

ICS 27. 140

P 59

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 266—2014

替代 SL 266—2001

水电站厂房设计规范

Design code for hydropower house

2014-04-21 发布

2014-07-21 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部
关于批准发布水利行业标准的公告
(水电站厂房设计规范)

2014 年第 23 号

中华人民共和国水利部批准《水电站厂房设计规范》
(SL 266—2014)为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水电站厂房设计规范	SL 266—2014	SL 266—2001	2014. 4. 21	2014. 7. 21

水利部

2014 年 4 月 22 日

前 言

根据水利部水利行业标准制修订计划，按照《水利技术标准编写规定》（SL 1—2002）的要求，对《水电站厂房设计规范》（SL 266—2001）进行修订。

本标准共分 10 章和 5 个附录，主要技术内容有：

- 电站等级与洪水标准；
- 地面厂房布置；
- 地面厂房整体稳定分析及地基处理；
- 地面厂房结构设计；
- 地下厂房；
- 其他型式厂房的布置及结构设计；
- 建筑设计；
- 安全监测设计。

本次修订的主要内容有：

- 增加了“术语”和引用标准名称；
- 增加厂房下游挡水部位安全加高的规定；
- 灯泡贯流式机组厂房和水斗式机组厂房单独成节，并补充了其布置及结构设计方面的内容；
- 按照《水工混凝土结构设计规范》（SL 191—2008）的要求修订了厂房结构设计内容、荷载及荷载效应组合表；
- 补充了金属蜗壳直接埋入型式及相关设计内容；
- 增加了水电站厂房抗震构造措施；
- 增加了厂房上部结构屋盖设计要求；
- 补充了地下厂房布置、围岩稳定分析方法、支护设计等内容；
- 增加了出线洞或出线竖井等布置内容；

- 增加了地下厂房岩壁式吊车梁设计内容；
- 增加了厂房振动监测和厂房振动控制的条款；
- 增加了尾水管分离式底板内力和锚筋计算附录；
- 补充了厂区建筑设计内容；
- 增加了各类厂房监测项目列表。

本标准中的强制性条文有：3.2.1条、5.3.5条1款、7.1.14条。以黑体字标示，必须严格执行。

本标准所替代标准的历次版本为：

- SD 335—89
- SL 266—2001

本标准批准部门：**中华人民共和国水利部**

本标准主持机构：**水利部水利水电规划设计总院**

本标准解释单位：**水利部水利水电规划设计总院**

本标准主编单位：**中水北方勘测设计研究有限责任公司**

本标准参编单位：**长江勘测规划设计研究有限责任公司**

本标准出版、发行单位：**中国水利水电出版社**

本标准主要起草人：**耿振云 王峰山 张秀崧 韩强**
周述达 杜申伟 翟兴无 余伦创
朱化广 任杰 马震岳 陶连银
卢波 王晓红 朱凤娟 何成连
于玉森 刘正军

本标准审查会议负责人：**刘志明**

本标准体例格式审查人：**牟广丞**

目 次

1	总则	1
2	术语	3
3	电站等级与洪水标准	5
3.1	电站等级	5
3.2	洪水标准和安全加高	5
4	地面厂房布置	7
4.1	厂区布置	7
4.2	厂房内部布置	9
5	地面厂房整体稳定分析及地基处理	14
5.1	一般规定	14
5.2	荷载及其组合	14
5.3	整体稳定及基础底面应力计算	20
5.4	地基设计及处理	24
6	地面厂房结构设计	26
6.1	一般规定	26
6.2	上部结构	27
6.3	风罩与机墩	32
6.4	下部结构	35
6.5	构造设计	40
7	地下厂房	45
7.1	地下厂房布置	45
7.2	地下厂房结构设计	49
8	其他型式厂房的布置及结构设计	56
8.1	灯泡贯流式机组厂房	56
8.2	水斗式机组厂房	57
8.3	坝内式厂房	59

8.4 溢流式厂房	59
9 建筑设计	61
9.1 厂区建筑规划	61
9.2 厂房建筑设计	61
10 安全监测设计	64
10.1 一般规定	64
10.2 监测项目	64
附录 A 厂房深层抗滑稳定计算	68
附录 B 圆筒式风罩内力计算	71
附录 C 机墩动力计算	81
附录 D 尾水管分离式底板内力和锚筋计算	85
附录 E 岩壁式吊车梁设计	87
标准用词说明	91
条文说明	93

1 总 则

1.0.1 为规范水电站厂房设计，保证设计质量，做到技术先进、安全可靠、经济合理、管理运行方便，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建、扩建或改建的1级、2级、3级水电站厂房设计。

1.0.3 厂区布置应与枢纽总体布置和环境相协调。

1.0.4 水电站厂房设计应吸取国内外工程实践经验，积极慎重采用新技术、新材料、新设备和新工艺。

1.0.5 本标准的引用标准主要有以下标准：

《建筑抗震设计规范》(GB 50011)

《动力机器基础设计规范》(GB 50040)

《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086)

《泵站设计规范》(GB 50265)

《水利水电工程设计防火规范》(SDJ 278)

《水工混凝土结构设计规范》(SL 191)

《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203)

《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL 211)

《水工预应力锚固设计规范》(SL 212)

《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252)

《溢洪道设计规范》(SL 253)

《水利水电工程进水口设计规范》(SL 285)

《混凝土重力坝设计规范》(SL 319)

《水利水电工程锚喷支护技术规范》(SL 377)

《水利工程边坡设计规范》(SL 386)

《水利水电工程机电设计技术规范》(SL 511)

《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077)

《水工混凝土施工规范》(DL/T 5144)

《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》(DL/T 5207)

《公路工程技术标准》(JTG B01)

1.0.6 水电站厂房设计除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 壅水厂房 water retaining power house

位于河床上或水库边起壅水作用，直接承受其上游水压力的水电站厂房，也称为河床式厂房。

2.0.2 主厂房 power house

装设水轮发电机组及其辅助设备，供发电运行及安装检修作业用的建筑物。

2.0.3 副厂房（辅助厂房） auxiliary power house

装设配电变电设备、控制操作设备、水机辅助设备、通信设备等以及为检修、试验、生活、管理等使用的房间。

2.0.4 主机间 machine hall

水电站厂房内布置水轮发电机组和各种辅助设备的场所。

2.0.5 安装间 erection bay

主厂房中供机组和其他机电设备组装、检修、装卸用的场所。

2.0.6 厂房上部结构 upper structure of power house

一般指主厂房发电机层地面以上结构。厂房上部结构包括屋盖系统、吊车梁、构架、各层板梁柱和围护结构等。

2.0.7 厂房下部结构 lower structure of power house

一般指主厂房发电机层地面以下结构。厂房的下部结构通常为钢筋混凝土结构。主要包括挡水墙、机墩、风罩、混凝土蜗壳、钢蜗壳外围混凝土、尾水管、基础底板，河床式厂房还包括进水口结构等。

对于灯泡贯流式厂房下部结构指流道结构顶面以下部分。灯泡贯流式厂房流道顶地面称为“运行层”。

2.0.8 发电机风罩 ventilation barrel

围护在立轴水轮发电机定子外壳周围，形成冷却通风道的筒

形结构物。一般为圆筒，也有水电站为施工方便做成多边形。

2.0.9 机墩 generator pier

支承水轮发电机组传来的荷载并将其传给厂房下部块体的结构物（有圆筒式、框架式、环梁立柱式、块基式、墙板式等型式）。

2.0.10 蜗壳 spiral case

连接进水流道与座环，将水流从圆周方向均匀导入座环，外形像蜗牛壳的过水流道。水头较高时采用圆形断面金属蜗壳，水头较低时常采用混凝土蜗壳。

2.0.11 尾水管 draft tube

紧接反击式水轮机转轮出口的管状导水部件。引导从水轮机转轮流出的水流与下游尾水相连接，并能回收从转轮流出水流的一部分动能。

2.0.12 尾水渠 tail water canal

从尾水管出口通往下游河道的明渠。

2.0.13 尾水位 tail water level

水电站尾水出口断面的水面高程。

2.0.14 正常尾水位 normal tail water level

水电站全部机组通过额定流量时相应的尾水位。

2.0.15 检修尾水位 overhaul tail water level

根据机组检修要求确定的尾水位。

2.0.16 设计尾水位 design tail water level

下泄厂房设计标准的洪水时相应的尾水位。

2.0.17 校核尾水位 check tail water level

下泄厂房校核标准的洪水时相应的尾水位。

2.0.18 最低尾水位 minimum tail water level

水电站通过最小发电流量时相应的尾水位。

2.0.19 岩锚式吊车梁 rock-bolted crane girder

为减小地下厂房洞室开挖跨度，地下厂房在开挖的岩壁上设置的无柱吊车梁。分为岩壁式吊车梁和岩台式吊车梁。

3 电站等级与洪水标准

3.1 电站等级

3.1.1 水电站工程等级应根据其工程规模、装机容量、效益和在国民经济中的重要性按 SL 252 的规定确定。

3.1.2 壅水厂房的建筑物级别应与枢纽中挡水建筑物级别一致；其他非壅水厂房的建筑物级别按电站装机容量确定。

3.1.3 坝后式厂房与壅水建筑物联合作用时，其级别应与壅水建筑物级别一致。

3.2 洪水标准和安全加高

3.2.1 水电站厂房（包括厂区建筑物）应按其工程等级及挡水条件采取下列相应的洪水标准：

1 壅水厂房兼作为枢纽挡水建筑物，其防洪标准应与该枢纽工程挡水建筑物的防洪标准相一致。

2 非壅水厂房的防洪标准应按表 3.2.1 的规定确定。

表 3.2.1 非壅水厂房的洪水标准

建筑物级别	洪水重现期 (a)	
	设计洪水	校核洪水
1	200	1000
2	200~100	500
3	100~50	200

3.2.2 水电站厂房的副厂房、主变压器场地、开关站和进厂交通等的防洪标准可按表 3.2.1 确定。

3.2.3 对受淹时间短、经济损失不大的水电站，经论证，其防洪标准可适当降低。

3.2.4 壅水厂房上游挡水部位的安全加高与枢纽工程壅水建筑

物一致；厂房下游挡水部位顶部安全加高不应小于表 3.2.4 的规定。

表 3.2.4 厂房下游挡水部位顶部安全加高的下限值

运用情况	建筑物级别		
	1	2	3
设计 (m)	0.7	0.5	0.4
校核 (m)	0.5	0.4	0.3

4 地面厂房布置

4.1 厂区布置

4.1.1 厂区布置应根据地形、地质、环境条件，结合整个枢纽的工程布局，与城乡建设规划相协调，按下列原则进行：

1 合理布置主厂房、副厂房、主变压器场地、开关站、高低压引出线、进厂交通、发电引水及尾水建筑物等，使水电站运行安全、管理和维护方便。

2 妥善解决厂房和泄洪、排沙、通航、鱼道等建筑物布置及运用的相互协调，避免干扰，保证水电站安全和正常运行。

3 综合考虑厂区防洪、排水、消防等安全措施及检修的必要条件。

4 少征或不征用耕地，保护天然植被，保护环境，保护文物。

5 做好厂区建筑环境总体规划及主要建筑物的建筑艺术处理。

6 统筹安排运行管理所必需的生产辅助设施。

7 综合考虑施工程序、施工导流及首批机组发电投运的工期要求，优化各建筑物的布置。

4.1.2 厂房位置宜避开冲沟口和崩塌体，对可能发生的山洪淤积、泥石流或崩塌体等应采取相应的防御措施。

4.1.3 厂房边坡设计应符合 SL 386 的规定。厂房位于高陡坡下时，应设有安全防护措施及排水设施。

4.1.4 当压力管道采用明敷方式时，宜将厂房布置在免受事故水流直接冲击的方向；当不可避免时，应采取有效保护措施。

4.1.5 副厂房的位置应与主变压器场地、主厂房的位置及环境要求相协调，经综合比较确定。同时应结合运行、管理方便的要求，合理利用有效空间，对外交通方便。

4.1.6 主变压器及开关站位置应结合安装检修、运输、消防通道、进线出线、防火防爆等要求按下列原则确定：

1 主变压器位置宜靠近主厂房，并宜与安装间高程相同。主变压器场地的防火防爆及通风散热等应符合有关规范规定。

2 开关站宜靠近主变压器。应选择地基及边坡稳定地段或利用其他合适的场地进行布置，其进出线应避免跨越泄流建筑物的水跃区、射流区。开关站位置宜避开冲沟口，不能避开时，应对山洪、泥石流和崩塌体等采取防御措施。

3 出线场宜布置在开关站附近，户内式开关站可将出线场布置在厂房顶部。

4.1.7 河床式水电站厂房的进水部分布置应结合枢纽布置情况妥善解决泥沙、漂浮物和冰凌等对发电的影响，其设计应符合 SL 285 的规定。

4.1.8 厂房与泄水建筑物相邻时，在厂房与泄水建筑物之间应设置足够长的导墙，必要时，应通过水工模型试验验证。

4.1.9 坝后式厂房宜在厂、坝之间设永久变形缝；必要时，可采用厂坝整体连接的形式。厂坝之间的空间可布置副厂房、主变压器场、开关站等建筑物。

4.1.10 尾水渠应根据水电站具体情况按下列原则布置：

1 考虑机组运行条件、地形地质、河道流向、泄洪、排沙及其他建筑物影响进行布置。对可能发生淘刷或淤积部位应加强防护措施。

2 应考虑枢纽泄水、下游梯级回水和河床采砂等引起河床变化所造成的影响。

4.1.11 厂区防洪及排水系统应按下列要求设计：

1 应保证主、副厂房和主变压器场地及开关站在设防水位条件下不受淹没。

2 厂区的排水量、管沟布置、排水方式及排水设施，应根据水电站厂房的重要性、本地区气候特征、设计暴雨强度、降雨历时、暴雨设计重现期、汇水地区性质、地形特点及其他可能的

集水量综合考虑确定。设计降雨重现期可取 3~5a，设计降雨历时为 5~15min。

3 应采取可靠措施防止洪水倒灌。

4 对泄洪、降水或雾化对厂区造成的不利影响，应采取相应的防护措施。

5 对可能导致水淹厂房的孔洞、管沟、通道、预留缺口等应采取必要的封堵和引排措施。

6 应进行各建筑物边坡地表水和地下水的排水设计。

4.1.12 厂区内交通应按下列原则布置：

1 应根据近期和远景规模，全面规划，统筹安排，并应满足机电设备重件、大件的运输及装卸方便的要求。

2 主要交通在设计洪水标准条件下应保证畅通；在校核洪水标准条件下，应保证进出厂人行交通不被阻断；穿过泄水雾化区地段宜采取适当保护措施。

3 进厂公路厂前应设有平直段。

4 进厂公路的设计可按国家相应标准进行，公路纵坡宜小于 8%，受地形条件限制的布置困难地段最大纵坡宜小于 12%。

5 高尾水位厂房，经论证，允许进出厂房主要交通采用垂直运输方式。

6 根据需要，厂前区可设置回车场。

4.1.13 进厂公路宜从下游侧引入厂房。当因地形、地质和枢纽布置条件限制进厂公路必须由厂房端部平行于厂房轴线方向进厂时，应设置警戒标志或阻进器。

4.1.14 扩建和改建水电站厂房，应与既有建筑物及设施协调一致并对既有建筑物采取安全保护措施，施工期不影响或少影响发电。

4.2 厂房内部布置

4.2.1 厂房内部布置应根据水电站规模、厂房型式、环境特点、土建设计和机电设备布置、运行维护和安装、检修等情况，合理

确定和分配各部位的尺寸及空间。

4.2.2 主厂房主机间的控制尺寸应按下列原则确定：

1 主机间的长度和宽度应综合考虑机组台数、水轮机过流部件、发电机及风道尺寸、起重机吊运方式、进水阀及调速器位置、厂房结构要求、运行维护和厂内交通等因素确定。

2 水轮机过流部件及机组支撑方式应按机组结构并结合水工结构要求选择。

3 机组段长度由水轮机蜗壳尺寸控制时，对金属蜗壳，机组段长度应满足蜗壳安装所需要的空间要求，最小空间尺寸不宜小于0.8m；如采用充水加压浇筑混凝土，还应考虑安装及拆卸闷头和充水加压装置所需的空間；对混凝土蜗壳以及与混凝土联合受力的金属蜗壳，其混凝土侧墙厚度由强度、刚度及构造需要确定。

4 机组段长度由发电机及其风道尺寸控制时，机组间距除满足设备布置要求外，还应保留必要宽度的通道。

5 坝后式厂房机组段长度宜与坝体分缝相协调。对隧洞引水式厂房，还应与压力管道之间的岩体厚度相适应。

6 当机组段设有泄水、排沙孔时，应同时满足各孔口的结构强度、构造及施工要求。

7 主机间的长度和宽度，应满足起重机吊钩在有效工作范围内吊运机组主要部件、水轮机进水阀等设备以及厂内交通和结构尺寸要求。

8 主厂房水下、水上部分的结构尺寸宜相互协调，统一考虑。

4.2.3 主厂房安装间布置和尺寸应按下列要求确定：

1 安装间面积应根据厂房型式、机组结构、安装进度以及一台机组扩大性检修等因素综合确定，并应符合SL 511的规定。

2 缺乏资料时，安装间长度可取1.25~1.5倍机组段长度；多机组水电站，安装间面积可根据需要增大或加设副安装间。

3 安装间地面高程宜与发电机层地面高程相同；如下游洪

水尾水位高于发电机层地面高程，可抬高安装间高程或设置高于发电机层的卸货平台。

4 安装间布置应根据装机台数，满足设备运输、安装及检修或车辆进厂装卸的需要。安装间可布置于主厂房的一端、两端或中间段。

5 安装间布置应与主要设备的进厂运输方式协调。

4.2.4 主厂房起重机布置及轨顶高程确定应符合下列要求：

1 应满足机组主要部件吊装的要求。厂内设有进水阀时，宜将其中心线布置在起重机吊钩工作范围以内。

2 起重机轨顶高程应根据起重机规格、机组或主变压器的安装及检修时吊装要求确定，并应满足进厂运输车辆的货物装卸要求。

3 起重机顶与厂房吊顶（或屋架下弦、灯具底）的净距不应小于 300mm。

4 在厂房顶部适当部位应有可供拆装起重机的减速器盖、卷筒、电动机等部件的必要空间。

5 起重机端边至上下游墙的距离除满足大车行走外，应在适当部位留有 大车行走机构的安装及检修需要的净空和人员行走让车位置。

6 吊车梁顶面宽度（包括走道板）应满足运行人员通行要求，并应设有供司机和检修人员上、下起重机的扶梯。

7 吊装中的部件距已安装的设备、结构及地面的安全距离应符合 SL 511 的规定。

4.2.5 厂内交通应符合下列规定：

1 厂内交通应满足方便管理、利于检修、处理故障迅速的要求。

2 主要通道尺寸及楼梯宽度、坡度、安全出口设置等应符合 SDJ 278 和 SL 511 的规定。

3 发电机层及水轮机层宜设有贯穿全厂的直线水平通道。

4 发电机层、母线层、水轮机层等主要楼层每 1~2 个机组

段宜设置 1 个楼梯，全厂不宜少于 2 个楼梯。

5 在起重机吊钩工作范围内的主厂房和有机电设备吊运要求的副厂房，宜设置供安装检修的吊物孔。

4.2.6 水轮机机坑的布置及尺寸应满足机组安装及维修的需要；机组支撑结构和蜗壳、座环支撑结构应具有足够的强度和刚度。

4.2.7 主厂房内各层高程应符合下列要求：

1 应满足机组及附属设备布置、安装检修、运行维护、结构尺寸和建筑空间要求。

2 水轮机安装高程应根据 SL 511 确定。

3 水轮机层地面高程应根据蜗壳进口断面尺寸及蜗壳顶部最小混凝土结构厚度确定。

4 发电机层地面高程除应满足发电机层布置要求外，尚应考虑水轮机层设备布置及母线电缆的敷设和下游水位影响。

5 如主厂房空间允许，可在发电机层下增设母线层，其净空应满足发电机主引出线、电缆敷设、运行维护和消防等要求。

6 屋顶高程应根据屋盖形式和结构尺寸确定，并应满足起重机部件安装与检修、厂房吊顶、照明设施布置和保温等要求。

4.2.8 尾水平台布置应符合下列要求：

1 尾水平台宽度应满足尾水闸门及启闭设备布置、闸门吊运、交通、下游防洪设施和消防等对结构尺寸的要求。

2 尾水平台长度可根据启闭设备运行、闸门检修要求确定。

3 尾水管较长的厂房可利用尾水平台布置主变压器、开关站或副厂房，若为此需增加尾水管长度，应经技术经济论证。

4.2.9 中央控制室布置应按下列原则确定：

1 应方便运行、维修管理，便于分期过渡和节省电缆。应避免振动、噪声和工频磁场等干扰的影响。

2 宜与发电机层同一高程或略高。当中央控制室高于发电机层时，两者之间的交通应方便。

3 中央控制室设于远方集控中心时，可在副厂房内设置过渡值班室。

4 中央控制室的布置应为值班人员提供良好舒适的工作环境，室内色彩协调，有良好的照明、采暖通风和空气调节设备及防噪声设施，应充分利用自然采光和通风。

5 中央控制室的面积宜根据工程规模、装机台数、进出线数量、电气主接线等控制方式确定。当室内布置有控制台、模拟屏（大屏幕）时，宜为 $100\sim 150\text{m}^2$ ，净高宜为 $3.5\sim 4.0\text{m}$ ，并使宽高比例适宜。

6 布置上宜采取值班、参观互不影响的隔离措施。

7 中央控制室下的电缆夹层应根据需要设置。

4.2.10 副厂房的面积和内部各房间应根据机电设备布置、维修、试验和管理自动化水平，结合下列条件综合确定：

1 副厂房的布置应根据工程总体规划并结合枢纽布置条件确定，可设在主厂房的上下游侧或端部。

2 副厂房内机械、电气设备宜按系统分区布置，应使相关设备联系紧密、布置合理，检修、运行、维护和试验方便。

3 各房间的布置应满足各功能的协调要求，避免机组主引出线、电缆和通风管路等相互干扰。

4 当副厂房内面积受限时，可将试验、检修、辅助生产用房移至厂外。

5 地面厂房整体稳定分析及地基处理

5.1 一般规定

5.1.1 地面厂房整体稳定分析应根据地基情况、结构特点及施工条件进行。具体可包括下列内容：

1 厂房沿建基面的抗滑稳定计算。当厂房地基内部存在不利于厂房整体稳定的软弱结构面时，应进行厂房沿软弱结构面的深层抗滑稳定计算。对于非岩基上的厂房应校核齿墙基底土层抗滑稳定。

2 厂房基础面法向应力计算。

3 厂房抗浮稳定验算。

4 非岩基上厂房尚应进行地基承载力、变形、沉降计算。

5.1.2 厂房整体稳定及地基应力宜采用下列方法计算：

1 材料力学法。

2 位于复杂地基上的大型水电站厂房，除用材料力学法计算外，可采用有限元法或其他合适的方法进行复核计算。

5.1.3 厂房整体稳定及地基应力计算，应分别以中间机组段、边机组段及安装间段作为独立的单元，按结构特点和荷载组合情况分别进行。对于有侧向水压力作用的边机组段及安装间段，还应核算双向水压力作用下的整体稳定性及地基应力。

5.1.4 坝后式厂房采取厂坝整体连接时，应考虑厂坝联合作用。

5.2 荷载及其组合

5.2.1 作用在水电站厂房上的基本荷载和特殊荷载应按下列规定分类：

1 基本荷载应包括下列内容：

1) 厂房结构及其永久设备自重。

2) 回填土石重。

- 3) 正常蓄水位或设计洪水位情况下的静水压力。
- 4) 正常蓄水位或设计洪水位情况下的扬压力。
- 5) 正常蓄水位或设计洪水位情况下的浪压力。
- 6) 淤沙压力。
- 7) 土压力。
- 8) 冰压力。
- 9) 其他出现机会较多的荷载。

2 特殊荷载应包括下列内容：

- 1) 校核洪水位或检修水位情况下的静水压力。
- 2) 校核洪水位或检修水位情况下的扬压力。
- 3) 校核洪水位或检修水位情况下的浪压力。
- 4) 地震力。
- 5) 其他出现机会较少的荷载。

5.2.2 厂房各部分结构自重应按其几何尺寸及材料容重计算确定。

5.2.3 厂房内机电设备重量应计算固定的主要设备，可不考虑附属设备及非固定设备重量。

5.2.4 作用在厂房上的静水压力应根据厂房在不同运行工况下的上、下游水位计算确定。静水压力应包括压力钢管内水压力。对于多泥沙河流应考虑含沙量对水容重的影响。

5.2.5 作用在岩基上厂房的扬压力，应按下列原则进行计算：

1 按垂直作用于计算截面全部截面积上的分布力计算。扬压力分布图应根据厂房上、下游计算水位，地基、地质条件及防渗、排水措施等情况确定。

2 河床式厂房基底面的扬压力分布图可按下列三种情况分别确定：

- 1) 当厂房上游设有防渗帷幕和排水孔时，扬压力分布图如图 5.2.5-1a) 所示，渗透压力强度系数 α 取 0.25。
- 2) 当厂房上游不设防渗帷幕和排水孔时，厂房底面上游处扬压力作用水头为 H_1 ，下游处为 H_2 ，其间以直线连接，如图 5.2.5-1b) 所示。

- 3) 当厂房上游设有防渗帷幕和排水孔，并且在下游侧设有排水孔及抽排系统时，其扬压力分布图如图 5.2.5-1c) 所示， α_1 取 0.2， α_2 取 0.5。

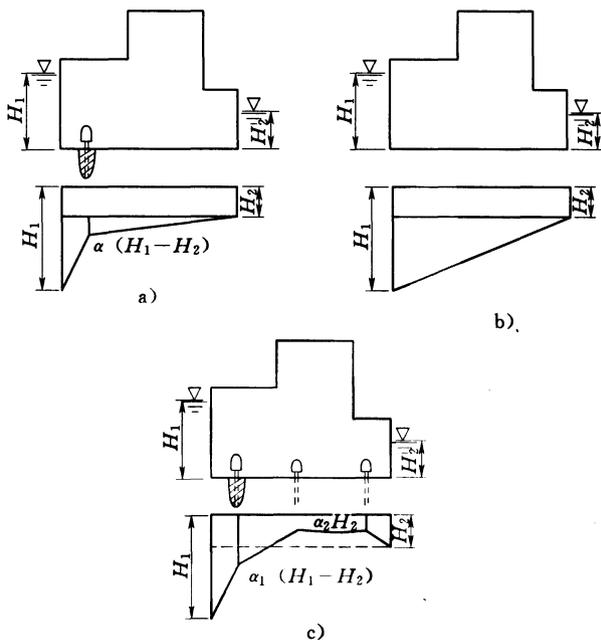


图 5.2.5-1 河床式厂房扬压力分布图

3 坝后式厂房当厂坝整体连接或厂坝间设有永久变形缝并已用止水封闭时，其扬压力分布图应与坝体共同考虑并符合下列要求：

- 1) 实体重力坝坝后式厂房，当上游坝基设有防渗帷幕和排水孔，下游坝基无抽排设施时，扬压力分布图如图 5.2.5-2a) 所示， ΔH 由帷幕、排水孔位置及 α 值计算确定。
- 2) 宽缝坝、空腹坝坝后式厂房 $\Delta H=0$ ，如图 5.2.5-2b) 所示。

4 岸边式厂房上游侧扬压力应根据尾水水位和地下水位综合分析确定。当设有帷幕和排水设施时可予以折减。

5 当洪峰历时较短，下游洪水位较高时，经论证，厂房的扬压力分布图可考虑时间效应予以折减。

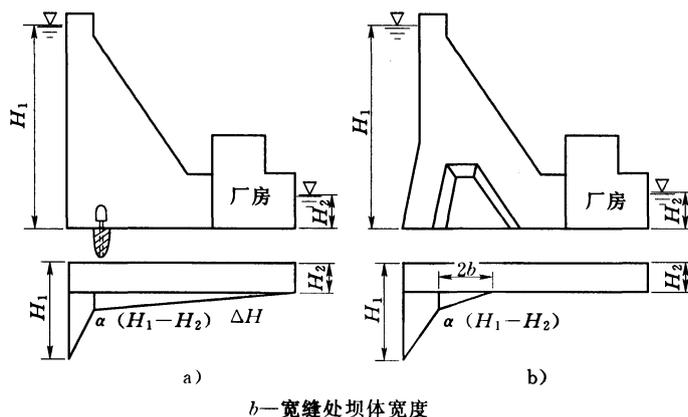


图 5.2.5-2 坝后式厂房扬压力分布图

5.2.6 非岩基上厂房扬压力分布图应根据厂房建筑物地下轮廓设计具体情况，以及地基的渗透特性，通过计算或模拟试验研究确定。

5.2.7 作用于厂房单位长度上水平主动土压力可按式 (5.2.7) 计算：

$$F_{ak} = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5.2.7)$$

式中 F_{ak} ——水平主动土压力标准值，kN/m；

γ ——填土容重，kN/m³；

H ——填土高度，m；

φ ——填土内摩擦角，(°)。

5.2.8 作用于厂房单位长度上水平淤沙压力可按式 (5.2.8) 计算：

$$P_{sk} = \frac{1}{2} \gamma_{sb} h_s^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2} \right) \quad (5.2.8)$$

式中 P_{sk} ——水平淤沙压力标准值，kN/m；

γ_{sb} ——淤沙浮容重，kN/m³；

h_s ——厂房前泥沙淤积高度，m；

φ_s ——淤沙的内摩擦角，(°)。

5.2.9 作用在厂房上的冰压力可按 SL 211 中的相关规定计算。
作用在厂房上的浪压力可按 SL 319 的规定计算。

5.2.10 厂房建筑物抗震计算可只考虑水平向地震作用。1 级壅水厂房应按动力法进行抗震计算，其余各级厂房可采用拟静力法计算并符合下列规定：

1 当采用拟静力法计算地震作用时，沿厂房高度作用于质点 i 的水平向地震惯性力代表值应按式 (5.2.10) 计算：

$$F_i = 0.25a_h\alpha_i G_{Ei}/g \quad (5.2.10)$$

- 式中 F_i ——作用在质点 i 的水平向地震惯性力代表值，kN；
 a_h ——水平向设计地震加速度， m/s^2 ，按表 5.2.10-1 取值，或根据专门的地震危险性分析提供的基岩峰值加速度成果确定；
 α_i ——质点 i 的动态分布系数，按表 5.2.10-2 取值；
 G_{Ei} ——集中在质点 i 的重力作用标准值，kN。

表 5.2.10-1 水平向设计地震加速度代表值 a_h

设计烈度	7	8	9
a_h	0.1g ~ 0.15g	0.2g ~ 0.3g	0.4g

注：g 为重力加速度， m/s^2 。

表 5.2.10-2 厂房水平地震动加速度动态分布系数 α_i

厂 房	河床式	坝后式、岸边式
水平向 (顺河流向)		
注：H 为厂房总高度； H_1 为厂房下部结构高度； H_2 为厂房上部结构高度。		

表 5.2.11 荷载组合

荷载组合	计算情况	上、下游水位		荷载类别										备注				
		上游水位	下游(尾)水位	结构自重	永久设备重	水重	回填土石重	静水压力	扬压力	浪压力	泥沙压力	土压力	冰压力		地震作用			
基本组合	正常运行	a ₁	正常蓄水位	最低水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	
		a ₂	设计洪水位	下游相应水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	
	机组检修	b ₁	上游水位	最低水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	
		b ₂	正常蓄水位	检修水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	
	特殊组合 I	施工期(机组未安装)	a	正常蓄水位或正常运用洪水位或施工期度汛洪水位	下游相应水位或最不利水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	(1) 水重应根据实际情况确定; (2) 坝后式下游度汛水位
			b	—	设计洪水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—
完建		a	无水	无水	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
		b	无水	无水	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
特殊组合 II		非常运行	a	校核洪水位	下游相应水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
			b	—	校核洪水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
地震	地震	a	正常蓄水位	最低水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
		b	—	正常水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

注 1: 表中 a 适用于河床式厂房, b 适用于坝后式及岸边式厂房。
 注 2: 机组检修情况、施工期情况和地震情况如按冬季计及冰压力, 则不计浪压力。
 注 3: 厂房基础设有排水孔时, 若考虑排水失效情况, 可作为特殊组合 I。
 注 4: 土压力应根据厂房外是否有土石回填而定, 一般河床式厂房上、下游侧设有填土。
 注 5: 浪压力与冰压力不同时存在, 可根据实际情况采用。
 注 6: 表中下游相应水位是指上游发生洪水时, 下游可能出现的不利的对厂房最不利的水位(包括枢纽泄洪或不泄洪情况)。

2 地震动水压力及地震动土压力的计算应参照 SL 203 中的相关公式进行计算。

5.2.11 厂房整体稳定分析的荷载组合可按表 5.2.11 的规定采用，必要时还应考虑其他可能的不利组合。

5.3 整体稳定及基础底面应力计算

5.3.1 岩基上厂房整体抗滑稳定可按抗剪断强度公式 (5.3.1-1) 或抗剪强度公式 (5.3.1-2) 进行计算：

1 抗剪断强度按式 (5.3.1-1) 计算：

$$\text{岩基} \quad K' = \frac{f' \sum W + c' A}{\sum P} \quad (5.3.1-1)$$

式中 K' ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；

f' 、 c' ——岩基上厂房基础底面与地基间的抗剪断摩擦系数及凝聚力，kPa；

A ——滑动面受压部分的计算截面积， m^2 ；

$\sum W$ ——全部荷载对滑动面的法向分力值（包括扬压力），kN；

$\sum P$ ——全部荷载对滑动面的切向分力值（包括扬压力），kN。

2 抗剪强度按式 (5.3.1-2) 计算：

$$\text{岩基或非岩基} \quad K = \frac{f \sum W}{\sum P} \quad (5.3.1-2)$$

式中 K ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；

f ——滑动面的抗剪摩擦系数。

3 f' 、 c' 及 f 的取值应根据相关勘察试验资料，经工程类比，按有关规范分析研究确定。

5.3.2 对于河床式厂房及与坝体有联合作用的坝后式厂房，其计算公式选择及安全系数宜与枢纽中拦河坝（闸）一致。

5.3.3 厂房地基内部存在不利于厂房整体稳定的软弱结构面时，应按下列规定进行深层抗滑稳定计算：

1 对于岩基上的厂房，可采用刚体极限平衡法，沿软弱结构面进行稳定计算，计算方法见附录 A。

2 对于非岩基上的厂房，可采用沿软弱层面的滑弧法、混合滑动法或专门论证的其他方法进行计算。

3 必要时，可采用有限元法进行复核计算。

5.3.4 厂房整体抗滑稳定和深层抗滑稳定安全系数不应小于表 5.3.4 规定的数值。

表 5.3.4 抗滑稳定最小安全系数

地基类别	荷载组合	厂房建筑物级别			适用公式
		1	2	3	
非岩基	基本组合	1.35	1.30	1.25	式 (5.3.1-2)
	特殊组合 I	1.20	1.15	1.10	
	特殊组合 II	1.10	1.05	1.05	
岩基	基本组合	1.10			式 (5.3.1-2)
	特殊组合 I	1.05			
	特殊组合 II	1.00			
	基本组合	3.00			式 (5.3.1-1) 或附录 A
	特殊组合 I	2.50			
	特殊组合 II	2.30			
注：特殊组合 I 适用于机组检修、施工期、完建及非常运行情况，特殊组合 II 适用于地震情况。					

5.3.5 厂房抗浮稳定应符合下列规定：

- 1 任何情况下，抗浮稳定安全系数不应小于 1.1。
- 2 抗浮稳定安全系数按式 (5.3.5) 计算：

$$K_f = \frac{\sum W}{U} \quad (5.3.5)$$

式中 K_f ——抗浮稳定安全系数；

$\sum W$ ——机组段（或安装间段）的全部重量（力），kN；

U ——作用于机组段（或安装间段）的扬压力总和，kN。

5.3.6 厂房基底面上的法向应力可按式 (5.3.6) 进行计算:

$$\sigma = \frac{\sum W}{A} \pm \frac{\sum M_x y}{J_x} \pm \frac{\sum M_y x}{J_y} \quad (5.3.6)$$

式中 σ ——厂房基底面上的法向正应力, kPa;

$\sum W$ ——作用于机组段 (或安装间段) 上全部荷载 (包括或不包括扬压力) 在计算截面上法向分力的总和, kN;

A ——厂房地基计算截面受压部分的面积, m^2 ; 当尾水管底板为分离式或厚度较薄, 不能将荷载有效传递到其下地基时, 则此部分底板不应计入计算截面;

$\sum M_x$ 、 $\sum M_y$ ——作用于机组段 (或安装间段) 上全部荷载 (包括或不包括扬压力) 对计算截面形心轴 X 、 Y 的力矩总和, $kN \cdot m$;

x 、 y ——计算截面上计算点至形心轴 X 、 Y 的距离, m ;

J_x 、 J_y ——计算截面对形心轴 X 、 Y 的惯性矩, m^4 。

5.3.7 岩基上厂房基底面的法向应力采用材料力学法计算时, 应符合下列要求:

1 厂房基底面的最大压应力不应超过地基允许承载力。在 地震情况下地基持力层允许承载力可适当提高。

2 厂房基底面的最小法向应力 (计入扬压力) 应满足下列规定:

- 1) 河床式厂房除地震情况外都不应出现拉应力, 地震情况允许出现不大于 0.1MPa 的拉应力。
- 2) 坝后式及岸边式厂房, 正常运行情况不应出现拉应力; 特殊组合 I 允许出现不大于 0.1MPa 的局部拉应力; 特殊组合 II 如出现大于 0.2MPa 的拉应力, 应进行专门论证。

5.3.8 非岩基上厂房地基允许承载力可按 GB 50265 的有关 规定计算确定。对软基上的重要厂房应根据实际情况经综合分析后

确定。

5.3.9 非岩基上厂房基础底面平均基底应力不应大于地基允许承载力；基底最大应力不应大于 1.2 倍地基允许承载力。

5.3.10 非岩基上厂房基础底面法向应力不均匀系数的允许值可按表 5.3.10 采用。

表 5.3.10 不均匀系数的允许值

地基土质	荷载组合	
	基本组合	特殊组合
松软	1.5	2.0
中等坚实	2.0	2.5
坚实	2.5	3.0

注 1：对于重要的大型厂房，不均匀系数的允许值宜按表列值适当减小。
注 2：对于地震情况不均匀系数的允许值可适当增大。

5.3.11 非岩基上厂房地基最终沉降量可按式 (5.3.11) 计算：

$$S_{\infty} = m \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \quad (5.3.11)$$

式中 S_{∞} ——地基最终沉降量，mm；

m ——地基沉降量修正系数，可采用 1.0~1.6（坚实地基取小值，软土地基取大值）；

i ——土层号；

n ——地基压缩层计算深度范围内的土层数；

e_{1i} 、 e_{2i} ——厂房基础底面以下第 i 层土在平均自重应力作用下的孔隙比和在平均自重应力、平均附加应力共同作用下的孔隙比；

h_i ——第 i 层土的厚度，mm。

5.3.12 地基压缩层的计算深度应按计算层面处附加应力和自重应力之比等于 0.1~0.2（坚实地基取大值，软土地基取小值）的条件确定。

5.3.13 非岩基上厂房地基允许最大沉降量和沉降差应以保证厂

房结构安全和设备正常运行原则，其值应根据工程具体情况确定。

5.4 地基设计及处理

5.4.1 厂房地基经处理后应符合下列要求：

- 1 具有足够的强度，满足承载力的要求。
- 2 满足厂房抗滑稳定和变形控制要求。
- 3 满足防渗和渗透稳定性的要求。
- 4 满足耐久性要求。

5.4.2 厂房地基的具体开挖深度和基坑形状，应根据厂房布置和结构要求以及地形、地质条件，并结合地基的处理措施确定。对地基开挖方式应提出设计要求。对易风化、泥化的岩基应提出相应的保护措施，必要时预留保护层。

5.4.3 厂房地基防渗、排水设计应符合下列规定：

1 河床式厂房地基防渗、排水设计可按 SL 319 的规定进行。

2 坝后式及岸边式厂房的防渗、排水设计可适当简化，但应与岸坡衔接。

3 下游尾水位较高的厂房，宜在下游侧周边设置防渗帷幕或采用抽排水等降低扬压力的措施。

4 非岩基上厂房地基及两岸的渗流平均坡降和出逸坡降，应小于地基允许渗流坡降值。在渗流逸出段宜设置反滤层及盖重。

5 重要的厂房防渗、排水设施应具备检修条件。

5.4.4 地质条件不良的厂房地基加固措施应通过技术经济比较确定，并应符合下列要求：

1 厂房岩基裂隙发育的地段可采用固结灌浆。

2 厂房岩基存在断层、挤压破碎带或深槽等不良地质条件时，可采取混凝土置换等处理措施，必要时，可进行灌浆处理。

3 厂房岩基存在软弱结构面、不利于厂房稳定的岩层产状

时，应按抗滑要求进行专门设计，采取相应的工程处理措施。

4 对地基中可能发生液化的土层可采取换填、桩基、振冲法或强力夯实法、围封等措施进行处理。

5.4.5 非岩基上厂房基础轮廓尺寸以及地基处理方案应综合考虑地基性质、厂房结构特点、两岸连接方式、施工条件以及运行要求等因素，经技术经济比较确定。

5.4.6 水电站厂房不宜建造在半岩半土地基上；否则，应采取可靠工程措施。

6 地面厂房结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 地面厂房结构应采用极限状态设计法，在规定的材料强度和荷载取值条件下，采用在多系数分析基础上以安全系数表达的方式进行设计。厂房结构设计应符合 SL 191 和 DL 5077 的有关规定。

