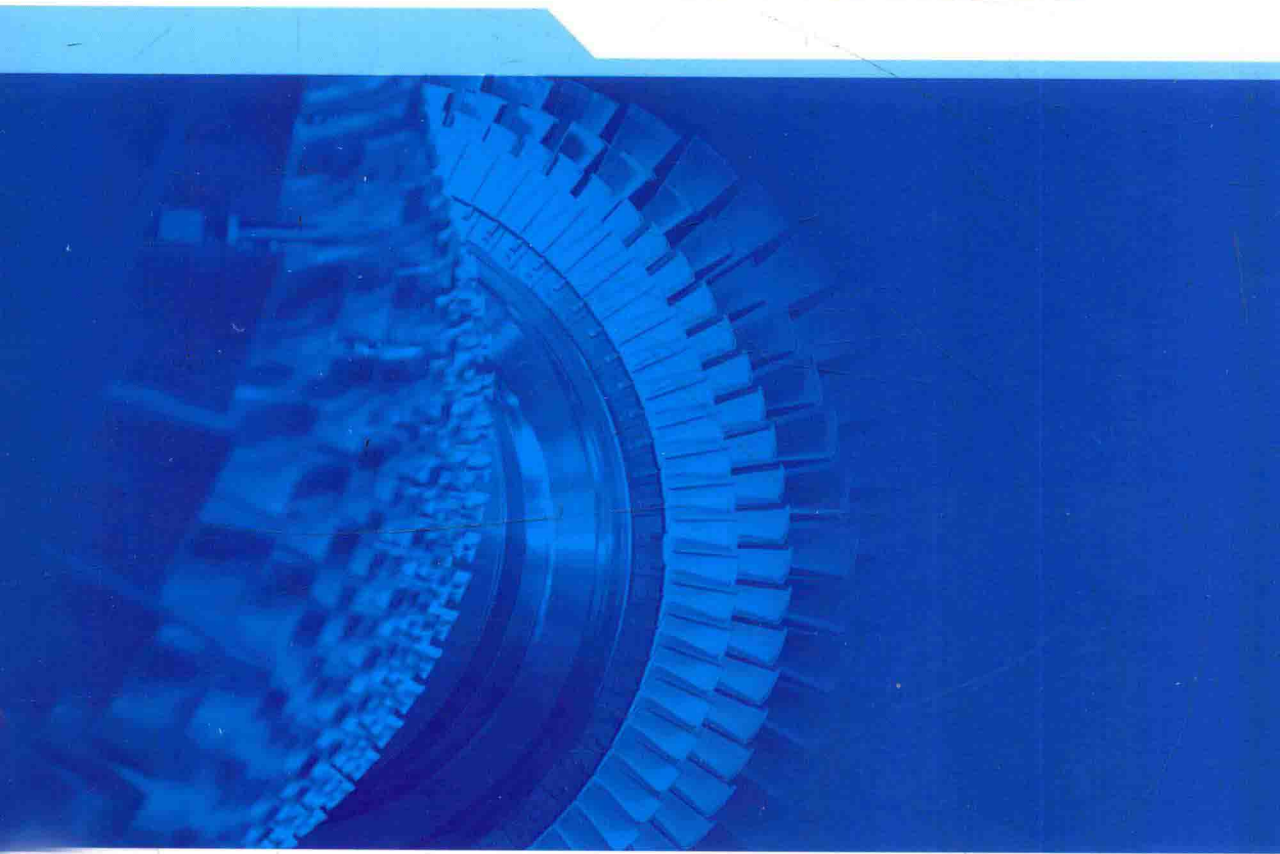


西门子燃气轮机 控制系统解析

北京能源投资（集团）有限公司

西门子电站自动化有限公司 编著

西门子（中国）有限公司



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

西门子燃气轮机 控制系统解析

北京能源投资（集团）有限公司
西门子电站自动化有限公司 编著
西门子（中国）有限公司



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是一本全面解析西门子燃气轮机控制系统的著作。本书首先扼要介绍了西门子燃气机组技术发展情况；然后以西门子 F 级燃气机组为例，详细介绍了燃气轮机控制系统就地监控系统元器件构成、燃气轮机系统保护控制、顺序控制和闭环控制，并对西门子 E 级燃气机组的控制策略与 F 级燃气机组的差异之处进行了介绍；最后对燃气轮机控制系统典型故障分析和处理案例进行了说明。

