

发电工程设计项目经理（设总）培训课题

第二部分：专业设计基础知识

第十章：土建结构专业基础知识

华北电力设计院工程有限公司

2012 年 9 月 北京

编写：王昌炎

校审：周建军

目 录

1 火力发电厂土建结构设计范围和设计内容.....	1
1.1 设计范围	1
1.2 结构专业主要设计内容.....	1
1.2.1 结构专业主要设计任务	1
1.2.2 设计分界及与各专业关系	2
1.3 各设计阶段土建结构专业主要设计内容.....	2
1.3.1 可行性研究阶段	2
1.3.2 初步设计阶段	3
1.3.3 施工图阶段	4
1.3.4 各设计阶段需要设总协调的接口内容（必须的依据文件和资料）	4
2 土建结构设计任务和设计方法	6
2.1 土建结构设计的基本任务	6
2.2 工程结构设计方法的演进和分类	7
2.3 概率极限状态设计法	7
2.3.1 建筑结构的有关要求	8
2.3.2 结构的设计使用年限	8
2.3.3 建筑结构的等级	9
2.3.4 工程结构的极限状态	9
2.3.5 结构可靠性和可靠度	10
2.3.6 概率极限状态设计法实际表达式。	10
3 主厂房结构设计	10
3.1 主厂房结构设计的内容	10
3.1.1 主厂房结构设计的内容	10
3.1.2 建筑结构选型	11
3.2 主厂房结构选型	17
3.2.1 主厂房结构选型的发展	17
3.2.2 主厂房结构选型原则	19
3.2.3 主厂房结构布置	19
3.2.4 主厂房结构体系	22
3.2.5 主厂房结构抗震体系	24
3.2.6 楼板结构	24
3.2.7 屋面结构	25
3.2.8 围护结构	27
3.2.9 其它结构	27
4 地基基础	29

4.1 术语	29
4.2 一般规定	29
4.3 地基计算	31
4.4 基础设计	32
4.5 地基处理	33
4.5.1 需进行地基处理的地基	34
4.5.2 地基处理方案选定	34
4.5.3 地基浅层处理	34
4.6 桩基础设计	37
4.6.1 术语	37
4.6.2 桩基础的分类	37
4.6.3 常用桩型的特点	38
4.6.4 桩基础的设计	41
5 烟囱	42
5.1 术语	43
5.2 有关规范关于烟囱选型的规定	43
5.2.1 《烟囱设计规范》(GB 50051-2002) 相关规定如下:	44
5.2.2 《火力发电厂烟囱设计导则》(Q/DG1-T001-2009) 的规定	45
5.2.3 《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022-200×) 的规定	46
5.3 早期设计的脱硫烟气烟囱运行状况	47
5.4 各型脱硫烟气烟囱技术经济比较	49
5.5 烟囱投资费用组成分析	51
6 输煤系统建(构)筑物简介	51
6.1 术语	51
6.2 输煤系统建(构)筑物简介	52
7 抗震设计	55
7.1 术语	55
7.2 概述	56
7.2.1 有关地震的几个名词	57
7.2.2 地震的震级与烈度	57
7.2.3 抗震设防烈度	57
7.2.4 抗震设防烈度和设计基本地震加速度的关系	58
7.3 抗震设计的基本目的和设防目标	58
7.3.1 抗震设计的基本目的	58
7.3.2 抗震设防的适用范围	58

7.3.3 抗震设防的目标	58
7.4 建筑抗震设防分类和设防标准	59
7.4.1 建筑抗震设防分类	59
7.4.2 电力建筑抗震设防分类	60
7.4.3 建筑抗震设防标准	61
7.5 建筑抗震概念设计	61
7.6 抗震设计的基本要求	62
7.6.1 合理选择场地	62
7.6.2 地基和基础设计宜符合下列要求:	62
7.6.3 建筑物的平、立面布置要求	62
7.6.4 结构体系的选择	63
7.6.6 注意选择良好的材料。	63
7.7 火力发电厂主厂房结构抗震设计的主要原则	63
7.8 汶川大地震概况（供参考）	64
8 设计和审查中常遇到的问题	67
8.1 主厂房结构布置及选型	67
8.1.1 主厂房结构选型	67
8.1.2 地震区主厂房框架结构体系的选择	68
8.1.3 对规范定为不宜采用的结构选型应进行专题论证	69
8.2 地基处理	69
8.2.1 可研报告中应避免的疏漏	69
8.2.2 地基条件是总平面布置应考虑的重要因素	70
8.2.3 地基基础选型宜进行专题论述	70
8.3 烟囱	70
8.3.1 早期防腐烟囱设计无章可依	70
8.3.2 脱硫烟气烟囱设计的行业标准已实施	71
8.3.3 烟囱防腐设计必须按标准执行	71

1. 火力发电厂土建结构设计范围和设计内容

1.1 设计范围

火力发电厂围墙范围内除水工系统外的所有建（构）筑物的结构设计工作，均属于结构专业的设计范围。具体包括下列几大部分：

- a) 主厂房；
- b) 烟、尘、渣系统建（构）筑物，包括烟道、烟囱、除尘器支架、除尘器场地及灰、渣建（构）筑物；
- c) 电气系统建（构）筑物，包括主控楼、网控楼、通讯楼、A 列外构筑物及升压站等；
- d) 输煤系统建（构）筑物，包括翻车机室、卸煤沟、碎煤机室、转运站及输煤栈桥等；
- e) 化学水系统建（构）筑物，包括化学水处理室、循环水处理室及制氢站等；
- f) 脱硫、脱硝建（构）筑物；
- g) 空冷平台支架结构；
- h) 全厂非水工专业负责设计的管架和支墩；
- i) 辅助生产建筑物，包括机、炉、电检修间、金工车间及启动锅炉房等；
- j) 附属建筑物，包括生产办公楼，行政办公楼、材料库、值班休息室、传达室等；
- k) 地基处理（当地基条件不能满足采用天然地基要求时，需对地基进行必要的处理）

L) 高度在 3 米以上的边坡处理和挡土墙，山体边坡处理。

1.2 结构专业主要设计内容

1.2.1 结构专业主要设计任务

火力发电工程中结构专业的主要设计内容，就是根据工艺专业和建筑专业提出的设计条件，包括建（构）筑物的主要尺寸、作用大小、连接构造、允许变形等使用要求及工程特定外部条件，经过计算分析，设计出在规定的使用期内能满足预定使用要求的、安全、耐久的结构。一个建筑物的结构设计，通常包括下列内容：地基处理（如有必要的话）、基础设计、上部承重结构、屋盖结

构、围护结构、设备基础及零米沟道等。

1.2.2 设计分界及与各专业关系

在工艺系统建（构）筑物中，所有的工艺设备和管道均支承在土建结构上，工艺专业对土建结构专业的要求表现在结构的外形、孔洞、埋件、荷重等方面。结构专业和工艺专业的设计分界也就在工艺设备和土建结构的连接界面上。具体的说结构专业和外专业的分界主要有下述几方面：

a) 各建（构）筑物零米设施中的沟道，均在建（构）筑物外轮廓轴线外1m处分界，1m以外属总图专业负责。

b) 各建（构）筑物的定位由总图专业确定，各建（构）筑物基础图上应标注由总图提供的坐标。

c) 作用于结构上的各种荷载以及用于工艺设备（包括所需的运输设备）生根的埋件尺寸、位置标高、荷载大小均应由相关的工艺专业提供。

d) 设备基础的外形及定位尺寸，设备底座安装标高、埋件、锚栓位置及埋设要求，作用于基础上的动、静荷载等均应由相关专业提交。

由于任一建（构）筑物的设计均要涉及多个专业，建筑结构和主体工艺专业更有着密不可分的关系。结构设计应服从工艺专业的要求，但当从结构专业的角度看，工艺要求不尽合理，尤其可能与抗震概念有悖时，可与工艺专业商量，以取得双方均能接受的方案。因此，在结构设计过程中，各设计阶段工艺和结构专业之间的资料互提、甚至是多版往返是必须的。在主厂房零米设施的设计中，由于零米设施布置复杂，沟道纵横，辅机基础密布，常有碰撞发生。结构专业的该卷册负责人应起到车间司令的作用，对各专业的零米设施进行协调和归口。

火力发电厂勘察设计中各专业间的分工、专业间互提资料及联系配合制度，已在质量管理体系文件中作了详细规定，此处不再赘述。

1.3 各设计阶段土建结构专业主要设计内容

1.3.1 可行性研究阶段

新建（扩建）发电工程均要进行初步可行性研究，在此阶段土建结构专业一般不须参予。

可行性研究阶段结构专业的主要工作如下：

a) 必要时参加现场踏勘调研,配合岩土专业掌握厂区区域地质稳定条件和厂区地震基本烈度。

b) 根据岩土工程勘察报告及岩土专业对地基基础方案的建议,提出各主要生产建(构)筑物所采取的地基基础方案、辅助及附属建筑物的地基基础方案。

c) 根据工程规模及相关外部条件,进行主要建(构)筑物的选型,并进行论证,写出结构选型说明书,作为可研报告的一部分。

根据烟气脱硫系统和环保要求,说明拟采用的烟囱型式及内衬防腐措施,必要时进行专题论证。

d) 当需采用人工地基时应进行多方案的技术经济比较和论证,提出推荐的人工地基方案以及必要的试桩工作量。

e) 配合主要工艺专业的主厂房布置图(建筑、结构专业一般不单独出图)。

f) 向技经专业提供进行投资估算的资料,包括上部结构和地下设施、地基基础工程量,以及拟列的试验研究费用。

在此阶段结构专业应取得的资料有工程地质、水文地质、水文气象及各生产建(构)筑物的主要工艺资料。

1.3.2 初步设计阶段

根据《火力发电厂初步设计文件内容深度规定》(DL/T 5427—2009)的要求,初步设计阶段土建专业应单独立卷出版初设文件,包括说明书和图纸,归档时尚应有必要的计算书。《火力发电厂初步设计文件内容深度规定》对说明书和图纸的内容均作了详细的规定,此处不再赘述。在此仅就说明书中应重点阐述的问题作一些说明。

a) 应明确各主要建构筑物的设计使用年限、结构安全等级、地基基础设计等级及抗震设防类别等基本要求。

b) 应明确设计依据和设计要求,着重说明厂址的自然条件、主要技术数据以及对施工条件的要求。

c) 应对可研报告审查中提出的问题进行详细的回答。

d) 初步设计是工程设计的关键阶段,应为工程提出技术先进而又切实可行的具体方案,因此对主要结构的选型应进行多方案的比较和优选。

e) 结构体系的选型,包括主厂房纵向、横向结构体系选择、屋盖及各层楼

面方案。

-----抗震体系的布置及计算原则（对于地震区的电厂）

-----伸缩缝、沉降缝及防震缝的设置，防止结构不均匀沉降的措施。

-----地基处理及主要建（构）筑物和主要设备基础型式的选择，应作必要的计算比较和论证。

-----新技术、新结构、新材料的采用。

f) 应选择有代表性的框架、基础和构件进行计算，以保证所定的梁、柱断面尺寸在施工图阶段不会有大的变化，避免因此而影响工艺设备的布置和土建工程量有大的改变。如有类似工程可参考时，亦应作套用计算。

对于地震及场地条件不宜采用钢筋混凝土结构主厂房的工程，如拟选用钢筋混凝土结构，应进行必要的论证，提出结构选型的专题报告。

g) 初设阶段除本专业的工作以外，应做好和各专业的配合工作，以便使工艺专业所推荐的方案对结构专业来说也是切实可行的。

h) 向技经专业提交技经资料及向有关工艺专业提交配合资料。

1.3.3 施工图阶段

施工图设计阶段的任务是根据初步设计及其审批文件的要求，编制满足工程项目要求的施工图。施工图设计应满足下列要求：

a) 施工图设计应根据已审批的初步设计进行编制，这不仅指技术方案不能改变，而且从投资控制方面，要做到限额设计，不突破概算。

b) 如因情况变化需改变已审定的初步设计方案时，应向原审批单位提出修改方案的报告，经批准后方可实施。

c) 施工图卷册的编号应按规定编排。

d) 施工图应能满足有关规定对施工图的深度要求。

1.3.4 各设计阶段需要设总协调的接口内容（必须的依据文件和资料）

1.3.4.1 可行性研究阶段

a) 设计必须的依据文件；

b) 可研阶段结构专业应取得的资料有可研阶段工程地质资料（含厂址稳定性评价、地震资料等）、水文地质、水文气象、各生产建（构）筑物的主要工艺资料及业主的其他要求。

上述资料中，工程地质资料是十分重要的，尤其当地质条件较差时，结构设计人员将根据地质条件对地基基础选型进行多方案技术经济比较后确定地基基础方案。地基方案的合理选择是影响工程造价和工期的重要因素。

对于重要电厂，应取得工程场地地震安全性评价报告。经有关部门评审和由省地震局批复的地震动参数将作为抗震设计的依据，在可研阶段结构专业将据此确定主厂房结构的选型。

1.3.4.2 初步设计阶段

初步设计阶段结构专业应取得的资料有：

- a) 初设阶段工程地质资料。若在可研阶段已审定采用桩基或其他地基处理方式，并在初设开展前已完成原体试验。应取得试桩报告或其他地基处理的试验成果报告。
- b) 经省地震局批复的地震安全性评价报告提供的工程场地地震动参数。
- c) 可研报告审查意见。
- d) 主厂房建筑布置、主要设备布置及荷载（5t 以上）资料。
- e) 其他主要生产建（构）筑物的建筑布置及工艺资料。
- f) 其他特殊要求。

1.3.4.3 施工图阶段

- a) 初步设计及其审批文件，如因情况变化需改变已审定的重大初步设计方案时，应向原审批单位提出修改方案的报告，经批准后方可实施。
- b) 工程所在地的水文气象资料，包括气温、降雨量、湿度、风速、风向、积雪厚度和土壤冻深等。
- c) 施工图阶段工程地质资料，包括厂区地层分布、地质构造、各层土的物理力学性质及主要指标，场地土类别及建筑场地类别。对厂区有无特殊地质条件如软弱地基、膨胀土、滑坡、溶洞、冻土、抗震不利地段等分别作出说明。
- d) 水文地质资料、地下水类型、深度及季节性变化情况以及对钢结构、混凝土及钢筋混凝土结构中的钢筋侵蚀性评价。
- e) 单项工程建筑结构的使用功能要求及对结构设计的特殊要求（如耐高温、防震抗震、防渗漏、防腐蚀、防爆等）。
- f) 结构选型对施工条件的要求：如现浇或装配式结构，如采用装配式结构，

要考虑机械吊装能力及构件划分原则及采用新的施工技术的可能性。

g) 施工图阶段应取得各建（构）筑物详细的工艺资料，包括建（构）筑物的主要尺寸、埋件、孔洞、荷重等资料。

2. 土建结构设计任务和设计方法

2.1 土建结构设计的基本任务

为了电力生产，火力发电厂需要建造一系列的建（构）筑物。它们为各个工艺系统以合理流程布置的设备提供坚固可靠的支撑结构、配备各项必要的辅助设施，并为设备正常运行及检修提供必要的空间、为电力生产人员创造良好的工作环境。

当按各种使用功能要求完成了建筑平面和剖面设计后，和所有建筑设计一样，发电工程土建结构设计的基本任务是在结构的可靠和经济之间选择一种合理的平衡，力求以最低的代价，使所建造的结构在规定的条件下和规定的使用期限内，能满足预定的安全性、适用性和耐久性等功能要求。

随着工程建设经验的积累和标准化建设不断完善，国家为工程结构设计制定了一系列规范。土建结构设计应遵循的标准主要有：

a) 跨行业的国家标准（GB）系列规范，如：

- 1) 建筑结构可靠度设计统一标准（GB 50068-2001）；
- 2) 建筑抗震设防分类标准（GB 50223-2008）；
- 3) 建筑抗震设计规范（GB 50011-2010）；
- 4) 建筑结构荷载规范（GB 50009-2001 2006 年版）；
- 5) 混凝土结构设计规范（GB 50010-2002）；
- 6) 钢结构设计规范（GB 50017-2003）；
- 7) 砌体结构设计规范（GB 50003-2001）；
- 8) 构筑物抗震设计规范（GB 50191-93）；
- 9) 建筑设计防火规范（GB 50016-2006）；
- 10) 建筑地基基础设计规范（GB 50007—2002）；
- 11) 工业建筑防腐蚀设计规范（GB 50046-2008）等。

b) 建筑工业的国家标准（GBJ）系列规范，如：

- 1) 建筑结构设计统一标准（GBJ68—）；

- 2) 建筑结构设计术语和符号标准 (GBJ—) 等。
- c) 建筑工程行业标准 (JGJ) 系列标准, 如:
 - 1) 建筑桩基技术规范 (JGJ 94—2008)
 - 2) 建筑地基处理技术规范 (JGJ 79-2002) 等。
- d) 电力行业标准 (DL) 系列规范, 如:
 - 1) 火力发电厂设计技术规程 (DL 5000—2000);
 - 2) 火力发电厂土建结构设计技术规定 (DL 5022—200X) 等。

2.2 工程结构设计方法的演进和分类

为达到结构设计的基本目的, 近百年来人们采用过多种设计方法。以承载能力设计为例, 有:

a) 容许应力设计法

设计准则: 结构的工作应力不应大于材料的容许应力。

b) 破损阶段设计法

设计准则: 结构的最大内力不应大于结构的承载能力。

c) 极限状态设计法

设计准则: 对于规定的极限状态, 作用引起的可能的最大内力不应大于可能的结构最小承载力。

d) 概率极限状态设计法

设计准则: 对于规定的极限状态, 作用引起的结构内力大于结构承载力的概率 (失效概率) 不应大于规定的限值。

作用—施加在结构上的集中力或分布力 (称直接作用, 也称荷载) 和引起结构外加变形或约束变形的原因 (称间接作用)。

自国际标准 ISO2394 发布以后, 采用概率法已成为工程设计方法发展的基本趋势。

2.3 概率极限状态设计法

我国于 2001 年 11 月发布了国家标准《建筑可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001), 自 2002 年 3 月 1 日起执行。该标准规定了我国工业与民用建筑结构设计采用概率极限状态设计法, 是制定现行工业与民用建筑结构荷载规范、钢结构、木结构、砌体结构设计规范, 以及建筑物抗震设计规范应遵循的准则。

2.3.1 建筑结构的性能要求

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)对建筑结构的性能要求规定如下:

“1.0.7 结构在规定的性能使用年限内应满足下列性能要求:

1 在正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用(施加在结构上的集中或分布荷载,以及引起结构外加变形或约束变形的原因,均称为结构上的作用。);

2 在正常使用时有良好的工作性能;

3 在正常的维护下具有足够的耐久性;

4 在设计规定的偶然事件发生时及发生后,仍能保持必须的整体稳定性。”

上述 1、4 项为安全性,2 项为适用性,3 项为耐久性,总称为可靠性。

在此对有关的两个名词解释如下:

设计基准期 为确定可变作用及与时间有关的材料性能等取值而选用的时间参数。如结构抗震设计的设计基准期为 50 年,它是抗震规范确定地震作用取值时选用的统计时间参数,即地震发生的超越概率是按 50 年统计的。

设计使用年限 设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的年限,即建(构)筑物在正常设计、正常施工、正常使用和一般维护下所应达到的使用年限。当达到设计使用年限后,经鉴定和维修,可继续使用。因而,设计使用年限不同于建(构)筑物的使用寿命。

2.3.2 结构的设计使用年限

《建筑结构可靠度设计统一标准》以强制性条文对设计使用年限规定如下:

“1.0.5 结构的设计使用年限应按表 1.0.5 采用。”

表 1.0.5 设计使用年限分类

类 别	设计使用年限(年)	示 例
1	5	临时性结构
2	25	易于替换的结构构件
3	50	普通房屋和构筑物
4	100	纪念性建筑和特别重要的建筑结构

火力发电厂的建(构)筑物的结构的设计使用年限,除临时性结构外,均

为 50 年。

2.3.3 建筑结构的安全等级

《建筑结构可靠度设计统一标准》以强制性条文规定如下：

“**1.0.8** 建筑结构设计时，应根据结构破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等）的严重性，采用不同的安全等级。建筑结构安全等级的划分应符合表 1.0.8 的要求。”

表 1.0.8 建筑结构的安全等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的房屋
二级	严重	一般的房屋
三级	不严重	次要的房屋