6.1.2 厂房结构设计应根据承载能力极限状态及正常使用极限状态的要求，分别按下列规定进行计算和验算：

1 厂房所有结构构件均应进行承载能力计算。对需要抗震设防的结构，尚应进行结构的抗震承载能力计算。

2 对使用上需要控制变形的结构构件，如吊车梁、厂房构架等，应进行变形验算。

3 对承受水压力的下部结构构件，如钢筋混凝土蜗壳、闸墩、胸墙及挡水墙等，应进行抗裂或裂缝宽度验算。对使用上需要限制裂缝宽度的上部结构构件，应进行裂缝宽度验算。

4 对大型工程和特殊工程，宜进行共振复核、振幅验算、刚度复核和抗振设计。

6.1.3 对直接承受动荷载作用的结构在进行静力计算时应考虑动力系数，其数值可按表 6.1.3 确定。其动力作用只考虑传至直接承受动力荷载的结构，其他部分计算时可不考虑。

表 6.1.3 动力系数表

序号	动荷载种类	动力系数	备 注
1	吊车竖向轮压、门机轮压	1.05	
2	机动车辆轮压	1.20	包括汽车、拖车轮压
3	搬运、装卸重物	1.10~1.20	
4	电动机、通风机	1.20~1.50	
5	水轮发电机垂直、水平动荷载	1.50~2.00	圆筒式机墩取小值，环形梁柱式、构架式机墩取大值

6.1.4 厂房各部位混凝土除应满足强度要求外，还应根据所处环境条件、使用条件、地区气候等具体情况分别提出抗渗、抗冻、抗侵蚀、抗冲磨等耐久性要求。混凝土强度等级可按表 6.1.4 的规定采用；其他耐久性等级按 SL 191、SL 211 中的有关规定确定。

表 6.1.4 厂房结构各部位混凝土强度等级表

序号	结构部位	强度等级 (28d 龄期)	备 注
1	基础混凝土	$\geq C20$	
2	尾水管、蜗壳、机墩、风罩、尾水闸墩、水下墙等	$\geq C25$	
3	水位变动区混凝土结构等	$\geq C25$	
	上部结构梁、板、柱	$\geq C25$	
4	桥面梁、预制钢筋混凝土吊车梁、屋架等	$\geq C30$	采用 HRB400 级和 RRB400 级钢筋时不低于 C35
5	预应力钢筋混凝土构件	$\geq C35$	当采用高强钢丝、热处理钢筋作为预应力钢筋时，混凝土强度等级不宜低于 C40

6.1.5 厂房结构的一般构件可只做静力计算；对直接承受振动荷载的构件如发电机支承结构，宜做整体动力分析或单体动力计算。宜按结构力学法计算，对于整体或复杂结构，除用结构力学法计算外，宜采用有限元法进行计算分析，必要时可采用结构模型试验验证。动力分析宜采用拟静力法，大型工程或复杂结构，尚宜采用动力法复核。

6.2 上部结构

6.2.1 厂房屋盖系统、吊车梁、构架、各层板梁柱和围护结构等上部结构可根据工程具体情况，简化为平面问题计算，必要

时，也可按空间结构体系进行计算。

6.2.2 设计楼面（平台）的主梁、墙、柱和基础时，应对楼面的活荷载标准值乘以 0.80～0.85 的折减系数。

6.2.3 吊车梁所承受的荷载应包括梁自重、钢轨及其附件重、吊车竖向轮压和横向及纵向水平制动力。钢轨及其附件重标准值应根据厂家资料确定，初步计算时可取 1.5～2.0kN/m。吊车竖向轮压和横向及纵向水平制动力标准值应采用按制造厂提出的可能发生的最大值。当无制造厂资料时可按 DL 5077 的规定确定。

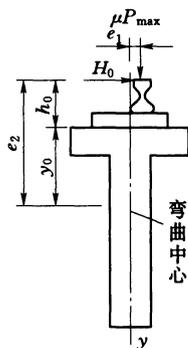


图 6.2.4 扭矩计算简图

6.2.4 作用于吊车梁上的扭矩标准值计算简图如图 6.2.4 所示，可按式 (6.2.4) 计算：

$$T = \beta(\mu P_{\max} e_1 + H_0 e_2) \quad (6.2.4)$$

式中 T ——一个轮子产生的扭矩标准值， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

P_{\max} ——吊车最大竖向轮压标准值， kN ；

H_0 ——吊车横向水平制动力标准值（一个轮子）， kN ；

μ ——吊车竖向轮压动力系数；

β ——组合系数，一台吊车工作时， $\beta=0.8$ ，两台吊车联合工作时， $\beta=0.7$ ；

e_1 ——吊车轨道安装偏心矩， m ，宜取 0.02m；

e_2 —— H_0 对吊车梁截面弯曲中心的距离， m 。

6.2.5 吊车梁设计应符合下列要求：

1 除按承载能力设计外，还应按正常使用极限状态要求验算挠度。

2 电动桥式吊车的吊车梁标准组合最大允许挠度应符合下列规定：

1) 钢筋混凝土吊车梁为 $L_0/600$ (L_0 为吊车梁计算跨度)。

2) 钢结构吊车梁为 $L_0/750$ 。

3 钢筋混凝土吊车梁应验算裂缝开展宽度，厂内普通钢筋混凝土吊车梁正常使用极限状态最大裂缝宽度不大于 0.4mm；预应力钢筋混凝土吊车梁，正常使用极限状态最大裂缝宽度不大于 0.2mm。

4 水电站厂房吊车梁可不验算疲劳强度。

6.2.6 吊车梁与柱连接的设计，应满足支座局部承压、抗扭及抗倾覆要求。

6.2.7 厂房构架的布置应满足下列要求：

1 柱网布置应满足机电设备的安装和检修要求，柱距宜统一，并宜与机组分缝相适应。

2 立柱宜避免直接落在尾水管、蜗壳或钢管的顶板上。

3 厂房构架除满足结构强度要求外，还应具有足够的刚度。在正常使用极限状态下，吊车梁轨顶的侧向位移不应超过吊车正常行驶所允许的限值，且在标准组合下轨顶高程柱的最大位移不宜超过表 6.2.7 的允许值。

表 6.2.7 轨顶高程柱的允许位移值

序号	变形种类	按平面图形计算	按空间图形计算
1	横向位移（厂房封顶）	$H/1800$ （钢筋混凝土构架柱）	$H/2000$
2	横向位移（厂房未封顶）	$H/2500$	
3	纵向位移	$H/4000$	
注：H 为柱下端基础面到吊车梁轨顶面的高度。			

6.2.8 厂房结构在 earthquake 荷载下应满足 SL 191 和 GB 50011 规定的设防要求。

6.2.9 厂房构架承受的荷载及其荷载效应组合，可按表 6.2.9 的规定确定。

6.2.10 厂房构架宜按平面构架进行计算，其计算简图应符合下列规定：

表 6.2.9 厂房构架荷载效应组合表

极限状态	荷载效应组合	计算情况	作用名称													
			结构自重	屋面水久机电设备重	屋面活荷载或雪荷载	发电机层楼面荷载	水压力 设计洪水位或正常蓄水位	校核洪水位	吊车轮压	吊车水平制动力	风荷载	温度作用	施工荷载	地震作用		
承载能力极限状态	基本组合	1. 吊车满载	√	√	√	√	—	√	—	√	—	√	—	—	—	—
		2. 吊车空载+风荷载+温度作用	√	√	√	√	—	—	√	—	√	—	—	√	—	—
		3. 吊车满载+风荷载+温度作用	√	√	√	√	—	—	√	—	√	—	√	—	—	—
		4. 施工期	√	—	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—	√	—
正常使用极限状态	偶然组合	1. 吊车空载+地震作用	√	√	—	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—	√
		2. 吊车空载+校核洪水水压力	√	√	—	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—	—
		1. 吊车满载	√	√	√	√	—	—	√	—	√	—	√	—	—	—
		2. 吊车空载+风荷载+温度作用	√	√	√	√	—	—	√	—	√	—	√	—	—	—
正常使用极限状态	标准组合	3. 吊车满载+风荷载+温度作用	√	√	√	√	—	—	√	—	√	—	√	—	—	—
		4. 施工期	√	—	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—	√	—

注 1: 荷载效应组合时, 应考虑施工期厂房封顶或厂房封顶机坑二期混凝土未浇筑等情况, 施工荷载作用值大小及其组合由具体条件确定。
注 2: 构架温度作用视地域环境、上部结构型式和重要性等因素确定。

1 横向跨度以轴线为准，对阶形变截面柱，轴线通过最小截面中点。

2 下柱高度取柱固定端至牛腿顶面的距离。上柱高度：铰接时取牛腿顶面至柱顶面的距离；刚接时取牛腿顶面至横梁中心的距离。

3 楼板（梁）与柱简支连接时，可不考虑板（梁）对柱的支承约束作用，若板（梁）柱整体连接，根据板（梁）刚度大小假定按不动铰、刚接或弹性结点考虑。

4 构架柱基础固端高程，可根据基础的约束条件确定。

5 构架柱与屋面大梁整体浇筑或屋盖采用混凝土厚板结构时，构架柱与屋盖连接按刚接考虑；当屋盖采用屋架（预制混凝土、钢屋架）结构时，构架柱与屋架连接按铰接考虑。

6.2.11 厂房纵向构架两侧相邻吊车梁竖向反力差产生的纵向偏心弯矩标准值 M_y 可按式（6.2.11）近似计算：

$$M_y = \Delta R e \quad (6.2.11)$$

式中 ΔR ——相邻吊车梁反力差标准值，kN；

e —— ΔR 对柱中心的偏心距，m。

6.2.12 地震设计烈度为 6 度及 6 度以上的厂房的抗震措施应符合下列规定：

1 厂房上部结构应按要求设置防震缝，防震缝的宽度应满足 GB 50011 的要求。

2 厂房上部结构可采取梁端加腋以及加强排（框）架和屋架之间的纵向联系（包括屋架支承、柱间支承、屋顶圈梁、吊车梁附近柱间纵向联系梁以及各层圈梁等）的措施，其抗震构造要求应满足 SL 191 的相关要求。

3 主机间各层楼板与上下游墙、风罩、柱可采用整体连接。采用梁板结构时，板宜适当加厚。

6.2.13 屋盖系统设计应符合下列规定：

1 屋盖结构可根据屋盖荷载、厂房跨度、施工难易、工期等条件，采用混凝土结构或轻钢结构。

2 屋盖系统设计应贯彻国家节能环保政策，结合水电站所处自然环境、厂房布置和运行要求，满足排水、保温、防火、抗震等要求。屋顶可采用保温板材，必要时设自然采光带。

3 屋面坡度应结合当地降雨强度、屋盖结构型式和建筑立面处理综合选定。

6.3 风罩与机墩

6.3.1 设计机墩与风罩时，应取得下列机组资料：

1 发电机、水轮机的总装图、基础图及基础荷载图。

2 发电机出力 N 、额定转速 n 、飞逸转速 n_p 、功率因数 $\cos\varphi$ 及暂态电抗 X_z 。

3 发电机总重及定子、转子、机架、励磁机和附属设备重。

4 水轮机导叶叶片数 X_1 和转轮叶片数 X_2 。

5 水轮机转轮连轴重。

6 水轮机轴向水推力。

7 机组转动部分质量中心与机组中心的可能最大偏心距 e 。

8 发电机冷却的循环空气温度。

9 作用于风罩的千斤顶推力。

10 转子半数磁极短路时的单边磁拉力。

11 转动惯量 $G_r D^2$ 。

12 正常扭矩。

13 短路扭矩。

6.3.2 风罩承受的荷载及其荷载效应组合可按表 6.3.2 的规定确定。

6.3.3 风罩结构宜按下列要求进行设计：

1 其底部为固端，顶部宜与发电机层楼板整体连接。

2 温度作用引起的内力，宜考虑结构开裂后的影响予以折减，或采取降低钢筋设计强度的方法以抵偿温度作用。

3 圆筒式风罩内力可按附录 B 计算。

4 正常使用极限状态风罩最大裂缝宽度允许取 0.4mm。

表 6.3.2 风罩荷载效应组合表

极限状态	荷载效应组合	计算情况	荷载名称				
			结构自重	发电机层楼板荷载	温度作用	发电机上机架千斤顶推力	
						正常	短路
承载能力极限状态	基本组合	正常运行	√	√	√	√	—
正常使用极限状态	偶然组合	转子半数磁极短路	√	√	√	—	√
正常使用极限状态	标准组合	正常运行	√	√	√	√	—

6.3.4 机墩结构形式应根据发电机型式、机组特性及厂房结构布置等因素选择。作用在机墩上的荷载，应根据水轮发电机组的型式、结构及传力方式分析确定。机墩承受的荷载宜按下列规定确定：

1 垂直静荷载：结构自重、发电机定子重、机架及附属设备重等。

2 垂直动荷载：发电机转子连轴重、励磁机转子重、水轮机转轮连轴重及轴向水推力。

3 水平动荷载：由机组转动部分质量中心和机组中心偏心距 e 引起的水平离心力标准值 P_m (kN)， P_m 可按式 (6.3.4-1) 和式 (6.3.4-2) 计算：

$$\text{正常运行时} \quad P_m = 0.0011eG_r n^2 \quad (6.3.4-1)$$

$$\text{飞逸时} \quad P_m = 0.0011eG_r n_p^2 \quad (6.3.4-2)$$

式中 G_r ——机组转动部分总重标准值，kN；

n ——机组额定转速，r/min；

n_p ——机组飞逸转速，r/min；

e ——机组转动部分质量中心与机组中心偏心距，m。

4 正常扭矩标准值 T (kN·m)，按式 (6.3.4-3) 计算：

$$T = 9.75 \frac{N \cos \varphi}{n} \quad (6.3.4-3)$$

式中 N ——发电机容量，kVA；

$\cos \varphi$ ——发电机功率因数。

5 短路扭矩标准值 T' (kN·m)，按式 (6.3.4-4) 计算：

$$T' = 9.75 \frac{N}{nX_z} \quad (6.3.4-4)$$

式中 X_z ——发电机暂态电抗。

6.3.5 机墩荷载效应组合可按表 6.3.5 的规定确定。

表 6.3.5 机墩荷载效应组合表

极限状态	荷载效应组合	计算情况	荷载与荷载效应名称					
			垂直静荷	垂直动荷	水平动荷 加短路工况		扭矩	
					正常	飞逸	正常	短路
承载能力 极限状态	基本组合	正常运行	√	√	√	—	√	—
	偶然组合	短路时	√	√	√	—	—	√
		飞逸时	√	√	—	√	—	—
正常使用 极限状态	标准组合	正常运行	√	√	√	—	√	—

6.3.6 机墩结构应满足机组在正常运行、短路及飞逸时的强度和刚度要求。直接承受集中荷载的支座应验算局部承压强度并配置钢筋网。

6.3.7 机墩和风罩上的孔口或切口，应考虑孔边应力集中，适当加强配筋。

6.3.8 圆筒式机墩的动力计算应按下列原则进行：

1 应验算共振、振幅和动力系数，计算方法见附录 C。大型机组或必要时宜用有限元法或其他分析方法复核。

2 机墩自振频率与强迫振动频率之差和自振频率之比值应大于 20%，或强迫振动频率与自振频率之差和机墩强迫振动频率之比值应大于 20%。

3 机墩强迫振动的振幅应满足：垂直振幅不大于 0.15mm；水平横向与扭转振幅之和不大于 0.20mm。

6.3.9 框架式、墙板式等其余类型的机墩动力计算可按照 GB 50040 的相关规定进行。

6.4 下部结构

6.4.1 水电站厂房蜗壳、尾水管、进口段（河床式厂房）、挡水墙和基础底板等结构，可分成几个独立部分进行设计。按各独立结构设计时应考虑相互之间力的传递及变形协调。对大型工程宜考虑空间作用，进行三维有限元分析计算。

6.4.2 切取框架计算时应遵循下列原则：

1 杆件计算长度宜以中心线为准。

2 当结构中任一杆件满足下列条件时，应考虑剪切变形及刚性节点的影响：

1) 两端固结的杆件， $h/l > 0.15$ ， h 为杆件截面高度，单位 m， l 为杆件净跨长度，单位 m。

2) 一端固结、一端铰结的杆件， $h/l > 0.3$ 。

6.4.3 蜗壳的型式可根据作用水头大小选用金属蜗壳或钢筋混凝土蜗壳。当最大水头大于 40m 时宜采用金属蜗壳，若采用钢筋混凝土蜗壳，则应进行技术经济论证。

6.4.4 金属蜗壳与外围混凝土结构处理措施可采用下列方式：

1 设置弹性垫层：在金属蜗壳与外围混凝土之间设置弹性垫层。传至混凝土上内水压力大小应根据垫层设置范围、厚度及垫层材料的物理力学指标等研究确定。

2 充水保压：金属蜗壳与外围混凝土之间不设垫层，在蜗壳充水加压状态下浇筑外围混凝土，其充水加压值可根据外围混凝土结构具体条件分析研究确定。

3 直接埋入：金属蜗壳与外围混凝土之间不设垫层，在蜗壳不充水（仅设置内部支撑）的情况下浇筑外围混凝土。金属蜗壳和外围混凝土完全联合，共同承受全部内水压力。

6.4.5 钢筋混凝土蜗壳及金属蜗壳外围混凝土结构承受的荷载和荷载效应组合可按表 6.4.5 的规定确定。

表 6.4.5 蜗壳荷载效应组合表

蜗壳型式	极限状态	荷载效应组合	计算工况	荷载名称					
				结构自重	机墩及风罩传来荷载	水轮机层地面活荷载	内水压力	外水压力	温度作用
金属蜗壳 外围混凝土	承载能力 极限状态	基本组合	正常运行	√	√	√	√	—	√
			蜗壳放空	√	√	√	—	—	—
	正常使用 极限状态	标准组合	正常运行	√	√	√	√	√	√
			蜗壳放空	√	√	√	—	√	—
钢筋混凝土 蜗壳	承载能力 极限状态	基本组合	正常运行	√	√	√	√	√	√
			蜗壳放空	√	√	√	—	√	—
		偶然组合	施工期	√	√	—	—	—	√
			校核洪水运行	√	√	√	√	√	—
	正常使用 极限状态	标准组合	正常运行	√	√	√	√	√	√
			蜗壳放空	√	√	√	—	√	—

注 1：内水压力包括水锤压力。

注 2：温度作用仅考虑环境年变幅影响。

注 3：施工期温度作用，宜采用温控措施及合理分块浇筑予以降低。

6.4.6 钢筋混凝土蜗壳结构的内力，宜简化为平面框架计算，顶板及边墙的环向力也可简化为环形板筒计算，对于进口段尚应考虑中墩及上游墙的约束作用。大型工程宜进行三维有限元分析。

6.4.7 钢筋混凝土蜗壳的抗裂计算应满足下列要求：

1 钢筋混凝土蜗壳已满足抗裂要求时，可不进行裂缝开展宽度验算。

2 钢筋混凝土蜗壳不满足抗裂要求时，可按限制裂缝开展宽度设计，最大裂缝宽度允许值 ω_{\max} 按下列数值选取：

1) 当水力梯度 $i > 20$ 时，标准组合 $\omega_{\max} \leq 0.20\text{mm}$ 。

2) 当水力梯度 $i \leq 20$ 时，标准组合 $\omega_{\max} \leq 0.25\text{mm}$ 。

3) 当钢筋混凝土蜗壳内壁设有钢衬时，裂缝宽度 $\omega_{\max} \leq 0.30\text{mm}$ 。

3 按限制裂缝开展宽度设计，对计算温度作用效应取值，宜考虑开裂影响予以适当折减。

6.4.8 尾水管承受的荷载及荷载效应组合可按表 6.4.8 的规定确定。

6.4.9 尾水管结构的内力计算应按下列原则进行：

1 垂直水流方向宜简化为平面问题考虑，即沿水流方向分区切若干剖面。按平面框架计算。

2 高尾水位的厂房应验算顶板、底板及支墩的顺水流方向强度。

3 大型水电站的尾水管宜进行三维有限元计算。

6.4.10 大型机组的尾水管顶板及整体式厚底板，应考虑施工进度程序可能产生的不利应力并验算施工期的温度作用，合理选定混凝土分层分块及温控措施。

6.4.11 厂房基岩完整坚硬时，尾水管扩散段底板可采取分离式。当分离式底板设有可靠排水设施时，作用在底板上的浮托力可折减 40%~60%。分离式底板内力可按无梁楼盖或连续梁计算，见附录 D。锚筋设计应符合 GB 50086 和 SL 377 的有关规定。

表 6.4.15 进口段荷载效应组合表

极限状态	荷载效应组合	计算工况	荷载与荷载效应								地震作用	温度作用	
			结构自重	上部结构及设 备重	上游水压力		横缝中缝隙水压力		扬压力				
					正常蓄水位 或设计 洪水位	校核 洪水位	正常蓄水位 或设计 洪水位	校核 洪水位	正常 情况	校核 情况			
承载能力 极限状态	基本组合	正常运行	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—
		检修期	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—
		施工期	√	√	—	—	—	—	—	—	—	√	—
正常使用 极限状态	偶然组合	校核洪水运行	√	√	—	√	—	—	√	—	—	—	—
		正常运行+地震	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—	√
		正常运行	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—
	标准组合	检修期	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—	—
		施工期	√	√	—	—	—	—	—	—	—	—	√

注 1：寒冷地区应计入冰压力。
注 2：横缝中缝隙水压力根据止水设计情况确定。

6.4.12 厂房基岩软弱破碎或为非岩基上厂房时，尾水管扩散段底板宜采用整体式。当切取平面框架计算内力时，宜按弹性地基考虑。

6.4.13 当单孔尾水管顶板厚度与跨度之比 $h/l > 0.5$ 或多孔尾水管顶板厚度与跨度之比 $h/l > 0.4$ 时，顶板内力宜按深梁进行应力分析及配筋，边墩及中墩视作深梁的简支支座。

6.4.14 尾水管顶板采用预制倒 T 梁作承重模板时，应考虑顶板分层浇筑引起的应力叠加。

6.4.15 河床式厂房进口段承受荷载及荷载效应组合可按表 6.4.15 的规定确定。

6.4.16 河床式水电站厂房进口段结构设计应按下列要求进行：

1 内力计算，宜简化为平面问题沿水流方向分区切取若干代表性剖面进行分析，当胸墙、挡水墙高跨比单孔 $h/l > 0.5$ 、双孔 $h/l > 0.4$ 时，宜按深梁要求核算及配筋。

2 胸墙、挡水墙及中、边墩的横向受力，可沿不同高程切取若干代表性剖面进行分析。

3 闸门槽颈部应根据闸门关闭最不利工况核算应力并加强配筋。当闸墩上部（蜗壳或进水流道顶板以上）高度与长度（沿水流向）之比较大时，应计算闸墩在水压力作用下横向正截面及斜截面强度。

4 对大型工程宜采用有限元法计算复核。

5 正常使用极限状态下裂缝控制可按 6.4.7 条有关规定设计。

6.5 构造设计

6.5.1 变形缝的设置应按下列要求确定：

1 主机间与大坝、安装间及副厂房等相邻建筑物之间，宜设置永久变形缝。

2 机组段永久变形缝的间距，主要取决于地基特性、机组尺寸大小、结构形式、气候条件等情况，宜为 20~30m。经论

证，采取措施后可适当放宽。

3 永久变形缝的宽度应根据建筑物温度变形、沉降及抗震构造要求等条件确定。岩基上的建筑物，下部结构的永久变形缝缝宽为10~20mm，上部结构的永久变形缝缝宽宜适当加大。非岩基上的厂房永久变形缝缝宽应按地基不均匀变形计算研究确定。

4 当厂房整体稳定及应力需要时，可在厂房下部结构的某些部位（如厂坝间的接触面）设置临时变形缝，待混凝土块体温度降至预期要求，或结构变形达到设计要求后再进行接缝灌浆。

5 为保证永久变形缝的宽度，可在缝内设置填充材料。填充材料应具有弹性、能适应变形要求。

6.5.2 止水设置及材料选择应满足下列要求：

1 永久变形缝缝中应设置可靠的止水，止水布置应有利于结构的受力条件。必要时可在止水设施后加设排水孔和排水管道。

2 止水材料可根据变形缝的宽度、水压力、环境条件及其所处部位，选用紫铜片、不锈钢片、橡胶、塑料、沥青以及高分子合成材料等。

3 深入基岩的止水片必须与基岩妥善连接，埋入基岩内深度宜取300~500mm。

4 厂房墙体与陡立的边坡相连时，临水面宜设止水键体。宜在岩壁上挖槽，回填混凝土，同时埋设止水片。止水键体的深度宜采用300~500mm，并用插筋锚入岩壁，必要时可在键体与岩壁结合面进行灌浆以加强防渗。

5 止水键体混凝土达到一定龄期后，方可浇筑厂房混凝土，浇筑前应对止水键体混凝土外露面涂抹沥青等隔离材料。

6 承受水压的竖向施工缝宜设止水。水平施工缝可不设置止水，当水力梯度较大，宜设置止水。

6.5.3 厂房一期、二期混凝土划分应符合下列要求：

1 尾水管、锥管及蜗壳预留二期混凝土尺寸及空间除满足

安装要求外，还应考虑钢筋安设和二期混凝土浇筑要求。金属蜗壳周围二期混凝土厚度不应小于 0.8m。

2 机组分期安装的厂房，预留后期安装的机组段，其一期混凝土结构应满足初期运行时稳定、强度和防渗等要求。厂房下游墙、边墙和构架在厂房二期混凝土未浇筑和厂房未封顶前，应具备承受相应工况荷载的能力。

3 尾水管肘管底板预留一期混凝土厚度应满足基础底板的结构要求。

6.5.4 厂房混凝土浇筑分层分块应根据厂房结构形式和尺寸、施工进度、浇筑能力及温控措施等情况按下列要求确定：

1 施工缝的设置应不影响结构受力条件和整体性，宜避免设在应力较大的部位，且应避免出现锐角和薄片。

2 施工缝宜采用错缝，避免上下层垂直缝贯通。错缝水平搭接长度宜取浇筑层厚度的 $1/2 \sim 1/3$ ，且不宜小于 300mm；如采用直缝，宜选择在受力较小部位，并考虑埋设直缝灌浆系统和缝面插筋。

3 分层分块应有利于减少混凝土温度应力和干缩应力。

4 分层分块应满足设备安装和埋件埋设要求，并有利于简化施工工序和加快施工进度。

6.5.5 大型机组的尾水管顶板及整体式厚底板，应考虑施工进度程序可能产生的不利应力并验算施工期的温度作用，合理选定混凝土分层分块及温控措施，防止发生贯穿性温度裂缝。

6.5.6 混凝土浇筑层厚度，基础块宜采用 1~2m；在基础约束范围以外，可采用 3~6m。

6.5.7 先期浇筑的混凝土竖向施工缝面上宜设置键槽，键槽面积约为总面积的 $1/3$ 。在有抗剪和抗渗要求的水平施工缝面上可设置凸形或凹形键槽。施工缝表面处理应符合 DL/T 5144 的有关规定。

6.5.8 为减少厂房混凝土结构的施工期温度应力，可根据情况选择下列措施：

- 1 宜优先考虑采用适当外加剂、掺合料等措施。
 - 2 在尾水管、蜗壳、闸墩等部位设封闭块或预留宽槽。
 - 3 预埋冷却水管，通水冷却。
 - 4 采用补偿收缩微膨胀混凝土。
 - 5 配置适量构造钢筋。
- 6.5.9 对排沙底孔等流速较大的挟沙水流的过流表面，宜采用高强度抗冲耐磨混凝土或其他抗磨蚀层。抗冲磨混凝土应符合 DL/T 5207 的有关规定。
- 6.5.10 尾水管、锥管段进人孔及其他开孔（洞）周围的钢衬和混凝土结构应采取加强措施。
- 6.5.11 钢筋混凝土蜗壳，当采用薄钢板防渗衬护时，应设置足够的肋板及拉筋，以保证与混凝土的紧密连接。
- 6.5.12 埋设在混凝土中的管道，穿过永久变形缝时应考虑建筑物相对变形的作用，并采取适当措施。
- 6.5.13 永久性钢结构及钢筋混凝土结构的钢构件外露部分均应做好防锈蚀处理。
- 6.5.14 厂区平台以上主副厂房外墙可视环境条件，设置一定高度的钢筋混凝土墙体。
- 6.5.15 定子、转子及下机架基础二期混凝土应满足机组安装调整要求。
- 6.5.16 主厂房发电机层、水轮机层、安装间和副厂房中央控制室等各层楼面布置应符合下列规定：
- 1 安装间楼面结构布置宜考虑安装、检修时设备分区要求。对特别重的部件宜直接由基岩或大块混凝土承担。若安装间下面需布置机电设备采用板梁柱结构时，柱间距宜控制在 5~6m 左右，次梁间距不宜大于 3m。对吊物孔周围的楼板宜用肋梁加强，孔边悬臂板长度不宜大于 0.5m。
 - 2 发电机层楼面孔洞周围宜设置边梁，当采用无梁楼板时，孔洞四周应布置暗梁。
 - 3 发电机层楼板（包括发电机层与水轮机层之间的母线层

楼板)应具有足够的强度和刚度。当采用无梁楼板时,厚度不宜小于0.3m。

4 楼面与周围墙体或梁柱的连接型式应根据布置和结构要求确定,可按固接或铰接设计。

6.5.17 设计烈度为6度及6度以上厂房应采取相应的抗震措施并符合下列规定:

1 厂房上部结构应按要求设置防震缝,防震缝的宽度应满足GB 50011的要求。

2 厂房上部结构可采取梁端加腋以及加强排(框)架和屋架之间的纵向联系(包括屋架支撑、柱间支撑、屋顶圈梁、吊车梁附近柱间纵向联系梁以内各层圈梁等)的措施,其抗震构造要求应满足SL 191相关要求。

3 主机间各层楼板与上、下游墙、风罩、柱可采用整体连接。采用梁板结构时,板宜适当加厚,以提高厂房的整体刚度。

7 地下厂房

7.1 地下厂房布置

7.1.1 地下厂房布置应根据枢纽总体布置，结合水文、气象、地形、地质条件、施工条件、机电设备布置、运行管理和节能环保等因素，经技术经济比较确定。

7.1.2 地下厂房布置型式可按下列方式划分：

- 1 以厂房在水道上的位置划分有首部式、中部式、尾部式。
- 2 以厂房的埋藏方式划分有地下式、半地下式、窑洞式。

7.1.3 地下厂房主洞室及附属洞室的布置应满足下列要求：

1 主洞室应布置在地质构造简单、岩体完整坚硬、上覆岩体厚度适宜、地下水微弱以及山坡稳定的地段。

2 主洞室位置宜避开较大断层、节理裂隙发育区、破碎带以及高地应力区。如不可避免时，应进行专门论证。

3 当地震设计烈度为8度或超过8度时，不宜在地形陡峭、岩体风化、地质构造发育的山体中修建窑洞式和半地下式厂房。

4 地下厂房及其附属洞室洞口位置，宜避开风化严重或有较大断层通过的高陡边坡地带，宜避开滑坡、危崖、山崩以及其他软弱面形成的坍滑体，宜避开泄洪雾化区。

7.1.4 地下厂房主洞室纵轴线选择应综合考虑下列因素：

1 主洞室的纵轴线走向，宜与围岩的主要构造弱面（断层、节理、裂隙、层面等）呈较大的夹角。同时，应注意次要构造面对洞室稳定的不利影响。

2 在高地应力地区，洞室纵轴线走向与地应力最大主应力水平投影方向的夹角宜采用较小角度。

7.1.5 地下洞室群的布置宜遵循临时与永久相结合和一洞多用的原则，宜减少附属洞室的数量。

7.1.6 地下厂房洞室群各洞室顶部以上的岩体厚度或傍山洞室

靠边坡一侧的岩体厚度，应根据围岩岩性、岩体完整性程度、风化程度、地应力大小、地下水活动情况、洞室规模及施工条件等因素综合分析确定。主洞室顶部岩体厚度不宜小于洞室开挖宽度的2倍，否则应有专门论证。

7.1.7 地下厂房洞室群各洞室之间的岩体应保持足够的厚度，其厚度应根据厂房布置要求、地质条件、洞室规模及施工方法等因素综合分析确定并符合下列规定：

1 洞室间的岩柱厚度不应小于相邻洞室平均开挖宽度的1倍，并不宜小于较大洞室开挖高度的0.5倍，对于高地应力区不应小于大洞室开挖宽度的1.5倍。

2 上下层洞室间的岩体厚度，当两洞室纵轴线水平投影的夹角较小时，应大于下层洞室开挖宽度的1倍；当两洞室纵轴线水平投影的夹角较大，且围岩完整坚硬时，可适当减小，但应进行必要的分析论证。

7.1.8 两洞室相交时，其轴线之间的夹角，应根据工程布置要求及相交处地质构造确定，宜采用较大夹角。

7.1.9 在研究地下洞室布置及洞室尺寸时，应通过优化布置和合理的机电设备选型，压缩地下洞室的规模，选择合理洞形。

7.1.10 地下厂房厂内布置除应满足4.2节的有关要求外，还应遵循下列规定：

1 机电设备布置应简洁、紧凑，充分利用空间。

2 充分利用主机间附近的附属洞室。

3 主机间平面尺寸应考虑压力管道之间、尾水管（洞）之间岩体厚度的要求。

4 厂房高度应满足母线洞、吊车梁、顶棚等布置要求。

5 安装间的布置应考虑进厂交通运输线路的布置，并宜在安装间设置天锚，用于桥机的安装、检修等。

6 应考虑围岩稳定 and 支护结构的要求。

7 厂内交通、通风、防潮、排水、照明布置应满足地下运行环境要求。

7.1.11 副厂房应按集中与分散相结合、地面与地下相结合、管理运行方便的原则布置并符合下列规定：

1 需靠近主机的附属设备，可集中布置在紧靠主机间的地下洞室内。

2 可以远离主机放置的设备，可利用已有洞室分散布置或置于地面。

7.1.12 主变压器室及开关站布置应根据地形、地质、洞室群规模、电气设计、交通运输及消防等因素，结合水电站总体布置，考虑泄洪雾化的影响，经技术经济比较选定。

7.1.13 交通运输洞（井）的布置应遵守下列原则：

1 交通运输洞的线路应综合考虑地形地质条件、主洞室布置及对外交通条件等选定。

2 交通运输洞的宽度及高度应满足设备运输要求，如运输洞兼作其他用途时，其断面尺寸还应满足其他使用要求。

3 交通运输洞的纵坡和转弯半径可按照 JTG B01 的有关规定确定，进入安装间前应有一段平直段。

4 交通运输洞的进口高程宜位于厂房校核洪水位以上，宜避开泄洪雾化及冲沟口、崩塌体、泥石流等不利条件的影响。进口高程低于厂房校核洪水位时，应设置可靠的防洪、防淹措施和人员安全进出口；交通运输洞进口段宜做成反坡。

5 当受地形条件限制，布置交通运输洞有困难时，经论证可采用竖井运输方式。

7.1.14 地下厂房至少应有 2 个通至地面的安全出口。

7.1.15 引水压力管道末端进水主阀可布置在主厂房内，高水头水电站也可将主阀布置在单独设立的阀室内，应进行技术经济比较确定。阀室的布置应满足阀门的运输、安装及检修等要求。

7.1.16 尾水系统布置应满足下列要求：

1 当多台机组尾水管的出水汇入一条尾水洞时，尾水管汇入尾水洞的水流折角宜大于 90° 。

2 尾水管出流应满足机组运行稳定要求，尾水管进口处真

空度不应超过 8m 水柱。

3 尾水管之间应保留维持围岩稳定需要的岩体厚度，选择窄高型的尾水管。

4 在尾水管末端宜设尾水闸门。当采用一机一洞时，尾水洞长度较短且其出口设有检修闸门，则尾水管末端可不设尾水闸门。

5 尾水管闸门操作廊道底面或操作平台的高程宜高于尾水洞出口的下游校核洪水位和尾水洞（尾水调压室）的最高涌浪水位。当采用密闭式闸阀时可不受此规定限制。

6 尾水洞（包括尾水调压室）的布置及其断面型式、尺寸应根据下游尾水位变化幅度、工程地质、机组调节保证等因素经技术经济比较确定，当山体单薄或地质条件较差时，宜研究取消尾水调压室的替代方案。

7.1.17 出线洞（井）可布置为平洞、斜井或竖井，其断面尺寸应满足布置、交通、通风和施工等要求，并应对应设置台阶、楼梯和电梯。

7.1.18 通风系统的布置应遵循下列原则：

1 除必须专门设置通风洞外，宜利用交通运输洞（井）、出线洞（井）、无压尾水洞以及主厂房天棚吊顶上方空间等兼作送风道或排风道。

2 通风系统设计应与消防设计相协调。

3 通风系统的通风机宜远离主、副厂房布置（如布置在洞口或单独的洞室内），若布置在主、副厂房内或其邻近地方时，应有屏蔽噪音的有效措施。

4 引风洞进口应考虑泄洪雾化的影响，引入厂内的风应清洁、湿度适宜。

5 尾水调压室的通风洞洞口应有可靠的安全设施。

7.1.19 地下电站主厂房、主变压器及高压开关站等主要洞室的防渗、排水、防潮措施应根据工程地质、水文地质条件和工程布置情况确定，并应符合下列要求：

1 洞室距水库或河床较近时或地下水丰富的地区，应加强前沿及河床侧部位的防渗、排水措施，必要时可在洞室群外围与厂房顶部分层设置防渗帷幕、排水洞，并在排水洞内设排水幕，形成厂外排水系统。

2 地下水丰富或岩体透水性强的地区，宜在主洞室开挖之前，形成厂外排水系统。

3 当设有尾水调压室时，应加强靠近尾水调压室侧的防渗、排水措施。

4 具备自流排水条件应采用自流排水。

5 需抽排的，应根据围岩水文地质条件及防渗排水工程措施合理确定渗漏水量，设置足够容积的集水井和抽排设施。

7.1.20 对可能造成施工期或运行期地下厂房进水的地质探洞、探槽或其他井、坑及施工支洞等应进行安全有效的封堵。

7.2 地下厂房结构设计

7.2.1 地下厂房围岩稳定分析和支护设计所需要的地质资料和参数，应根据地质勘察、现场和室内试验成果、工程类比等综合分析研究确定。

7.2.2 地下厂房围岩稳定分析方法包括定性分析和定量分析两类。定性分析包括地质分析法和工程类比法；定量分析包括数值分析法、块体稳定分析法、模型试验法、监控量测法和反馈分析法。设计中可根据设计阶段、洞室规模、围岩类别、岩体特性等选用。

7.2.3 洞室围岩稳定性应根据岩体地质构造、岩石力学性质、围岩分类、地应力大小与方向、地下水影响、洞室群布置及施工等因素，采用地质分析、工程类比结合数值分析作出评价。

7.2.4 地下厂房洞室围岩支护设计应以工程类比为主，结合数值分析，根据施工期围岩监测成果进行动态设计。

7.2.5 地下厂房洞室整体稳定性和支护设计可采用有限元法进行计算，计算时应根据围岩性质按下列原则选用合适的力学

模型：

1 坚硬完整围岩可采用弹性或弹塑性力学模型计算。

2 中硬岩、软弱围岩、高地应力围岩宜采用弹塑性力学模型计算。

3 有流变性质的围岩宜采用黏弹塑性力学模型计算。

7.2.6 对于局部不稳定岩体可采用刚体极限平衡法进行计算分析。

7.2.7 地下洞室的开挖应选择合理的施工方法和开挖程序，宜采用控制爆破（光面爆破、预裂爆破），适时进行支护，在不良地质地段可采用“预灌浆”或“超前锚固”等措施。

7.2.8 地下厂房在开挖和支护过程中应按照下列原则进行监控量测，尤其是高地应力区、构造复杂和软弱围岩中更应做好必要的监控量测：

1 通过对围岩变形、支护受力等量测来监控洞室的稳定状况，并进行反馈分析，验证围岩稳定性和最终确定支护形式与参数。

2 围岩变形监测宜于主洞室开挖之前实施，并宜与先行开挖的洞室结合布置。

3 及时做好地质编录，对潜在的不稳定楔形体或块体及时预报。

4 应对围岩地下水进行监测。

7.2.9 地下主厂房、主变压器及高压开关站等洞室形状宜满足下列要求：

1 围岩较坚固完整且地应力不大时，宜采用直墙曲顶拱的形式。

2 软弱破碎的围岩，或水平地应力较大的中等质量围岩宜采用马蹄形或卵形。

3 洞室的轮廓宜避免突变和锐角。

7.2.10 地下厂房的支护设计，应充分发挥围岩的自身承载能力，根据围岩的地质条件、洞室断面形式和尺寸及施工方法，选

择合适的支护型式，对围岩进行适时支护，施工期的临时安全支护应尽量与永久支护相结合。

7.2.11 对窑洞式厂房进口段、洞室交岔段、洞室间岩体或岩柱等稳定条件不利的部位应根据地质情况加强支护措施，并选择适当的施工方法。

7.2.12 地下厂房洞室围岩支护型式可分为柔性支护、刚性支护和组合支护。支护设计应遵循“以柔性支护为主、刚性支护为辅；系统支护为主，局部加强为辅，并与随机支护相结合”的原则，并宜符合下列要求：

