

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

第三章：燃气-蒸汽联合循环电厂 基础知识

华北电力设计院工程有限公司

2012 年 8 月 北京

主编：陈赢展

校审：李惠民

目 录

1.	燃气-蒸汽联合循环发电技术发展概况	1
2.	燃气-蒸汽联合循环电厂主要设备	2
2.1	燃气轮机	2
2.2	余热锅炉（HRSG）	5
2.3	汽轮机、发电机	5
2.4	联合循环电厂的主要辅助系统	6
3.	燃气-蒸汽联合循环电厂定义	6
3.1	常用标准	6
3.2	定义	9
4.	燃气-蒸汽联合循环电厂机组配置	11
4.1	常规配置方案	11
4.2	典型 F 级机组和 E 级机组的性能及参数	11
4.3	采暖供热机组配置（针对大中北方城市）	14
4.4	燃气-蒸汽联合循环电厂动力岛典型布置	15
5.	燃气-蒸汽联合循环电厂特点	24
6.	燃气-蒸汽联合循环电厂的经济性	25

1. 燃气-蒸汽联合循环发电技术发展概况

从世界电力工业发展的历程来看,以往,人们主要是依靠燃煤的蒸汽轮机电站来实现发电目标的。在这个领域内,人们一直环绕着两大问题进行着卓越的工作,即(1)不断提高燃煤电站的单机容量和供电效率;(2)解决日益严重的因燃煤而造成的污染问题,以满足环境保护的要求。那么改善燃煤电厂的供电效率的主要方向是:提高蒸汽的初参数并改进其热力循环系统的设计,也就是说使主蒸汽的参数向亚临界、超临界、超超临界的方向发展,同时采用多级的再热循环系统和热电联产方案。在解决因燃煤而带来的污染问题,人们首先致力于解决粉尘的排放问题,进而向解决 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 的方向发展。总之,为提高供电效率,减少污染,保护环境,发达国家推出了许多技术升级计划,如:欧共体 700℃ 计划、美国的 CCT、ATS、Vision21、LEBS,日本的新阳光计划等。

燃气轮机是从 20 世纪 50 年代逐步开始登上发电工业舞台(第一台是 1939 年瑞士 BBC 4000KW 发电燃气轮机)但由于当时机组的单机容量小,而热效率又较低,一般只作为紧急备用电源和调峰机组使用。联合循环电厂的技术发展,主要取决于燃机技术的发展,当然也离不开余热炉、蒸汽轮的技术发展。从燃机技术参数及性能的发展来分,大致可分为四个阶段:

50-60 年代开始建设联合循环电厂,当时燃机参数较低,燃机初温一般为 600-800℃,因而使得联合循环电厂的效率仅为 35%左右,还达不到大型燃煤电站的水平,因此,发展较慢。

70 年代燃机的初温提高到了 850-1000℃,其联合循环电厂的效率达到了 40-45%,接近或超过了大型燃煤机组。

80 年代燃机的初温提高到了 1100-1288℃,排汽温度 500-600℃,联合循环电厂的效率超过了 50%,大大超过了大型火电机组,因而使联合循环电厂得到了迅速发展。

90 年代以后,由于联合循环电厂所具有明显的优越性,其技术出现了很大的飞跃,几家大制造厂相继推出了先进的大功率高效率的燃机,初温提到了 1315℃ 及以上,联合循环电厂的效率超过了 57%。

中国在 20 世纪虽有研究,但无发展,直到 21 世纪,为满足我国电力工业发展的需要,提高重型燃气轮机制造技术水平,2001 年由原国家计委牵头,按照以“市场换技术”的原则,对燃气轮机设备进行了国际打捆招标,才引进了重型燃气轮机制造技术。目前哈尔滨动力股份有限公司、南京汽轮电机(集团)有限公司引进美国 GE 公司技

术，上海电气集团股份有限公司引进德国西门子技术，东方电气集团有限公司引进日本三菱技术。

阿尔斯通也是重型燃机的著名生产商之一，但阿尔斯通没有进入国产化名单。

已经国产化的部分重型燃机型号见下表。

燃机型号	国产厂家	引进技术和关键部件公司
常规燃气轮机		
GE PG9171E 、PG6581B	南京汽轮电机(集团)有限公司	美国 GE 公司
Siemens SGT5-2000E (V94. 2)	上海电气集团有限公司	德国 Siemens 公司
先进的“F”级燃气轮机		
GE PG9351FA	哈尔滨动力设备股份有限公司	美国 GE 公司
Siemens SGT5-4000F (V94. 3A)	上海电气集团有限公司	德国 Siemens 公司
Mitsubishi M701F	东方电气集团有限公司	日本三菱公司

2. 燃气-蒸汽联合循环电厂主要设备

燃气—蒸汽联合循环电厂是由燃气轮机、余热炉、蒸汽轮机和发电机及其附属系统组成。

2.1 燃气轮机

2.1.1 燃机的类型

工业型燃机（重型）：按地面工作环境设计，寿命长（10 万小时以上）尺寸大、重量大。

航空改进型燃机（轻型）：由航空发动机改装设计，轻巧、初温高、效率高，一般用于船舶和应急电源。

但现在的轻型燃机，已经做了很多改进，降温降速，以求有效的延长寿命，部分零部件的材料变更以适应地面的工作条件，燃气发生器后加装动力透平，通常动力透平按重型燃机的指导思想设计即部件厚重，并采用活动轴承，以提高使用可靠性。

2.1.2 燃料

燃机燃用的燃料为气体和液体两种：

气体包括 NG、LNG、高炉焦气、低热值高炉煤气、合成气；

液体包括重油、原油、轻油。

2.1.3 燃机组成

燃机主要由压气机、燃烧室、燃气透平组成。

2.1.4 燃机技术

燃机技术因制造厂的不同而不同，各有各的特点。世界上共有 100 多家制造厂，具有代表性的主要有四家：GE、SIEMENS、MITSUBISHI、ALSTOM（ABB）。

1) GE 公司

GE 公司是燃机的老牌（资格）厂（40 年代），在世界燃机市场中占有率最高。

燃机特点：

- a) 整体结构型式：压气机、燃烧室和燃气透平，包括压气机进气机匣和燃气透平的排气扩压机匣，彼此连接成为一个整体，安装在同一个底座上。一些辅助设备（润滑油系统、冷却水系统、燃料系统、起动机系统、传动齿轮箱等）安装在另一个底座上，节省安装时间和机组设备的运输费用。
- b) 6B、9E、9EC，是在燃气透平侧的热端输出功率，6FA、9FA 型冷端输出功率。
- c) 除 MS9001E 型机组为三轴承支撑方式外，其余机组均为双轴承支撑方式。
- d) 压气机由进气机匣、汽缸、静叶、转子、动叶、气封和排气扩压缸等部件组成。
- e) 燃烧室采用逆流式分管型结构形式。
- f) 燃气透平由汽缸、静叶（又称喷嘴）、转子、动叶、气封和排气扩压器等部件组成。

2) 西门子（Siemens）

Siemens 公司的重型燃机是由 KWU 公司开发的，1948 年开始设计，1954 年制造出，95 年收购了西屋火电部，使其在燃机方面的实力增强，以西门子技术为主生产燃机。

燃机特点：

- a) 整体式
- b) 冷端输出
- c) 双轴承支撑
- d) 一根中心拉杆，通过各轮盘外缘压紧面处的端面齿来对中、压紧和传递转矩的。
- e) 大型环型燃烧室、DLN 燃烧器。
- f) 单晶体金属结构叶片，高温叶片也涂合金和陶瓷层。

4) 日本三菱公司 (MITSUBISHI)

80 年代以前使用西屋公司图纸，生产 “D” 型燃机，

80-95 年 与西屋签定协议，双方共同开发燃机，在此阶段开发了 “501F” 燃机。

95 年以后独立开发 “F” 级，目前已发展生产 “G” 型燃机。

燃机进口温度从 1150℃ 发展到 1500℃ (喷嘴前)

