

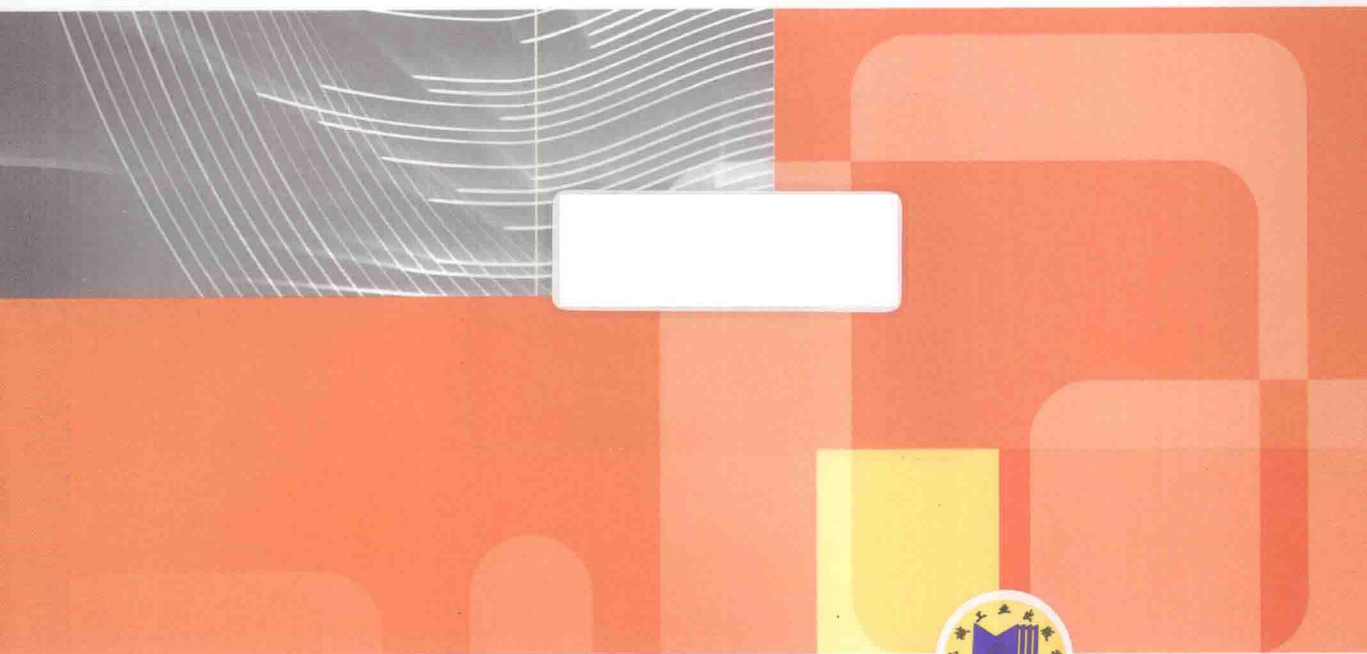
普通高等教育“十二五”规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

电厂燃气轮机概论

付忠广 张辉 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材
北京市高等教育精品教材立项项目

电厂燃气轮机概论

主 编 付忠广 张 辉
参 编 徐 钢 韩振兴 钱亚杰



机械工业出版社

本书是在北京市高等教育精品教材立项项目的资助下完成的,是学习电厂燃气轮机及其联合循环发电知识的入门教材。本书内容在撰写时力求通俗易懂,突出基本知识,不对技术的细节做深入的理论推演。书中包括电厂燃气轮机技术的最新发展动态以及对其未来发展趋势的一些介绍,力求使读者能够尽快对电厂燃气轮机及其联合循环发电知识有一个系统的了解。全书共 11 章,包括三部分主要内容:第一部分是燃气轮机的基本原理和结构,第二部分是燃气-蒸汽联合循环发电系统与设备,第三部分是燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环机组的运行、维护、控制和保护。

本书为普通高等院校能源动力类专业本科生教材,可供从事电厂燃气轮机及其联合循环机组安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读或作为培训教材使用,也可供专业硕士等相关专业人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电厂燃气轮机概论/付忠广,张辉主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 8

普通高等教育“十二五”规划教材 北京市高等教育精品教材立项项目
ISBN 978-7-111-43762-8

I. ①电… II. ①付…②张… III. ①发电厂—燃气轮机—高等学校—教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 197575 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖

责任校对:刘秀芝 封面设计:张 静

责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 15.25 印张 · 374 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43762-8

定价:29.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面防伪标均为盗版

前 言

在环境保护及可持续发展战略的指导下,国家正在不断地调整能源结构。由于以天然气为燃料的基于电厂燃气轮机的联合循环发电技术良好的经济性和环保性,一大批新型的联合循环电厂不断投入运行,联合循环发电技术在国内得到大力推广。电厂燃气轮机及其燃气-蒸汽联合循环在洁净煤发电技术的发展中也占有重要的地位。

发电用重型燃气轮机作为一种高技术的动力机械,在一定程度上反映了一个国家的综合国力和工业化水平。通过燃气轮机将天然气、煤气、生物质制气以及煤油、柴油、重油等气体和液体燃料的能量转化为电能或热能,是国家重要的战略举措。随着大量洁净优质的油气能源被高效率地用于电力生产,国家急需一大批掌握电厂燃气轮机及其联合循环发电技术的技术人员,以保证数量日益增长的联合循环电厂安全、经济地运行。与此同时,在教学上急需编写一部与教学需求相适应的教学参考书,特别是电厂燃气轮机的入门教材,更是专业教学所迫切需要的。为适应教学的需要,编者在北京市高等教育精品教材立项重点项目的资助下编写完成了本书。

燃气轮机涉及燃烧学、空气动力学、热力学和传热学等学科,还涉及材料、强度、振动、转子动力学和自动控制等理论。目前国内介绍燃气轮机的书籍,大多选取燃气轮机内容的几个部分作重点介绍,比如侧重航空方面,侧重新技术方面,侧重热力循环方面;也有分几册全面介绍燃气轮机内容的。本书定位于入门教材,内容撰写力求通俗易懂,突出最重要的基本知识,不对技术的细节作深入的理论推演。既对燃气轮机相关内容作广泛的介绍,又注重与同类部件间的对比,比如地面燃气轮机与航空燃气轮机、涡轮机与压气机等内容的对比,使读者既学到了燃气轮机的知识,又能够与其他相关内容相联系,举一反三。