1 宜采用由喷混凝土、钢筋网、锚杆、锚索和钢筋拱肋等的一种或几种组合而成的柔性支护。

2 当单独使用柔性支护难以满足围岩稳定要求时，宜采用柔性支护与钢筋混凝土衬砌组合的组合式支护。

3 IV~V类围岩宜采用钢筋混凝土衬砌型式的刚性支护或组合式支护。

4 对特殊地质条件洞段或部位，可采用固结灌浆、混凝土置换等超前支护措施。

5 当因运行或水力学等要求采用钢筋混凝土衬砌时，洞室支护宜按组合式支护设计。

7.2.13 地下厂房柔性支护的设计和施工技术要求，应符合 GB 50086、SL 377 及 SL 212 的有关规定。

7.2.14 钢筋混凝土结构刚性支护可根据初期支护和围岩情况选择下列不同的结构型式：

1 顶拱钢筋混凝土肋拱衬砌。

2 顶拱全封闭钢筋混凝土衬砌，边墙不衬砌或薄层混凝土衬砌。

3 洞室全断面钢筋混凝土衬砌。

7.2.15 钢筋混凝土衬砌厚度，应根据计算和构造要求，并结合施工方法确定。配置单层钢筋的混凝土衬砌厚度不宜小于 300mm，配置双层钢筋的混凝土衬砌厚度不宜小于 400mm。混

凝土强度等级不宜低于 C25。

7.2.16 围岩压力应根据围岩条件、洞室埋深、洞室断面形状与大小、施工方法及支护情况等因素，按实际情况及下列原则分析确定：

1 薄层及松散围岩，可按式 (7.2.16-1) 和式 (7.2.16-2) 计算，并根据实际情况进行修正：

$$\text{垂直方向} \quad q_{vk} = (0.2 \sim 0.3) \gamma_R B \quad (7.2.16-1)$$

$$\text{水平方向} \quad q_{hk} = (0.05 \sim 0.10) \gamma_R H \quad (7.2.16-2)$$

式中 q_{vk} ——垂直均布围岩压力标准值， kN/m^2 ；

q_{hk} ——水平均布围岩压力标准值， kN/m^2 ；

γ_R ——岩体容重， kN/m^3 ；

B ——洞室开挖宽度， m ；

H ——洞室开挖高度， m 。

2 块状、中厚层至厚层状围岩，可根据围岩中不稳定块体的作用力来确定围岩压力。

3 不能形成稳定拱的浅埋洞室，宜按洞室顶拱上覆岩体的重力作用来确定围岩压力，并根据施工所采取的支护措施予以修正。

4 当采用组合式支护时，作用于衬砌上的围岩压力宜考虑围岩卸荷过程予以适当折减。

5 具有流变或膨胀等特殊性质的围岩，围岩压力应经专门研究确定。

7.2.17 作用在衬砌上的外水压力应根据地下水情况、围岩透水性能及工程上采取的防渗排水措施，通过工程类比或渗流计算分析确定。对地下水较丰富的地下厂房应在洞室四周及顶部设置可靠的排水系统和灌浆阻水帷幕，减小或消除外水压力。

7.2.18 顶拱混凝土衬砌顶部应做回填灌浆。围岩完整性较差、裂隙较发育者，可考虑对衬砌后岩体进行固结灌浆。回填灌浆和固结灌浆应符合下列要求：

1 回填灌浆的范围宜为顶拱中心角 $60^\circ \sim 120^\circ$ 。灌浆压力应

根据灌浆孔布置、施灌程序及作用范围来确定。

2 固结灌浆的参数可通过工程类比或现场试验确定。固结灌浆孔间距可采用 2~4m，孔深应根据岩石裂隙情况确定，宜为 3~8m。

7.2.19 混凝土干缩及施工期温度作用宜采用浇筑分块和施工措施消除。运行期混凝土的温度作用应根据环境介质温度变化情况
分析确定。

7.2.20 作用于衬砌上的施工及安装时的荷载应按实际情况
确定。

7.2.21 地震设计烈度为 9 度的地下建筑物或地震设计烈度为 8 度的 1 级地下建筑物，均应验算建筑物和围岩的抗震强度和稳定性。窑洞式厂房的进口段、交通洞、通风洞、出线洞等进出口部位，应按 SL 203 的有关规定验算。

7.2.22 支护结构受力及钢筋混凝土衬砌的应力，宜采用有限元法模拟开挖、支护过程进行分析。

7.2.23 当采用结构力学方法计算衬砌内力时，应考虑围岩
抗力。

7.2.24 地下厂房除可采用常规的墙、柱结构吊车梁外，还可根据
具体条件选用能缩小厂房开挖跨度的下列吊车梁：

- 1 岩锚式吊车梁（包括岩壁式和岩台式）。
- 2 悬挂在钢筋混凝土顶拱拱座上的悬挂式吊车梁。

7.2.25 岩锚式吊车梁的设计与施工应满足下列要求：

- 1 在洞室围岩为Ⅲ类及以上时，宜采用岩锚式吊车梁。
- 2 应建筑在稳定的边墙围岩基础上，应注意岩壁侧向变形的影响，当遇到不良地质情况，如断层、软弱破碎带、不稳定块体、平行层面等，应采取相应的工程加固措施。

- 3 应进行施工方法设计，选择合理的爆破方法及参数，严格控制超欠挖，并保证岩壁（台）的成型。

- 4 当岩锚式吊车梁下方布置有洞室时（如交通洞、母线洞等），应注意下层洞室开挖对岩锚式吊车梁基础的影响，并采取

相应的结构措施。

5 岩壁式吊车梁的受拉锚杆入岩深度应穿过围岩爆破松弛区，锚入稳定岩体内的锚固长度可按计算和工程类比确定，并不小于该部位系统锚杆的深度。

6 岩壁式吊车梁结构设计方法可采用刚体极限平衡法和有限元法。岩壁式吊车梁刚体极限平衡法设计见附录 E。

7 岩壁式吊车梁受拉锚杆可采用普通砂浆锚杆或预应力锚杆。当采用普通砂浆锚杆时，应充分考虑下部开挖时围岩变形对锚杆受力的不利影响，预留足够的安全余度或补强措施；当采用预应力锚杆时，可采用部分预应力或完全预应力结构，并应满足可进行二次张拉要求。

8 岩壁式吊车梁锚杆设计应满足 GB 50086、SL 377 及 SL 212 的有关规定。受拉锚杆在距离岩壁孔口一定深度范围宜做成自由段。

9 梁体结构设计按 SL 191 中壁式连续牛腿有关规定执行。

10 岩壁式吊车梁可不设置伸缩缝，当岩壁高度、地质条件变化较大或梁体结构型式有变化时，应在相应部位设置伸缩缝。伸缩缝两侧岩壁式吊车梁受拉锚杆应加强。

11 岩壁式吊车梁应设置施工缝，施工缝间距宜为 8~15m，缝面应设置键槽，并作凿毛处理，梁体纵向钢筋应跨缝布置。键槽面积不宜小于梁体断面总面积的 1/3，必要时可设拼缝钢筋。

12 岩锚式吊车梁顶部应设置排水沟，梁体内埋置排水管，做好有组织排水。

13 岩壁式吊车梁受拉锚杆中宜全部进行无损检测，检查其注浆密实度。

14 岩锚式吊车梁应进行专门的监测设计，对重要的或大吨位岩锚式吊车梁应进行现场承载试验。

15 厂房洞室开挖支护完成后，桥机吊运大件前，宜对桥机轨道进行测量校正。

7.2.26 地下厂房顶部宜设置顶棚。顶棚设计应结合通风、防潮、防水、照明及装饰的需要综合考虑。顶棚应预留上人的通道。

7.2.27 地下厂房四周在需要时可设置防潮装饰隔墙。在隔墙底部宜设排水沟和便于清理的出口，并做好防潮处理和厂内排水系统设计。

7.2.28 地下厂房可采取下列构造措施提高抗振性能：

- 1 厂房楼板与风罩和边墙刚性连接，以提高整体刚度。
- 2 对结构断面变化部位、孔口附近等进行加强。
- 3 增加厂房楼板厚度，并加强梁、柱结构。

8 其他型式厂房的布置及结构设计

8.1 灯泡贯流式机组厂房

8.1.1 灯泡贯流式机组厂房布置除应符合常规厂房有关设计规定外，还应满足下列要求：

1 灯泡贯流式机组厂房的厂区布置宜满足河床式厂房的厂区布置原则，并根据水电站水头低的特点，合理布置进水渠（或前池）和尾水渠，使进出水流顺畅，尽量减少流态变化造成的动能损失，应避免尾水渠水位壅高。

2 在进水渠或进水口前宜设置拦沙坎或导沙墙，必要时设置排沙设施。

3 厂房进口段、出口段以及流道段水上结构的布置原则和要求与常规立轴机组河床式水电站基本相同。流道段水下部分结构根据过流要求、结构要求、机组安装要求等确定，流道的断面形状和尺寸应满足机组出力要求。

4 根据灯泡贯流式机组特点，厂房的主要尺寸基本由流道尺寸控制。机组流道尺寸由水轮发电机制造厂提供，前期缺乏厂家资料时，也可按经验公式估算。

5 厂内交通应满足防火安全疏散要求，自流道顶板通往水轮机井底部交通廊道的楼梯不宜少于2道。

6 进水口底板高程及淹没深度应符合 SL 285 的规定。进口前应设置拦污清污设施，水流过栅流速宜采用 $1.0 \sim 1.4 \text{ m/s}$ 。

7 尾水出口的淹没深度应大于 $v^2/2g$ (v 为尾水管出口断面的平均流速)，并不应小于 0.5 m 。

8 应结合机组防飞逸措施，合理选择闸门的型式和设置位置。

9 进厂交通可采用水平进厂或垂直进厂方式，但应经综合比较，择优选定。对高尾水位厂房，其进厂交通应有可靠的防洪和排水措施。

8.1.2 灯泡贯流式机组厂房结构设计除应符合地面厂房设计规定外，还应满足下列要求：

1 采用结构力学方法计算厂房水下结构时，应考虑节点刚度及剪切变形影响。

2 流道进水口段和尾水管段可切取单位宽度结构按弹性地基梁上的平面框架计算。

3 大、中型厂房流道中段除采用结构力学方法进行结构计算外，宜结合三维有限元分析成果进行结构设计。流道中段的荷载效应组合见表 8.1.2。

4 流道中段管形壳立柱与混凝土结合部位应力集中，结构配筋应予以加强。

表 8.1.2 流道中段荷载效应组合表

极限状态	荷载组合	计算工况	荷载名称							
			自重	水重	内水压力	外水压力	扬压力	机组作用力	温度	地震
承载能力 极限状态	基本组合	正常运行	√	√	√	√	√	√	√	—
		检修工况	√	—	—	√	√	—	√	—
	偶然组合	校核洪水	√	√	√	√	√	√	—	—
		地震	√	√	√	√	√	√	—	√
		飞逸	√	√	√	√	√	√	√	—
		短路	√	√	√	√	√	√	√	—
正常使用 极限状态	标准组合	正常运行	√	√	√	√	√	√	—	

8.1.3 灯泡贯流式机组的流道顶板厚度相对较薄时（水力梯度 $i \geq 20$ ），应进行裂缝开展宽度验算，最大裂缝宽度允许值 $\omega_{\max} \leq 0.20\text{mm}$ 。

8.2 水斗式机组厂房

8.2.1 水斗式水轮发电机组厂房布置除应符合常规厂房有关设

计规定之外，还应满足 8.2.2~8.2.5 条的要求。

8.2.2 卧式水斗水轮发电机组厂房布置应遵循下列原则：

- 1 机组轴线宜沿厂房纵向布置。
- 2 发电机定子为分瓣结构时，机组间距可由机组总长度和两台机组间的通道决定。发电机定子为整体结构时，还应满足抽轴长度的要求。
- 3 机组安装高程由设计最高尾水位、排出高度（指转轮下沿与尾水槽中最高水位之差）与 $1/2$ 转轮直径之和确定。
- 4 厂房宽度：根据机组尺寸、球阀及其控制机构、调速设备和电气设备、安全通道、墙柱厚度等，结合起重机工作范围线综合确定。

8.2.3 立式水斗式水轮发电机组厂房布置应遵循下列原则：

- 1 机组间距应根据引水管配水管尺寸、外包混凝土厚度、交通要求和发电机、电气设备的布置等确定。
- 2 安装高程由设计最高尾水位、排出高度和 $1/2$ 水斗宽度之和确定。

8.2.4 水斗式水轮机尾水槽设计应满足下列要求：

- 1 应保证转轮水斗在各种可能运行条件具有足够的通气净空。
- 2 在射流骤然偏转时，尾水槽内的涌浪水面不应超过转轮下沿。
- 3 尾水槽应具有消力池的功能，其边壁及底板应进行抗冲蚀设计。

8.2.5 引水管高压阀宜布置在主厂房外专设的阀室内，并满足阀门安装、检修要求。如设在主厂房内应加以论证。

8.2.6 水斗式机组厂房应设置取水口的拦沙和排沙设施，防止高压、高速泥沙对斗叶的冲蚀。

8.2.7 水斗式水轮发电机组厂房结构设计应满足下列要求：

- 1 配水管管外围混凝土结构型式与常规机组的金属蜗壳外围混凝土结构型式相似，分三种结构型式：垫层式、充水保压

式、直埋式。

2 下部结构包括配水环管、尾水流道、下部墙、厂房底板等。配水环管外围混凝土结构宜采用三维有限元分析计算。尾水流道结构可按平面框架计算内力和配筋。

8.3 坝内式厂房

8.3.1 坝内式厂房的空腔尺寸应根据坝型、坝高并结合主厂房布置需要，通过分析比较确定。

8.3.2 机组及其附属设备的选型和布置应与坝体空腔尺寸相适应。在满足水电站正常运行和维修的前提下，应尽量压缩厂房的高度和宽度。

8.3.3 坝内式厂房宜采用窄高型尾水管，坝趾处的坝体应力应控制在允许限度之内。

8.3.4 坝内式厂房的坝体横缝和机组段之间的变形缝等均应采取可靠的防渗措施。

8.3.5 坝内式厂房一般采用全封闭式，应统筹考虑通风、防潮、防噪、排水和照明等问题。

8.4 溢流式厂房

8.4.1 溢流式厂房厂坝连接方式，应根据厂坝的地基条件、坝型和坝高、坝及厂房的抗滑稳定性和抗振性能等因素，经技术经济综合论证确定。

8.4.2 溢流式厂房的结构设计，应进行静力和动力分析。可根据结构特点选择结构力学或有限元方法计算，必要时可进行结构模型试验。

厂房上部结构的自振频率应大于高速水流脉动优势频率20%以上，防止发生共振。对于大型机组尚应对振动反应进行复核。

8.4.3 溢流式厂房，除考虑常规厂房所需要考虑的荷载之外，尚应考虑下列荷载，其值及分布宜通过水力学模型试验分析

确定：

1 溢流或挑流时作用于厂房顶的动水压力（时均压力和脉动压力）。

2 溢流或挑流时尾水波动作用于下游墙上的动水压力（时均压力和脉动压力）。

3 水流摩阻力。

4 地基和坝体变形对厂房结构的影响。

8.4.4 厂顶溢流面曲线、导墙及尾坎的体型，应按照 SL 253 确定，并采取必要措施（如掺气减蚀、提高表面平整度等），避免气蚀破坏。

8.4.5 溢流式厂房机组进水口在溢流闸墩中或溢洪道之下时，应避免机组进水口的闸门、拦污栅和启闭机与溢洪道闸门干扰，以满足引水顺畅、泄洪安全和检修方便的要求。

8.4.6 溢流式厂房的坝体横缝、厂坝连接缝和机组段之间的变形缝等均应采取可靠的防渗措施。

9 建筑设计

9.1 厂区建筑规划

9.1.1 厂区建筑总体规划应根据厂区布置，注重与枢纽其他建筑物相互协调，厂区各单体建筑物间应统筹安排、合理布置，做到单体建筑与群体布置的统一；必要时，宜考虑水利风景区、城乡规划等要求。处于抗震设防区的水电站工程，厂区总体规划应明确工程紧急避难场所与应急疏散线路。

9.1.2 厂区建筑物的平面布置和空间组合，应功能分区明确，布置紧凑合理，满足安全运行，方便运行管理。

9.1.3 厂区建筑造型宜结合当地建筑风格、民俗文化，应与周围环境相协调。

9.1.4 厂区内应做好道路和给排水规划。

9.1.5 厂区应进行绿化美化。厂区主要出入口、主要建筑的周围、主干道两侧，宜列为绿化重点。

9.2 厂房建筑设计

9.2.1 厂房建筑设计应符合下列要求：

1 满足建筑功能和使用要求，做好保温、隔热、通风、日照、采光、照明等节能设计。

2 应注意造型，力求使用功能、结构技术和建筑艺术三者协调统一。

9.2.2 室内空间的尺度、各部件相互之间的比例关系、形状以及内饰颜色、材料质感与其间的设备，应保持有机的内在联系和外观统一。

主副厂房应以机电设备为主要表现对象，利用内饰和照明突出水电站厂房的特点。

9.2.3 力求减少厂内噪声源，对强噪声应采用消声和隔声处理；

有周期性机械振动部位，宜与其他部位脱开布置，当无法脱开时可采取适当减振和隔振措施。

9.2.4 主、副厂房建筑楼（地）面，应根据荷载类别、用途及美观要求进行设计，并应符合下列要求：

1 主厂房的楼（地）面应坚固耐久。发电机层、安装间应采用光滑不起尘，并易清除油污的地面。

2 有防酸要求的房间，应采用耐酸材料地面，并应有良好的通风、排水、防渗设施。

3 中央控制室地面宜防静电、防尘。

4 楼（地）面上吊物孔，开盖后应有临时防护设施；竖向楼梯井口须有凸沿和栏杆防护。

5 地锚宜做成暗式，卧入地面下，如有碍交通应加设盖板。

6 可能渗水、积水的部位均应有排水设施，保持地面沟槽整洁、排水畅通。

9.2.5 主、副厂房建筑采用的墙体材料应坚固、耐用、施工方便，并满足下列要求：

1 有洁净、防污染和检修需要的建筑部位应设具有防护功能的墙裙。

2 有耐酸要求的室内墙面应严密无缝，并喷涂耐酸漆或粘贴耐酸瓷砖等材料。

3 室内有防潮要求的墙体应选择不易吸潮、不结露的材料，或采用防潮夹层。

4 中央控制室墙面色彩宜与照明相协调，提供舒适的运行环境。

5 内墙面应平整、明亮和不挂灰、掉灰。

9.2.6 主机间、中央控制室和其他重要的建筑部位宜根据防水、防潮、通风、照明、吸声减噪和美观等需要设置吊顶，吊顶结构宜采用轻型结构，应满足安全、耐久、防火等要求。

9.2.7 主副厂房门窗应坚固耐用、开启方便、经济美观，满足保温、防尘、防虫、隔音、易清洁等要求，朝向西的窗口宜设遮

阳板，并应符合下列要求：

1 门的尺寸与开启形式应根据设备安装、检修、搬运以及其他功能需要确定，手动开启的大门扇，应有制动装置。运输大型设备的门，宜采用卷帘门。

2 开向疏散走道及楼梯间的门扇，不应影响走道及楼梯平台的疏散宽度。

3 有防酸要求的室内不应采用空腹门窗，阳光能直射入的窗户宜用磨砂玻璃。有防火要求的房间，应采用防火门窗。

4 主厂房的高侧窗，宜有便于维修和清扫的条件。

5 中央控制室如设有面向主机间的观察窗，宜采用安全玻璃。

6 开向公共通道的平开窗，其窗扇底部距楼面、地面的高度不应小于2m。

7 天窗应采用防破碎的透光材料或设安全网，并应有防止冷凝水产生或设引泄冷凝水的措施。

9.2.8 厂区内其他建筑物，应按照其功能和使用要求，做好相应的建筑设计。

10 安全监测设计

10.1 一般规定

10.1.1 水电站厂房应根据建筑物级别、厂房类型、结构特性及地基条件等，设置必要的安全监测项目和设施。

10.1.2 水电站主厂房安全监测设计的布置应符合下列要求：

1 监测断面选择及测点布置，应与拦河坝、引水道等枢纽建筑物统一考虑，应少而精，重点突出，兼顾全面，能反映厂房建筑物及结构的实际工作状态；相关项目应统筹安排，配合布置，要求各物理量监测值能互相校核。

2 在满足精度要求的前提下，要求监测仪器可靠、耐久、实用、先进，应便于实现监测自动化。

3 应排除和避免环境因素（如基点不稳、折光、气流等）影响监测精度。

4 监测设施应有必要的保护设备，并便于施工、安装和维修。

10.1.3 对监控建筑物安全运行的主要监测项目和测点，宜集中、远传引至中央控制室（或机旁盘）进行遥测。有条件时宜建立监测自动化系统，同时应具备人工监测的条件。

10.1.4 对主要的安全监测项目及测点，宜提出监测值的预计变化范围；对关键部位测值，宜提出设计监控指标。

10.2 监测项目

10.2.1 水电站厂房建筑物的监测应设置建筑物的水平位移、垂直位移、接缝裂缝、基础扬压力和渗流量等监测。

10.2.2 厂地质质条件不良的地基，应根据基础处理设计，设置必要的地基应力和地基变形监测项目。

10.2.3 对具有承压含水层的厂房地基和含有深层滑动面的厂房

地基。除监测沿建筑物基础面的扬压力外，应同时设深层渗压监测项目。

10.2.4 对厂区边坡稳定性监测，应根据其水文及工程地质条件和工程防护设计，设置必要的位移、裂缝、地下水位及加固工程的应力应变等监测项目，必要时可以设渗流量及地应力等监测项目。

10.2.5 水位、流量、泥沙等监测应与水电站的水情测验、水力监测项目相配合。若枢纽其他建筑物或机电设备设有这些监测项目，则不必重复设置。

10.2.6 根据设计、科研及监控结构安全的需要，对厂房部分结构可设置应力应变、温度和振动等监测。

10.2.7 地下厂房主洞室，应根据围岩特性和支护设计，设置洞室围岩压力、围岩变形、围岩与衬砌接触缝、伸缩缝，支护结构应力应变，地下水位、外水压力及渗流量等监测项目。

10.2.8 岩锚式吊车梁宜设置变形监测、吊车梁与岩面接触缝监测、锚杆（索）应力应变监测等项目。

10.2.9 溢流式厂房可视技术条件增设溢流水力学和结构振动特性专项监测项目。

10.2.10 各类水电站厂房的安全监测项目应符合表 10.2.10 的规定。

表 10.2.10 水电站厂房安全监测项目设置

厂房类别	监测类别	监测项目	厂房级别		
			1	2	3
河床式 厂房	变形	水平位移	▲	▲	▲
		垂直位移	▲	▲	▲
		倾斜	▲	△	△
		接缝、裂缝	▲	▲	▲
		地基变形	▲	△	△
	渗流	扬压力	▲	▲	▲
		渗流量	▲	▲	▲

表10.2.10(续)

厂房类别	监测类别	监测项目	厂房级别		
			1	2	3
河床式 厂房	应力、应变及温度	应力	▲	△	△
		应变	▲	▲	△
		混凝土温度	△	△	—
		厂基温度	△	△	—
	地震反应	地震反应	△	△	△
	环境量	上游淤积	△	△	△
下游冲淤		△	△	—	
坝后式 厂房	变形	水平位移	△	△	△
		垂直位移	▲	▲	▲
		倾斜	△	△	—
		接缝	▲	▲	△
		裂缝	▲	▲	▲
		基岩变形	△	△	—
	渗流	扬压力	▲	▲	▲
		渗流量	▲	▲	▲
	应力、应变及温度	应力	▲	△	△
		应变	▲	▲	△
		混凝土温度	△	△	—
厂基温度		△	△	—	
地震反应	地震反应	△	△	△	
岸边式 厂房	变形	水平位移	△	△	△
		垂直位移	▲	▲	▲
		倾斜	△	△	—
		接缝、裂缝	▲	▲	▲
		地基变形	△	△	△

表10.2.10(续)

厂房类别	监测类别	监测项目	厂房级别		
			1	2	3
岸边式 厂房	渗流	扬压力	▲	▲	▲
		渗流量	△	△	△
	应力、应变及温度	应力	▲	△	△
		应变	▲	▲	△
		混凝土温度	△	△	—
	地震反应	地震反应	△	△	△
地下厂房	变形	围岩变形	▲	▲	▲
		围岩与衬砌接触缝	▲	▲	▲
		接缝、裂缝	▲	▲	△
	渗流	地下水位	▲	▲	△
		渗流量	▲	▲	△
	应力、应变及温度	锚杆、锚索应力	▲	▲	▲
		钢筋混凝土衬砌应力	▲	▲	▲
		围岩压力	▲	△	△
		温度	△	△	△
	注：▲为应设监测项目；△为根据工程需要可选监测项目。				

附录 A 厂房深层抗滑稳定计算

A.0.1 岩基上的厂房地基内部存在缓倾角结构面时，可根据地质资料概化为单滑动面、双滑动面和多滑动面，进行深层抗滑稳定分析。岩基上的厂房深层抗滑稳定可采用刚体极限平衡等安全系数法计算。厂房深层抗滑稳定宜采用抗剪断强度公式计算。对于采取工程措施后应用抗剪断强度公式计算仍不满足表 5.3.4 要求的坝段，可采用抗剪强度公式 (A.0.2-2)、公式 (A.0.3-4) ~ 公式 (A.0.3-6) 计算抗滑稳定安全系数。其安全系数指标可经论证确定。

A.0.2 当厂房地基深层滑动面为单面滑动时 (见图 A.0.2)，其抗滑安全系数可按公式 (A.0.2-1) 计算。

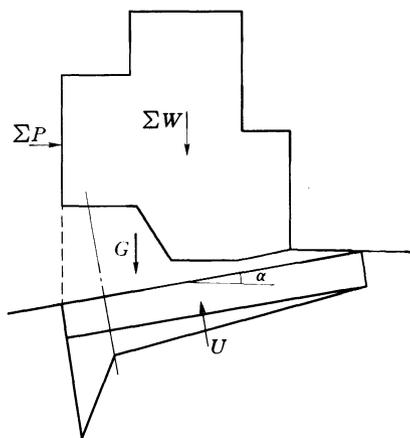


图 A.0.2 单面滑动示意图

1 抗剪断强度计算公式。抗剪断强度抗滑稳定安全系数可按公式 (A.0.2-1) 计算：

$$K' = \frac{f'[(\Sigma W + G)\cos\alpha - \Sigma P\sin\alpha - U] + c'A}{(\Sigma W + G)\sin\alpha + \Sigma P\cos\alpha} \quad (\text{A.0.2-1})$$

- 式中 K' ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；
 f' ——滑动面的抗剪断摩擦系数；
 c' ——滑动面的抗剪断凝聚力，kPa；
 ΣW ——竖向力之和，kN；
 G ——滑动面以上的岩体重量（力），kN；
 ΣP ——水平力之和，kN；
 α ——滑动面倾角，当滑动面倾向下游时，为正值；当滑动面倾向上游时，为负值，(°)；
 U ——作用在滑动面上的扬压力，kN；
 A ——滑动面的计算截面积， m^2 。

2 抗剪强度计算公式。抗剪强度抗滑稳定安全系数可按公式 (A.0.2-2) 计算：

$$K = \frac{f[(\Sigma W + G)\cos\alpha - \Sigma P\sin\alpha - U]}{(\Sigma W + G)\sin\alpha + \Sigma P\cos\alpha} \quad (\text{A.0.2-2})$$

- 式中 K ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；
 f ——滑动面的抗剪摩擦系数。

A.0.3 当厂房地基深层滑动面为双面滑动时（见图 A.0.3），其抗滑稳定安全系数可按下列方法计算：

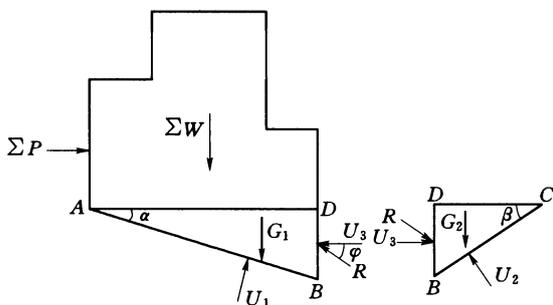


图 A.0.3 双面滑动示意图

1 抗剪断强度计算公式：

$$K'_1 = \frac{f'_1[(\Sigma W + G_1)\cos\alpha + U_3\sin\alpha - \Sigma P\sin\alpha - R\sin(\varphi - \alpha) - U_1] + c'_1 A_1}{(\Sigma W + G_1)\sin\alpha + \Sigma P\cos\alpha - R\cos(\varphi - \alpha) - U_3\cos\alpha} \quad (\text{A.0.3-1})$$

$$K'_2 = \frac{f'_2 [R \sin(\varphi + \beta) + G_2 \cos\beta + U_3 \sin\beta - U_2] + c'_2 A_2}{R \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin\beta + U_3 \cos\beta} \quad (\text{A. 0. 3 - 2})$$

$$K' = K'_1 = K'_2 \quad (\text{A. 0. 3 - 3})$$

式中 K' ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；

K'_1 、 K'_2 ——AB、BC 滑动面按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；

f'_1 、 f'_2 ——AB、BC 滑动面的抗剪断摩擦系数；

c'_1 、 c'_2 ——AB、BC 滑动面的抗剪断凝聚力，kPa；

G_1 、 G_2 ——AB、BC 面以上的岩体重量（力），kN；

U_1 、 U_2 ——AB、BC 面上的扬压力，kN；

A_1 、 A_2 ——AB、BC 滑动面的计算截面积， m^2 ；

α 、 β ——AB、BC 滑动面与水平面的夹角， $(^\circ)$ ；

U_3 ——BD 面上的扬压力，kN；

R ——下游岩体抗力，kN；

φ ——抗力与水平面的夹角，偏安全计可取 $\varphi=0^\circ$ 。

2 抗剪强度计算公式。抗剪强度抗滑稳定安全系数可按公式 (A. 0. 3 - 4) ~ 公式 (A. 0. 3 - 6) 计算：

$$K_1 = \frac{f_1 [(\sum W + G_1) \cos\alpha + U_3 \sin\alpha - \sum P \sin\alpha - R \sin(\varphi - \alpha) - U_1]}{(\sum W + G_1) \sin\alpha + \sum P \cos\alpha - R \cos(\varphi - \alpha) - U_3 \cos\alpha} \quad (\text{A. 0. 3 - 4})$$

$$K_2 = \frac{f_2 [R \sin(\varphi + \beta) + G_2 \cos\beta + U_3 \sin\beta - U_2]}{R \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin\beta + U_3 \cos\beta} \quad (\text{A. 0. 3 - 5})$$

$$K = K_1 = K_2 \quad (\text{A. 0. 3 - 6})$$

式中 K ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；

f_1 、 f_2 ——AB、BC 滑动面的抗剪摩擦系数；

K_1 、 K_2 ——AB、BC 滑动面按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数。

附录 B 圆筒式风罩内力计算

B.0.1 圆筒式风罩的内力可根据风罩支承条件和所受作用，按表 B.0.1-1~表 B.0.1-3 中的公式查表计算。

B.0.2 圆筒式风罩内力计算符号含义和正负号规定：

M_x ——竖向弯矩标准值，外壁受拉力为正， $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ；

M_θ ——环向弯矩标准值，外壁受拉力为正， $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ；

N_θ ——环向力标准值，受拉力为正， kN/m ；

V_x ——剪力标准值，向外为正， kN/m ；

M_0 ——外力矩标准值，外壁受拉力为正， $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ；

t_R ——均匀温差，温升为正， $^\circ\text{C}$ ；

Δt ——内外温差，等于外壁温度减内壁温度， $^\circ\text{C}$ ；

α_t ——混凝土温度线膨胀系数， $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

E_c ——混凝土弹性模量， kN/m^2 ；

ν_c ——混凝土泊松比；

H ——风罩圆筒高， m ；

h ——风罩圆筒厚度， m ；

d ——风罩圆筒中心直径， m ；

R ——风罩圆筒半径， m ；

K_{M_x} ——竖向弯矩系数；

K_{N_θ} ——环向力系数；

K_{V_x} ——剪力系数。

表 B.0.1-1 圆筒式风罩内力计算表

H^2/dh	竖向弯矩系数 K_{M_x}										
	x/H										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	1.0000	0.7474	0.5200	0.3303	0.1812	0.0691	-0.0128	-0.0731	-0.1199	-0.1600	-0.1982
2.5	1.0000	0.7171	0.4687	0.2708	0.1253	0.0259	-0.0372	-0.0753	-0.0983	-0.1141	-0.1279
3.0	1.0000	0.6900	0.4243	0.2212	0.0809	-0.0062	-0.0536	-0.0745	-0.0803	-0.0792	-0.0763
3.5	1.0000	0.6659	0.3859	0.1802	0.0463	-0.0293	-0.0635	-0.0715	-0.0656	-0.0537	-0.0402
4.0	1.0000	0.6441	0.3523	0.1460	0.0194	-0.0453	-0.0685	-0.0670	-0.0535	-0.0352	-0.0160
4.5	1.0000	0.6240	0.3225	0.1173	-0.0014	-0.0560	-0.0699	-0.0616	-0.0434	-0.0221	-0.0003
5.0	1.0000	0.6055	0.2957	0.0928	-0.0176	-0.0628	-0.0689	-0.0556	-0.0351	-0.0129	0.0092
5.5	1.0000	0.5881	0.2714	0.0717	-0.0304	-0.0667	-0.0663	-0.0496	-0.0281	-0.0064	0.0146
6.0	1.0000	0.5716	0.2492	0.0534	-0.0403	-0.0685	-0.0626	-0.0436	-0.0222	-0.0020	0.0172
6.5	1.0000	0.5561	0.2288	0.0374	-0.0480	-0.0688	-0.0584	-0.0379	-0.0173	0.0009	0.0179
7.0	1.0000	0.5413	0.2099	0.0234	-0.0540	-0.0680	-0.0538	-0.0326	-0.0132	0.0028	0.0174
7.5	1.0000	0.5272	0.1924	0.0111	-0.0585	-0.0663	-0.0492	-0.0277	-0.0098	0.0040	0.0162
8.0	1.0000	0.5137	0.1762	0.0003	-0.0619	-0.0642	-0.0446	-0.0233	-0.0070	0.0047	0.0146

边界条件：上端筒支、下端固定

荷载情况：上端作用力矩 M_0

计算公式： $M_x = K_{M_x} M_0$ $M_0 = \nu_c M_x$
 $N_0 = K_{N_0} \frac{M_0}{h}$ $V_x = K_{V_x} \frac{M_0}{H}$

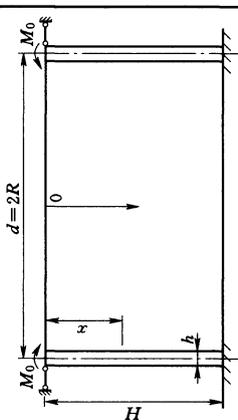


表 B.0.1-1 (续)

H^2/dh		环向力系数 K_{No}										
		x/H										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	0.0000	0.6567	0.9637	1.0265	0.9335	0.7545	0.5421	0.3348	0.1612	0.0433	0.0000	0.0000
2.5	0.0000	0.7256	1.0312	1.0609	0.9300	0.7238	0.5006	0.2979	0.1384	0.0359	0.0000	0.0000
3.0	0.0000	0.7770	1.0683	1.0589	0.8909	0.6632	0.4375	0.2479	0.1095	0.0270	0.0000	0.0000
3.5	0.0000	0.8177	1.0878	1.0377	0.8354	0.5913	0.3684	0.1956	0.0803	0.0182	0.0000	0.0000
4.0	0.0000	0.8516	1.0969	1.0067	0.7739	0.5181	0.3014	0.1467	0.0538	0.0104	0.0000	0.0000
4.5	0.0000	0.8808	1.0995	0.9711	0.7118	0.4484	0.2404	0.1039	0.0312	0.0040	0.0000	0.0000
5.0	0.0000	0.9063	1.0976	0.9334	0.6518	0.3846	0.1868	0.0677	0.0129	-0.0010	0.0000	0.0000
5.5	0.0000	0.9289	1.0925	0.8951	0.5951	0.3271	0.1409	0.0381	-0.0014	-0.0049	0.0000	0.0000
6.0	0.0000	0.9491	1.0849	0.8569	0.5420	0.2760	0.1021	0.0145	-0.0121	-0.0075	0.0000	0.0000
6.5	0.0000	0.9671	1.0754	0.8191	0.4927	0.2310	0.0699	-0.0037	-0.0199	-0.0093	0.0000	0.0000
7.0	0.0000	0.9832	1.0642	0.7821	0.4469	0.1914	0.0433	-0.0176	-0.0250	-0.0103	0.0000	0.0000
7.5	0.0000	0.9977	1.0516	0.7460	0.4046	0.1568	0.0216	-0.0278	-0.0281	-0.0106	0.0000	0.0000
8.0	0.0000	1.0106	1.0380	0.7109	0.3655	0.1265	0.0041	-0.0349	-0.0297	-0.0106	0.0000	0.0000

表 B.0.1-1 (续)

		剪力系数 K_{Vx}										
		x/H										
H^2/dh	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
2.0	-2.5759	-2.4310	-2.0970	-1.6924	-1.2965	-0.9570	-0.6972	-0.5225	-0.4248	-0.3861	-0.3802	
2.5	-2.8997	-2.6975	-2.2439	-1.7120	-1.2096	-0.7943	-0.4884	-0.2902	-0.1832	-0.1422	-0.1361	
3.0	-3.1918	-2.9292	-2.3562	-1.7070	-1.1169	-0.6495	-0.3204	-0.1171	-0.0126	0.0255	0.0309	
3.5	-3.4560	-3.1303	-2.4386	-1.6815	-1.0208	-0.5213	-0.1877	0.0063	0.0995	0.1312	0.1354	
4.0	-3.6983	-3.3067	-2.4968	-1.6403	-0.9233	-0.4077	-0.0836	0.0913	0.1677	0.1907	0.1933	
4.5	-3.9235	-3.4636	-2.5359	-1.5875	-0.8262	-0.3067	-0.0019	0.1477	0.2043	0.2176	0.2185	
5.0	-4.1358	-3.6046	-2.5598	-1.5264	-0.7308	-0.2170	0.0620	0.1831	0.2190	0.2226	0.2218	
5.5	-4.3363	-3.7327	-2.5717	-1.4596	-0.6384	-0.1375	0.1118	0.2034	0.2190	0.2134	0.2112	
6.0	-4.5283	-3.8498	-2.5737	-1.3890	-0.5499	-0.0673	0.1501	0.2126	0.2094	0.1959	0.1924	
6.5	-4.7126	-3.9574	-2.5675	-1.3162	-0.4658	-0.0057	0.1791	0.2141	0.1942	0.1738	0.1693	
7.0	-4.8900	-4.0565	-2.5545	-1.2423	-0.3865	0.0478	0.2003	0.2100	0.1758	0.1501	0.1448	
7.5	-5.0613	-4.1481	-2.5358	-1.1682	-0.3123	0.0942	0.2151	0.2021	0.1560	0.1263	0.1205	
8.0	-5.2272	-4.2328	-2.5123	-1.0946	-0.2432	0.1338	0.2246	0.1916	0.1362	0.1037	0.0976	

表 B.0.1-2 圆筒式风罩内力计算表

H^2/dh	竖向弯矩系数 K_{Mx}										
	x/H										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	0.0000	0.0196	0.0313	0.0369	0.0376	0.0338	0.0253	0.0115	-0.0089	-0.0376	-0.0755
2.5	0.0000	0.0164	0.0254	0.0293	0.0294	0.0265	0.0204	0.0099	-0.0062	-0.0300	-0.0630
3.0	0.0000	0.0138	0.0207	0.0232	0.0230	0.0208	0.0164	0.0087	-0.0040	-0.0240	-0.0530
3.5	0.0000	0.0118	0.0171	0.0186	0.0181	0.0164	0.0133	0.0076	-0.0024	-0.0194	-0.0452
4.0	0.0000	0.0103	0.0144	0.0150	0.0143	0.0130	0.0109	0.0068	-0.0012	-0.0158	-0.0391
4.5	0.0000	0.0091	0.0122	0.0123	0.0114	0.0104	0.0091	0.0062	-0.0003	-0.0130	-0.0344
5.0	0.0000	0.0082	0.0105	0.0102	0.0092	0.0084	0.0076	0.0056	0.0003	-0.0108	-0.0306
5.5	0.0000	0.0075	0.0092	0.0085	0.0074	0.0068	0.0064	0.0051	0.0008	-0.0091	-0.0275
6.0	0.0000	0.0069	0.0081	0.0072	0.0060	0.0055	0.0055	0.0047	0.0012	-0.0076	-0.0250
6.5	0.0000	0.0064	0.0073	0.0061	0.0049	0.0045	0.0047	0.0044	0.0015	-0.0065	-0.0229
7.0	0.0000	0.0059	0.0066	0.0053	0.0040	0.0037	0.0040	0.0040	0.0018	-0.0056	-0.0211
7.5	0.0000	0.0056	0.0060	0.0045	0.0033	0.0030	0.0035	0.0038	0.0019	-0.0048	-0.0196
8.0	0.0000	0.0053	0.0055	0.0039	0.0027	0.0024	0.0030	0.0035	0.0020	-0.0041	-0.0183

边界条件：上端筒支、下端固定

荷载情况：均匀温差 t_R

计算公式： $M_x = K_{Mx} P_1 H^2$ $M_0 = \nu_c M_x$ $N_0 = (K_{N0} - 1) P_1 R$

$V_x = K_{Vx} P_1 H$ $P_1 = \frac{E t_R t_R}{R}$

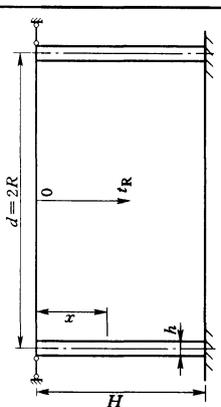


表 B.0.1-2 (续)

