



大型燃气—蒸汽联合循环电厂培训教材

深圳能源集团月亮湾燃机电厂
中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会

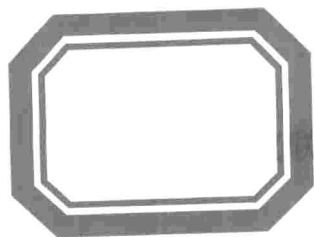
编

电气分册

DIANQI FENCE



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>



合循环电厂培训教材

电气分册

深圳能源集团月亮湾燃机电厂
中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会 编

重庆大学出版社

内容提要

本书系统地阐述了 F 级燃气轮机电厂的电气主设备及电气系统的组成、工作原理、运行操作维护以及典型事故处理。全书共分 7 章: F 级燃气轮机发电机, 变压器, 电气主接线, 高压设备及发电机出口断路器, 厂用电系统, 发电厂的电气控制, 发电厂防雷及过电压。

本书内容全面实用, 突出了 F 级燃气轮机机组的电气系统和电气设备的特点, 针对性强, 适合作为燃气—蒸汽联合循环电厂运行人员的培训用书, 也可作为从事电厂相关工作的管理人员、技术人员和筹建人员的技术参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型燃气-蒸汽联合循环电厂培训教材. 电气分册/
深圳能源集团月亮湾燃机电厂, 中国电机工程学会燃气轮
机发电专业委员会编. —重庆: 重庆大学出版社,
2014. 4

ISBN 978-7-5624-7852-2

I. ①大… II. ①深… ②中… III. ①燃气-蒸汽联合
循环发电—发电厂—技术培训—教材②燃气-蒸汽联合循
环发电—电厂电气系统—技术培训—教材 IV.
①TM611.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 274031 号

大型燃气-蒸汽联合循环电厂培训教材 电气分册

深圳能源集团月亮湾燃机电厂
中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会 编
策划编辑: 周立
责任编辑: 文鹏 姜凤 版式设计: 周立
责任校对: 任卓惠 责任印制: 赵晟

*

重庆大学出版社出版发行
出版人: 邓晓益
社址: 重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号
邮编: 401331

电话: (023) 88617190 88617185(中小学)

传真: (023) 88617186 88617166

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 19.75 字数: 493 千

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1—4 000

ISBN 978-7-5624-7852-2 定价: 55.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题, 本社负责调换
版权所有, 请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书, 违者必究

编 委 会

主 任 苏 坚

副主任 (按姓氏笔画排序)

朱小英 杨 中 程芳林

委 员 甘孟必 曹建中 胡国良

编写人员名单

主 编 曹建中

参编人员 (按姓氏笔画排序)

邓仁超 吴小先 汪 路

陈小勇 罗小国 敖显江

彭足仁 蔡晓铭

序 言

1791 年英国人巴伯首次描述了燃气轮机 (Gas Turbine) 的工作过程。1872 年德国人施托尔策设计了一台燃气轮机, 从 1900 年开始做了 4 年的试验。1905 年法国人勒梅尔和阿芒戈制成了第一台能输出功率的燃气轮机。1920 年德国人霍尔茨瓦特制成了第一台实用的燃气轮机, 效率为 13%, 功率为 370 kW。1930 年英国人惠特尔获得燃气轮机专利, 1937 年在试车台成功运转离心式燃气轮机。1939 年德国人设计的轴流式燃气轮机安装在飞机上试飞成功, 诞生了人类第一架喷气式飞机。从此燃气轮机在航空领域, 尤其是军用飞机上得到了飞速发展。

燃气轮机用于发电则始于 1939 年, 由于发电用途的燃机不受空间和质量的严格限制, 所以尺寸较大, 结构也更加厚重结实, 因此具有更长的使用寿命。虽然燃气-蒸汽联合循环发电装置早在 1949 年就投入运行, 但是发展不快。主要是因为轴流式压气机技术进步缓慢, 如何提高压气机的压比和效率一直在困扰压气机的发展, 直到 20 世纪 70 年代轴流式压气机在理论上取得突破, 压气机的叶片和叶形按照三元流理论进行设计, 压气机整体结构也按照新的动力理论进行布置, 压气机的压比才从 10 不断提高, 现在压比则超过了 30, 效率也同步提高, 也同时满足了燃机的发展需要。

