

---

# 百万机侧煤仓主厂房结构选型探讨

山东电力工程咨询院 于军 席爱斌

**【内容摘要】** 某电厂根据工艺专业提出的主厂房侧煤仓方案、前煤仓方案、侧煤仓无除氧间方案，对主厂房框排架形式采用钢筋混凝土结构或钢结构方案采用空间分析手段从计算分析、截面设计等方面进行专题论述，并结合本工程的特点，研究适合本工程的主厂房结构方案侧煤仓方案。

**关键词：**侧煤仓 钢筋混凝土结构主厂房 前煤仓 钢结构主厂房 空间计算分析 工期比较 技术经济比较

## 概述

某电厂一期工程为  $2 \times 1000\text{MW}$  机组超超临界机组，预留再扩建条件。

厂址自然条件如下：

厂址区地层结构简单，覆盖层厚度差别较大；第四系分布广泛，局部地区尚隐伏有第三系地层分布；持力层为花岗岩，主厂房采用天然地基。

地震基本烈度为 7 度。设计基本地震加速度值  $0.1156g$ ，地震动反应谱特征周期  $0.37s$ 。

主要建筑物区建筑场地类别 I 类。

50 年一遇基本风压为  $0.6\text{kPa}$ 。

## 主厂房结构布置：

**方案一侧煤仓方案：**工艺专业布置特点：通过对汽机房内设备的布置优化，将汽机房的跨度由  $34\text{m}$  缩至  $30\text{m}$ ，除氧器露天布置在除氧间屋顶，煤仓间布置在两炉之间。两机合用一煤仓间，合用一磨煤机检修通道，每台机组设六个煤斗，采用侧煤仓方案，主厂房区域布置更为紧凑，A 排至烟囱的距离减少，主厂房占地面积减少。另外汽轮机与锅炉之间距离减少，四大管道长度减少，节约投资。

土建专业突出的优点是着重解决了钢筋混凝土结构在主厂房布置中错层、异型节点受力复杂，薄弱环节较多的抗震问题。主厂房采用二列式布置，汽机房、联络平台、除氧间组成横向框排架体系，纵向框架体系；联络平台与汽机房连成一体，增加了汽机房结构的整体性和刚度。汽机房 A 列排架采用现浇混凝土梁柱，除氧间框架采用现浇梁柱，汽机房内平台及除氧煤仓间各层楼屋面板有通风要求区域的及除氧器检修平台采用钢格栅，其他采用钢梁+现浇钢筋混凝土板的结构型式（简称组合楼、屋面板）不采用压型钢板底模。运转层及以下汽机房固定、扩建端采用现浇混凝土柱，砖墙封闭，运转层以上采用钢柱、钢支撑体系挂复合压型钢板；汽机房屋面采用实腹式屋面钢梁、钢支撑体系自防水自保温压型钢板屋盖。

侧煤仓间模块配合工艺布置在两炉之间，为独立结构体系；采用独立的不等跨两跨钢筋混凝土纵横框架结构体系，中间柱顶至煤斗梁层，C8\C9 轴框架为煤仓间转运站部分，高度较高，柱宽适当加大，使结构自振周期控制在规范允许范围内，确保结构可行，12 座原煤斗采用支承式受力结构，通过支承梁将煤斗荷重传至  $29.50\text{m}$  层框架上。该层框架梁截面较高，按深受弯构件设计并采取构造措施。

煤仓间与锅炉间在运转层设侧平台布置电子设备间；平台梁一端滑动于锅炉钢架，另一端简支于煤仓间框架。皮带层屋面采用钢结构轻型封闭支撑于楼面梁上，减少煤仓间容积，降低框架计算高度，减小结构荷载，达到节约投资的目的。楼板采用钢梁+现浇钢筋混凝土板的结构型式（简称组合楼、屋面板）不采用压型钢板底模。输煤皮带层以上采用钢结构体系轻型封闭。集控室位于煤仓间和除氧间之间，一端与除氧设滑动支座、另一端与煤仓间的边柱铰接，楼板采用次梁楼板整体现浇混凝土结构体系。电子设备间布置在炉侧平台上。炉侧平台梁一端与煤仓间设滑动支座、另一端锅炉钢架边柱铰接。