全书共11章,包括三个主要部分:第一部分(第1~5章)为燃气轮机的基本原理和结构,第二部分(第6~8章)为燃气-蒸汽联合循环发电系统与设备,第三部分(第9~11章)为燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环机组的运行、维护、控制和保护。

第1、2章对燃气轮机作了简要的介绍,并讲述了燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环的热力学原理。

第3~5章分别介绍了电厂燃气轮机三大组件:压气机、燃烧室和涡轮机的工作原理和基本结构特征。

第6~8章在对燃气-蒸汽联合循环基本情况进行说明的基础上,重点介绍了常规燃气-蒸汽联合循环系统和设备以及几种燃煤联合循环。

第9章介绍了燃气轮机的控制调节原理,重点介绍了GE的MARK VI控制系统。

第10章介绍了燃气轮机的保护系统。

第11章先介绍了燃气轮机的几个辅助系统,然后介绍了燃气轮机的运行、维护和常见故障知识。

本书第1、2章由付忠广、张辉编写;第3~5章主要由张辉编写;第6~8章主要由徐

钢编写，其中第7章第3节的主要内容由韩振兴编写；第9~11章主要由韩振兴编写；钱亚杰为全书提供了重要的图片和数据资料。

全书由付忠广教授统稿，张辉对全书内容进行了编排和整理。

在本书编写过程中，编者参阅了多台燃气轮机的产品说明书、座谈报告、授课课件等。在此对给予编者帮助的各位同仁深表谢意。

由于编者水平和能力有限，错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论..... 1

- 1.1 燃气轮机的工作原理..... 1
- 1.2 燃气轮机的主要应用..... 3
- 1.3 世界主要燃气轮机厂商介绍..... 4
- 1.4 燃气-蒸汽联合循环..... 5
- 1.5 燃气-蒸汽联合循环发电
装置在国内外的的发展情况..... 9
- 复习思考题..... 12

第 2 章 燃气轮机的热力过程..... 13

- 2.1 基本热力学知识..... 13
- 2.2 燃气轮机基本的热力过程..... 15
 - 2.2.1 电站燃气轮机基本的热力
过程..... 15
 - 2.2.2 环境参数变化对燃气轮机
性能的影响..... 19
 - 2.2.3 航空燃气轮机基本的
热力过程..... 21
- 2.3 燃气复杂循环..... 23
- 2.4 燃气注蒸汽循环..... 25
- 2.5 燃气-蒸汽联合循环的多种形式..... 26
- 复习思考题..... 26

第 3 章 压气机..... 27

- 3.1 压气机的增压原理..... 27
- 3.2 单级压气机性能及影响因素..... 29
- 3.3 压气机非稳定工作特性..... 31
- 3.4 多级轴流压气机工作特性..... 32
- 3.5 压气机的防喘措施机理..... 34
- 3.6 压气机结构特点..... 34
- 3.7 各燃气轮机厂商压气机技术特点..... 38
- 复习思考题..... 39

第 4 章 燃烧室..... 40

- 4.1 燃烧的基本知识..... 40
 - 4.1.1 燃烧基本原理..... 40
 - 4.1.2 气体燃料燃烧..... 41
 - 4.1.3 液体燃料燃烧..... 42
- 4.2 燃烧室的燃烧组织..... 43

- 4.3 低污染燃烧..... 47

- 4.4 主要燃气轮机厂商燃烧室
技术特点..... 49
- 复习思考题..... 52

第 5 章 涡轮机..... 53

- 5.1 涡轮机工作原理..... 53
- 5.2 涡轮机性能特点..... 54
- 5.3 涡轮机与压气机的协调..... 56
- 5.4 涡轮机的结构..... 57
- 5.5 涡轮机热保护..... 58
 - 5.5.1 冷却介质和冷却方式..... 59
 - 5.5.2 涡轮机冷却结构布置..... 60
 - 5.5.3 涡轮机叶片腐蚀、氧化及
保护..... 61
- 复习思考题..... 61

第 6 章 多种形式的燃气-蒸汽 联合循环..... 62

- 6.1 常规联合循环..... 62
 - 6.1.1 无补燃的余热锅炉型
联合循环..... 62
 - 6.1.2 补燃的余热锅炉型联合循环..... 63
 - 6.1.3 增压锅炉型联合循环..... 63
 - 6.1.4 排气助燃型联合循环..... 64
 - 6.1.5 给水加热型联合循环..... 64
- 6.2 燃煤联合循环..... 65
 - 6.2.1 整体煤气化联合循环..... 65
 - 6.2.2 增压流化床燃煤
联合循环..... 66
 - 6.2.3 常压流化床燃煤
联合循环..... 66
- 6.3 新型联合循环..... 67
 - 6.3.1 注蒸汽燃气轮机联合循环..... 67
 - 6.3.2 湿空气涡轮机联合循环..... 68
 - 6.3.3 以卡琳娜循环为底循环的
联合循环..... 69
 - 6.3.4 氢氧联合循环..... 69
- 复习思考题..... 70