注：1. 对特殊的建筑物，其安全等级应根据具体情况另行确定；

2. 地基基础设计安全等级及按抗震要求设计时建筑结构的安全等级，尚应符合国家现行有关规范的规定。

火力发电厂的建（构）筑物中除下列结构为一级外，其余建（构）筑物的结构安全等级均为二级：

高度 200m 以上或单机容量 600MW 以上电厂的烟囱：（摘自《火力发电厂烟囱设计导则》（Q/DG 1—T001—2009）5.1.1 条）；

单机容量 300MW 以上电厂的主厂房悬吊煤斗和汽机房屋盖；

2.3.4 工程结构的极限状态

极限状态 整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求，此特定状态为该功能的极限状态。

结构的极限状态分为两类：

a) **承载能力极限状态** 这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了承载能力极限状态：

1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去了平衡（如倾覆等）；

2) 结构构件或连接因超过材料强度而破坏（包括疲劳破坏），或因过度变形而不适于继续承载；

3) 结构转变为机动体系；

- 4) 结构或结构构件丧失稳定（如压屈等）；
- 5) 地基丧失承载能力而破坏（如失稳等）。

b) 正常使用极限状态 这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了正常使用极限状态：

- 1) 影响正常使用或外观的变形；
- 2) 影响正常使用或耐久性能的局部损坏（包括裂缝）；
- 3) 影响正常使用的振动；
- 4) 影响正常使用的其他特定状态。

2.3.5 结构可靠性和可靠度

可靠性 结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力。

可靠度 结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成规定功能的概率。

结构可靠度是结构可靠性的定量描述。

规定的时间：设计基准期 50 年，其取值（50 年）是结合一般结构的使用期兼顾分析精度确定的。设计基准期并不简单的等同于结构的寿命，但当结构使用期限超过设计基准期后，结构可靠度就可能会较设计预期值降低。

规定的条件：正常设计，正常施工，正常使用。

2.3.6 概率极限状态设计法实际表达式。

为便于工程技术人员的应用，概率极限状态设计法采用分项系数表达式。实用表达式是以定值的变量代表值和定值的分项系数代替随机变量和可靠指标进行工程结构设计。结构具体设计方法仍和传统设计方法相同，并不直接涉及统计参数和概率运算。和以往设计方法不同的是，以往各种设计方法中的安全系数是根据经验确定的，而新的设计表达式中采用的各种分项系数是根据基本变量的统计特性以结构可靠度的概率分析为基础优选确定，即新法中的各分项系数是共同表达结构可靠度的分析系数。

3 主厂房结构设计

3.1 主厂房结构设计的内容

3.1.1 主厂房结构设计的内容

主厂房是火力发电厂的核心建筑。受生产工艺的制约，主厂房布置已形成了

较为固定的模式。在介绍主厂房布置之前，先介绍几个土建专业常用的名词。主厂房的横向是指汽机房、除氧间、煤仓间和锅炉房依次排列的方向；纵向是指多台机组排列的方向。主厂房纵向轴线（用字母 A、B、C、D 等标注）之间的距离称为跨度，横轴（用数字标注）之间的距离称为柱距。

早期建成的火力发电厂采用典型的四列式布置：即由汽机房、除氧间、煤仓间和锅炉房组成。大型电厂已不建造高大的锅炉房来遮盖和围护巨大的锅炉，而是在锅炉的外围采用紧身封闭结构（或采用露天设计），由锅炉钢架承受封闭结构的水平荷载，锅炉钢架自成结构单元并由锅炉厂设计供货。因此，现在所说的主厂房一般均不将锅炉房包括在内，仅指由汽机房、除氧间和煤仓间组成的厂房建筑，并将此称为三列式布置。但这造成对主厂房几列式布置的叫法上的混乱。

典型的三列式布置由汽机房（除氧器布置在汽机房内）、煤仓间和锅炉房或汽机房、除氧煤仓间和锅炉房组成。

随着工艺布置方案的优化，有的工程采用汽机房、除氧间和锅炉房三列式带侧煤仓的布置；也有的工程采用汽机房（除氧器布置在汽机房内）和锅炉房两列式带侧煤仓的布置模式；有的热电厂还有可能出现 A 列外局部带披屋的布置。

从结构角度看，主厂房框—排架结构是指由汽机房的外侧柱通过汽机房屋架与主框架相连形成的联合承重结构。

主厂房的结构设计是火力发电厂结构设计重点。它包括了框—排架、屋面结构、楼面结构、吊车梁、煤斗、汽轮发电机基础及各种动力设备基础等结构类型。

3.1.2 建筑结构选型

结构设计人员在工程前期，首先要根据建筑设计的功能和造型要求选定主要承重结构的用材和结构型式。常用的结构类型按主要结构用料可划分为：砌体结构、钢筋混凝土结构、钢结构、木结构以及由几种材料组合而成的混合结构。火力发电厂主厂房主要采用钢筋混凝土结构及钢结构，电厂其余建（构）筑物大部采用钢筋混凝土结构，部分辅助建筑及附属建筑采用砖混结构。

在确定了结构用材的基础上，根据建筑物使用功能、层数高低、地基条件、环境状况等因素，进一步选定结构方案。一般工业民用建筑常用的结构方案大体可分为砖混结构、钢筋混凝土单层刚架、单层排架、框架、剪力墙、框架—剪力

墙等结构体系。

3.1.2.1 主要工程结构材料

在介绍结构类型之前，先对主要的工程结构材料做简单介绍：

a) 混凝土

混凝土是由胶凝材料、细集料与粗集料、水、外加剂、细粉掺合料按适当比例配合、拌制成拌合物，经一定时间养护硬化而成的人造石材。普通混凝土是由水泥、砂、碎石、水和外加剂所组成。

混凝土在正常养护条件下，其强度将随着龄期的增加而增长。最初 7~14 天内，强度增长较快，28 天以后增长缓慢。但龄期延续很久其强度仍有所增长。混凝土性能的标志是其强度等级。混凝土的强度等级是按混凝土立方体抗压标准强度（MPa）来确定的。按照国际上对建筑材料等级标志的规定，混凝土强度等级以混凝土英文单词（Concrete）的第一个字母 C，加上混凝土立方体抗压标准强度值的数字来表达。强度等级划分为 C7.5、C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C60 等十二个等级。（注：在早期的混凝土设计规范中，混凝土的强度以标号来表示）

为了确定混凝土的强度等级，应按照国家标准《普通混凝土力学试验方法》（GBJ81—），制作边长为 150mm 的立方体试件，在标准条件[温度（20±3）℃，相对湿度 90%以上]下，养护到 28 天龄期，测得的抗压强度值为混凝土立方体试件抗压强度（简称立方体抗压强度）。

混凝土立方体抗压标准强度值（以 MPa 即 N/mm² 计）是具有 95%保证率的立方体试件抗压强度。即抗压标准强度是按数据统计处理办法达到规定保证率的立方体试件抗压强度数值。

不同的建筑工程，不同的结构部位常采用不同强度等级的混凝土，我国目前一般选用情况如下：

- 1) C10~C15—用于垫层、地坪等次要的、受力不大的结构。
- 2) C20~C30—用于梁、板、柱、楼梯等普通现浇钢筋混凝土结构。
- 3) C30~C40—用于跨度较大的结构、耐久性较高的结构、预制构件等。
- 4) C40~C45—用于预应力钢筋混凝土构件、吊车梁及特种结构、高层建筑等。

b) 钢材

钢材是土木工程的重要材料之一，由于钢材的强度较高，抗压和抗拉能力都很强，且能承受较大的弹性变形和塑性变形，并有经受冲击和振动荷载的能力，可以焊接、铆接和螺栓连接，便于装配，因此宜用于大跨度及对延性要求高的结构。

1) 钢的分类

钢与生铁的区别在于含碳量的数量。含碳量小于 2.06% 的铁碳合金称为钢；含碳量大于 2.06% 的称为铁。

按照化学成分分类

(1) 碳素钢

① 普通碳素钢

低碳钢：碳含量小于 0.25%。

中碳钢：碳含量 0.25%~0.60% 之间。

高碳钢：碳含量、大于 0.60%。

② 优质碳素结构钢：保证钢的化学成分和力学性能。

(2) 合金钢

① 低合金钢：合金元素总含量小于 5.0%。

② 中合金钢：合金元素总含量在 5.0%~10% 之间。

③ 高合金钢：合金元素总含量大于 10% 以上。

按照冶炼时脱氧程度分类

① 镇静钢：浇注时，钢液平静地冷却凝固，是脱氧较完全的钢。含有较少的有害氧化物杂质，各种力学性能比沸腾钢优越，用于承受冲击荷载或其他重要结构，其代号为“Z”。

② 半镇静钢：指脱氧程度和质量介于镇静钢与沸腾钢之间的钢，其质量较好。其代号为“b”。

③ 特殊镇静钢：比镇静钢脱氧程度还要充分彻底的钢，其质量最好，适用于特别重要的结构工程。其代号为“TZ”。

④ 沸腾钢：脱氧不完全的钢，浇注后在钢液冷却时有大量一氧化碳气体外逸，引起钢液剧烈沸腾，成为沸腾钢。此种钢的碳和有害杂质磷、硫的偏析较

严重，钢的致密程度较差，故冲击韧性和焊接性能较差，特别是低温冲击韧性的降低更显著。但沸腾钢只消耗少量的脱氧剂，钢锭的收缩孔较小，成品率较高，故成本低，被广泛应用于建筑结构。其代号为“F”

目前，沸腾钢的产量逐渐下降并被镇静钢所代替。

磷和硫是钢中主要的有害杂质，均是在炼铁原料中带入的。磷对钢材起强化作用，因而可使钢的屈服点和抗拉强度提高，但塑性和韧性显著降低，特别在低温下的冲击韧性下降非常显著，会增大钢材的冷脆性和降低焊接性能。但磷可提高钢的耐磨性和耐蚀性。

硫在钢中以硫化铁夹杂物形式存在。由于硫化铁的熔点低，使钢材在加工过程中容易引起钢材断裂，形成热脆现象。硫将大大降低钢的热加工性和可焊性。因此磷和硫是钢材中需严格控制含量的有害杂质。

2) 钢材的牌号

建筑上常用的主要钢种是普通碳素钢中的低碳钢和合金钢中的低合金高强度结构钢。

建筑钢材可分为钢结构用钢材和钢筋混凝土结构用钢筋、钢丝等。

碳素结构钢的牌号、代号和符号：

碳素结构钢的牌号由代表屈服点的字母、屈服点数值、质量等级符号、脱氧方法符号等四个部分按顺序组成。

例如：Q235—AF 符号的意义为：

Q—钢材屈服点“屈”字汉语拼音首位字母；

235—为钢材屈服点数值，（单位为 N/mm^2 ）；

A、B、C、D—分别为质量等级；其中 A 级硫磷含量最高，D 级最低。

F—沸腾钢“沸”字汉语拼音首位字母；

b—半镇静钢“半”字汉语拼音首位字母；

Z—镇静钢“镇”字汉语拼音首位字母；

TZ—特殊镇静钢“特镇”两字汉语拼音首位字母。

在牌号组成表示方法中，“Z”与“TZ”符号可予以省略。

碳素结构钢按屈服点的大小划分为 5 个牌号：Q195、Q215、Q235、Q255、Q275。在土建结构中，主要采用 Q235 钢。

低合金高强度结构钢，是在普通碳素钢的基础上添加少量的一种或多种合金元素及稀土元素，以提高其强度、耐腐蚀性、耐磨性或耐低温冲击韧性。

低合金高强度钢具有较高的屈服点和抗拉强度、良好的塑性和冲击韧性，具有耐腐蚀、耐低温性能。采用低合金高强度钢可延长使用寿命、用于主要受力构件可减轻结构重量、节约钢材、提高经济效益。

低合金高强度结构钢按含碳量和合金元素种类、含量不同，划分为 Q295、Q345、Q390、Q420、Q460 5 个牌号。建筑钢结构常用 Q345 钢。

低合金高强度结构钢除 Q295 分为 A、B 两个质量等级、Q460 分为 C、D、E 三个质量等级外，其余三个牌号均分为 A、B、C、D、E 5 个质量等级，其中 A 级磷、硫含量最高，依次含量逐渐减少。

钢筋混凝土用热轧光圆钢筋和带肋钢筋

热轧带肋钢筋的牌号由 HRB 和牌号的屈服点最小值构成。H、R、B 分别为热轧 (Hot rolled)、带肋 (Ribbed)、钢筋 (Bars) 三个词的英文首位字母。热轧带肋钢筋分为 HRB335、HRB400、HRB500 三个牌号。

3) 抗震结构的材料要求:

混凝土的强度等级，框支梁、框支柱及抗震等级为一级的框架梁、柱、节点核心区，不应低于 C30；构造柱、芯柱、圈梁及其他各类构件不应低于 C20。

钢结构的钢材宜采用 Q235 等级 B、C、D 级的碳素结构钢及 Q345 等级 B、C、D、E 的低合金高强度结构钢。

3.1.2.2 主要建筑结构类型

混凝土结构 以混凝土为主制成的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力结构等。

素混凝土结构 由无钢筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构，通常用于主要承受压力的次要结构，如小型的设备基础等。

钢筋混凝土结构 由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构。

混凝土具有很好的抗压性能，但是抗拉性能很差。根据结构受力配置了钢筋后，钢筋混凝土结构就能承受拉、压、弯、剪等各种应力，建造各种受力复杂的结构。

预应力钢筋混凝土结构 由配置受力的预应力钢筋通过对预应力钢筋张拉或其他方法建立预加应力的混凝土制成的结构。

钢筋混凝土结构虽然克服了素混凝土结构受拉性能差的弱点，但是，钢筋混凝土结构构件在弯矩或拉力作用下，受拉区的混凝土很快开裂，拉应力将转由钢筋承受，随着钢筋拉应力的增加，混凝土裂缝也将加大，这将影响到结构的正常使用和结构的耐久性。因此出现了预应力钢筋混凝土结构，所谓预应力就是在结构或构件在承受正常的外部荷载前，先在结构或构件内部通过张拉预应力钢筋使混凝土受压，混凝土的压应力和钢筋的拉应力是平衡的。在结构或构件承受外部荷载后，混凝土中的预压应力将被外荷载引起的拉应力部分或全部抵消，因而避免开裂或减小了裂缝的宽度，改善了结构的使用功能。

下面对几种常用的结构方案及其特点，做简单介绍：

a) 砖混结构 通常是指屋盖、楼盖等水平结构构件采用钢筋混凝土或木材，而墙、柱等竖向构件采用砌体材料，这种房屋通常称为混合结构房屋。

b) 单层刚架、单层排架

结构是由各种构件按照一定的规则连结而成的。钢筋混凝土承重结构中的梁和柱有不同的连结方式。

在工业建筑中，组成钢筋混凝土承重结构的梁和柱可以做成刚接（所谓刚接是指梁柱在节点处为刚性连接，在外荷载作用下梁柱间的夹角保持不变。这靠梁、柱内的钢筋相互穿插，并用混凝土浇制成整体来实现），梁柱刚接的单层结构称为单层刚架结构。但当建筑物要求有很大的跨度和高度时，采用实腹的钢筋混凝土大梁因自重太大而不再合理，常用钢筋混凝土屋架或钢屋架作为屋面的承重结构。由于屋架与柱难于实现刚接，只能采用铰接（屋架支座处只能传递垂直和水平力，不能传递弯矩），此种梁式构件与柱铰接的单层结构称为单层排架结构。

单层刚架在适应大跨、吊车荷载方面较单层排架差，施工也不太方便，一般用于较大水平荷载和较大跨度的公共建筑上。

c) 框架结构

钢筋混凝土梁柱刚性连接而形成一定的功能空间，并能抵抗各种外力的整体结构称框架结构。其柱网尺寸及层高易于适应建筑功能的要求、使用空间灵活、抗震性能好、在多层工业厂房和民用建筑中广泛采用。

发电厂主厂房的除氧煤仓间双框架（所谓双框架是指由三列柱形成的双跨框架）或混合煤仓单框架（即由两列柱形成的单跨框架）均为框架结构，而汽机房屋架与 A 排柱及 B 列柱通常为铰接，主厂房的横向结构成为框—排架结构。各纵向柱列就形成了多跨的框架结构。

d) 剪力墙结构

钢筋混凝土纵横向的墙体之间及它们与楼盖之间刚接，能承受很大的竖向、水平荷载的结构称剪力墙结构，其墙体同时起承重、围护及隔断作用。采用全现浇方案时，结构整体性好、刚度大、承载能力强，特别适用于无大空间要求的高层建筑。

e) 框架—剪力墙结构

这是一种集框架结构和剪力墙结构优点于一身的结构体系，既保持了框架结构空间灵活、使用方便和剪力墙结构抗侧刚度大、承载能力强的优点，又缓解了框架结构和剪力墙结构各自的缺点，因此在高层公共建筑中广泛应用。在须抗震设防的主厂房结构中也得到了广泛应用。通常在地震设防烈度为 8 度及以上时，在钢筋混凝土结构主厂房的纵向框架结构的适当柱间，设置与两侧框架柱相连的剪力墙，便形成了框架—剪力墙结构。

3.2 主厂房结构选型

3.2.1 主厂房结构选型的发展

建国以来，随着我国电力工业的发展和单机容量的增大、建筑材料工业和土建施工技术的进步，火力发电厂主厂房结构型式发生了巨大的变化。

3.2.1.1 钢筋混凝土结构

建国初期，火力发电厂单机容量仅数 MW，受由前苏联援建的火力发电厂设计模式的影响，当时主厂房都是现浇钢筋混凝土结构，到了上世纪 50 年代末，随着钢筋坡口焊的试验成功，火力发电厂主厂房开始采用装配式钢筋混凝土框架结构，并在相当长的一段时间内得到了广泛的应用，在技术上也得到了不断完善和改进。与此同时，一些发电厂采用了装配式钢筋混凝土框架结构，取得了良好的经济效益，推动了预应力技术在电力土建工程中的应用。上世纪 80 年代开始，由于现代土建技术的发展，如滑膜技术、定型钢模版（大模板）、压型钢板底模、泵送混凝土、混凝土搅拌车等的施工机具的应用，全现浇的钢筋混凝土框架结构

又得到了广泛的应用。

3.2.1.2 钢—混凝土组合结构

钢—混凝土组合结构是集钢筋混凝土和钢结构两者优点于一身的新结构型式。如外包钢结构、钢管混凝土结构、组合梁结构和劲性混凝土结构等。

外包钢结构在上世纪 70 年代开始在火力发电厂主厂房结构中应用。外包钢结构是在框架梁、柱截面的四角包以角钢，角钢之间用横向钢筋焊接，形成空间骨架。梁、柱断面内扣除四角的角钢面积以外，还应按计算配置足够的受力钢筋。梁、柱骨架安装就位并连接完成后，再浇灌混凝土，形成整浇的钢筋混凝土结构。由于外包钢结构的钢骨架有一定的刚度，能够承受施工期间的荷载，方便了施工。与普通的钢筋混凝土框架结构相比，外包钢混凝土框架结构改善了结构性能，增加了结构的延性，并简化了设计（省去了预埋件），加快了设计进度。

组合梁结构是在采用大型 H 型钢作次梁的钢筋混凝土楼板结构中发展起来的。通过在钢筋混凝土板与钢梁上翼缘顶面之间设置一定数量的抗剪键（形如无螺纹的螺栓），使钢筋混凝土板和钢梁形成共同工作的组合梁结构。由于充分发挥了位于受压区的钢筋混凝土板受压性能良好的特点，从而达到提高钢梁承载能力和刚度的目的。现在组合梁结构已较普遍的在主厂房的汽机、锅炉平台和集控楼的楼层结构中采用，在全钢结构主厂房的楼层结构中也普遍采用。

钢管混凝土系指在钢管之内填充混凝土而形成的组合材料。钢管有圆形和方形之分。圆钢管混凝土和方钢管混凝土的力学性能有重大差别。圆钢管因能有效地约束钢管内的混凝土，因而其混凝土的抗压强度和抗变形能力都能显著提高。方钢管则因不能对核心混凝土提供有效的紧箍力，其强度和抗变形能力都远低于圆钢管混凝土。因此，通常均采用圆钢管混凝土作为结构材料。

