

微型燃气轮机 发电技术

袁 春 陈彬兵 陈兆海 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

微型燃气轮机发电技术

袁 春 陈彬兵 陈兆海 钱希森
雍岐东 魏克银 张军刚 金 钊
贾武元 张瑞伟 龚利红 潘小兵
张传富

编 著



机械工业出版社

本书内容包括微型燃气轮发电机组与分布式供电系统；微型燃气轮机发电机组结构及原理；微型燃气轮机；高速永磁同步电机；电能变换与系统控制；微型燃气轮发电机组的开发与应用；微型燃气轮发电机组的性能指标。本书可作为高等院校热能与动力工程、电力工程及自动化、动力发电、通信电源等相关学科和专业师生的教学参考书；可作为工程技术人员在设计、选型、运行及管理时的参考；也可作为以微型燃气轮机发电机组为基础的分布式供能系统、热电联供系统、独立发电系统的设计、运行和技术管理人员的培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

微型燃气轮机发电技术/袁春等编著. —北京：机械工业出版社，2012.8

ISBN 978-7-111-39431-0

I. ①微… II. ①袁… III. ①燃气轮机—发电 IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 187735 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：沈红 责任编辑：沈红 蒋有彩 版式设计：姜婷
责任校对：王欣 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2012 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·16.25 印张·333 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39431-0

定价：49.00 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

策划编辑：(010)88379778

社服务中心：(010)88361066

网络服务

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线：(010)88379203

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

微型燃气轮机技术是 21 世纪能源与动力系统的核心关键技术，是衡量一个国家工业基础先进程度的重要标志。发展微型燃气轮机技术具有重大的战略意义和广阔的产业化前景，对于我国在相关领域中的高新技术发展有着极其重大的作用。

微型燃气轮机(Microturbine, 简称 MT)是一种以超小型燃气轮机为原动机驱动发电机发电的设备，是内燃机发电设备的最佳替代产品。微型燃气轮机的容量一般在几十千瓦到 300kW 之间(美国学者认为 25~500kW 之间)。主要性能指标包括输出功率、电压、频率、效率、燃料消耗率、进排气温度及回热度等。与传统内燃机发电设备比较，微型燃气轮机发电机具有体积小、重量轻、振动小、噪声低、起动较快、运动部件少、可靠性高、使用寿命长达 45000h(约为柴油机的十倍)、环境友好、燃料适应性广、可遥控和自诊断等优点。目前微型燃气轮机发电机组的最大特点是可以长期连续工作，基本免维护，运行费用和维护费用远远低于柴油机发电机组，已广泛应用于分布式供电系统、热电联供(效率高于 80%)及混合动力电动车辆等。

微型燃气轮机将在未来我国电力和动力系统中发挥重要作用。微型燃气轮机发电机组可以用作备份电源(Stand-by Power)、优质可靠电源(Power Quality and Reliability)和联合发电(Cogeneration, 简称 CHP)，可以广泛应用于航天、能源、交通、化工、邮电、通信、财政金融等领域。在军事领域，既可用作边防、海防地区和重要国防设施的常备电源，又可用作军事通信和导弹发射等装备的备用电源。微型燃气轮机可以使用多种燃料，包括使用可再生资源 and 垃圾气体。在民用方面，它可以直接用于 25~500kW 的商场、饭店、宾馆、酒店和小型写字楼等，以及重要部门、涉及民生安全的电力保障与热电联供系统。此外，微型燃气轮机还可用于车辆混合动力，特别是作为混合动力电动汽车的蓄电池充电，比如，中美联合研制、已在北京奥运会上示范运用的微型燃气轮机混合动力电动汽车 MTG-HEV，将成为 21 世纪混合动力汽车的新模式。

本书是作者在 2000 年以来先后承担多项军队和省部级以上科研项目的基础上，根据自编研究生教学讲义，结合最新研究成果编著的。在编著过程中，得到清华大学蔡宁生教授、西安交通大学丰镇平教授、清华泰豪微电机公司刘建平总工、中国航空动力机械研究所涂孟黑高工、哈尔滨新能源公司(东安动力)吴文峰高工，以及美国康奈尔大学 Albert R. George 教授的关心和帮助。本书得