燃机特点：

- a) 环保型燃烧器属于 DLN 燃烧器 ；
- b) 独立研制的四级燃气透平，螺栓连接；
- c) 冷端驱动，双轴承支撑；
- d) 动、静叶空气冷却，高温叶片表面涂有合金和陶瓷材料；
- e) 启动方式三种：
马达、变频启动、蒸汽启动，常用后两种。

5) ALSTOM (原 ABB)

ABB 公司的工业燃机是由原 BBC 公司开发的，1939 年生产了世界上第一台发电用燃机 ，它偏重于生产重型结构燃机。

燃机特点：

- a) 整体式
- b) 在压气机的冷端输出功率，燃气透平采用轴向排气方式，便于与 HRSG 连接，流阻损失小。
- c) 双轴承支撑方式，
- d) 大型盘鼓锻压件和两端的半轴，用焊接方法组合一体。(焊接转子)
- e) 燃烧室按燃料性质不同分为三种

标准圆筒型 (SBK)、装设 EV 型燃烧器的圆筒型、装设 EV 型燃烧器的环形燃烧室 (GTE2 、GT24、GT 26)。

f) 机组的绝对死点置于压气机进气侧功率输出端的前轴承部位。

g) 变频器：使发电机作为变速的同步电机来启动燃机，可靠性高，易快速再启动。

GT26 型：焊接转子，两段燃烧 (在第一级燃烧室的燃气经过第一级透平后) 在第一、二级透平之间喷入燃料，KA26 CC 供电效率 58.5%。

高压比 (30: 1 其它 公司 15 (17): 1) 压气机三级静叶可调，其调节性能好，调节幅度大。

2.2 余热锅炉（HRSG）

在燃气--蒸汽联合循环电厂中，余热锅炉是回收燃机的排气余热，借以产生推动蒸汽轮机发电所需蒸汽的换热设备。

HRSG 一般由省煤器、蒸发器、过热器、再热器以及联箱和汽包等组成。

2.2.1 类型

按形式分：立式 卧式（补燃、无补燃）

按循环方式：自然循环、强制循环、直流

按压力：单压、双压、三压（有、无再热）

参数：中压、高压、超高压、亚临界

2.2.2 特点

余热炉与常规锅炉的区别：

- 利用燃气轮机排气作为热源，因此不需燃烧系统
- 不用风机
- 可在多压状态下产生蒸汽提高了热回收率
- 对流热交换而不是辐射热交换
- 不采用膜式水冷壁结构
- 传热面都采用鳍片管（环状、锯齿型）提高传热效率

2.2.3 余热炉的选择

1) 余热炉的设计参数根据燃气轮机特性确定，当 GT 排气温度低于 538℃时，不宜采用再热循环。

HRSG 排气温度高于酸露点温度,给水温度则可比酸露点温度低 5-10℃,烧无硫燃料时,比烟气中水的露点温度高 10℃左右。HRSG 进口烟温比主蒸汽温度高 30-50℃左右。

2) HESG 应采用滑压运行。

3) 按电厂性质选择补燃、无补燃，自然循环、强制循环、直流。

4) 按燃料（重油、NG）、场地选择立式、卧式。

5) 一般选择无补燃余热炉，但调峰电价较高或供热电厂，可选择补燃余热炉。

2.3 汽轮机、发电机

联合循环发电机与常规电站的发电机没什么区别；但汽机与常规电站的汽机相比，有它的特殊性。

1)、无回热抽气系统

联合循环汽机一般均取消了回热抽汽，汽机排汽凝结为给水后，进入余热炉。给水预热用烟气。

2)、无调节级，用滑压参数调节功率。

余热炉的产汽量随着燃机排气的流量和温度而变化，汽机总是想方设法的利用这部分烟气能量而尽量多发电，所以汽轮机的输出功率跟随燃机工况而变化，最终整体电厂的输出功率就由燃气轮机单独调节，电厂输出功率的调节也就简单的成为燃机燃料量的调节，其中，汽轮机本身是不参与功率调节的。由于这些特点，汽机可按照滑压运行的模式设计。在功率大于 50%额定功率以上时，汽机进行阀门全开的滑压运行方式，此时，调节阀不再参与压力调节，也不需要精细的阀位控制，汽轮机输出功率的大小随燃机的工况变化。

所以对汽轮机而言，本身不参与电网的一次和二次调频，整个电厂的一、二次调频由燃机单独完成。

3)、排汽量比进汽量大，(约 1.3 倍，常规电厂排汽量为进汽量的 0.7 倍)，这是因为多压形式的汽机还有中间蒸汽注入的缘故，因此，汽机进口的容积流量较小，而排汽容积很大。

4)、轴封用汽用外部汽源，轴封漏汽漏入通流级。

5)、汽轮机采用多压式(采用 2-3 压)，通流级中间分段引入不同压力的蒸汽。

6)、汽轮机旁路一般为 100%，凝汽器应满足 100%蒸汽旁路的要求。

2.4 联合循环电厂的主要辅助系统

联合循环电厂的主要辅助系统主要有：燃料系统、空气系统、控制系统、冷却水系统、化学水处理系统、起动系统、润滑油系统、液压系统、通流部分的清洗系统、消防系统。

3. 燃气-蒸汽联合循环电厂定义

3.1 常用标准

3.1.1 国家标准

GB/T 14099-2005	燃气轮机	采购
GB/T 14100-1993	燃气轮机	验收试验 (eqv ISO 2314:1989)
GB/T 15135-2002	燃气轮机	词汇 (ISO 11086:1996,MOD)

GB/T 18929-2002	联合循环发电装置 验收试验 (ISO 2314:1989/Amd 1:1997(E))
DL/T 851-2004	联合循环发电机组验收试验 (修改采用 ISO2314:1989/Amd.1:1997(E))
DL/T5174-2003	燃气—蒸汽联合循环电厂设计规定
GB3836.14-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第 14 部分: 危险场所分类 (idt IEC 60079-10:1995)
GB50058-92	爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范
GB50229-96	火力发电厂与变电站设计防火规范
GB50183-2004	石油天然气工程设计防火规范
GB50016-2006	建筑设计防火规范
GB50028-2006	城镇燃气设计规范
GB14089-1993	燃气轮机噪声
GB12348-1990	工厂企业厂界噪声标准
GB/T 6075.1-1999	在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动
idt ISO 10816-1:1995	第 1 部分: 总则
GB/T 6075.2-2002	在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动
idt ISO 10816-2:1996	第 2 部分: 50MW 以上陆地安装的大型汽轮发电机组
GB/T 6075.4-2001	在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动
idt ISO 10816-4:1998	第 4 部分: 不包括航空器类的燃气轮机驱动装置
GB/T 11348.1-1999	旋转机械转轴径向振动的测量和评定
eqv ISO 7919-1:1996	第 1 部分: 总则
GB/T 11348.2-1997	旋转机械转轴径向振动的测量和评定
eqv ISO 7919-2:1996	第 2 部分: 陆地安装的大型汽轮发电机组
GB/T 11348.4-1999	旋转机械转轴径向振动的测量和评定
eqv ISO 7919-4:1996	第 4 部分: 燃气轮机组

3.1.2 国际标准

ISO 7919	<p>Mechanical vibration of non-reciprocating machines —— Measurements on rotating shafts and evaluation criteria —— 在旋转轴上测量非往复式机器的机械振动及评价准则——</p> <p>Part 1: General guidelines : 1996 第 1 部分：总则：1996 版</p> <p>Part 2: Large land-based steam turbine generator sets : 2001 第 2 部分：陆地安装的大型汽轮发电机组：2001 版</p> <p>Part 4: Gas turbine sets : 1996 第 4 部分：燃气轮机组：1996 版</p>
ISO 10816	<p>Mechanical vibration —— Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts —— 在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动</p> <p>Part 1: General guidelines : 1995 第 1 部分：总则：1995 版</p> <p>Part 2: Large land-based steam turbine generator sets in excessive of 50MW : 2001 第 2 部分：50MW 以上陆地安装的大型汽轮发电机组： 2001 版</p> <p>Part 4: Gas turbine driven sets excluding aircraft derivatives : 1998 第 4 部分：不包括航空器类的燃气轮机驱动装置：1998 版</p>
ISO 2314: 1989	<p>Gas turbines —— Acceptance tests TECHNICAL CORRIGENDUM 1 :1997 AMENDMENT 1: Acceptance tests for combined –cycle power plants : 1997 燃气轮机——验收试验 技术勘误表 1：1997 年 增补件 1：联合循环装置验收试验：1997 版</p>
ISO 2314—1989	<p>Gas turbines——Acceptance tests 燃气轮机——验收试验</p>