钢管混凝土除具有一般套箍混凝土的强度高、重量轻、塑性好、耐疲劳、耐冲击等优点外，还具有方便施工、缩短工期、减少施工用地等优点。用圆钢管混凝土代替钢筋混凝土和钢结构作为结构的受压或小偏心受压构件，可比钢结构显著的节省钢材，比钢筋混凝土结构节省钢材和减轻结构自重，并使传统杆系结构的性能大为改善，尤其适用于高层、大跨、重载和抗震抗爆的建筑结构中。圆钢管混凝土结构已在个别电厂的框架结构中得到了应用。

在大机组主厂房中，柱距达到 9m 或 12m，为了减轻结构自重和方便施工，不

少工程将纵向框架梁和楼层纵梁采用钢梁，仅横向框架的柱和框架梁采用钢筋混凝土结构，这也是一种钢—混凝土组合结构形式。

3.2.1.3 钢结构

上世纪末，在采用国外引进设备的火力发电厂工程项目中，绝大多数主厂房采用全钢结构型式。其后，不少国内设计的大机组的火力发电厂主厂房也采用全钢结构。今后随着建筑钢材产量和品种的增加，对于厂址处于高烈度地震区及软土地区的大机组主厂房，采用全钢结构方案在技术上是必要的，也是经济合理的。

3.2.2 主厂房结构选型原则

主厂房选型应考虑下列原则：

- a) 认真贯彻国家的建设方针，尤其是电力建设有关的技术政策。
- b) 结构设计应与其他专业密切配合，满足电力生产工艺的需要，创造良好的电厂运行条件。
- c) 结构选型必须充分考虑结构的坚固性、耐久性；有利于结构抗震。
- d) 节约建筑材料，降低工程造价。
- e) 方便施工，制作和安装用工量少，缩短施工工期。
- f) 节约用地，尽量减少施工场地及临时建筑设施所需场地面积。

我国电力工业经过半个多世纪的发展，主厂房结构体系已呈现了多种型式共存的局面。但在今后工程结构选型中，控制造价依然是最重要的因素。与全钢结构相比，钢筋混凝土结构造价相对较低，新建电厂的主厂房预计仍将以钢筋混凝土结构为主。《火力发电厂设计技术规范》(DL5000—2000)及《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—1993)，均明确规定：“主厂房框（排）架应采用钢筋混凝土结构，有条件时也可采用组合结构，其中汽轮机及锅炉运转层平台宜采用钢梁—混凝土组合结构。300MW 及以上机组的主厂房的主要承重结构必要时可采用钢结构。”（待与新版规范核实）近年随着控制造价力度的加大，对主厂房结构体系选型的限制更为严格，明确规定 300MW 机组主厂房框（排）架结构采用钢筋混凝土。对于国产 600MW 机组主厂房，当其位于 8 度地震区且为 II 类及 II 类以上场地时，可考虑采用钢结构，其他情况原则上采用钢筋混凝土结构。

3.2.3 主厂房结构布置

3.2.3.1 地震区主厂房框架型式的有关规定

火力发电厂的主厂房的建筑和结构布置首先应服从于工艺流程的需要。汽机房、除氧间、煤仓间的跨度、纵向柱距、各层层高等主要尺寸的确定，均取决于工艺布置的要求，没有固定的模式。从已建电厂的结构体系看，大多数电厂的钢筋混凝土主厂房结构采用了双框架结构方案。上世纪 90 年代后，为降低电厂造价，各电力设计院对主厂房的工艺系统的布置进行了不断的优化，出现了侧煤仓方案，主厂房中间框架成了单跨框架；循环流化床锅炉的电厂也采用了单跨框架的结构体系。

钢筋混凝土单跨框架结构，由于其抗侧刚度小，耗能能力弱，结构的冗余度少，一旦柱子出现塑性铰，很可能导致结构倒塌。在台湾 1999 年的地震（7.3 级）台中客运站的 16 层单跨框架结构彻底倒塌。5.12 汶川大地震后，《建筑抗震设计规范》（GB50011-2001 2008 年版）对地震区民用多、高层钢筋混凝土单跨框架结构的应用作了严格的规定：“……高层的框架结构不应采用单跨框架结构，多层框架结构不宜采用单跨框架结构。” 在 2010 年 12 月 1 日起实施的《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）中对单跨框架结构的应用范围进一步作了具体规定：“6.1.5 ……甲、乙类建筑以及高度大于 24m 的丙类建筑，不应采用单跨框架结构；高度不大于 24m 的丙类建筑不宜采用单跨框架结构。” 在工业建筑及电力建筑中，由于层高受工艺要求的制约变化范围很大，难于用层数来限制框架结构的应用范围，而用建筑高度来界定单跨框架的应用条件能充分反映地震区结构的受力特点。因此，《建筑抗震设计规范》关于不应（或不宜）采用单跨钢筋混凝土框架结构的规定，对于提高框架结构的抗震性能的概念是正确的。《建筑抗震设计规范》上述规定发布后，《火力发电厂土建结构设计技术规定》的报批稿中，补充了“发电厂建（构）筑物不宜采用单框架结构，当采用单框架结构时，应采取提高安全度的可靠措施。” 因此，电厂主厂房采用钢筋混凝土结构时宜采用由双框架结构形成的框—排架结构体系。

3.2.3.2 伸缩缝间距

a) 体量较大、布置不规则、荷重不均匀、地基不均匀的建筑物，通常需用结构缝将结构划分成几个小的部分。现将各种缝的功能和设置要求介绍如下：

1) 温度伸缩缝

混凝土结构的温度裂缝有两种：混凝土由于水灰比过大，水泥用量过多，或养护不当，或浇灌大体积混凝土时产生大量的水化热，致使混凝土硬化后会产生收缩裂缝，这是混凝土结构的早期裂缝。当混凝土硬化后，结构在使用阶段由于外界温度变化，导致混凝土结构膨胀或收缩，而当变形受到结构约束时，就会在混凝土构件中产生裂缝，这是混凝土结构在使用阶段的温度裂缝。对于后一种裂缝，结构在使用期内经受的温度变化是混凝土结构开裂的根本原因。为了控制使用阶段的温度裂缝，采取限制建筑物长度的办法，来防止由于温度引起的内应力积聚过大，以达到控制裂缝的目的。

允许结构伸缩而不致引起较大约束应力或裂缝的混凝土结构的长度，即为设计中的伸缩缝间距。

伸缩缝两侧的结构应设置独立的承重结构，形成双柱双梁和双墙，这给建筑在使用上和立面处理等方面带来不便。

2) 沉降缝

当同一建筑物中的各部分由于荷载差异过大、地基不均匀、压缩性差异过大、建筑结构或基础类型不同时，相邻基础会产生显著沉降差异，有可能使结构有关部位产生难于承受的内力和变形。为避免由此而造成结构的过大的裂缝，可在应力容易集中的部位设置沉降缝，将结构分开成各自独立的结构单元。

沉降缝不但应贯通上部结构，而且应贯通基础。

设置沉降缝后，虽然避免了建筑物因差异沉降可能造成的结构过大裂缝问题，但上部结构也必须在缝的两侧设置独立的抗侧力结构，形成双柱双梁和双墙，同样会给建筑在使用上和立面处理等方面带来不便。

3) 防震缝

当抗震设计的建筑物属于不规则结构，为了避免在地震作用下结构产生过大的扭转、应力集中、局部严重破坏等的震害，可将结构的动力特性不同的部分以防震缝分开，形成独立的结构单元。

为防止位于防震缝两侧的建筑物在地震时相碰，防震缝必须留有足够的宽度。防震缝的净宽度原则上应大于两侧结构允许的地震作用下水平位移之和。

防震缝应按房屋全高设置，在平面上不宜采用折线防震缝，基础和地下室可不设置防震缝。当结构设置了伸缩缝或沉降缝时，对于抗震设计的结构应满足防

震缝的要求。

b) 为了避免产生过大的温度应力致使钢筋混凝土结构开裂和变形, 有关规范均对温度缝的长度作了规定。《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002) 规定, 室内条件下的现浇钢筋混凝土框架的伸缩缝最大间距为 55 米, 装配式框架为 75 米。主厂房布置时希望以机组为单元设伸缩缝, 随着大机组采用纵向布置, 机组单元的长度普遍超过 75m, 这一伸缩缝长度的规定较难满足。根据工程经验, 《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—200X), 对温度伸缩缝作了适当放宽, 现浇框架不超过 75m, 装配式框架不超过 100m。对于 $2\times 300\text{MW}$ 主厂房, 纵向长度约 160m, 根据规范设置伸缩缝是必须的。因此在结构布置时应尽量满足有关规范对温度伸缩缝长度的规定, 如不能满足时, 结构设计可参考类似工程, 进行必要的计算, 采取相应的构造措施。

c) 如主厂房采用钢结构, 纵向温度伸缩缝的容许长度要大得多。原苏联火力发电厂主厂房钢框架纵向温度区段长度取 150~200m 或更长。日本及其它某些国家规范中未考虑温度伸缩缝, 只要求考虑温度荷载产生的应力和变形, 在构造上采取相应的措施, 我国现行《钢结构设计规范》(GB 50017-2003) 规定单层钢结构房屋温度区段长度不超过 220m, 一般情况可不考虑温度应力和温度变形的影响。对于多层和高层房屋未明确规定, 可参照钢结构规范执行。对于 $2\times 600\text{MW}$ 机组, 主厂房纵向长度虽不超过规定, 但通常按机组设置伸缩缝, 这对减小结构的温度应力肯定是有利的。

d) 《火力发电土建结构设计技术规定》还规定, 伸缩缝处应设置双柱、双屋架, 梁板和围护板宜采用悬挑方式。对于抗震设计的建筑, 伸缩缝处双柱间距除满足伸缩缝宽度要求外, 还应满足防震缝宽度要求, 根据需要设置插入距。

3.2.4 主厂房结构体系

3.2.4.1 钢筋混凝土主厂房结构

几十年来钢筋混凝土结构主厂房布置格局, 已形成了较为固定的模式。对于各种单机容量的电厂, 主厂房横向通常是以汽机房排架、除氧间和煤仓间双框架组成的框—排架结构体系; 锅炉钢架构自成独立体系; 布置在两台炉之间的集控楼, 其结构布置也自成独立的框架结构。主厂房纵向各柱列当为现浇钢筋混凝土结构时, 可根据有无抗震设防要求及设防烈度的大小, 采用钢筋混凝土纯框架

或钢筋混凝土框架—抗震墙（抗震支撑）体系。

当主厂房采用外包钢混凝土结构时，由于外包钢混凝土实际上是部分外部配筋的钢筋混凝土结构，所以有着和钢筋混凝土结构主厂房相同的结构体系。

3.2.4.2 全钢主厂房结构

当主厂房采用钢结构时，使结构体系的选择有了更多的灵活性。对于传统的三列式或四列式布置，横向可采用梁柱刚接的纯框架结构（汽机房屋面钢梁或屋面桁架与柱刚接，与除氧煤仓间框架形成不等跨的复式框架，或汽机房屋面钢梁或屋面桁架与柱铰接，形成框—排架结构体系）。但是，钢结构的纯框架或框—排架结构相对来说侧向刚度较小。因此，通常在横向框架平面内，在工艺设备布置允许的部位，设置一定数量的垂直支撑，形成框架—支撑结构体系，通过水平刚度很大的各层楼板，使侧向刚度不一的各榀横向框架连结成具有足够侧向刚度的空间结构。在有条件设置横向垂直支撑的情况下，梁柱节点除刚接外，为了简化连接构造也可采用铰接连接。柱脚与基础的连接亦可有铰接或刚接的选择。由于厂房柱通常采用工字型断面，工字型断面柱的强轴与厂房纵向平行（即工字型柱的腹板在横向框架平面内），柱子在厂房纵向的刚度要小的多，因此纵向一般均为梁柱铰接带柱间支撑的结构，沿厂房纵向柱脚和基础的连接通常也采用铰接连接。

采用钢结构的主厂房布置出现了与传统布置不同的新形式，如主厂房的一部分由汽机房、除氧间和加热器间组成框—排架结构或不等跨的两跨复式框架结构；作为主厂房另一部分的煤仓间则可能布置于锅炉侧面或尾部，与锅炉架构一起形成另一个独立的结构单元。也有的工程将主厂房连成一体，利用刚度极大的锅炉架构来承受汽机房、除氧—煤仓间及锅炉本体的水平荷载，减少了主厂房部分的支撑，方便了工艺设备的布置，减少了主厂房结构的受力，节省了钢材用量。当采用非传统布置方式时，各个结构单元依然有梁柱铰接或刚接及带不带支撑的选择。

与钢筋混凝土结构相比，全钢结构主厂房具有以下优点：

a) 对于高烈度地震区的电厂，采用钢结构可减轻结构自重，上部结构自重约为钢筋混凝土厂房的 $1/2.5$ ，因而可减少结构的地震作用。并且钢结构具有较好的延性和韧性，抗震性能好。

b) 安装钢结构不需大型机具，可降低施工费用，同时施工受气候影响小，可缩短工期。

c) 由于钢结构自重轻，减少了作用在基础上的荷载，使厂房基础的钢筋混凝土用量可减少 25~30%。对于地基不良的厂址，也可能因此而省去昂贵的地基处理费用。

d) 采用钢结构可使结构体系的选择更加灵活，更易适应非常规的布置，使主厂房布置更紧凑，节省用地，节省钢材。

3.2.5 主厂房结构抗震体系

对于钢筋混凝土结构的主厂房，横向结构受工艺设备布置的限制，无法设置抗震墙或抗震支撑，通常均采用框—排架结构抗震。纵向结构可根据设防烈度的不同，采用不同的抗震结构体系，可按下表采用：

主厂房纵向抗震结构类别

抗震设防烈度	抗震结构类别
6	钢筋混凝土框架结构
7、8	钢筋混凝土框架或框架—抗震墙（抗震支撑）
9	钢筋混凝土框架—抗震墙（抗震支撑）

对于钢结构主厂房，横向结构应采用具有多道抗震防线的结构体系，如刚接框架带支撑或铰接框架带支撑的结构。

3.2.6 楼板结构

合理选择火力发电厂主厂房楼板结构型式，对减轻结构自重、降低工程造价，改善结构受力及抗震性能具有重要意义。据以往已建工程统计，楼板结构的混凝土量（或自重）约占上部结构的 25%左右，而楼面结构的自重又直接影响梁、柱和基础的受力。因此，选择合适的楼面结构是十分重要的。

钢筋混凝土楼板结构的发展和钢筋混凝土框排架结构一样，同样经过了现浇、预制装配、现代现浇三个阶段。但是，现代现浇楼面采用了新的次梁结构，解决了全现浇楼面的支模问题，所以得到了广泛的应用。已建成的 300MW 以上机组火力发电厂主厂房楼面结构，采用的结构型式有：

1) 槽形板

槽型板有预应力和非预应力之分，因柱距一般 $\geq 9\text{m}$ ，应采用预应力结构，以

提高板的刚度和抗裂性。槽形板可利用板缝支吊管道,以减少预埋件,方便施工。

2) 双 T 板和单 T 板

此种预制板应用比较灵活,板肋间距固定,由两边挑出宽度来调整板宽,布置灵活,制作方便。当板跨大时应采用预应力结构。此种板工艺管道的支吊需较多的预埋件。

无论预应力槽板或预应力双 T 板均有不足之处:板自重较大,占用施工场地大;板的类型多、安装不便;反拱大,9m 跨的板达 4cm,12m 时达 7cm,加厚了细石混凝土找平层,增加了自重,因此在新建的电厂中已很少采用。

3) 钢梁+钢筋混凝土板(活动钢模板支模)

此种结构自重轻、整体性好,特别适用于地震区。由于楼板为现浇,开孔埋件、管道支吊等较方便。尽管耗钢量较多,需要的钢模数量大,并需在高空装拆操作平台,但还是得到了广泛应用。

此种楼板中的钢梁可以考虑和楼板共同工作(即按组合梁计算),也可不考虑共同工作。当考虑组合梁作用时,可节省钢材 20~40%,且组合梁的刚度比钢梁大,挠度可减小 30%以上。

4) 钢梁+压型钢板底模+现浇钢筋混凝土板

此种楼板型式在国外引进工程中得到了广泛的应用,一般不考虑压型钢板参与楼板的工作,仅作为底模使用,由于压型钢板不再拆除,因此省去了高空拆模的工作,但耗钢量大。

综上所述,各种楼板结构中,预应力槽板和预应力双 T 板结构,虽耗钢量较少,但需要设置预应力结构的张拉及养护设施,需要较大的构件制作和堆放场地,楼板结构自重较大,抗震性能也较差。钢梁+现浇钢筋混凝土楼板方案,虽然造价较预应力预制构件略高,但施工方便,占用场地少,施工速度快,适应各种工艺荷重的能力强,结构自重轻,抗震性能好。考虑上述各因素,在大机组发电工程中,钢梁+现浇钢筋混凝土楼板方案得到了广泛应用。

3.2.7 屋面结构

汽机房屋盖跨度的大小不仅与机组大小有关,更主要的与汽机的布置方式有关。例如 200MW 机组横向布置时出现了 45m 的大跨度。随着机组单机容量的增大,汽机房屋盖的跨度、柱距明显增大。当单机容量为 300MW 或 600MW 时汽轮发电机

组横向布置已不再合理，但即使纵向布置，汽机房跨度也要达到 27-33m, 柱距达 9-12m。

汽机房屋盖承重结构在早期的小型电厂中较多的采用了钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土屋架。在唐山大地震后，新建电厂的汽机房屋盖普遍采用钢屋架。但是，由于汽机房跨度和柱距的加大，通常采用的大型屋面板钢屋架的无檩体系的重屋盖方案显得很不合理。大机组汽机房屋盖出现了下列趋势：

a) 由有檩体系的轻屋盖，代替无檩的重屋盖体系

当采用大型屋面板时，屋面板的两端直接搁置于钢屋架上，在屋面板上再作防水及保温。屋盖承重结构除了设置必要的支撑体系外，两榀屋架之间不设檩条，此种屋盖结构称为无檩体系。但如果屋面构件的支承跨度较小，需要支承于檩条上，再通过檩条将屋面荷载传至屋架。此时屋盖承重结构除了设置必要的支撑体系外，两榀屋架之间还需要设置檩条，此种屋盖结构称为有檩体系。有檩体系的屋面做法主要有：一种为钢檩条上铺压型钢板作受力层，其上现浇保温层，再作找平层及防水层；以压型钢板为底模，其上现浇钢筋混凝土屋面板，再做保温防水等；另一种采用自防水屋面构件，在钢檩条上直接铺设压型钢板（无保温的单板或保温的负荷压型钢板）。

如采用无檩的重屋盖体系，由于柱距的增大，使屋架的受荷宽度相应增加，而屋面板因板跨增大，屋面板的折算厚度相应也随之增加。因此，屋盖跨度和柱距的增大使屋架受力增加得更快。大跨度、大柱距屋盖采用轻型屋盖是技术发展的必然趋势。由国外设计的引进机组的大型电厂的汽机房，普遍采用有檩体系，屋面构件采用带保温层的双层压型钢板，板重仅 20kg/m^2 。屋面结构自重的减轻，使以重力作用为主要荷载的屋盖结构受力大大减小，传至下部承重结构及基础的荷载也相应减小，这对于地震区和软弱地基上的电厂，有着明显的经济效益。

采用压型钢板作为屋面构件的汽机房屋面，由于压型钢板在运输、安装过程中不可避免的会产生变形和涂层损伤，加以节点处理质量不易保证，直接影响到屋面的防水性能和耐久性，此种屋面经过实际使用的检验，已逐渐暴露出上述缺点。因此，新建电厂倾向于采用钢檩条上铺设压型钢板作底模、其上现浇钢筋混凝土板，并作整体防水层的屋面结构方案，不但有足够的强度和刚度，而且提高了防水性能和耐久性，当然，屋面结构的自重要比轻型结构要重。

b) 由于采用带保温层的双层压型钢板作屋面构件, 屋盖结构的荷载大大减少, 因此在全钢结构主厂房中, 亦可采用实腹屋面梁结构, 并将梁两端分别与汽机房外侧柱及除氧间框架柱刚接, 不但加大了厂房的横向刚度, 而且采用实腹屋面梁后其断面高度比桁架大大减小, 从而减低了建筑高度, 节省了土建投资。

c) 网架结构在汽机房屋盖结构中得到了应用

对于由平面钢桁架承重的屋盖结构体系, 在柱距为 6m 时支撑系统所消耗的钢材, 在屋盖总用钢量中所占比重较小, 但是当柱距增大到 9m-12m 时, 除桁架本身的单位面积用钢量有所增加外, 受细长比控制的支撑系统所消耗的钢材成倍的增加, 使屋盖的总用钢量大大增加。因此, 对于大柱距的屋盖承重结构, 采用平面桁架结构体系在技术上是不合理的, 在采用轻型材料做屋面构件时更是如此。