本书兼顾西门子燃气轮机技术的基础知识和工程实践，是一本实用的工程技术类图书，可供从事燃气电厂设计、安装、调试、运行、维护的工程技术人员使用。本书可作为燃气电厂热工自动化专业的培训教材，也可供大专院校热能动力与自动化相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

西门子燃气轮机控制系统解析/北京能源投资(集团)有限公司, 西门子电站自动化有限公司, 西门子(中国)有限公司编著. —北京: 中国电力出版社, 2016.1 (2016.3 重印)

ISBN 978-7-5123-8860-4

I. ①西… II. ①北… ②西… ③西… III. ①燃气轮机—控制系统 IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 018495 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 3 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 238 千字

印数 5001—6500 册 定价 50.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编写委员会

主任	郭明星					
副主任	刘海峡	关天罡	龚毅	赵作智		
主编	金生祥					
副主编	储炳南	李春喜	张秉权			
编写人员	金生祥	储炳南	李春喜	张秉权	宋兆星	
	邓建平	张朝阳	尹立新	王六虎	马万军	
	齐桐悦	胡耀宇	田磊	陈慧丽	王月龙	
	李伟	石磊	张晔			

评 审 委 员 会

主 任 邓 春

委 员 马欣欣 陈冀平 李卫华 司派友 左 川

王燕晋 张红侠 丁劲松 刘 添 周业涛

梁 峰 赵剑波 吴莉娟 侯小龙 张 巍

赵 杰 张伟东 房之栋 吕继军



序

在美国、日本等国家，燃气发电是主要发电方式之一，燃气机组占比超过燃煤机组。为应对世界气候变化，减少温室气体排放，同时也为降低北京的燃煤消耗量，改善首都的环境质量，北京能源投资（集团）有限公司近几年加大了清洁能源的投资力度，除了在资源丰富的地区投资风电机组、光伏发电机组以外，还在北京、珠三角等负荷中心地区重点发展燃气—蒸汽联合循环发电机组。目前已有 7 个电厂 9 套 13 台总装机容量为 480 万 kW 的燃气—蒸汽联合循环发电机组投产发电，另有 3 个电厂 3 套 5 台总容量 200 万 kW 的燃气—蒸汽联合循环发电机组在建或拟建，燃气机组容量超过京能集团总装机容量的 1/4。这使得京能集团的电源结构更趋合理，清洁能源比例逐步提高。

大型燃气轮机技术门槛高，自动化程度高，对运行、检修、维护提出了更高的要求。为了保障燃气机组安全、稳定、高效运行，需要电厂技术人员对燃气机组的结构、控制系统等有深入的理解和认识。为此，京能集团集中专业技术力量，选取占集团燃气机组近 2/3 的西门子 F 级和 E 级燃气轮机，对其控制系统进行了比较系统、深入的分析和总结，编写完成了《西门子燃气轮机控制系统解析》一书。本书立足于京能集团已建的多个燃气机组工程项目，提供的控制逻辑取自于实际工程，因而具有比较强的实用价值。

京能集团在消化吸收国外先进技术、理念的基础上，跟踪燃气机组的技术发展趋势，不断总结、优化控制逻辑，提高燃气机组日常运行的自动化水平，提高检修维护人员分析问题、解决问题的能力及时效，使燃气机组的运行更加安全、更加可靠、更加经济、更加环保。

编写本书的主要目的是将其作为京能集团从事燃气机组建设、运行、检修、

维护人员的培训教材和日常参考资料。如果同时也能为国内其他从事燃气机组设计、建设、运行、检修等相关的技术人员和管理人员带来一定的帮助，我们将深感欣慰。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '何明生' (He Mingsheng).