		环向力系数 K_{Ng}										
		x/H										
H^2/dh	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
2.0	0.0000	0.2127	0.3900	0.5097	0.5611	0.5429	0.4623	0.3352	0.1875	0.0579	0.0000	
2.5	0.0000	0.2673	0.4885	0.6368	0.7004	0.6788	0.5805	0.4236	0.2391	0.0746	0.0000	
3.0	0.0000	0.3110	0.5663	0.7359	0.8086	0.7850	0.6746	0.4961	0.2829	0.0893	0.0000	
3.5	0.0000	0.3458	0.6268	0.8114	0.8903	0.8660	0.7481	0.5550	0.3200	0.1024	0.0000	
4.0	0.0000	0.3737	0.6739	0.8686	0.9514	0.9271	0.8056	0.6033	0.3521	0.1142	0.0000	
4.5	0.0000	0.3965	0.7110	0.9120	0.9968	0.9732	0.8509	0.6435	0.3803	0.1251	0.0000	
5.0	0.0000	0.4157	0.7409	0.9451	1.0304	1.0078	0.8868	0.6776	0.4058	0.1354	0.0000	
5.5	0.0000	0.4324	0.7655	0.9706	1.0552	1.0338	0.9156	0.7072	0.4292	0.1453	0.0000	
6.0	0.0000	0.4472	0.7861	0.9904	1.0733	1.0532	0.9390	0.7331	0.4510	0.1549	0.0000	
6.5	0.0000	0.4607	0.8039	1.0060	1.0864	1.0675	0.9581	0.7562	0.4715	0.1643	0.0000	
7.0	0.0000	0.4732	0.8196	1.0183	1.0955	1.0779	0.9738	0.7771	0.4911	0.1736	0.0000	
7.5	0.0000	0.4851	0.8336	1.0281	1.1016	1.0851	0.9868	0.7961	0.5098	0.1828	0.0000	
8.0	0.0000	0.4965	0.8464	1.0360	1.1054	1.0899	0.9976	0.8135	0.5279	0.1918	0.0000	

表 B.0.1-2 (续)

H^2/dh		剪力系数 K_{Vx}										
		x/H										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	0.2428	0.1536	0.0842	0.0297	-0.0161	-0.0603	-0.1096	-0.1694	-0.2432	-0.3313	-0.4293	
2.5	0.2095	0.1231	0.0614	0.0183	-0.0140	-0.0443	-0.0808	-0.1302	-0.1970	-0.2817	-0.3791	
3.0	0.1832	0.0990	0.0435	0.0094	-0.0124	-0.0320	-0.0583	-0.0993	-0.1603	-0.2421	-0.3389	
3.5	0.1629	0.0805	0.0299	0.0026	-0.0113	-0.0226	-0.0412	-0.0755	-0.1316	-0.2110	-0.3073	
4.0	0.1472	0.0663	0.0195	-0.0024	-0.0105	-0.0157	-0.0283	-0.0572	-0.1093	-0.1864	-0.2824	
4.5	0.1350	0.0552	0.0115	-0.0063	-0.0099	-0.0105	-0.0185	-0.0432	-0.0917	-0.1669	-0.2624	
5.0	0.1254	0.0466	0.0054	-0.0092	-0.0094	-0.0067	-0.0111	-0.0322	-0.0777	-0.1511	-0.2463	
5.5	0.1176	0.0398	0.0007	-0.0113	-0.0091	-0.0038	-0.0055	-0.0237	-0.0665	-0.1381	-0.2329	
6.0	0.1113	0.0343	-0.0028	-0.0129	-0.0088	-0.0017	-0.0013	-0.0169	-0.0572	-0.1273	-0.2217	
6.5	0.1061	0.0298	-0.0057	-0.0141	-0.0086	-0.0001	-0.0019	-0.0115	-0.0496	-0.1181	-0.2121	
7.0	0.1017	0.0261	-0.0079	-0.0149	-0.0083	0.0010	0.0043	-0.0072	-0.0432	-0.1102	-0.2039	
7.5	0.0979	0.0229	-0.0097	-0.0154	-0.0081	0.0018	0.0061	-0.0038	-0.0378	-0.1033	-0.1966	
8.0	0.0946	0.0203	-0.0111	-0.0157	-0.0079	0.0024	0.0075	-0.0010	-0.0331	-0.0972	-0.1902	

表 B.0.1-3 圆筒式风罩内力计算表

H^2/dh	竖向弯矩系数 K_{M_x}										
	x/H										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	0.0000	-0.2525	-0.4799	-0.6696	-0.8187	-0.9308	-1.0128	-1.0731	-1.1199	-1.1600	-1.1982
2.5	0.0000	-0.2828	-0.5312	-0.7291	-0.8746	-0.9740	-1.0372	-1.0753	-1.0983	-1.1141	-1.1279
3.0	0.0000	-0.3099	-0.5756	-0.7787	-0.9190	-1.0062	-1.0536	-1.0745	-1.0803	-1.0792	-1.0763
3.5	0.0000	-0.3340	-0.6140	-0.8197	-0.9536	-1.0293	-1.0635	-1.0715	-1.0656	-1.0537	-1.0402
4.0	0.0000	-0.3558	-0.6467	-0.8539	-0.9805	-1.0453	-1.0685	-1.0670	-1.0535	-1.0352	-1.0160
4.5	0.0000	-0.3759	-0.6774	-0.8826	-1.0014	-1.0560	-1.0699	-1.0616	-1.0434	-1.0221	-1.0003
5.0	0.0000	-0.3944	-0.7042	-0.9071	-1.0176	-1.0628	-1.0689	-1.0556	-1.0351	-1.0129	-0.9907
5.5	0.0000	-0.4118	-0.7285	-0.9282	-1.0304	-1.0667	-1.0663	-1.0496	-1.0281	-1.0064	-0.9853
6.0	0.0000	-0.4283	-0.7507	-0.9465	-1.0403	-1.0685	-1.0626	-1.0436	-1.0222	-1.0020	-0.9827
6.5	0.0000	-0.4438	-0.7711	-0.9625	-1.0480	-1.0688	-1.0584	-1.0379	-1.0173	-0.9990	-0.9820
7.0	0.0000	-0.4586	-0.7900	-0.9765	-1.0540	-1.0680	-1.0538	-1.0326	-1.0132	-0.9971	-0.9825
7.5	0.0000	-0.4727	-0.8075	-0.9888	-1.0585	-1.0663	-1.0492	-1.0277	-1.0098	-0.9959	-0.9837
8.0	0.0000	-0.4862	-0.8237	-0.9996	-1.0619	-1.0642	-1.0446	-1.0233	-1.0070	-0.9952	-0.9853

边界条件：上端筒支、下端固定

荷载情况：内外温差 Δt

计算公式： $M_x = K_{M_x} M_t$ $M_\theta = \nu_c (K_{M_x} - 5) M_t$ $N_\theta = K_{N_\theta} \frac{M_t}{h}$

$V_x = K_{V_x} \frac{M_t}{H}$ $M_t = 0.1 E_c h^2 \alpha_t \Delta t$

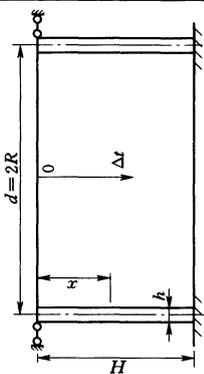


表 B.0.1-3 (续)

H^2/dh		环向力系数 $K_{\Sigma 0}$										
		x/H										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	0.0000	0.6567	0.9637	1.0265	0.9335	0.7545	0.5421	0.3348	0.1612	0.0433	0.0000	
2.5	0.0000	0.7256	1.0312	1.0609	0.9300	0.7238	0.5006	0.2979	0.1384	0.0359	0.0000	
3.0	0.0000	0.7770	1.0683	1.0589	0.8909	0.6632	0.4375	0.2479	0.1095	0.0270	0.0000	
3.5	0.0000	0.8177	1.0878	1.0377	0.8354	0.5913	0.3684	0.1956	0.0803	0.0182	0.0000	
4.0	0.0000	0.8516	1.0969	1.0067	0.7739	0.5181	0.3014	0.1467	0.0538	0.0104	0.0000	
4.5	0.0000	0.8808	1.0995	0.9711	0.7118	0.4484	0.2404	0.1039	0.0312	0.0040	0.0000	
5.0	0.0000	0.9063	1.0976	0.9334	0.6518	0.3846	0.1868	0.0677	0.0129	-0.0010	0.0000	
5.5	0.0000	0.9289	1.0925	0.8951	0.5951	0.3271	0.1409	0.0381	-0.0014	-0.0049	0.0000	
6.0	0.0000	0.9491	1.0849	0.8569	0.5420	0.2760	0.1021	0.0145	-0.0121	-0.0075	0.0000	
6.5	0.0000	0.9671	1.0754	0.8191	0.4927	0.2310	0.0699	-0.0037	-0.0199	-0.0093	0.0000	
7.0	0.0000	0.9832	1.0642	0.7821	0.4469	0.1914	0.0433	-0.0176	-0.0250	-0.0103	0.0000	
7.5	0.0000	0.9977	1.0516	0.7460	0.4046	0.1568	0.0216	-0.0278	-0.0281	-0.0106	0.0000	
8.0	0.0000	1.0106	1.0380	0.7109	0.3655	0.1265	0.0041	-0.0349	-0.0297	-0.0106	0.0000	

表 B.0.1-3 (续)

H^2/dh_i		剪力系数 K_{Vx}												
		x/H												
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
2.0	-2.5759	-2.4310	-2.0970	-1.6924	-1.2965	-0.9570	-0.6972	-0.5225	-0.4248	-0.3861	-0.3802			
2.5	-2.8997	-2.6975	-2.2439	-1.7120	-1.2096	-0.7943	-0.4884	-0.2902	-0.1832	-0.1422	-0.1361			
3.0	-3.1918	-2.9292	-2.3562	-1.7070	-1.1169	-0.6495	-0.3204	-0.1171	-0.0126	0.0255	0.0309			
3.5	-3.4560	-3.1303	-2.4386	-1.6815	-1.0208	-0.5213	-0.1877	0.0063	0.0995	0.1312	0.1354			
4.0	-3.6983	-3.3067	-2.4968	-1.6403	-0.9233	-0.4077	-0.0836	0.0913	0.1677	0.1907	0.1933			
4.5	-3.9235	-3.4636	-2.5359	-1.5875	-0.8262	-0.3067	-0.0019	0.1477	0.2043	0.2176	0.2185			
5.0	-4.1353	-3.6046	-2.5598	-1.5264	-0.7308	-0.2170	0.0620	0.1831	0.2190	0.2226	0.2218			
5.5	-4.3363	-3.7327	-2.5717	-1.4596	-0.6384	-0.1375	0.1118	0.2034	0.2190	0.2134	0.2112			
6.0	-4.5283	-3.8498	-2.5737	-1.3890	-0.5499	-0.0673	0.1501	0.2126	0.2094	0.1959	0.1924			
6.5	-4.7126	-3.9574	-2.5675	-1.3162	-0.4658	-0.0057	0.1791	0.2141	0.1942	0.1738	0.1693			
7.0	-4.8900	-4.0565	-2.5545	-1.2423	-0.3865	0.0478	0.2003	0.2100	0.1758	0.1501	0.1448			
7.5	-5.0613	-4.1481	-2.5358	-1.1682	-0.3123	0.0942	0.2151	0.2021	0.1560	0.1263	0.1205			
8.0	-5.2272	-4.2328	-2.5123	-1.0946	-0.2432	0.1338	0.2246	0.1916	0.1362	0.1037	0.0976			

附录 C 机墩动力计算

C.1 强迫振动频率

C.1.1 机组转动部分偏心引起的振动频率 n_1 (r/min) 可按式 (C.1.1) 计算：

$$n_1 = n(\text{或 } n_p) \quad (\text{C.1.1})$$

式中 n ——发电机额定转速，r/min；

n_p ——飞逸转速，r/min。

C.1.2 水力冲击引起的振动频率 n_2 (r/min) 可按式 (C.1.2) 计算：

$$n_2 = \frac{nx_1x_2}{a} \quad (\text{C.1.2})$$

式中 x_1 、 x_2 ——导叶叶片和转轮叶片之片数；

a —— x_1 与 x_2 两数的最大公约数。

C.1.3 转轮叶片通过频率可按式 (C.1.3) 计算：

$$n_2 = nx_2 \quad (\text{C.1.3})$$

C.2 机墩自振频率

C.2.1 机墩自振频率分垂直、水平和扭转三种。

C.2.2 垂直自振频率 n_{01} (r/min) 可按式 (C.2.2-1) 和式 (C.2.2-2) 计算：

$$n_{01} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{G_1 \delta_1}} = \frac{30}{\sqrt{G_1 \delta_1}} \quad (\text{C.2.2-1})$$

$$G_1 = \sum P_i + P_0 + P_a \quad (\text{C.2.2-2})$$

式中 G_1 ——作用于机墩上的全部垂直荷载，kN；

$\sum P_i$ ——机组垂直荷载（不计动力系数），kN；

P_0 ——机墩自重，kN；

P_a ——蜗壳顶板重，kN；

δ_1 ——单位垂直力作用下的结构垂直变位（包括机墩压缩变位和蜗壳顶板垂直变位），m/kN。

C. 2.3 水平横向自振频率 n_{02} (r/min) 可按式 (C. 2.3-1) 和式 (C. 2.3-2) 计算：

$$n_{02} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{G_2 \delta_2}} = \frac{30}{\sqrt{G_2 \delta_2}} \quad (\text{C. 2.3-1})$$

$$G_2 = \sum P'_i + 0.35P_0 \quad (\text{C. 2.3-2})$$

式中 G_2 ——相当于集中在机墩顶端的当量荷载，kN；

$\sum P'_i$ ——作用在机墩顶端的垂直荷载，kN；

P_0 ——机墩自重，kN；

δ_2 ——机墩顶端作用单位水平力时的水平变位，m/kN。

C. 2.4 水平扭转自振频率 n_{03} (r/min) 可按式 (C. 2.4-1) ~ 式 (C. 2.4-5) 计算：

$$n_{03} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{I_\varphi \Phi_1}} = \frac{30}{\sqrt{I_\varphi \Phi_1}} \quad (\text{C. 2.4-1})$$

$$I_\varphi = \sum P_i r_i^2 + 0.35P_0 r_0^2 \quad (\text{C. 2.4-2})$$

$$\Phi_1 = \frac{H_j}{GI_p} \quad (\text{C. 2.4-3})$$

$$G = 0.425E_c \quad (\text{C. 2.4-4})$$

$$I_p = \frac{\pi}{32} (D_j^4 - d_j^4) \quad (\text{C. 2.4-5})$$

式中 I_φ ——相当于集中在机墩顶端的荷载转动惯量，kN·m²；

$\sum P_i$ ——作用在机墩顶端的垂直荷载，kN；

r_i ——荷载 P_i 至回转中心的距离，m；

P_0 ——机墩自重，kN；

r_0 ——机墩圆筒平均半径，m；

Φ_1 ——单位扭矩作用下机墩的转角，rad/(kN·m)；

G ——混凝土抗剪弹性模量，kN/m²；

I_p ——机墩极惯性矩，m⁴；

H_j ——机墩高度，m；

D_j ——机墩外径，m；

d_j ——机墩内径，m。

C.3 振幅验算及动力系数核算

C.3.1 垂直振幅 A_1 (m) 可按式 (C.3.1-1) ~ 式 (C.3.1-3) 计算：

$$A_1 = \frac{P_1}{\frac{G_1}{g} \sqrt{(\lambda_1^2 - \omega_1^2)^2 + 0.2\lambda_1^2\omega_1^2}} \quad (\text{C.3.1-1})$$

$$\lambda_1 = 0.1047n_{01} \quad (\text{C.3.1-2})$$

$$\omega_1 = 0.1047n_1 (\text{或 } n_2) \quad (\text{C.3.1-3})$$

式中 P_1 ——作用在机墩上的垂直动荷载，kN；

λ_1 ——机墩垂直振动的自振圆频率，即 2π 秒内的振动次数， s^{-1} ；

ω_1 ——机墩垂直振动的强迫振动圆频率， s^{-1} ；

G_1 ——作用于机墩上的全部垂直荷载，kN；

g ——重力加速度，取 10m/s^2 ，以下各式相同。

C.3.2 水平横向振幅 A_2 (m) 可按式 (C.3.2-1) ~ 式 (C.3.2-3) 计算：

$$A_2 = \frac{P_2}{\frac{G_2}{g} \sqrt{(\lambda_2^2 - \omega_2^2)^2 + 0.2\lambda_2^2\omega_2^2}} \quad (\text{C.3.2-1})$$

$$\lambda_2 = 0.1047n_{02} \quad (\text{C.3.2-2})$$

$$\omega_2 = 0.1047n_1 (\text{或 } n_2) \quad (\text{C.3.2-3})$$

式中 P_2 ——作用在机墩上的水平动荷载，即离心力，可按式 (6.3.4-1) 和式 (6.3.4-2) 计算，kN；

λ_2 ——机墩水平振动的自振圆频率， s^{-1} ；

ω_2 ——机墩水平振动的强迫振动圆频率， s^{-1} ；

G_2 ——相当于集中在机墩顶端的当量荷载，kN。

C.3.3 水平扭转振幅 A_3 (m) 可按式 (C.3.3-1) 和式 (C.3.3-2) 计算：

$$A_3 = \frac{TR_j}{\frac{I_\varphi}{g} \sqrt{(\lambda_3^2 - \omega_2^2)^2 + 0.2\lambda_3^2 \omega_2^2}} \quad (\text{C. 3.3-1})$$

$$\lambda_3 = 0.1047n_{03} \quad (\text{C. 3.3-2})$$

式中 T ——扭转力矩（正常扭矩或短路扭矩）， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

R_j ——机墩外圆半径， m ；

λ_3 ——机墩水平扭转自振频率， s^{-1} ；

I_φ ——相当于集中在机墩顶端的荷载转动惯量， $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ 。

C. 3.4 动力系数 η 可按式（C. 3.4）计算：

$$\eta = \frac{1}{1 - \left(\frac{n_i}{n_{0i}}\right)^2} \quad (\text{C. 3.4})$$

式中 η ——动力系数；

n_i ——机墩强迫振动频率， r/min ；

n_{0i} ——机墩在相应于 n_i 方向的自由振动频率， r/min 。

附录 D 尾水管分离式底板内力 和锚筋计算

D. 0. 1 根据锚筋间距 s 和板厚 h ，尾水管底板结构可做如下简化：

- 1 $s > 1.5h$ 时，以锚筋为支点按无梁楼盖计算内力。
- 2 $s \leq 1.5h$ 时，以锚筋为支点按连续梁计算内力。

D. 0. 2 锚筋截面面积按式 (D. 0. 2) 计算：

$$A_s = \frac{K_a q s^2}{f_y} \quad (\text{D. 0. 2})$$

式中 A_s ——单根锚筋的截面面积， mm^2 ；

K_a ——锚筋抗拉安全系数，1.5~2；

q ——扣除自重后的底板底面的均布荷载设计值， N/mm^2 ；

s ——锚筋间距， mm ；

f_y ——锚筋抗拉设计强度， N/mm^2 。

D. 0. 3 锚筋深度计算应符合下列规定：

1 对完整岩石，锚筋深度取决于砂浆与岩石的黏结强度，锚筋深度按式 (D. 0. 3 - 1) 计算：

$$H \geq \frac{K_1 f_y d^2}{4DC} \quad (\text{D. 0. 3 - 1})$$

式中 H ——计算锚筋深度， mm ；

K_1 ——砂浆与孔壁胶结长度安全系数，1.5~2；

d ——锚筋直径， mm ；

D ——锚筋孔直径， mm 。

C ——砂浆与岩石的黏结强度标准值， MPa 。根据不同岩性和岩石类别取值，符合 SL 377 相关规定。

2 对层状岩石，锚筋深度尚应按式 (D. 0. 3 - 2) 进行

验算：

$$H \geq \frac{\pi d^2 f_y}{4 \gamma' s^2} \quad (\text{D. 0. 3 - 2})$$

式中 γ' ——岩石浮容重， N/mm^3 ；
 s ——锚筋间距， mm 。

D. 0. 4 锚筋构造应符合下列规定：

1 锚筋孔直径宜取 $3d$ (d 为锚筋直径)，且不小于 $d + 50\text{mm}$ ；锚筋距孔底应大于 50mm 。

2 锚筋锚入基岩的深度不应小于 $40d$ ；锚入上部混凝土结构的长度，应符合 SL 191 的相关规定。

3 锚筋宜选用变形钢筋，间距宜为 $1.0 \sim 2.0\text{m}$ 。

4 灌注锚筋孔的水泥砂浆抗压强度不宜低于 30MPa ，细石混凝土强度等级不宜低于 C30，且宜选用微膨胀水泥，灌浆前应将锚筋孔清理干净。

5 分离式底板应设置垂直排水孔或水平排水沟，宜与锚筋错开布置。

D. 0. 5 应对基岩应进行锥形破坏验算，重要工程应按现场锚筋抗拔试验确定。

附录 E 岩壁式吊车梁设计

E.0.1 断面初拟应采用下列方法（见图 E.0.1）：

1 梁体顶面宽度 b ：

$$b = c_1 + c_2 \quad (\text{E.0.1-1})$$

式中 c_1 ——轨道中心线至洞室边墙开挖面的距离，包括吊车梁以上岩壁喷混凝土厚度、防潮隔墙内空隙净宽、防潮隔墙厚度、桥机端部至防潮隔墙的最小距离（必要时应考虑人行道宽度）、桥机端部至轨道中心线的距离，mm；

c_2 ——轨道中心线至吊车梁边缘的最小距离，mm，宜取 300~500mm，当桥机的轮压较大时取大值，反之取小值，对特大型吊车，尚应适当加大。

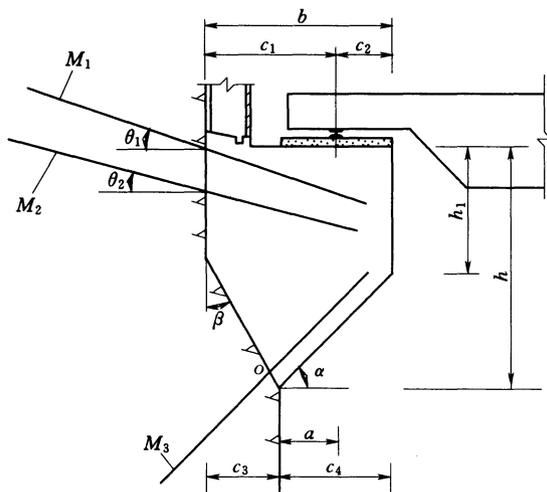


图 E.0.1 岩壁式吊车梁断面示意图

2 梁体高度 h ：

$$h > 3.33a \quad (\text{E. 0.1-2})$$

式中 a ——轨道中心线距离吊车梁下部岩壁开挖面距离，mm；

h ——岩壁梁高，mm。

$h_1 \geq h/3$ ，且不宜小于 500mm。梁体高度还应满足 SL 191 中有关牛腿裂缝控制对牛腿断面尺寸的要求。

3 岩壁角 β ： $\beta = 20^\circ \sim 40^\circ$ 岩壁角 β 应综合考虑岩层、主要地质构造及节理裂隙的影响，在能确保岩壁面的开挖成形保证率不低于 80% 的情况下选取，最终取值还应根据岩壁式吊车梁断面尺寸、锚杆的布置及受力状况优选确定。

4 梁体底面倾角 α ： $\alpha = 30^\circ \sim 45^\circ$ 。

5 受拉锚杆倾角 θ_1 、 θ_2 ： $\theta_1 = 15^\circ \sim 30^\circ$ ； $\theta_2 = \theta_1 - (5^\circ \sim 10^\circ)$ 。锚杆倾角应与岩层层面（层状岩体）及比较发育的结构面有一定的交角。当采用预应力锚杆时，锚杆倾角应小于岩壁面的残余摩擦角。

E. 0.2 单位长度竖向轮压和水平横向刹车力，应按 SL 191 中壁式连续牛腿中方法计算。

E. 0.3 按刚体极限平衡法计算锚杆轴力及梁体稳定，应取单位长度岩壁式吊车梁为计算对象（见图 E. 0.3），以受压锚杆与岩体面交点 O 为转动点，并假定受拉锚杆轴力与其力臂成正比，根据刚体极限平衡理论，推出：

$$F_1 L_1 + F_2 L_2 + W L_w = F_v L_v + F_H L_H + G L_G \quad (\text{E. 0.3-1})$$

$$F_1 / F_2 = L_1 / L_2 \quad (\text{E. 0.3-2})$$

$$T = (F_v + G + W) \cos \beta + F_H \sin \beta - F_1 \sin(\theta_1 + \beta) - F_2 \sin(\theta_2 + \beta) \quad (\text{E. 0.3-3})$$

$$N = (F_v + G + W) \sin \beta - F_H \cos \beta + F_1 \cos(\theta_1 + \beta) + F_2 \sin(\theta_2 + \beta) \quad (\text{E. 0.3-4})$$

式中

F_1 、 F_2 ——岩壁式吊车梁受拉锚杆轴力，kN；

F_V ——作用于吊车梁单位长度上的竖向轮压设计值（包括钢轨及埋件重量），kN；

F_H ——作用于吊车梁单位长度上的水平横向刹车力设计值，kN；

G ——单位长度吊车梁梁体自重，含二期混凝土重量，kN；

W ——单位长度吊车梁上防潮隔墙重量，kN；

N —— F_1 、 F_2 、 F_V 、 F_H 、 G 、 W 在岩体面上的法向合力，kN；

T —— F_1 、 F_2 、 F_V 、 F_H 、 G 、 W 在岩体面上的切向合力，kN；

L_1 、 L_2 、 L_V 、 L_H 、 L_G 、 L_W ——力 F_1 、 F_2 、 F_V 、 F_H 、 G 、 W 对 O 点的力臂，m。

岩壁式吊车梁沿岩壁面的抗滑稳定应满足：

$$\mu = T/N < f \quad \text{且} \quad \mu < 1.0 \quad (\text{E. 0.3-5})$$

式中 f ——梁体混凝土与岩台面的允许摩擦系数。

E. 0.4 受拉锚杆面积计算。单位长度岩壁式吊车梁上每排受拉锚杆的面积可按式 (E. 0.4) 计算：

$$A_{si} = \frac{KF_i}{f_y} \quad (\text{E. 0.4})$$

式中 A_{si} ——单位长度岩壁式吊车梁第 i 排受拉锚杆截面面积， mm^2 ；

F_i ——第 i 排受拉锚杆的轴力，N；

f_y ——第 i 排受拉锚杆的强度设计值， N/mm^2 ；

K ——安全系数，一般为 2.0~2.5。

E. 0.5 锚杆间距。同排受拉锚杆的间距宜取 500~800mm，且不宜小于 500mm，上下排受拉锚杆间的距离不宜小于 500mm，且宜错开布置。受压锚杆的间距宜取 500~1000mm，且不宜小

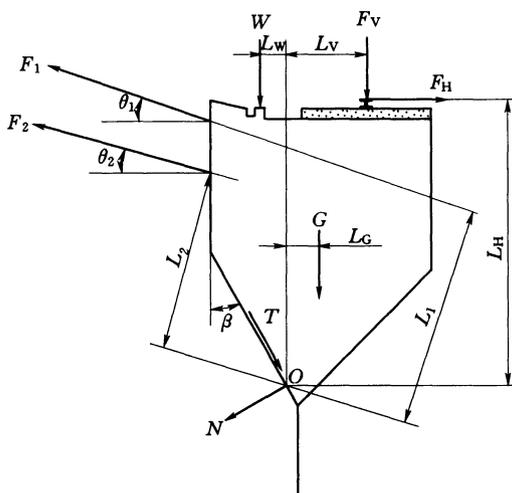


图 E.0.3 岩壁式吊车梁受力示意图

于 500mm。

E.0.6 受拉锚杆入岩长度。锚杆应锚入稳定岩体内，有效锚固段应穿过围岩松动圈。其锚入岩体长度为：

$$L = L_b + L_a \quad (\text{E.0.6})$$

式中 L ——锚杆锚入岩体内的长度，m；

L_b ——围岩松动圈深度（或自由段长度），m；

L_a ——有效锚固长度，m。

L_a 的计算可按照 SL 377 中端头锚固型锚杆内锚头的胶结长度计算公式。对一般大、中型工程的岩壁式吊车梁，吊车梁锚杆锚入岩体长度常用 5~8m，且不小于洞室边墙上的系统支护锚杆长度。特大型岩壁式吊车梁则往往采用 10~12m 甚至更长的锚杆。

E.0.7 梁体结构设计。岩壁式吊车梁梁体结构设计应按 SL 191 中壁式连续牛腿有关条款进行。

标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要 求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推 荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允 许
不必	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

水电站厂房设计规范

SL 266—2014

条 文 说 明

目 次

1	总则	95
3	水电站等级与洪水标准	96
4	地面厂房布置	99
5	地面厂房整体稳定分析及地基处理	106
6	地面厂房结构设计	113
7	地下厂房	128
8	其他型式厂房的布置及结构设计	168
9	建筑设计	180
10	安全监测设计	184

1 总 则

1.0.1 20世纪90年以来的20年是国内水电高速发展时期，据不完全统计，仅新建总装机容量超过300MW的大型水电站就达50余座，还有一批巨型水电站正在建设中。根据国内、外已建水电站厂房资料，水电站厂房形式多样，按集中落差方式的不同，水电站可划分为堤坝式、引水式和混合式。水电站厂房按枢纽布置和结构特点分为地面式厂房（包括河床式、坝后式和岸边式）、地下式厂房（包括全地下式、半地下式和窑洞式）、坝内式厂房、溢流式厂房（包括厂顶溢流式和厂前挑流式）；按厂房上游是否挡水可分为壅水厂房和非壅水厂房；按机组型式可分为立式机组厂房和卧式机组厂房，贯流式机组厂房还可分为灯泡贯流式和轴伸贯流式。地下厂房以厂房在引水道上的位置可分为首部式、中部式、尾部式。有些厂房形式因施工干扰、厂房内部工作环境不佳等因素有逐渐淡出的趋势，如溢流式厂房（包括厂顶溢流式厂房和厂前挑流式厂房）、坝内式厂房。有些厂房形式近年得到广泛应用，如贯流式机组厂房，在30m以下水头段有取代轴流机组的趋势。此外，水斗式机组只是冲击式水轮机组的一种，冲击式机组的另外两种形式斜击式和双击式多用于小型水电站。

1.0.2 适用范围仍沿用原规范，对于4级、5级小型水电站已经有《小型水力发电站设计规范》（GB 50071）可供遵循。

1.0.3 随着经济的发展，人们对生产、生活环境要求越来越高，业主也越来越注重厂区环境建设，许多水电站建成后都成为当地一道靓丽风景线，本条“厂区布置应与枢纽总体布置和环境相协调”中的“环境”一词具有丰富的内涵，包括自然环境（主要指生态环境）、社会环境（主要指人文、地理环境）。

3 水电站等级与洪水标准

3.1 电站等级

3.1.2 已建水利水电工程中，有些工程按防洪或灌溉供水等确定的水库规模较大，但水电站装机较小，如根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL 252—2000）按水库库容确定的工程等别来确定主要建筑物级别，则厂房的建筑物级别较高。根据近年来工程建设实践，明确了“其他非壅水厂房的建筑物级别按水电站装机容量确定”。

3.1.3 本条为新增内容，对厂坝联合作用的水电站厂房建筑物级别确定予以明确。

3.2 洪水标准和安全加高

3.2.1 壅水厂房上游防洪标准与枢纽工程挡水建筑物的防洪标准相一致没有任何异议，但壅水厂房的下游即非壅水部分的防洪标准采用与枢纽工程挡水建筑物相同防洪标准在行业内存在不同意见，本次修订对此问题进行了调研，国内部分壅水厂房的上下游洪水标准确定情况见表 1。在调查的 22 座河床式水电站壅水厂房中，有 11 座厂房下游防洪标准与壅水建筑物防洪标准相比有所降低，主要集中在南方，以航电枢纽居多。综合考虑中国南北方工程实践，此次修订，维持“厂房兼作为枢纽挡水建筑物，其防洪标准应与该枢纽工程挡水建筑物的防洪标准相一致。”

对于壅水厂房下游防洪标准按枢纽工程挡水建筑物相同防洪标准导致厂房下游洪水标准偏高，造成水电站进厂困难，工程投资显著加大，经论证可适当降低下游防洪标准，但不宜低于按表 3.2.1 确定的洪水标准。当壅水厂房下游洪水标准低于枢纽工程挡水建筑物防洪标准时，建议在稳定、应力计算时，考虑实际可能出现的各种不利组合条件。

对于特别重要的工程，经论证，其防洪标准可高于 1000 年一遇洪水标准。

表 1 国内部分壅水厂房的上下游洪水标准

序号	工程名称	工程等别	总装机容量 (MW)	挡水建筑物级别	壅水厂房建筑物级别	挡水建筑物设计洪水标准 (a)	挡水建筑物校核洪水标准 (a)	壅水厂房下游设计洪水标准 (a)	壅水厂房下游校核洪水标准 (a)
1	喜河	II	180	2	2	100	1000	100	1000
2	土卡河	III	165	3	3	50	500	50	500
3	旬阳	II	320	2	2	100	1000	100	1000
4	老口	I	150	1	1 (非壅水部分 3级)	500	2000	100	200
5	巴江口	II	90	2	(非壅水部分 3级)	100	1000	100	200
6	鱼梁	II	60	3	3	50	500	50	200
7	旺村	II	60	3	3	50	500	50	200
8	那吉	III	66	3	3	50	500	50	500
9	尼尔基	I	250	1	1	1000	PMF	100	200
10	大藤峡	I	1600	1	1	1000	5000	200	1000
11	哈达山	I	34.5	1	1	500	2000	50	100
12	红石	III	200	3	3	100	1000	100	1000
13	太平湾	II	190	2	2	500	5000	500	5000
14	龙虎山	III	65	3	3	50	500	50	500
15	双岭	III	50	1	1	500	2000	50	100
16	万安	I	500	1	1	1000	10000	1000	10000
17	高坝洲	II	252	2	2	100	1000	100	500
18	银盘	II	600	2	2	100	1000	100	500
19	白马	II	525	2	2	100	1000	100	500
20	龙口	II	420	2	2	100	1000	100	1000
21	沙坡头	II	121.5	3	3	50	500	50	500
22	海勃湾	II	90	2	2	100	2000	100	2000

3.2.4 本条增加厂房下游挡水部位安全加高的规定。注意安全超高为特征挡水位加波浪爬高、风壅水面高和安全加高值；如厂房位于泄水建筑物下游厂房安全超高取值宜考虑泄洪造成的水面波动影响。

4 地面厂房布置

4.1 厂区布置

4.1.1 随着很多水电站建成后成为风景优美的旅游区，本着保护生态，促进人与自然和谐相处的原则，本条第5款补充了厂区环境总体规划。第3款增加了“厂区防洪”要求。厂区布置应注意与周边环境和城镇建设规划相协调，目前相当数量水电站正将此作为一个参与方案比选的条件，交通道路组织也应综合考虑，特别是低水头水电站，站址常处于城镇附近或上、下游高、中坝梯级水电站之间，由于受淹没损失影响较大或地质条件制约，不适合建中高坝，均规划成低水头电站，且多要求设在城镇的下游，以改善和提高城镇水环境品位。

4.1.3 补充了“厂房边坡设计应符合 SL 386 的规定。”必须重视岸边厂房边坡的排水设计，尤其地质灾害问题严重的南方地区，应加强防御措施，防止因强降雨引发泥石流淤堵排水沟，造成水淹厂房。厂房高边坡出现的型式较复杂，岸边式厂房的后山坡，靠近陡岸侧布置的坝后式、河床式厂房的安装间侧边坡，均存在边坡处理问题。

岸边厂房一般布置在高陡边坡下，厂区布置空间有限，通常采用 GIS 高压配电装置，且在副厂房屋顶布置出线平台，平台上一一般布置高压互感器、避雷器和出线门构等设施，高边坡上滚落物、后边坡设置交通道路时运输车辆载物及路上飞溅石子均会威胁水电站正常运行，应在适当位置设置挡墙或护网进行防护。

4.1.8 本条补充了河床式或坝后式水电站厂房进水设计和厂房与泄水建筑物相邻时导墙设计的要求。厂房与泄水建筑物布置时，尤其对于河床式水电站，由于厂房建基高程往往低于泄洪闸、坝的建基高程，由此造成厂坝间导墙虚高，且稳定性较差，在厂房与泄水建筑物相邻布置时，在满足泄流前沿宽度的条件

下，可布置过度坝段，以优化导墙的布置。河床式水电站，一般而言，机组较多，发电水头较小，发电引用流量大，且为满足溢洪要求布置在岸边。当多台机组发电时，厂坝边机组受厂房与泄水建筑物之间导墙的隔流影响，水电站边机组进水口引流须绕过导墙，进口存在回流及立轴漩涡，边机组流态差，且水位降低 $0.1\sim 0.2\text{m}$ ，长期影响到水电站的发电效益。因此厂坝导墙长度和高程不应隔断水电站的引流，应以满足进水口挡沙和泄洪（排沙）闸导沙要求为主。对于泄洪对低导墙水电站的影响，由于泄洪时间较短，可最后开启邻近闸门，此时上下游水位可能低于水电站最低水头要求而停机。

4.1.9 对坝后式厂房补充了“厂坝之间的空间可布置副厂房、主变压器场、开关站等建筑物”的规定。

4.1.10 水电站尾水渠及下游河道应防止因不恰当的弃渣或下游围堰拆除不彻底而抬高厂房发电尾水位，进而影响厂房防洪安全。水电站下游河道未清理到位，不仅仅抬高发电尾水位，影响电量，而且会抬高下游洪水位，降低厂房的防洪标准，影响厂房防洪安全和发电效益，因此，应该引起重视。也有的水电站已有因泄洪冲刷河床导致尾水河床的流量、水位关系发生重大改变，导致停机后重新开机时的尾水位偏低，而相应采取临时打开泄洪闸门迅速抬高下游水位后才开机；有的梯级为反调节梯级水电站，受上游调峰水电站运行方式影响明显，停机时有发生，而下游河床的下切加剧了不利影响；尾水渠设计计算可采用苏联古宾教授主编的“水力发电站”一书的计算方法，对此，有设计单位在物理模型试验中做过验证。

4.1.14 本条为原规范 2.2.6 条，是水电站改建、扩建的规定。

4.2 厂房内部布置

4.2.3 安装间的面积可按一台机组扩大性检修需要的面积确定。《水利水电工程机电设计技术规范》（SL 511）列出检修部件的内容，见表 2。

表 2 安装间放置的机组大件

大件名称	机 组 形 式					
	混流悬式机组	混流伞式机组	轴流悬式机组	轴流伞式机组	灯泡贯流式	冲击式机组
发电机转子	√	√	√	√	√	√
发电机上机架	√	√	√	√	—	√
水轮机转轮	√	√	√	√	√	√
水轮机顶盖	√	√	√	√	—	—
水轮机支持盖	—	—	√	√	—	—
推力轴承支架	—	√	—	√	—	—
水轮机内配水环	—	—	—	—	√	—
水轮机外配水环	—	—	—	—	√	—
灯泡式发电机定子	—	—	—	—	√	—
机壳	—	—	—	—	—	√
喷管	—	—	—	—	—	√

注：√代表应考虑放置的大件。

(1) 布置安装间应注意下列问题：

a. 视需要考虑水轮机转轮体补焊，组装要求倒置的适当位置。

b. 应考虑检修人员的工作场所及临时放置工具和设备（如电焊机试验仪表等）所需场地面积。

c. 一般不考虑机组与变压器同时检修。

d. 安装间的布置，还要考虑安装检修设备起吊次序。

(2) 多机组厂房的安装间面积，还应根据机组安装投产进度计划、机组大修期安排以及工作量等情况和多种因素确定。

(3) 多泥沙河流的水电站，机组磨蚀相对比较严重，检修周期短，而且检修工作量大，检修工期长，因此安装间亦可视具体情况适当加大面积。

(4) 安装间位置与对外交通联系密切。从统计资料看安装间

多为一侧布置，并与对外交通同侧。根据主机间布置的具体条件，也可布置成左右安装间。

(5) 安装间地面高程与进厂交通相联系，如与发电机层地面同高可增加安装检修使用面积；如因尾水较高也可采用高于发电机层的地面高程。国内一些大型水电站如湖北清江的隔河岩水电站、云南李仙江的戈兰滩水电站，因尾水位很高，采用安装间与发电机层同高，便于检修，同时，增设卸货平台，高于下游洪水水位，这种布置，对于山区峡谷河流、下游洪水尾水位较高的水电站，不失为一种可行的布置型式。

4.2.4 起重机轨顶高程通常由起吊机组大件确定，当主变有进厂要求时，可能主变的吊装是控制条件。

起吊大件与固定设备的安全距离，在 SL 511 中已有规定。

本条第 2 款“起重机轨顶高程应根据起重机规格、机组或主变压器的安装及检修时吊装要求确定，并应满足进厂运输车辆的货物装卸要求”，本次修订把原规范 2.3.7 条中与起重机布置有关的规定均放在本条内。

4.2.5 厂内交通布置应注意下列几点：

(1) 明确主要楼层为发电机层和水轮机层，大型机组还有母线层。不再强制要求主要楼层一至两个机组段应设两个楼梯，在人员安全撤离能得到保障的前提下可以设一个楼梯。

(2) 本条增加“5 在起重机吊钩工作范围内的主厂房和有机电设备吊运要求的副厂房，宜设置供安装检修的吊物孔”，设置吊物孔的目的是满足上、下层之间设备垂直运输的要求。