第7章 常规燃气-蒸汽联合循环

发电系统及设备 71

7.1 联合循环中燃气轮机的特点 71

7.2 燃气-蒸汽联合循环的蒸汽系统 72

7.2.1 联合循环中蒸汽系统的 构成及特点 72

7.2.2 联合循环中的余热锅炉 74

7.2.3 联合循环中的汽轮机 79

7.2.4 联合循环中蒸汽系统设计的 主要约束条件 80

7.3 燃气-蒸汽联合循环的主要辅助 系统与设备 82

7.3.1 联合循环装置的轴系配置 与总体布置 82

7.3.2 燃气轮机主要辅助系统概述 84

7.3.3 燃气轮机主要辅助系统与设备 84

7.4 联合循环系统的热力性能 102

7.4.1 联合循环热力性能参数的 计算与分析 102

7.4.2 主要设计参数对联合循环 性能的影响 105

7.5 燃气轮机的变工况 107

7.5.1 单轴燃气轮机的变工况性能 109

7.5.2 燃气轮机带动发电机时的性能 110

7.6 部件性能恶化与进排气压力损失 对机组性能的影响 110

7.6.1 压气机叶片积垢或 磨损的影响 111

7.6.2 涡轮机叶片积垢或磨损 对性能的影响 111

7.6.3 进排气压力损失变化 对性能的影响 112

复习思考题 113

第8章 燃煤联合循环发电系统 114

8.1 整体煤气化联合循环 (IGCC) 系统 114

8.1.1 整体煤气化联合循环 (IGCC) 系统概述 114

8.1.2 典型 IGCC 热力系统方案 概念性设计 117

8.1.3 典型 IGCC 电站运行情况 119

8.1.4 IGCC 未来的发展趋势 121

8.2 增压流化床联合循环系统 122

8.2.1 增压流化床联合循环系 统概述 122

8.2.2 第一代增压流化床联合 循环系统 124

8.2.3 第二代增压流化床联合 循环系统 128

8.3 常压流化床联合循环系统 129

8.4 其他燃煤联合循环系统 130

8.4.1 直接燃煤燃气轮机联合 循环系统 130

8.4.2 外燃式燃煤联合循环系统 131

8.4.3 整体煤气化燃料电池联合 循环系统 131

8.4.4 燃煤的磁流体发电联合循环 132

复习思考题 133

第9章 燃气轮机组调节与

控制系统 135

9.1 燃气轮机发电机组调节基础 135

9.1.1 转速自动调节系统 135

9.1.2 速度调节系统静态特性 140

9.1.3 调节系统动态特性及过 渡过程 144

9.2 燃气轮机控制系统 Mark VI 147

9.2.1 Mark VI 系统组成及特点 148

9.2.2 燃气轮机主控系统 149

9.2.3 燃气轮机顺序控制系统 165

9.2.4 进口导叶 (IGV) 的控制 170

9.2.5 压气机入口抽气加热控制 174

9.2.6 燃料控制系统 176

9.3 燃气轮机控制系统 DIASYS Netmation 简介 183

9.4 燃气轮机控制系统 TELEPERM XP 简介 185

复习思考题 187

第10章 燃气轮机保护系统 188

10.1 通用燃气轮机保护系统 188

10.1.1 超速保护 188

10.1.2 超温保护 191

10.1.3 熄火保护 193

10.1.4 燃烧监测保护 194

10.1.5 振动保护 198

10.1.6 液压遮断油系统	202	11.3.3 手动紧急停机	216
10.2 三菱公司燃气轮机保护		11.3.4 冷机	216
系统简介	205	11.4 燃气轮机日常检查与维护	216
10.3 西门子公司燃气轮机保		11.4.1 日常检查项目	216
护系统简介	207	11.4.2 燃气轮机的清洗	217
复习思考题	208	11.5 燃气轮机的内部孔窥检查	220
第 11 章 燃气轮机组的运行与维护	209	11.6 燃气轮机发电设备的检修	221
11.1 燃气轮机起动	209	11.6.1 燃气轮机检修范围划分	221
11.1.1 正常的起动过程	209	11.6.2 燃气轮机检修周期	223
11.1.2 并网、带负荷	210	11.7 联合循环发电设备运行事故	226
11.1.3 快速起动和快速加载起动	211	11.7.1 燃气轮机故障、事故处理	
11.1.4 起动过程中的参数变化	212	原则	226
11.2 燃气轮机发电设备的运行监视	213	11.7.2 燃气轮机的运行故障、典型	
11.3 燃气轮机的停运	214	事故及处理	227
11.3.1 正常停机	215	复习思考题	234
11.3.2 冷拖停机	215	参考文献	235

第 1 章 绪 论

本章主要介绍以下几方面内容：①燃气轮机的工作原理以及与其他动力装置的区别和联系；②燃气轮机的主要应用；③世界主要燃气轮机厂商介绍；④燃气-蒸汽联合循环及其发电装置在国内外的发展情况。

1.1 燃气轮机的工作原理

燃气轮机是一种将热能转化为机械功的动力装置。从热力学的角度看，燃气轮机与蒸汽机、内燃机、汽轮机十分类似，都是利用高压、高温工质的焓降输出有用的机械功。这四类装置的主要区别体现在形成工质高压、高温状态的方式，以及利用工质焓降的形式两个方面。

气体工质的高压状态由两种方式产生。第一种方式是通过相变，即将液态工质加热并限制其体积，从而产生高压，蒸汽机、汽轮机工质的高压状态，即由这种方式产生；第二种方式是通过气体做功产生高压，内燃机和燃气轮机工质的高压状态由这种方式产生。气体做功增压的形式有两种，如图 1-1 所示。燃气轮机中采用的是旋转式压缩，气体通过连续旋转的叶轮实现增压；内燃机中采用的是往复式压缩，气体的压缩过程不是连续的。与气体工质增压做功相类似，高温、高压气态工质的膨胀也有旋转式和往复式两种形式，燃气轮机中这一个膨胀过程也是通过连续旋转的叶轮实现的，而内燃机中的膨胀过程则是与气体的增压过程组合在一起，周期性地实现一个热力过程。

表 1-1 给出了上述四种动力装置的比较，较高的压力是这些动力装置对外输出机械功的关键，特别是动力输出过程中压力的变化，在某种程度上决定了对输出功率的水平。图 1-2 所示为电厂燃气轮机基本工作原理图。其动力输出采用涡轮机，增压部分由压气机完成，压气机与涡轮机共轴并由涡轮机带动，工质升温部分由燃烧室完成。由于蒸汽机和内燃机是通过活塞在气缸中往复移动实现对工质做功，其做功间歇及单缸容积较小两个因素限制了蒸汽机和内燃机的大功率输出。与其相比，汽轮机和燃气轮机则可以实现较大功率设计。汽轮机的入口压力较高而出口压力较低，且压降较大，故而功率可有较大输出。燃气轮机与汽轮机相比，其入口端温度高，而压力低，且出口端压力较高，导致其单机最大功率不如汽轮机大。

表 1-1 四种动力装置的比较

	蒸汽机	内燃机	汽轮机	燃气轮机
工质	水蒸气	燃气	水蒸气	燃气
压力水平 ^①	10MPa	8.5~14MPa	15~30MPa	30 压比
温度水平 ^②	450℃	1800℃	600℃	1400℃
功率水平	3kW~18MW	13kW~4MW	500MW~1000MW	10kW~300MW
高压产生原理	活塞压缩	活塞压缩	汽包	压气机
高温产生	锅炉加热	燃料燃烧	锅炉加热	燃料燃烧
设备运动形式	往复	往复	旋转	旋转