如果采用跨度  $16.5\text{m}$  的单跨钢结构结构体系，将有两种方案：

方案一：结构体系是纵向铰接、横向刚接的框架和各层楼、屋面组成的空间结构体系。用钢量大，在

---

目前钢材价格居高不下的情况下，造成材料的浪费，投资的增加。

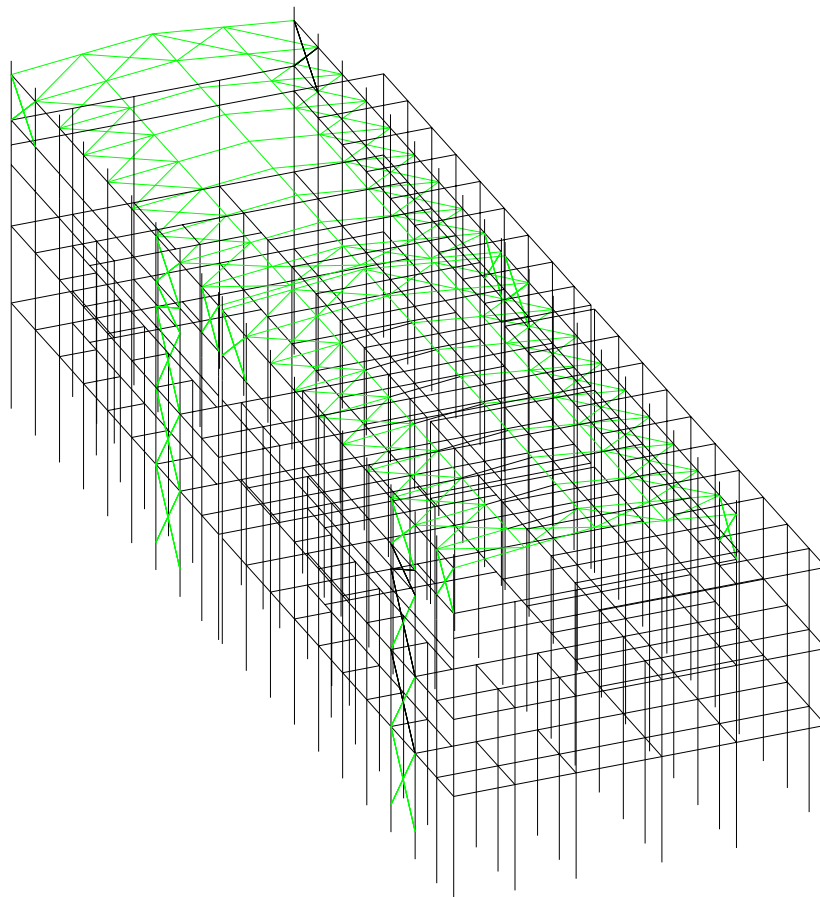
方案二：结构体系是纵、横向铰接框架与锅炉炉架联合空间结构体系，需加设必要的支撑杆件，以确保结构的稳定并抵抗侧向力，本方案机务布置已经优化到空间最小了，支撑的布置将影响磨煤机系统的布置。这种体系将通过支撑杆件将一部分横向水平力传至炉架，由炉架传至基础，另一部分横向水平力通过煤仓间框架自身的抗侧力系统传给基础。本方案需要与锅炉联合计算，设计配合工期较长，还因为目前尚未了解锅炉结构和侧煤仓钢结构连接后其地震反应的相互影响作用，暂不建议锅炉结构和侧煤仓钢结构连接。由于上述原因，本工程不推荐采用。

**方案二前煤仓方案：**主厂房布置采用三列式布置，汽机房、除氧、煤仓间组成横向框排架结构体系，B、C、D列纵向由柱梁刚接组成框架结构体系；汽机房A列纵向采用现浇混凝土梁柱设柱间支撑结构体系，除氧、煤仓间框架采用现浇梁、柱结构体系，楼板采用钢梁+现浇钢筋混凝土板的结构型式（简称组合楼、屋面板）不采用压型钢板底模。运转层及以下汽机房固定、扩建端采用现浇钢筋混凝土梁、柱结构体系，填充墙封闭，运转层以上采用钢柱、钢支撑体系挂复合压型钢板；汽机房屋面采用钢梁、钢支撑体系上铺复合压型钢板自防水屋盖；煤仓间输煤皮带层以上采用钢结构体系复合压型钢板封闭。集控楼位于两炉之间，采用现浇混凝土框架结构体系，每层端部与煤仓间边柱铰接。