厂房内吊物孔盖板一般为预制混凝土板或钢结构，但现场分块预制或焊接的盖板，笨重、不美观。近年来，出现了一种厂家生产的“围栏式盖板”。盖板的开启不使用吊车，人工操作，快捷，方便，美观，盖板翻起作为围栏，满足劳动安全卫生要求。

(3) 大中型厂房下部的廊道较多，不同的廊道功能不同，但均应满足交通和防火要求，同时还应注意各层廊道的交通衔接问题。

4.2.7 水轮机安装高程为水电站控制高程，由水能参数及机组特性，根据 SL 511 的规定选定，还应结合厂房位置的地形、地质条件，经技术经济比较后确定。

(1) 尾水管底板最低点高程与选定尾水管形式有关，尾水管形式对机组效率及机组稳定有较大影响，其尺寸超过允许变化范围要与厂家商定，必要时应重做模型试验。

(2) 水轮机层高程一般由蜗壳尺寸及蜗壳顶板混凝土层厚度决定。

(3) 发电机层高程由机组尺寸决定，并与上机架采用埋入式或非埋入式有关。发电机上机架采用埋入式布置，可增加水轮机层到发电机层高度，一些水电站在发电机层与水轮机层之间增设母线层，以使机、电布置分开，增加了使用面积，层高可根据机电及其附属设备布置情况，满足安全运行和检修需要确定。从统计数字看，水轮机层到母线层，或母线层到发电机层高度多在 3m 以上。

(4) 大中型机组的调速器、油压装置应根据机组主引出线和中性点引出线的方位，合理布置在主机间的水轮机层；如小型机组水轮机层空间有限，可布置在发电机层。中小型机组水轮机层还应考虑机组供、排水（尾水放空）等设备的布置。

4.2.8 尾水平台的布置补充了以下内容：

(1) 增加了尾水平台长度可根据启闭设备运行、闸门检修要求确定。工程实践中有利用安装间段设置门库的案例，但是否均要设置门库，应根据实际情况确定，高尾水平台的闸门一般通过门槽锁定或起吊即可完成检修。

(2) 河床式水电站可考虑利用尾水平台布置主变压器或副厂房，若需增加尾水管长度，应经技术经济论证。

尾水平台宽度应根据尾水闸门及其启闭机的操作和检修需要确定。尾水闸门启闭机平台一般应高出下游正常运用洪水位，但布置门机的尾水平台一般应高出下游校核洪水位，否则下游应设混凝土防洪墙。

对于大中型水电站，尾水管一般较长，其上至尾水平台之间的空间可灵活布置下游副厂房，若因为副厂房布置需要加长尾水管长度，则应进行技术经济比较。

4.2.9 中央控制室的布置：

(1) 中央控制室是整个水电站运行、控制、监护的中心。中央控制室的位置宜从方便水电站运行、操作、维护和监视，消除故障迅速和控制电缆最短等因素综合考虑，短的控制电缆不仅可节省投资，而且还能减少发生故障的机会，提高运行的可靠性。所以大多数中央控制室都布置在主厂房发电机层附近，但大多数地下厂房的中央控制室布置在地面，可不受此条限制。

(2) 中央控制室一般均与发电机层同高。如果布置在同高程有困难时，可布置在不同高程上。当中央控制室高于发电机层时，两者之间应设置宽敞的楼梯和方便的专门通道。

(3) 中央控制室虽需要临近发电机层，但又希望环境安静，宜用隔音墙将两者隔开。

(4) 中央控制室还须考虑各单体工程多项功能的综合集中控制。近年来很多水电站已将泄洪闸、进水闸、船闸、清污设备、柴油机等自动控制、监视集中至中央控制室，有的水电站甚至已实现远程控制，达到了高度自动化遥、监、管。

(5) 中央控制室的自然采光必须防止或避免阳光直接射在表盘上，朝向西晒的应作好可靠的隔热遮阳措施。

(6) 中央控制室布置在主厂房下游侧尾水管上，受尾水管的振动影响较为明显，容易引起电气设备的误操作，运行人员也难以忍受，应采取有效的防振措施。

4.2.10 根据 SL 511 的有关要求，补充了副厂房布置的一般原则。

(1) 副厂房的水机和电气设备应分区布置，避免水机管路、电缆和通风管路等相互干扰，避免电缆与油管的交叉布置，满足防火要求。

(2) 各房间的布置还应满足各功能的协调要求，如继电保护

室和计算机室一般与中央控制室相邻布置，其下层一般设有电缆夹层。

(3) 透平油处理室应紧临透平油罐室布置，并设置专用排油通风机室。

(4) 油罐室等荷载较大的房间宜布置在底层或下层，或直接布置在大体积混凝土上。

(5) 压缩空气系统的空压机、储气罐及附属设备宜集中布置在专用房间内，并根据需要采取减振、隔音和排污措施。

(6) 根据机组的取水方式，技术供水系统可合理布置在水轮机层上、下游侧或安装间下部，同时还应考虑不同功能的管路空间穿越问题。

(7) 大中型水电站的检修和渗漏排水系统应分开布置。

(8) 位于多泥沙河流上的水电站，汛期泥沙相对较高，水流浑浊，不能满足机组的自身用水要求，必须考虑汛期机组用水的备用水源问题。可在厂区或厂房下部设清水池。

(9) 当厂内面积受限时，可将试验、检修等辅助生产用房移至厂外，许多水电站的试验室、绝缘油库、机修间等生产用房布置在进厂公路旁边或尾水渠边。

5 地面厂房整体稳定分析及地基处理

5.1 一般规定

5.1.1~5.1.4 地面厂房整体稳定分析的计算单元应根据厂房结构布置特点确定。由于厂房机组之间均设有伸缩缝，把整个厂房划分成中间机组段、边机组段及安装间段三个独立单体，故一般分别对每段进行整体稳定及地基应力计算，满足规定的安全度。

边机组段及安装间段有侧向水压力作用时，应计算上、下游及左、右侧两个方向的水压力等共同作用的稳定及地基应力。

由于厂房布置需要和节省工程量，厂房基础面往往做成台阶式或其他不规则形状，为简化计算，一般将其投影为某一高程的计算平面按材料力学法计算厂房整体稳定及地基应力。但对于地质情况比较复杂的基础，还应采用有限元法或其他合适的方法进行复核计算。

5.2 荷载及其组合

5.2.1 雪荷载和风荷载在抗滑稳定计算中所占的比重很小，对厂房整体稳定的影响可忽略不计，因此未列入荷载类别中。如有必要考虑风压力，例如在受台风影响的沿海地区，可作为可变荷载列入基本荷载组合中。

5.2.2 一般常用材料的容重可参考下列数值取用：

(1) 混凝土容重：厂房下部结构，如进水口、闸墩、尾水管、蜗壳、水下墙等，含钢率较低，其容重可取 24kN/m^3 ；厂房上部结构，主要包括梁、板、柱等，含钢率较高，其容重可取 25kN/m^3 。

(2) 浆砌石容重可取 $21\sim 23\text{kN/m}^3$ 。

(3) 回填土石容重可取 $16\sim 18\text{kN/m}^3$ 。

5.2.4 在基本荷载中明确静水压力应包括钢管内水压力。对于

岸边式地面厂房，压力钢管内水压力的考虑与否和压力管道的结构型式（如是否设置伸缩节）有关，应根据工程实际情况确定。

5.2.5 岩基上河床式厂房和坝后式厂房的扬压力是参照《水工建筑物荷载设计规范》（DL 5077—1997）有关混凝土坝的分析成果确定的。

有些低水头河床式厂房，设有防渗帷幕和排水孔，但未设帷幕灌浆廊道。当帷幕失效时，帷幕补充灌浆困难。为安全起见，在扬压力计算中可以不计帷幕灌浆的作用，厂房底面扬压力按正文中的图 5.2.5-1b) 计算。

正文中图 5.2.5-2b) 中的 b 是指宽缝重力坝的坝段宽度减去宽缝宽度。

厂房扬压力受下游尾水位影响很大，当洪峰流量大，持续时间短，尾水位变幅大时，下游侧作用水头往往为不稳定水头，其基岩内各点的渗透压力向内传导需一定的时间，渗透压力可考虑时间效应予以折减。

5.2.6 非岩基上的厂房国内工程实例还不多，故仅作原则性的规定。

5.2.7 土压力的计算方法较多，国内现行的设计规范大多采用主动土压力，如《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）、《水工建筑物荷载设计规范》（DL 5077）等。主动土压力的计算主要有朗肯理论和库仑理论。库仑公式能考虑较多的影响因素，并具有相对较高的准确度，但公式较复杂，所需参数多。考虑到对厂房整体稳定而言，土压力占的比重有限，故本标准推荐较为简单的朗肯公式计算水平土压力。

当侧向土压力对厂房稳定有利时宜按主动土压力公式或静止土压力公式计算；当对厂房稳定不利时宜按静止土压力公式计算。

5.2.10 依据 SL 203—97 中 4.1.1 条和 4.5.3 条的规定并结合厂房的特点，本条文明确提出在厂房整体稳定计算中一般只计水平向地震作用，计算方法除 1 级壅水厂房应按动力法外，其余各

类厂房均按拟静力法计算。

表 5.2.10 - 1 是根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001) 和《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203) 的精神作出修订。表 5.2.10 - 2 中水平地震加速度分布系数 α_i 是天津大学水利系在对 18 个水电站厂房进行抗震计算和 3 个水电站试验资料的基础上提出的，考虑了厂房下部结构对厂房上部结构的放大影响。

5.2.11 基本组合是厂房在正常运行情况下的荷载组合；河床式厂房起控制作用的一般是上游正常蓄水位及下游最低水位时的组合情况，如上游设计洪水位与正常蓄水位相差较大或者下游洪水位很高时，水电站还应考虑设计洪水情况作为基本组合。坝后式厂房可视情况只计算下游静水压力；对于岸边式地面厂房应根据厂房布置结构特点分别考虑下游高尾水位情况和上游不利地下水位与下游低尾水位组合的情况，按其中最不利情况进行计算。

表 5.2.11 中注 5 是考虑到有的工程所处地区度汛期不结冰或工程度汛期不安排在冬季的情况而增加的。

5.3 整体稳定及基础底面应力计算

5.3.1 厂房整体抗滑稳定计算

(1) 国内现行有关规范关于岩基上的结构整体抗滑稳定计算，多数情况下将抗剪断强度公式和抗剪强度公式并列，如 GB 50265—2010、SL 265—2001、SL 319—2005 等规范，只有 DL 5108—1999 仅列入了抗剪断强度公式。本标准将两种公式并列，实际应用时满足两个公式中的任意一个即可。

非岩基上的厂房整体抗滑稳定计算，在工程应用中多采用抗剪强度公式计算。本标准规定对非岩基上的厂房整体抗滑稳定只需满足抗剪强度公式即可。

(2) 当采用抗剪断强度公式时，应注意到厂房基础面由于尾水管埋深需要，常常形成台阶式，在陡坡处基础应力比较复杂，在推力作用下，该部位接触面的凝聚力容易首先遭到破坏。因

此，在计算基础面的截面积 A 值时，应适当减去陡坡段的投影面积。

(3) 对于岩基上厂房， f' 、 c' 及 f 的取值，可参考 (SL 319—2005 中第 6.4.2 条的规定。非岩基上厂房 f 的取值，可参考 GB 50265—2010 中第 6.3.4 条的相关规定。

5.3.2 由于河床式厂房是枢纽壅水建筑物的一部分，以及与坝体起联合抗滑稳定作用的坝后式厂房在稳定计算时与坝体是不可分割的，因此，本标准要求这两种形式厂房抗滑稳定计算采用的公式宜与拦河坝（闸）的计算相一致，以求统一。

5.3.3 岩基上的厂房基础内存在缓倾角软弱夹层或剪切带时，应根据地质构造分析确定滑动模式，如单面滑动、双面滑动等，选择最危险的滑动面进行分析计算。计算方法以刚体极限平衡法为主。

附录 A 给出了单面滑动和双面滑动的深层抗滑稳定等稳定安全系数法计算公式。

非岩基上厂房除了校核平面滑动抗滑稳定性，还应校核平面转动抗滑动稳定性。深层滑动的计算模式应根据地基地质具体条件以及地下轮廓设计综合研究选定。

5.3.5 岩基上厂房地基面上最小垂直正应力满足了本标准的规定后，一般无需进行抗浮稳定性验算。但对于高尾水位的厂房，当地基面上拉应力区面积较大时，应进行抗浮稳定性验算。

5.3.6 由于水电站厂房水下部分由尾水管、蜗壳和纵横墙等块体结构所组成，整体刚度较大，通常建在地质构造简单的岩石地基上。因此厂房地基面上的法向应力按材料力学的偏心受压构件公式计算一般能够满足要求。边机组段及安装间往往受双向水压力作用，故公式中列入 X 、 Y 两个方向的弯曲应力。

当地基的岩石较好，尾水管扩散段底板如设计成分离式或厚度较薄只起保护基岩作用时，则此部分底板不承担传递厂房荷载至地基的作用，即在基础截面积计算中不应计入此部分的面积。

5.3.7 不论何种型式厂房的地基面所承受的最大法向应力 σ_{\max}

均应小于基岩允许压应力。在计算 σ_{\max} 时，计入扬压力的作用， σ_{\max} 值有可能减小也可能增大，因此为了求得偏于安全的数值，要求计算时分别考虑计入扬压力和不计入扬压力两种情况，选择其中一种控制情况。

最小法向正应力控制与厂房的抗倾、抗浮稳定有关。只有当基础面出现拉应力达到一定值时，才有可能导致厂房倾覆，因此恰当的控制基础面的拉应力，也就控制了厂房的抗倾稳定。参照 SL 319 及以往的厂房稳定设计实践，不论河床式还是坝后式或岸边式厂房，正常情况均不允许出现拉应力，只有在特殊组合情况下允许出现局部拉应力。如地震情况的局部拉应力超过 0.1MPa（河床式厂房）或 0.2MPa（坝后式或岸边式厂房），可考虑基础应力重分配，将超过允许拉应力的部分从基础计算截面中扣除，以满足基础最大、最小应力在允许值之内。

5.3.8 原规范中非岩基上厂房地基允许承载力的计算是按《泵站设计规范》（GB/T 50265—97）有关规定进行。GB/T 50265—97 以及新修订后的 GB 50265—2010 和《水闸设计规范》（SL 265—2001）中地基允许承载力的计算是根据荷载类别选用限制塑性区开展深度的公式、 C_k 法公式或汉森公式进行。《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）和《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG D63—2007）中则是采用对地基承载力特征值按基础宽度和埋深进行修正的公式进行计算。根据西霞院水电站厂房允许承载力计算成果看，这几种计算公式的结果差异较大。由于水电站厂房的基础尺寸和开挖深度往往较大而目前国内软基上修建的水电站厂房实例还比较少，为慎重起见，建议在实际工程中对几种规范中的公式分别计算并经综合分析后确定地基允许承载力，也可为今后厂房规范的进一步完善积累经验。

5.3.10 对非岩基上的厂房应避免由于基础底部应力分布不均匀而导致基础产生过大的不均匀沉降。本标准规定的基底应力不均匀系数允许值与 GB 50265 和 SL 265 一致。

5.3.11 非岩基上厂房地基最终沉降量公式的计算原理是分层总

和法。按该式计算地基最终沉降量时所采用的土壤压缩曲线应由土壤压缩试验提供。对于一般土质地基，当厂房基底压力小于或接近于厂房基础未开挖前作用于该基底面上土的自重压力时，土的压缩曲线宜采用 $e-p$ 回弹再压缩曲线，以消除开挖土层的先期固结影响。对于软土地基土的压缩曲线宜采用 $e-p$ 压缩曲线。有条件时，土的压缩曲线也可采用 $e-\lg p$ 压缩曲线。原规范中公式的沉降量计算结果与实际情况相比往往偏小。对此，参照国家现行有关规范的规定，本次修订时增加了地基沉降量修正系数 m 。

5.3.13 目前，我国建筑在非岩基上的厂房实例较少。非岩基上的厂房地基变形控制不同于工民建和水闸工程，应考虑厂房尺寸对机电设备的安装和正常运行的影响。各工程应根据自己的实际情况和设备厂家要求具体分析确定。

5.4 地基设计及处理

5.4.1 厂房的地基处理要求取决于地基条件和厂房的型式及规模，本条规定系在总结国内外厂房地基处理经验的基础上提出。第4款补充了耐久性要求。

5.4.2 本条补充了厂房基础开挖要求。

基础开挖深度与厂房布置及结构要求有密切关系。我国大部分大、中型厂房的基础修建在中等好的岩石基础上。考虑到厂房一般承受的水头并不太大，地基应力要求不高，故开挖深度在满足本标准 5.4.1 条和厂房布置及结构强度要求条件下，宜尽量减少，以节省工程量。

采用常规开挖爆破方式易造成基础破坏等不良后果，故宜采用梯段爆破、预裂爆破。对易风化、泥化、遇水软化的坝基岩体如黏土岩或砂质黏土岩，应加强基坑排水，在开挖出建基面后，立即喷水泥砂浆、喷混凝土或浇筑混凝土封闭，喷层或浇筑层应具有—定的厚度。

5.4.3 为减少厂房基础的扬压力，可考虑在厂房地基适当部位

设置防渗及排水设施。河床式厂房上游侧的防渗及排水设施对保证厂房的整体稳定尤其重要，宜考虑设置专用廊道以便于检修。应认真考虑厂房基础排水设施对地基可能造成的不利影响，必要时应采取有效的保护措施，防止地基发生渗透变形或其他危害。对于排水可能失效的情况在扬压力计算中应不计排水作用或不设置排水。

非岩基上厂房的排水反滤层的设计可参照 SL 265 及《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2001)。

补充了“下游尾水位较高的厂房，宜在下游侧周边设置防渗帷幕或采用抽排水等降低扬压力的措施。”

5.4.4 厂房岩基存在软弱结构面、不利于厂房稳定的岩层产状时，常采用的工程措施有齿槽、混凝土塞、钢筋混凝土桩、预应力锚固等，可根据实际情况采用一种或几种措施进行处理。

非岩基上厂房的地基承载力或变形不能满足要求时，可采取机械压实、换填垫层、钢筋混凝土桩或振冲碎石桩或其他有效措施。

5.4.5 非岩基厂房的地下轮廓及两岸连接方式应在满足本标准 5.4.1 条的条件下根据地基地质和水文地质条件合理选择齿墙、防渗帷幕或灌浆等，以竖向防渗为主，结合设置竖向排水、水平排水等措施以削减地基的渗透水压力。厂房与铺盖、翼墙的连接以及厂房永久变形缝中的防渗止水必须可靠。

6 地面厂房结构设计

6.1 一般规定

本章是按照《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)的原则和要求进行修订的。

6.1.2 采用原规范的 4.1.2 条。增加“4 对大型工程和特殊工程，宜进行共振复核、振幅验算、刚度复核和抗振设计”，提出厂房结构抗振设计要求。

6.1.3 沿用原规范的 4.1.8 条。

6.1.4 沿用原规范的 4.1.9 条。将原规范中引用的旧规范替换为现行规范，注释按 SL 191—2008 要求进行了调整。“抗冲刷”改为“抗冲磨”。根据已颁布的 SL 191—2008 中对环境类别的划分及对耐久性要求的提升，提升了一类、二类混凝土的最低强度标准，同标号混凝土及同等级的钢筋的设计强度值有所降低。增加了上部结构梁、板、柱的最低强度标准。

6.1.5 在原规范的 4.1.10 条上补充了动力计算的规定。

6.2 上部结构

6.2.1~6.2.8 沿用原规范的 4.2.1~4.2.8 条。将原规范中引用的旧规范替换为现行规范。短期组合改为基本组合。

根据 SL 191—2008 中表 4.3.7 的规定，一类环境普通钢筋混凝土吊车梁尚应验算裂缝开展宽度放宽到 0.4mm。根据 SL 191—2008 中表 7.2.2 注 3，水电站厂房的吊车梁，可将计算求得的最大裂缝宽度乘以 0.85。水电站厂房吊车属轻级工作制，因此吊车梁可不验算疲劳强度。

2008 年，湖南省发生多起水电站厂房屋面受冻雨冰雪荷载导致垮塌屋面事故，甚至有正在运行的厂房，其他工业厂房垮塌的更多，因此雨雪荷载的取值要慎重。鉴于全国各地均有水电站

厂房屋面受冻雨冰雪荷载影响发生垮塌屋面事故，雨雪荷载多超过规范值，建议荷载选取时结合当地气候特点应适当加大安全富裕度。

6.2.9 与 SL 191—2008 协调一致，取消持久、短暂、偶然设计状况，在承载能力极限状态下基本组合合为一个，在正常使用极限状态下不再分长期和短期组合，统称为标准组合。其他仍沿用原规范。

6.2.10、6.2.11 沿用原规范的 4.2.10 条、4.2.11 条。

排架柱可参照下列假定进行计算：

(1) 当排架柱与屋面大梁整体浇筑或屋盖采用厚板结构时，柱与屋盖连接为刚接；当屋盖采用屋架（预制混凝土、钢屋架）结构时，柱与屋架视为铰接。

(2) 排架上游柱一般假设固定在水轮机层混凝土顶部，若上游墙较厚，墙柱的刚度比达到 12~15 时，则上游柱可假设固定在墙顶。当厂房下游墙为与尾水闸墩整体浇筑的厚墙时，排架下游柱可假设固定在尾水闸墩顶部，否则按固定在水轮机层考虑。

(3) 主机间发电机层楼板一般为后浇的二期混凝土，且刚度较小，因此楼板可视为柱的铰支承。安装间楼板刚度较大，且大梁与柱均为一期混凝土整体浇筑，因此柱与梁可视为刚接。

6.2.12 增加了厂房结构抗震构造要求，主要依据《建筑抗震设计规范》(GB 5011—2010)。

6.2.13 增加对水电站厂房屋盖系统的规定。

水电站厂房屋盖系统结构及材料趋向于轻型化，各项目业主单位对建筑及屋面造型提出的要求亦多样化，近年来发现多个工程为了造型而造型的现象。由于厂房上部结构排架的计算假定是基于屋架体系在横向排架平面内的刚度 $EI = \infty$ ，对排架起到推拉杆作用，而非简单的防雨、防尘结构，其设置是要对水平力（如风、水平刹车力、温度变形等）起到拉结作用的，其中的温度应力的影响在中国北方地区尤为突出，冬季由于室内外温差很大，墙体向外变位也较为突出，使屋架下弦杆处于张紧状态，已

成为不得不面对的现实。有的水电站设计为了造型，忽略了结构的安全性，而设计为拱形或其他方式的结构，运行中造成桥机啃轨和厂房上下游墙体的水平变位。这对厂房上部结构的安全造成很大威胁，尤其对结构的抗震造成威胁。除非上下游墙为大体积混凝土或有其他结构的约束。

地面厂房屋盖系统结构型式多种多样，应根据使用功能、气候条件、抗震要求等工程具体情况选用，按其材料性能不同分为钢筋混凝土结构和钢结构两大类。

钢筋混凝土屋盖系统主要有以下几种型式：

(1) 现浇钢筋混凝土梁板结构。这种型式整体性好，但施工难度大，进度较慢。

(2) 预制屋面梁、板结构。适用于中、小型厂房，结构简单、施工方便，但整体性和抗震性能差。

(3) 预应力钢筋混凝土屋架、屋面板。常用的屋架型式有三角形、折线形、拱形和梯形等。

(4) 预制预应力 T 形、雁形屋面板。

钢结构屋盖系统主要有如下几种型式：

(1) 平面梯形钢屋架。由于水电站厂房吊车吨位较大，因此在套用工民建标准设计时，必须验算由排架柱顶传给屋架的水平力，并对屋架端节点、下弦杆等部位作适当加强。

(2) 实腹式钢梁。因其刚度较小，大跨度厂房不宜选用。

(3) 钢网架结构。空间钢网架结构具有自重轻、刚度大、整体性好、安装方便、施工速度快等优点，适合各种跨度的水电站厂房，近年来得到广泛应用，可按《钢结构设计规范》（GB 50017）、《空间网格结构技术规程》（JGJ 7）的有关规定进行设计。

钢网架结构型式和构造要求：

(1) 钢网架型式一般采用正放四角锥或正放桁架，为节省工程量也可采用正放抽空四角锥。杆件为无缝钢管，支座节点为板式支座，杆件和球节点一般为螺栓连接。

(2) 钢网架支撑型式一般采用下承式网架，为降低女儿墙高度，也可采用上承式支撑的网架型式。

(3) 由于水电站厂房柱距一般不满足建筑模数，网架与柱头的连接型式，一般通过柱顶的帽梁，网架支座可落在柱顶，也可落在帽梁上。

(4) 网架支座型式根据布置和受力条件有下列几种：简支（一端自由、一端铰接）、铰支（两端铰接）、钢支（两端刚接），两端铰接最为常用，见图 1。

(5) 钢网架结构一般情况下，由专业的厂家制造、安装。采用地面拼装，分片整体吊升的安装方式。

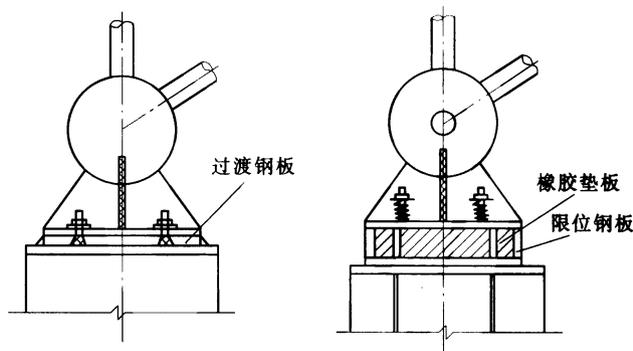


图 1 钢网架典型铰支支座

6.3 风罩与机墩

6.3.1 根据计算要求，增加了 4 项设计时应取得的机组资料。

6.3.2 与 SL 191—2008 协调一致，取消持久、短暂、偶然设计状况。在承载能力极限状态下增加偶然组合情况下短路时发电机层楼板约束扭矩，在正常使用极限状态下不再分长期和短期组合，统一为标准组合。

6.3.3 沿用原规范的 4.3.3 条，因不再分长、短期组合，风罩最大裂缝宽度允许值按短期组合要求为 0.4mm。

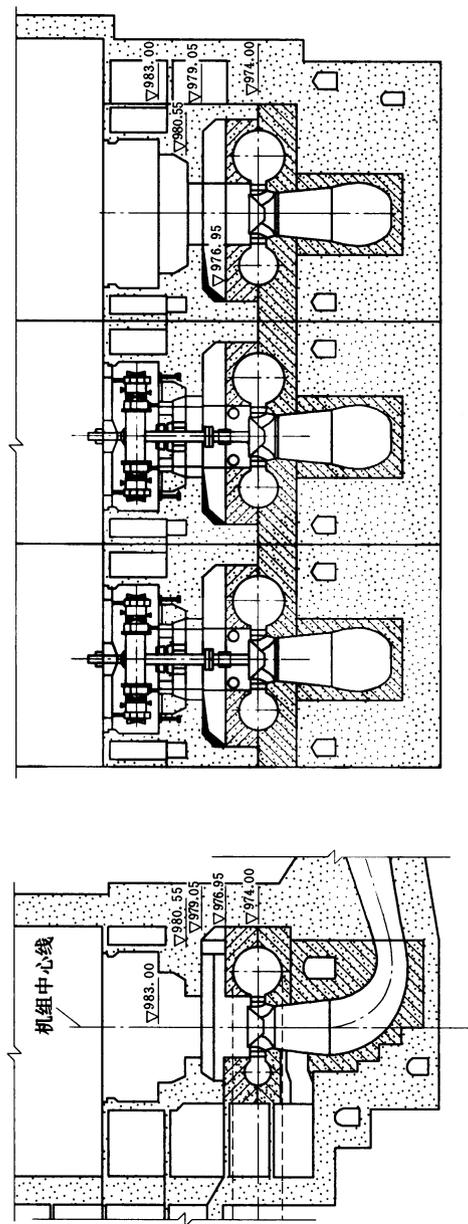


图 2 洪家渡水电站墙墩板式机墩典型剖面图

6.3.4 沿用原规范的 4.3.4 条。

6.3.5 与 SL 191—2008 协调一致，取消设计状况。在正常使用极限状态下不再分长期和短期组合，统称为标准组合。其他仍沿用原规范。

6.3.6~6.3.7 沿用原规范的 4.3.6 条和 4.3.7 条。

6.3.8 与 SL 191—2008 协调一致，取消长、短期组合，振幅按原短期组合控制。计算复核可参照《隔振设计规范》（GB 50463）、《动力机器基础设计规范》（GB 50040）、《水利水电工程劳动安全与工业卫生设计规范》（GB 50706）等执行。

6.3.9 新增条款，为圆筒机墩以外类型的机墩动力计算提供了设计依据。根据施工进度、结构布置等要求，在满足结构安全的前提下，可按工程需要采用环形梁式、矮式、墙板式、框架式等机墩结构型式。国内大型水电站一般采用圆筒式机墩，国外在其他机墩形式上尝试较多，如澳大利亚 MURRAY2 水电站和马来西亚的 BatangAi 水电站均采用了墙板式机墩，国内洪家渡水电站厂房（装机 $3 \times 200\text{MW}$ ）也采用了这种机墩型式，见图 2。

6.4 下部结构

6.4.1~6.4.3 沿用原规范的 4.4.1 条~4.4.3 条。

6.4.4 国内对于大型水轮发电机组蜗壳与外围混凝土承载结构型式曾开展过专门的研究。目前国内已使用的金属蜗壳与外围混凝土的结构处理措施有下列三种方式：

(1) 设置弹性垫层。为使金属蜗壳与其外围混凝土分开，受力互不传递，我国通常做法是在金属蜗壳上半部表面铺设弹性垫层，欧美等国大多数不设弹性垫层，而采用充水加压浇筑混凝土蜗壳的施工方法。

观测资料和有限元计算表明，设置弹性垫层的蜗壳有部分内水压力外传，外传比例与垫层材料、厚度和铺设范围等因素有关。

垫层材料通常敷设于上半圆表面，必要时可对垫层范围进行

调整，以减小座环处钢衬应力集中，改善蜗壳外围混凝土薄弱区受力条件。垫层材料应具有弹性模量低、吸水性差、抗老化、抗腐蚀、徐变小且稳定、造价低廉、施工方便等性能，一般采用非金属的合成或半合成材料，如聚胺脂软木（PU板）、聚乙烯闭孔泡沫（PE板）、聚苯乙烯泡沫（PS板）等，弹性模量不高于10MPa，通常采用1~3MPa，其厚度一般采用20~50mm。国内部分水电站大型机组垫层蜗壳参数见表3。

表3 国内部分水电站大型机组垫层蜗壳参数

水电站名称	龙滩	拉西瓦	三峡 (垫层蜗壳)	李家峡	小浪底	戈兰滩
单机容量 (MW)	700	700	700	400	300	150
机组台数 (台)	9	6	4	5	6	3
蜗壳进口 直径 (m)	8.7	6.8	12.4	8.0	7.2	5.7
蜗壳设计内水 压力 (MPa)	2.420	2.760	1.395	1.640	1.910	1.250
最大静水压力 (MPa)		2.32	1.18	1.31	1.40	0.95
垫层材料	PE板	PU板	PE板	PU板	PS板	PU板
垫层厚度 (mm)	30	20	30	20	20~30	30
垫层弹性模量 (MPa)	1.5	2.0~3.0	2.5	3.6		2.5~3.0
垫层敷设范围	上端距座 环2.0m, 下端在 腰线处	上端距座 环1.25m, 下端在 腰线处	上端距座 环2.5m, 下端在 腰线处	腰线 下30°	上半圆	腰线 下5°

(2) 充水保压。随着大容量高水头水轮机的发展，对金属蜗壳的强度要求更高，为减薄钢板厚度以利加工和节省钢材，可考虑金属蜗壳与外围混凝土联合作用。前苏联已有这方面的先例，国内从 20 世纪 60 年代就开始这方面的试验研究，但迄今为止，仅在一些水电站中采用过局部联合受力的措施以改善座环蝶形边的应力状态，收到一定效果。

当今国内外大多数抽水蓄能电站的金属蜗壳，已采用充水保压的施工方法，起到金属蜗壳和外围混凝土的联合作用。金属蜗壳和外围混凝土的设计与蜗壳的埋设方式和结构处理措施有关，采用何种结构型式，应根据水电站水头、机组容量、机组振动及施工条件等综合分析比较选定。

蜗壳充水保压压力，根据国内外已建工程实践一般控制在 0.5~1.0 倍最大静水头。本标准建议控制在机组最大静水头的 0.6~0.8 倍。

金属蜗壳一般仍按承受全部设计内水压力设计及制造。由于蜗壳的保压值一般不大于最大静水压力，总是低于设计内水压力，运行过程中当内水压力大于保压值时，大于保压值的那部分内水压力，由蜗壳与外围混凝土共同承担，因此，外围混凝土结构除承受结构自重和外荷载外，还要承受部分内水压力。

充水保压值对外围混凝土结构的受力和配筋有直接的影响，充水水温对钢蜗壳的变形也有较大的影响，因此合理选择保压值和充水水温至关重要，应根据外围混凝土结构具体条件与厂家协商研究确定。

国内外部分水电站大型机组充水保压蜗壳结构参数见表 4。

(3) 直接埋入。随着大容量高水头水轮机的发展，对金属蜗壳的强度要求更高，为减薄钢板厚度以节省钢材和便于加工，金属蜗壳与外围混凝土之间不设垫层、在蜗壳不充水（仅设置内部支撑）的情况下浇筑外围混凝土，金属蜗壳和外围混凝土将完全联合共同承受全部内水压力，即直接埋入法。

表 4 国内外部分水电站大型机组充水保压蜗壳结构参数

水电站名称	瀑布沟	二滩	三峡 (保压蜗壳)	天生桥 Ⅱ级	大古力 Ⅱ级	依泰普	古里 Ⅱ级
单机容量 (MW)	600	550	700	220	716	715	610
机组台数 (台)	6	6	14	6			
蜗壳进口直径 (m)	8.0	7.2	12.4	4.2	10.6	9.6	7.3
设计内水压力 (MPa)	2.450	2.310	1.395	2.700	1.200	1.680	2.000
最大静水压力 (MPa)	1.890	1.940	1.180	2.050	0.965	1.450	1.670
浇筑混凝土时 保压值 (MPa)	1.400	1.940	0.700	2.050	0.965	1.300	1.510
保压值/最大 静水压力	0.74	1.00	0.60	1.00	1.00	0.90	0.90
钢蜗壳水压 试验压力 (MPa)	3.67	2.54	0.70	2.05	1.82	2.52	3.00

直埋蜗壳有两种构造类型：Ⅰ型是金属蜗壳按承受全部内水压力设计制造，外包混凝土按联合承载设计，承担部分内水压力；Ⅱ型是金属蜗壳与外围混凝土二者均按联合承担内水压力设计，也就是说，二者组成一个整体结构才能承担全部内水压力，金属蜗壳可以采用强度较低的钢材并称为“钢衬钢筋混凝土蜗壳”。欧美和日本大多数工程采用Ⅰ型结构，前苏联是Ⅱ型结构的首创者。国内外部分水电站大型机组直埋蜗壳参数见表 5。

表 5 国内外部分水电站大型机组直埋蜗壳参数

水电站名称	景洪	三峡 (15号机)	努列克	英古里	萨扬舒申斯克
单机容量 (MW)	300	700	300	260	640
机组台数 (台)	5	1	9		10
蜗壳进口直径 (m)	11.2	12.4	4.2	3.0	6.5
设计内水压力 (MPa)	0.96	1.40	3.80	5.50	2.90
钢板最大厚度 (mm)	40	75	32	36	40
钢材屈服极限 (MPa)	320	490	300	300	400
构造类型	I 型	I 型	II 型	II 型	II 型

从20世纪60年代起，前苏联在克拉斯诺雅尔斯克和布拉茨克两座巨型水电站开展钢衬与钢筋混凝土联合承载的研究。为了降低座环与蜗壳连接处的弯曲应力，取消了此处1.5~2.0m范围内的软垫层，取得了良好效果。后来相继在努列克水电站（蜗壳最大设计水头380m，单机容量300MW）、英古里水电站（蜗壳最大设计水头550m，单机容量260MW）、萨扬舒申斯克水电站（蜗壳最大设计水头286m，单机容量640MW，1978年开始投产，运行良好）实现了真正意义上完全联合承载的蜗壳，即钢蜗壳减薄，采用中等强度钢板不按承受全部内水压力设计。西方国家，主要是日本和欧洲，采用直埋式蜗壳的也较多，但是与前苏联不同，钢蜗壳是按单独承受全部内水压力设计制造的，并不因有外包钢筋混凝土而将钢蜗壳厚度减薄；单机容量较大的为300MW左右，最大的达460MW，但其水头不高（仅105m）。国内从20世纪60年代就开始直埋式蜗壳的试验研究，但仅限于在一些水电站中采用过局部联合受力的措施以改善座环蝶形边的应力状态，收到了一定效果。从2005年开始，我国已经开始对景洪水电站（单机容量250MW，装机5台）、三峡右岸水电站（15号机组，单机容

量 700MW)、溪洛渡水电站(单机容量 700MW, 左右两岸厂房各装机 9 台)开展直埋式蜗壳的研究, 在初步取得的数值仿真计算和结构模型试验结果的基础上, 经过数次专家论证审查后, 景洪水电站 5 台机组和三峡水电站右岸 15 号机组已经决定采用直埋式蜗壳, 这是一个很好的发展趋势。

直埋式蜗壳是一种非常有发展前途的蜗壳结构型式, 由于内水压力全部由钢蜗壳和外围混凝土联合承载, 非常有利于机组的运行稳定。即使蜗壳厚度不因联合承载而减薄, 由于不需要增加闷头、密封环和水泵等加压设备, 而且不需要铺设垫层, 可以节省工期, 因此, 我国近年来有部分承受高水头、进口直径较小的金属蜗壳采用了直接埋入法。但是, 对于高 HD (设计内水压力与钢蜗壳进口管径之积) 值金属蜗壳, 外围混凝土相对较薄, 采用直埋式蜗壳时, 外围钢筋混凝土结构将承担很大比例的内水压力, 导致裂缝范围和宽度较大, 作为机组支承结构和厂房水下结构的整体刚度和抗振性能可能会有所降低, 可能对机组运行产生不利的影响; 过于密集的配筋将导致蜗壳周围管路布置和混凝土施工困难。我国景洪水电站和三峡水电站几台采用直埋式蜗壳的机组已经投入运行, 从三峡水电站蜗壳实际运行监测资料分析, 蜗壳应力均在安全范围内, 机组蜗壳运行正常, 但缺乏长期稳定运行的成功经验。

垫层蜗壳、充水保压蜗壳、直埋蜗壳三种结构型式, 各有优缺点。总结国内外的工程经验, 以上三种方式均有应用。对中、低水头和单机容量小于 400MW 的机组, 国内通常采用垫层蜗壳, 垫层蜗壳的应用也取得了长足的发展; 对于大型机组和 HD 值特别高的蜗壳, 国内多采用充水保压蜗壳; 直埋式蜗壳在景洪水电站和云峡水电站右岸 15 号机组也得到应用。因直埋蜗壳在国内应用较少, 要采用该方法还须结合具体工程, 提前研究, 以确定合理、安全的钢衬及外围混凝土的结构尺寸、配筋量等, 并研究蜗壳周围钢筋混凝土在抗裂、限裂条件下的受力情况。

金属蜗壳和外围混凝土的设计与蜗壳的埋设方式和结构处理措施有关，最终采用何种结构型式，还应根据厂房布置（结构的强度、刚度、控制尺寸）、水电站水头、机组容量、机组振动、施工条件、工程投资、工期和运行维护等方面综合比较确定。

6.4.5 与 SL 191—2008 协调一致，取消设计状况。在正常使用极限状态下不再分长期和短期组合，统称为标准组合，其他仍沿用原规范的 4.4.5 条~4.4.7 条。

6.4.6 蜗壳为一空间受力结构，内力计算有平面框架、环形板筒和有限元三种基本方法，各有优缺点，可根据结构尺寸及边界条件选用，计算结果取值应综合考虑。

6.4.7 混凝土蜗壳裂缝开展宽度依据《水工混凝土结构设计规范》（SL 191—2008）的表 3.3.7，处于三类环境类别的结构构件最大裂缝宽度限值 0.25mm 为基准提出，考虑到钢筋混凝土蜗壳的混凝土保护层厚度一般均在 50mm 以上，本条规定还留有适当余地。混凝土蜗壳裂缝开展不仅会影响结构耐久性，而且一旦渗漏影响厂内环境，宜从严掌握。

6.4.8 与 SL 191—2008 协调一致，取消设计状况。在正常使用极限状态下不再分长期和短期组合，统称为标准组合。

6.4.9 尾水管结构是复杂的空间问题。垂直水流方向的强度简化为分区切取平面框架进行设计，一般可满足设计精度要求。但是计算时应注意正确确定上部结构下传的荷载，应考虑空间的传递作用。河床式厂房，厂坝整体连接的坝后式厂房、溢流式厂房及高尾水位的厂房上（下）游的水推力及竖向荷载要通过尾水管的边墩、中墩及底板传至地基，故边墩、中墩及底板顺水流方向的应力及竖向切力可能较大，不可忽视，应根据应力大小配置适量钢筋。

6.4.10 大型机组的尾水管顶板及整体式厚底板，应考虑施工进度可能产生的不利应力，并验算施工期的温度作用，合理选定混凝土分层分块及温控措施，防止发生贯穿性温度裂缝。

6.4.11 当厂房基岩完整坚硬时，尾水管扩散段底板可采用分离式，不承受地基反力，仅考虑尾水管放空时承受扬压力的作用，并且由锚筋承担，故底板不厚（一般 0.5~1.0m），可减少岩石开挖量和混凝土工程量。