① 目前工业使用的较高压力值。

② 目前工业使用的较高温值。

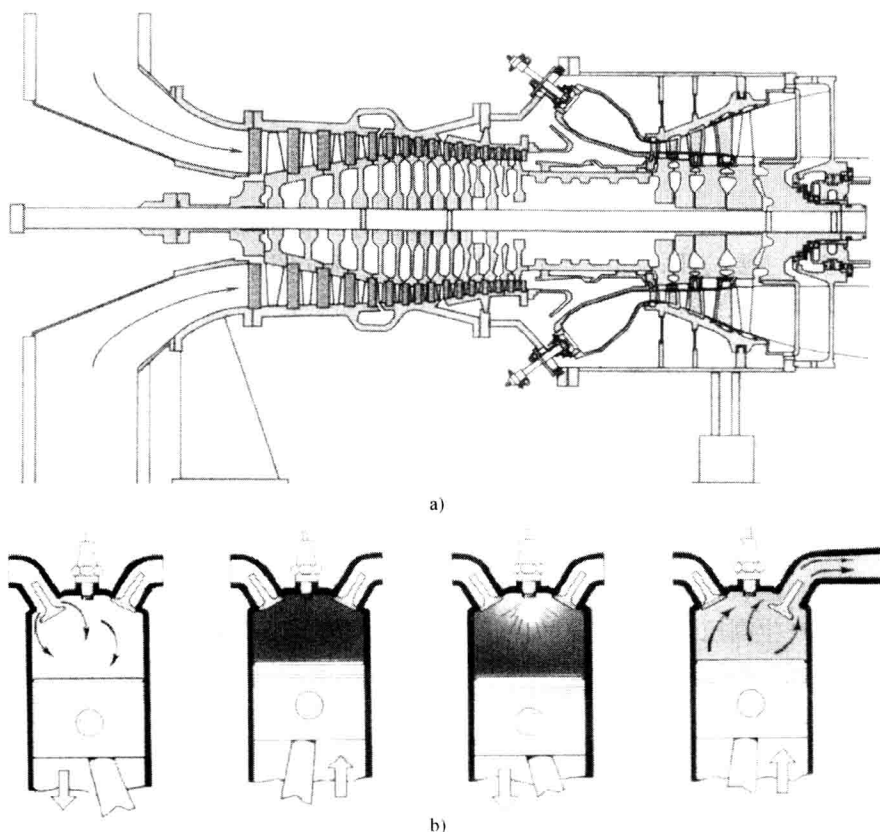


图 1-1 旋转式与往复式动力机械的差异^[1]

a) 旋转式动力机械 b) 往复式动力机械

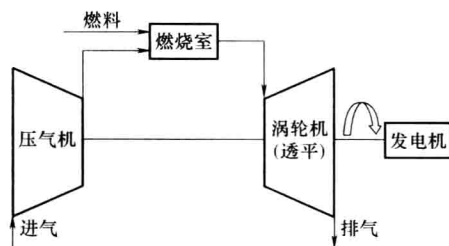


图 1-2 电厂燃气轮机基本工作原理图

表 1-1 中所列的内燃机和燃气轮机结构紧凑，整体可以移动，整个系统的重量较轻。其主要的原因有两个：一是内燃机和燃气轮机均是以空气为工质的开式系统，即从大气中引入空气，再将气体排入大气。而蒸汽机和汽轮机以水为工质，需要较多的辅助设备实现水的循环。另一个原因是表 1-1 中所列的动力装置，都有一个对工质升温增压的过程，内燃机和燃气轮机采用做功和燃料直接燃烧的办法对工质升温增压，而蒸汽机和汽轮机则采用对水加压和相变加热的办法实现，水的相变过程需要利用较多的管束，这就显著增加了系统的复杂性和重量。在四种动力装置中，蒸汽机和汽轮机多使用煤燃料，内燃机和燃气轮机则使用天然气及液体燃料，故而污染物的排放也有所差异。

1.2 燃气轮机的主要应用

从燃气轮机的工作原理可以看出,高温、高压的燃气膨胀可以输出转矩来驱动发电机,也可以将高焓值的燃气通过喷管高速向后喷出,产生向前的推力,从而将燃气轮机作为航空器的动力装置使用。图 1-3 所示为不同用途的燃气轮机示意图。图 1-3a 所示为电厂用燃气轮机,其发电机与压气机和涡轮机共轴,发电机和压气机的驱动力矩都由涡轮机来提供,力矩分配一般是压气机约为发电机的 2 倍,发电机也可接于涡轮机后面。图 1-3b 所示为螺旋桨类航空燃气轮机,它与电厂用燃气轮机十分相似,螺旋桨叶在燃气轮机外部,通过高速旋转驱动气流向后流动,从而产生推力,作为飞行器的动力。图 1-3c 所示为典型的喷气类燃气轮机,涡轮机输出的力矩全部用于压气机的增压,燃气的剩余焓值将全部用于产生高速的向后气流。图 1-3d 所示为用于非恒速负载的燃气轮机,由于其所带负载要求转速随负载变化而变化,为了保证燃气轮机压气机、涡轮机的稳定工作,需要独立出动力涡轮机,且动力涡轮机不与压气机共轴,其转速可以随负载的变化而变化,而前面压气机轴的转速可以保持不变,从而保证燃气轮机整体的稳定工作。