**方案三侧煤仓方案：**汽机房采用独立排架式布置，外侧为除氧间框架结构；纵向为框架支撑体系；运转层以下横向为联络平台、汽机房外侧梁柱组成的框架，以上为排架；联络平台，与汽机房连成一体，增加了汽机房结构的整体性和刚度；除氧间十二榀框架柱与汽机房外侧排架柱连成框架，也增加了整体刚度。汽机房A、B列排架、联络平台、除氧间均采用现浇混凝土梁柱。其楼面、屋面、墙面同方案一的做法。侧煤仓结构形式同方案一。

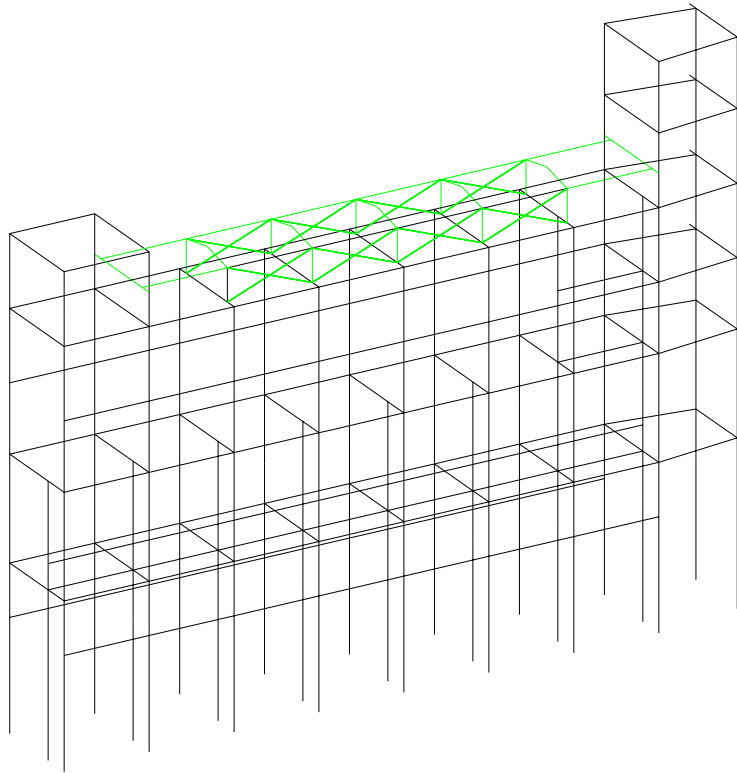
#### 计算分析

对于本工程的三个方案分别进行了空间三维建模，空间计算分析，考虑空间地震作用，计算结果更加合理精确，计算模型见下图：

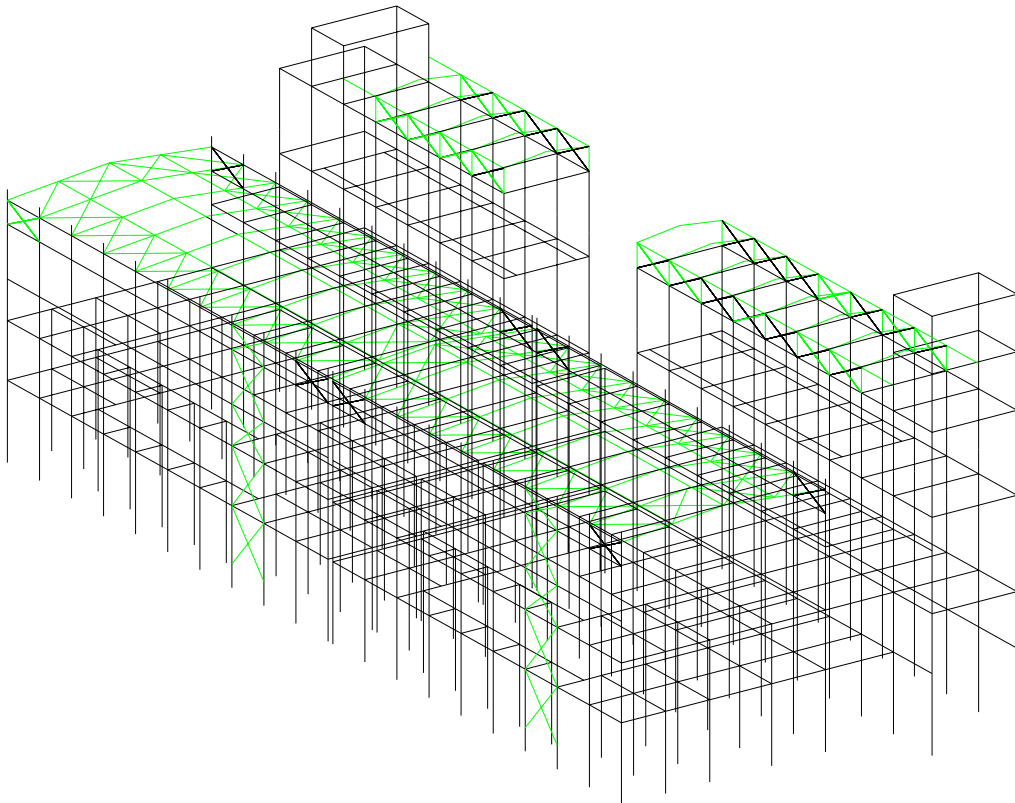


---

方案一 汽机房、除氧间空间杆系计算模型

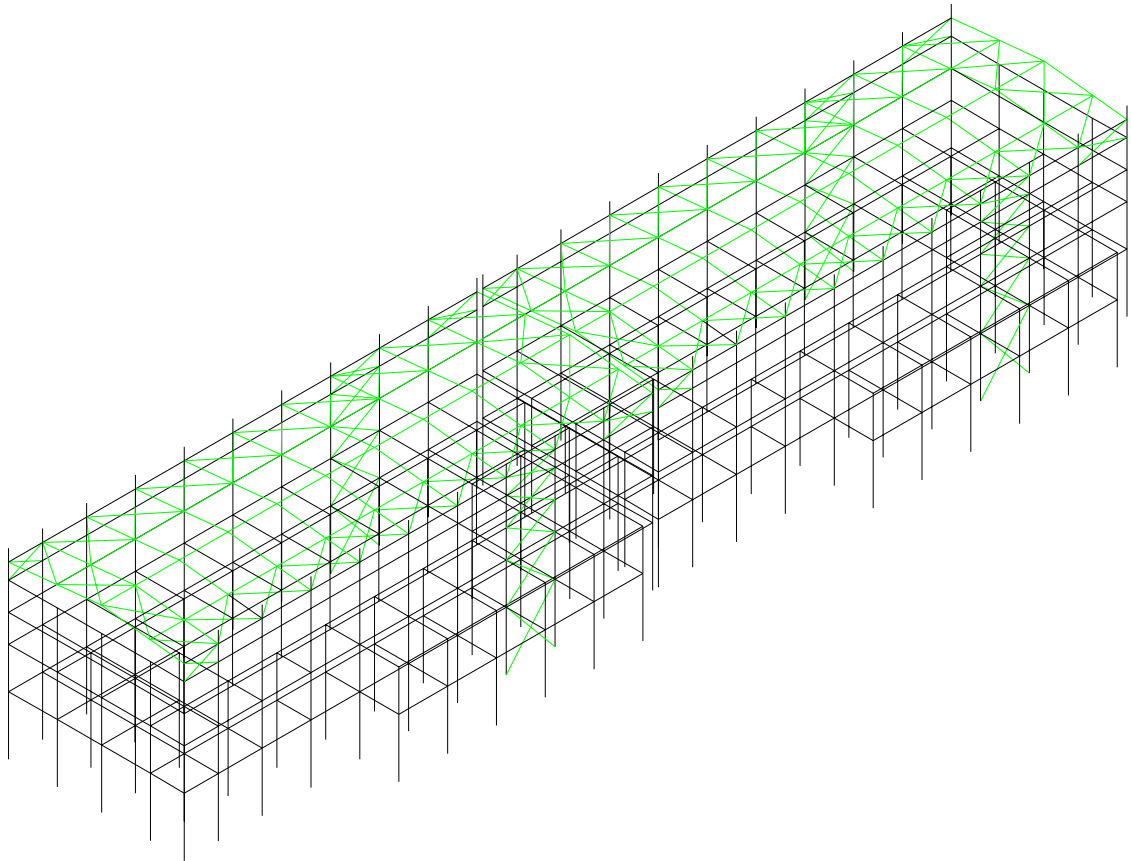


方案一 侧煤仓空间杆系计算模型



方案二 汽机房、除氧煤仓间空间杆系计算模型

---



方案三 汽机房空间杆系计算模型

主厂房主要尺寸、截面选型优化结果比较表

名称		方案一 (钢筋砼方案)	方案二 (钢筋砼方案)	方案三 (钢筋砼方案)	钢结构 方案(模式同 方案二)
汽机房	汽机房跨度	30m	30m	36m	30m
	汽机房柱距	7m、9m、10m	10m	7m、9m、10m	10m
	档数	2+2+15=19	19	2+2+15=19	19
	汽机房长度	183.5m	191.5m	183.5m	191.5m
	汽机房高度	34.9 ~ 37.9m	34.9 ~ 37.9m	37.7m ~ 40.4	36 ~ 39m