尾水管底板设排水孔时，大多数工程设计对底板浮托力均进行折减。据石泉水电站和葛洲坝二江水电站实测资料表明，作用在尾水管底板上的扬压力值小于设计值。浮托力折减多少应根据排水孔布置情况和基岩情况确定。一般情况折减 40%~60%。国内部分分离式底板浮托力折减系数见表 6。

表 6 国内部分分离式底板浮托力折减系数

序号	水电站名称	厂房基岩	底板厚度	折减系数 (%)
1	刘家峡	云母石英片岩	1.0	60
2	丹江口		1.0	50
3	风滩	砂岩	1.0	50
4	潘家口	片麻岩	1.0	50
5	陵窝	变粒岩	0.8	70
6	回龙山	砾岩	0.5	50
7	白山	混合岩	1.0	50

6.4.12~6.4.16 除 6.4.16 条第 4 款“重要性工程”改为“大型工程”，其他仍沿用原规范 4.4.14 条~4.4.19 条。高尾水位厂房的尾水闸墩和尾水管可考虑优化止水设计使缝间控制性充水平衡掉一部分不利水压，以减小结构尺度和机组段长度，但应验算施工期抗御一定标准洪水时的一期混凝土结构强度（立式机组为蜗壳段，灯泡贯流机为管形座段）。机组段布置时，有因溢流前沿长度不够压缩机组段长度的情况，而采取控制性缝间充水平衡部分外水压力的措施（特别是低水头水电站），以减小流道侧壁厚度（即压缩机组段长度）。

6.5 构造设计

6.5.1 厂房设置永久变形缝的目的是：适应结构物在温度变化、混凝土干缩时产生的水平位移；适应结构物因地基不均匀沉降产生的水平和竖向位移。永久变形缝既是伸缩缝，又是沉降缝。

本条把原规范涉及变形缝的 4.5.1 条、4.5.2 条、4.5.3 条和 4.5.9 条综合到一起，补充了嵌缝材料的规定。

机组段分缝间距主要是根据机组中心间距而定，可以采用一机一缝或是两机一缝。《混凝土重力坝设计规范》（SL 319—2005）规定大坝的横缝间距可为 15~20m，超过 22m 时应作论证。《水工混凝土结构设计规范》（SL 191—2008）规定地基为岩基时，伸缩缝最大间距为 15m；软基时为 20m，与大坝的规定大体一致。实际上，不少大中型水电站的伸缩缝间距均大于 20m，故本标准建议间距一般为 20~30m。鉴于国内已有两机一缝的水电站（如西津水电站），其间距已达 48m；有的大型水电站，一个机组段就超过 30m（如葛洲坝二江水电站，大机组间距 40.2m，小机组为 35.3m；三峡水电站，机组间距 38.3m），因此本标准提出，经论证，采取措施后可适当放宽。

6.5.2 本节把原规范涉及止水内容的 4.5.4 条~4.5.8 条归并，增加了止水键体表面处理的规定。

6.5.3 本条增加了对尾水管肘管底板预留一期混凝土厚度要求和尾水管、锥管及蜗壳预留二期混凝土尺寸及空间的规定。

6.5.4~6.5.12 沿用原规范条款 4.5.11 条~4.5.19 条。6.5.9 条补充了抗冲磨混凝土符合《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》（DL/T 5207）的有关规定。6.5.10 条补充了“其他开孔（洞）”的结构加强要求。

6.5.14 本条为新增条款，近年来自然灾害频发，厂房的安全显得更加重要，为保证厂房的安全，可根据地形、地质及自然条件，将厂区平台以上主副厂房外墙采用钢筋混凝土结构，增加抵御自然灾害的能力。

- 6.5.15** 增加对定子、转子及下机架基础二期混凝土的规定。
- 6.5.16** 增加对各层楼盖设计的构造要求。发电机无梁板式（也称为厚板式）设计，施工简便，底面平整，便于电缆敷设。各层楼盖的主梁、柱、基础等结构的设计荷载取值应按荷载设计规范计算折算荷载。
- 6.5.17** 增加了厂房抗震构造措施。

7 地下厂房

7.1 地下厂房布置

7.1.2 地下厂房各种布置方式的适用条件及优缺点：

(1) 首部式地下厂房一般在引水道首部地质条件、水文地质条件好的情况下采用，其优点是：压力引水道比较短，节约投资；水头损失较小，发电效益高；不设上游调压室；机组运行比较灵活，利于担负调峰任务。缺点是：厂房距离水库较近，防渗排水问题较为突出，同时由于尾水洞较长，需要设置尾水调压室。国外如加拿大丘吉尔瀑布水电站、葡萄牙撒拉蒙德水电站等，以及国内小浪底、构皮滩、溪洛渡、小湾、二滩等大型厂房采用首部式布置。

(2) 中部式地下厂房一般在引水道首部地质条件不佳，而中部有较合适的地形地质条件时采用，其优点是：当厂房位置合适时，既可不设置上游调压室，又可不设置尾水调压室，且引水道和尾水洞长度相当，投资一般较尾部式小；防渗与排水较首部式简单。缺点是：当流道较长时，可能需要同时设置上游调压室和尾水调压室，投资增加；当尾水洞较短，经论证可采用变顶高尾水洞替代尾水调压室，如三峡地下电站、彭水水电站等。

(3) 尾部式地下厂房有较长的引水流道和较短的尾水洞，一般需设上游调压室，多用于远距离高水头引水式电站，其优点是：适应的水头范围较大，最高水头可达到 1000m 以上；厂房洞室接近地面，进厂交通洞、出线洞、施工交通通道等均较短，开关站、副厂房可布置于地面，运行维护方便，国内已建的高水头地下电站 70% 以上为尾部式。潭岭、鲁布革、锦屏二级等水电站均为尾部式。

7.1.4 在根据水电站总布置和地形地质条件确定了厂房位置后，厂房轴线方向应从对围岩稳定最有利情况来选择，主要考虑因素

是围岩构造弱面和地应力。

一般情况下主洞室纵轴线与构造弱面正交对围岩稳定最为有利，但是围岩构造弱面往往是多组的，因此提出选择洞室纵轴线时，不仅要考虑主要构造弱面方向，而且要兼顾次要的构造弱面的影响，以期减少构造弱面的裸露，有利于围岩的稳定和支护。评价构造弱面的影响时，不仅要考虑它的数量、倾角，还要考虑其性质，特别是抗剪强度等。

洞室开挖使洞壁原来法向地应力释放，围岩应力重分布，在应力超过岩体极限强度区域，岩体发生塑性屈服变形转移塌落，因此应使洞室纵轴线走向与地应力最大主应力方向平行或呈较小夹角，有利于边壁稳定，减少侧向压力或变形，尤其是高地应力地区。设计中，在考虑主洞室轴线与地应力方向的夹角时，应兼顾和主洞室正交的尾水洞、母线洞等洞室轴线与地应力方向的夹角。工程经验表明，在高地应力区，厂房主洞室轴线和地应力的夹角为 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 较为合适。

7.1.6 地下洞室顶部岩体厚度，随着岩体的完整性和岩石的物理力学性质的差异以及布置上的要求，变幅甚大。若覆盖岩层太薄，由于顶部构造弱面的切割而形不成自承拱；但也并不是越厚越好，埋入深度很深的地下厂房，随着地应力的增大，施工中易发生岩爆现象。因此，洞顶岩体厚度应适度，对于一般工程提出了最小厚度的建议范围值。

国内部分已建水电站地下厂房岩体覆盖厚度见表 7，从表中可见 92% 的工程岩体覆盖厚度大于 2 倍洞宽。

表 7 国内部分已建水电站地下厂房岩体覆盖厚度

序号	水电站名称	最小埋设深度 (m)	相当于开挖宽度的倍数
1	大广坝	14	0.92
2	三峡地下电站	30	0.92
3	大发	30	1.30
4	刘家峡	50	1.70

表7(续)

序号	水电站名称	最小埋设深度 (m)	相当于开挖宽度的倍数
5	毛家村	25	2.00
6	龚嘴	50	2.00
7	白山	55	2.20
8	仁宗海	50	2.30
9	闽东	62	2.50
10	小浪底	70	2.70
11	功果桥	80	2.90
12	长湖	60	3.50
13	龙滩	110	3.60
14	向家坝	120	3.60
15	彭水	112	3.70
16	潭岭	50	4.00
17	南水	75	4.50
18	水布垭	105	4.50
19	天荒坪	90	4.50
20	鲁地拉	140	4.80
21	山美	85	5.40
22	桐柏	140	5.70
23	糯扎渡	180	5.80
24	锦屏一级	170	5.90
25	官地	185	5.90
26	绿水河	80	6.00
27	山椿子	70	6.30
28	长河坝	200	6.50
29	小江	110	6.50
30	泉水	84	7.00
31	瀑布沟	220	7.20

表7(续)

序号	水电站名称	最小埋设深度 (m)	相当于开挖宽度的倍数
32	东风	150	7.50
33	天荒坪	160	7.60
34	拉西瓦	230	7.70
35	太平驿	160	8.00
36	鲁布革	150	8.30
37	二道桥	140	8.30
38	泰安抽水蓄能	205	8.40
39	十三陵	200	8.60
40	二滩	300	9.70
41	宝泉	210	9.80
42	构皮滩	274	10.10
43	溪洛渡	340	10.70
44	大岗山	360	11.70
45	映秀湾	200	12.00
46	小湾	380	12.40
47	水牛家	211	13.10
48	宜兴	310	14.10
49	小天都	257	14.40
50	渔子溪一级	250	15.00
51	狮子坪	280	15.90
52	广州抽水蓄能	300	16.50

洞室上部及侧旁岩体覆盖厚度与地质条件紧密相关，本标准提出对于主洞室一般不小于洞室开挖宽度的2倍是合适的。对于地质条件较好的水电站，经技术论证，采取工程措施后可以突破这一规定。

7.1.7 地下洞室之间的岩体厚度，与地质条件、洞室规模等因素有关，难以得出统一的规定。洞间岩体厚度较大时，有利于洞

室的稳定，但母线洞长度增加，相应的增加了低压母线长度和长期电能损耗。因此应在满足洞室围岩稳定的情况下，尽量减小洞间岩体厚度。

表 8 和表 9 列举了国内部分已（在）建地下厂房相邻洞室间岩体厚度与大洞室开挖高度及相邻洞室平均开挖宽度的比值，统计分析，岩体厚度与大洞室高度比值 $L/H=0.31\sim 0.79$ ，其中 88% 大于 0.5。岩体厚度与相邻洞室平均开挖宽度的比值 $L/B=0.8\sim 2.6$ ，其中 92% 在 1.0~2.0 之间，73% 在 1.5 以上。地下厂房一般均选择地质条件较好的厂址，岩体强度较大，故建议两洞室间的岩体厚度一般不小于相邻洞室平均开挖宽度的 1~1.5 倍。在高地应力区，特别当围岩强度应力比较低时，数值分析和工程监测表明，洞室开挖后岩体卸荷松弛影响深度普遍大于同类埋深和规模的洞室，洞间岩体破损区易连通，故要求洞间岩体厚度不小于 1.5 倍大洞室开挖宽度，如锦屏一级水电站，洞间岩体厚度为大洞室开挖宽度的 1.56 倍，官地水电站为 1.58 倍。

尾水管之间的岩体往往难以满足 1.0 倍洞室宽度的要求，可不在此限制之列，但应通过结构设计和施工措施加以妥善解决。

表 8 国内部分已（在）建地下厂房洞室间岩体厚度
与大洞室开挖高度关系

序号	水电站名称	大洞室开挖高度 (m)	洞室间岩体厚度 (m)	洞间岩体厚度与 大洞室高度之比
1	白山	53.85	16.50	0.31
2	构皮滩	73.32	30.00	0.41
3	向家坝	85.50	40.00	0.47
4	小浪底	61.44	32.80	0.53
5	功果桥	74.45	40.00	0.54
6	糯扎渡	81.60	45.75	0.56
7	龙滩	76.40	43.00	0.56
8	二滩	65.38	37.50	0.57

表8(续)

序号	水电站名称	大洞室开挖高度 (m)	洞室间岩体厚度 (m)	洞间岩体厚度与 大洞室高度之比
9	太平驿	42.00	24.80	0.59
10	东风	47.94	28.40	0.59
11	鲁地拉	75.60	45.00	0.60
12	长河坝	73.35	45.00	0.61
13	小湾	82.00	50.00	0.61
14	溪洛渡	75.60	47.65	0.63
15	瀑布沟	70.10	43.90	0.63
16	官地	76.30	49.20	0.64
17	大岗山	73.78	47.50	0.64
18	泰安抽水蓄能	53.67	34.30	0.64
19	桐柏	57.25	37.30	0.65
20	拉西瓦	74.74	49.70	0.66
21	锦屏一级	68.80	45.00	0.65
22	周宁	42.70	28.50	0.67
23	天荒坪	47.73	33.50	0.70
24	索风营	57.90	43.15	0.75
25	宜兴	52.40	40.00	0.76
26	广州抽水蓄能	44.54	35.00	0.79

表9 国内部分已(在)建地下厂房洞室间岩体
厚度与平均洞宽关系

序号	水电站名称	大洞室 开挖宽度 (m)	小洞室 开挖宽度 (m)	洞室间 岩体厚度 (m)	岩体厚度比 平均洞宽
1	白山	25.0	15.0	16.50	0.80
2	西洱河一级	18.0	6.6	12.00	1.00
3	大发	25.4	16.2	23.60	1.13

表9(续)

序号	水电站名称	大洞室 开挖宽度 (m)	小洞室 开挖宽度 (m)	洞室间 岩体厚度 (m)	岩体厚度比 平均洞宽
4	仁宗海	23.4	16.2	24.10	1.22
5	大广坝	15.0	4.5	13.00	1.30
6	古田一级	9.7	3.0	8.00	1.30
7	向家坝	33.4	26.3	40.00	1.34
8	构皮滩	27.0	15.8	30.00	1.40
9	映秀湾	17.0	7.2	17.30	1.40
10	太平驿	19.7	12.4	23.40	1.40
11	二滩	30.7	18.3	37.00	1.50
12	东风	21.7	19.5	30.20	1.50
13	龚嘴	24.5	5.0	22.30	1.50
14	泰安	25.9	17.5	34.30	1.58
15	小浪底	26.7	14.4	32.80	1.60
16	拉西瓦	30.0	29.0	49.70	1.68
17	天荒坪	22.4	17.0	34.00	1.70
18	十三陵	23.0	16.5	34.10	1.70
19	龙滩	30.7	19.8	43.00	1.70
20	瀑布沟	30.7	18.3	42.95	1.75
21	桐柏	24.5	18.0	37.30	1.76
22	广蓄	22.0	17.2	34.50	1.80
23	潭岭	12.5	5.0	14.80	1.80
24	渔子溪一级	14.0	7.9	19.90	1.80
25	小江	16.8	7.4	21.90	1.80
26	长河坝	30.8	18.8	45.00	1.81
27	功果桥	27.4	16.5	40.00	1.82

表9(续)

序号	水电站名称	大洞室 开挖宽度 (m)	小洞室 开挖宽度 (m)	洞室间 岩体厚度 (m)	岩体厚度比 平均洞宽
28	糯扎渡	31.0	19.0	45.75	1.83
29	溪洛渡	31.9	19.8	47.65	1.84
30	锦屏一级	28.9	19.2	45.00	1.87
31	鲁地拉	29.2	18.2	45.00	1.90
32	大岗山	30.8	18.8	47.50	1.92
33	宜兴	23.5	17.5	40.00	1.95
34	官地	31.1	18.8	49.20	1.97
35	盐水沟	12.8	8.2	20.50	2.00
36	小湾	30.6	19.0	50.00	2.02
37	鲁布革	17.5	12.5	39.00	2.60

7.1.8 地下厂房洞室群的布置应重视洞室之间交岔口的问题。由于交岔洞口受力情况复杂，布置时尽量采用较大夹角，并在交叉洞口采取合适的施工方法和支护加强措施，保证洞口的稳定。在国内一些水电站建设过程中，不少工程曾在交岔口处发生程度不同的塌方或衬砌被拉裂的情况。国内已建水电站，其引水管道、尾水管道、母线洞以及交通运输洞等的轴线大部分与主厂房纵轴线垂直，也有个别水电站因考虑到这些附属洞室的围岩节理裂隙分布情况而布置成斜交。交岔口围岩稳定除与地质条件有关外，还与支护情况及施工程序有很密切的关系，应引起重视。

7.1.9 减小地下洞室的规模，尤其是压缩洞室的横断面尺寸，不仅可减少工程量、节约投资，更重要的是对洞室围岩稳定有利。另外，洞形对洞室围岩受力条件的影响也是很大的，但洞形太复杂，会增加施工方面的不便。压缩洞室尺寸和选择合适洞形是地下厂房设计的重要环节。

减小地下厂房洞室尺寸的主要措施有：

(1) 合理的机电设备选型。包括采用高比转速混流式水轮机、高流速的阀门和蜗壳，选用先进桥式吊车等。

(2) 优化机组附属设备及其管路的布置，使其简洁、紧凑，充分利用空间。

(3) 压力管道斜向进厂，如鲁布革、广蓄、东风、二滩、水布垭等。

(4) 只在厂房下游侧设置贯穿全厂的水平通道，如三峡地下电站、构皮滩、水布垭等。

(5) 采用岩壁式吊车梁，并尽可能选用较大悬臂。

(6) 边墙局部扩挖，包括蜗壳部位扩挖，边墙局部倒悬，如三峡地下电站；压力管道斜向进厂，在主阀部位上游边墙局部扩挖，如鲁布革水电站。

(7) 采用窄高型尾水管。

(8) 减小蜗壳外围混凝土厚度，改进机墩结构，优化结构设计。

(9) 优先采用柔性支护，尽量不采用钢筋混凝土衬砌。

(10) 地下水微弱、洞室边墙干燥时，不设防潮墙。

(11) 尾水管锥管、肘管部位采用掏槽开挖，最大限度保留尾水管间岩体，减少厂房全断面开挖高度，有利于提高洞室稳定性，如三峡地下电站、构皮滩地下电站等。

7.1.10 地下厂房控制尺寸的确定和地面厂房基本一样，但应结合地下厂房的特点，平面尺寸应注意满足引水洞、尾水管（洞）之间岩体厚度的要求，高度上应注意母线洞、顶棚等布置的要求，确保洞室围岩稳定，并应优化厂内布置，尽量减小洞室尺寸。

地下厂房安装间的位置，应结合厂区地形地质及进厂交通线的具体位置而定。

多数地下厂房的安装间与副厂房为左右端分列，这种布置的优点是减少运行与安装检修的干扰，当机组台数不多时，比较适宜，但是当机组台数较多，首末两台机组投产日期相隔较长时，

将给这期间的运行带来不便。

另外，也有将安装间布置在机组之间，副厂房布置于主厂房端部。这种布置方式有利于多机组电站的分期投产，且由于不受吊车左、右端吊钩限制线的限制，安装间的面积可充分利用。安装间布置在机组之间，安装间下岩体可以保留，对围岩的稳定也是有利的，因此，在地质条件不好时，可考虑将安装场布置于厂房中间。

交通运输洞可从安装间下游墙或端墙进厂，应结合安装间的布置、机组部件安装、检修工位布置和进厂车辆装卸货位置等综合分析确定。

地下电站桥机安装时，由于受空间限制，采用汽车吊等吊装机械较为困难，在安装间布置天锚，便于桥机安装和检修时的吊装，尤其是桥机安装时大梁的吊装。

7.1.11 副厂房的布置，应具体情况具体分析，遵循因地制宜的原则，即集中与分散相结合，地面与地下相结合的原则。应简化布置，减小地下洞室规模，提供较好的厂房运行管理条件。副厂房全部放置于地下，将大大增加地下洞室工程量，延长施工期和增加造价，故不能片面强调运行方便而将副厂房全部布置于地下，尽量将检修试验、辅助生产和行政管理用房布置于地面。

地下副厂房布置方式一般有下列两种：

(1) 副厂房布置于主厂房或主变室端部。大型地下厂房，主洞室跨度较大，多采用这种布置方式，不会增加洞室跨度，只需加长洞室即可。如三峡地下电站、构皮滩地下电站等。

(2) 副厂房与主厂房纵轴线平行布置于主厂房一侧，一般为下游侧。主洞室跨度较小的电站，当地质条件较好，副厂房布置于主厂房一侧，洞室总跨度仍不大时，可采用这种方式。如西洱河一级，流溪河水电站等。

7.1.12 主变压器室及开关站的布置方式一般有下列三种：

(1) 主变压器室和开关站均布置于地下。溪洛渡、拉西瓦、锦屏一级、锦屏二级、天荒坪、鲁布革、十三陵、东风等水电站

采用了这种布置方式。该方式布置比较紧凑，并可省去大量母线及母线洞（竖井）开挖，但增加了主洞室规模。随着户内式高压配电装置的发展，今后地下厂房设计会更多地把主变压器及高压开关站布置于地下洞室内。

主变室布置于地下，有以下几种布置方式：

- a. 单独洞室，与主厂房洞室平行或斜交。
- b. 布置于主厂房洞室端部。
- c. 布置于主机间内，位于机组下游侧或与机组间隔布置，用防爆墙与主机间隔开。

大中型水电站一般采用单独洞室布置。

地下开关站一般布置于主变室顶部，与主变压器在同一个洞室内。

(2) 主变压器室布置于地下，开关站布置于地面。根据国内外已建地下电站的布置统计资料，将主变压器放在地下，开关站放在地面的情况居多。如构皮滩、小浪底、二滩、瀑布沟、太平驿、毛家嘴、鱼子溪一级等水电站。

(3) 主变压器室和开关站均布置于地面。对于埋藏较浅的厂房，将主变压器移置于地面，以节省洞室开挖工程量。如三峡地下电站，彭水、水布垭、龚嘴、大广坝等水电站。主变压器或开关站布置于地面时，应注意泄洪雾化的影响。

7.1.13 地下厂房因受种种条件的限制，交通运输洞纵坡比一般交通洞要陡，为停车安全计，要求在进厂前有一平直段。另外，交通洞往往与其他用途结合兼用，故在洞室的断面尺寸方面应综合考虑。

山区河流、洪水有暴涨暴落情况，若洪水历时短或有其他困难时，洞口亦可布置在校核洪水位以下，而在洞口加设防洪门、防洪堤及人行安全通道等措施。进口段做成反坡，防止雨水倒灌。

地下厂房的设备运输及人行交通除了大部分采用水平运输洞方式外，对于首部式地下厂房，由于厂房深埋于地下，如采用水

平运输洞，则可能线路很长，很不经济，此时可采用垂直运输方式（即设置竖井及电梯）。

7.1.14 为满足消防安全要求，地下厂房安全出口应不少于 2 个，并应分散布置。

7.1.15 国内一些水电站的运行经验表明，没有发生过引水管球阀爆破事故。随着国内阀体制造水平的提高和明管材料的加强，阀体爆破的几率越来越少，故在规范中不再强调阀室单独放置，而倾向于尽可能将阀门放置于主厂房内，不仅可利用桥机起吊，而且可省去阀门洞室和单独的阀门起吊设备，节约投资。但也不排除特殊情况，例如少数高水头冲击式机组的水电站，若将阀门放置主厂房内将会大大增加厂房宽度时，经论证可单独设置。

7.1.16 我国已建成的中小型地下厂房，如广东的流溪河、南水、长湖等水电站，采用了长压力尾水洞的布置型式，而中间不设尾水调压室。其主要措施：

- (1) 延长导叶关闭时间。
- (2) 限制支持盖与转轮之间的空隙，以防止机组上抬。
- (3) 于尾水锥管内加设十字补气架。
- (4) 支持盖上设置真空破坏阀。

从已运行的长尾水洞水电站原型观测来看，情况比较稳定。但是，对于大中型水电站，长压力尾水洞不设调压室的布置，还缺少实践，如拟采用这种布置方式，必须有专门论证，以确保水电站安全运行。

已建的三峡地下电站、彭水电站，采用变顶高尾水洞方案，替代尾水调压室。当山体单薄，或地质条件较差，设置尾水调压室困难时，可研究替代方案。

根据 SL 511 的要求，尾水管进口处真空度不应超过 8m 水柱，在高海拔地区，由于大气压力较低，应进行高程修正。

尾水闸门的操作廊道底面或操作平台高程一般要高于尾水洞出口的下游校核洪水位和尾水洞（尾水调压室）的最高涌浪水位，若布置上有困难，可低于该高程，但是其与厂房相通的进出

口应高于该高程，或设专门的挡水密封门，以防止尾水倒灌进入厂房，酿成事故。

7.1.17 出线洞（井）可为平洞、斜井或竖井，应使出线长度最短，出口应距离地面开关站或出线场较近，并应做好防雨、防水措施。为便于安装、运行和维护，洞（井）内应布置交通通道，斜井应设置台阶，竖井应设置楼梯，必要时可设置电梯。

7.1.19 防渗排水对裂隙发育、地下水渗水量大的岩体或靠近水库的地下厂房尤为重要。防渗排水可大大减少地下水对围岩的不利影响，减少作用于围岩支护结构上的渗水压力，并能改善厂内的湿度。

对地下水较丰富的地下厂房应以洞室外围排水为主，但这将会增加工程投资，应根据工程具体情况考虑。

提前形成厂外排水系统，可使厂房主洞室开挖支护施工安全、方便。

厂外排水有条件的尽量采用自流排水，可减少抽排设备的投资和运行费用。高程较高的排水洞一般都具备自流排水条件。

厂外排水系统的集水井可布置在厂房主洞室外，也可布置于主洞室内，具体应根据工程地质、水文地质条件和工程布置情况确定。当岩体透水性强、地下水丰富、洞室靠近水库、渗水量大时，集水井宜在主洞室外单独设置，有利于厂房安全。若要设置于主洞室内，应单独布置，并应在集水井与厂房连通通道处设置密封门或密封盖板，以防抽排设备发生故障导致水淹厂房。当地下水渗水量较小时，可将集水井布置于主洞室内，并可与厂内渗漏集水井结合，以减少工程投资，并便于抽排设备的运行管理和维修。

彭水电站位于岩溶地区，在主洞室外单独设置厂外排水系统集水井。

构皮滩水电站同样位于岩溶地区，厂外排水系统的集水井布置在厂房主洞室内，单独设置，并与厂内渗漏集水井之间设置了连通阀，其目的是当厂外渗水量大时，打开连通阀，利用厂内渗

漏集水井内的水泵帮助排水。

三峡地下电站由于围岩透水性弱，地下水渗水量较小，厂外排水系统的集水井与厂内渗漏集水井结合布置。

7.1.20 对可能造成地下厂房进水的地质探洞、探槽或施工中的临时洞、井等，应进行安全有效的封堵，避免水淹厂房。

张家界鱼潭水电站地下厂房由于对探洞与岩石产状、洪水特性处理要求等认识不一，施工期封堵不严，造成施工期水淹主厂房洞室，运营期因岩石（石英砂岩，Ⅲ类）遭洪水（100年一遇）冲刷，局部河岸岩体被掏，封堵破坏，全厂淹没至发电机层以上。

7.2 地下厂房结构设计

7.2.2~7.2.6 地下厂房洞室围岩稳定分析的目的，是为充分发挥围岩自身的承载能力，对围岩稳定性作出评价，提出合理的支护时间和支护方式。

影响围岩稳定性的主要因素有：①岩体结构；②岩体应力；③地下水；④工程因素（洞室大小、间距、形状以及施工方法、开挖次序等）。

地下厂房围岩稳定分析方法，一般包括定性分析和定量分析两类。定性分析有地质分析法和工程类比法；定量分析包括块体稳定分析法、数值分析法、模型试验法、监控量测法和反馈分析法。

(1) 地质分析法。通过地质勘测手段了解和分析岩体的特性、地质构造、岩体结构与工程关系、岩体地应力和地下水影响等主要因素对围岩稳定的影响。

国外的MRM、Q系统法和我国的和差计分法等，这些方法统计数据多以单洞为主，目前在水利水电工程地下洞室围岩分类、稳定性评价和支护设计中也得到了广泛的应用。

(2) 工程类比法。目前在地下工程的设计中，工程类比法仍作为围岩的稳定和支护设计的主要设计方法。围岩分类仍是工程

类比的基础，现已为国内外设计所广泛应用。厂房围岩分类可参见《水利水电工程地质勘察规范》（GB 50487）。工程类比法贯穿于工程设计施工全过程，即根据各设计阶段对围岩特性的了解深度及施工中观测的情况，及时修正设计。

工程类比法分直接类比法和间接类比法。直接类比法是根据围岩基本分类和洞室规模，依据现行喷锚支护规范，确定所设计工程的支护类型及参数。间接类比法是和基本相同或类似的已建工程进行对比，确定支护类型及参数。

间接类比法应注意工程的可比性，应满足下列基本条件：

- a. 工程规模、工程等级基本相同。
- b. 洞室形状、规模、洞群布局基本相同。
- c. 岩层特性、地质构造、岩体力学参数、岩体完整性、围岩类别、洞室埋深和地下水的影响程度等基本相似。
- d. 初始地应力场的量级基本相当。
- e. 施工方法基本相同。

间接类比法的一般步骤如下：

- a. 根据拟建工程的地形、工程地质、水文地质情况，确定围岩的类别和初步判断工程的地质环境和属性。
- b. 根据拟建地下厂房的布置特点和洞室规模，拟定洞室的轴线和地下厂房主要洞室的布置格局。
- c. 与国内外同类工程相比较，初步拟定主要洞室围岩的支护型式及支护参数。
- d. 对于洞室规模较小、地质条件优良，可直接根据类比和经验判断确定支护参数。

(3) 块体稳定分析法。对由软弱结构面切割成的不稳定块体可采用块体理论进行稳定分析。块体稳定性分析的基本步骤如下：

- a. 针对由特定结构面组合切割形成的岩石块体，采用全空间赤平投影方法或矢量分析方法，根据有限性定理和可动性定理排除无限块体和不可动块体。

b. 对有界可移动块体进行运动学分析，确定块体在重力和外力作用下的运动形式（冒落、单面滑动或双面滑动等），排除稳定块体。

c. 根据滑动面的物理力学特性进行力学分析，求出可移动块体的净滑动力；若净滑动力小于零，则说明是可能失稳块体；大于或等于零则说明是关键块体。

d. 进行支护方案设计使得岩石块体的支护力大于净滑动力并具有一定的安全裕度。

当采用“滑动型”块体计算时，抗滑稳定安全系数为：

$$K_c \geq \frac{fN + CA + P_{AS}}{P_s} \quad (1)$$

式中 K_c ——稳定安全系数， $K_c \geq 1.5 \sim 1.8$ ；

N ——滑动面上的法向作用力，kN；

P_s ——平行于滑动面方向的滑动力，kN；

P_{AS} ——平行于滑动面的抗滑力，kN；

f 、 C ——滑动面材料的摩擦系数和黏结力，kPa。

当采用“悬吊型”块体计算时，按不稳定块体重量计算支护抗力：

$$K_c \geq G/P_A \quad K_c \geq 2.0 \quad (2)$$

式中 P_A ——支护抗力，kN；

G ——岩块重量，kN。

(4) 数值分析法。围岩稳定分析所采用的数值分析方法主要包括有限元法、有限差分法和离散元法等；其中，以有限元法、有限差分法最为常用。对节理裂隙发育的岩体可采用离散元法、不连续变形分析（DDA）法。有限元法包括弹塑性有限元、黏弹（塑）性有限元和弹塑性损伤有限元等，在地下厂房设计中应用比较广泛。

数值分析法应根据不同围岩特性选用合适的力学模型：

a. 坚硬完整围岩可采用弹性或弹塑性力学模型计算。

b. 中硬岩、软弱围岩、高地应力围岩宜采用弹塑性力学模

型计算。

c. 有流变性质的围岩宜采用黏弹塑性力学模型计算。

数值分析法需注意解决下列四个方面的问题：

a. 围岩力学特性的模拟。按照应力—应变关系，选择不同的本构方程，如线弹性、非线性弹塑性、黏弹（塑）性等。

b. 初始地应力场确定。根据实测地应力资料进行回归分析，推求初始地应力场。对初始地应力场的分析，除了地应力测量结果外，应充分利用前期勘探平洞揭示和地应力有关的变形破坏形迹。

c. 围岩力学参数的选取。输入的原始参数对计算结果影响很大，一般采用室内和现场试验资料分析确定。当缺少试验资料时，采用工程类比综合分析确定计算参数。如果有洞室围岩监测资料，还可依据监测数据进行围岩力学参数的反演分析。

d. 洞室分期开挖对围岩稳定的影响。对软岩和地应力高的围岩，不同的开挖顺序对围岩的应力和变形有一定的影响。

数值计算模型应满足下列要求：

a. 计算模型应符合工程实际，能比较准确地反映区域内的地质因素和工程因素，及地下洞室的体形、施工开挖顺序、支护措施、支护时间等实际工作状态。

b. 计算模型应简练、清晰，满足计算精度的要求。对某些关键区域，如洞室周围区域，地质构造等应力和位移变化梯度大或者荷载有突变的部位，单元划分应适当加密。

c. 计算模型的模拟范围，应满足开挖引起的二次应力场在模型边界处的影响小于初始应力场的 3%~5% 或取洞径方向不小于 3~5 倍洞径。

d. 计算模型应考虑洞室开挖后，受开挖爆破和卸荷的影响，在洞周围岩一定深度范围内形成松动圈。

e. 地下洞室数值计算模型单元的划分还要考虑分期开挖的界线。

地下洞室围岩稳定性数值分析应考虑对复杂施工过程的模拟，根据不同支护型式合理选择单元类型。

工程岩体中的软弱夹层、岩层层面等不连续面，可用节理单元进行模拟。

(5) 监控量测法。监控量测法是通过现场量测围岩的应力、变形和支护结构的受力状况，评价围岩的稳定性和支护结构的安全性，是一种较为直观和实用的设计方法。

监控量测法与动态反馈分析相结合，根据洞室围岩施工期的变形和应力监测等信息，并充分考虑开挖揭露围岩地质条件的变化情况，及时调整数值分析模型和参数取值，对围岩稳定性和支护系统的工作性态进行综合分析和评价，并对施工顺序、支护方案及其参数进行必要的调整和优化。

监控量测法已在地下工程设计和施工中广泛采用，特别适用于高地应力状态的围岩和稳定性差的软弱围岩或跨度较大的地下洞室。

(6) 模型试验法。国内常用的模型试验类型主要有原位模拟洞试验和地质力学模型试验。

原位模型试验能反映实际洞室的地质构造、地应力情况，并较直观地对地下洞室围岩稳定性和支护效果进行评价。原位试验常需较大比尺。这种模型试验一般只用于大型的地下工程。

地质力学模型试验是研究洞室围岩的变形、应力、破坏形态和支护效应，评价支护和开挖对洞室围岩稳定的影响。模型试验材料应根据岩性相似性原理确定。

7.2.8 20世纪60年代以后国内外的地下洞室普遍采用新奥法施工。现场监测是新奥法施工主要内容之一，是隧洞安全施工的保证。

目前新奥法在设计理论上不很成熟，很多情况下还不能作出准确的定量计算，有限元虽然可以作为一种计算手段，但岩体情况复杂，施工状况又受很多条件影响，因此计算结果还难以准确地反映实际情况。目前常用经验统计类比的方法作事先的设计，然后在施工过程中不断监测围岩应力应变状况，随时调整支护措施。

厂房洞室开挖前，在先期开挖的厂外排水洞内，提前埋设多点位移计等变形监测仪器，这样在厂房主洞室开挖过程中，监测

到的围岩变形结果，更为真实可靠。故围岩变形监测应于主洞室开挖之前实施，结合厂外排水洞布置监测设备，可节约工程投资。

地下水监测主要是地下水位和外水压力的监测。

7.2.9 地下厂房洞室的形状对围岩稳定和围岩应力分布有很大影响。已建地下厂房的顶拱大多数做成曲线拱形。岩石较完整、地应力较低的情况下，普遍采用直墙圆顶拱形式。软弱破碎的围岩，侧压力相对较大，洞室边墙稳定难以保持时，则选用马蹄形或卵形断面。如日本的新高濑川和今市地下水电站是马蹄形断面。联邦德国的瓦尔德克-2号抽水蓄能电站与南斯拉夫的维诺多尔地下电站是卵形断面。挪威的莱福斯达水电站厂房采用拱顶斜边墙形。南斯拉夫的雅布兰尼卡水电站厂房建在片麻岩中，为了防止岩层滑动、蠕动及漏水，采用了卵形断面，并做了较厚的钢筋混凝土衬砌。

7.2.10 地下工程的设计理论和方法，在20世纪60年代后有了较大的发展，即由过去将岩体视为外荷转向将岩体当作承载结构，采取锚喷支护结构型式。地下结构设计的基本指导思想是充分发挥围岩自身承载能力，因地制宜地搞好地下洞室的开挖和支护。

所谓“充分发挥围岩自身承载能力”，就是要避免围岩破坏或失稳。在设计中，应根据当地的地质条件，合理选择洞址和洞轴线，选择一个围岩应力分布比较均匀的洞型，避免过大的应力集中，制定出合理的开挖程序和开挖方法，搞好适时支护，使围岩的承载潜力充分发挥出来。

所谓“适时支护”，就是支护的时机要恰到好处。从图3中可以看出，支护过早，支护结构就要承受很大的“形变压力”，将是不经济的；过迟了，围岩会过度松弛而导致失稳，将是不安全的。一般说来，稳定性较好的可以在开挖完一段时间之后再做支护；稳定性差的，为防止塌滑，在开挖后应及时支护。

7.2.11 洞室的进口段、交岔段、洞室间岩体或岩柱，由于围岩临空、应力集中以及多次开挖爆破影响，围岩稳定性大为降低，故一般需采取加强支护措施，并选择适当的施工程序。例如刘家

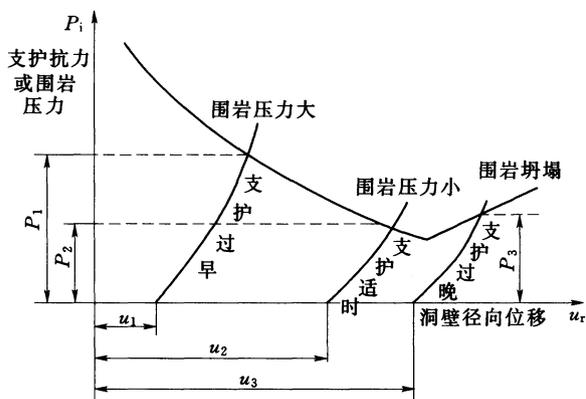


图3 洞壁位移与支护抗力关系图

峡水电站的窑洞式地下厂房的进口段采用了全断面钢筋混凝土衬砌，以及先拱后墙的施工程序，保证了施工和运行的安全。

渔子溪和龚嘴水电站的母线洞与主厂房正交，当母线洞衬砌后再开挖主厂房下部尾水管时，由于围岩变形，母线洞衬砌开裂，以致漏水滴在母线上，影响运行安全。对于这些部位可以先作一层锚喷支护，以保证开挖厂房下部岩石时母线洞室的围岩稳定与安全，待变形趋向稳定后，再对母线洞作局部二次锚喷支护或衬砌。

映秀湾水电站机组间距 17m，尾水管宽 10m，衬砌厚 1m，尾水管间的岩柱厚度只有 5m，采用了先挖 1 号、3 号尾水管，待衬砌后再挖 2 号尾水管的措施，保证了施工安全。白山水电站亦采取了先挖 2 号尾水管，后挖两侧的 1 号和 3 号，并对尾水管之间的岩柱采用了对穿锚索加固。

7.2.12 20 世纪 70 年代以来锚喷支护在国内外地下工程中得到广泛应用，在减少洞室开挖、节约材料、加快施工进度和降低工程造价等方面，起了显著作用。所以本标准提出首先研究柔性支护的合宜性，尽量不单独使用刚性支护。

表 10 列出了国内部分已（在）建洞室规模较大的地下电站柔性支护设计参数，供设计参考。

表 10 国内部分已(在)建地下电站厂房洞室支护参数表

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
1	二滩	L=280.29 B=30.7/25.5 H=65.38	新鲜坚硬的正长岩和灰长岩为主, 变形模量 35GPa, 泊松比 0.17; 局部变质玄武岩, 变形模量 10~35GPa, 泊松比 0.17~0.2; 地应力: 最大主应力 σ_1 , 正长岩灰长岩 20~25MPa, 变质玄武岩 30~35MPa; $\alpha=34^\circ\sim 84^\circ$; $\beta=29^\circ$	喷素混凝土厚 15cm, 局部厚 20cm, 挂钢丝绳网; $\phi 32@3m \times 3m$ (局部 $1m \times 1m$), L=8m, $\phi 28 @ 3m \times 4.4m$, L=6m (人岩 5.7m) 间隔布置; 施工中局部增加了 P=150kN, L=11m @ 2.2m x 3.0m 单股软锚索	喷素混凝土厚 10cm, 局部加喷 8~10cm 纤维混凝土; $\phi 32$, L=8m 和 $\phi 28$, L=6m @ 1.5m x 1.5m, 间隔布置; 局部设 P=1750kN 锚索, L=20m/15m	喷素混凝土, 厚 10cm, 局部挂钢丝绳网或加喷 8~10cm 纤维混凝土; $\phi 28$, L=6m, @ 1.5m x 1.5m; 局部设 P=1750kN 锚索, L=20m/15m	
2	小浪底	L=251.5 B=26.2 H=61.44	顶拱以厚层硅质砂岩为主, 边墙以钙质细砂岩为主, Q 值 12.7, II _T , 泊松比 0.2, C=0.6MPa, $\varphi=45^\circ$; $\alpha=25^\circ\sim 30^\circ$	喷 C25 混凝土, 厚 20cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; 张拉锚杆 P=150kN, $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m$, L=8m/6m 间隔布置, 树脂锚杆; 锚索 P=1500kN, @ 4m x 6m, L=25m	喷混凝土, 厚 20cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; 张拉锚杆 P=150kN, $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m$, L=10m/6m, 间隔布置; 树脂锚杆, 长锚杆为砂浆锚杆; 局部 P=500kN, L=12m 预应力锚杆	喷素混凝土, 厚 20cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; 张拉锚杆 P=150kN, $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m$, L=10m/6m, 间隔布置; 树脂锚杆, 长锚杆为砂浆锚杆; 局部 P=500kN, L=12m 预应力锚杆	(与上游边墙相同)