IEC 953-2-1990	Rules for steam turbine thermal acceptance tests——Method B-Wide range of accuracy for various types and sizes of turbines 汽轮机热力验收试验规范——方法 B：各种类型和规格透平的低精度试验
IEC 953-1-1990	Rules for steam turbine thermal acceptance tests——Method A-High accuracy for large condensing steam turbines 汽轮机热力验收试验规范——方法 A：大型凝汽式汽轮机高精度试验
ISO 14532: 2001	Natural gas —— Vocabulary 天然气——词汇
ISO 13443: 1996	Natural gas —— Standard reference conditions 天然气——标准参考条件
ISO 13686: 1998	Natural gas ——Quality designation 天然气——质量指标
ASME PTC 46-1996	Performance Test Code on Overall Plant Performance 电厂总体性能试验规范
ASME PTC 22 - 2005	Performance Test Codes —— Gas Turbines 性能试验规范——燃气轮机
ASME PTC 4.4 - 1992	Performance Test Codes —— Gas Turbine Heat Recovery Steam Generators 性能试验规范——燃气轮机余热锅炉
ASME PTC 6-2004	Performance Test Codes——Steam Turbines 性能试验规范——汽轮机

3.2 定义

3.2.1 机组定义

燃气—蒸汽联合循环发电机组（简称：联合循环机组）——由燃气轮机、余热锅炉、汽轮机、发电机及相关附属设备组成的发电机组，可分成单轴联合循环机组和多轴联

合循环机组。

单轴联合循环机组（简称：单轴机组）——燃气轮机、汽轮机、发电机连接在同一轴上的配置方式，由燃气轮机和汽轮机同时驱动发电机发电。

多轴联合循环机组（简称：多轴机组）——燃气轮机与汽轮机分别驱动各自的发电机且不连接在同一轴上的布置方式，多轴机组通常有下列组合形式：1+1（或称一拖一）机组；2+1（或称二拖一）机组。

1+1（或称一拖一）机组——由一台燃气轮机和一台余热锅炉、一台汽轮机组成的联合循环机组，燃气轮机和汽轮机分别驱动各自的发电机（其主要特点是：燃气轮机驱动一台发电机，汽轮机驱动另一台发电机，两台发电机分处不同的轴系中，汽轮机的蒸汽来自于利用对应燃气轮机排气余热的余热锅炉）。

2+1（或称二拖一）机组——由二台燃气轮发电机组和二台余热锅炉、一台汽轮发电机组组成的多轴联合循环发电机组（其主要特点是：二台燃气轮机分别驱动各自的发电机，汽轮机驱动另一台发电机，他们分处不同的轴系中，汽轮机的蒸汽来自于利用对应二台燃气轮机排气余热的二台余热锅炉）。

3.2.2 工况定义

额定工况：按机组全年的运行模式确定，一般可按年平均气象条件即环境温度 $\underline{XX}^{\circ}\text{C}$ ，大气压力 $\underline{XXX}\text{kPa}$ ，相对湿度 $\underline{XX}\%$ ，冷却水温 $\underline{XX}^{\circ}\text{C}$ 的气象条件称为额定工况。

ISO（标准）工况：指 ISO 工况气象条件即环境温度 15°C ，大气压力 1013kPa ，相对湿度 60% ，冷却水温 15°C 的气象条件称为 ISO 工况。

冬季工况：指多年冬季最冷月的日最低温度平均气象条件即环境温度 $\underline{XX}^{\circ}\text{C}$ ，大气压力 $\underline{XXX}\text{kPa}$ ，相对湿度 $\underline{XX}\%$ ，冷却水温 $\underline{XX}^{\circ}\text{C}$ 的气象条件称为冬季工况。

夏季工况：指多年夏季最热月的日最高温度平均气象条件即环境温度 $\underline{XX}^{\circ}\text{C}$ ，大气压力 $\underline{XXX}\text{kPa}$ ，相对湿度 $\underline{XX}\%$ ，冷却水温 $\underline{XX}^{\circ}\text{C}$ 的气象条件称为夏季工况。

3.2.3 功率定义

额定功率：额定工况条件下燃气轮机发出的功率或联合循环机组发出的功率称为额定功率。

标准功率：ISO 工况条件下燃气轮机发出的功率或联合循环机组发出的功率称为标准功率。

最大功率：在冬季工况条件下燃气轮机发出的功率或联合循环机组发出的功率称为最大功率。

最小功率：在夏季工况条件下燃气轮机发出的功率或联合循环机组发出的功率称为最小功率。

额定工况的性能指标作为燃机或联合循环机组考核指标，其他工况如 ISO 工况、冬季工况、夏季工况的性能指标作为燃机或联合循环机组验证指标。

4. 燃气-蒸汽联合循环电厂机组配置

4.1 常规配置方案

联合循环电厂的常规配置为“一拖一(1+1+1)”和“二拖一(2+2+1)”两种。如：

50MW 级 S106B
100MW 级 S206B S106FA GUD1S.64.3A
200MW 级 S109E S206FA GUD1.94.2
350MW 级 S209E KA11N2-2 S109FA GUD1S.94.3A KA26-1 MPCP1-701F
700MW 级 S209FA GUD2.94.3A MPCP2-701F KA26-2
2x109FA 2x MPCP1-701F 2x GUD2.94.3A 2x KA26-1

4.2 典型 F 级机组和 E 级机组的性能及参数

下述描述的 F 级和 E 级燃气轮机及由此燃气轮机所组成的联合循环机组主要是指国内已经引进技术的 GE、西门子和三菱公司的产品。

以下各表种所列燃气轮机及由此燃气轮机所组成的联合循环机组的性能数据是在 ISO 标准参考条件下的典型数据，由于燃气轮机的性能受环境条件（大气压力、大气温度、大气相对湿度、海拔高度、冷却空气和/或冷却水的温度等）的影响较大，现场条件下的性能数据与 ISO 标准参考条件下的性能相比可能会有很大的差异；此外，随着燃气轮机技术的不断发展，各制造商均在对现有机型进行不断的改进，同一级别的燃气轮机，随着技术的改进，其性能也会有所不同；因此，针对某一特定工程的燃气轮机或联合循环机组的性能，应以制造商根据项目具体条件提供的数据为准。

4.2.1 F 级燃气轮机及联合循环的典型数据

表 4-1：F 级简单循环燃气轮机的参考性能（ISO 标准参考条件）

生产厂商	GE/哈动力	西门子/上海电气	三菱/东方
型号	PG9351FA	V94.3A	M701F
功率（MW）	255.6	267	270
热效率（%）	37	38.7	38.2
空气流量（kg/s）	632.7	645	651

生产厂商	GE/哈动力	西门子/上海电气	三菱/东方
排气流量 (kg/s)		659	
压缩比	15.4	16.9	17.0
压气机级数	18	15	17
透平转子进口温度 (TRIT) (°C)	1327	1310	1400*
透平级数	3	4	4
透平排气温度 (°C)	609	576	586
NO _x 排放量 (天然气燃料) (ppm)	25	25	25
机组重量 (~t)	240	330	340
机组近似尺寸	22.6×5.0×5.4	12.5×6.1×7.5	17.3×5.8×5.8

注*: 这是透平参考进口温度, 即透平第一级喷嘴前的温度。

4.2.2 E 级燃气轮机及联合循环的典型数据

表 4—2: 由 F 级燃气轮机组成的联合循环机组的参考性能 (ISO 标准参考条件)