2016年1月9日



前言

在全球主要经济体的一次能源结构中，未来天然气将可能超过石油，成为世界第一大主体能源。国外经验表明，天然气发电是促进天然气需求增长的主要动力。目前，我国燃气发电仅占全国发电装机容量的4%，远低于发达国家天然气发电装机水平，充分表明我国燃气发电具有很大的发展空间。

为贯彻落实国家《大气污染防治行动计划》，进一步改善空气质量，北京市关停了燃煤机组，同步建设了四大燃气热电中心，北京能源投资（集团）有限公司承建了大部分项目。随着在建燃气电厂的投产，北京能源投资（集团）有限公司燃气机组发电装机规模已达到480万kW以上，其中有9套燃气—蒸汽联合循环发电机组采用了德国西门子技术。尽管燃气机组在我国应用日益广泛，但由于燃气轮机从设计制造到调试等过程由外方或主机制造厂主导，燃气轮机控制逻辑关键技术等环节始终是燃气电厂检修维护人员的技术瓶颈，电厂检修维护人员难以介入，客观上给燃气电厂生产运行、检修维护人员造成了技术壁垒。北京能源投资（集团）有限公司近两年陆续投产的京桥热电、未来城热电、京西热电经过调试、试运、运行等过程，在燃气轮机控制方面总结和积累了一定的经验。

为全面提高京能集团燃气电厂专业人员技术水平，保证新建燃气机组充分借鉴已运行机组的经验，京能集团生产管理部组织京桥热电、京西热电、高安屯热电、未来城热电、上庄热电在现有逻辑、框图的基础上，对燃气轮机控制系统保护原理、保护控制方案、保护元器件配置、顺序控制逻辑、闭环控制等进行了梳理和总结，对于F级及E级燃气机组在保护控制逻辑、顺控逻辑和闭环控制等方面的控制差异进行了对比和说明。为便于专业人员理解，还绘制完善了顺序控制逻辑图及闭环控制图。本书的整理和总结，对其他新建、在建燃气机组的调试和试运过程有借

鉴意义，同时对已投产的燃气电厂的运行维护工作有一定的指导意义。

在京能集团燃气项目实施和本书审定过程中，上海电气集团股份有限公司、西门子电站自动化有限公司、西门子（中国）有限公司、华北电力科学研究院有限责任公司、中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司等单位的专家以及工程师们，提供了大量的帮助和具体指导，在此表示感谢！

在编写过程中，为使本书的编制更加科学、准确，还广泛听取了京能集团内外各方专家的意见，在此一并表示感谢！

由于时间仓促并限于作者水平，书中难免存在疏漏与不足之处，敬请各位读者给予批评指正。

编写委员会

2015年12月

目录

序

前言

第一章 燃气轮机控制系统概述	1
第一节 西门子燃气轮机简介	1
第二节 西门子燃气轮机控制系统组成	8
第三节 西门子燃气轮机控制系统实现的功能	13
第二章 西门子 SGT5 - 4000F (4) 型燃气轮机保护控制系统	14
第一节 西门子 SGT5 - 4000F (4) 型燃气轮机保护的实现	14
第二节 西门子 SGT5 - 4000F (4) 型燃气轮机保护内容	28
第三章 西门子 SGT5 - 4000F (4) 型燃气轮机模拟量控制系统	92
第一节 概况	92
第二节 启动升速控制	94
第三节 转速/负荷控制	97
第四节 排气温度控制	100
第五节 负荷限制控制	108
第六节 压气机压比极限控制	109
第七节 值班阀及预混阀的阀位控制	111
第八节 IGV 温度控制	115
第九节 协调控制功能	116
第十节 其他闭环控制系统	119
第四章 西门子 SGT5 - 4000F (4) 型燃气轮机顺序控制系统	124
第一节 燃气轮机启停 SGC	124
第二节 天然气系统 SGC	133