随着电算技术的发展, 网架分析计算软件已很完善, 为网架结构的推广应用创造了条件。因此在上世纪末建设的一些电厂中, 汽机房屋盖采用了网架结构。网架结构和平面桁架相比, 具有一定的优点, 节省钢材较明显。但是由于网架厂家技术水平良莠不齐, 网架垮塌的个案使电厂建设单位对汽机房屋盖采用网架结构失去了兴趣。

3.2.8 围护结构

按照国家的技术经济政策, 不可再把粘土砖用作围护墙的材料, 大机组主厂房的大柱距、大层高对围护结构也提出了新的要求。在已建成的大型电厂中, 出现了多种墙板型式:

a) 预应力及非预应力钢筋混凝土多孔板、槽型板或双 T 板, 在早期建设的非采暖地区的厂房中应用较为普遍。

b) 预制轻混凝土大型保温墙板, 在华北、东北地区早期建成的电厂有较多的应用。

c) 金属压型钢板是上世纪八十年代随着全钢结构主厂房的引进而发展起来的新型围护结构, 它具有重量轻、造型美、安装快捷, 具有现代气息等优点, 但免维护的耐久性也有待时间的考验。它已是新建电厂围护结构的首选。

3.2.9 其它结构

a) 煤斗

大型电厂的煤斗容积越来越大，传统的钢筋混凝土煤斗的自重随之大增，并且又在厂房的高位布置，致使主厂房质量大、重心高，于抗震不利。大机组厂房采用钢煤斗已成大势所趋。据上世纪八十年代末对 300MW 机组电厂的调查，采用钢煤斗的工程占被调查工程的 80%，600MW 机组电厂均采用钢煤斗。进入上世纪九十年代，大型燃煤电厂基本都采用圆形钢煤斗。

b) 吊车梁：

大型电厂汽机房吊车梁有钢梁、预应力及非预应力钢筋混凝土吊车梁可供选择。当吊车梁跨度小于 10m 时钢筋混凝土吊车梁用的较多，当跨度为 12m 时，多在钢梁或预应力钢筋混凝土吊车梁中选择。随着国家经济的发展和钢产量的增加，大型火力发电厂中，采用钢结构吊车梁已成为普遍的选择。

c) 汽轮发电机基础：

汽轮发电机组是精密的旋转式机器，人们常把它比作火力发电厂的“心脏”，由此可见汽轮发电机基础的重要。

汽轮发电机基础系复杂的空间框架结构，属动荷载作用下的空间多自由度体系。框架式钢筋混凝土汽轮发电机基础通常可分为刚性基础、柔性基础，刚性基础和柔性基础可统称为常规基础。常规基础的模式为底板+柱+台板，汽轮发电机安装在台板上。在此种常规基础中，柱与台板刚接，在汽轮发电机基础的纵向和横向均形成框架结构。当基础的台板和柱之间安装弹簧隔振器——简称弹簧基础。弹簧基础的模式为底板+柱+弹簧+台板。在弹簧基础中，柱生根于底板上，其上端通过弹簧隔振器来支承台板而不再伸入台板。

通常来说，常规汽机基础的刚柔只是一个相对的概念，如果用汽机基础本身的特性来衡量的话，自振频率显然是最恰当的。美国土木工程学会的《大型汽轮发电机基座设计导则》中指出：当机器频率大于 3 倍汽机基础垂直自振频率时，基础属于低频范围，可以理解为柔性基础；当机器频率小于 0.7 倍汽机基础垂直自振频率时，基座属于高频范围，可以理解为刚性基础。刚性基础只是台板以下支撑结构刚度相对于柔性基础较大，台板本身刚度和柔性基础相差较小。具体来说，刚性基础的下部支承结构的柱截面较大；柔性基础可以看作是减小刚性基础下部结构尺寸而得到的，柱截面就相对小很多；弹簧基础下部结构则是弹簧隔振器和下部柱子并联而成，显然比柔性基础下部结构更“柔”。由此可见，由刚性

基础到弹簧基础，刚性基础下部支承刚度最大，；柔性基础次之，弹簧基础最小。

随着单机容量的增大，汽轮发电机基础的尺寸亦相应增大，如 600MW 机组的基础，是一个轮廓尺寸约为长 50m、宽 15m、高 18m 的庞大的空间框架结构，钢筋混凝土工程量几近 6000M^3 。因此，汽轮发电机基础的设计水平的高低，不仅影响到大量工程材料的消耗，而且基础动力特性的优劣还直接影响到机组的长期安全运行。目前国际上汽轮发电机基础的设计现状可谓设计方法各异，基础型式悬殊。呈现不同的学术思路和设计风格。

用以建造汽轮发电机基础的材料，除钢筋混凝土以外，国外有不少发电机组采用了钢基础，弹簧隔振基础在欧洲一些国家有较多的应用。

由于基座设计涉及复杂的结构动力学问题，至今还有不少课题有待研究，因此基座设计技术发展的前景是非常广阔的。

4 地基基础

4.1 术语

4.1.1 地基 为支承建筑物基础的土体或岩体，包括天然地基和人工地基。

天然地基 未经加固处理、直接支承基础的地基。

人工地基 当地基土层较软弱，建筑物的荷重又较大，地基承载力和变形不能满足设计要求时，需对地基进行人工加固处理，这种经进行人工加固处理后形成的地基称为人工地基。

4.1.2 基础 将结构所承受的各种作用传递到地基上的结构组成部分。

4.1.3 地基承载力特征值 基础设计中按地基承载能力极限状态计算采用的地基承载力的计算指标。地基承载力特征值通常采用由载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内规定的变形所对应的压力值，其最大值为比例界限值。

4.2 一般规定

4.2.1 地基基础设计，应根据岩土工程资料，结合火力发电厂各类建（构）筑物的使用要求，充分吸取地区建筑经验，综合考虑结构类型、材料情况及施工条件等因素，采用安全、经济、合理的地基基础型式。

4.2.2 《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）对地基基础的设计等级作了规定：“3.0.1 根据地基复杂程度、建筑物规模和功能特征以及由于地基问题可能造成建筑物破坏或影响正常使用的程度，将地基基础设计分为三个设计等

级，设计时应根据具体情况，按表 3.0.1 选用。”

表 3.0.1 地基基础设计等级

设计等级	建筑和地基类型
甲级	重要的工业与民用建筑物、 30 层以上的高层建筑
乙级	除甲级、丙级以外的工业与民用建筑物
丙级	场地和地基条件简单、荷载分布均匀的七层及七层以下民用建筑及一般工业建筑物；次要的轻型建筑物

4.2.3 电力建设工程中的各类建筑物的地基的安全等级，电力行业标准《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—200X)是这样规定的(待规定正式发布后核对)：

“7.1.2 根据地基复杂程度、建筑物规模、功能特征以及由于地基问题可能造成建筑物破坏或影响正常使用的程度，将地基基础设计分为三个设计等级，设计时应根据具体情况，按表 7.1.2 选用。”

表 7.1.2 地基基础设计等级

安全等级	建筑物名称
甲级	主厂房（包括汽轮发电机基础、锅炉架构基础）、主（集）控制楼或网络控制楼、通信楼、220KV 及以上的屋内配电装置楼、高度大于 200m 的烟囱、直接空冷器支架、跨度大于 30m 的厂房建筑、场地及地质条件复杂的建筑物。
乙级	除甲、丙级以外的其他生产建筑、辅助及附属建筑物
丙级	机炉检修间、材料库、机车库、汽车库、材料库棚、推煤机库、警卫传达室、厂区围墙、自行车棚及临时建筑

4.2.4 地基基础设计，应根据相应设计阶段的工程地质勘测资料(如需采用桩基或地基处理时，尚需取得试桩或其他原体试验的成果资料)进行设计.对于复杂的地质条件（如山区地基、特殊地基土），应在施工阶段进行必要的现场地质检验。

项目经理应根据工程进展情况及时安排各阶段的勘察工作，为地基基础设计提供可靠的设计资料。

4.3 地基计算

4.3.1 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)对建筑物地基基础设计以强制性条文规定如下:

“3.0.2 根据建筑物地基基础设计等级及长期荷载作用下地基变形对上部结构的影响程度,地基基础设计应符合下列规定:

- 1 所有建筑物的地基计算应满足承载力计算的有关规定;
- 2 设计等级为甲级、乙级的建筑物,均应按地基变形设计;
- 3 ……”

4.3.2 《火力发电厂土建结构设计规定》(DL 5022—200X)关于地基计算有如下规定:

“7.2.1 根据建筑物地基基础设计等级,地基计算应按下列要求进行:

- 1 所有建筑物的地基计算均应满足地基承载力计算的有关规定。
- 2 设计等级为甲级、乙级的建筑物除按地基承载力计算外,均应按地基变形设计。”

4.3.3 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)对建筑物地基的变形规定如下:

“5.3.1 建筑物的地基变形计算值,不应大于地基变形允许值。”

“5.3.4 建筑物的地基变形允许值,按表 5.3.4 规定采用。对表中未包括的建筑物,其地基变形允许值应根据上部结构对地基变形的适应能力和使用要求确定。”(表略)

4.3.4 《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—200X)对火力发电厂主厂房及主要设备基础的地基变形允许值规定如下:

“7.1.3 主厂房地基的容许变形值,应符合表 7.1.3 的规定,其他建筑物的变形允许值应符合《建筑地基基础设计规范》GB50007 或地区规范的有关规定。

表 7.1.3 主厂房地基的容许变形值

主厂房结构	容许沉降差或倾斜		容许沉降量 (mm)	
	纵向	横向	天然地基	桩基
汽机房外侧柱	0.003L	-----	200	150
汽机房外侧柱与框架	-----	0.003L	-----	-----
主厂房框架	0.003L	0.002L	200	150

主厂房结构	容许沉降差或倾斜		容许沉降量（mm）	
	纵向	横向	天然地基	桩基
汽轮发电机基础	0.0015L		200	150
锅炉基础	0.002L		200	150
直接空冷器支架	0.001L		200	150
汽轮发电机基础与框架	0.005L		-----	-----
锅炉基础与框架	0.005L			
注：a)表中L为相邻柱基的中心距离或汽机基础的边长； b)表中桩基指预制混凝土方桩、预应力离心管（PHC）桩、钢筋混凝土灌注桩或钢管桩基础； c)桩端持力层应为中、低压缩性土层；				

4.4 基础设计

建(构)筑物基础的型式取决于上部结构的型式、作用于基础的荷载及地基承载力或单桩承载力等因素。现将常用的各种基础型式及其应用条件介绍于下：

a) 单独基础，也叫独立基础，是柱基础中最常用和最经济的一种。根据所采用的材料的不同，单独基础可分为刚性基础和钢筋混凝土扩展基础两种。

刚性基础通常用混凝土、毛石混凝土、砖砌体、毛石砌体等材料建造。通过刚性基础将柱脚传下的荷载分散到地基上。为了节省材料，刚性基础做成向下不断放大的台阶形。这些刚性基础的材料，虽都有一定的抗压强度，但抗拉、抗剪强度都不高，设计时必须保证发生在基础内的拉应力、剪应力不超过材料容许的抗拉和抗剪强度。这一保证是通过构造上的限制来实现的，即每个台阶的挑出宽度与其高度之比不超过某一数值。在这样的限制下，基础的相对高度都比较大，几乎不会发生挠曲变形，所以习惯上称为刚性基础。此种基础仅宜用于柱基础荷载较小的建筑，

钢筋混凝土扩展基础 当基础荷载较大或地基承载力较低时就要加大基础的底面积，如再采用刚性基础，必然要加大基础高度，造成用料多、自重大及埋深大等问题。在此情况下通常用钢筋混凝土来制作基础，只需不大的基础高度便可以获得较大的基础底面积、减少了基础埋深、方便了施工。柱子为偏心受压时基础底面形状常为矩形。

b) 条形基础 区别于独立基础，当基础两边的尺寸相差很大时，即为条形基础。条形基础分为柱下条形基础和墙下条形基础两种。当用于砖混结构的

承重墙下基础时，与单独基础一样，条形基础也可分为刚性条形基础和钢筋混凝土扩展条形基础两类，分别根据荷载及地基条件采用。

当柱子荷载较大或地基承载力较低时，采用单独基础时可能出现过大的不均匀沉降或需基底面积很大而在平面位置受到限制时，可将同一条轴线上的若干柱子的基础联合在一起，就成为柱下条形基础。柱下条形基础的受力与倒置的 T 形截面梁相似，因要受弯，需采用钢筋混凝土制作，造价要比独立基础高。当柱子间距较大时，经济性就变差（配筋量增加），而基础刚度亦将下降，不利于调整不均匀沉降。

c) 柱下交叉梁基础 如地基很软，土的压缩性或柱的荷载分布在两个方向上均不均匀，一方面需要进一步扩大基础的底面积，同时又要求基础具有空间刚度来调整不均匀沉降时，可在柱网下纵横两向设置钢筋混凝土条形基础，这样就形成了交叉梁基础，或称十字交叉条形基础。

d) 片筏基础 当地基承载力低，而上部结构传来的荷载却很大，即使采用交叉梁基础还不能提供足够的底面积时，可将柱下的基础连成一片，形成一块钢筋混凝土的大板，称为钢筋混凝土片筏基础或筏板基础。片筏基础常用于有地下室的房屋或贮液结构物（如水池、油库等）。

5) 箱形基础 箱形基础是由钢筋混凝土的底板、顶板和纵横墙体组成的整体结构，形同箱形而得名。箱形基础象一块空心厚板一样工作，基础的中空部分可用作地下室（可在内墙的适当位置上开设门洞供通行）。

由于箱形基础具有很大的抗弯刚度，能有效的调整基底压力，减小地基的不均匀沉降，而且箱基内的空间代替了大量的回填土，减小了基底的地基自重应力，使利用软弱地基成为可能。但是，箱形基础造价高昂，施工技术要求也较高，是否采用应进行技术经济比较后确定。

4.5 地基处理

随着火力发电厂建设数量的越来越多，建厂条件优越的新厂址日益稀少。不少新建厂不得不在工程地质条件不良的厂址上建设。这不仅要增加建设的投资，而且将大大增加设计和施工的工作量。结构设计人员在新建工程的可研阶段应根据岩土工程资料，对主厂房和主要设备的地基基础方案进行详细的计算，以确定采用天然地基或需进行地基处理。

4.5.1 需进行地基处理的地基

火力发电厂建（构）筑物的地基，在下列情况下需进行加固处理：

- 1 天然地基承载力或变形不能满足建筑物使用要求；
- 2 发现地基有暗沟、古河道、土洞或溶洞等不良地质现象；
- 3 地震区存在可液化土层的地基，不能满足抗液化要求；
- 4 经技术经济比较，对地基进行处理比天然地基更合理；
- 5 在软土地基上，建筑物各单元的高度、荷载、刚度或基础埋深相差悬殊或对地基有特殊要求时。

4.5.2 地基处理方案选定

地基处理是影响电厂建设成本与工期的重要因素之一，地基处理方案的选定，可按下列顺序进行：

- a) 根据工程设计要求和天然地基存在的问题，确定地基处理的目的、处理范围和处理后要达到的各项技术经济指标等；
- b) 根据工程地质资料，了解相似场地上同类工程地基处理工程的经验和使用情况，选择几种可供考虑的地基处理方案；
- c) 对初步选定的地基处理方案，分别从适用范围、预期处理效果、材料来源和消耗、施工进度、对环境影响和费用等方面进行技术经济分析和对比，选择最佳的地基处理方法，必要时可选择两种或多种地基处理措施。
- d) 上述工作应在可行性阶段完成。对建筑场地地基处理的必要性和可行性进行充分论证，并对初选的地基处理方案进行技术经济综合比较，推荐一个或若干个技术可靠、经济合理的地基处理方案，作为可研阶段设计说明书的一部分，或以专题报告形式作为说明书的附件，提交审查机关审批。
- e) 根据设计阶段的划分情况，宜在可研审批后及早进行地基处理的原体试验和工程试桩。即对已批准的地基处理方案，选择有代表性的场地进行相应的现场试验或工程试桩，以取得必要的设计参数和合理的施工方案。

4.5.3 地基浅层处理

4.5.3.1 术语

- a) 土 土是整块、坚固的岩石在风化作用下形成的大小悬殊的颗粒，经过不同的搬运方式，在各种自然环境中生成的沉积物。

土的物质成分包括有作为土骨架的固态矿物颗粒、骨架孔隙中的水及其溶解物质及气体。因此，土是由颗粒（固相）、水（液相）和气（气相）所组成的三相体系。

b) 湿陷性黄土 在一定压力下受水浸湿，土结构迅速破坏，并产生显著附加下沉的黄土。

c) 自重湿陷性黄土 在上覆土的自重压力下受水浸湿，发生显著附加下沉的湿陷性黄土

d) 非自重湿陷性黄土 在上覆土的自重压力下受水浸湿，不发生显著附加下沉的湿陷性黄土

e) 地基处理 当天然地基土的性质不能满足工程要求时，为提高地基土的强度、改善土的变形性质或渗透性质而对地基土加固改良的方法。

f) 复合地基 天然地基土体经地基处理后得到增强、置换或在土体中设置加筋材料，由地基土体和加固体相互作用或共同承担荷载的人工地基。

g) 原体试验 通过对可能采用的地基方案进行适宜性分析与比较，选择一个或几个技术可靠、经济合理的地基方案，按实际工程工况条件进行的地基处理现场实体试验。

4.5.3.2 几种常用的地基处理方法简介

a) 换填垫层法 挖去地表浅层软弱土层或不均匀土层，回填坚硬、较粗粒径的材料，并夯压密实，形成持力层的地基处理方法。

适用范围：换填垫层法适用于浅层软弱或不良地层的处理。

垫层材料：可选用砂石类材料、粉质粘土、灰土（粉质粘土与石灰的混合料）、粉煤灰及矿渣等其他质地坚硬性能稳定的工业废渣。

预期效果：因换填材料的不同，垫层的承载力特征值可达到 150~250kPa，可提供较大承载能力的持力层。

注意事项：换填法的处理深度通常在 3.0m 以内较为经济。当软弱土层较深厚，采用局部换填时，仅能解决持力层的承载能力，不能解决软弱土层沉降量大的问题。

b) 预压法 对地基进行堆载预压或真空预压，使地基土固结的地基处理方法。

预压法适用于处理淤泥质土、淤泥和冲填土等饱和粘性土地基。

c) 强夯法

强夯法又称动力固结法或动力压密法。 这种方法是反复将几十吨（一般为 8 ~40t）的重锤，提升到几十米（一般 6~40 米）的高处，再使其自由落下，给地基以冲击和振动能量，将地基土夯实的地基处理方法。此法是上世纪 60 年代末由法国开发的，开始时仅用于砂土及碎石土地基，后来逐步推广应用于细粒土地基。强夯法具有效果显著、设备简单、施工方便、适用范围广、经济易行、节省材料和工期短等优点。强夯法单击的夯击能量一般为 1000~8000KN-m。

适用范围：强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基，一般均能取得较好的处理效果。

预期效果：经强夯处理的地基，其承载能力和压缩模量均有较大提高，具体参数应由试夯确定。

注意事项：对于饱和度（土中被水充满的空隙体积与空隙总体积的比，以百分比计）较高的粘性土，一般来说处理效果不显著，其中尤其是淤泥和淤泥质土，处理效果更差，应慎用。

由于强夯施工时重锤的巨大的冲击能量，使地基的振动很大，对于周边有建筑的工程场地或扩建工程不宜采用。

d) 强夯置换法

强夯置换法是将夯锤提到高处使其自由落下形成夯坑，并不断往坑内回填并夯击坑内回填的砂石、矿渣等硬粒料，使其形成密实的墩体的地基处理方法。

适用范围：强夯置换法适用于处理高饱和度的粉土与软塑~流塑的粘性土等地基上对地基变形要求不严的工程。

强夯置换法在设计前必须通过现场试验确定其适用性和处理效果。

e) 振冲法 通过振冲器的水平振动和高压水的共同作用，使松砂土层振密，或在软弱土层中成孔，然后回填碎石等粗粒料形成桩柱，并和原地基土组成复合地基的地基处理方法。

适用范围：振冲法适用于处理砂土、粉质粘土、素填土和杂填土。对于处理不排水抗剪强度不小于 20kPa 的饱和粘土和饱和黄土地基，应在施工前通过试验确定其适用性。

f) 水泥粉煤灰碎石桩法（通常称为 CFG 桩，即 cement-flyash-gravel pile 的缩写）

水泥粉煤灰碎石桩法是在被加固的土层中采用适宜的成孔工艺成孔，在孔内灌注由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂及水等混合料形成的高粘结强度桩，并由桩、桩间土和褥垫层（即中粗砂、级配砂石或碎石的垫层）一起组成复合地基的地基处理方法。