影响燃机发展的另一个重要原因是燃气透平的高温热通道材料。提高燃机的功率就意味着提高燃气的温度, 热通道部件不能长期承受 1 000 °C 以上的高温, 这就限制了燃机功率的提高。20 世纪 70 年代燃机动叶采用镍基合金制造, 在叶片内部没有进行冷却的情况下, 燃气初温可以达到 1 150 °C, 燃机功率达到 144 MW, 联合循环机组功率达到 213 MW。20 世纪 80 年代采用镍钴基合金铸造动叶片, 燃气初温达到 1 350 °C, 燃机功率 270 MW, 联合循环机组功率 398 MW。90 年代燃机采用镍钴基超级合金, 用单向结晶的工艺铸造动叶片, 燃气初温 1 500 °C, 燃机功率 334 MW, 联合循环机组功率 498 MW。进入 21 世纪, 优化冷却和改进高温部件的隔热涂层, 燃气初温 1 600 °C, 燃机功率 470 MW, 联合循环机组功率 680 MW。解决了压比和热通道高温部件材料的问题后, 随着燃机功率的提

高,新型燃机单机效率大于 40%,联合循环机组的效率大于 60%。

为了加快大型燃气轮机联合循环发电设备制造技术的发展和应⤿用,我国于 2001 年发布了《燃气轮机产业发展和技术引进工作实施意见》,提出以市场换技术的方式引进制造技术。通过打捆招标,哈尔滨电气集团公司与美国通用电气公司,上海电气集团公司与德国西门子公司,东方电气集团公司与日本三菱重工公司合作。三家企业共同承担了大型燃气轮机制造技术的引进及国产化工作,目前除热通道的关键高温部件不能自主生产外,其余部件的制造均实现了国产化。实现了 E 级、F 级燃气轮机及联合循环技术国内生产能力。截至 2010 年燃气轮机电站总装机容量 2.6 万 MW,比 1999 年燃气轮机装机总容量 5 939 MW 增长了 4 倍,大型燃气-蒸汽联合循环发电技术在国内得到了广泛地应用。

燃气-蒸汽联合循环是现有热力发电系统中效率最高的大规模商业化发电方式,大型燃气轮机联合循环效率已达到 60%。采用天然气为燃料的燃气-蒸汽联合循环具有清洁、高效的优势。主要大气污染物和二氧化碳的排放量分别是常规火力发电站的 1/10 和 1/2。

在《国家能源发展“十二五”规划》提出:“高效、清洁、低碳已经成为世界能源发展的主流方向,非化石能源和天然气在能源结构中的比重越来越大,世界能源将逐步跨入石油、天然气、煤炭、可再生能源和核能并驾齐驱的新时代。”规划要求“十二五”末,天然气占一次能源消费比重将提高到 7.5%,天然气发电装机容量将从 2010 年的 26 420 MW 发展到 2015 年的 56 000 MW。我国大型燃气-蒸汽联合循环发电将迎来快速发展的阶段。

为了让广大从事 F 级燃气-蒸汽联合循环机组的运行人员尽快熟练掌握机组的运行技术,中国电机工程学会燃机专委会牵头组织有代表性的国内燃机电厂编写了本套培训教材。其中燃气轮机/汽轮机分册分别由三家电厂编写,深圳能源集团月亮湾燃机电厂承担了 M701F 燃气轮机/汽轮机分册,浙能集团萧山燃机电厂承担了 SGT5-4000F 燃气轮机/汽轮机分册,广州发展集团珠江燃机电厂承担了 PG9351F 燃气轮机/汽轮机分册;深圳能源集团月亮湾燃机电厂还承担了余热锅炉分册和电气分册的编写;深圳能源集团东部电厂承担了热控分册的编写。