第三节	液压间隙优化 HCO 顺控系统	137
第四节	燃气轮机 SFC 清吹子组 SGC	139
第五节	燃气轮机润滑油/盘车子组 SGC	140
第五章	西门子 SGT5 - 2000E (V94.2) 型燃气轮机控制系统	145
第一节	西门子 E 型燃气轮机结构特点	145
第二节	西门子 E 型燃气轮机保护系统	146
第三节	西门子 E 型燃气轮机闭环控制系统	156
第四节	西门子 E 型燃气轮机顺控系统	158
第五节	西门子 E 型燃气轮机使用含高氢天然气的技术解决方案	178
第六章	异常事件处理分析及优化	182
第一节	西门子燃气轮机在现场应用中的事件案例分析	182
第二节	西门子燃气轮机控制相关优化	196
附录	逻辑功能块图例说明	201
参考文献	202

燃气轮机控制系统概述

本章主要对燃气轮机及西门子燃气轮机的发展历史进行介绍，并对近年来应用较广的 E 级和 F 级燃气轮机控制系统的功能进行了简要论述。

第一节 西门子燃气轮机简介

一、燃气轮机简述

燃气轮机技术从 20 世纪 20 年代进入工业应用，40 年代在航空发动机上得到了较大的发展，70 年代在舰用燃气轮机上又得到了广泛应用。1939 年瑞士推出了世界上第一台发电用燃气轮机后，燃气轮机在发电领域也得到了广泛应用。20 世纪 90 年代以来，由于联合循环技术的成熟发展，机组效率整体得到较大提高，燃气轮机在发电领域中得到了迅速发展，至今已成为电网中发电设备的重要组成部分，这是一种目前应用较广的先进发电技术。燃气轮机一般由压气机、燃烧室和透平组成，燃气轮机的发电原理不同于常规的采用朗肯（Rankine）循环的蒸汽轮机发电技术，它采用布雷顿（Brayton）循环，主要是根据布雷顿循环原理将燃料的化学能通过透平—发电机系统转换为电能。机组运行中主要存在四个热力过程，即压气机中的空气压缩过程、燃烧室中的燃气加热过程、透平中的燃气膨胀过程，以及燃气轮机排气在大气中的放热过程。被压气机吸入的大气被压缩达到一定的压力后，进入燃烧室同燃料混合进行燃烧加热，形成高温燃气，具有一定压力的高温燃气进入透平通过静、动叶片膨胀做功，由此带动发电机发电，做功后的排气经扩散段排出。

燃气轮机经过几十年来的发展，目前已经相当成熟。燃气轮机发电的主要过程是压缩和加热燃烧过程，因此燃气轮机的关键技术也主要在于如何提高压气机效率、

如何提高燃烧室燃烧温度，以及如何使透平安全可靠地在高温下运行等方面。

二、西门子重型燃气轮机主要性能概况

西门子重型燃气轮机主要包括 SGT5/6-2000E、SGT5-4000F、SGT6-5000F 和 SGT5/6-8000H。图 1-1 对西门子各型号重型燃气轮机的出力进行了简要汇总。根据 2015 年初的统计数据显示，其总装机数量已达 1100 台左右。其中西门子 2000E 和 4000F 燃气轮机应用在我国国内的燃气—蒸汽联合循环机组中，装机数量达 63 台，分别为 42 台 4000F 和 21 台 2000E。这些燃气—蒸汽联合循环电厂主要分布东部沿海城市和中部主要发达城市。