适用范围：水泥粉煤灰碎石桩法适用于处理粘性土、粉土、砂土和已经自重固结的素填土等地基，且其下有承载能力相对较高的土层作为桩端持力层。

g) 灰土挤密桩法 利用横向挤压成孔设备成孔，使桩间土得以挤密。用灰土填入桩孔内分层夯实形成灰土桩，并与桩间土组成复合地基的地基处理方法。

4.6 桩基础设计

4.6.1 术语

4.6.1.1 桩基础 由设置于岩土体中的基桩和连接桩顶的承台共同组成的基础。

4.6.1.2 单桩竖向极限承载力 单桩在竖向荷载作用下达到破坏状态前或出现不适于继续承载的变形所对应的最大荷载，它取决于土对桩的支承阻力和桩身材料强度。

4.6.2 桩基础的分类

当地基为软弱地基，不能满足上部结构对天然地基的要求，浅层处理方法不适用或还不能满足上部结构对地基的要求时，可采用桩基础。

桩基础是深基础的一种型式，由基桩和连接于桩顶的承台共同组成。由于桩基础通过桩侧摩阻力和桩端阻力将上部结构的荷载传递到深部土（岩）层，从而解决了浅部土层承载力不足或变形过大的问题，因而是软弱地基上常用的一种基础型式。由于工程建设和工业技术的发展，桩的类型和成桩工艺都有较大的发展，有多种多样的桩型可供选择，就其分类而言，有下列各种分类：

4.6.2.1 按承载性状分类：

a) 摩擦型桩：

- 1) 摩擦桩：在极限承载力状态下，桩顶荷载由桩侧阻力承受。
- 2) 端承摩擦桩：在极限承载力状态下，桩顶荷载主要由桩侧阻力承受。

以下几种情况均可视为摩擦型桩：

(1) 当桩端无坚实持力层且桩底不扩大时。

(2) 当桩的长径比很大，即使桩端置于坚实持力层上，由于桩身压缩量过大，传递到桩端的荷载较小时。

(3) 当灌注桩桩底残留较厚的虚土、沉渣形成一压缩性高的褥垫，致使坚实持力层无法充分发挥其承载力时。

b) 端承型桩

1) 端承桩：在极限承载力状态下，桩顶荷载由桩端阻力承受；

2) 摩擦端承桩：在极限承载力状态下，桩顶荷载主要由桩端阻力承受。

以下两种情况属端承型桩：

(1) 当桩端置于坚实土层（砂、砾石、卵石、坚硬老粘土等）或岩层中，且桩的长径比不太大时；

(2) 当桩底扩得比较大时。

4.6.2.2 按桩的使用功能分类：

a) 竖向抗压桩（抗压桩）；

b) 竖向抗拔桩（抗拔桩）；

c) 水平受荷桩（主要承受水平荷载）；

d) 复合受荷桩（竖向及水平荷载均较大）。

4.6.2.3 按桩身材料分类

a) 钢筋混凝土桩；

b) 钢桩。

4.6.2.4 按成桩工艺分：

a) 非挤土桩：干作业法、泥浆护壁法、套管护壁法。

b) 部分挤土桩：部分挤土灌注桩、预钻孔打入式预制桩、打入式敞口桩；

c) 挤土桩：挤土灌注桩、挤土预制桩（打入或静压）。

4.6.3 常用桩型的特点

随着机组容量的加大，火力发电厂工程中采用桩基的逐渐增多，现将目前电厂中主要建（构）筑物常用的桩型介绍如下：

由于钢筋混凝土桩的配筋率较低（一般为 0.3~1.0%），而混凝土取材方便、

价格便宜、耐久性好，钢筋混凝土桩既可预制又可现浇（灌注桩），适用于各种地层，成桩长度和直径可变范围大，因此，桩基工程的绝大部分采用钢筋混凝土桩，用于电厂的桩基工程的发展方向仍然是钢筋混凝土桩。

a) 预制钢筋混凝土方桩

长期以来，预制钢筋混凝土方桩是建筑工程的主要传统桩型，在电厂建筑中也有广泛的应用。由于环保要求的提高，在城市建设中的应用范围受到一定的制约。但是，在新建的发电厂工程中依然有较好的应用前景。

1) 预制桩除不易穿透的砂土及碎石土等硬夹层（除非采用预钻孔、射水等辅助沉桩措施）外，对地质的适应范围广，可用于各种土层；

2) 桩身为工地预制，桩身质量易于保证；

3) 桩尖能打入松散的砂、砾、硬粘土、强风化岩层等持力层一定深度，对桩端土有挤密作用，能提高桩的承载能力；

4) 沉桩一般采用锤击，产生振动和噪声污染；

5) 在饱和软粘土地区使用时，由于沉桩过程产生的挤土效应可能导致周围建筑物、道路、管线等的损坏；

6) 由于桩的贯入能力受多种因素制约，常出现因桩打不到设计标高而截桩，造成浪费。

7) 造价较灌注桩稍高。

b) 预应力管桩

近年来，预应力管桩在发电工程中得到了广泛的应用。所说的预应力管桩，是指采用离心成型的先张法预应力混凝土管桩，包括预应力混凝土管桩（代号 PC 桩）和预应力高强混凝土管桩（代号 PHC 桩）两大类。预应力混凝土管桩的离心混凝土强度等级低于 C80 但不低于 C60，而预应力高强混凝土管桩的离心混凝土强度等级不低于 C80。

由于对桩身主筋施加了预拉应力，混凝土受到了预压应力，从而改善了桩的抗裂性能，提高了沉桩时的抗锤击能力，使穿透砂层等硬夹层的能力有了提高，扩大了应用的地质条件。由于管桩的强度高、耐打性好、贯穿力强，使预应力管桩端部对持力层的挤密效应比普通预制桩要高，从而提高了桩端阻力，使预应力管桩的承载能力相对于普通预制桩要高。预应力管桩的综合造价基本和预制桩相

当。预应力管桩由于在工厂中制造，桩身质量易于得到保证，并且省去了现场预制的场地，这是为不少工程乐于采用的一个原因。

当然，如果在工程所在地附近无预应力管桩厂，长距离的运输将会增加工程成本。

预应力管桩基础的应用条件基本和预制桩一致，但更宜用于桩端持力层为较厚的强风化或全风化岩层，坚硬粘土层，密实碎石土、砂土、粉土层的场地。不宜用于下列场地：

1) 土层中含有较多难于清除的孤石、障碍物，或含有不宜作持力层且管桩又难于贯穿的坚硬夹层；

2) 管桩难于贯入的岩面上无适合作桩端持力层的土层，或持力层较薄且持力层的上覆土层较松软；管桩难于贯入的岩面埋藏较浅且倾斜较大。

3) 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 第 3.3.2 条，抗震设防烈度 8 度及以上地区不宜采用预应力混凝土管桩 (PC 桩) 和预应力混凝土空心方桩 (PS 桩)。

4) 根据《工业建筑防腐蚀设计规范》(JB 50046—2008) 第 4.9.2 条及第 4.9.5 条，预应力管桩可应用于中等及弱腐蚀性等级的腐蚀性环境，而在强腐蚀性等级的腐蚀环境中不应采用预应力管桩。

c) 灌注桩

当前灌注桩在我国已形成多种成桩工艺、多种桩型，使用范围已扩大到土木工程的各个领域。在火力发电工程中主要应用的有非挤土的螺旋钻钻孔灌注桩和部分挤土的冲击钻钻孔灌注桩。近年来大直径的人工挖孔灌注桩(扩底或不扩底)在电厂主厂房中也得到了应用(但出于施工人员安全的考虑，应慎用)。各类灌注桩有如下的优缺点：

1) 施工过程无大的噪声和振动；

2) 可根据土层分布情况任意变化桩长，可根据同一建筑物的荷载分布和土层情况采用不同桩径；

3) 可穿过各种软、硬夹层，将桩端置于坚实的土层或嵌入基岩，还可扩大桩底以充分发挥桩身强度和持力层的承载力；

4) 配筋率远低于预制桩，桩身单位体积的造价约为预制桩的 60~80%；

采用泥浆护壁法造孔时，要具备设置泥浆沉淀池的现场条件，并影响文明施工；

5) 根据《工业建筑防腐蚀设计规范》(JB 50046—2008)第 4.9.5 条，灌注桩不应用于强腐蚀性等级的腐蚀环境中。

近年来，桩基工程中新开发出了挤扩多支盘混凝土灌注桩，这种多支盘桩是在钻孔灌注桩的基础上，在承载力较高的土层中，利用支盘成型机在桩孔选定的标高处在孔壁上挤压出若干分枝或承力盘，从而改善盘周土的性状，增加桩的稳定性，可较大幅度提高桩的承载力。此种桩型已在发电厂工程中得到了应用，并有较好的经济效益。

d) 钢桩

钢桩可根据荷载特征制作成各种有利于提高承载力的断面，在电厂中常用钢管桩和 H 型钢桩。钢管桩和箱形断面的桩端常作成开口式以减小沉桩过程的挤土效应，当桩壁竖向抗压强度不够时，可将挤入管、箱中的土塞挖除灌注混凝土。H 型钢桩沉桩过程的排土量较小，沉桩贯入性能好。此外，H 型钢桩的比表面积大，能提供较大摩阻力。

钢桩除具有上述优点外，还具有抗冲击性能好、接头易于处理、运输方便、施工质量稳定等优点。钢桩最大缺点是造价高，耐腐蚀性能差，按我国的价格，单位承载力的造价，约相当于钢筋混凝土桩的 2~3 倍。因此仅在有特殊要求的工程中才可应用。

4.6.4 桩基础的设计

4.6.4.1 桩基础的两种极限状态

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)第 3.1.1 条规定：

“桩基础应按下列两类极限状态设计：

1 承载能力极限状态：桩基达到最大承载能力、整体失稳或发生不适于继续承载的变形；

2 正常使用极限状态：桩基达到建筑物正常使用所规定的变形限值或达到耐久性要求的某项限值。”

4.6.4.2 桩基设计等级

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)第 3.1.2 条，根据建筑规模、功能特征、对差异变形的适应性、场地地基和建筑物体形的复杂性以及由于桩基问题

可能造成建筑破坏或影响正常使用的程度，将应用于各种建筑类型的桩基分为甲、乙、丙三个设计等级。

电力行业标准《电力工程地基处理技术规程》(DL/T 5024—2005)及《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—200X)，未对电力工程桩基的设计等级作出规定，但《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—200X)对火力发电厂各建筑物地基的安全等级作了规定。从对应关系可知用于主厂房(包括汽轮发电机基础、锅炉架构基础)、主控楼、通讯楼等主要生产建(构)筑物的桩基设计等级应为甲级。

4.6.4.3 单桩竖向极限承载力的确定

a) 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)第 5.3.1 条规定，设计等级为甲级的建筑桩基应通过静载试验确定单桩竖向极限承载能力的标准值。

b) 《建筑地基基础设计规范》规定：

“8.5.5 单桩竖向承载力特征值应通过单桩竖向静载荷试验确定。在同一条件下的试桩数量，不宜少于总桩数的 1%，且不少于 3 根。……。”

实践表明，单桩竖向极限承载能力的确定就其可靠性而言，以传统的静载试验最高。因此用于火力发电厂的桩基，其单桩极限承载力特征值应通过静压桩试验确定。通过试验得到的单桩竖向极限承载力值除以 2，即为单桩竖向承载能力的特征值 R 。

因此，在工程可研阶段，通过地基选型的研究，如要进行地基处理，应在工程费用的估算中计列地基处理的试验费用。

c) 对于发电工程而言，由于电厂工程规模巨大，建筑物布置分散，往往需用的桩的数量很大，关于试桩的技术要求及数量，《火力发电厂土建设计技术规定》有相应的规定：

“7.1.7 新建工程不同地质条件下的单桩承载力，应根据现场静载荷试验确定。试桩方案必须结合地质条件、地区经验和使用要求选定。试桩宜在初步设计之前进行。

对于扩建工程，若地质条件不同，或桩型、桩长不同时，也应进行试桩。

每种桩型的试桩数量应为工程桩总数的 1%~5%，亦不应少于 3 根。”

5 烟囱

5.1 术语

5.1.1 烟囱筒身 烟囱基础以上部分，当为单筒式烟囱时包括筒壁、隔热层和内衬等部分；当为套筒式或多管式烟囱，包括筒壁、与筒壁脱开的排烟内筒（及其隔热层及内衬）、各层内部平台及附件等。

5.1.2 筒壁 也就是由钢筋混凝土浇制的烟囱筒身的最外层结构，用于保证筒身的强度与稳定。

5.1.3 隔热层 对于单筒烟囱而言，置于筒壁和内衬之间的一层隔热材料，以使筒壁的受热温度不超过规定的最高温度，以减小筒壁的温度应力。

5.1.4 内衬 烟囱内直接与烟气接触的结构层。对于单筒烟囱，内衬选用耐酸砖由耐酸胶结料砌筑于筒壁分段外挑的牛腿上。要求砖缝的气密性，以防止烟气透过内衬及隔热层腐蚀筒壁。

5.1.5 单筒式烟囱 即在钢筋混凝土筒壁内侧直接设置隔热层及内衬的普通烟囱，隔热层及内衬分段支承在筒壁内侧挑出的牛腿上。

5.1.6 套筒式烟囱 筒壁内设置一个与筒身脱开的排烟筒的烟囱。排烟筒可为砌体结构，分段砌筑于由筒身挑出的钢筋混凝土支撑架平台或环形厚板平台上。当排烟筒采用钢内筒，钢内筒常采用自立于基础或悬吊于筒身顶部平台的方式与筒壁脱开。

5.1.7 多管式烟囱 两个或多个排烟筒共用一个钢筋混凝土筒壁或钢塔架组成的烟囱。

5.1.8 钢内筒 材质为钢材的套筒式烟囱的排烟内筒。根据钢材的防腐性能钢内筒的内壁可能需采取必要的防腐措施。

5.1.9 自立式钢内筒 全部支承于烟囱基础上的钢制排烟内筒。

5.1.10 悬挂式钢内筒 悬挂于生根在钢筋混凝土外筒结构上的若干层或顶层平台结构上的钢制排烟筒，悬挂式又分为分段悬挂和整体悬挂两种方式。

5.1.11 钢内筒横向止晃装置 一种起着约束和协调钢制排烟内筒横向位移的装置，通常有平台制晃装置、柔性拉条或刚性撑杆三种类型。

5.2 有关规范关于烟囱选型的规定

烟囱是火力发电厂中一个必不可少的生产构筑物。在上世纪 60 年代前，由于电厂容量不大，环境问题不突出，即使发达国家的火力发电厂，其高度超过

100 米的烟囱数量极少。到了上世纪 60 年代，随着大容量电厂的大规模建设，引起的大气环境污染日益严重。为了解决大气污染问题，最根本的办法应为对烟气进行净化（除尘、脱硫、脱硝），但是由于当时尚无成熟的净化技术，便从烟囱设计上采取措施：

a) 建造高烟囱，加大烟气扩散范围，降低有害物的落地浓度；

b) 提高烟气流速，采用集合式烟囱或增加一个烟囱的烟气排放量，以提高烟气抬升高度。扩大烟气稀释范围。

由于高烟囱的设计技术和施工水平比较容易掌握，在排放干烟气的情况下，烟囱在运行后很少需要维修，建造费用和烟气净化费用相比相对要低得多。

因此，从 60 年代开始，工业发达国家的烟囱越造越高，到 70 年代前期，国外电厂烟囱高度达到了最高峰，其中前苏联的热浦洛什戈电厂 320 米烟囱和美国的米捷尔电厂 368 米烟囱创造了烟囱高度的世界纪录。高烟囱使距电厂较近距离处的烟气落地浓度比低烟囱小，但是在距烟囱很远处，烟囱高度对落地浓度已无影响。也就是说，高烟囱并不能降低烟气中有害物质的总排放量。因此到 70 年代后期，烟囱的高度比赛没有继续下去，而是转向烟气净化技术的研究。

目前电厂烟囱的运行条件已趋向复杂化，燃煤含硫量的不同、烟气净化方式的不同使烟气的温度和湿度变化范围很大。如现在火力发电厂大都采用石灰石—石膏湿法脱硫装置，当有 GGH 时，正常排烟温度为 80℃ 左右，如不设 GGH 时，正常排烟温度为 50℃ 左右，而湿度高达 95%；有旁路烟道且烟气走旁路烟道时，排烟温度为 130℃ 左右；故障时，排烟温度可能超过 180℃。同时，烟气流速已普遍提高到 25—35m/s。部分烟囱的内壁处于正压运行状态。国家环保部要求新建电厂不设旁路烟道，新建电厂的烟囱必须考虑上述的不利因素。这些因素不但对结构型式的选择有影响，也直接关系到内衬、保温措施的选择。

随着环保要求的提高、烟气净化技术对烟囱型式选择的影响，在相应的规范中得到了反映。现将不同规范关于烟囱选型的规定简述如下：

5.2.1 《烟囱设计规范》（GB 50051-2002）相关规定如下：

“10.1.2 烟气对烟囱和烟道结构腐蚀等级分类如下：

- 1 当燃煤含硫量为 0.75~1.5%时，烟气属弱腐蚀性；
- 2 当燃煤含硫量为大于 1.5%但小于或等于 2.5%时，烟气属中等腐蚀性；
- 3 当燃煤含硫量大于 2.5%时，烟气属强腐蚀性。”

“10.2.2 烟囱高度大于 100m 时，烟囱型式可根据烟气腐蚀等级按下列规定采用：

- 1 当排放强腐蚀性烟气时，宜采用套筒式或多管式烟囱。
- 2 当排放中等腐蚀性烟气时，可根据烟囱的重要性既可采用套筒式或多管式烟囱，也可采用防腐型单筒式烟囱。
- 3 当排放弱腐蚀性烟气时，可采用普通单筒式烟囱，但应采取有效防腐蚀措施。”

上述规定仅针对温度低于 150℃的非脱硫处理烟气的常规烟囱，它是根据我国早期建成的火力发电厂的烟囱经实测调查，发现腐蚀程度与燃煤含硫量密切相关，并由此总结出的常规烟囱的设计思路和方法。实践证明按上述规定设计的烟囱，总体上在安全可靠性和使用耐久性方面能满足火力发电厂发电机组非脱硫处理烟气的排烟要求。由于此前还没有脱硫烟气烟囱的长期运行经验，并没有反应经烟气净化后的低温高湿烟气对烟囱的腐蚀性对烟囱选型的要求。

5.2.2 《火力发电厂烟囱设计导则》（Q/DG1—T001—2009）的规定

近年来，随着国家环保标准的不断提高，新建的火力发电厂工程都要求同步建设烟气脱硫处理系统，并且不设置 GGH，烟气的温度和湿度和非脱硫烟气相比有很大变化，烟囱的运行条件趋于恶化。为此，中国电力工程顾问集团公司针对烟气湿法脱硫烟囱设计中的新问题，及时总结了已有的设计经验，制定了企业标准《火力发电厂烟囱设计导则》（Q/DG 1—T001—2009）。在该标准中对于烟囱的选型有如下的规定：