每个分册内容包括工艺系统、设备结构、运行操作要点、典型事故处理与运行维护等,教材注重实际运行和维护经验,辅

以相关的原理和机理阐述,每章附有思考题帮助学习掌握教材内容。本套教材也可作为燃机电厂管理人员、技术人员的工作参考书。

由于编者都是来自生产一线,学识和理论水平有限,培训教材中难免存在缺点与不妥之处,敬请广大读者批评指正。

燃机专委会

2013 年 10 月

前言

本套培训教材包括燃气轮机/汽轮机分册、电气分册、余热锅炉分册和控制分册。电气分册是本套教材丛书的一个分册。

本书主要介绍了美国通用电气、德国西门子和日本三菱公司的 F 级发电机结构、原理与运行,大型变压器主要结构部件的性能与运行,发电厂电气一次系统的构成和运行原理,高压电器的原理和性能,配电装置的组成,发电厂的防雷与过电压,发电厂电气设备的继电保护,发电机的励磁系统、同期系统,厂用电系统及快切系统、直流系统、不停电电源系统,发电厂控制系统等内容。本书以实用为出发点,选材力求突出 F 级燃气轮机机组电气系统和电气设备的特点,注重理论和实际相结合,注重知识的深度和广度的结合,注重专业知识和技能的结合,注重新设备新技术的应用。

本培训教材编写人员为一线运行人员,编写偏重于运行实践,内容丰富、实用性强,对电厂技术人员全面掌握配套 F 级机组电气的知识有较大的帮助。

本培训教材的内容、章节由编委会审定,曹建中主编,本书具体编写分工如下:

第 1 章 1.1、1.6 节由罗小国执笔;1.2 节由汪路执笔;1.3 节由吴小先执笔;1.4 节由陈小勇执笔;1.5 节由蔡晓铭执笔;

第 2 章 2.1 节、2.2 节、2.3 节、2.4 节、2.6 节、2.7 节、2.8 节由邓仁超执笔;2.5 节由蔡晓铭执笔;

第 3 章 3.1 节、3.2 节、3.3 节、3.4 节由敖显江执笔;3.5 节由汪路执笔;3.6 节由吴小先执笔;

第 4 章 4.1 节由敖显江执笔,4.2~4.8 节由彭足仁执笔;

第 5 章 5.1 节、5.2 节、5.4 节、5.8 节、5.10 节由彭足仁执笔;5.3 节、5.6 节、5.9 节由敖显江执笔;5.5 节由邓仁超执笔;5.7 节由蔡晓铭执笔。

第 6 章由陈小勇执笔;第 7 章由吴小先执笔;附录由敖显江执笔。

在本书正式编写前,编委会对培训教材编写的原则、内容等进行了详细的讨论并提出了修改意见;编写期间电厂各级技术骨干提出了不少建设性的意见和建议,同时教材编写过程中也得到了深圳能源集团东部电厂及其他电厂的专家和技术人员的大力帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

编委会

2013 年 12 月

目 录

第 1 章 F 级燃气轮机发电机	1
1.1 发电机结构及其冷却系统	1
1.2 励磁系统	23
1.3 变频启动装置	38
1.4 发电机同期系统	52
1.5 发电机保护	58
1.6 发电机运行	76
复习思考题	93
第 2 章 变压器	95
2.1 变压器的结构及主要部件	95
2.2 变压器技术参数	100
2.3 变压器的冷却系统	102
2.4 变压器的分接开关	105
2.5 变压器保护	109
2.6 变压器的运行与维护	120
2.7 变压器的异常及事故处理	124
复习思考题	128
第 3 章 电气主接线	130
3.1 概述	130
3.2 主接线的基本接线形式	131
3.3 典型一次主接线及运行方式介绍	136
3.4 线路及母线保护	138
3.5 倒闸操作	156
复习思考题	159
第 4 章 高压设备及发电机出口断路器	161
4.1 高压配电装置	161
4.2 断路器基本知识	166
4.3 六氟化硫断路器	173
4.4 发电机出口断路器	183
4.5 隔离开关	191