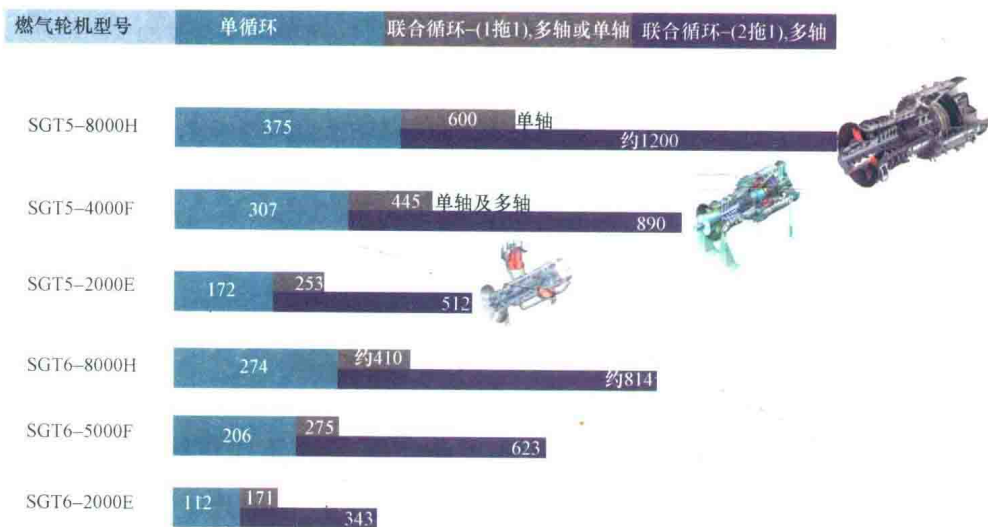
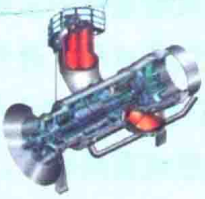




图 1-1 西门子各型号重型燃气轮机出力

注：图中数值为按 ISO 工况的净功率，单位为 MW。

2000E、4000F 和 8000H 作为西门子燃气轮机中最主要的三个型号，其主要性能参数简要概述如表 1-1 所示。国内目前只引进 4000F 和 2000E 两种型号。

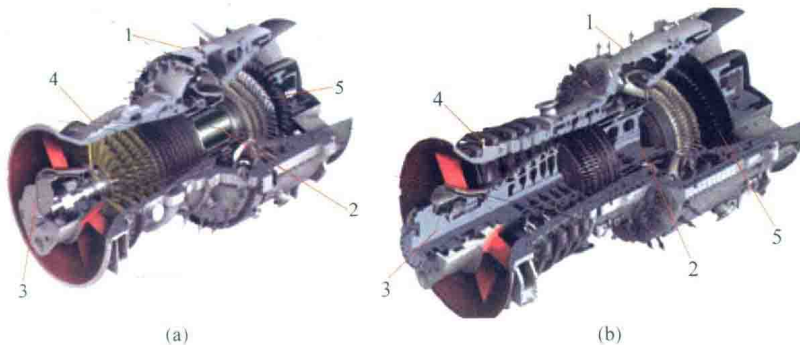
表 1-1 50Hz 西门子重型燃气轮机主要技术参数

机 型	SGT5-2000E	SGT5-4000F	SGT5-8000H
参 数			
ISO 工况下额定功率 (MW)	172	307	400
热耗率 (kJ/kWh)	10190	9001	8999
效率 (%)	35.3	40	40
压比	12.1	18.8	19.2

续表

机 型	SGT5-2000E	SGT5-4000F	SGT5-8000H
排气质量流量 (kg/s)	531	723	869
透平转速 (r/min)	3000	3000	3000
排气温度 (°C)	537	579	627
联合循环 (1拖1) 净出力 (MW)	253	445	600
联合循环 (1拖1) 净效率 (%)	52.5	58.7	>60
联合循环 (2拖1) 净出力 (MW)	512	890	1200
联合循环 (2拖1) 净效率 (%)	53.1	58.7	>60

F级和H级燃气轮机作为目前先进的燃气轮机，其运行的高灵活性和高可靠性满足了市场的需求。西门子燃气轮机在SGT5-4000F和SGT5-8000H中采用了一些先进的技术特点。其主要技术特点如图1-2所示。