除氧间	除氧间跨度	9.5m	9.5m		9.5m
	柱距	7m、9m、10m	10m		10m
	除氧层高度	26m	26m		26m
煤仓	煤仓间跨度	16.5m ( 11.5+5.0 )	12.5m	16.5m ( 11.5+5.0 )	12m

名称		方案一 (钢筋砼方案)	方案二 (钢筋砼方案)	方案三 (钢筋砼方案)	钢结构 方案(模式同 方案二)
间	柱距	10m	10m	10m	10m
	皮带层高度	46.5m	42.5m	46.5m	42.5m
主 厂 房 柱 断 面	汽机房外侧 A 列 排架柱	600 × 1200	800 × 1800	800 × 1800	H500 × 1200
	汽机房除氧间 B 列框架柱	600 × 1500	800 × 1800	800 × 1800	H500 × 1200
	除氧间 C 列框架 柱	600 × 1200	800 × 2000		箱型 1000 × 1000
	煤仓间 D 列框架 柱		800 × 1800		箱型 1000 × 1000
	侧煤仓间边柱	800 × 1600		800 × 1600	箱型 1000 × 1000
	煤仓间中柱	1000 × 1600		1000 × 1600	
	煤仓间转运站 C9\C8 柱	1000 × 1600		1000 × 1600	
主 厂 房 横 向 框 架 梁 断 面	除氧间 8.600m 层	600 × 1500	700 × 1600		H500 × 1200
	除氧间 17.000m 层	600 × 1600	700 × 1800		H500 × 1300
	除氧间 26.000m 层	600 × 1600	700 × 1800		H500 × 1300