“4 选用原则

- 4.1 烟囱结构选型一般应按照现行的国家标准 GB 50051（《烟囱设计规范》）、电力行业标准 DL 5000（《火力发电厂设计技术规程》）和 DL 5022（《火力发电厂土建结构设计技术规定》）中的选型要求进行选用。
- 4.2 湿法脱硫处理的烟气按强腐蚀性等级考虑；半干法、干法（水介质）脱硫处理的烟气按中等腐蚀性等级考虑；循环流化床锅炉（CFB）和其他干法脱硫处理的烟气按弱腐蚀性等级考虑；非脱硫处理的烟气腐蚀性等级根据燃煤含硫量指标按国家标准 GB 50051（《烟囱设计规范》）的相关要求确定。
- 4.3 当烟气非脱硫处理、半干法脱硫处理、干法脱硫处理及循环流化床锅炉条件时，一般可选用单筒式烟囱。根据烟气的腐蚀性等级，按国家标准 GB 50051（《烟

囱设计规范》)进行烟囱的防腐蚀设计。

4.4 当烟气湿法脱硫处理时,宜选用钢筋混凝土外筒壁和排烟内筒脱开布置的套筒式或多管式烟囱。

对套筒式或多管式烟囱的排烟内筒结构,应根据烟气的腐蚀性条件、温度湿度条件、使用期限要求、地质地震条件、施工质量保障程度和可能存在的检修修补维护对机组运行的影响程度综合选择。

4.5 对 1000MW 等级及以上的燃煤发电机组,排烟内筒应按“一炉配一管”的原则配置;对 600MW 等级燃煤发电机组,当烟气湿法脱硫处理、不设气气换热器(GGH)系统时,排烟内筒宜按“一炉配一管”的原则配置;其他单机容量的发电机组,宜按电力行业标准 DL 5022(《火力发电厂土建结构设计技术规定》)中烟囱的配置要求配置。”

5.2.3 《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL 5022—200×)的规定

“10.1.1 烟囱结构选型应结合烟气排放条件及烟气腐蚀性等级,经综合技术经济比较后,合理选择单筒式烟囱、套筒式烟囱或多管式烟囱等结构型式。对套筒式或多管式烟囱的排烟筒结构,还应根据烟气的腐蚀性等级、烟气温度湿度条件、工程地质条件、施工难易程度和机组检修维护等综合条件确定选型。”

“10.1.2 石灰石—石膏湿法脱硫处理后的烟气应按强腐蚀性等级考虑;半干法、干法(水介质)脱硫处理的烟气按中等腐蚀性等级考虑;循环流化床锅炉(CFB)和其他干法脱硫处理的烟气按弱腐蚀性等级考虑;非脱硫处理条件的烟气腐蚀性等级,应按照《烟囱设计规范》(GB 50051)中提出的燃煤含硫量指标确定。”

“10.4 烟囱防腐措施

10.4.1 火力发电厂烟囱的结构型式与防腐措施密切相关,应根据烟气的腐蚀等级、结构的重要性、烟囱的运行条件、烟气的结露状况以及检修维护条件等综合确定,一般应遵循以下原则:

1 当排放强腐蚀性烟气时,一般应采用套筒式或多管式烟囱。即把承重的钢筋混凝土外筒壁与排烟内筒分开,避免承担安全作用的钢筋混凝土外筒壁结构与排烟内筒可能渗漏的强腐蚀性烟气直接接触。

对于排放强腐蚀性烟气、且不考虑设置烟气加热装置(GGH)时,排烟内筒应加强防腐和抗渗透措施,应优先选择整体密闭性强、抗渗透能力好的钢排烟

筒或类似性能的结构体系。

2 当排放中等腐蚀性烟气时，可根据结构的重要性和烟气匹配机组容量的大小，选择套筒式、多管式或防腐型单筒式烟囱。

3 当排放弱腐蚀性烟气时，可采用防腐型单筒式烟囱。”

5.3 早期设计的脱硫烟气烟囱运行状况

由于我国烟气脱硫处理设施的应用较晚，而且烟气脱硫设施投运后的运行状况也不稳定，对投运后烟囱内的腐蚀状况进行的调查研究的资料也少。前一时期，国内各设计单位主要根据各自积累的经验 and 国内外参考资料进行脱硫烟气烟囱的设计。早期投运的脱硫烟气烟囱大致有下列几种型式：常规单筒烟囱、改进型单筒烟囱、砖砌结构排烟筒的套筒烟囱及钢排烟筒的单管或多管式套筒式烟囱。经过几年的运行，据有关单位对国内部分电厂烟囱的调查，湿法脱硫处理烟气烟囱暴露出如下的问题：

a) 常规单筒烟囱和改进型单筒烟囱，尽管从设计概念来说，排烟筒由耐酸的砌块用耐酸胶结料砌筑，本身具有一定的耐腐蚀的性能，钢筋混凝土筒壁的内侧还涂刷防腐涂料，钢筋混凝土筒壁和砖砌内衬之间有耐腐的发泡材料作隔热层。理论上讲此种烟囱能适应湿烟气的工作环境。但是由于砌体内衬的施工质量难于保证，砖缝不易密实，隔热层也难于保证气密性，烟气又处于正压运行状态，无法避免冷凝酸液与钢筋混凝土筒壁的接触，因此内衬及保温层气密性差的烟囱，其钢筋混凝土外壁有不同程度的腐蚀现象。当钢筋混凝土筒壁可能存在收缩裂缝和温度裂缝时，将加剧筒壁的腐蚀。

b) 对于砖砌结构排烟筒的套筒烟囱，虽然排烟筒与承重外筒脱开了，并设置了检修空间，但是此种排烟筒是分段支承在烟囱外壁挑出的平台上，砌体结构及其外侧保温层的气密性难于保证，加上各分段接口也难于处理好，同样会引起烟气和冷凝酸液的泄漏，从而造成支承平台和筒壁的腐蚀。

c) 采用钢质排烟筒的套筒式烟囱，为了控制造价，若采用防腐性能很差的 Q235 钢，则必须在排烟筒内侧采取必要的防腐措施，如贴泡沫玻璃砖、喷涂防腐涂料或涂鳞片胶泥等。但这些防腐材料在耐高速烟气的冲刷、耐高温性能、耐老化、与钢板的附着力等方面各自存在着一定的不足，而且施工要求严格，施工质量难于保证。湿法脱硫烟气在排烟筒内表面均有结露产生，当不设 GGH 时烟囱

中凝结水量会更大。已运行的 Q235 钢的钢排烟筒，有的因防腐层的局部脱落，导致短时间内钢内筒筒壁腐蚀穿透和渗漏。

d) 采用湿法脱硫装置的烟囱，尤其当不设置 GGH 时，冷凝水量会比较大，应重视冷凝稀酸液对结构物的渗透和隔离，对冷凝稀酸液应采取收集和排除措施，并进行处理后排放，以免渗入地下腐蚀烟囱基础。

在中国电机工程学会电力土建专委会结构分专委会于 2010 年 7 月召开的学术研讨会上，西北院提交的有关湿法脱硫烟囱防渗防腐设计的论文中，介绍了他们“广泛收集的全国各地 10 多项烟气湿法脱硫处理、不设烟气加热系统 GGH 条件的烟囱工程腐蚀渗漏资料，表明该类烟囱的腐蚀渗漏严重，且存在一定的安全隐患，具体表现在：1) 砖砌体结构的排烟内筒或内衬，由于烟气正压运行，烟气冷凝结露渗漏非常突出，出现状况的速度很快，最快者在脱硫系统投运后不到一个月；2) 钢内筒结构的排烟内筒，由于局部防腐层的脱落导致短时间内钢内筒筒壁腐蚀穿透和渗漏，出现状况的速度和严重程度远远超过预期；3) 外接烟道及与烟囱内烟道相连接处腐蚀渗漏突出。分析其原因，主要是：1) 施工质量不高，无论是砖砌体结构，还是钢内筒的防腐层，都存在灰缝或粘接胶不饱满和减少用量的状况，需要进行防腐防渗处理的基层表面未按设计要求进行彻底的处理；2) 排烟内筒防腐蚀和防渗漏衬里的抗烟气气流冲刷磨损极耐烟气温度变化引起的开裂性能达不到使用要求；3) 排烟内筒防腐防渗层的设计耐久性 & 施工因素影响考虑不足。”

关于湿烟囱钢排烟筒的腐蚀情况，中国电机工程学会电力土建专委会结构分专委会 2010 年学术研讨会上，《采用玻璃钢解决湿烟囱防腐的新途径》论文中有较详细的叙述：

“目前湿烟囱钢内筒防腐主要采用喷涂重防腐涂料（RHF APC 鳞片树脂）、粘贴泡沫玻璃砖二种方案。粘贴泡沫玻璃砖或陶瓷玻化砖的工程目前出了不少问题，石洞口二厂、外高桥三期、鲤鱼江电厂、漳山电厂、九江电厂、兆光电厂等钢内筒烟囱出现了严重脱落、冲刷和渗漏情况。鄂州电厂采用喷涂防腐涂料，也出现了严重渗漏。不管是普通钢还是耐酸钢的内筒都出现几十个穿孔，冷凝酸对钢板的腐蚀可达到每月 0.2~0.4mm。

湿烟囱（不加 GGH）钢内筒采用喷涂鳞片树脂，在湖北鄂州电厂一期烟囱出

现的问题是严重的，钢内筒已经多处腐蚀穿孔，可以形容为“千疮百孔”。喷涂 RHF 专用重防腐涂料只在仅有的少数烟囱工程中试用，喷涂 APC 仅在烟道中局部试用，尚有待进一步观察总结。喷涂料与钢内筒的粘结经常出问题，而且小面积试用与大面积烟囱内壁实用还有很大距离；在烟气温度交替变化后，喷涂涂料与钢板会起皮开裂，导致冷凝酸液渗漏，这些问题可能出在材料本身，也可能出在施工工艺方面。”

综上所述，在烟气湿法脱硫不上 GGH 的条件下，烟气温度低、湿度大，烟气中残留的硫化物和氮氧化物将会形成酸液，对烟囱的排烟筒产生很强的腐蚀性。国外对于此类烟囱均按强腐蚀性烟气来设计，排烟筒通常采用钢内筒或玻璃钢内筒，钢内筒一般选用防腐性能优良的镍基合金板或钛金属复合板材料。

5.4 各型脱硫烟气烟囱技术经济比较

国内湿法脱硫烟气烟囱经过近几年运行暴露出的问题，对于今后此类烟囱的设计具有借鉴的意义，在选择烟囱型式时应考虑以下因素：

- 1) 技术可行性，满足复杂化学环境下的防腐要求；
- 2) 经济合理性，不仅应考虑初投资的大小，而且应考虑运行期间的可靠和免维护的使用寿命；
- 3) 施工条件好，质量容易控制，施工周期短；
- 4) 运行维护费用低，检修方便。

采用湿法脱硫且不上 GGH 装置，烟道不设置旁路的情况下，基于已有的用于排放湿法脱硫且不设 GGH 的湿烟气烟囱的运行情况，对该类烟囱的选型和防腐设计可得出以下认识，可在新建电厂烟囱设计中考虑。

a) 由于单筒烟囱的砖砌内衬的气密性难于保证，冷凝酸液的渗透及对承重外筒的腐蚀难于避免且不易发现，这对烟囱的长期安全运行无疑会带来隐患。因此，尽管这种烟囱造价最低也不应采用。

b) 砖砌排烟筒的套筒式烟囱，虽然具备了检修空间，排烟筒与外筒的脱开也使承重结构的安全易于监测，但是同样由于砌体内衬结构及其保温层、分段接口处理的气密性难于保证，外筒内壁及支承平台结构仍然需要考虑防腐措施。且该种烟囱的抗震性能较差，需抗震设防的电厂不宜采用。

c) 采用价格较低的普通碳素钢作排烟筒，内表面的防腐措施可有多种选择，

如敷贴泡沫玻璃砖或涂重防腐涂料。

泡沫玻璃砖本身具有很强的抗腐蚀的能力，进口产品造价较高，国内产品价格稍低，施工要求均很严格。一个钢排烟筒的内衬需要敷贴数万块的玻璃砖、有数千米长的砖缝需要用粘结剂充填密实，其施工质量的监控是非常困难的，排烟筒外面紧密包裹着一层保温材料，使钢内筒的腐蚀情况难于监测，该类烟囱经运行后出现了一些渗漏问题也是不足为奇的。此外，泡沫玻璃砖粘结剂的耐温性能也是应考虑的因素，当设有旁路烟道时更是如此。

用于钢排烟筒防腐的多种重防腐涂料，虽基建价格比发泡玻璃砖稍低，但其技术性能如耐高温性能、耐老化、与钢板的附着力等还不够理想，因而运行后期维护工作量大和费用较大。

d) 靠材料自身防腐的钢排烟筒采用的材质有复合钛板（爆炸法钛钢复合板，在碳素钢板表面复合 1.2mm 厚的钛板），钛是一种非常活泼的金属，它和氧有很强的亲和力，在空气中钛表面生成一层致密的、附着力强、惰性大的氧化膜，保护了钛基体不被进一步腐蚀。复合钛板是一种防腐性能很好的材料，但价格昂贵。复合镍基合金钢板是性能比钛板更好的材料，但其造价也高于复合钛板。

e) 玻璃钢排烟筒，用于排烟筒的玻璃钢为玻璃纤维增强树脂的俗称，简称 FRP 或 GFRP。此种材料具有高强度、高模量、质轻、绝缘、耐腐蚀等优点。用它作排烟筒时不需再作防腐内衬，适用于烟气温度较低、工况单一的烟囱。后期维修率低、使用寿命长。该种烟囱需在现场缠绕，且应有专业施工队伍施工，施工过程中应严格防火。该种烟囱在国内工程中尚缺少使用经验，国内还没有相关的施工规程或规范。当烟气温度变化幅度较大时，树脂的耐温性能及耐老化性能应是材料选择时着重注意的问题。

f) 钢排烟筒的支承方式可分为自立式和悬挂式两种。自立式钢排烟筒直接落座于烟囱基础底板上，排烟筒的壁板在竖向承受压力，由于要考虑钢板的局部稳定，板厚不能太薄。而悬挂式是靠支撑于筒身的钢梁来悬挂排烟筒，排烟筒壁在竖向承受的是拉应力，不存在局部稳定的问题，因而钢材用量要比自立式少。悬挂式钢内筒又可分为整体悬挂式和分段悬挂式。整体悬挂式仅在烟囱上部设置一个支撑平台悬吊整个内筒，沿烟囱竖向隔一定间距设置检修平台和横向限位装置；而分段悬挂式是在钢筋混凝土外筒内部设置多个支撑平台，分段悬吊内筒，

每段通过伸缩节相连。但是分段相连处又是确保排烟筒气密性的薄弱环节，分段宜尽量减少。玻璃钢排烟筒通常采用整体悬挂的方式

5.5 烟囱投资费用组成分析

以下摘自西北院论文：

“烟囱投资费用一般指建筑工程费用，其中定额直接费用约占 73.2%，措施、间接费用、利润、人工等约占 26.8%。在定额直接费中，钢内筒结构及防腐层等属于防腐防渗部分的费用要占到 60%以上，因此烟气湿法脱硫、不设置烟气加热系统 GGH 条件的烟囱，防腐防渗部分的费用所占比例很大，不能小视。

双管钢内筒烟囱和钢套筒（单管套筒）烟囱的工程量对比：钢筋混凝土外筒壁混凝土量，双管钢内筒比钢套筒约高 20%；钢内筒用钢量，双管钢内筒比钢套筒约高 35%，钢内筒要考虑两台机组接入烟气混流的影响，所以钢套筒（单管套筒）的筒壁厚度要大些。”

《采用玻璃钢解决湿烟囱防腐的新途径》论文中，对钢内筒采用玻璃钢整体衬套防腐体系作了简单介绍：即以钢内筒作结构层，再在钢内筒内侧设置装配式耐高温、耐腐蚀复合材料（MSB 复合板）封闭内衬防腐，因此 MSB 玻璃钢复合板的厚度可以减薄，从而降低了造价。“钛钢复合钢板内衬防腐工程估价为 3000 元～3200 元/m²，而 FRP 预制衬套整体防腐体系估价为 1900 元～2000 元/m²（其中钢筒结构 700 元～800 元/m²，MSB 板防腐层 1200 元/m²）。”

6 输煤系统建（构）筑物简介

6.1 术语

6.1.1 运煤廊道 支承和围护运煤皮带的构筑物，是地下运煤廊道和地上的运煤栈桥的总称。

6.1.2 干煤棚 两端开敞或两端及侧墙均开敞的煤场防雨棚。

6.1.3 全封闭圆形煤场 由环形分离式或连续式挡煤墙、钢结构（通常采用网架）屋盖组成的圆形封闭式贮煤场。

6.1.4 全封闭球形贮煤仓 平面形状为圆形、贮煤结构为钢筋混凝土半球形薄壳结构的封闭式贮煤场。钢筋混凝土半球形薄壳结构不仅作为煤场的围护结构，而且要承受贮煤的侧压。

6.2 输煤系统建（构）筑物简介

输煤系统是燃煤发电厂中一个重要的工艺系统，包括了从厂外来煤的卸煤设施到主厂房屋原煤斗的所有工艺环节，输煤系统建构筑物有翻车机室、卸煤沟、输煤廊道、输煤转运站、干煤棚、贮煤筒仓、碎煤机室、输煤综合楼等。现将输煤系统主要建（构）筑物的结构型式概述如下：

6.2.1 输煤皮带构筑物 输煤系统各建（构）筑物之间有输煤皮带相连，为输煤皮带提供支承和围护的结构即位输煤皮带构筑物。当输煤皮带廊道位于地下时，通常做成钢筋混凝土箱形结构，但现浇结构受温度应力的限制，当地下廊道长度太长时，需设置温度缝。当输煤皮带升出地面且高度不大时，输煤栈桥通常做成钢筋混凝土框架结构，楼面和屋面采用现浇梁板式结构，侧墙用砌体封闭。当栈桥离地面高度较大时，通常采用以钢筋混凝土柱（或钢柱）和钢桁架承重、楼面为钢梁+压型钢板作底模现浇钢筋混凝土组合结构，屋面及侧墙采用压型钢板围护。

6.2.2 翻车机室及卸煤沟 翻车机室及卸煤沟均包括地上和地下两部分，地下部分为钢筋混凝土箱形结构，地上部分通常为排架结构。由于工艺要求，翻车机室及卸煤沟的地下部分埋深很深，有的工程达 20 多米，当地下水位较高时，给施工及结构防水、抗浮带来困难，通常要采用地下连续墙结构以阻隔地下水，为地下结构的施工创造条件。地下连续墙可作为地下墙体永久结构的一部分或仅作为施工临时措施和地下墙体结构的外模。采用地下连续墙不仅需要较长的施工工期，同时会增加工程的造价。

6.2.3 碎煤机室及输煤转运站 此两种建筑通常也包括地上和地下两部分，地上部分为框架结构，地下部分通常为箱形结构。

6.2.4 干煤棚 干煤棚是燃煤电厂贮存干煤的构筑物，随着电厂装机容量的增大，要求的贮煤量增多，堆取料机的大型化，要求干煤棚有很大的跨度和净空。干煤棚承受的荷载主要为结构自重及风、雪及地震（如在地震区）荷载，但是，由于跨度很大，采用钢筋混凝土结构技术上不可能或不合理，因此干煤棚均选用钢结构。上世纪 70~80 年代开始，建成了一大批跨度达 75m~100m、净空高度达 25m~30m 的钢结构干煤棚，其中有国外设计的，也有国内自行设计的。早期建成的钢结构干煤棚结构型式有：排架、门架和拱架，它们都采用了格构式的钢

结构。

到了上世纪 90 年代，网架结构及网壳（曲面网架）结构被大量应用于干煤棚。网架及网壳结构是高次超静定结构，与门架、拱架等平面结构相比，具有整体性好、空间刚度大、抗震性能强、自重较轻及节省钢材的优点。网架公司根据主体设计院提出的煤棚技术条件，承担网架设计、制作和安装。

6.2.5 预应力贮煤筒仓 由于受环保要求或场地限制或因混煤的需要，贮煤筒仓在电厂输煤系统中得到了广泛的应用。采用普通钢筋混凝土建造的筒仓，由于在仓内贮煤的侧压力的作用下，筒壁产生环向拉力，而且此拉力随着筒仓直径的增大而增大。为了满足筒仓的耐久性要求，避免筒壁出现裂缝或限制裂缝宽度，不得不加大筒壁的厚度，增加筒壁的环向配筋率，从而加大了筒仓的造价。针对筒仓壁在贮煤工况下承受环向拉力的特点，在筒仓壁中采用高强度钢丝束施加预拉应力，使仓壁承受预压应力，而当满载工况下，仓内贮煤侧压力产生的筒壁环向拉力将被仓壁内的预压应力所全部或部分抵消，使结构不致开裂或者裂缝宽度控制在容许的范围内。因此筒仓采用预应力结构后，可以采用比非预应力结构薄的壁厚和较低的配筋率，就能满足结构的安全性和耐久性的要求，这对大直径的贮煤筒仓有重要意义。