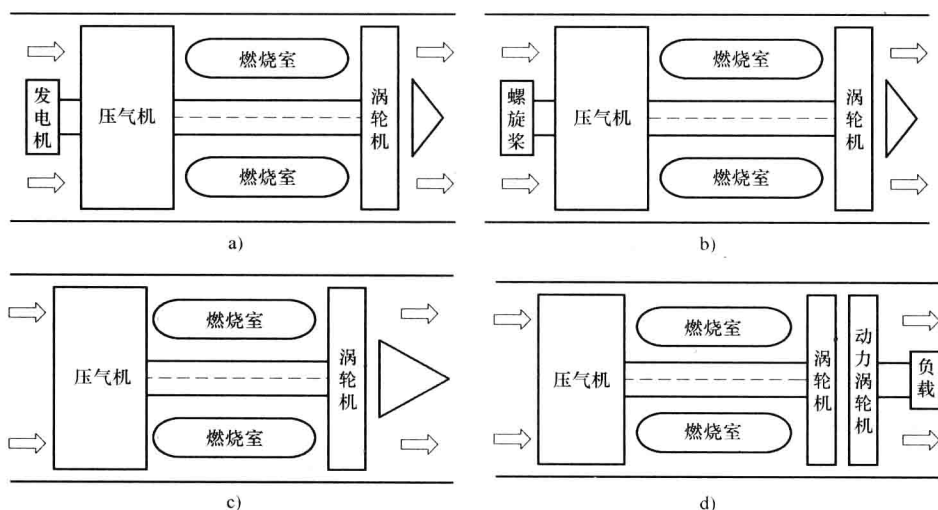


图 1-3 不同用途燃气轮机示意图

a) 电厂类 b) 螺旋桨类 c) 喷气类 d) 动力涡轮类

不同尺寸、类型的燃气轮机输出功率为 $10\text{kW}\sim 300\text{MW}$, 大的功率输出范围使燃气轮机可以应用在很多需要动力装置的设备上, 其主要的类型有驱动类和推力类两种。

首先, 在航空航天领域, 主要应用图 1-3b 和图 1-3c 所示的类型, 兼有驱动和推力两种应用类型。可以说是燃气轮机开启了飞机动力的新时代, 使飞机由活塞式发动机过渡到喷气式发动机, 飞机飞行速度也由原来的亚音速飞跃到超音速。由于燃气轮机技术在航空领域发展速度最快, 航空燃气轮机技术的运用已成为其他领域燃气轮机技术发展的捷径。

其次, 在电力领域, 主要应用图 1-3a 所示的类型。目前, 中国的电厂中以汽轮机作为发电动力装置的占主体地位, 包括燃煤的火电厂及核电厂。进入 21 世纪后, 随着人们对环

境保护问题的日益关注, 燃气-蒸汽联合循环电厂发展迅速。从机组发电功率的输出水平来看, 单台燃气轮机的输出功率在 250MW 左右, 燃气-蒸汽联合循环整体的输出功率在 400MW 左右, 这与目前 1000MW 的汽轮机相比有一定差距, 但可以采用 2~4 台燃气轮机组合, 以输出较大的功率。

驱动类型的燃气轮机除了用于电厂外, 也可以作为发动机用于机车、汽车、坦克等地面运输机械和舰船驱动, 但存在传动减速、倒车和起动转矩三个问题; 还可以作为大型泵与风机的动力, 在能源、石油、化工等领域也有重要的应用。读者可通过阅读相关文件资料进一步了解燃气轮机在航空航天、电力、能源、交通等领域的应用情况。

1.3 世界主要燃气轮机厂商介绍

世界范围内最早拥有自主燃气轮机技术体系的四个代表性厂商为通用电气 (GE) 公司、西屋 (Westinghouse) 公司、西门子 (Siemens) 公司和布朗勃法瑞 (ABB) 公司。目前西门子公司和西屋公司合并在一起, 但各自拥有自主燃气轮机产品; 原生产西屋公司燃气轮机的日本三菱重工经发展已成为燃气轮机的一大供货商; ABB 公司被阿尔斯通 (Alstom) 公司收购后, 阿尔斯通公司也成为燃气轮机供货商。

1. 通用电气 (GE) 公司

通用电气 (GE) 公司即美国的 General Electric 公司, 成立于 1878 年, 目前已成为一个特大型跨国公司, 其电厂燃气轮机在世界范围内的市场占有率最高。通用电气公司的燃气轮机制造历史悠久。20 世纪 40 年代末通用电气公司将航空燃气发动机技术用于发电, 开始了燃气轮机发电机组的研究、设计和制造。20 世纪后期, 通用电气公司生产出燃气-蒸汽联合循环发电机组。20 世纪 90 年代后期该公司生产的最大燃气轮机单机出力达 226.5MW, 单轴联合循环机组总出力达 330.3MW, 热效率高达 52.9%; 其在 21 世纪初推出的新型燃气轮机 (9H) 机组联合循环出力为 480MW, 热效率高达 60%^[2]。通用电气公司的技术特点主要体现在压气机的模化设计、高温材料、热涂层及冷却技术等方面。

2. 西门子公司

西门子 (Siemens) 公司的工业燃气轮机最早是由其 KWU 发电部开发的。1948 年, 西门子公司开始自行设计燃气轮机, 没有参照航空燃气轮机母型。1961 年, 该公司投运 25MW 燃气轮机, 并于 1984 年使用 114MW 的 V94.2 型燃气轮机组成 750MW 的完全补燃型联合循环机组。1998 年, 西门子公司收购西屋 (Westinghouse) 公司的发电事业部 (PG-BU) 成立西门子-西屋 (Siemens-Westinghouse) 动力公司 (SWPC)。西屋公司于 1886 年由 G. 威斯汀豪斯在美国宾夕法尼亚州创立, 其主要业务领域涉及发电设备、输变电设备、用电设备和电控制设备、电子产品等。

3. 阿尔斯通公司

阿尔斯通 (Alstom) 公司燃气轮机的技术实际上来源于 ABB 公司。1999 年, 阿尔斯通公司将自己原有的重型燃气轮机业务出售给通用电气 (GE) 公司, 与 ABB 公司合资成立了 ABB-Alstom 公司。2000 年, 阿尔斯通收购了 ABB 的股份, 成立 Alstom 电力部。ABB 由两个 100 多年历史的国际性企业——瑞典的阿西亚公司 (ASEA) 和瑞士的布朗勃法瑞公司 (BBC, Brown Boveri), 于 1988 年合并而成, 两家公司分别成立于 1883 年和 1891 年。因

而目前阿尔斯通的燃气轮机继承的是 BBC 的技术。BBC 公司于 1939 年投运了世界首台燃气轮机, 于 1948 年研制成功第一台双轴有再热的燃气轮机, 并于 1956 年投运首台燃气-蒸汽联合循环机组。1996 年研制成 GT24 (60Hz) 和 GT26 (50Hz) 再热式燃气轮机。