序号	灵活性及可靠性特点
1	(1) 全内空冷设计 (环形燃烧室、透平、转子); (2) 简单的冷却方案, 无需转子冷却器; (3) 机器启动时无需辅助蒸汽
2	(1) 带 Hirth 锯齿的轮盘设计和中心拉杆设计; (2) 耐用、灵活的转子设计, 使燃气轮机具备快速加减负荷能力
3	(1) 液压间隙优化; (2) 快速启动能力, 且无叶片摩擦风险; (3) 老化慢
4	(1) 可变/进气导叶; (2) 增强部分负荷能力
5	经过优化的四级透平设计

图 1-2 SGT5-4000F/SGT5-8000H 主要技术特点

(a) SGT5-4000F (可靠性大于 99%); (b) SGT5-8000H (可靠性大于 99%)

截至 2014 年，SGT5-4000F 已累计运行时间超过 1000 万 EOH（等效运行小时数）。16 台已装机的 8000H 已累计运行时间超过 10 万 EOH。

已装机机组的实际运行情况验证了 SGT5-4000F 和 SGT5-8000H 的高度灵活性和可靠性。如图 1-3 所示，其灵活性运行曲线与标准运行曲线相比有着很大的提升，如快速加减负荷及调峰能力。

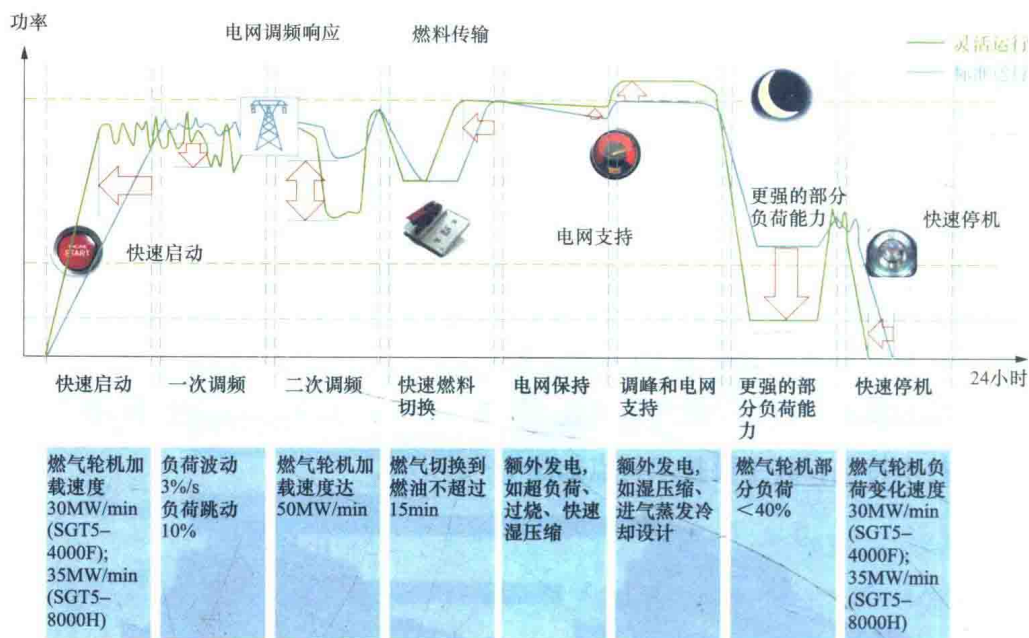


图 1-3 燃气轮机在电网调峰中的优势对比

三、西门子重型燃气轮机主要特点简介

(一) SGT5-2000E 型燃气轮机的主要特点

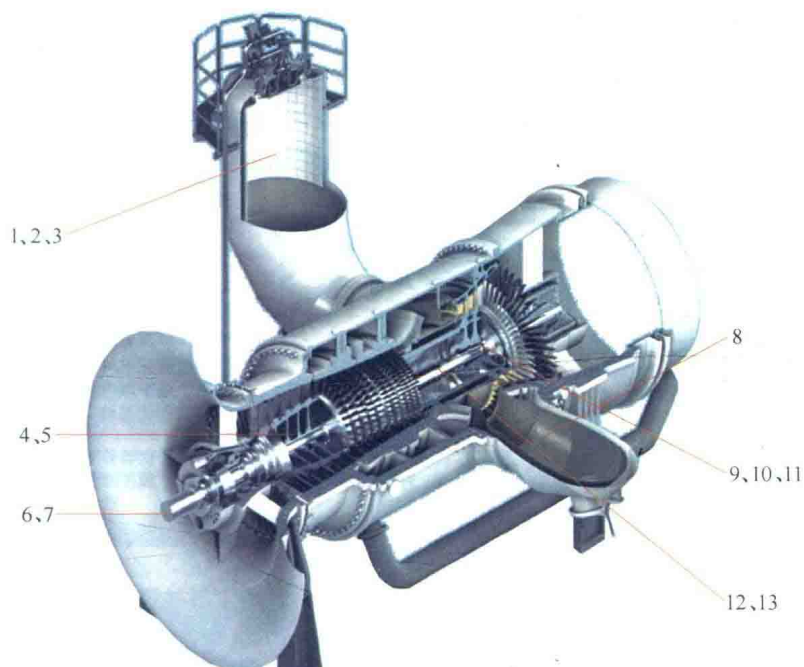