4.6 气体全封闭组合电器配电装置·····	194
4.7 互感器·····	205
4.8 封闭母线·····	211
4.9 高压电缆·····	213
复习思考题·····	219
第5章 厂用电系统 ·····	220
5.1 厂用电接线·····	220
5.2 厂用电系统中性点接地方式·····	226
5.3 中压成套配电装置·····	231
5.4 低压配电装置·····	239
5.5 干式变压器·····	246
5.6 厂用电源的快切装置·····	249
5.7 厂用电系统保护·····	254
5.8 厂用事故保安电源·····	258
5.9 直流系统·····	261
5.10 不停电交流电源系统·····	268
复习思考题·····	272
第6章 发电厂的电气控制 ·····	273
6.1 发电厂电气控制系统概述·····	273
6.2 DCS 中的电气监控部分·····	276
6.3 发电厂的网络计算机监控系统·····	278
6.4 发电厂厂用电气自动化系统·····	282
复习思考题·····	285
第7章 发电厂防雷及过电压 ·····	286
7.1 概述·····	286
7.2 防雷设备介绍·····	286
7.3 发电厂的防雷·····	290
7.4 电力系统过电压·····	294
复习思考题·····	298
附录 主要名词英汉对照表 ·····	299
参考文献 ·····	300

第 1 章

F 级燃气轮机发电机

发电机(Generator)是将机械能转化为电能的设备。从 1831 年法拉第发现电磁感应现象,1884 年派生斯制造出第一台 7.5 kW 直流汽轮发电机以来,发电机在越来越多的行业中得到广泛使用。经过长时间的发展,发电机的结构形式越来越多,容量也不断增大。目前,最大的汽轮发电机容量达到 1 450 MW。按照驱动设备的不同,发电机可分为汽轮发电机、水轮发电机、燃气轮机发电机以及风力发电机等。

从 21 世纪初开始,东方电气集团、哈电集团、上海电气集团三大发电设备制造商,分别和日本三菱重工、美国通用电气、德国西门子三家燃气轮机发电设备制造商合作,引进 F 级重型燃气轮机技术及其发电机的制造技术。F 级燃气轮机机组在国内电网中一般作为调峰机组运行,这就要求燃气轮机发电机应具有变负荷和两班制运行能力。其次运用于 F 级燃气轮机上的发电机组,除能将机械能转化为电能外,还在启动过程中将电能转化为机械能,用作机组启动的原动力。此类发电机可看作一台受控的大型变频同步电机。

由于 F 级燃气轮机联合循环机组具有单轴和分轴两种形式,与之对应的发电机台数和容量也不相同。分轴形式的联合循环机组具有两台发电机,而单轴情况下仅有一台发电机。分轴形式的联合循环机组两台发电机的容量之和约为单轴形式的发电机容量。由于发电机本身容量的不同,冷却方式也不相同,本章所介绍的发电机参数、结构、冷却方式等仅适用联合循环为单轴情况下的发电机。

1.1 发电机结构及其冷却系统

1.1.1 发电机技术参数

国内 F 级燃气轮机发电机分别在东方电机股份有限公司(以下简称东电)、哈尔滨电机厂有限责任公司(以下简称哈电)、上海汽轮发电机有限公司(以下简称上电)生产制造。其主要技术参数见表 1.1。