6.2.6 圆形煤场 目前国内煤场形式主要有斗轮堆取料机条形煤场（露天布置）、圆形煤场及筒仓（封闭布置）等，其中筒仓单位贮煤量小，投资费用高，主要用于电厂混煤。

圆形全封闭煤场的结构是钢结构网架屋盖和环形肋板式钢筋混凝土侧墙（分离式或连续式挡煤墙）组成。网架结构上设有采光板。是环保型煤场，进入圆形煤场的带式输送机穿过钢结构网架屋盖，支撑于煤场内堆取料机的中心柱顶部。送入的煤通过堆料机在圆形煤场内形成环形煤堆。取料机沿煤堆斜面将煤刮至中心柱下圆锥煤斗内，通过活化给料机和地下带式输送机将煤输出。整个圆形煤场由圆形煤场堆、取料机、事故煤斗、圆形煤场土建结构、钢网架结构、消防系统、暖通系统、电气系统及其他相关辅助设施构成。

圆形煤场的土建结构包括地下设施、环形挡煤墙及网架屋顶，均为常规结构。

6.2.7 球形贮煤仓

薄壳式球形仓结构技术由美国 DOME 公司首创开发, 广泛应用于煤、水泥、飞灰、石灰石、肥料、矿石、粮食的储存。目前全球最大球仓直径 96m, 高 58m, 可储煤约 $15 \times 10^4 \text{T}$ 。

薄壳式球形仓结构在国外已有 30 多年的应用历史, 在国外燃煤发电厂的燃煤设施中作为贮煤仓得到了应用。近年来, 国内有多个设计院拟在新建工程中采用球形煤仓。

从不同设计院所作关于球形煤仓的介绍看, 球形煤仓似可有两种情况: 一种为贮煤的上表面中止于球壳底部的环梁, 即球壳仅作为煤场遮挡风雨的围护结构, 此设施似应称作球形煤场; 另一种描述则贮煤将充满球壳内部的大部空间, 球壳除遮风挡雨外, 还要承受贮煤的荷载, 此时似应称作球形贮煤仓。

6.2.7.1 球形贮煤仓

球形贮煤仓的输煤系统包括球顶输煤转运站、设置于地下的多条平行的缝隙式煤槽、叶轮给煤机、输煤胶带廊道等。燃煤通过栈桥上至球顶输煤转运站, 采用球顶部单点落煤方式堆煤, 煤堆呈圆锥状规则分布, 有效避免圆形煤场环形堆煤不均, 对环形挡煤墙产生受力不均的缺陷; 球形仓比圆形煤场堆煤量大, 充满系数高; 占地面积小。

球形煤仓的土建结构包括钢筋混凝土球形薄壳及支承于其顶部的转运站、环形基础梁、地下煤槽及皮带通廊等。其中土建结构的难点在球壳的施工。据资料介绍, 球形薄壳的施工的具体过程为:

- a) 基础开挖, 并进行基础环梁施工;
- b) 球壳 PVC 外膜的制作, 并与基础环梁固定, 保证其气密性, 待充气; 各类施工机械(吊车, 铲车、混凝土喷射泵等)及混凝土壳体所需钢筋等均应封闭在 PVC 薄膜内;
- c) 外膜充气, 施工中应一直充气并保持内部压力稳定, 直到混凝土达到一定强度后方可停止充气;
- d) 气膜内喷聚氨酯泡沫塑料隔热层, 并在隔热层中嵌入定位钢筋;
- e) 沿定位钢筋绑扎混凝土壳体的钢筋;
- f) 往绑扎好的钢筋网上喷射混凝土;
- g) 混凝土凝固并达到一定强度时, 撤除充气泵, 并可进行内部安装、装修

等后续工作。

薄壳式球形仓施工的核心技术（包括煤场土建和设备全过程技术设计、薄壳外膜充气气囊、薄壳泡沫材料、混凝土添加剂、薄壳施工支架、喷枪设备以及施工方法）国内尚不掌握，技术合作费用高达 170 万美元/座，且无自主知识产权。

6.7.2.2 球形煤场

根据某设计院的资料介绍，我所理解的球形煤场是在引进国外球形贮煤仓技术的基础上，作了改进的一种贮煤设施。从输煤工艺角度看基本上采用了球形煤仓的技术特点，即从球形煤仓顶部单点落煤，形成圆锥形煤堆，地下设施为多条钢筋混凝土煤槽通廊，配备叶轮给煤机系统。但土建结构以球形钢网架结构代替球形钢筋混凝土薄壳结构。这样在保全球形煤仓的技术功能的前提下，避开了国内尚不掌握钢筋混凝土薄壳施工的难点。

由于球形钢网架不考虑承受煤的侧向荷载，并将需设置于球顶的输煤转运站用独立的中央框架支承，使球形钢网架仅作为维护结构，大大减轻了它的荷载。球形煤场土建结构包括球形顶盖、中央框架、圆形浅仓（贮煤层及卸煤层）及设置了多道煤槽通廊的基础底板。

球形煤场的钢网架不考虑贮煤的受力结构，必然会减少煤堆贮量（为了增加贮煤量，可设置环形挡煤墙），它的充满系数要比筒仓、球仓小，比圆形煤场大。

7 抗震设计

7.1 术语

7.1.1 抗震设防烈度 按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。一般情况，取 50 年内超越概率 10% 的地震烈度。

7.1.2 抗震设防标准 衡量抗震设防要求的尺度，由抗震设防烈度和建筑使用功能、重要性确定。

7.1.3 地震作用 由地震动引起的结构动态作用，包括水平地震作用和竖向地震作用。

7.1.4 设计地震动参数 抗震设计用的地震加速度时程曲线、加速度反应谱和峰值加速度。

7.1.5 设计基本地震加速度 50 年设计基准期超越概率 10%的地震动加速度的设计取值。

7.1.6 设计特征周期 抗震设计用的地震影响系数曲线中，反映地震震级、震中距和场地类别等因素的下降段起始点对应的周期值。

7.1.7 建筑抗震概念设计 根据地震灾害和工程经验等所形成的基本设计原则和设计思想，进行建筑和结构总体布置并确定细部构造的过程。

7.1.8 抗震措施 除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容，包括抗震构造措施。

7.1.9 抗震构造措施 根据抗震概念设计原则，一般不需计算而对结构和非结构各部分必须采取的各种细部要求。

7.1.10 建筑场地 在抗震设计中，建筑场地指具有相似的反应谱特征的房屋群体所在地，其范围指工程建设所直接占有并直接使用的有限面积的土地。对于发电厂一般相当于厂址范围。

7.1.11 建筑场地类别 不同场地的地震反应是不同的，在地震区，根据土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度将建筑场地分为四类，。不同类别的场地对应不同的特征周期。

地震灾害表明，地震造成建筑的破坏，除地震动直接引起结构破坏外，还有场地条件的原因，对于同样或相近的建筑，建造于 I 类场地时震害较轻，建造于 III、IV 场地震害较重。

7.2 概述

我国处在环太平洋和南亚—地中海两大地震带的交汇地区，是地震多发的国家之一，约有 60%的地区地震基本烈度为 6~9 度。由于地震的突发性、不确定性及强烈地震作用的极大破坏性，对社会和人民的财产将造成巨大损失。我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。20 世纪以来，我国因地震死亡的人数近 70 万，占世界因地震死亡人数的一半。结构抗震设计的目的就是要尽量将这种损失减低到最低程度。《中华人民共和国防震减灾法》明确规定：“新建、扩建、改建建设工程，必须达到抗震设防要求”，同时该条第二款又规定一般建设工程“必须按照国家颁布的地震烈度区划图或者地震动参数区划图规定的抗震设防要求，进行抗震设防。”因此，在地震区内建设电厂，必须深入了解和掌握抗震

设计的有关规范的规定，并在工程设计中切实贯彻执行。

下面介绍有关地震的一些基本知识：

7.2.1 有关地震的几个名词

地震俗称地动，通常把地球内部发生振动的地方叫“震源”。“震源”正对着的地面叫“震中”。震中附近震动最大，一般也是破坏最严重的地区，叫“极震区”或“震中区”。从震中到震源的距离叫“震源深度”。在地面上，受地震影响的任何一点，到震中的距离，叫“震中距”；到震源的距离叫“震源距”。根据震源的深浅，可把地震分为浅源地震（震源深度小于 70 公里）、中源地震（震源深度 70~300 公里）和深源地震（震源深度大于 300 公里）。全世界 95% 以上的地震都是浅源地震。

7.2.2 地震的震级与烈度

地震的震级和烈度，这是人们容易混淆的两个概念。震级，就是衡量地震本身能量大小的等级。震级大小，是地震释放能量多少的尺度，一次地震只有一个震级。

地震烈度是地震时一定地点的地面震动强弱程度的尺度，是指该地点一定范围内平均水平而言。同一次地震在不同地方所表现出的强烈程度和引起的破坏是不一样的。通常用烈度表示地面震动及建筑物受到破坏的程度。任何一次地震，总是震中区烈度最大，叫“震中烈度”。随着震中距的加大，烈度逐渐降低。也就是说一次地震中烈度因地区而异，可以有好几个。对于浅源地震，震级与震中烈度大致的对应关系，如表 7.2.2：

表 7.2.2 震中烈度与震级的大致对应关系

震级 (M)	一~三	四	五	六	七	八	八以上
震中烈度 (I)	1-3	4-5	6-7	7-8	9-10	11	12

关于烈度标准各国不一，目前国际上普遍采用的是十二烈度表。我国也是将烈度分为十二度。简单地说，1 至 2 度，人无感觉；3 度在夜静时少数人有感觉；4 至 5 度，普遍有感觉，夜间会惊醒，挂灯摇晃；6 度是器皿倾倒，房屋轻微损坏；7 度至 8 度，房屋遭受破坏，地面出现裂缝；9 度至 10 度，房屋严重毁坏，地表裂缝很多；11 至 12 度，房屋普遍倒塌，灾害十分严重。

7.2.3 抗震设防烈度

按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度叫抗震设防烈度。《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)关于抗震设防烈度有下列规定:

“(1.0.4) 抗震设防烈度必须按国家规定的权限审批、颁发的文件(图件)确定。”

“(1.0.5) 一般情况下,抗震设防烈度可采用中国地震动参数区划图的地震基本烈度(或与本规范基本地震加速度值对应的烈度值)。对已编制抗震设防区划的城市,可按批准的抗震设防烈度或设计地震动参数进行抗震设防。”

7.2.4 抗震设防烈度和设计基本地震加速度的关系

a) 由于烈度标准只是宏观描述,多年来人们一直在寻求合理的数量标准。很早就有人建议用地震时地面最大加速度来表示地震烈度。但如何确定一个合理的数量标准,是多年来一直有争议的问题。由于地面运动加速度是抗震设计规范中的一项重要基本参数,在工程设计中取值的高低直接影响抗震设防的标准和基本建设的投资。因此,在新的《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)第3.2,2条中,对抗震设防烈度和设计基本地震加速度的关系作了规定:

“3.2.2 抗震设防烈度和设计基本地震加速度取值的对应关系,应符合表3.2.2的规定。设计基本地震加速度为0.15g和0.30g地区内的建筑,除本规范另有规定外,应分别按抗震设防烈度7度和8度的要求进行抗震设计。

表 3.2.2 抗震设防烈度和设计基本地震加速度的对应关系

抗震设防烈度	6	7	8	9
设计基本地震加速度值	0.05g	0.10(0.15)g	0.20(0.30)g	0.40g

注: g 为重力加速度。”

7.3 抗震设计的基本目的和设防目标

7.3.1 抗震设计的基本目的

建筑抗震设计贯彻执行地震工作以预防为主方针,使建(构)筑物抗震设防后,减轻建(构)筑物的地震破坏。避免人员伤亡,减少经济损失。

7.3.2 抗震设防的适用范围

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),以强制性条文规定:

“1.0.2 抗震设防烈度为6度及以上地区的建筑,必须进行抗震设计。”

7.3.3 抗震设防的目标

按《建筑抗震设计规范》进行抗震设计的建筑,其抗震设防目标是:当遭

受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震时，一般不受损坏或不需修理可继续使用，当遭受相当于本地区抗震设防烈度地震影响时，可能损坏，经一般修理或不需修理仍可继续使用，当遭受高于本地区抗震设防烈度预估的罕遇地震影响时，不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。也就是说，规范保持了《建筑抗震设计规范》GBJ11—89 及《建筑抗震设计规范》GB50011—2001 抗震设防的三个水准目标：

1) 第一水准：即小震，亦称多遇地震或众值烈度地震。根据我国西北和西南地区，六十多个城市的地震危险性分析，众值烈度地震是 50 年内超越概率为 63.2% 的地震（相当于 50 年一遇）。众值烈度约比基本烈度低一度半。当遭遇这种地震时，建筑物应无破坏，处于弹性状态，可按弹性反应谱计算。

2) 第二水准：大体与基本烈度相当，50 年超越概率为 10%（相当于 475 年一遇）。当建筑物遭遇这种地震时，允许它进入非弹性工作阶段，但其损坏应控制在可修复的范围内。

3) 第三水准：即罕遇地震，50 年超越概率为 2~3%（相当于 2000 多年一遇）。罕遇地震一般约比基本烈度高一度。当建筑物遭遇这种地震时，允许它发生较大的非弹性变形，但不能倒塌。

这三个水准可概括为：“小震（众值烈度地震）不坏，中震（基本烈度地震）可修，大震（罕遇地震）不倒。”

7.4 建筑抗震设防分类和设防标准

7.4.1 建筑抗震设防分类

《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）规定：

“**3.1.1** 抗震设防的所有建筑应按现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB50223 确定其抗震设防类别及其设防标准。”

《建筑工程抗震设防分类标准》（GB50223—2008）对建筑物抗震设防分类以强制性条文规定如下：

“**3.0.2** 建筑工程应分为以下四个抗震设防类别：

1) 特殊设防类：指使用上有特殊设施，涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果，需要进行特殊设防的建筑。简称甲类。

2) 重点设防类: 指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑, 以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果, 需要提高设防标准的建筑。简称乙类。

3) 标准设防类: 指大量的除 1、2、4 款以外按标准要求进行设防的建筑。简称丙类。

4) 适度设防类: 指使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害, 允许在一定条件下适度降低要求的建筑。简称丁类。”

7.4.2 电力建筑抗震设防分类

7.4.2.1 《建筑工程抗震设防分类标准》(GB50223—2008) 对电力建筑抗震设防分类规定如下:

“5.2.4 火力发电厂(含核电厂的常规岛)、变电所的生产建筑中, 下列建筑的抗震设防类别应划为重点设防类:

1) 单机容量为 300MW 及以上或规划容量为 800MW 及以上的火力发电厂和地震时必须维持正常供电的重要电力设施的主厂房、电气综合楼、网控楼、调度通信楼、配电装置楼、烟囱、烟道、碎煤机室、输煤转运站和输煤栈桥、燃油和燃气机组电厂的燃料供应设施。

2) 330kV 及以上的变电所和 220kV 及以下枢纽变电所的主控通信楼、配电装置楼、就地继电器室; 330kV 及以上的换流站工程中的主控通信楼、阀厅和就地继电器室。

3) 供应 20 万人口以上规模的城镇集中供热的热电站的主要发配电控制室及其供电、供热设施。

4) 不应中断通信设施的通信调度建筑。

7.4.2.2 由原电力工业部会同有关部门共同制定的《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—96) 对电力设施的抗震类别作了详细的规定, 此处略。

7.4.3 建筑抗震设防标准

《建筑工程抗震设防分类标准》(GB50223—2008) 3.0.3 条, 对各类建筑抗震设防标准作了规定, 应符合如下要求:

建筑物类别	地震作用计算	抗震措施
特殊设防类 (甲类)	应按批准的地震安全性评价的结果且高于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用	应按高于本地区抗震设防烈度一度的要求加强其抗震措施; 但抗震设防烈度 9 度时应按比 9 度更高的要求采取抗震措施。
重点设防类 (乙类)	应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用	应按高于本地区抗震设防烈度一度的要求加强其抗震措施; 但抗震设防烈度 9 度时应按比 9 度更高的要求采取抗震措施; 地基基础的抗震措施, 应符合有关规定。
标准设防类 (丙类)	应按本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用。	应按本地区抗震设防烈度确定其抗震措施; 达到在遭遇高于当地抗震设防烈度的预估罕遇地震影响时不致倒塌或发生危及生命安全的严重破坏的抗震设防目标。
适度设防类 (丁类)	一般情况下, 仍应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用。	允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低其抗震措施, 但抗震设防烈度为 6 度时不应降低。

抗震措施——除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容, 包括建(构)筑物所在场地及其地基基础、承重结构选型、材料、非结构构件等方面的抗震设计要求、一般规定和抗震构造措施。

7.5 建筑抗震概念设计

“概念设计”是相对于“计算设计”而言的。早期抗震设计, 人们试图通过地震作用的计算来实现结构的抗震。但是, 由于地震时地面运动的复杂性和不确定性、结构体系和地基土影响的复杂性, 以及结构计算模型与实际情况的差异, 使得“计算设计”很难有效地控制结构在地震作用下的薄弱环节不受损坏, 也就是说, 单靠提高结构强度来达到抗震的目的是不经济的, 也是不现实的, 甚至是不可能的。另一方面, 人们从宏观的震害调查中发现, 建筑场地的不同、地基基础的差异、不同的结构体系和构件选型, 构件断面和节点设计的不同, 使结构在地震中的反应和破坏情况是不同的。因此, 从上世纪 70 年代以来, 人们在总结大地震灾害的基础上, 逐渐的得出这样的看法: 结构的抗震不

能单纯的依赖计算，相反，更应注重正确的概念，即根据有关抗震的一些重要概念进行设计，即所谓的“概念设计”。在现行的抗震设计规范中，抗震概念设计的思想已得到了充分的反映，已在规范中明确的提出了重要的抗震概念和相应的措施和规定。

7.6 抗震设计的基本要求

随着对抗震设计认识的深化，当今抗震设计的一个突出特点，就是强调概念设计。也就是说在抗震设计中应满足下列基本要求：

7.6.1 合理选择场地

因地震造成的建筑物破坏，除了地震动直接引起的结构振动外，还有场地条件的原因。例如，地震引起的地表错动与地裂，地基土的不均匀沉降，滑坡和砂土液化等。因此必须重视场地选择。具体的选择要求是：

a) 宜选择对建筑物抗震有利的地段，即选择开阔平坦的坚硬场地土，或密实的中硬的场地土地段。尤其需要指出，框架等具有一定柔性的结构，若能选择较坚硬的场地土，可使地震作用大大降低。

b) 宜避开对建筑物抗震不利的地段，如软弱场地土、易液化土、条状突出的山咀，高耸突出的山丘、陡坡、河岸等等。当无法避开时，应采取适当的抗震措施，如对软弱场地土采取打桩措施。海城地震灾害表明，当采用钢筋混凝土桩基时，结构抗震能力有明显提高。

c) 不应在危险地段，建造甲、乙、丙类建筑物。危险地段一般是指地震时可能发生地表错位的发震断层地段。

7.6.2 地基和基础设计宜符合下列要求：

1) 对于同一建筑单元，不宜建立在性质截然不同的地基上，不宜采用不同类型的基础，不宜埋置在不同的标高上。

2) 当地基有软弱粘性土、可液化土、严重不均匀土层时，宜加强地基的整体性和刚性。

7.6.3 建筑物的平、立面布置要求

建筑物平、立面布置宜规则、对称，质量和刚度分布宜均匀或均匀变化，避免楼层错层。

当体型较复杂时，一般应设置防震缝，将其分成规则的结构单元。在设置

防震缝时，应注意同伸缩缝与沉降缝协调布置，并满足缝宽要求，以免地震时发生碰撞。

7.6.4 结构体系的选择

应根据建筑物的重要性、设防烈度、场地条件、房屋高度、地基基础材料、施工状况等，结合技术经济条件综合考虑，合理选择结构体系。抗震结构体系通常应注意下列要求：

结构体系应有明确的计算简图；

结构体系应有多道抗震防线；

结构体系不仅要有足够的强度，而且要有良好的变形能力和耗能能力；

注意整体结构刚度、强度的协调，既要避免薄弱部位，也要避免不适当的局部加强；改善构件的变形能力，力求避免脆性破坏；加强构件连接和结构整体性，适当加强支撑体系，以保证结构的整体性和整体稳定性。