到重庆通信学院雷斌教授及图书编审委员会、后勤工程学院研究生处等领导和专家的关心支持，在此一并致谢！

本书由重庆通信学院军用特种电源军队重点实验室袁春教授、陈兆海教授、钱希森教授，四川大学电气信息学院陈彬兵教授、后勤工程学院雍岐东教授等编著。其中袁春教授提出编写提纲，并负责编写第1章、第2章和第3章，张军刚工程师参加第1章编写，张传富参加第2章编写；潘小兵参加第3章编写；陈彬兵教授负责编写第4章，魏克银博士、金钊讲师参加编写；钱希森教授负责编写第5章，张瑞伟讲师参加编写；陈兆海教授负责编写第6章，贾武元工程师参加编著；雍岐东教授负责编写第7章，龚利红讲师参加编写。研究生薄冲、申新楼、原林、赵钢、郭立滨、王济乾、冯利刚、刘洋、苏红春、恪嘉鑫、程松参加了本书的资料分析、指标计算、文字录入、图形处理及书稿校对工作。

由于作者水平有限，编著过程中难免存在疏漏和不妥之处，敬请专家和读者批评指正。

编著者

目 录

前言

第1章 微型燃气轮机发电机组与

分布式供电系统 1

1.1 微型燃气轮机发电机组的概况 1

1.2 微型燃气轮机发电机组与内燃机 发电机组的比较 4

1.2.1 内燃机发电机组特点 4

1.2.2 微型燃气轮机发电机组的 特点 7

1.3 微型燃气轮机发电机组的研发与 应用现状 10

1.3.1 国外研发与应用现状 10

1.3.2 国内研发与应用现状 12

参考文献 12

第2章 微型燃气轮机发电机组结

构及工作原理 14

2.1 微型燃气轮机发电机组的结构 ... 14

2.1.1 微型燃气轮机 15

2.1.2 永磁同步发电机 16

2.1.3 电能变换单元 18

2.1.4 智能控制单元 23

2.1.5 能量存储技术 28

2.2 微型燃气轮机发电机组工作原 理 31

2.2.1 微型燃气轮机发电机组的 起动 31

2.2.2 正常运行 32

参考文献 37

第3章 微型燃气轮机 38

3.1 微型燃气轮机关键部件 39

3.1.1 压缩机 39

3.1.2 回热器 41

3.1.3 燃烧室 45

3.1.4 涡轮机 49

3.1.5 转子与轴承 50

3.1.6 波转子 53

3.1.7 辅助系统 54

3.2 微型燃气轮机热力循环 57

3.2.1 微型燃气轮机等压理想简 单循环 58

3.2.2 微型燃气轮机等压理想回 热循环 59

3.2.3 回热循环过程计算 60

3.2.4 工质在大气中自然放热过 程 70

3.2.5 微型燃气轮机有无回热装 置的性能比较 71

3.2.6 微型燃气轮机特性循环计 算 71

3.2.7 微型燃气轮机与波转子顶 层循环 73

3.2.8 外燃式微型燃气轮机循环 ... 74

3.3 压缩机结构设计 76

3.3.1 压缩机叶轮设计 76

3.3.2 压缩机扩压器设计 82

3.4 压缩机的能量损失 86

3.4.1 摩擦损失 86

3.4.2 分离损失 87

3.4.3 二次流损失 87

3.4.4 尾迹损失 89

3.4.5 流通损失计算 89

3.5 微型燃气轮机向心涡轮机的结 构设计 91

3.5.1 向心涡轮机的热力设计 91

3.5.2 向心涡轮机叶轮的结构设 计 93

参考文献 103

第4章 高速永磁同步发电机	105	式	147
4.1 高速永磁同步发电机的原理与特点	105	5.2.4 双向变换器的控制方案	147
4.1.1 高速永磁同步电机的原理	105	5.3 DC-AC 逆变器	149
4.1.2 高速永磁同步电机的特点	107	5.3.1 基本电路结构	150
4.2 高速永磁同步电机技术现状	108	5.3.2 基本工作模式	151
4.2.1 国外高速永磁中频同步发电机技术现状	108	5.3.3 驱动与控制	153