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
3	构皮滩	L=230.45 B=27/25.3 H=73.32	中厚—厚层灰岩， 岩层倾角 $40^{\circ} \sim 48^{\circ}$ ， II类为主，变形模量 25~30GPa，泊松比 0.25，湿抗压强度 70 ~80MPa，地应力 11 ~14MPa； $\alpha = 30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ； $\beta = 35^{\circ}$ ； $\theta = 35^{\circ} \sim 40^{\circ}$	喷钢纤维混凝土 (C20)，厚 15cm； $\phi 25/\phi 28 @ 1.5m \times$ 1.5m，L = 6m/9m， 其中长锚杆为 P = 50kN 张拉锚杆； 其中长锚杆为 P = 50kN 张拉锚杆	喷钢纤维混凝土 (C20)，厚 15cm/10cm； $\phi 25/28 @ 1.5m \times$ 1.5m，L = 6m/9m， 其中长锚杆为 P = 50kN 张拉锚杆； 锚索 P = 2000kN， @ 4.5m \times 4.5m，L = 25m	(与上游边墙相 同) 其中与主变洞对 应区域的锚索对穿	水轮机层 以上喷混凝 土，厚 15cm
4	功果桥	L=175 B=27.4/25.2 H=74.45	中厚—厚层砂岩、 板岩，倾角 $65^{\circ} \sim 73^{\circ}$ ， III类，变形模量 8~ 10GPa，泊松比 0.25，抗压强度 40~ 60MPa，地应力 10 ~13MPa； $\alpha = 45^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ； $\beta = 30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ； $\theta = 45^{\circ} \sim 60^{\circ}$	喷聚丙烯纤维混凝 土 (C25)，厚 15cm， 挂网 $\phi 6.5 @ 15cm \times$ 15cm； $\phi 28/32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L = 6m/9m， 其中长锚杆为 150kN 张拉锚杆	喷聚丙烯纤维混凝 土 (C25)，厚 15cm， 挂网 $\phi 6.5 @ 15cm \times$ 15cm (III 2、IV)； $\phi 28/32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L = 6m/9m； 锚索 P = 1500kN @ 4.5m \times 4.5m，L = 20m	(与上游边墙相 同)	

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
5	鲁地拉	L=269 B=29.2/27 H=75.6	互层—厚层砂岩， 倾角 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ ，Ⅲ类， 变形模量 $8\sim 10\text{GPa}$ ， 抗压强度 $60\sim 100\text{MPa}$ ，地应力 $10\sim 15\text{MPa}$ ； $\alpha=35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ； $\beta=20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ； $\theta=45^{\circ}\sim 60^{\circ}$	喷聚丙稀纤维混凝土 (C25)，厚 20cm ，挂网 $\phi 6.5@15\text{cm}\times 15\text{cm}$ (Ⅲ2、Ⅳ)； $\phi 28/32@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=6\text{m}/9\text{m}$ ； 其中长锚杆为 150kN 张拉锚杆	喷聚丙稀纤维混凝土 (C25)，厚 20cm ，挂网 $\phi 6.5@15\text{cm}\times 15\text{cm}$ (Ⅲ2、Ⅳ)； $\phi 28/32@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=6\text{m}/9\text{m}$ ； 锚索 $P=1750\text{kN}@4.5\text{m}\times 4.5\text{m}$ ， $L=20\text{m}$	(与上游边墙相同)	
6	拉西瓦	L=311.75 B=30/27.8 H=74.84	块状中粗粒花岗岩， 变形模量 $15\sim 28\text{GPa}$ ，泊松比 0.23 ，抗压强度 $80\sim 130\text{MPa}$ ，地应力 $19\sim 23\text{MPa}$ ； $\alpha=35^{\circ}\sim 65^{\circ}$ ； $\beta=10^{\circ}\sim 25^{\circ}$	喷碳纤维混凝土 (C30)，厚 15cm ； $\phi 28/32@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=4.5\text{m}/9\text{m}$ ，其中长锚杆为 100kN 预应力锚杆； 局部锚索 $P=1500\text{kN}@4.5\text{m}\times 6\text{m}$ ， $L=20\text{m}$	喷碳纤维混凝土 (C30)，厚 15cm ； $\phi 28/32@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=4.5\text{m}/9\text{m}$ ，其中Ⅲ类围岩中长锚杆为 100kN 预应力锚杆； 锚索 $P=1500\text{kN}@4.5\text{m}\times 6\text{m}$ ， $L=20\text{m}$	(基本与上游边墙相同) 锚索 $L=20\text{m}/35\text{m}$	

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
7	糯孔渡	L=418 B=31/29 H=81.6	块状或整体结构微风化一新鲜花岗岩, 倾角 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$, II类, 变形模量 28.8GPa, 泊松比 0.25, 湿抗压强度 96~160MPa, 地应力 6.5~8.3MPa; $\alpha=44^{\circ}\sim 56^{\circ}$; $\beta=20.2^{\circ}\sim 25.9^{\circ}$; $\theta=54^{\circ}\sim 96^{\circ}$	喷钢纤维混凝土(C30), 厚 20cm; $\phi 25/32 @ 1.5m \times 1.5m, L=4.5m/9m$	喷素混凝土(C20), 厚 15cm, 局部挂网 $\phi 6.5 @ 20cm \times 20cm$; $\phi 25/28/32 @ 2m \times 2m, L=4.5m/6m/9m$; 锚索 $P=1000 \sim 2500kN @ 5m \times 5m, L=20 \sim 40m$	(与上游边墙相同)	
8	溪洛渡	L=443.34 B=31.9/28.4 H=75.6	块状一次块状结构玄武岩, II类, 变形模量 17~26GPa, 泊松比 0.20, 地应力 16~20MPa; $\alpha=54^{\circ}\sim 74^{\circ}$; $\beta=36^{\circ}\sim 46^{\circ}$; $\theta=44^{\circ}\sim 54^{\circ}$	喷混凝土(C25), 厚 20cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m, L=9m$; 非预拉砂浆锚杆(UB)与 $P=120kN$ 预应力锚杆	喷混凝土(C25), 厚 20cm/15cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m, L=6m/9m$; 锚索 $P=1750kN/1500kN @ 3m \times 3m/4.5m \times 4.5m, L=20m/15m$	(与上游边墙相同)	高程 364.00m 以下 C25 钢筋混凝土衬砌

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
9	彭水	L=252.0 B=30/28.5 H=78.5	厚层灰岩、页岩， 倾角60°~70°，Ⅱ类、 Ⅲ类，变形模量25~ 30GPa/25GPa，泊松 比0.28~0.30/0.25， 饱和抗压强度60~ 80MPa/60MPa，地 应力8.5~11MPa； $\alpha \approx 0^\circ$ ； $\beta \approx 0^\circ$ ； $\theta \approx 0^\circ$	喷射纤维混凝土 (C25)，厚15cm； $\phi 32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L=8m/10m， 中空注浆张拉锚杆	喷射纤维混凝土 (C25)，厚15cm； $\phi 32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L=6m/9m； 锚索 P=1500kN@ 4.5m \times 4.5m，L =25m	(与上游边墙相 同)	
10	三峡地 下电站	L=311.3 B=32.6/31.0 H=87.3	块状、次块状闪云 斜长花岗岩，Ⅰ类、 Ⅱ类，变形模量35~ 45GPa，泊松比0.20， 抗压强度90~ 110MPa，地应力11.2 ~12.25MPa； $\beta = 78.5^\circ$	喷射纤维混凝土 (C30)，厚15cm； $\phi 32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L=6m/9m， 长锚杆为张拉锚杆； 锚索 P=2500kN， L=25~35m	喷射纤维混凝土 (C30)，厚15cm； $\phi 32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L=6m/9m， 长锚杆为张拉锚杆； 锚索 P=2500kN@ 6m \times 6m，L = 25m/28m	喷射纤维混凝土 (C30)，厚15cm； $\phi 32 @ 1.5m \times$ 1.5m，L=9m/ 12m，长锚杆为张 拉锚杆； 锚索 P=2500kN @ 4.5~6m，L = 25m/30m/35m	顶拱锚索用 于加固薄覆盖 岩体和块体， 边墙锚索用于 加固块体，下 游边墙挖空率 高、块体多， 锚杆加长

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
11	向家坝	L=255.0 B=33.4/31.4 H=85.5	厚层—巨厚层砂岩, 倾角 15°~20°, II类为主, 局部IV类, 变形模量 15GPa, 泊松比 0.22, 湿抗压强度 80MPa, 地应力 6.8~15MPa	喷钢纤维混凝土(C25), 厚 15cm; $\phi 25/28 @ 1.5m \times 1.5m$, L=6m/9m, 其中长锚杆为 P=50kN 张拉锚杆;	喷钢纤维混凝土(C25), 厚 15cm/10cm; $\phi 25/28 @ 1.5m \times 1.5m$, L=6m/9m, 其中长锚杆为 P=50kN 张拉锚杆; 锚索 P=2000kN @ 4.5m x 4.5m, L=25m	(与上游边墙相同) 锚索 L=30m, 与主变洞对穿	水轮机层 以上喷混凝土, 厚 15cm
12	水布垭	L=168.5 B=23.5/20.1 H=65.47	灰岩、页岩、煤层, 上硬下软, 软硬交杂, 裂隙发育, 倾角 8°~15°, II~IV类, 变形模量 15~20GPa/1~2GPa/0.4~0.8GPa, 泊松比 0.25/0.35/0.35, 抗压强度 60~65MPa/15~20MPa/15~20MPa, 地应力 5.62MPa; $\alpha \approx 45^\circ \sim 57^\circ$; $\beta \approx 34.5^\circ$; $\theta \approx 39^\circ$	喷钢纤维混凝土(C20), 厚 15cm; $\phi 25/32 @ 3m \times 1.5m$, L=6m/8m; 锚索 P=1500kN @ 4.2m x 4.5m, L=25m	喷钢纤维混凝土(C20), 厚 15cm/20cm; $\phi 25/32 @ 3m \times 1.5m$, L=6m/8m; 六排锚索 P=2000kN @ 4.5m, L=25m/20m	(与上游边墙相同)	

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
13	龙潭	L=398.5 B=30.7/28.9 H=76.4	层状结构砂岩、粉砂岩、泥板岩夹少量灰岩，倾角 $55^{\circ}\sim 62^{\circ}$ ，II类、III类，局部IV类，变形模量 $13\sim 20\text{GPa}$ ，饱和抗压强度 $130/40\sim 80\text{MPa}$ ，地应力 12MPa ； $\alpha\approx 30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ； $\beta\approx 30^{\circ}$ ； $\theta\approx 30^{\circ}\sim 35^{\circ}$	喷钢纤维/聚丙烯纤维混凝土，厚 20cm ； 墙上部 $\phi 28/32\text{ @ }1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=6\text{m}/8\text{m}$ ，其中IV类岩 $\text{@ }1.5\text{m}\times 1.2\text{m}$ ， $L=6\text{m}$ ； 排锚索 $\text{@ }4.5\times 6\text{m}/4.5\text{m}$ ， $L=20\text{m}$ ； 墙下部 $\phi 28/32\text{ @ }1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=5.5/8\text{m}$ ； 岩中长锚杆为预应力	喷钢纤维/聚丙烯纤维混凝土，厚 20cm ； 墙上部 $\phi 28/32\text{ @ }1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=6\text{m}/9.5\text{m}$ ，其中III类岩长锚杆为预应力，3排锚索 $\text{@ }4.5\text{m}/6\text{m}\times 6\text{m}$ ， $L=20\text{m}$ ； 墙下部 $\phi 28\text{ @ }1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ， $L=5.5\text{m}$	高程 221.70 以上喷钢纤维混凝土，上下游边墙上下游程分上下部分	

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
14	锦屏一级	L=276.4 B=28.9/25.6 H=68.8	大理岩, 倾角 30°~40°, III ₁ 类, 部分 III ₂ 类, 变形模量 8~15GPa, 抗压强度平均值为 45.8~93MPa, 泊松比 0.25, 地应力 18~35.7MPa; $\alpha \approx 50^\circ$; $\beta \approx 27^\circ$	挂网喷混凝土, 厚 20cm; $\phi 32 @ 1.2m \times 1.4m$, L=7m/9m, 其中长锚杆为 P=120kN 张拉锚杆	挂网喷混凝土, 厚 15cm; $\phi 28 / \phi 32 @ (1 \sim 1.5m) \times (1 \sim 1.5m)$, L=6m/9m, 局部 $\phi 32$, L=9m, P=120kN 张拉锚杆或钢筋束加强; 8~9 排锚索, P=1500kN/2000kN @ 3~4m, L=15~30m	(与上游边墙相同)	厂房洞与主变洞、三大洞室与排水洞间布置对穿锚索
15	官地	L=243.44 B=31.1/29 H=76.3	块状一次块状, P ₂ θ ² 角砾集块熔岩, II类、III类, II类岩变形模量 15~20GPa, 泊松比 0.2~0.25, III类岩变形模量 5~10GPa, 泊松比 0.25~0.3, 地应力 25~35MPa; $\beta \approx 41^\circ$	喷混凝土 (C25), 厚 20cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m$, L=6m/9m	喷混凝土 (C25), 厚 15cm, 挂网 $\phi 8 @ 20cm \times 20cm$; $\phi 32 @ 1.5m \times 1.5m$, L=6m/9m; 锚索 P=1500kN/1750kN @ 4.5m x 4.5m, L=15m/20m 间隔布置	(与上游边墙相同)	上游边墙与排水洞、下游边墙与主变洞布置对穿锚索 P=2000kN

表10(续)

编号	工程名称	洞室规模 (m)	地质条件	支护参数			备注
				顶拱支护	上游边墙支护	下游边墙支护	
16	大岗山	L=226.58 B=30.8/27.3 H=73.78	中粒黑云二长花岗岩，块状一次块状，新鲜完整，Ⅱ类、Ⅲ类； 地应力 11.4~22.2MPa	喷射纤维混凝土厚5cm和喷射混凝土(C25)厚15cm，挂网φ8@20cm×20cm；φ28/32P=150kN张拉锚杆，L=6m/9m@1.5m×1.5m(Ⅱ类围岩)、@1.2m(Ⅲ类围岩)×1.2m(Ⅳ类围岩)； 锚索 P=1500/1800kN @ 4m×4.5m，L=15m/20m间隔布置	喷射混凝土(C25)，厚15cm，挂网φ6.5@15cm×15cm；φ28/32，L=6m/8m@1.5m×1.5m(Ⅱ类围岩)、@1.2m×1.2m(Ⅲ类围岩)@1m×1m(Ⅳ类围岩)； 锚索 P=1500/1800kN @ 4m×4.5m，L=15m/20m间隔布置	(喷射混凝土和锚杆与上游边墙相同)； 锚索发电机层以上 P=1800kN@4m×4.5m，与主变洞对穿；发电机层以下 P=1500kN/1800kN @ 4m×4.5m，L=15m/20m间隔布置	岩壁式吊车架以上边墙支护与顶拱相同
17	瀑布沟	L=294.1 B=30.7/26.8 H=70.1	澄江期中粗粒花岗岩，块状一次块状，Ⅰ类、Ⅱ类，局部Ⅲ类，岩石变形模量 27~30GPa，抗压强度 80~220MPa，地应力 21.1~27.3MPa； β<30°	挂网喷射混凝土，厚15~20cm； φ28/32 @ 1.2m×1.2m，L=7m/9m，局部 3φ28/32@2.4m×1.2m，L=9m/12m/15m 钢筋束加固	喷射纤维混凝土，厚12~15cm； φ28 @ 1.5m×1.5m，L=7m/8m； 锚索 P=2000kN@4m×4.6m，L=20m	(喷射混凝土和锚杆与上游边墙相同)； 每2台机组间布置2排(4束)与主变室对穿的锚索，P=2000kN	

注：L—洞室长度；B—洞室宽度（轨道梁以上/以下）；H—洞室高度；α—厂房轴线与主要节理、裂隙或断层夹角；β—厂房轴线与第一主应力夹角；θ—厂房轴线与岩层走向夹角。

7.2.16~7.2.23 作用在衬砌上的有些荷载（如围岩压力、外水压力、温度作用等）常常是难于准确确定的，这不仅仅因为确定这些荷载的客观条件复杂，还因为它们还与施工情况和工程措施等因素有关，也就是说，这些荷载在一定程度上是可以人为控制的。因此，地下厂房衬砌设计时应着重研究减小不利荷载的各种结构、施工及其他工程措施，并经过经济比较后确定结构型式及其荷载值。

当作用在衬砌上的外水压力较大时，宜考虑采取排水孔等导、排措施降低外水压力，减小衬砌内力，和由衬砌直接承担较大的外水压力相比，更为经济。

当厂房洞室跨度较大时，顶拱固结灌浆深度太浅，对形成稳定拱圈作用不大，故应加大固结灌浆孔深。

对复合支护，宜将围岩与钢筋混凝土衬砌作为共同承载结构，用有限元法进行结构计算。若采用结构力学方法分析钢筋混凝土衬砌时，宜考虑初期柔性支护作用，不计或少计松散围岩压力荷载，但应注意围岩变形（或地应力调整）在钢筋混凝土衬砌上产生的变形压力荷载。

7.2.24 岩锚式吊车梁可减少地下洞室的宽度，节省工程量，同时可使厂内吊车提前投入运行，有利于加快施工进度。近年来，此种型式的吊车梁在国内地下厂房中得到广泛应用，如鲁布革、广蓄、东风、太平驿、天荒坪、小浪底、二滩、拉西瓦、三峡地下电站、彭水、构皮滩等工程，取得许多有益的经验。

已建部分工程统计表明，当洞壁围岩为Ⅲ类及以上时，采用岩锚式吊车梁是安全可行的，应优先考虑采用。

7.2.25 厂房边墙围岩稳定是岩锚式吊车梁安全的基础，当岩壁本身受节理裂隙切割和存在不利的结构面时，应采取系统锚杆或锚索加固围岩。

岩锚式吊车梁成功的关键是施工技术，应采用光面预裂爆破，严格控制超欠挖，近年来国内已建或在建工程中，一般超挖控制在100mm以内，并尽量避免欠挖，以保证梁体的断面尺

寸。当岩锚式吊车梁以下洞壁超挖影响岩锚式吊车梁稳定安全时，可采用在超挖部位设置钢筋混凝土护壁和护壁锚杆的措施，保证安全。三峡地下电站岩壁式吊车梁岩台的开挖，采取的主要措施有：厂房洞室分层开挖，开挖岩壁式吊车梁所在层岩体时，在中部拉槽梯段爆破开挖前，对两侧进行超前施工预裂，隔断和削弱爆破振动对岩台区的影响；对斜岩台下拐点以下 1m 范围的洞壁采用角钢、锚杆、喷钢纤维混凝土等进行加强支护；采用钢管架强制定位技术，严格控制岩台垂直爆破孔和斜面爆破孔的位置和深度；进行现场爆破试验，优化爆破参数；岩台垂直孔和斜孔双光面爆破等。以上措施保证了三峡地下电站岩壁式吊车梁岩台开挖成型好，超挖控制在 80mm 内。

在主洞室与其他洞室相交处，岩锚式吊车梁以下支持岩体削弱，应采取有效结构措施。一是减小交叉洞室洞口尺寸，保证梁下有足够的岩体厚度，如广蓄工程采取局部缩小母线洞洞口尺寸的措施。二是当交叉洞室尺寸较大时，在交叉洞口部位，洞顶采用拱形钢筋混凝土梁、洞口两侧采用贴岩钢筋混凝土柱的措施，保证洞口部位岩锚式吊车梁的可靠支持，如三峡地下电站、构皮滩地下电站在交通洞口就是采取这种措施。或在洞口部位，采用普通钢筋混凝土梁代替岩锚式吊车梁，如东风水电站，在交通洞洞口上方，采取普通钢筋混凝土吊车梁。

岩壁式吊车梁受拉锚杆入岩深度应保证锚杆内锚段位于稳定岩体内。国内已建岩壁式吊车梁，受拉锚杆入岩深度一般 6~8m，大吨位的岩壁式吊车梁受拉锚杆入岩深度可达 10m。受拉锚杆入岩深度多大于岩壁式吊车梁部位洞室系统锚杆入岩深度。受拉锚杆倾角 θ 越小，锚杆受力越小，但岩壁式吊车梁抗滑稳定性降低； θ 越大，锚杆受力越大，岩壁式吊车梁抗滑稳定性提高，但锚杆上覆岩体变薄，不利于锚杆的锚固安全。统计 27 个已（在）建工程岩壁式吊车梁资料，上排受拉锚杆倾角有 20 个为 25° ，6 个为 20° ，1 个为 10° ，下排受拉锚杆水平倾角全部比上排锚杆小 5° 。锚杆倾角应与岩层层面（层状岩体）及比较发

育的结构面有一定的交角。当采用预应力锚杆时，锚杆倾角应小于岩壁面的残余摩擦角。

在实际工程设计中，岩壁式吊车梁的计算分析，主要采用刚体极限平衡法和有限元法。刚体平衡法简单明了，但无法计算吊车梁以下洞室开挖洞壁变形产生的吊车梁锚杆应力。有限元法可模拟洞室开挖过程，能考虑洞壁变形对岩壁式吊车梁锚杆及梁体的影响，故在大型、复杂地质条件、高地应力区、高地震烈度区的岩壁式吊车梁设计宜采用有限元法。

工程中常采用的岩壁式吊车梁受拉锚杆类型有普通砂浆锚杆和预应力锚杆（张拉锚杆），其中预应力锚杆又可分为全预应力和部分预应力锚杆，全预应力锚杆按其预应力设计值张拉锁定，部分预应力锚杆张拉锁定值小于设计值。实际工程监测表明，洞壁变形引起的岩壁式吊车梁受拉锚杆应力远大于桥机轮压引起的应力，桥机轮压产生的锚杆应力一般为 10MPa 左右，而岩壁变形产生的应力可接近甚至超过锚杆的设计强度。因此，当采用普通砂浆锚杆时，应预留足够的安全余度或补强措施，补强措施主要是在梁体预留锚杆孔，便于以后增加锚杆。岩壁式吊车梁设计中，当采用刚体平衡法时，工程中常采用较大的受拉锚杆安全系数，一般取为 2.0~2.5。

三峡地下电站、构皮滩水电站、彭水电站等工程的岩壁式吊车梁受拉锚杆，采用可二次张拉的预应力锚杆，锚杆初期采用较小的张拉荷载锁定，在厂房洞室开挖完成洞壁变形稳定后，对锚杆进行二次调节张拉，锁定在设计值，这样有效地解决了洞壁变形引起的锚杆应力过大的问题，保证了岩壁式吊车梁的安全。小浪底水电站岩壁式吊车梁受拉锚杆采用 500kN 级预应力锚杆，初期锁定在 250kN，洞室开挖完成后，再次张拉锁定在 400kN，预留 100kN 做为安全储备，以适应洞壁的后期变形。

岩壁式吊车梁受拉锚杆在岩壁孔口一定深度范围做成自由段，不仅可保证锚杆拉力向深处岩体传递，还可使锚杆能适应梁体沿岩壁方向的位移，避免锚杆产生较大的切向应力。国内已建

工程中，自由段长度一般为 1.0~2.0m，常采用杆体上涂沥青的办法，沥青外套 PE 管则更可靠，并有利于杆体防腐。当设置自由段时，应验算桥机运行时，自由段变形引起的轨顶位移，避免影响桥机正常运行。

《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008) 中壁式连续牛腿的结构计算公式可用于岩壁式吊车梁梁体结构设计，包括单位长度桥机轮压、横向水平刹车力的计算公式。岩壁式吊车梁梁体内应避免配置弯起钢筋，故要求梁体高度 h 大于轮压距梁下岩壁距离的 3.33 倍。

不设伸缩缝，可保证岩壁式吊车梁的整体性，有利于桥机的运行和吊车梁的安全。但当洞壁高度变化较大、围岩地质条件差异较大时，洞壁变形不一致会造成吊车梁开裂，因此在这些部位，应设置伸缩缝以适应岩壁变形。同时，在交叉洞口等部位，当采用了其他型式的吊车梁，或岩壁式吊车梁结构尺寸有大的变化，也应设置伸缩缝避免梁体开裂。在靠近伸缩缝处，岩壁式吊车梁锚杆内力会增加，故在该部位，锚杆应加强，一般是减小锚杆间距，加密锚杆，加密范围一般取伸缩缝两侧各 2.0m 长。

为避免或减少岩壁式吊车梁混凝土产生温度裂缝，吊车梁浇筑中应设置施工缝，由于岩壁的约束作用，吊车梁每次浇筑长度不宜太长，8~15m 较为合适，实际工程中有采用 20m 长的，但裂缝较多，因此不宜采用较长分段。施工缝面凿毛、设置键槽、拼缝插筋、梁体纵向钢筋跨缝布置，均是为了保证梁体的整体性。

由于岩壁式吊车梁上作用荷载大、结构重要，而受拉锚杆的安全对岩壁式吊车梁的安全起控制作用，故工程中一般要求对受拉锚杆全部进行无损检测，主要是检查其注浆密实度。

岩锚式吊车梁的监测包括施工期和运行期，施工期监测主要为了在洞室开挖过程中，及时掌握岩锚式吊车梁的变形、受力状态，对其安全性进行评估，及时预报险情，反馈设计，指导施工。运行期的监测，其目的主要是了解岩锚式吊车梁的稳定状

表 11 国内部分已(在)建地下电站岩壁式吊车梁基本参数表

编号	工程名称	P_{max} (kN)	c_1 (mm)	c_2 (mm)	c_4 (mm)	β (°)	h_1 (mm)	α (°)	h (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	锚杆 M1	锚杆 M2	锚杆 M3
1	大朝山	710	1250	500	1000	27.5	1850	33	2500	25	20	$L = 9.8m$, 人岩 $8m$, $\phi 36 @ 70cm$, 孔口 $1.2m$ 长涂沥青	$L = 9.8m$, 人岩 $8m$, $\phi 36 @ 70cm$, 孔口 $1.2m$ 长涂沥青	$L = 7.0m$, 人岩 $6m$, $\phi 32 @ 100cm$
		玄武岩、杏仁状玄武岩, II类为主, III类次之, 变形模量 $6 \sim 15GPa$, 单轴抗压强度 $62 \sim 85MPa$												
2	素风营	890	1500	500	1150	30	1940	34.8	2740	25	20	$L = 10m$, 人岩 $8m$, $\phi 40 @ 50cm$, 孔口 $2m$ 长涂沥青	$L = 12m$, 人岩 $10m$, $\phi 40 @ 50cm$, 孔口 $2m$ 长涂沥青	$L = 6.5m$, 人岩 $5.5m$, $\phi 40 @ 100cm$
		中厚层夹薄层灰岩, III类围岩												
3	龙潭	925	1600	500	1200	33	1600	45°	2800	10	5	$L = 12m$, 人岩 $10m$, $\phi 36 @ 75cm$, 孔口 $2m$ 长涂沥青	$L = 12m$, 人岩 $10m$, $\phi 36 @ 75cm$, 孔口 $2m$ 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $7.5m$, $\phi 32 @ 75cm$
		砂岩、粉砂岩、泥板岩夹少量灰岩, II类、III类岩												
4	漫湾二期	850	2300	500	1500	29.5	2200	45	3700	25	20	$L = 9m$, 人岩 $6.5m$, $\phi 36 @ 50cm$, 孔口 $1.5m$ 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $6.5m$, $\phi 36 @ 50cm$, 孔口 $1.5m$ 长涂沥青	$L = 8m$, 人岩 $6m$, $\phi 36 @ 50cm$
		III类围岩为主, 夹IV类、II类围岩。围岩稳定性一般—较好, 部分洞段较差												
5	江口	387	1350	400	1000	25	1600	30.96	2200	25	20	$\phi 36 @ 75cm$, 人岩 $7m$, 孔口 $50cm$ 长涂 沥青	$\phi 36 @ 75cm$, 人岩 $7m$, 孔口 $50cm$ 长涂 沥青	$\phi 25 @ 100cm$, 人 岩 $5m$
		南津关组灰岩, 较坚硬完整, I类、II类。												

表11(续)

编号	工程名称	P_{max} (kN)	c_1 (mm)	c_2 (mm)	c_4 (mm)	β (°)	h_1 (mm)	a (°)	h (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	锚杆 M1	锚杆 M2	锚杆 M3
6	惠州抽水蓄能	545				20			2600	25	20	$\phi 38 @ 70\text{cm}$, 入岩 7.5m	$\phi 38 @ 70\text{cm}$, 入岩 7.5m	$\phi 32 @ 70\text{cm}$, 入岩 5m
		850				27.5	1800	31.33	2500	25	20	$\phi 36 @ 65\text{cm}$ (三级钢筋), 孔口 2m 长涂沥青	$\phi 32 @ 65\text{cm}$ (三级钢筋), 孔口 2m 长涂沥青	$\phi 32 @ 65\text{cm}$ (三级钢筋)
7	思林	中厚一厚层块状灰岩, II类、III类												
													$\phi 36 @ 70\text{cm}$, 入岩 深 7.5m	$\phi 36 @ 70\text{cm}$, 入岩 深 7.5m
8	广蓄二期	燕山三期中粗粒黑云母花岗岩, 较坚硬完整, I类、II类为主、局部III类												
			1250	350	1100	20	1700	24.44	2200	25	20		$\phi 32 @ 75\text{cm}$, 入岩 深 8m	$\phi 32 @ 75\text{cm}$, 入岩 深 8m
9	鲁布革	485	1250	500	1250	20	1600	26.6	2225	25	20	$\phi 40$ 上游面深 7.5m, 下游面深 9m	$\phi 32 @ 75\text{cm}$, 入岩 深 8m	$\phi 25$ 入岩深 6m
		385	1000	500	1000	26	1610	27.5	2120	20	15	$\phi 40$ 上游面深 7.5m, 下游面深 9m	$\phi 32$ 上游面深 8m, 下游面深 9m	$\phi 25$ 深 5m
10	大广坝	花斑状花岗岩, I类、II类												
			400	1350	450	1150	22	1500	26.6	2075	25	20	$\phi 32 @ 75\text{cm}$, 入岩 深 8m	$\phi 32 @ 75\text{cm}$, 入岩 深 8m
11	太平驿	花岗岩长岩, II类												

表11(续)

编号	工程名称	P_{max} (kN)	c_1 (mm)	c_2 (mm)	c_4 (mm)	β (°)	h_1 (mm)	α (°)	h (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	锚杆 M1	锚杆 M2	锚杆 M3
12	东风	680	1600	500	1250	30	1700	34.8	2570	20	15	$\phi 36 @ 66\text{cm}$, $L = 8\text{m}$, 入岩 6.85m	$\phi 36 @ 66\text{cm}$, $L = 8\text{m}$, 入岩 6.85m	$L = 6\text{m}$, $\phi 25 @ 100\text{cm}$
13	小湾	840	2300	500	1500	29.1	2080	45	3580	25	20	$L = 9\text{m}$, 入岩 6.5m, $\phi 36 @ 50\text{cm}$ (三级钢筋), 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 9\text{m}$, 入岩 6.5m, $\phi 36 @ 50\text{cm}$ (三级钢筋), 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 9\text{m}$, 入岩 6.5m, $\phi 36 @ 50\text{cm}$ (二级钢筋)
		层状灰岩, II类 黑云花岗岩片麻岩夹薄层透镜状片岩, 完整、新鲜。片麻岩、片岩均属坚硬岩石												
14	溪洛渡	1050	1950	700	900	34	2380	34	2980	25	20	$L = 12.5\text{m}$, 入岩 10m, $\phi 40 @ 75\text{cm}$ (四级钢筋) 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 12.5\text{m}$, 入岩 10m, $\phi 40 @ 75\text{cm}$ (四级钢筋) 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 9\text{m}$, 入岩 7.9m, $\phi 32 @ 75\text{cm}$ (二级钢筋)
		岩性为 P2 ⁸⁴ 层含斑玄武岩, 岩体较完整, 以块状一次块状结构为主, II类, 局部 III 类												
15	向家坝	1100	1450	550	1000	33	2000	45	3000	20	15	$L = 12\text{m}$, 入岩 10m, $\phi 36 @ 80\text{cm}$ (三级钢筋), 孔口 2.9m 长涂沥青	$L = 12\text{m}$, 入岩 10m, $\phi 36 @ 80\text{cm}$ (三级钢筋), 孔口 2.9m 长涂沥青	$L = 9\text{m}$, 入岩 7.7m, $\phi 36 @ 80\text{cm}$ (二级钢筋)
		以厚至巨厚层砂岩为主, 岩层产状较平缓, 主厂房边墙以 II 类围岩为主, III 类次之。有两条平缓软弱夹层与岩锚梁相交。变形模量 7~15GPa, 单位弹性抗力系数 40~70MPa/cm												
16	拉西瓦	800	1500	600	1000	33.2	1400	45	2500	25	20	$L = 12\text{m}$, 入岩 10m, $\phi 32 @ 75\text{cm}$ (四级精轧螺纹钢), 孔口 2m 长涂沥青	$L = 12\text{m}$, 入岩 10m, $\phi 32 @ 75\text{cm}$ (四级精轧螺纹钢), 孔口 2m 长涂沥青	$L = 9\text{m}$, 入岩 7.7m, $\phi 32 @ 75\text{cm}$ (二级钢筋)
		灰一灰白色中粗粒花岗岩, 块状结构, II类为主, III类次之, 变形模量 15~28GPa, 单轴抗压强度 57~155MPa												

表11(续)

编号	工程名称	P_{max} (kN)	c_1 (mm)	c_2 (mm)	c_4 (mm)	β (°)	h_1 (mm)	α (°)	h (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	锚杆 M1	锚杆 M2	锚杆 M3
17	坝果桥	800	1450	650	1000	35	1450	45	2450	25	20	$L = 12m$, 人岩 $10m, \phi 32 @ 75cm$ (Ⅳ级精扎螺纹钢), 孔口入岩 2m 长、梁 体内 0.1m 长涂沥青	$L = 12m$, 人岩 $10m, \phi 32 @ 75cm$ (Ⅳ级精扎螺纹钢) 孔口入岩 2m 长、梁 体内 0.1m 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $7.7m, \phi 32 @ 75cm$ (二级钢筋)
		900	1500	600	1000	35	1450	45	2450	20	15	$L = 12m$, 人岩 $10m, \phi 32 @ 75cm$ (预应力混凝土用螺 纹钢筋 PSB 785), 孔口入岩 2m 长、梁 体内 0.1m 长涂沥青	$L = 12m$, 人岩 $10m, \phi 32 @ 75cm$ (预应力混凝土用螺 纹钢筋 PSB 785) 孔 口入岩 2m 长、梁体 内 0.1m 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $7.7m, \phi 32 @ 75cm$ (二级钢筋)
18	鲁地拉	变质砂岩, Ⅲ ₁ 类、Ⅲ ₂ 类为主										$L = 9m$, 人岩 $6.5m, \phi 36 @ 50cm$, 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $6.5m, \phi 36 @ 50cm$, 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 8.0m$, 人岩 $6m, \phi 36 @ 50cm$
		变质砂岩, Ⅲ ₁ 类、Ⅲ ₂ 类为主												
19	糯扎渡	花岗岩, Ⅱ类为主, 局部有 F20、F22、F23 断层, 单轴抗压强度 90~160MPa										$L = 12m$, 人岩 $10m, \phi 40 @ 70cm$ (四级钢筋), 孔口 2m 长涂沥青	$L = 12m$, 人岩 $10m, \phi 40 @ 70cm$ (四级钢筋), 孔口 2m 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $8m, \phi 32 @ 100cm$ (四级钢 筋)
		755	1850	700	900	36	1750	35.84	2400	25	20			
20	锦屏 一级	大理岩夹绿片岩条带或大理岩、绿片岩互层; 变形模量 4~ 15GPa, 单位弹性抗力系数 25~45MPa/cm										$L = 9m$, 人岩 8m, $\phi 32 @ 100cm$ (四级钢 筋)	$L = 9m$, 人岩 8m, $\phi 32 @ 100cm$ (四级钢 筋)	
		大理岩夹绿片岩条带或大理岩、绿片岩互层; 变形模量 4~ 15GPa, 单位弹性抗力系数 25~45MPa/cm												

表 11(续)

编号	工程名称	P_{max} (kN)	c_1 (mm)	c_2 (mm)	c_4 (mm)	β (°)	h_1 (mm)	α (°)	h (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	锚杆 M1	锚杆 M2	锚杆 M3
21	官地	785	1450	600	1200	35	2260	33.7	3060	25	20	$L = 12m$, 人岩 $9.7m, \phi 40 @ 70cm$ (三级钢), 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 12m$, 人岩 $9.7m, \phi 40 @ 70cm$ (三级钢), 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 9m$, 人岩 $7.5m, \phi 32 @ 70cm$ (二级钢)
		布置在以 II 类岩体为主的 $P_2\beta$ 层内, 岩石新鲜坚硬, 无大的软弱结构面, 错动带规模很小, 围岩岩体完整性较好, 以次块一块状结构为主, 局部为镶嵌或碎裂结构。变形模量 $15 \sim 20GPa$, 单位弹性抗力系数 $50 \sim 60MPa/cm$												
22	大岗山	800	1900	750	900	35	1980	45	2880	25	20	$L = 11m$, 人岩 $9m, \phi 40 @ 70cm$ (三级钢), 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 11m$, 人岩 $9m, \phi 40 @ 70cm$ (三级钢), 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 11m$, 人岩 $7.8m, \phi 32 @ 100cm$ (二级钢)
		中粒黑云二长花岗岩, II 类为主, III 类次之, 局部 IV 类、V 类(辉绿岩脉带及断层破碎带)。变形模量 $9 \sim 11GPa$ 。V 类岩段, 采用混凝土实体墙, 并设有 180t 的锚索, 实际张拉 150t												
23	瀑布沟	800	1850	1000	900	36.35	2100	35.84	2750	25	20	$L = 13.1m$, 人岩 $10m, \phi 40 @ 70cm$, 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 12.7m$, 人岩 $10m, \phi 40 @ 70cm$, 孔口 1.5m 长涂沥青	$L = 9.19m$, 人岩 $8m, \phi 32 @ 100cm$
		岩性为单一中粗粒花岗岩体, 中有少量辉绿岩脉分布, 岩性坚硬, 强度高, 无大的地质构造, 完整性较好, 围岩以 II 类、III 类为主												
24	小浪底	800	1350	500	1250	25	1905	26.6	2530	25	20	500kN 预应力, $L = 15m$, $\phi 36 @ 1m$, 内锚段 6m	500kN 预应力, $L = 15m$, $\phi 36 @ 1m$, 内锚段 6m	$L = 8m, \phi 32 @ 150cm$ (普通螺纹钢)
		硅质、钙质砂岩, II 下类(预应力锚杆先张拉到 600kN 再减载锁定在 250kN, 待厂房全部开挖完成后再次张拉到 400kN 锁定, 为适应岩壁的后形, 张拉锚杆预留 100kN 的安全储备)												

表11(续)

编号	工程名称	P_{\max} (kN)	c_1 (mm)	c_2 (mm)	c_4 (mm)	β (°)	h_1 (mm)	α (°)	h (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	锚杆 M1	锚杆 M2	锚杆 M3
25	三峡地下电站	1080	1550	600	1350	28.07	2330	36.53	3330	20	15	200kN 预应力, $L = 12\text{m}$, $\phi 36$ @ 60cm, 内锚段 7.2m (四级精轧螺纹钢)	200kN 预应力, $L = 12\text{m}$, $\phi 36$ @ 60cm, 内锚段 7.2m (四级精轧螺纹钢)	$L = 9\text{m}$, $\phi 32$ @ 75cm, 人岩深度 7.5m (普通螺纹钢)
		闪云斜长花岗岩 (预应力锚杆分两次张拉, 第一次张拉锁定在 50kN, 待厂房全部开挖完成围岩稳定后再次张拉锁定在 200kN)												
26	彭水	1000	1500	500	1250	26.6	1800	38.7	2800	25	20	200kN 预应力, $L = 12\text{m}$, $\phi 36$ @ 50cm, 内锚段 8m (四级精轧螺纹钢)	200kN 预应力, $L = 12\text{m}$, $\phi 36$ @ 50cm, 内锚段 8m (四级精轧螺纹钢)	$L = 9\text{m}$, $\phi 32$ @ 50cm (普通螺纹钢)
		厚层—中厚层块状灰岩, II类, 变形模量 25~30GPa, 单轴抗压强度 55~75MPa (预应力锚杆分两次张拉, 第一次张拉锁定在 75~150kN, 待厂房全部开挖完成围岩稳定后再次张拉锁定在 200kN)												
27	槐皮滩	900	1750	500	140	29.54	1800	35.54	2800	20	15	200kN 预应力, $L = 12\text{m}$, $\phi 32$ @ 50cm, 内锚段 7.2m (四级精轧螺纹钢)	200kN 预应力, $L = 12\text{m}$, $\phi 32$ @ 50cm, 内锚段 7.2m (四级精轧螺纹钢)	$L = 9\text{m}$, $\phi 32$ @ 50cm, 人岩深度 7.5m (普通螺纹钢)
		中厚—厚层灰岩, II类为主, 局部 III类, 变形模量 30~35GPa, 单轴抗压强度 80~90MPa (预应力锚杆分两次张拉, 第一次张拉锁定在 150kN, 待厂房全部开挖完成围岩稳定后再次张拉锁定在 200kN)												