生产厂商	GE		西门子		三菱	
型号	S109FA	S209FA	1S. V94. 3A	2S. V94. 3A	MPCP1 (M701F)	MPCP2 (M701F)
CC 功率 (MW)	390.8	786.9	392	784	397.7	799.6
GT 功率 P _{GT} (MW)	254.1	508.2		513.0	266.1	532.2
ST 功率 P _{ST} (MW)	141.8	289.2		281.5	131.6	267.4
P _{GT} /P _{ST}	1.792	1.757		1.822	2.022	1.990
热效率 (%)	56.7	57.1	57.4	57.3	57.0	57.3
燃机、汽机配置	1+1 单轴	2+1	1+1 单轴	2+1	1+1 单轴	2+1
余热锅炉配置	三压再热	三压再热	三压再热	三压再热	三压再热	三压再热

表 4—3: E 级简单循环燃气轮机的参考性能 (ISO 标准参考条件)

生产厂商	GE/ 南汽	西门子/上海电气	三菱/东方
型号	PG9171E	V94. 2/V94. 2A	M701D
功率 (MW)	123.4	157/192	144
热效率 (%)	33.79	34.4/35.8	34.8
空气流量 (kg/s)	403.7	510/522	441
排气流量 (kg/s)		519/532	
压缩比	12.3	11.1/14.0	14.0

生产厂商	GE/ 南汽	西门子/上海电气	三菱/东方
压气机级数	17	17	19
透平转子进口温度(TRIT) (℃)	1124	1105/1290	1250*
透平级数	3	4	4
透平排气温度 (℃)	538	540/572	542
NO _x 排放量 (天然气燃料) (ppm)	25	25/25	25
机组重量 (t)	190	295/320	200
机组近似尺寸(m)	20×4.6×4.8	14×12.5×8.4 12.01×6.0×7.41	12.5×5.2×5.28

注*: 这是透平参考进口温度, 即透平第一级喷嘴前的温度。

表 4—4：由 E 级燃气轮机组成的联合循环机组的参考性能（ISO 标准参考条件）

生产厂商	GE		西门子				三菱	
型号	S109E	S209E	1. V94. 2	2. V94. 2	1. V94. 2A	2. V94. 2A	MPCP1 (M701D)	MPCP2 (M701D)
CC 功率 (MW)	189. 2	383. 7	233	467. 5	293. 5	588	212. 5	426. 6
GT 功率 P_{GT} (MW)	121. 6	243. 2	152. 0	304. 0		367. 0	142. 1	284. 2
ST 功率 P_{ST} (MW)	70. 4	146. 1	85. 5	173. 0		230. 0	70. 4	142. 4
P_{GT}/P_{ST}	1. 727	1. 665	1. 778	1. 757		1. 596	2. 018	1. 996
热效率 (%)	52. 0	52. 7	51. 7	51. 8	55. 1	55. 0	51. 4	51. 6
燃机、汽 机配置	1+1	2+1	1+1	2+1	1+1	2+1	1+1	2+1
余热锅炉 配置	双压无 再热	双压无 再热	双压无 再热	双压无 再热	双压无再 热	双压无再 热	双压无 再热	双压无 再热

4.3 采暖供热机组配置（针对大中北方城市）

由于天然气价格较高，需供的热负荷较大，为降低工程造价，燃机选型一般采用国产化的高参数、高效率、大容量 F 级重型燃气轮机，同时蒸汽轮机采用抽凝式汽轮机以满足冬季热负荷的需求。从满足热负荷需求来看，有两种装机方案，即：

方案一：“二拖一”的“F”级燃气蒸汽联合循环供热机组；

方案二：“一拖一”的“F”级单轴燃气蒸汽联合循环供热机组；

方案一的优点在于：

- 两台燃气轮机组带动一台蒸汽轮机组，汽轮机及其发电机可国产化，设备投资费用略低；

- 机组效率较“一拖一”方案略高；
- 燃机、余热锅炉可以独立运行通过减温减压来保证供热；
- 供热量较比“一拖一”方案大。

方案一的缺点在于：

- 由于共用一台蒸汽轮机，非采暖期机组运行时，当一台燃机停运或者燃机低负荷运行，汽轮机组运行经济性较差；
- 由于只有 1 台汽轮机，抽汽供热可靠性比“一拖一”方案差；

- 机组启动、运行相对不灵活

方案二的优点在于：

- 燃气轮机和蒸汽轮机共用一台发电机及其配电系统，设备数量较少；
- 2 台机单元机组，系统相对简单独立，运行控制方便；
- 2 台汽轮机分别供热，抽汽供热可靠性较高；
- 占地面积较小；

方案二的缺点在于：

- 供热量较比“二拖一”方案小。
- 主厂房跨度大；
- 由于单轴机组需要国外公司的技术支持，国产化率相对较低，设备造价略高；

下表为单轴与双轴方案综合比较结果：

比较项目	方案一：二拖一分轴	方案二：单轴一拖一
燃气轮机数量	2	2
蒸汽轮机数量	1	2
余热锅炉数量	2	2
发电机数量	3	2
主变压器数量	3	2
设备投资	低	中
联合循环效率	略高	中
抽汽供热可靠性	低	高
国产化率	较高	较低

综合来看，“二拖一”双轴和“一拖一”单轴各有优缺点，“二拖一”机组国产化率较高，设备投资较少，供热量大。因此，一般推荐“二拖一”方案。

4.4 燃气-蒸汽联合循环电厂动力岛典型布置

联合循环电厂的动力岛包括：燃气轮发电机组及其本体辅助系统、余热锅炉本体及其辅助系统、汽轮发电机组及其本体辅助系统。

根据现场具体条件，采用可用率高，经济效益好、技术先进的设计方案，做到工艺流程顺畅，布置合理，安排好检修设施和检修场地，为电厂安全运行、维护检修提供良好的工作环境。布置原则如下：

- 主厂房内布置的设备尽可能地采用模块式紧凑型设备
- 在设备形式的选择上，尽可能选择占地面积小且维护工作量小的设备
- 考虑设备和部件的检修和起吊设施及空间
- 考虑设备和部件的运输和维护通道