表 1.1 F 级燃气轮机发电机技术参数

序号	项 目	东电	哈电	上电
1	联合循环机组型号	M701F	S109FA	V94.3A
2	配套发电机型号	QFR-400-2-20	390H	THDF108/53
3	额定容量/MVA	482	468	458
4	额定功率/MW	410	398	389
5	最大连续出力/MW	445	424	417
6	额定功率因数(滞后)	0.85	0.85	0.85
7	额定电压/kV	20	19	21
8	额定电流/A	13 914	14 221	12 592
9	额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	3 000	3 000
10	频率/Hz	50	50	50
11	相数	3	3	3
12	效率	99.27%	99.1%	98.93%
13	定子绕组接线	YY	YY	YY
14	冷却方式	全氢冷	全氢冷	水氢氢冷
15	额定氢压/MPa	0.4	0.42	0.5
16	稳态负序电流能力 I_2/I_N	0.1	0.1	0.1
17	暂态负序能力 $(I_2/I_N)^2 t/s$	10	10	10
18	负序电抗 X_2	21.6%	16.0%	20.4%
19	零序电抗 X_0	12.8%	12.0%	10.3%
20	短路比	0.55	0.5	0.55
21	定子绕组绝缘等级	F	F	F
22	转子绕组绝缘等级	F	F	F
23	励磁方式	自并励静态	自并励静态	自并励静态
24	励磁电压/V	402	750	418
25	励磁电流/A	3 390	2 019	3 541
26	强行励磁电压倍数	2.0	2.0	2.0
27	噪声/dB	85	85	85

1.1.2 发电机本体结构

发电机本体主要由定子、转子、冷却器、轴承等部分组成。典型的全氢冷发电机本体结构如图 1.1 所示。

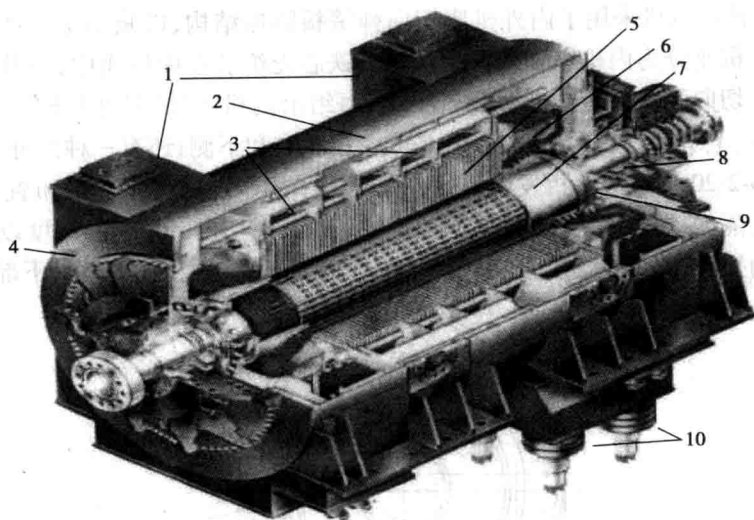


图 1.1 发电机结构图

1—氢气冷却器;2—外壳;3—通风道;4—端盖;5—定子铁芯;6—定子端部绕组;
7—转子;8—端盖轴承;9—风扇;10—出现套管

(1) 定子

定子主要由机座、定子铁芯、定子绕组、端盖等部分组成。

1) 机座与端盖

机座的作用主要是支撑和固定定子铁芯、定子绕组,当采用端盖轴承时,则需要承受转子的质量,此外机座还需要承受电磁力矩和倍频的交变电磁力的作用。因此,对发电机机座的强度和刚度都有较高的要求。发电机的机座还有隔绝噪声的作用。

机座由高强度的优质钢板焊接而成。机壳和定子铁芯背部之间的空间是发电机通风冷却系统的一部分。为了减少氢冷发电机通风阻力和缩短风道,F级燃气轮机发电机氢气冷却器常安放在机座上方。

端盖是发电机密封的一个组成部分。为了安装、检修方便,端盖由水平分开的上下两半构成。F级燃气轮机发电机常采用端盖轴承,轴承装在高强度的端盖上。端盖分为外端盖、内端盖和导风环。内端盖和导风环与外端盖间构成风扇前、后的风路。

2) 机座隔振

机座隔振又称为定子弹性支撑,运行中定子铁芯的振动会对机座和基础产生不良影响。定子铁芯振动有以下几个方面的原因:

①气隙内各点磁通密度随转子旋转而改变,转子每旋转一周,磁通密度变化两次,铁芯的形变也要交变两次,使得定子铁芯产生两倍工频(倍频)的振动。

②当转子旋转时,受自重和惯性转矩影响,依转子位置的不同,转轴弯曲程度也不相同。转子每转一圈,弯曲程度要变化两个周期,将产生倍频振动。

③定子线棒因电流间的相互作用力而产生振动,也引起定子铁芯倍频振动。三相突然短路时,定子铁芯会出现扭转振动。

④定子端部漏磁的轴向分量,也会引起铁芯产生轴向倍频振动。

⑤由于定子铁芯各齿内磁导的不均匀,定子铁芯还会产生频率高于倍频的振动。

F 级燃气轮机发电机采用了内外机座切向弹簧板隔振结构,以减小定子铁芯振动对机座和基础的影响。机座分为内机座和外机座。定子铁芯先组装在内机座中,内外机座之间用切向弹簧板连接。切向弹簧板沿轴向分为若干组,每组沿内机座外圆切向分布。布置方式有 3 种:一种是分布在上下和左右两侧;另一种是分布在左右和下侧;还有一种是分布在左右两侧。

如 QFR-400-2-20 型燃气轮机发电机的弹性隔振采用了左右和下侧的布置方式,如图 1.2 所示。图中弹性隔振结构在铁芯径向具有一定的柔性,在切向有足够的刚度以支撑铁芯的重量和承受短路力矩。弹性隔振由立式弹簧板构成,弹簧板上部与定子把合,下部与机座焊接。

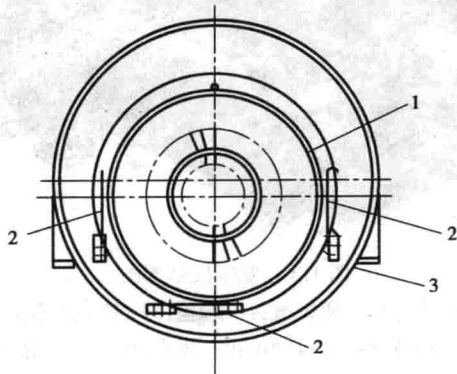


图 1.2 QFR-400-2-20 型燃气轮机发电机弹性隔振
1—定子;2—弹性隔振;3—机座

3) 定子铁芯

定子铁芯是构成发电机磁路和固定定子绕组的重要部件。现代大容量发电机的定子铁芯常采用磁导率高、损耗小、厚度为 0.35 ~ 0.5 mm 的优质冷轧硅钢片叠装而成,如图 1.3 所示。硅钢片的两侧都涂有绝缘漆,这些漆在发电机正常运行情况下可以保证硅钢片间的片间绝缘,减小铁芯中的涡流损耗。



图 1.3 定子铁芯叠片结构

大容量发电机铁芯端部的发热问题比较突出。一方面由于其线性负荷大、磁通密度高、端部漏磁大,同时,定子绕组端部伸出铁芯较长,出槽口后倾斜角大,形成喇叭形,共同造成定子端部存在较强的旋转漏磁场;另一方面隐极式转子绕组其端部必须一排一排地沿轴向排在转子本体两端的护环内,虽然护环采用非磁性钢,但在转子端部仍有一个随转子旋转的漏磁场。

以上两个旋转磁场在定子铁芯端部形成一个合成的旋转磁场,其中以定子端部的漏磁场为主,合成磁路分布复杂,如图 1.4 所示。漏磁通使定子铁芯端部温度升高,发电机的绝缘遭到破坏,在发电机进相运行时影响尤为严重。

为了减少铁芯端部的漏磁和发热,F 级燃气轮机发电机采用了以下措施。靠两端的铁芯段采用阶梯状结构,即铁芯端部的内径由里向外是逐级扩大的。铁芯端部开有楔形燕尾槽,减少涡流损耗与发热。整个定子铁芯通过外圆侧的许多定位筋及两端的齿连接片(又称压指)和压圈或连接片固定、压紧,如图 1.5(a)、(b)所示,再将铁芯和机座连接成一个整体。铁芯