注: 表中 P_{\max} 为最大桥机轮压; 表中未注明的锚杆, 均为砂浆锚杆。

态，及时发现异常，确保桥机运行安全。监测内容主要有梁体变位、钢筋应力、锚杆应力、梁体与岩壁接触面缝面开合变化、压应力大小等。

国内大吨位岩锚式吊车梁均进行了现场承载试验，以检验其承载能力和工作状况。

由于桥机轨道大部分是在厂房洞室开挖支护完成前安装的，在岩锚式吊车梁以下洞室开挖过程中，由于岩壁变形引起轨道变位，影响桥机正常运行，实际工程中已发生过桥机啃轨、卡轨的情况，故建议在厂房洞室开挖支护完成后，桥机吊大件前，对桥机轨道位置进行测量校正，重新定位，避免桥机啃轨甚至卡轨。

附录 E 给出了岩壁式吊车梁按刚体极限平衡法设计的计算方法，表 11 给出了国内部分已（在）建地下电站岩壁式吊车梁的设计参数，供设计参考。

7.2.26 本条补充地下厂房顶棚应预留上人通道。

7.2.27 本条补充地下厂房要做好防潮处理和厂内排水系统设计。

7.2.28 补充了地下厂房提高抗振性能的构造措施。

8 其他型式厂房的布置及结构设计

8.1 灯泡贯流式机组厂房

8.1.1 灯泡贯流式机组具有效率高、流道简单、机组过流量大、机组尺寸小、水头损失小、经济指标好等特点。

贯流式机组厂房与立轴机组厂房相比，其厂房高度低，机组间距小，结构体形简单，土建投资省。这种形式的水电站已成为30m水头以下的水电站发展趋势。

灯泡贯流式机组厂房的厂区布置与一般河床式厂房的厂区布置原则基本相同，因水头低，更应重视进水渠和尾水渠布置，使进出水流顺畅，水头损失小，发挥更大效益。

灯泡贯流式机组厂房分为水上、水下两大部分，水下墩墙和流道顶板面层以下的大体积混凝土称为水下部分，流道顶板以上的板、梁、柱等称为水上部分。水上部分和进口墩墙的布置与常规立轴机组河床式厂房基本相同。水下流道部分则与立轴机组截然不同。灯泡贯流式机组为横轴，机组布置在流道内，发电机密封安装在水轮机上游的灯泡形金属壳体中，水平主轴上游与发电机转子相连，下游与水轮机转轮体连接。这种机组没有蜗壳、肘管，厂房结构相对简单。流道段水下部分根据过流要求和机组安装要求可分为进水口段、中段和尾水管段。进水口段通常为矩形截面，中段包括管形壳段，水轮发电机组安装在该段内，断面由矩形渐变为圆形，尾水管段由锥管段和渐变段组成，断面由圆形渐变为矩形，流道断面形状和尺寸（主要由厂家提供）应满足机组出力要求。

根据灯泡贯流式机组特点，厂房的主要尺寸基本由流道尺寸控制（见图4和图5）。机组流道尺寸由水轮发电机制造厂提供，前期缺乏厂家资料时，也可按下列经验公式估算：

$$B_j = (1.7 \sim 2.1) D_1 \quad (3)$$

$$H_j = (2.1 \sim 2.5)D_1 \quad (4)$$

$$L_j = (3.4 \sim 3.8)D_1 \quad (5)$$

$$L_c = (4.5 \sim 5.0)D_1 \quad (6)$$

$$\theta = 11^\circ \sim 12^\circ \quad (7)$$

$$\beta \leq 6^\circ 30', \text{ 宜取 } 5^\circ \quad (8)$$

$$H_c = (1.45 \sim 2.0)D_1 \quad (9)$$

$$B_c = (2 \sim 2.2)D_1 \quad (10)$$

- 式中 D_1 ——机组转轮直径，m；
 B_j ——进口流道宽度，m；
 H_j ——进口流道高度，m；
 L_j ——进口流道长度，m；
 B_c ——尾水流道出口宽度，m；
 H_c ——尾水流道出口高度，m；
 L_c ——尾水流道长度，m；
 θ ——尾水流道锥角，(°)；
 β ——转轮室出口短锥管半角，(°)。

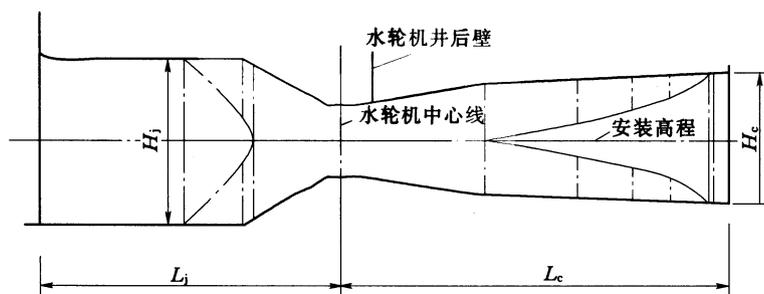


图4 灯泡贯流式机组流道纵剖面尺寸图

灯泡贯流式机组进口闸墩及上游挡水墙顶高程一般与相邻闸坝坝顶高程一致并兼顾上游交通要求。尾水墩及下游挡水墙顶高程一般高于厂房下游校核洪水位 0.5~1.0m。

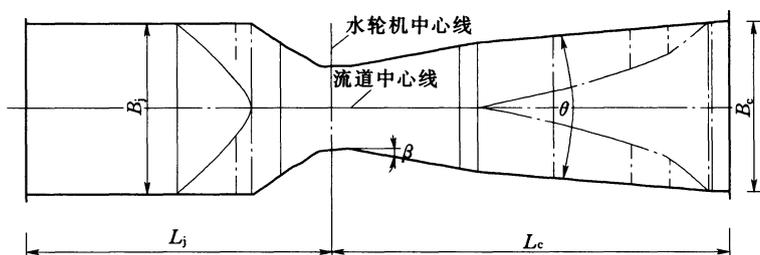


图 5 灯泡贯流式机组流道平面尺寸图

灯泡贯流式机组厂房的内部布置可分为主机间布置、安装间布置和副厂房布置。安装间和副厂房的布置与一般立轴机组河床式厂房基本相同。

主机间流道层布置：流道以水轮机中心线为界，上游至进口检修闸门为进口流道，下游至尾水闸门为尾水流道。从上游至下游依次布置发电机灯泡体、管形壳和转轮室。灯泡体的顶部设有交通竖井至流道顶板的发电机井，从灯泡体内引出的发电机主引出线通常沿交通竖井壁敷设。管形壳的上、下支柱兼做进人孔，上可至流道顶板层，下可经廊道进入水轮机井底部。转轮室布置在水轮机井内，上游与管形壳相接，下游与尾水管钢衬连接。水轮机井内通常还布置有接力器、轴承回油箱和防飞逸配重等设备。接力器根据不同的支承情况，布置在不同的部位，垂直支承布置在水轮机井底部，侧支承布置在水轮机井侧壁。

为方便运行管理，水轮机井底部通常由交通廊道串连。交通廊道与设在厂房底部的渗漏排水廊道和检修排水阀室、廊道相通。

水轮机井下游的尾水流道由锥管段和渐变段组成。锥管段通常有钢衬，渐变段为钢筋混凝土结构。

主机间流道顶板层布置：流道顶板层顺水流向布置有发电机井、管形壳进人孔和水轮机井。发电机井用于安装、检修时起吊灯泡头、发电机定子、转子等设备，人员也可以通过交通竖井进

入灯泡头内发电机处。水轮机井用于安装、检修时起吊机组主轴和转轮等设备，也作为运行管理时厂房底部的交通通道。

在发电机井的上游和水轮机井的下游各布置一条通道，宽度1.5~2.0m。

在机组之间的墩顶部位布置敷设有油气水管道和电缆的管沟或廊道。

在上游侧布置调速器和油压装置。机旁盘可布置在下游侧排架柱之间。

主机间运行层布置：有的水电站在流道顶板上再设一运行层，将调速器、油压装置和机旁盘布置在运行层。不设运行层的布置紧凑，工程量省，但工作环境稍差。

根据对已建灯泡贯流式机组水电站的统计资料分析，进口拦污栅平均流速为1.0~1.4m/s。贯流式机组水电站水头低，为此尽可能减少水头损失，对提高水电站效益十分重要。

尾水管出口淹没深度各水电站差异较大，统计资料为0.5~4.76m，尾水出口处流速水头 $\frac{v^2}{2g}$ 为0.18~0.38m。灯泡机组安装高程由以下两个条件决定：一是满足水轮机汽蚀要求；二是满足尾水管淹没深度。灯泡机组比卡普兰机组有较好的气蚀特性。在大多数情况下，气蚀对机组的安装高程影响不大，尾水管出口的淹没深度一般是控制因素。为此灯泡机组的安装高程除满足气蚀要求外，应保证任何工况下尾水管出口顶部有0.5m以上的淹没水深且不小于出口处的流速水头。

灯泡贯流式机组由于受水力条件的限制，发电机组的尺寸较小，因而机组的转动惯量较小，机组运行的稳定性较差。厂家在机组制造设计时，防飞逸保护一般采用重锤方式，即当调速器失灵引起机组过速时，可依靠控制环上的重锤，利用导叶自关闭力矩自动关闭导叶，为此一般灯泡式机组厂房进水口不设工作闸门，仅布置一道检修闸门。但是，在许多水电站的实际运行和机组试验中，常发生异常情况，机组防飞逸保护问题单靠重锤难以

解决。近几年国内外大型贯流式机组均在尾水管出口处设置快速闸门，如王甫洲水电站，尾水快速闸门能快速切断水流，切实起到防飞逸保护机组安全运行的作用。

国内、国外部分灯泡贯流式机组水电站见表 12 和表 13。

表 12 国内部分灯泡贯流式机组水电站一览表

水电站名称	省(自治区)	河流名称	单机容量(MW)	装机台数	最大水头(m)	额定水头(m)	转轮直径(m)	投产年份
桥巩	广西	红水河	57.00	8	24.30	13.80	7.40	2008
炳灵	甘肃	黄河	48.00	5	25.70	16.10	6.15	2008
蜀河	陕西	汉江	45.00	6	22.30	16.00		在建
洪江	湖南	沅水	45.00	5	27.30	20.00	5.45	2002
黄丰	青海	黄河	45.00	5		16.00	5.98	在建
长洲	广西	西江	42.00	15	15.35	9.50	7.45	2007
尼那	青海	黄河	40.00	4	18.10	14.00	6.00	2003
金银台	四川	嘉陵江	40.00	3	15.90	13.00	6.30	2005
大猷潭	湖南	沅水	40.00	5	15.10	11.20	6.70	2007
红花	广西	柳江	38.78	6	17.00	13.20	5.90	2005
飞来峡	广东	北江	35.00	4	13.83	8.53	7.00	1999
京南	广西	桂江	34.50	2	14.50	11.00	6.30	1997
青居	四川	嘉陵江	34.00	4			6.10	2004
紫兰坝	四川	白龙江	34.00	3	19.90	15.40	5.30	2006
百龙滩	广西	红水河	32.00	6	16.40	9.70	6.40	1996
贵港	广西	西江	30.00	4	14.00	8.50	6.90	1999
红岩子	四川	嘉陵江	30.00	3	13.30	8.50	6.40	2001
凌津滩	湖南	沅水	30.00	9	13.20	8.50	6.90	1998
大源渡	湖南	湘江	30.00	4	11.24	7.20	7.50	1998
乌金峡	甘肃	黄河	35.00	4	13.40	9.20	6.50	2008
沙坡头	宁夏	黄河	29.00	4	11.00	8.70	6.85	2007
王甫洲	湖北	汉江	27.40	4	10.30	7.52	7.20	2000

表 13 国外部分灯泡贯流式机组水电站一览表

水电站名称	国家	河流名称	单机容量 (MW)	装机台数	最大水头 (m)	额定水头 (m)	转轮直径 (m)	投产年份
只见	日本	只见河	65.00	1	20.70	19.80	6.70	1989
石岛	美国	哥伦比亚河	54.00	8	15.24	12.10	7.40	1978
萨拉托夫	苏联	伏尔加河	47.30	2	15.70	10.60	7.50	1972
阿尔滕沃尔特	奥地利	多瑙河	46.70	9	18.10	13.84	6.00	1976
chautague	法国	罗纳河	46.60	2	16.15	14.67	6.40	1980
贝莱	法国	罗纳河	46.00	2	17.02	14.70	6.50	1981
易卜斯	奥地利	多瑙河	46.00	3	12.10	10.60	7.50	1983
福鲁顿瑙	奥地利	多瑙河	30.30	8	10.86	6.80	7.50	1992
JIRAU	巴西	Rio Madeira	75.00	44			7.90	在建

8.1.2 增加了灯泡贯流式机组厂房结构布置和结构设计内容。

厂房顺水流向可分为进口段、流道段、出口段。进口段、出口段以及流道段水上结构布置与常规立轴机组河床式水电站基本相同，水下流道部分则与立轴机组截然不同。流道段水下部分根据过流要求和机组安装要求可分为进水口段、中段和尾水管段。进水口段通常为矩形截面，中段包括管形壳段，水轮发电机组安装在该段内，断面由矩形渐变为圆形，尾水管段由锥管段和渐变段组成，断面由圆形渐变为矩形，流道断面形状和尺寸（主要由厂家提供）应满足水轮机出力要求。

流道进水口段和尾水管段是过流部位，其结构布置、断面形状、所受的荷载及组合工况与立轴机组的进水口段和尾水管扩散段基本相同，因此该部位的计算假定和计算方法也基本与立轴机组相同。宜切取单位宽度结构按弹性地基梁上的平面框架计算。

流道中段除了过流外还是机组的支承结构，承受灯泡机组传来的各种动荷载、静荷载。流道中段的荷载包括径向和轴向两个方向，因此流道中段的结构设计也应考虑两个方向。大中型厂房宜根据具体情况采用三维有限元进行结构分析。

8.1.3 本条为原规范 4.4.12 条。

8.2 水斗式机组厂房

8.2.2 本条沿用原规范 2.4.1 条。原条文第 4 款和第 6 款均为厂房宽度确定内容，予以合并。原条文第 5 款关于引水管高压阀布置是卧式和立式水斗式机组厂房均应遵守的条款，单独成条，列于 8.2.5 条中。

卧式水斗式机组厂房一般分两层布置，上层为运行层，其主要结构与其他型式厂房上部结构一致，下层为流道层或管道层。

机组安装高程 H_s （水轮机主轴中心线高程）可按式（11）和式（12）确定：

$$H_s = \nabla + h_p + 0.5D_1 \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad h_p = (1.0 \sim 1.5)D_1 + h_r \quad (12)$$

式中 ∇ ——设计尾水位，m，一般取下游最高尾水位，对于选取最高尾水位而水头损失较大者，宜进行动能经济比较，选取合适水位；

D_1 ——水轮机转轮直径，m；

h_p ——排水高度；

h_r ——通风高度，一般不小于 0.4m， h_r 一般由机电专业提供。

8.2.3~8.2.4 本条沿用原规范 2.4.2 条和 2.4.3 条。

立式水斗式机组厂房一般分四层布置，第一层为发电机层，第二层为电气夹层，第三层为水轮机层，第四层为流道层，水轮机层以上结构与其他型式厂房上部结构基本一致。

安装高程 H_s （喷嘴射流中心线高程）可按式（13）和式（14）确定：

$$H_s = \nabla + h_p \quad (13)$$

$$h_p = (1.0 \sim 1.5)D_1 + h_r \quad (14)$$

式中 ∇ ——设计尾水位，m，一般取下游最高尾水位，对于选取最高尾水位而水头损失较大者，宜进行动能经济比较，选取合适水位；

h_p ——排水高度，立式水斗式机组一般取大值；

D_1 ——水轮机转轮直径，m；

h_r ——通风高度 h_r ， h_r 一般不小于 0.4m， h_r 一般由机电专业提供。

国内外近年大容量立式水斗式机组厂房见表 14。其中冶勒水电站总装机 $2 \times 120\text{MW}$ ，机组为 6 喷嘴立轴冲击式，设计最大水头为 644.80m，额定水头为 580m，额定转速 375r/min，转轮最大直径 3.346m，节圆直径 2.6m，21 个水斗。发电机为悬吊式结构形式，推力轴承采用全刚性支撑结构。冶勒水电站是我国第一次引进六喷嘴水斗冲击式水轮发电机组，也是在亚洲地区第一次安装六喷嘴的冲击式机组，水电站平均水头高达 597m，最高水头高达 644.80m。

表 14 国内外主要大型立式水斗式机组参数

工程名称	装机 (MW)	厂房型式	额定流量 (m ³ /s)	最大静水头 (m)	额定水头 (m)	配水环管外围混凝土结构型式	配水环管保压值 (MPa)	建成年份
冶勒	2×120	地下厂房	47.04	644.80	580.0	充水保压	5.00	2005
大发	2×120	地下厂房	57.00	514.00	482.0	充水保压	3.85	2007
金窝	2×140	地面厂房	54.00	619.10	595.0	充水保压	4.65	2008
仁宗海	2×120	地下厂房	49.14	610.00	560.0	充水保压	4.58	2009
哈萨克斯坦玛依纳	2×150	地面厂房	72.50	521.70	471.1	充水保压	4.40	在建
吉牛	2×120	地面厂房	60.28	507.25	457.0	充水保压	4.06	在建

8.2.7 上部结构包括板梁柱系统、吊车梁、屋顶结构等与常规水电站上部结构设计相同。配水环管外围混凝土结构型式与常规机组的金属蜗壳外围混凝土结构型式相似，根据配水环管外部混凝土受力情况，可分为三种结构型式：

(1) 垫层式。垫层式配水环管是在配水环管外一定范围内铺设软垫层，后浇筑外围混凝土。这种结构型式由配水环管承担大部分的内水压力，配水环管外围混凝土结构可以承担较小的内水压力，主要承担水轮发电机荷载以及主厂房上部结构荷载。由于钢板与混凝土间软垫层的存在，使混凝土对配水环管的约束降低，影响机组运行稳定性。

(2) 充水保压式。充水保压式配水环管是在配水环管充水保压状态下浇筑外围混凝土。这种结构型式配水环管与外包混凝土内拉应力均匀，并且配水环管与外包混凝土之间的荷载分配比例可以根据需要选择，荷载分配明确可靠。在运行时，配水环管能紧贴外包混凝土，使座环、配水环管与外包混凝土能结合成整体，增加了机组的刚性，提高了其抗疲劳性能，可以依靠外包混凝土减少配水环管及座环的扭转变形，有利于减少机组的振动和稳定运行。

根据国内外已建工程，充水保压值一般为 0.5~1.0 倍最大静水头，建议采用 0.5~0.8 倍最大静水头。充水保压值越高，外围混凝土受力越小，但是保压值越高，配水环管与外包混凝土间的缝隙越大，对机组的运行不利。因此需对保压值进行充分论证，使钢筋混凝土配筋受力满足要求，同时也需满足机组特性、电站运行要求等。

(3) 直埋式。直埋式配水环管是在配水环管外直接浇筑混凝土，既不设垫层，也不充内压。外围钢筋混凝土结构和配水环管联合承受内水压力，配水环管和座环受力小，因而可以减薄钢板厚度，但混凝土受力较大以致开裂，对混凝土受力不利。

卧式机组常用无外包混凝土的配水环管型式。立式水斗式机

组配水环管由于水头较高，流量较小，采用垫层式配水环管单独运行稳定较难保证；采用直埋式配水环管外围混凝土受力较大，混凝土结构较难满足要求，故立式水斗式机组一般采用充水保压式配水环管。

配水环管外围混凝土结构计算与反击式机组蜗壳外围混凝土计算基本一致，主要宜采用三维有限元分析计算，或工程类比确定配筋。配水环管外围混凝土厚度受配水环管外围混凝土结构型式和水头影响，至少 $1\sim 1.5\text{m}$ 。

8.3 坝内式厂房

8.3.1、8.3.2 坝内式厂房需在坝体内形成巨大空腔，厂房的引水道和尾水管分别穿过坝前、后腿，对坝体应力影响较大。因而，摸清空腹坝应力规律，选择能适应于布置坝内式厂房的优化坝体断面是坝内式厂房设计的关键问题之一。坝内式厂房因位于坝内，施工干扰问题常常制约此类厂房型式的采用。

优化坝体断面，应包括下列四个因素：

- (1) 应力分布和变化较为均匀。
- (2) 各主要部位应力值控制在允许范围内。
- (3) 满足厂房布置要求。
- (4) 混凝土量最小。

对空腹坝而言，其应力控制点主要有：坝踵；空腹上游面；顶拱；坝趾。

在最不利荷载组合下，应使以上四处的应力值控制在允许的范围。

8.3.3 穿过大坝后腿中的尾水管断面应采用窄高形，以改善坝体应力。根据国内已建工程实践经验，尾水管在大坝后腿中的开孔宽度，宜控制在坝块宽度的 $30\%\sim 40\%$ 左右。国内已建和在建的5个坝内式厂房尾水管对坝后腿削弱度可参考表15。

表 15 国内 5 个坝内式厂房尾水管对坝后腿削弱度表

项 目	断面位置	工 程 名 称				
		上犹江 水电站	凤滩 水电站	枫树坝 水电站	牛路岭 水电站	长潭 水电站
尾水管在坝 后腿内的开 孔宽度 (m)	进口处	5.13	10.94	12.44	4.98	5.97
	出口处	4.00	7.00	6.00	3.50	4.00
大坝坝段宽度 (m)	进口处	16.00	19.86	21.00	12.50	13.00
	出口处	16.00	17.28	21.00	12.50	13.00
尾水管开孔 宽度对坝后腿 宽度的削弱度 (%)	进口处	32.10	55.10	59.20	39.80	78.90
	出口处	25.00	40.50	28.60	28.00	30.80
	加权平均	26.20	46.40	38.70	31.50	36.60

注：“进口处”均指尾水管进入大坝后腿处的断面。

8.4 溢流式厂房

8.4.1 溢流式厂房又分为厂顶溢流和厂前挑流两种型式。

溢流式厂房厂、坝连接的结构型式主要有以下几种：

厂、坝上下部完全分开；厂、坝下部分开，上部采用筒支加拉板连接；厂、坝下部固接，上部分开；厂、坝上下部整体固接。

厂、坝连接结构型式，若厂房位于高拱坝或重力拱坝之后，由于坝体断面比较单薄，刚度较小，承受上游水压力后，坝体变形大，厂坝基础反力分布不均一，在厂、坝间沉陷变形有显著变化，宜采用厂、坝上下部完全分开的型式。在基础地质条件较复杂，有软弱带，节理较发育条件下宜采用厂、坝下部分开，上部筒支加拉板的连接型式。厂坝基础完整均一，宜采用整体型式连接。

8.4.2 厂顶溢流式厂房、厂前挑流式厂房的结构布置及受力比

较复杂，可根据结构特点选择结构力学或有限元进行静力和动力分析，必要时与结构模型试验成果对照。

溢流式厂房顶部高速水流的脉动问题，是一种复杂的随机现象，由于均化作用，面的脉动频率较点脉动频率小得多，采用厂房构架的自振频率大于 4Hz 的工程如新安江水电站、池潭水电站，经多年运行，未出现过异常现象。为慎重起见，本标准仍提出厂房上部结构的自振频率应大于高速水流脉动优势频率的规定。高速水流脉动频率，重要工程应经水工模型试验确定，一般可参照已建工程原型观测成果类比分析确定。

8.4.3 厂顶溢流或厂前挑流时作用在顶板上的脉动压力，根据国内已建成溢流式厂房的原型观测与理论计算成果，建议厂顶溢流的脉动压力宜按厂顶流速水头的 3%~5% 作为静荷载考虑，重要工程应经水力模型试验测定。

9 建筑设计

9.1 厂区建筑规划

9.1.1~9.1.3 厂区建筑总体规划应因地制宜，结合厂区布置、地形地貌、周边环境、当地建筑风格民俗特点，满足交通运输、防火要求，选择抗震有利地段等诸多因素。就厂区而言是个总体建筑，在决定建筑形体时，要考虑群体空间的组合及功能分区，各建筑之间应有有机联系、风格协调。在群体空间或自然环境中，设计时必须分析建造地段的环境特点，用较省的投资创造一个与自然有机结合的、完整的、富于感染力和宜人的环境，做到用地紧凑、布局合理、形式大方和总体协调。

2008年5月12日四川省汶川县发生8级强烈地震后，针对国内水电工程国家发展和改革委员会、国家能源局分别发布《关于加强水电工程防震抗震工作有关要求的通知》（发改能源〔2008〕1242号）和《关于委托开展水电工程抗震复核工作的函》（国能局综函〔2008〕16号），进一步明确和规范水电工程防震抗震研究设计工作内容和专题报告编制要求，做好水电工程防震抗震研究设计工作，提高水电工程的防震抗震能力，据此提出抗震设防区水电站工程，厂区总体规划应明确工程紧急避难场所与应急疏散线路的要求。

9.1.4 水电站厂区道路涉及生产、生活、消防、应急疏散等方面，给排水水质涉及工作人员生活质量和局域环境影响，设计应给予足够重视。

9.1.5 水电站厂区、生活区绿化可以使电厂显得活泼和富有生气，绿化美化还起到分隔空间和组织交通，改善小气候，提高环境质量，维持生态平衡和降低噪声，减小灰尘等作用，应引起足够的重视。水电站工作环境和条件有其特殊性，职工及家属常年处于山区，交通、生产生活、物资供应等都很困难，所以改善环

境可直接关系到职工身心健康。

9.2 厂房建筑设计

9.2.1 建筑的节能设计是在建设节约型社会背景下应运而生的，水利建筑的节能设计也是项目审查的重点之一。

使用功能、结构技术或建筑造型三者的协调统一对建筑具有重要意义，现代工程建筑的形式美，主要取决于其结构的新颖和先进性。

进行体形、外装修和建筑第五立面屋顶设计时，应从空间各角度多方位考虑，如考虑从坝顶、山头、水面等主要交通线上眺望厂房的艺术效果，此点往往被忽视。

在进行厂房的外立面设计时，其体型、比例、建筑风格、线条、色彩和材料质感都是建筑造型艺术的有机因素，如何处理这些因素并且满足功能要求，达到适用、经济、美观，并且与周围建筑物以及自然环境的相互协调，都应对空间组合进行研究，精心构思进行多方案必选，表现出各部分的对比、质感、明暗和色彩。

9.2.2 建筑室内空间是一个完整的“人—机—环境”系统。合适的有效空间和良好的空间感往往要求室内空间有适宜的尺度和各部件之间的比例关系，室内空间的墙面、地面、顶棚形状、色泽和材料质感及其间的设备、家具和装修应保持有机的内在联系和外观的统一。创造合用的室内空间，应深入分析和研究建筑物的使用要求，这一点要贯穿于建筑构思的全过程。如一般发电厂厂房主机间应保持大尺度空间的完整性；但对地下或封闭式厂房则应着力于打破沉闷的压抑感，采用轻巧、通透和明快手法以改善不利环境气氛。要注意室内设计应以机电设备为主要表现对象，利用色彩装修和照明等手段表现出水电站厂房的特点。

9.2.3 室内防噪必须从设备选型及布置上注意，尽量使高噪声声源的建筑与要求安静的建筑合理分隔开来，并注意到噪声的传播特性，如中央控制室等重要工作部位，运行监测要求较高，则

不仅需要环境安静以保持头脑清醒，信号明确，而且要确保语言清晰，电话通信及处理事故指令不受影响。当室外噪声级较高时，应增加围护墙面的隔声量，并尽可能使各围护部件（如墙、门、窗、墙板和吊顶等）的隔声相接近。墙体与门窗隔声量在很大程度上取决于施工质量，从隔音角度看，在满足使用要求前提下，尽可能减少墙体上门窗的数量和面积，对于大面积玻璃的选用更应慎重。

电厂主机间体量巨大，考虑自动化程度的逐步提高，值班运行人员少的特点，不必做过多的吸声减噪处理，可采用局部隔声措施。吸声减噪应选择重点部位做重点处理，注意经济效益和现实可能。噪声控制已成为工业厂房设计的一个重要内容，也是现代化企业综合环境设计中一个不可缺少的因素。随着水电站厂房大容量、高水头、高转速机组的日益增多，噪声越来越大，地下厂房、坝内厂房等封闭空间的噪声环境又较恶劣，应引起充分的重视。

有周期性机械振动的部位，在结构布置上，应针对设备布置特点和为了减少固体声传递，采取减振措施。

9.2.4 厂房地面做法系按不同工作场地的使用功能提出要求。发电机层和安装间一般采用易清除油污地面如水磨石、磨光的天然石材，中央控制室、电子计算机和载波室等可选择防静电地板等，水轮机层和配电装置室可根据具体要求，选用水泥砂浆地面或其他地面。

9.2.5 主厂房内墙面宜采用水泥砂浆抹面、滚（刷）乳胶漆。主机间墙裙用预制水磨石、大理石、花岗岩还是耐擦洗涂料要视具体情况而定，应注意保持其色泽和高度与主机间使用功能需要、尺度和装修等的协调。

副厂房一般房间仍可采用水泥砂浆抹面、滚（刷）乳胶漆墙面。中央控制室及电子计算机室等墙面传统做法是墙面上抹灰，待干以后，涂无光漆。中央控制室盘柜越来越少，有的甚至已不见表盘，只有显示终端屏幕，对于中央控制室的声学处理也趋于

简化，有的只用纺织品挂在墙上，既美观又能吸声，而且可以变换室内色彩。

9.2.6 主厂房的顶棚一般应满足室内空间设计总体构思的要求，宜平整光洁，有良好的光分布和色反射，除了地下式或坝内式厂房外，一般不需吊顶。

如采用钢屋架，必要时可以做防火吊顶保护屋架，钢屋架及吊顶钢结构的保护层应采用高级耐火涂料，满足整座建筑耐火等级对构件的耐火时限要求。

副厂房部分除中央控制室、电子计算机室外，无特殊要求的，可不设吊顶，但地下厂房、坝内厂房的拱顶可因排水、防潮、通风、照明和美观等需要而设置吊顶；由于吊顶所处位置对运行安全有直接影响，对其耐久性应予以足够重视，做到安全可靠。

9.2.7 主副厂房的窗户宜采用工业厂房钢窗，主厂房启闭窗扇宜用摇窗机或转动链。主、副厂房的窗都应配有严密的纱窗，以防止飞虫和鸟类进入厂内。如主厂房窗扇较大，应进行抗风计算。门窗的五金配件应采用坚固耐久的防锈钢件。有特殊要求的窗户还应按相应要求设计。

10 安全监测设计

10.1 一般规定

10.1.1 水电站厂房设置必要的安全监测项目和设施的目的是监控工程的施工和运行安全，反馈设计。

10.1.3 监视建筑物安全运行的主要项目和测点，宜考虑集中、远传引至中央控制室（或机旁盘）进行遥测，有条件应建立监测自动化系统，主要方便观测和管理，一旦有异常现象可及时监测，随时获取资料。但仍应保留可以进行人工监测的条件，提高监测工作的可靠性，保证监测工作，特别在非常情况下不中断。

10.1.4 为使管理单位掌握并及时预报工程的安全情况，对主要的安全性监测项目及测点，宜由设计单位提供监测值的预计变动范围或极限值，作为控制工程安全度的参考指标。

10.2 监测项目

10.2.1 建筑物的变形及基础扬压力监测是厂房的常规而不可缺少的基本监测项目，一般均应设置。变形监测主要指水平位移监测、垂直位移监测，辅以变形缝监测，必要时可增设建筑物挠度（倾斜）监测。

(1) 水平位移监测。河床式水电站厂房，一般均设有厂房顶或进水口和厂基水平位移监测系统。厂房顶或进水口水平位移监测一般均采用引张线、真空激光准直法或视准线法监测，厂基基础则一般采用引张线法监测。由于厂房结构布置上的一些特殊要求，同时为提高监测精度，厂房段可以采用独立的水平位移监测系统。这种监测的引张线、真空激光准直、视准线的两个端点设在可动的坝段上，故需要校测其端点的位移值，一般采用倒垂线、正垂线或其他方法进行校正。

坝后式厂房除在厂房坝段设置水平位移监测系统监测其坝体

位移外，一般不再为厂房建筑物设置专门的水平位移监测设备。但是在下述情况下，一些坝后式厂房，除在厂房坝段设置坝体水平位移监测系统外，对厂房建筑物亦设置专用的水平位移监测系统。例如我国南方的丰水河流上建成的坝后式厂房，一般下游洪水水位较高，甚至高出厂房顶部，在这种高尾水作用下或由于地基岩层中存在软弱夹层，厂房建筑物稳定安全度较小。对于这样的坝后式厂房则需要设置厂房建筑物的水平位移监测系统，以监测厂房建筑物的安全运行。

岸边式地面厂房建筑物的水平位移监测，除有特别要求外，可不设。

(2) 挠度监测。有些厂房结构或地基条件比较复杂，除在厂顶设有完整的水平位移监测外，可在沿高度设立若干测点进行挠度监测，以监测厂房建筑物的变形。

龙羊峡水电站，除在厂房坝段设有完整的水平位移监测系统外，还在主厂房顶高程 2490.00m 和厂坝副厂房顶部高程各建立一条视准线，以监测主副厂房的水平位移。同时还在主厂房左右边墙的上下游各设一组激光铅直线，以监测主厂房框架的挠度变形。

(3) 垂直位移监测。厂房建筑物垂直变形监测标点，一般布设在主副厂房顶部、进水口或尾水平台、基础廊道等部位。

厂房建筑物的垂直位移监测，一般采用精密水准测量水准网路。有基础廊道（包括灌浆排水以及交通廊道等）标点及其水准网路，进水口平台（或尾水平台）标点及其水准网路。进行水准测量，可按高程组成自行闭合网路，也可通过竖井，利用铟钢尺作高程传递，进行各高程水准网路的闭合。为了得出厂房建筑物的绝对垂直变形值，厂、坝建筑物的水准网路，需闭合于枢纽工程的水准基点，该水准基点应设在远离建筑物稳固可靠的基岩上，并应定期与国家一、二级水准点进行联测。

关于厂房建筑物基础的倾斜监测，除利用上述水准测量成果推算其倾斜度外，还可采用管式倾斜仪进行监测。

(4) 变形缝监测。变形缝的监测宜采用比较直观的机械式仪器设备，除变形缝表面外，还利用廊道、竖井以及其他孔（洞）穿过变形缝的部位，设置机械式测缝设备。变形缝内部测点，可采用测缝计监测。测缝计可根据缝的变形特性，布置呈单向、双向和三向测缝计组，变形缝测点应同时进行温度监测。变形缝监测段选择及测点布置，应与厂房外部形变监测、应力应变监测、温度监测等相配合，以便进行综合分析。

(5) 地基扬压力监测。河床式厂房基础的扬压力监测，一般根据其地质、结构条件以及机组台数，选择几个机组段作为扬压力监测断面，进行横向（沿水流向）扬压力分布监测。

关于监测断面内的扬压力测点分布，可根据上下游水位、帷幕、排水以及厂房基础轮廓布置，对于如下的特征点则一般设有测点：①帷幕上游测点，该测点是为监测水库淤积防渗效果而设置的，对于多泥沙河流，一般设有帷幕上游扬压力测点；②排水幕测点，该测点是为监测帷幕、排水效果而设置的，除扬压力监测断面以外，其他部位可根据需要增加扬压力测点。设有尾水帷幕和排水时一般在厂房基础尾部布置扬压力监测点，以监测这种扬压力的分布情况。对于厂坝分离的坝后式厂房，一般与相应厂房坝段的坝基扬压力监测通盘考虑布置监测断面。

10.2.2 厂房地基不如高坝问题突出，但是对于软弱地基，厂房受力复杂（如河床式和厂坝整体连接的坝后式厂房），则要考虑设置监测地基工作状况的监测设备。

10.2.3 国内已建的一些水电站中，厂房基础下卧有软弱夹层，由于软弱夹层的抗剪强度极低，其厂房的整体稳定往往由这些软弱夹层面的抗滑稳定所控制，故其扬压力监测，除沿基础面设扬压力监测设备外，还要根据基础处理设计，沿深部软弱夹层滑动面布设扬压力监测设备。特别是具有承压含水层的地层，以监测基岩内承压水头沿基岩深度的变化。

10.2.4 对于厂房建筑物有关的山体边坡稳定监测，越来越引起人们的重视，其监测项目和仪器设备布置也日趋完善。不仅设有

边坡变形监测、地下水位监测设备，对边坡本身变形、地下水位进行监测，而且要对加固工程的变形以及应力、应变进行监测，以便及时了解整个边坡工程的工作状况和稳定性。

10.2.5 国内已建大中型水电站的水情及水力学监测，如上下游水位、泥沙和流量等，属于水电站水力监测和水情测验内容，在《水利水电工程机电设计技术规范》（SL 511）及有关规程均有明确规定。国内 30 多座大、中型水电站调查结果表明，这些监测项目一般都有。为了避免这些监测项目重复或设置不当，应统一考虑。

10.2.6 厂房建筑物是一个复杂的空间受力结构，设计中常常把它区分为不同的部件，如蜗壳、尾水管和机墩等，按杆件系统结构力学为主的方法计算其内力。这些部件，特别是水下部分，其截面尺寸大，形状不规则，受力复杂，且多数为厚壁结构，跨高比常达 1~2。采用这种简化计算方法所得成果，可能与实际受力状况相差较远，因此可以在少而精的原则下有选择的在蜗壳、尾水管和机墩等部件中，埋设监测仪器，以了解实际工作状况。

（1）蜗壳结构的应力应变监测，可沿水流方向选取蜗壳进口段 0°、45°和 90°等 3~4 个垂直水流方向的截面，按平面问题布设监测仪器。监测截面内的测点布置应参照应力分析计算及其试验成果，设在最大应力处和结构的特征点处，但距框架的结点或端点应有一定的距离，埋设仪器一般有钢板计（对金属蜗壳）、钢筋混凝土内外层钢筋计、混凝土应变计、无应力计、渗压计和温度计等。

除按平面问题布设监测仪器外，宜沿蜗壳环向布设钢板计、应变计以及裂缝计等，以监测蜗壳环向的工作状况。

（2）尾水管结构的应力、应变监测，可在弯管段、扩散段各选取监测断面，布设钢筋计、裂缝计和应变计等，以监测钢筋和混凝土的应力、应变。

尾水管顶板监测仪器布置，应顾及其施工程序及分期施工的应力、应变状况的监测。

(3) 厂房整体结构温度状况的监测，重点是水下部分，除利用所设的差动电阻式应力应变仪器进行温度监测外，不足者应补设温度计，可在混凝土底板尾水管和蜗壳混凝土结构中，选取若干个截面，按单向热传导布设测温设备，进行混凝土温度的专门性监测。在这些温度监测截面内，可视需要布设应变计和钢筋计，以监测相应的温度应力。

(4) 厂房结构的动态应力如振动监测，可在机墩、尾水管及其他振动反应灵敏的部位，埋设钢筋计和应变计等进行经常性的静态应力、应变监测，在试运行或正常运行期，于上述部位安设加速度计、速度计及位移计，以监测机械、水流和地震等引起的结构振动反应（频率和振幅）。

10.2.7 地下厂房监测，地下厂房洞室的监测包括施工期临时性监测和永久性监测，本标准仅指永久性监测仪器设备的布置设计，对于施工期临时性监测项目和仪器设备布置设计，可参照其他规定执行。

大型地下厂房应根据围岩特性和支护设计，设置监控工程安全的监测设备。厂房洞室围岩变形监测，可采用岩体多点位移计，由测缝计改装的岩体变位计或其他应力应变计。多点位移计的施测深度一般大于1.0倍洞跨（或洞径）。

采用锚喷支护可安设锚杆测力计，钢筋混凝土衬砌可设钢筋计及混凝土应变计等。

厂房洞室内表面变形（断面收敛）可于洞室内表面设置收敛测点，采用钢钢丝收敛计或全站仪进行监测，采用引张线（或视准线）和垂线法监测上下游边墙的位移。

围岩有地下水时可采用测压管和渗压计监测地下水位和外水压力，采用量水堰监测渗流量。

10.2.8 岩锚式吊车梁是地下厂房中广泛运用的新型结构，为了摸清岩锚梁的工作状况，国内较大吨位的岩锚梁均设置了变形监测、缝面间隙监测和锚筋（索）应力应变监测。

10.2.9 溢流式厂房除了建筑物变形、地基扬压力、地基应力与

变形等监测外，宜增设水力学和溢流结构的动力学监测。水力学监测设计可纳入枢纽整个水力学监测统一考虑。

10.2.10 本条为新增内容，为便于设计人员使用，本条对河床式厂房、坝后式厂房、岸边式厂房和地下式厂房按建筑物级别对应设和可选监测项目进行了规定。

(1) 各类厂房边坡的安全监测项目及要求的应符合《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386) 的规定。

(2) 降雨量、气温、风速等环境量监测与枢纽结合考虑，表 10.2.10 中未作为厂房监测项目列出。

(3) 地面厂房应力应变监测项目包括结构应力应变、锚杆应力、地基应力等。

(4) 溢流式厂房除表 10.2.10 中选择的监测项目，还应增设水力学和结构振动监测项目。

(5) 厂房永久边坡工程的应力应变主要指锚索和锚杆应力，加固工程的钢筋和混凝土应力应变。

(6) 爆破振动、机组振动、厂房振动及流道内动水压力等专项监测，可以根据工程需要选择，不作为长期安全监测项目。