7.6.5 注意非结构构件的抗震要求，包括非结构构件（如女儿墙、围护墙、雨蓬、门脸、封墙等）应与主体结构有可靠的连接和锚固，注意填充墙和框架的连接。

7.6.6 注意选择良好的材料。

7.7 火力发电厂主厂房结构抗震设计的主要原则

在抗震的概念设计重于地震作用计算的抗震设计理念下，火力发电厂土建结构抗震设计绝不单是土建结构专业的任务，而是各个工艺专业设计中均应贯彻的重要原则。项目经理在工程设计中应组织、协调工艺专业的布置尽量满足抗震概念设计的要求。

在《建筑抗震设计规范》（GB50011—2001 2008 年版）实施后，《火力发电厂土建结构设计技术规程》报批稿（2010 年 7 月版），对发电厂抗震设计提出了相关的具体规定，与结构选型和结构体系有关的规定有：

“13.1.3 ……”

对于按有关规定进行地震安全性评价的发电厂，抗震设防烈度应按批准的地震安全性评价报告确定。”

“13.1.8 发电厂多层建（构）筑物，不宜采用单跨框架结构。当采用单跨框架结构时，应采取提高结构安全度的措施。”

“13.1.9 地震区主厂房结构选型应综合考虑抗震设防烈度、电厂的重要性以及厂房布置等条件，宜优先选用抗震性能较好的钢结构。常规布置的主厂房（指前煤仓布置的钢筋混凝土双框架结构）结构选型可按以下原则确定：

1 主厂房采用钢筋混凝土结构时，6 度及 7 度 I~II 类场地时，宜采用钢筋混凝土框架结构；7 度 III、IV 类场地时，钢筋混凝土结构宜选择框架—抗震墙或框架—支撑体系，也可采用钢结构。

2 8 度 II~IV 类场地时，主厂房宜采用钢结构，结构宜选择框架—支撑体系。

3 单机容量 1000MW 及以上时，主厂房宜采用钢结构，结构体系宜选择支撑框架或框架—支撑体系。当采用钢筋混凝土结构时应进行专门论证。”

“13.1.10 结构布置应重视抗震概念设计的要求，厂房结构应与工艺专业统一规划，平面和竖向布置宜规则、均匀、合理布置结构抗侧力体系和结构构件，提高结构体系的抗震性能。

1 地震区主厂房框架平面布置应控制局部凹凸变化，不宜采用集中控制楼插入框架的平面布置。不应采用局部单排架布置。……。

2 结构体系宜有多道防线，……。

3 主厂房不宜采用错层结构，尽可能避免形成结构薄弱层。

4 ……。”

“13.1.11 主厂房钢筋混凝土框架应采用现浇结构。”

7.8 汶川大地震概况（供参考）

汶川大地震给地震区人民造成了生命财产的巨大损失，国家和全社会为抗震救灾付出了巨大的代价。此次震害充分说明了地震的突发性、不可预知性和巨大的破坏性，在此将汶川大地震概况摘录于后，以增强我们在工程设计中做好抗震设防的责任心，也可看出只要按现行的《建筑抗震设计规范》设计的建筑，其抗震能力已达到了预期的设防目标。

下述汶川大地震概况摘自《汶川地震 建筑震害调查与灾后重建分析报告》
2.《汶川大地震——成都、都江堰所见、所学、所想》 作者 上海江欢成建筑设计有限公司

“2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 2 秒，汶川爆发大地震，北京、上海强烈

震感。这次特大地震，震中在四川汶川映秀镇，震级 $M_s=8.0$ ，震源深 12km，主震在 100s 内使地下岩体二次破裂，破裂带自西南的四川康定到东北的陕西略阳，长 620km，宽 60km。破裂在离震源 150km 的北川出露，释放能量 $6.3 \times 10^{16} \text{J}$ ，相当于 1000 多颗广岛原子弹。1400 年的古城汶川遭破坏。其中破坏最严重的是北川、映秀，遇难 6.9 万多人，失踪 1.8 万人，受灾 4500 万人。汶川地震的直接成因，是印澳板块以每年约 5cm 的速率向北推挤欧亚板块，受阻于四川盆地，250 年的能量积聚（1748 年 2 月 23 日，该处 6 级地震）终于释放，造成龙门山构造带破裂。

作为比较：唐山地震，为 1976 年 7 月 28 日凌晨 3 时，7.8 级，震源深 16km，主震 23s，能量相当于 400 颗广岛原子弹，24.2 万人遇难。

阪神地震，1995 年 1 月 17 日 5 时 45 分，7.2 级，震源深 16~20km，释放能量是汶川地震的 1/30，遇难 6000 人。

成都和都江堰的地震烈度有多大？

多数的估计是：映秀北川 11~12 度（映秀、北川的建筑物 95% 已倒塌），茂县、都江堰、绵竹 8~9 度，汶川、彭州、什邡、青川 8 度，德阳、绵阳、广元 7 度，成都 6~7 度。

成都的设防烈度为 7 度，如果当时已达到 7 度，即地面加速度已是 0.10g，而按小震 0.035g 进行结构的强度计算，震后表现良好。同样，都江堰的设防烈度也是 7 度，如果评定当时已达到 8~9 度，即地面加速度已是 0.2~0.4g，而按 0.035g 设计的结构，也有 70% 的房子可修复。说明我国的抗震规范，对“小震不坏”的设计已相当充分了。“

7.9 汶川地震中江油电厂建构筑物震害概述（仅供参考，摘自电机工程学会电力土建专委会《电力土建信息》2008 年第四期）

江油位于汶川的东北方向，直线距离约 100 多公里。巴蜀江油发电厂包括 2×330MW（#30、#31 机）燃煤发电机组和 2×300MW 燃煤发电机组。2×330MW（#33、#34 机）的建构筑物于 20 世纪 80 年代设计建造的，建构筑物的抗震设防烈度为 6 度，设计依据《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11—78)；2×300MW 机组的建构筑物是于 2003~2005 年设计建造的，设计依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)，建构筑物的抗震设防烈度为 7 度。

2008 年 5 月 12 日汶川发生里氏 8.0 级大地震后，巴蜀江油发电厂的部分建构筑物受灾情况严重，下面就具有电厂特性的建构筑物的震害情况作简单介绍。（在西南院的原文中，未见对电厂区实际烈度的描述。据有关资料，电厂遭受的实际烈度应在 7 度以上）

a) 2×300MW 机组汽机房屋面网架破坏情况

汽机房跨度 27m，设有两台 75 吨/20 吨轻级工作制吊车。网架横断面为双坡型式，网架单元为正放四角锥。网架支座置于钢筋混凝土托梁和柱牛腿上。

地震后 #33 机汽机房屋面网架整体垮塌，除部分散落于检修跨的地面及吊车上外，其他均掉落于运转层平台上，汽机等主机已被掉落物覆盖，掉落的网架已完全解体。

网架支座底板下的过渡板与预埋件焊缝完好，网架在支座处的破坏主要是底板与过渡板之间的连接螺栓被拉出，网架的其他部位为螺栓球节点处的螺栓被剪断。支承网架的混凝土构件（A、B 列柱及牛腿托梁等）以及固定端山墙结构完好，连接网架的预埋件也完好，未见任何脱落现象。

#33 机汽机房屋面网架垮塌主要原因为超过预期的巨大地震力作用。建议今后网架设计中应注意：网架结构在电厂主厂房的受力中要承受框架与排架柱之间的不平衡力，应按空间结构进行整体分析，而网架承包商通常仅进行单体结构的局部分析。网架承包商为了中标，常常压低报价，而在施工图设计计算时以满应力设计。

b) 主厂房框排架

5.12 大地震中，主厂房框架结构（注：在西南院的资料中未说明为双框架或单框架结构，从土规报批稿的说明中知主厂房框架应 为双框架）基本完好，仅有按 6 度设计的 330MW 机组主厂房有局部破坏：部分用于支承汽机房平台梁的框架柱上牛腿出现混凝土压碎现象，在汽机房运转层平台处部分框架柱出现混凝土脱落，少部分楼面钢梁移位，变形缝处吊车梁错位，轨道断裂，以及填充墙破坏等。

主厂房 A 列柱地震时位移较大，尤其在检修跨。经过检测，33#汽机房靠变形缝区域的 A 列柱明显向北倾斜，最大达 60mm(以柱脚至吊车梁牛腿下部共 21.25m 计),同时，吊车梁在变形缝错位严重，近 60mm，致使行车轨道在该处完

全断裂。对于因检修吊物孔造成 A 列柱变形不协调（即位于检修跨处的 A 柱，无汽机运转层平台的约束），建议今后工程设计中应考虑采取适当措施。

c) 2×330MW 机组烟囱

2×330MW 机组 240/7m 烟囱采用半套筒式烟囱，90m 以下为套筒式烟囱，90m 以上为普通单筒式烟囱，两台 330MW 机组共用一座烟囱。

地震后烟囱内筒 50~90m 的陶土砖砌体垮塌，将 18.2m 标高处的烟囱内外筒连接平台压垮后坠落至地坪。

2×300MW 机组的 240/7m 烟囱采用单筒式烟囱，建造更早的已停产的 50MW 机组亦采用钢筋混凝土单筒式烟囱，5.12 地震后均未发现破坏现象。两种烟囱震害对比，说明半套筒式烟囱由于地震时内外筒变形不协调，造成相互碰撞而发生内筒垮塌。因此，有抗震要求的烟囱，今后工程设计中不宜采用半套筒式烟囱。

d) 震害综述

通过对电厂 2×330 机组生产区一百一十多各建构筑物震害的调查统计，基本完好的主要为钢结构支架、钢筋混凝土构架、水池，轻微破坏的主要为钢筋混凝土框架、栈桥，中等破坏的主要为砖混及钢筋混凝土排架结构；发生严重破坏的主要为砖混结构。

8 设计和审查中常遇到的问题

8.1 主厂房结构布置及选型

在发电工程可研阶段，结构专业的主要任务之一就是确定主要生产建构筑物的结构选型。所谓结构选型是指选择建筑结构的主要用材及确定合理的结构体系。由于各种材料类型的结构特性、适用条件及造价指标相差很大，因此，正确的结构选型对保证建筑使用功能和控制工程造价是非常重要的。在电厂众多的生产建（构）筑物中，大部分结构的选型已很成熟、定型，变动性不大，但主厂房因其复杂的使用功能要求及庞大的工程量，它的选型对工程造价影响较大，应是考虑的重点。

8.1.1 主厂房结构选型

8.1.1.1 在主厂房结构用材的选择中，控制造价是考虑的主要因素。与全钢结构主厂房相比，钢筋混凝土结构有一定的优点，且造价相对较低。新建电厂的

主厂房除因受抗震设防制约需采用钢结构外，预计仍将以钢筋混凝土结构为主。除《火力发电厂设计技术规定》及《火力发电厂土建结构设计技术规程》对主厂房的结构选型均有规定外，在 2010 年版的“100 条”中相关规定如下：

“9.1.1 主厂房结构选型与结构体系选择

发电厂主厂房结构形式及结构体系应根据项目所在区域的抗震设防烈度、建筑场地类别按表 1 中的规定选择。(表 1 略)”

当为扩建工程且主厂房连续扩建时，新老主厂房的结构选型宜一致。

8.1.1.2 上述规定和《火力发电厂土建结构设计技术规程》类似的有关规定是针对常规布置的主厂房结构选型，即指前煤仓布置的双框架结构的。对于单框架结构，并未另作规定。因单框架结构的冗余度比双框架结构低，应结合工程的地震烈度、地基条件、场地特性等进行技术经济比较（当地基不好时，技术经济比较应计入地基处理的费用）后确定其选型。原则上单框架布置时采用钢筋混凝土结构的条件比双框架更为严格。

8.1.1.3 主厂房结构选型，对于非地震区的电厂来说相对比较简单。但是对于地震区的电厂，特别是地震烈度及场地条件处于结构选型分界处时，应进行必要的论证，尤其在初步设计阶段如能提出论述充分、附有必要计算结果的有说服力的主厂房结构选型的专题报告，便于推荐方案的顺利审查通过，也反映了设计单位的技术和管理水平。

8.1.2 地震区主厂房框架结构体系的选择

上世纪 90 年代，为了降低火力发电厂工程造价，各电力设计院对主厂房工艺系统的布置做了大量优化工作，并取得了很大的成绩。一些布置紧凑、节省投资的布置方案已在国内大量工程中被采用。但是，从抗震概念设计的角度看，有些方案对结构的抗震是不利的。在今后工程设计前期，选择主厂房框架结构的型式时，应予充分的注意。

5.12 汶川大地震后，《建筑抗震设计规范》2008 年版 6.1.5 条关于多、高层单跨钢筋混凝土框架适用范围的规定（在《建筑抗震设计规范》GB50011—2010 中，相应的规定更具体），在相当长的一段时期内困扰着结构设计人员对框架结构型式的选择，也使工程审核处于无所适从的境地。但是，经过广大电力工程结构设计人员的不断思考、交流、探索，在主厂房抗震设计的一些基本问题上

取得了共识，并反映在《火力发电厂土建结构设计技术规程》中。使因电力生产工艺要求而造成的主厂房结构的抗震设计，有了相应的专业标准可以遵循。在初步设计阶段确定主厂房布置方案时，下列几点应予充分注意：

a) 结构的抗震问题不应仅是结构设计人员的任务。国内外震害的惨痛教训告诉人们，抗震概念设计比结构的抗震计算更为重要和有效。震害表明，平面不规则、质量与刚度偏心的结构在水平地震作用下，将产生扭转效应而导致结构的严重震害。因此在选择主厂房布置方案时，主体工艺专业应将结构的抗震要求作为考虑的重要因素，以使受工艺布置制约本已属不规则结构的主厂房的平面和竖向布置尽可能规则、均匀，并对结构专业需布置抗测力体系进行协调。

b) 当采用双框架布置方案时，不宜将控制楼插入煤仓间，使框架结构沿主厂房纵向大部为双框架，局部为单框架的布置。

c) 当采用单框架布置方案时，不应将控制楼插入框架，使主厂房纵向大部为单框架与汽机房外侧柱形成框—排架结构，局部为单排架的布置。

8.1.3 对规范定为不宜采用的结构选型应进行专题论证

5.12 大地震后，在《建筑抗震设计规范》2008 年版颁布后不久审查的工程，所采用的单框架结构方案，在审查时基本上均被定为“不宜采用”，但是在业主的坚持下，往往无法改变单框架的布置方案，有的设计院在为业主服务好的理念支持下，对既定结构方案进行了抗震分析，为了满足《抗规》的抗震计算限值的要求，不屑加大柱子断面，提高结构的配筋率，以加大结构的抗震安全度，使采用单框架的经济性无形中打了个大折扣，技术上已不合理。

在我院今后承担的工程中，当工程场地地震烈度较高、地基条件较差的情况下，主厂房结构仍拟采用规范定为不宜采用的结构型式时，建议在初步设计阶段对拟采用的主厂房结构体系按空间模型进行整体分析，并提出结构分析的专题报告，以供审查单位审定。

8.2 地基处理

8.2.1 可研报告中应避免的疏漏

地基方案的选择是可研阶段土建结构专业应解决的另一主要问题。可研阶段的工程地质勘察报告是地基选型的依据，也是工程审查的依据。当拟选厂址的场地条件比较复杂、总平面布置有可能需移动优化时，勘察范围宜适当加大，

以供总图设计之需。在审查过的工程中，曾遇到有工程的主厂房区已全部或部分超出了勘察范围（推测设计院怕曝露此问题，在该工程的钻孔布置图上未套总平面布置方案，使问题不易发现），在对钻孔坐标及总平面布置图的坐标核对后发现主厂房区已超出了勘察范围。后经询问知，厂址在总平面优化时已经移动又来不及补勘。出现这种情况虽一般不致以造成厂址的颠覆，但这种差错是应避免的。

还有的工程缺少本期工程场地的地质资料，仅提供前一期工程且又不能满足深度要求的地质资料，这种情况在正式的可研报告中也是应避免的。

8.2.2 地基条件是总平面布置应考虑的重要因素

在电厂建设中，地基处理是影响工程造价的重要因素之一。也是土建结构专业为降低工程造价可作的主要工作，应作为可研阶段的重要工作来做。结构设计人员应配合总平面布置，建议尽量将主要建（构）筑物布置在地质条件较好的地段，以减少地基处理费用。在我院过去所做的工程中，不乏总图、岩土、结构设计人员密切配合，充分考虑地质条件做出较好的总平面布置方案的实例。

8.2.3 地基基础选型宜进行专题论述

根据可研阶段工程地质勘察报告，当需要进行地基处理时，应选定地基处理方案，并在可研报告中进行必要的论述。着重说明拟选的处理方案对本工程地基的适用性、预期效果、施工进度、对环境的影响及工程费用等。当有多种方案适用于本工程时，应对两种及以上的方案技术经济进行分析对比，并提出专题报告以供审查时选定。

在审查过的工程中，有不少工程可研报告中对地基处理的选型论述深度不够，仅对地基处理方案进行一般性的叙述，缺少必要的技术经济分析作支撑，因而无法提出明确的地基处理首选方案。使可研的审查难于对具体的地基处理方案进行审定，使得该在可研阶段确定的问题推到初步设计时解决。

8.3 烟囱

8.3.1 早期防腐烟囱设计无章可依

由于我国烟气脱硫处理设施的应用较晚，湿法脱硫烟气对烟囱的腐蚀状况的调查研究资料也少。国家标准和相关行业标准对脱硫烟气烟囱的设计无具体规定。前几年，国内各设计单位主要根据各自的经验和国内外参考资料进行脱硫烟

气烟囱的设计。各种型式烟囱的造价相差悬殊，在国外广为采用的烟囱型式和防腐材料往往造价较高。因此，早期设计的脱硫烟气烟囱型式是多种多样的，设计审查时同样没有具体的标准可遵循，较多的尊重业主的选择，使造价低廉但防腐能力低下的烟囱型式被一些工程所采用。

从设计概念来说，已采用的各种烟囱，理论上均可用于排放湿法脱硫烟气。但是，此前在选择烟囱型式考虑其防腐性能时，往往忽略了施工质量的可控性。无论耐酸砖内衬的普通烟囱还是贴泡沫玻璃砖的钢排烟筒，大量块材的铺砌质量均是无法保证的。以用于 $2 \times 300\text{MW}$ 机组的 $210/\phi 7.5$ 的钢排烟筒为例，筒壁的展开面达近 5000m^2 ，需贴的玻璃砖近 15 万块、需充填密实的砖缝约 50 多公里，施工又是在工作条件十分困难质量难于监控的高空进行的。因此，此类烟囱在施工中出现一些疏漏实在是无法避免的。

8.3.2 脱硫烟气烟囱设计的行业标准已实施

湿法脱硫烟气烟囱经多年运行，各型烟囱的防腐性能的优劣得到充分检验，为脱硫烟气烟囱的设计积累了宝贵的经验和教训。中国电力工程顾问集团有限公司在总结目前火力发电厂烟囱设计经验的基础上，制定了《火力发电厂烟囱设计导则》（Q/DG 1-T001—2009），并已于 2009 年 6 月实施，导则对应用于不同烟气条件的各类型烟囱的设计作了原则性的规定。

8.3.3 烟囱防腐设计必须按标准执行

随着环保压力的加大，国家环保部门已明令禁止在脱硫系统中装设旁路烟道。使得烟囱必须在设计规定的腐蚀环境下长期运行。今后烟囱选型、防腐材料和构造设计应根据所排放的烟气腐蚀性等级严格的按照《烟囱设计规范》、《火力发电厂设计技术规程》、《火力发电厂土建结构设计技术规程》《火力发电厂烟囱设计导则》进行。

由于防腐烟囱类型可有多种选择，其造价相差较大。因此，《在火力发电厂可行性研究报告内容深度规定》中明确规定“对于同步建设烟气脱硫装置的工程，应根据工艺系统和环保要求，说明拟选用的烟囱内衬结构型式，必要时进行专题论证。”