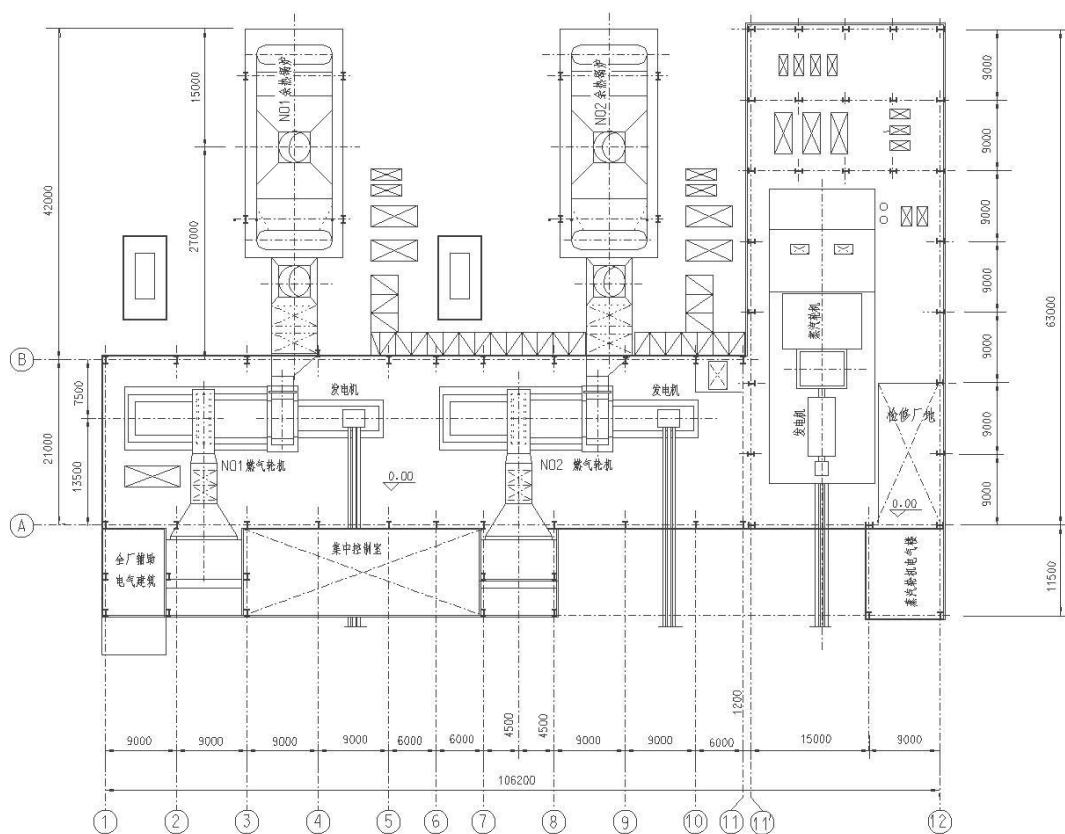


图-1 S-209E 动力岛平面布置图

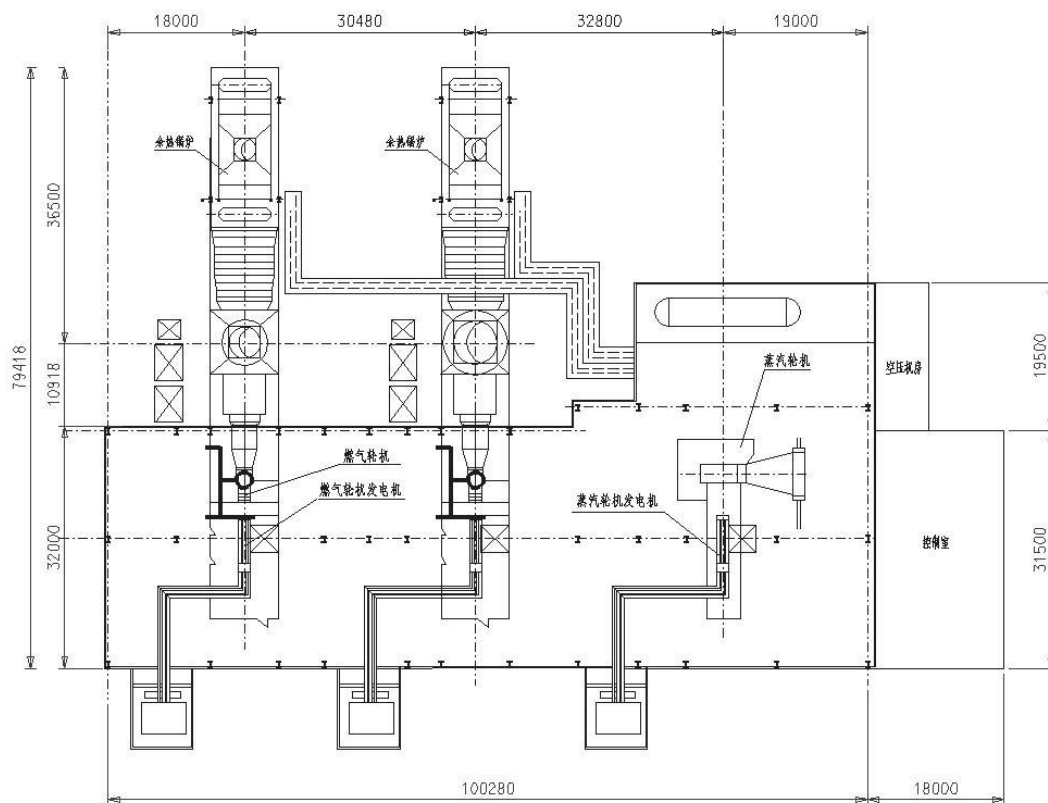


图-2 KA11N2-2 动力岛平面布置图