	除氧间除氧器梁	600 × 2400	700 × 2400		H600 × 1600
	煤仓间 17.000m 层	700 × 1600	700 × 1800	700 × 1600	H500 × 1500
	煤斗梁	800 × 3600	700 × 3200	800 × 3600	H700 × 1800
	输煤皮带层	700 × 1700	700 × 1800	700 × 1700	H500 × 1300

### 混凝土结构主要材料的选用

本工程自然条件好,框架抗震等级为二级,抗震设防烈度 7 度,现浇钢筋混凝土框排架结构计算容易满足,经过多方案优化计算分析,选用 C45 混凝土用于除氧、煤仓间底部柱轴力较大的部位,其它柱及框架梁采用 C40、C35 等多级混凝土。主要受力钢筋采用 HRB335。由于高强混凝土对原材料技术要求高,施工过程易产生砼收缩裂缝,本阶段在优化计算满足的情况下,没有采用,如果工程自然条件较差,可考虑采用高强混凝土。

### 主厂房楼面、屋面结构体系:

汽机房内平台及除氧煤仓间各层楼板一般采用压型钢板作底模、上浇钢筋混凝土板的结构型式,也有采用钢筋混凝土梁、板结构型式。

具体有五种做法:(1) 压型钢板仅作为永久性模板,不考虑其受力,钢梁与混凝土板间无连接件,钢梁按纯钢梁设计,不考虑钢梁与混凝土板的共同作用。(2) 不考虑压型钢板受力,钢梁与混凝土板间通过剪力件连接,以保证其共同受力,钢梁按组合钢梁设计。(3) 不设压型钢板底模,钢梁与混凝土板

间通过剪力件连接，以保证其共同受力，钢梁按组合钢梁设计。（4）采用特种压型钢板底模，并考虑其受力性能，板底不配钢筋，钢梁按组合钢梁设计。（5）采用现浇钢筋混凝土梁、板。