SGT5-2000E 型燃气轮机极为成熟、耐用，广泛应用于 50Hz 市场上。它可以适用于所有的负载范围，特别是峰值范围的负载。其 SGT5-2000E (LC) 型燃气轮机已应用于整体煤气化联合循环 (IGCC) 中。

SGT5-2000E 型燃气轮机已经被验证为最耐用的燃气轮机，目前已安装运行的机组超过 380 多台，累计运行时间超过 1600 万 EOH。SGT5-2000E 型燃气轮机的主要特性如图 1-4 所示。

SGT5-2000E 技术发展过程如图 1-5 所示。

(二) SGT5-4000F 型燃气轮机的特点

经过验证的 SGT5-4000F 的特征是高性能、低功耗、检修间隔时间长和设计服务友好。在联合循环应用中具有最经济的发电效率。它的最先进技术都是基于成熟



序号	主要特性
1	左右两个易于维护的燃烧筒设计
2	陶瓷隔热瓦可以单独更换
3	2×8 混合燃烧器，燃料选择灵活，选择范围可从重油到低热值气体
4	压气机第一级可快速变化的导叶设计有助于稳定电网频率，在保持排气温度恒定的情况下使燃气轮机可以降到一半负荷运行
5	在无需拆解或起吊转子的前提下可以进行所有动叶片的更换
6	冷端发电机驱动
7	双转子轴承
8	使用混合壳体保证火焰性能稳定
9	高性能四级透平采用了先进材料，第 1、2 级透平叶片涂有隔热涂层
10	前三级透平静叶和前两级透平动叶使用对流空气冷却
11	高效透平叶片采用三维叶片设计
12	带有径向 Hirth 锯齿和中心拉杆式的转子圆盘叠加式转子设计
13	质量轻、刚性强的转子轮盘设计可满足燃气轮机的快速启动