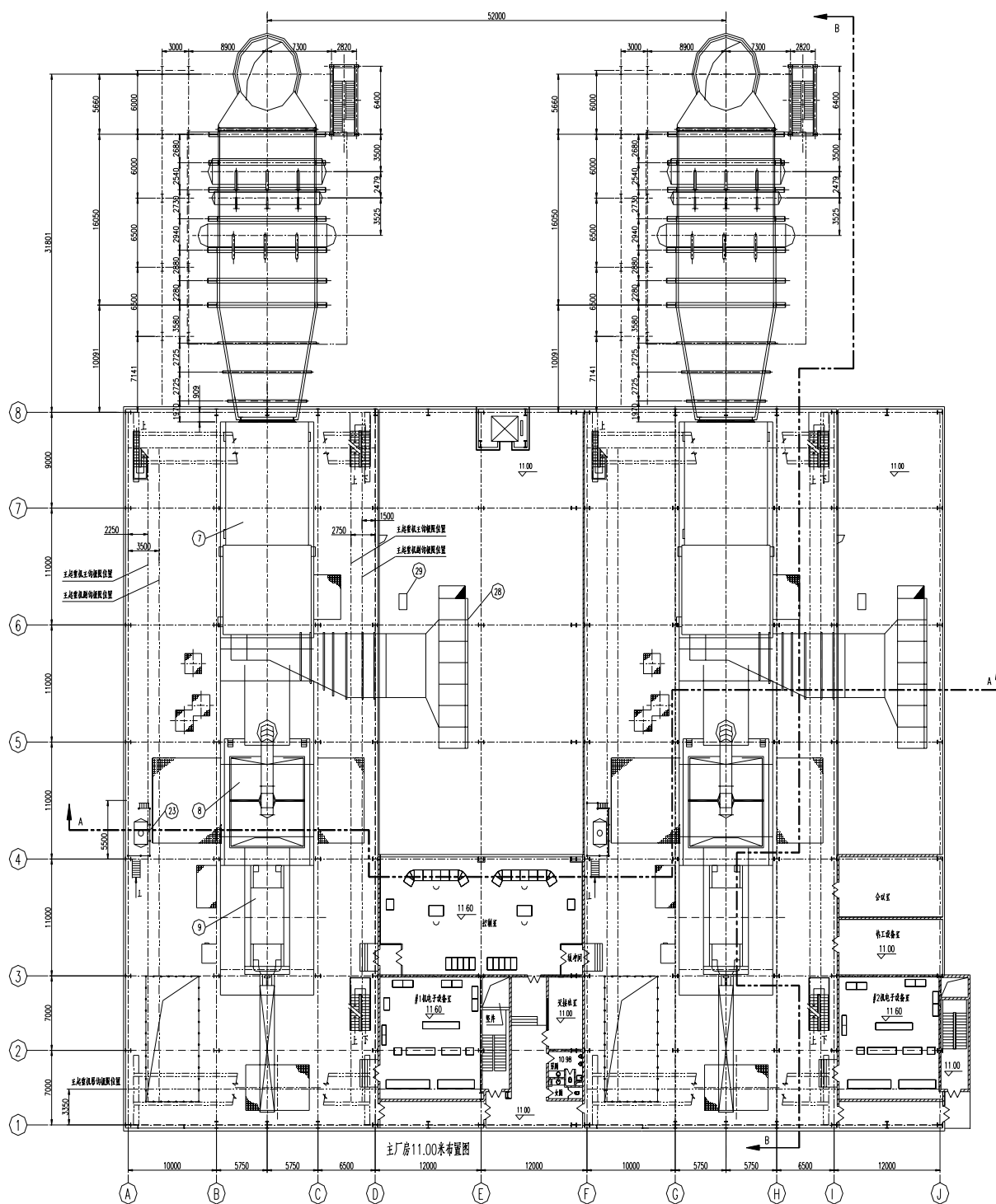
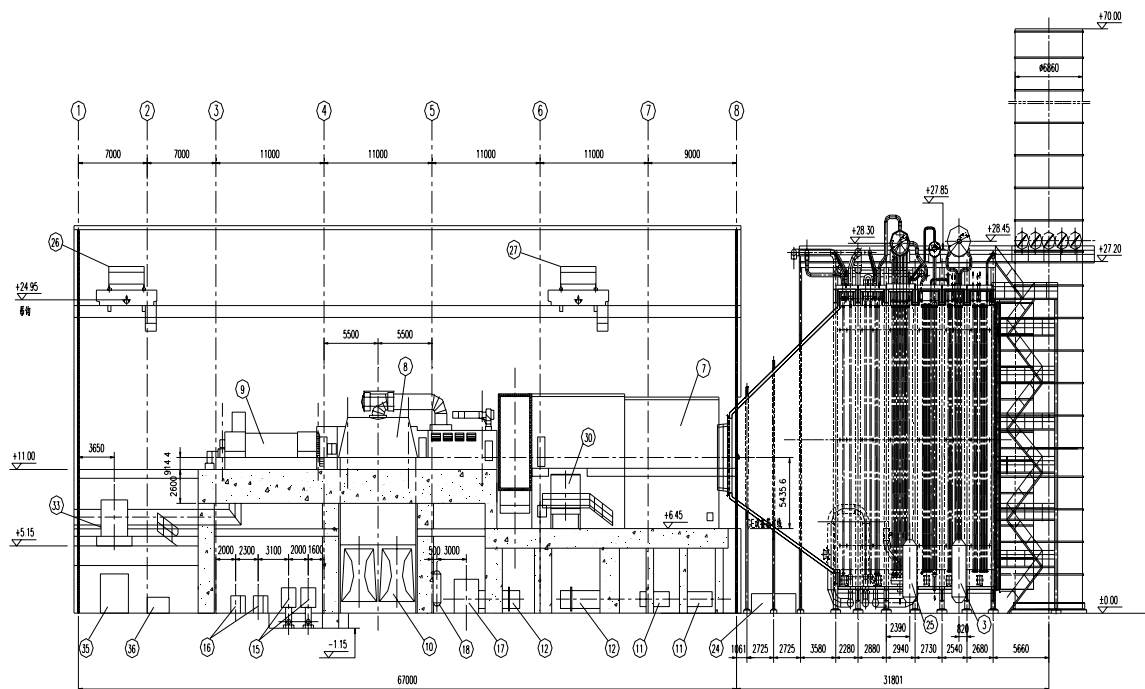
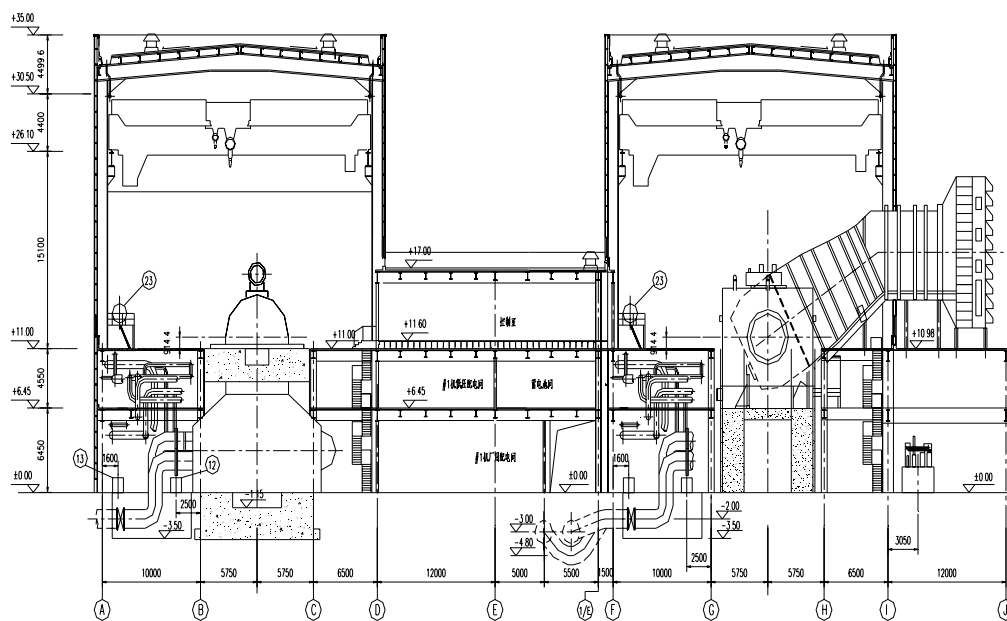