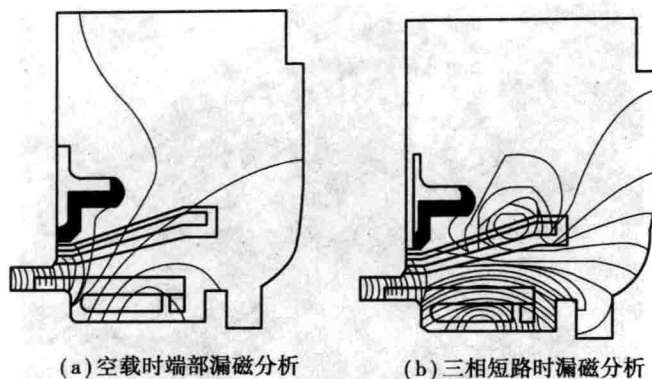


图 1.4 发电机端部漏磁场分布图

的压紧不用整体压圈而用分块铜制连接片,这种连接片本身也起电屏蔽作用,分块后也会减少自身发热。为了使铁芯轭部和齿部受压均匀和减少连接片厚度,铁芯除固定在定位筋上外,在铁芯内还穿有轴向的拉紧螺杆,再用螺母紧固在连接片上。由于穿心螺杆位于旋转磁场中,各个螺杆会产生感应电动势,因此,必须防止穿心螺杆间形成短路电流。这就要求穿心螺杆和铁芯相互绝缘,所有穿心螺杆端头之间也不能有电的联系,如图 1.5(c) 所示。铁芯端外部装设有磁屏蔽结构,以保护端部铁芯不受杂散磁场的影响。转子绕组端部的护环采用非磁性的锰铬合金制成,利用其反磁作用来减小转子端部漏磁的影响。

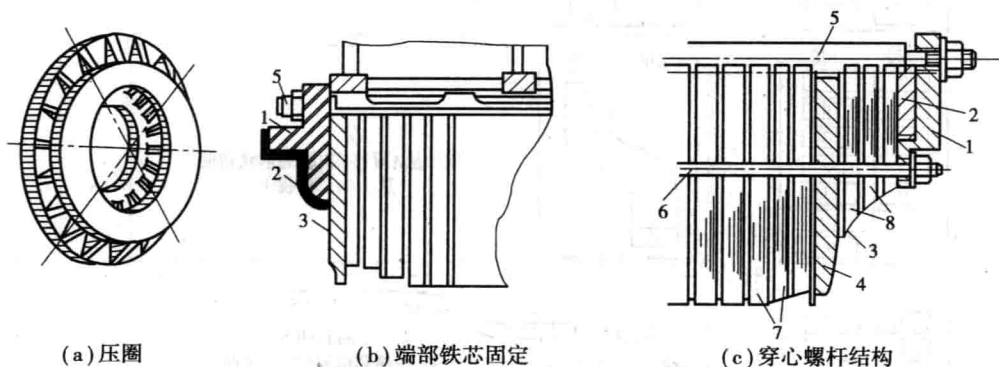


图 1.5 压圈、压指、穿心螺杆及端部固定

1—压圈;2—电屏蔽;3—连接片;4—压指;5—定位筋;
6—穿心螺杆;7—端部铁芯;8—磁屏蔽

4) 定子绕组

定子绕组是定子的电路部分。定子绕组按照一定的形式镶嵌在定子铁芯中,是感应电动势、通过电流、实现机电能量转换的重要部件。

①定子绕组结构。F级燃气轮机发电机的定子绕组采用三相双层分布绕组。定子绕组采用叠式绕组,每个绕组都是由两根条形线棒各自做成半匝后,构成单匝式结构,然后在端部线鼻处用对接或并头套焊接成一个整单匝式绕组。每匝绕组的端部都向铁芯的外侧倾斜,按渐开线的形式展开。端部绕组向外的倾斜角为 $15^\circ \sim 30^\circ$,形似花篮,故称为篮式绕组,如图 1.6 所示。

为了平衡股间导线的阻抗,抑制集肤效应,减少直线和端部的横向漏磁通在各股导体内产生环流及附加损耗,使每根子导线内电流均匀,线棒在槽内各股线需进行换位。F级燃气轮机发电机定子绕组采用 540° 换位,如图 1.7 所示。