做法（1）由于钢筋混凝土板与钢梁不能共同作用，对结构体系的稳定不利且钢梁耗钢量相对较大，在工程中已很少采用；做法（2）在工程中应用最多，其优点是受力合理，施工方便，外表美观，综合经济指标较好；做法（3）在工程中应用较多，其优点是受力合理，节约投资，但施工需支模板；做法（4）仅在个别工程中采用（如河北上安电厂、鲁能聊城五期等），由于电厂震动设备较多，其结构耐久性有待时间验证。做法（5）因为百万机组，主厂房体量大，层高高，支满堂脚手架难度大，周期长，不适合。

钢—混凝土组合楼面是较优的结构型式。组合梁是充分利用钢与混凝土两种材料和结构特性联合成为整体而共同工作的一种结构形式，为保证组合截面能充分发挥作用，在梁的上翼缘上焊接连接件，通过连接件使钢梁与钢筋混凝土板联结成整体而共同工作，形成了组合梁。组合梁整体截面承受全部荷载，相对非组合截面钢梁受拉部分面积加大，中和轴上移，由于钢筋混凝土板的共同工作，钢梁上翼缘的面积可以减少，可以提高结构的强度和刚度，节约钢材，降低造价约 20%，具有较显著的技术经济效果。从施工方面看，因为采用了钢梁，可以吊模板浇制混凝土板，与纯钢筋混凝土结构相比，节约了脚手架，缩短了施工工期。因为百万机组，主厂房体量大，层高高，支满堂脚手架难度大，周期长，采取上述方案可加快施工进度；在设计方面，采用钢梁可减少结构荷载，降低主框架梁柱截面尺寸，节约工程投资。在工程中也得到了越来越广泛的应用，在我院设计的 330MW、600MW 机组工程中广泛采用。

本工程推荐采用（3）不设压型钢板底模的，钢梁与混凝土板组合结构楼屋面板体系。

#### 对于主厂房，汽机房屋面概括起来有三种做法：

（1）采用自防水复合压型钢板，这种做法安装简单、施工速度快，自重轻，但钢板自身质量和施工质量要求高。

（2）压型钢板上铺保温层，再做防水层，这种做法需要加密檩条，否则压型钢板刚度小、易变形，防水层的质量往往不易保证，结构耐久性差。

（3）以压型钢板做底模，上浇混凝土，再加保温防水层，这种做法屋面刚度好，结构耐久性好，但屋面自重重大。

为了减少上部荷载，减少施工周期，降低造价，推荐采用第一种做法。

#### 钢筋砼框架结构与钢结构主厂房工期比较

现阶段，暂无百万机组施工工期资料进行比较，只能用 600MW 机组进行比较，根据以往电厂建设调研，2×600MW 机组工程钢结构主厂房比钢筋混凝土主厂房自浇第一罐混凝土至主厂房封顶工期一般缩短约 3 个月，华能德州电厂三期 2×660MW 工程和聊城电厂新建 2×600MW 工程主厂房也证实了，同时期比较：2000 年初，华能德州电厂三期工程钢结构主厂房自浇第一罐混凝土至主厂房封顶工期为 17 个月，聊城电厂新建工程钢筋混凝土主厂房自浇第一罐混凝土至主厂房封顶工期为 20 个月，相差约 3 个月。近期国电常州电厂一期工程钢结构主厂房自浇第一罐混凝土至主厂房封顶工期为 10 个月，沙州电厂工程钢结构主厂房自浇第一罐混凝土至主厂房封顶工期为 12 个月，费县一期工程钢筋混凝土主厂房自浇第一罐混凝土至主厂房封顶工期为 12 个月，上述情况看，工期与施工组织、程序有一定的关系。

#### 钢筋混凝土结构与钢结构主厂房的技术经济比较

##### 钢结构体系

主厂房钢结构体系是纵、横向钢构架和各层楼面及屋面组成的空间结构体系，按节点连接型式可分为铰接、刚接、铰接—刚接混合体系。铰接体系需加设必要的支撑杆件，以确保结构的稳定并抵抗侧向力，除梁以外的构件以承受轴力为主，受力简单明确，并具有较强的侧向刚度，但支撑杆件需占用一定空间，常与工艺布置发生矛盾或影响运行；刚接体系通过节点刚接来保证结构的稳定并抵抗侧向力，节点构造相对复杂，侧向刚度小，但不必设置支撑，有利用工艺布置；铰接—刚接混合体系的特点则介于两者之间，但力的传递不是很明确。