4. 三菱公司

三菱(即三菱重工, MIT: Mitsubishi Heavy Industries)公司在 20 世纪 60 年代引进了西屋(Westinghouse)公司的燃气轮机技术, 并在此基础上进行了联合开发及自主开发, 发展很快。1963 年, 三菱公司生产出第一台 M171 型燃气轮机。1986 年, 第一台三菱公司自行独立设计的 MF111 型燃气轮机投用。1998 年, 西屋公司被西门子公司收购后, 三菱公司与西屋公司的合作终止。1999 年的时候三菱公司推出了自己的燃气轮机产品 M701G。

1.4 燃气-蒸汽联合循环

1. 燃气-蒸汽联合循环原理

常见的热机循环多为简单循环, 且大多采用一种工质。由于所采用工质的性质和金属材料耐温性等的限制, 热机只能局限于狭窄的温度区间内工作, 因而热功转换的效率比较低。

随着技术的不断进步, 目前发电用的燃气轮机循环(布雷顿循环)燃气初温普遍可达 1300℃以上(F 级重型燃气轮机)。最新技术的先进发电燃气轮机的初温则可达 1430℃(H 级重型燃气轮机)。这些重型燃气轮机的排气温度也很高, 且燃气工质的流量很大, 致使大量热能随排气进入大气而损失掉, 进而导致单独燃气轮机循环的热效率并不高(一般在 35%~45%)。而另一种发电系统常用的热力循环——朗肯循环(汽轮机循环)的排汽温度则可以低到接近大气温度, 但由于设备受到材料限制, 蒸汽初温不能很高(550~650℃), 因而其热效率的提高也受到很大限制(一般在 35%~45%)。若将具有不同工作温度区间的上述两种热机循环联合起来, 互为补充, 即利用高温循环热机的排热作为低温循环的热源, 就有望大幅降低总的排热损失, 进而提高整体循环效率, 这种联合装置叫燃气-蒸汽联合循环。

大型燃气轮机出口排气温度达 400~650℃, 与一般汽轮机的进汽温度相当。且燃气轮机的排气量高达 600kg/s, 这样高热容量的排气可以用来加热水, 使其在一定程度上扮演燃煤电厂中锅炉的角色。最后产生的过热蒸汽则可以驱动汽轮机旋转对外做功。这种形式的发电系统就是当前普遍应用的燃气-蒸汽联合循环。余热锅炉在该系统中相当于换热器, 水在余热锅炉里与燃气轮机排气换热后成为过热蒸汽。

与常规燃煤电厂相比, 燃气-蒸汽联合循环电厂最大的优势在于使用了更为清洁的气体燃料(也包含液体燃料), 对环境污染小, 而且燃气轮机不需要大量的冷却水, 联合循环的耗水量在一般情况下仅相当于同容量火电厂的 1/3 左右^[3]。其次, 燃气-蒸汽联合循环机组启停快捷, 调峰性能好。例如, 燃气轮机可以实现 20min 内从起动到满负荷, 联合循环机组可实现 60min 内满负荷运行。另外, 联合循环电厂占地少、建厂周期短、自动化程度高、运行人员少。

2. 联合循环机组的基本结构

联合循环机组的热力原理图和基本结构如图 1-4 所示。燃气-蒸汽联合循环机组主要由燃气轮机、余热锅炉、汽轮机以及相应的辅机系统组成。下面将分别进行介绍。

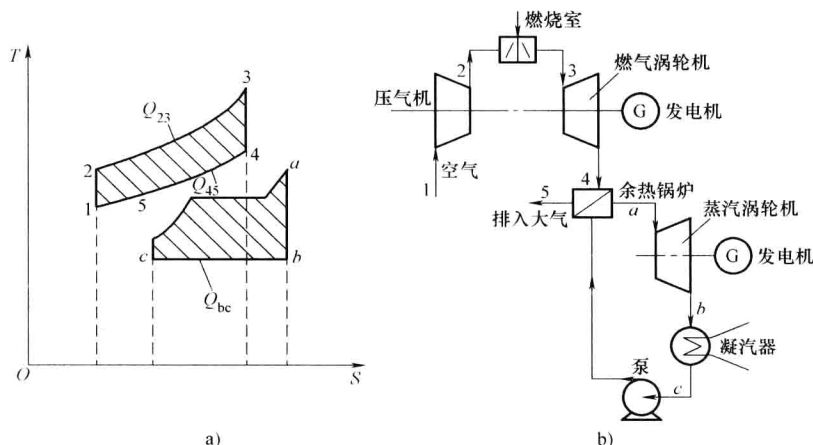


图 1-4 燃气-蒸汽联合循环机组的热力原理及基本结构
a) 热力原理图 b) 基本结构图

(1) 燃气轮机 燃气轮机是以空气和燃气为工质的热机，一般由压气机、燃烧室和涡轮机三大部件组成。压气机的作用是提高工质的压力；燃烧室的作用是提高工质的温度，将燃料的化学能转换为工质的热能；涡轮机的作用是通过工质的膨胀将其热能转换为机械功。燃气轮机中的压气机是由涡轮机直接驱动的，涡轮机产生的机械功在抵消掉压气机的耗功之后才能带动发电机产生电能。

(2) 余热锅炉 (HRSG) 余热锅炉 (HRSG: Heat Recovery Steam Generator) 是利用工业生产过程中的余热产生蒸汽的设备。燃气-蒸汽联合循环中的余热锅炉是联合循环电厂中的关键设备之一，它处于燃气循环和蒸汽循环的交接点上，接受燃气轮机的排气余热，并产生汽轮机所需的蒸汽；由于余热锅炉与燃气轮机、汽轮机的联系密切，所以其性能在很大程度上受这些设备的影响，同时也在很大程度上影响这些设备。

(3) 汽轮机 联合循环机组所用的汽轮机与常规电站所用的汽轮机相比，其基本原理和工作过程与常规电站汽轮机相同，但在设计和运行方面存在着较大的不同。其主要特点为：全变压，无抽汽和增设补汽。此外，联合循环汽轮机的末级叶片长度较常规电站汽轮机有所加长，对汽轮机的制造水平提出了更高的要求。