图-3-1 望亭电厂 2 套 F 级燃气—蒸汽联合循环机组 (GE STAG109FA-SS) 平面布置图



B - B



A - A

图-3-2 望亭电厂 2 套 F 级燃气—蒸汽联合循环机组 (GE STAG109FA-SS) 断面布置图

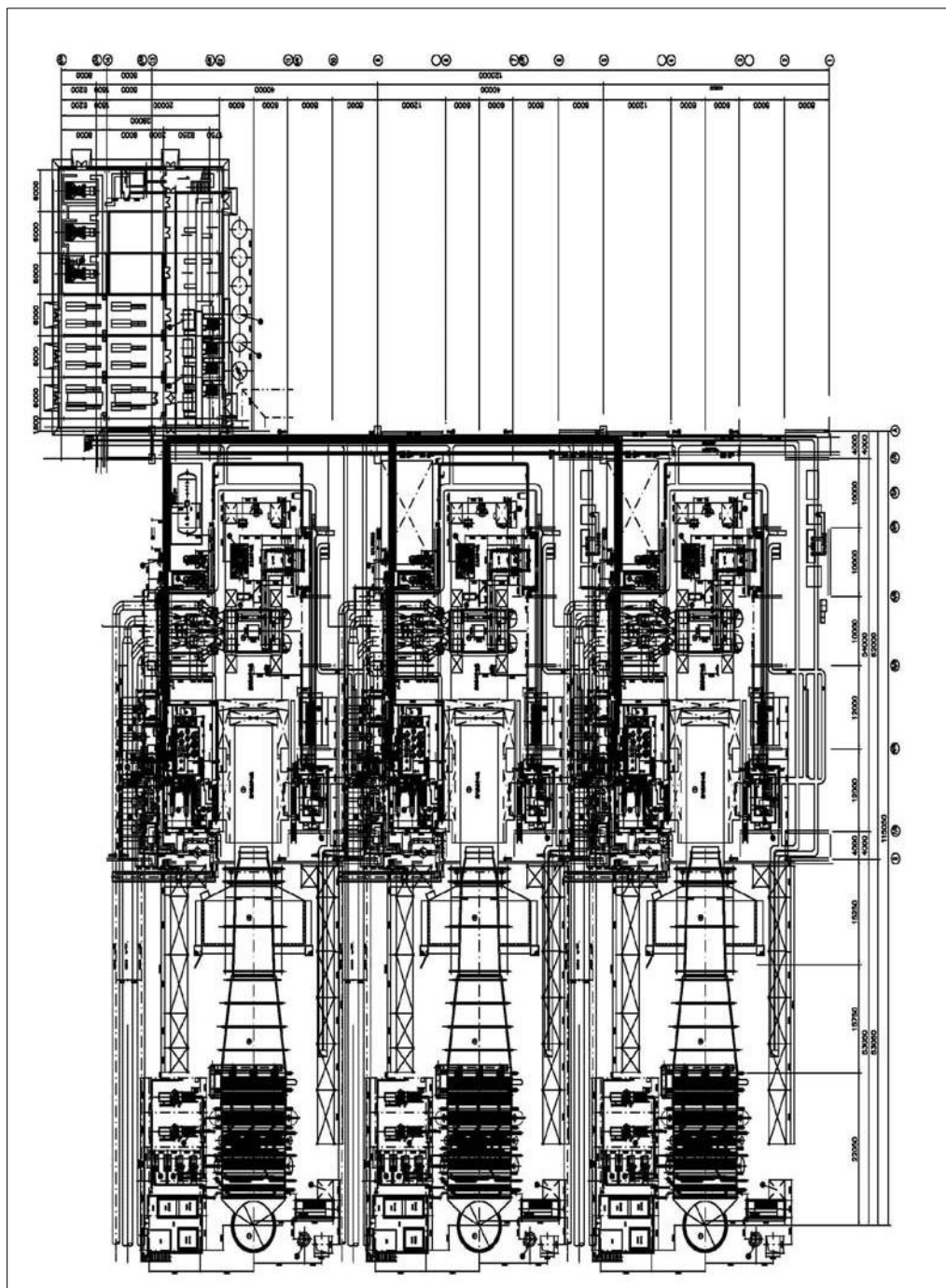


图-4-1 深圳东部电厂 3 套 F 级燃气—蒸汽联合循环机组 MPCP1（M701F）平面布置图

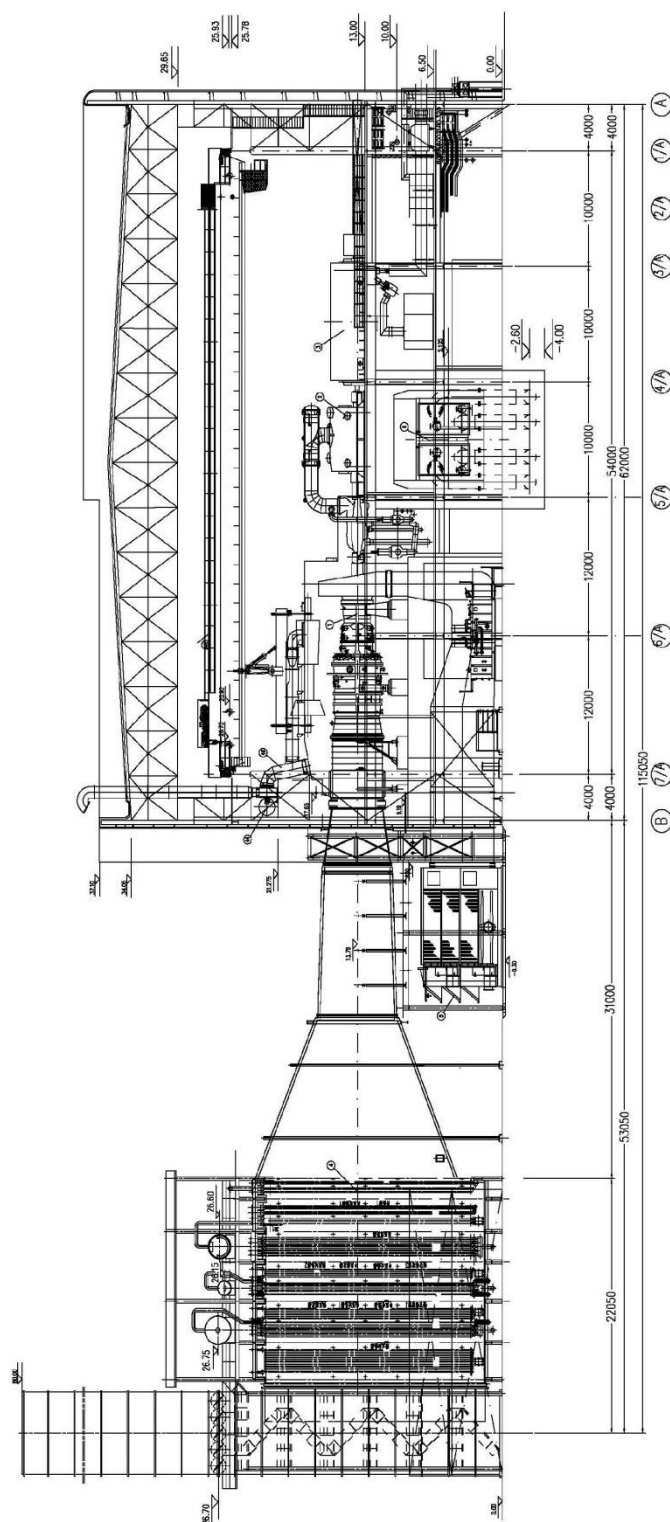


图-4-2 深圳东部电厂 3 套 F 级燃气—蒸汽联合循环机组 MPCP1 (M701F) 断面布置图

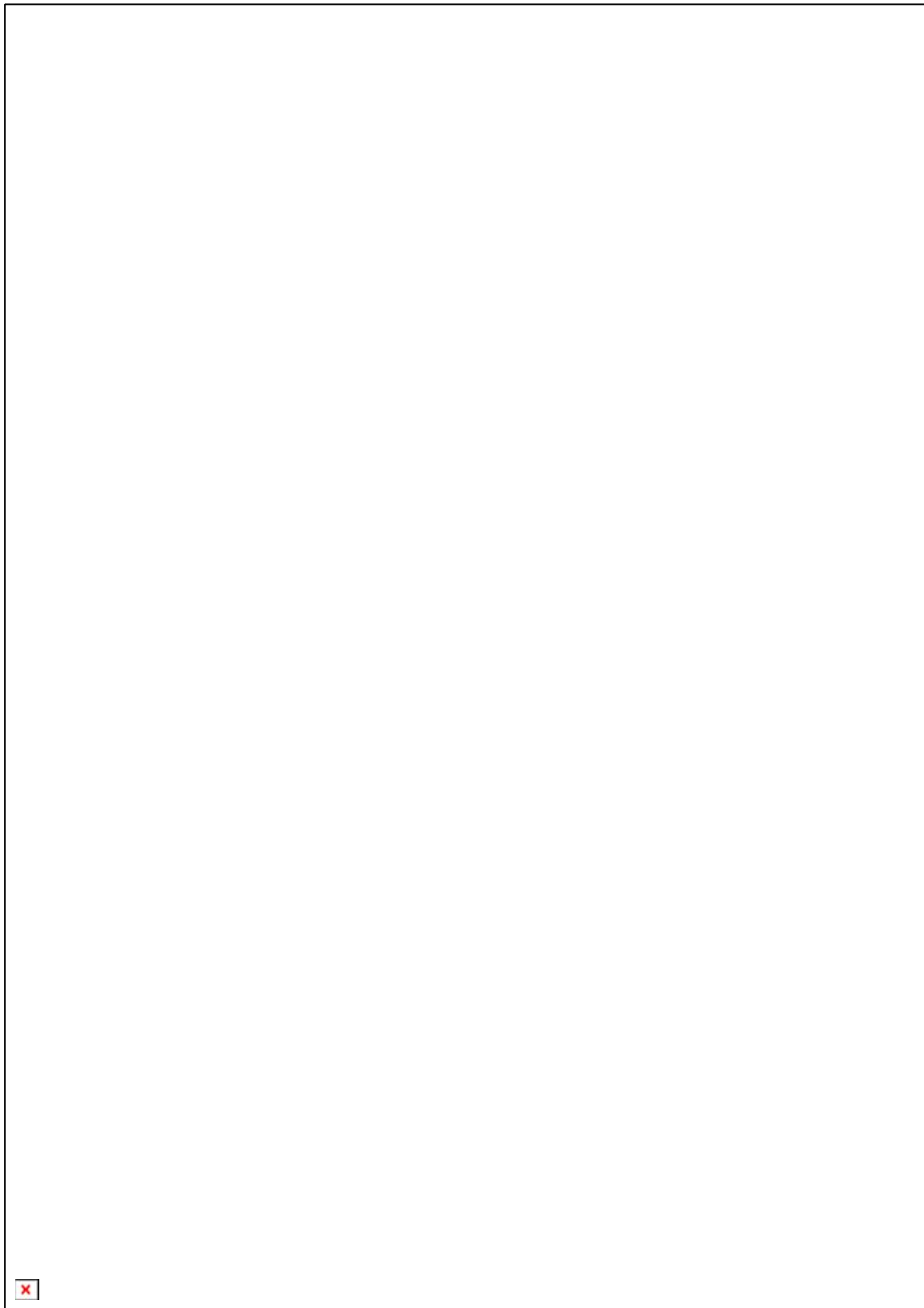


图-5-1 石洞口电厂 2 套 F 级燃气—蒸汽联合循环发电机组 SCC5-4000F 平面布置图

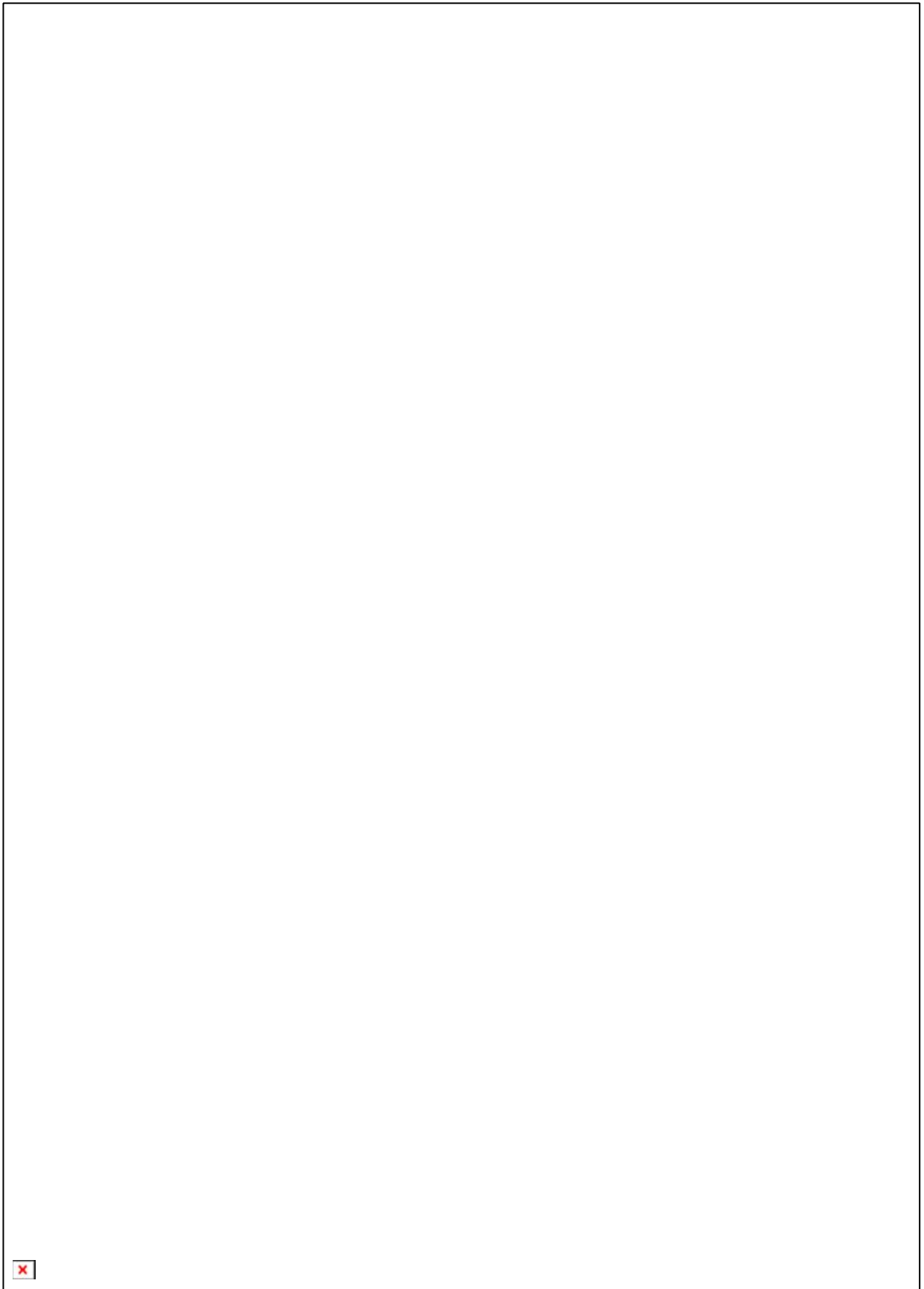


图-5-2 石洞口电厂 2 套 F 级燃气—蒸汽联合循环发电机组 SCC5-4000F 断面布置图

5. 燃气-蒸汽联合循环电厂特点

联合循环电厂具有效率高、启动快、占地少、用水量少、污染物排放低、建设周期短、单位投资省、厂用电率低、可用率高等特点。

1) 效率高

目前，亚临界参数电站的发电效率为 38%~41.9%左右，超临界参数电站的发电效率为 40%~44.5%左右，超超临界参数电站的发电效率为 47.7%左右，而大型联合循环电站的发电效率已超过 57%。

2) 启动快

燃机从启动到带满负荷运行，一般只需 20~25 分钟，若热态启动，则只需 5 分钟；燃气-蒸汽联合循环电厂的热态启动也不到一小时，因此，具有良好的调峰能力。

3) 污染物排放低

燃机一般都采用低 NO_x 燃烧技术，燃用天然气采用低 NO_x 燃烧器时，NO_x 的排放可控制在 25ppm 以内，大型先进燃机可减到 9ppm 以内，而且基本没有灰尘排放，SO_x 的排放也极低。

4) 占地少

由于燃气—蒸汽联合循环电厂没有煤场、输煤系统、除灰渣系统、除尘及脱硫等系统，所以厂区占地比燃煤电厂要小得多。另外，燃机和余热炉一般均在制造厂内完成最大可能的装配，而且一般可露天布置，减少了安装场地，燃气—蒸汽联合循环电厂与同容量的燃煤电厂相比，占地可节省 40~70%。