钢结构主厂房的突出特点：是轻质高强、安装简便，施工速度快，工厂化程度高，节点连接简单可靠、受力明确，延性大，抗震性能好，防火、耐腐蚀性差需要定期维护。安装简便包括主厂房结构本身的施工安

装和工艺安装两方面，轻质高强则可以减轻主厂房自重，减少地基处理和基础费用，影响钢结构在实际工程中推广的因素主要有两个：一是造价高（包括钢结构自身及防腐维护费用），二是耐火极限低；另外，加工精度高、焊接工作量大，垂直及水平支撑体系经常与工艺布置发生矛盾也是其不可避免的缺点。

钢结构分析计算现在运用 STAAD/CHINA 软件按空间模型进行三维计算分析已在国内外工程中广泛应用，其特点如下：

(1) 可进行强度设计、整体确定计算、变形计算、杆件截面优化，并给出杆件内力、柱脚内力等，可大大简化计算工作量。空间计算按三维杆系计算各杆件内力，并对水平荷载起控制作用时的扭转进行定量分析，杆件内力精确。

(2) 对杆件截面进行优化，使杆件选择更为合理，从而节省用钢量，取得较大的经济效益，一般情况下，可以节省钢材 5% ~ 10%。

### 钢筋砼结构体系

横向抗侧力体系：汽机房外侧柱、汽机房屋盖、除氧煤仓间框架组成的框、排架结构体系，汽机房屋架与 A、B 排铰接，其他混凝土梁柱之间均为刚性连接。纵向抗侧力体系：纵向 A\B\C\D 排均为有支撑的框架结构体系。

钢筋砼结构主厂房的突出特点：它具有造价低，施工简单，防火、耐腐蚀性好，维护费用低，成熟经验多等优点，但结构荷载大，相应基础工程造价高，建设工期长，工程量大。规范对温度区段长度要求严，柱、梁截面大，空间有效面积小，总建筑体积大。长期以来，国内绝大多数火力发电厂（单机容量 600MW 及以下机组）采用钢筋混凝土结构方案。

钢筋混凝土结构分析计算现在运用 PKPM\SATWE\MIDAS.GEN\SAP2000 等软件分别按平面、空间模型进行二维、三维计算分析已在国内外工程中广泛应用，并有成熟的经验。

### 两种结构体系的经济比较

据了解，目前国内正在建设的 1000MW 机组，均为钢结构主厂房如玉环、外高桥、邹县、泰州等，1000MW 机组钢结构厂房已有成熟的经验，尚无钢筋混凝土结构主厂房实例，且无百万机组主厂房设计的国家及行业标准。由于设计方案的优化，模块式布置的出现，目前百万机组前期方案大多数按钢筋混凝土结构主厂房论证或投标，得出结论是可实现的，并得到了行业内专家的认可。

**2 × 1000MW 机组钢筋砼结构与钢结构主厂房初步经济比较表**

序号	名称	建筑容积 m <sup>3</sup>	单方造价 元/m <sup>3</sup>	总造价 万元	备注	
1	钢结构主厂房 (布置同方案二)	367535	347	12754	建筑容积不含 单独集控楼， 含炉前平台	
2	钢筋混凝土 结构主厂房	方案一	315010	216		6809
		方案二	378470	221		8392
		方案三	323407	245	7923	

由上表可知，同等机组钢结构主厂房总造价高于钢筋砼结构主厂房方案一总造价约 5945 万元。

### 结论：

本工程地质条件较好，承载力高，采用天然地基，厂区地震基本烈度为 7 度，建筑场地类别 I 类。综合上述技术、经济、工期比较分析后，认为按照节约投资，符合国情的设计原则，推荐主厂房为现浇钢筋混凝土排架结构体系、煤仓间与汽机房除氧间脱开的侧煤仓方案一。主厂房楼面结构采用钢梁+混凝土板组合结构体系，汽机房屋面采用拱形钢梁+复合压型钢板结构体系。从目前各院方案设计情况来看，多数倾向于侧煤仓方案，所以，我们有必要对侧煤仓方案的可行性、适宜性加以论证。