(4) 主要辅助设备和系统 余热锅炉型联合循环机组需配备的辅助设备和系统一般有起动装置、润滑油系统、燃料系统、冷却水系统、进气系统，以及通流部分清洗设备、离合器等。

3. 燃气-蒸汽联合循环发电机组配置方式

联合循环机组由燃气轮机、余热锅炉、汽轮机、发电机组成。其中，燃气轮机和汽轮机是两个动力输出设备，它们与发电机的连接方式在实际使用中可有多种形式。

(1) 单轴布置 单轴布置是指一台燃气轮机、一台汽轮机、一台发电机，三体一轴的形式。单轴布置具体分为四种情况，其关键区别在于发电机是中置还是偏置，以及燃气轮机是冷端输出功率还是热端输出功率。所谓发电机中置是指发电机轴向位置在燃气轮机和汽轮机中间（见图 1-5a），而发电机在一侧则为发电机偏置（见图 1-5b）。

发电机中置是被大家所推崇的一种形式，其主要特点是发电机和汽轮机之间可安装同步离合器，能够大大提高电厂运行灵活性（见图 1-6）。由于离合器的采用，在起动过程中，燃

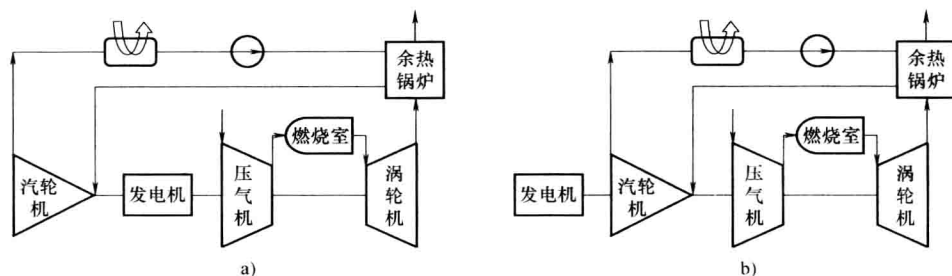


图 1-5 单轴联合循环系统示意图

a) 发电机中置 b) 发电机偏置

气轮机可以先按简单循环方式启动和运行。汽轮机处于脱开状态，一旦汽轮机转速升至额定转速，离合器就自动同步燃气轮发电机和汽轮机；在汽轮机停运的时候，也可以单独启动燃气轮机，即以燃气轮机简单循环进行工作。此外，发电机中置的结构也使得汽轮机排汽可轴向输出，与径向输出相比，其损失可以减少。发电机中置的缺点是在检修时无法轴向抽取发电机转子，给检修工作带来不便。

燃气轮机冷端输出是指从压气机机端接入汽轮机或发电机轴（见图 1-5a），而热端输出是指从涡轮机端接入汽轮机或发电机轴。目前，燃气轮机的功率输出多采用冷端输出的方式，其主要的考虑是压气机冷端温度较低，冷、热态间的轴向移动位移可以较小，同时涡轮机排气也是轴向输出的，排气损失较小。

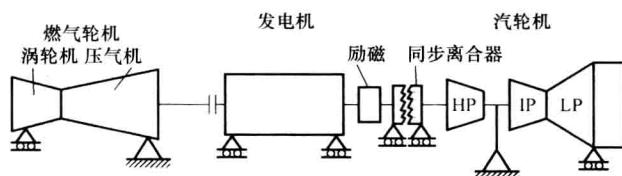


图 1-6 发电机中置连接结构示意图

单轴布置只有一台发电机及相关的输变电设备，余热锅炉一般不需加装旁通烟囱和挡板，辅助设施（如冷却水系统）可以统一布置，使控制系统的运行和维护简化、布置紧凑、厂房面积减小、土建成本降低，且整个电厂紧凑高效，电站投资较低（见图 1-7）。因而单轴布置近年来被迅速推广应用，特别是在新一代大功率联合循环中广泛采用单轴机组。单轴布置的不足之处是不能采用前期安装简单循环的燃气轮机先行投入运行，后期按需增加蒸汽循

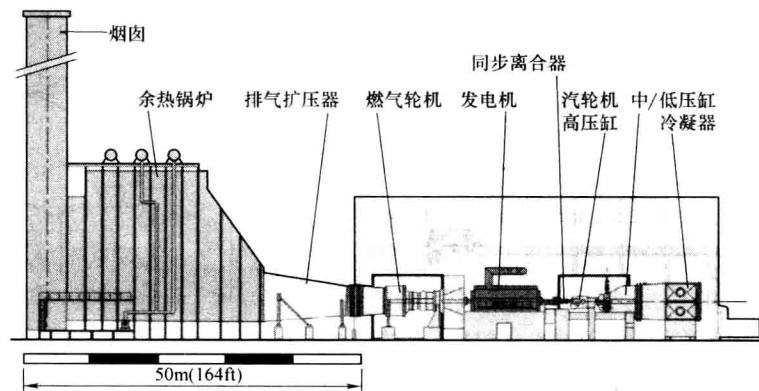


图 1-7 单轴联合循环电厂厂房布置示意图

环的分期建设方案，基本上不适用于对已有的汽轮发电机组进行提高效率、增大容量的技术改造。

(2) 分轴布置 分轴布置是指燃气轮机与汽轮机各自与两台发电机连接的形式（见图 1-8），其中燃气轮机端也存在选择冷端输出还是热端输出的问题。通用电气（GE）公司的 MS6001B 和 MS9001E 采用了燃气轮机热端功率输出。

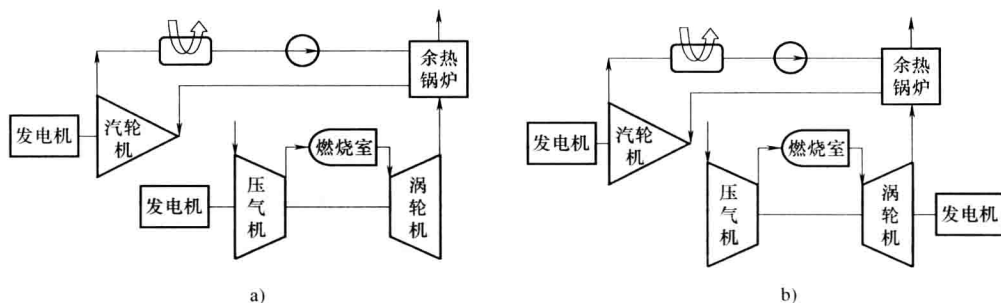


图 1-8 分轴联合循环系统示意图

a) 冷端输出 b) 热端输出

从结构角度来讲单轴布置明显优于分轴布置，其结构紧凑，相关部件少，成本低。在电站中有现成蒸汽源的情况下，还可以利用汽轮机作为燃气轮机的起动机。分轴布置的优势主要体现在两个方面：一是安装周期较短的燃气轮机可及早投产运行，而后逐步建成蒸汽循环部分，对于燃煤小电站机组的改造就需要以分轴的布置方式进行；二是分轴布置方式设备的检修较单轴的便利。