图 1-4 SGT5-2000E 型燃气轮机的主要特性

的设计特点发展而来的。目前已安装运行的机组超过 300 多台，运行小时数累计超过 1000 万 EOH。

SGT5-4000F 的主要特性如图 1-6 所示。

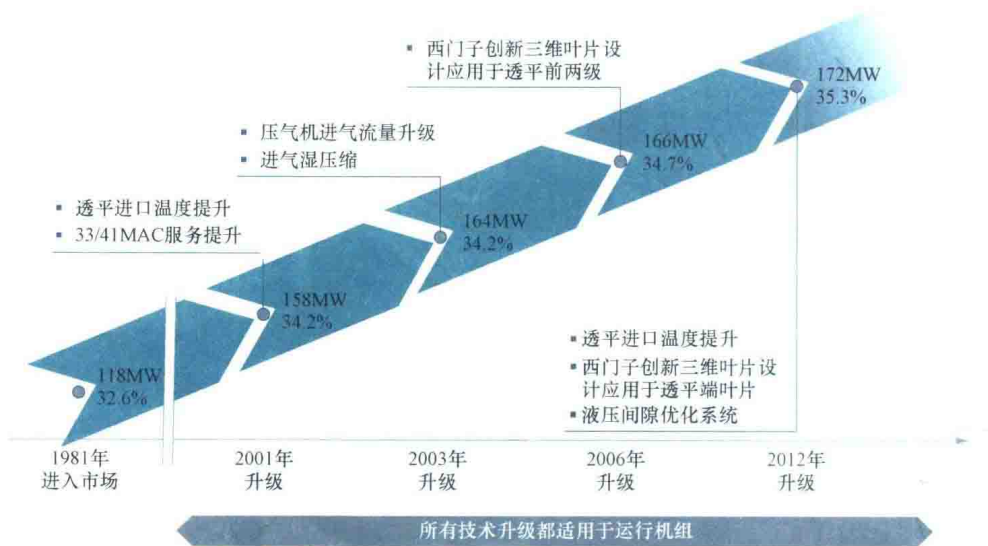
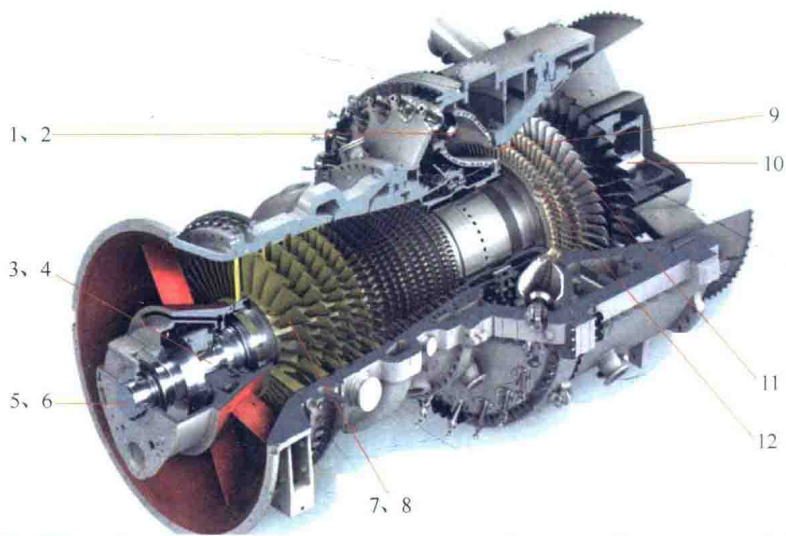


图 1-5 SGT5-2000E 技术发展过程



序号	主要特性
1	可进入武环形燃烧室, 可单独更换隔热瓦, 易于维护, 停机检修时间较短, 从而带来最高的利用率
2	干式低 NO _x 混合燃烧器的设计保证了使用气体和液体燃料时的低排放
3	内冷空气通道设计的转子所具有的快速热响应能力, 具备优秀的快速冷或热启动能力
4	能够独立组装的 Hirth 锯齿设计轮盘和中央拉杆设计使转子能在现场容易拆解
5	使用 HCO (液压间隙优化) 主动控制间隙来提升透平性能
6	在启机和停机过程中, 通过主动控制 HCO (液压间隙优化) 来保持紧密间隙, 从而减少磨损退化
7	经验证的 15 级压气机, 快速可变进气导叶设计, 使压气机具备快速动态响应能力
8	在无需拆解或吊起转子的前提下, 可以进行所有动叶片的更换, 均匀的燃烧器出口流场可最大化地减少透平的机械和热应力

图 1-6 SGT5-4000F 型燃气轮机的主要特性 (一)