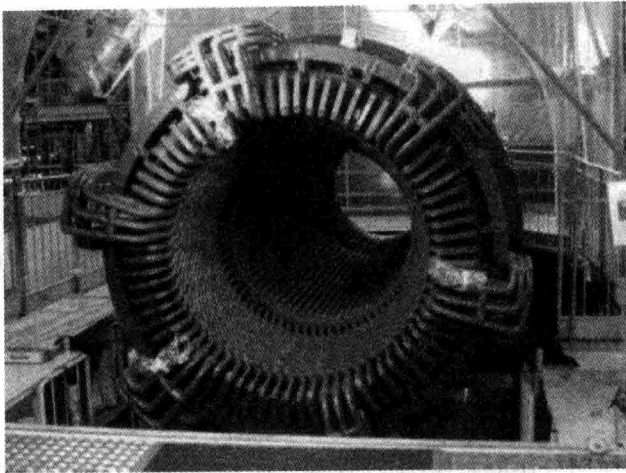


图 1.6 QFR-400-2-20 型燃气轮机发电机定子外形图

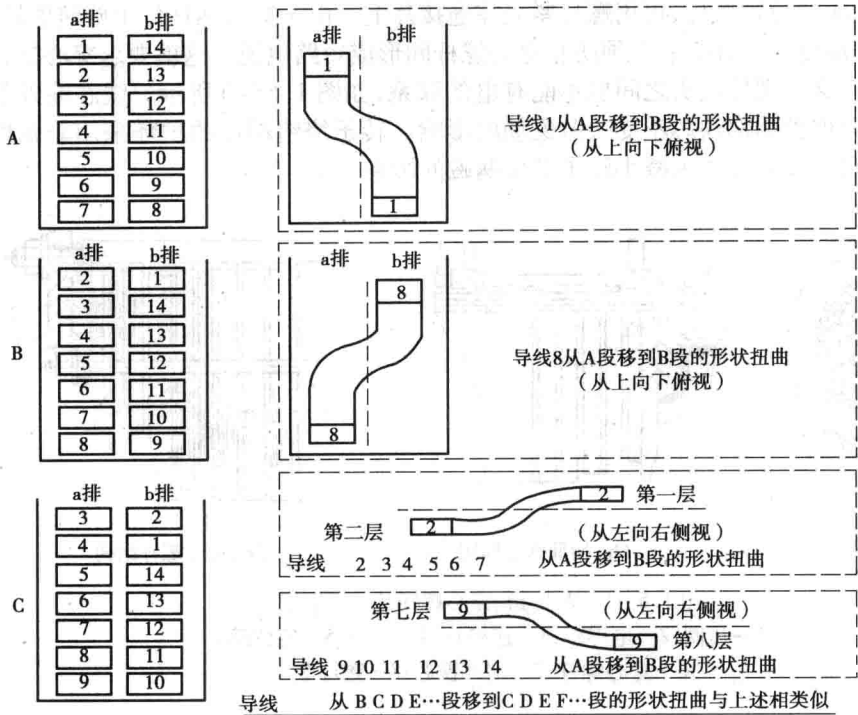


图 1.7 槽内导线换位示意图

1 ~ 14—导线编号; A ~ F—槽部分段, 540°换位共分 21 段(14 根导线)

②定子绕组绝缘。定子绕组绝缘包括线棒的主绝缘、股间绝缘、排间绝缘和换位部位的加强绝缘。

主绝缘是指定子导体和铁芯间的绝缘, 也称对地绝缘或线棒绝缘。主绝缘是线棒各种绝缘中最重要的一种绝缘, 它是最易受到磨损、碰伤、老化、电腐蚀和化学腐蚀的部分。F 级燃气轮机发电机采用多胶环氧粉云母带作为主绝缘材料, 耐热等级一般为 B 级或 F 级。B 级最高允许温度为 130 ℃, F 级最高允许温度为 155 ℃。