(3) 多轴布置 多轴布置是指两台或多台燃气轮机排气所产生的蒸汽汇集到一起，共同驱动一台汽轮机的布置形式，也被简单地称为“二拖一”或“多拖一”方式。上面所述单轴和分轴布置形式也可被称为“一拖一”方式。图 1-9 所示为“二拖一”多轴联合循环系统示意图，即两台燃气轮机的排气经各自的余热锅炉所产生的蒸汽供给一台汽轮机。

多轴布置结构中，各个轴可以单独运行。所以某一个轴停运时，其他轴可以在额定负荷下运行，使机组整体在部分负荷运行时的效率能够保持在较高的水平。例如，在由四个轴构成的机组中，一个轴停止时，负荷为 75%，两个轴停止时，负荷为 50%，这样可以确保各轴额定状态下的效率。此外，多轴机组一般用一台汽轮机，该汽轮机的蒸汽流量是单轴机组中单台汽轮机的 2~4 倍，能够提高汽轮机的内效率，从而提高联合循环的效率。

多轴布置机组的不足之处在于蒸汽和水的管路复杂化，需多装阀门和管路，这样不仅降低了运行的可靠性，且加大了流动损失，还会部分抵消因汽轮机内效率提高而带来的好处。从运行方面来看，多轴布置会使机组操作复杂化。

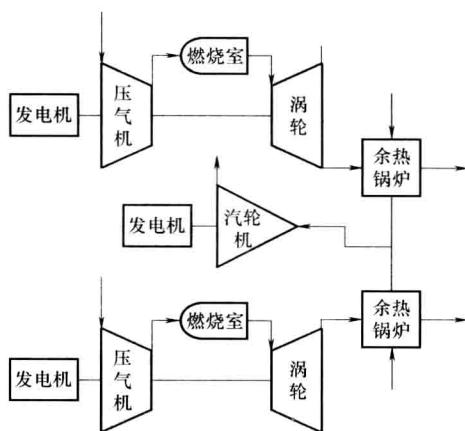


图 1-9 “二拖一”多轴联合循环系统示意图

多轴联合循环机组中燃气轮机、余热锅炉、汽轮机和发电机的相互布局关系不仅会影响联合循环电站的总体布置和投资费用,而且还会影响联合循环装置的运行性能。因此,在场地允许、技术经济比较合理的情况下,联合循环机组的布置应力求紧凑、对称,尽量减少主蒸汽管道的长度。

1.5 燃气-蒸汽联合循环发电装置在国内外的的发展情况

燃气-蒸汽联合循环是从 20 世纪 40 年代开始登上电力工业舞台的。1949 年世界首套燃气-蒸汽联合循环机组投入运行。该机组安装在美国奥克拉何马州阿尔杜·黑依电厂,是利用燃气轮机排气加热锅炉给水,燃气初温为 760°C ,功率为 3.5MW,锅炉给水由 65°C 加热到 148°C ,涡轮机排气由 415°C 降至 171°C 。由于各种因素的限制,20 世纪 80 年代之前建设的联合循环电厂,机组容量小、热效率比较低,在电力系统中只能作为紧急备用电源和调峰机组使用,并没有得到太多的应用。

20 世纪 80 年代以后,燃气轮机的初温提高到 $1100\sim 1288^{\circ}\text{C}$,排气温度达 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$,这使联合循环发电效率超过 50%,明显超过了当时的大型煤电机组发电效率。再加上世界范围内天然气资源的进一步开发,使得燃气轮机及其联合循环装置得到迅猛发展。其世界电力工业中的地位也不断升高,不仅可以作为紧急备用电源和调峰机组使用,而且大量被用作基本负荷电站。20 世纪末与本世纪初,联合循环机组技术又出现大飞跃,各公司相继推出了先进的大功率、高效率的燃气轮机系列及联合循环机组,燃气初温超过 1300°C ,联合循环效率可达 55%~58%,400~1000MW 级单轴或双轴联合循环装置批量投入商业运行。近期,新一代的 H 级燃气轮机及其联合循环投入运行,其燃气轮机初温高达 1430°C ,相应的联合循环效率达到 60%、单机容量达到 480MW、各种污染物排放量极低,呈现出更强的竞争力和广阔的发展前景。现在,燃气-蒸汽联合循环在电力系统中的地位也发生明显变化,在世界发电容量中所占份额快速增长。目前,全世界每年新增的发电容量中,有 35% 以上采用燃气-蒸汽联合循环机组,而美国更是高达 48%,在新增的发电设备总装机容量中,联合循环发电装置将超过常规火电站,占电力发展的主导地位。表 1-2 为目前世界商业应用的典型联合循环燃气轮机型号与性能参数。

表 1-2 目前世界商业应用的联合循环燃气轮机主要型号与性能参数

厂家	型号	功率/MW	效率(%)	压比	燃气初温/ $^{\circ}\text{C}$	排气温度/ $^{\circ}\text{C}$	排气流量/(kg/s)
通用电气	PG9001H	292	39.5	23	1430	595	702.6
	PG9351FA	255.6	36.9	15.4	1327	609	624
	PG9231EC	169.2	34.9	14.2	1240	558	508
	PG9171E	123.4	33.8	12.3	1124	538	404
三菱重工	M701G	334	39.5	21	1415	587	738
	M701F	270.3	38.2	17	1400	586	651
	M701	144	34.8	14	1250	542	441
西门子	V94.3A	265.9	38.6	17	1316	584	656
	V94.2A	190.7	35.3	13.9	1177	584	520
	V94.2	155.6	34.2	11.3	1177	537	509