5) 耗水量少

在燃气—蒸汽联合循环电厂中燃机的容量约占 2/3，而且燃机所需的冷却水很少，因而大大减少了电厂冷却水，并且，没有除灰渣用水、煤场喷水和输煤系统冲洗水。与同容量的燃煤电厂相比可节省 60%左右的水量。

6) 建设周期短

由于燃机制造商在厂内完成了最大可能的装配和分部调试后直接集装运抵现场，安装在预制好的现场基础上，施工安装简单。联合循环电厂的建厂周期一般是同容量的燃煤电厂的 2/3 左右。

7) 单位投资省

在国际上，燃气—蒸汽联合循环电厂交钥匙工程的单位千瓦造价：200MW 级--300MW 级(E 级)约为 550-600US\$/KW；350MW 级以上(F 级)的小于 500-550US\$/KW。

在国内，9F：3200--3400 元/kW，9E：3100 元/kW 左右（2009 年水平）。

8) 厂用电率低

燃气--蒸汽联合循环电厂的厂用电率一般为 1.5~2%，而 300MW 及以上大型燃煤机组的厂用电率一般为 4.5%左右，中小型燃煤机组的厂用电率更高。

9) 运行人员少

由于燃气--蒸汽联合循环电厂辅助设备相对较少，自动化程度高，采用先进的集散式控制系统，控制人员大大减少，一般仅占同容量燃煤电厂人员的 20~30%左右。

6. 燃气-蒸汽联合循环电厂的经济性

众所周知，设备年利用小时数和天然气价格是影响上网电价的两个主要因素。

燃气-蒸汽联合循环电厂一般作为调峰电厂或供热加调峰，运行小时相对较少。

我国目前天然气由国家定价，规定气价由井口价、净化费和管输费三部分构成。天然气销售以油气田企业为主，直供用气大户；城市用气则实行城市门站交气，再由城市燃气公司分销。

发电成本中，燃料费用占 65%以上，天然气价格越高，燃料费在发电成本中所占比例也越高。因此天然气价格是影响发电成本的主要因素，同时也是影响电价的主要因素。

我国的电力生产以煤为主要燃料，相对低廉的动力煤价对电力价格起主导作用。天然气发电的经济性很大程度上将受到煤与天然气比价的影响。

因此，在目前的天然气价格偏高和调峰电价政策没有落实情况下，燃气蒸汽联合循环电厂的电价与常规燃煤相比没有竞争力。