4.2.2 国内高速永磁中频同步发电机技术现状	109	5.4 蓄电池	160
4.2.3 研发高速永磁中频同步发电机的必要性	109	5.4.1 阀控铅酸蓄电池的基本结构	161
4.3 高速永磁中频同步发电机的关键技术	111	5.4.2 阀控铅蓄电池的基本工作原理	161
4.3.1 高速永磁中频同步发电机的结构与材料	111	5.4.3 阀控型密封铅酸蓄电池的端电压	163
4.3.2 高速永磁中频同步发电机的关键技术分析	116	5.4.4 蓄电池的充电方法	165
4.3.3 高速永磁同步电机技术性能指标分析	122	5.5 充电器	165
4.4 高速永磁中频同步发电机的电磁设计	127	5.5.1 半桥式隔离充电器	166
4.4.1 设计过程	127	5.5.2 全桥式变换电路	168
4.4.2 设计任务	128	5.6 控制单元	171
4.4.3 永磁体材料的体积	128	5.6.1 控制单元的主要作用	171
4.4.4 转子的结构	129	5.6.2 控制单元的组成	172
4.4.5 电枢绕组与定子结构	130	参考文献	172
4.4.6 参数计算与校核	132	第6章 微型燃气轮机发电机组的开发与应用	173
4.4.7 仿真设计	136	6.1 微型燃气轮机发电机组的主要开发制造商	173
参考文献	139	6.1.1 Bowman 公司	173
第5章 电能变换与系统控制	141	6.1.2 Capstone 燃气轮机公司	175
5.1 MTG 系统电能变换单元	141	6.1.3 Elliott 能源系统股份有限公司	178
5.2 AC-DC 双向变换器	142	6.1.4 Ingersoll-Rand 能源系统公司	178
5.2.1 双向变换器的基本工作原理	142	6.1.5 Turbec 公司	181
5.2.2 双向变换器主电路结构	144	6.2 微型燃气轮机发电机组的设计目标与应用领域	183
5.2.3 双向变换器的基本工作模		6.2.1 微型燃气轮机的应用方式	186
		6.2.2 分布式供电与热电联供	192
		6.2.3 混合动力汽车	197
		6.2.4 MTG 与电网的互连和供	

电	201	7.3 安全与保护	236
6.3 微型燃气轮机的国内外应用案		7.3.1 超速保护	236
例	204	7.3.2 接地保护	237
6.3.1 国外应用案例	204	7.3.3 熄火保护	238
6.3.2 国内应用案例	215	7.3.4 润滑不良保护	238
参考文献	222	7.3.5 超温保护	238
第7章 微型燃气轮机发电机组		7.3.6 过载、过压和短路保护	238
的性能指标	224	7.4 可靠性与环境特性	238
7.1 主要电气性能	224	7.4.1 可靠性、维修性及可用	
7.1.1 额定电气指标	224	性	238
7.1.2 负荷性能	224	7.4.2 环境特性	242
7.2 动力性能	225	7.5 微型燃气轮机发电机组的技术	
7.2.1 运行特性	225	认证	247
7.2.2 起动特性	229	7.5.1 互联认证	248
7.2.3 燃油消耗率	230	7.5.2 质量认证	249
7.2.4 热效率	232	7.5.3 环境认证	249
7.2.5 输出功率	236	参考文献	251

第1章 微型燃气轮机发电机组 与分布式供电系统

1.1 微型燃气轮机发电机组的概况

微型燃气轮机的单机容量一般在几十千瓦到 300kW 之间（国外学者认为功率小于 500kW 为微型燃气轮机）。主要性能指标包括输出功率、电压、频率、效率、燃料消耗率、进排气温度和回热度等。与内燃机发电机组相比，微型燃气轮机发电机具有体积小、重量轻、振动小、噪声低、起动较快、运动部件少、使用寿命长、维护简便、环境友好、燃料适应性广、可遥控和自诊断等优点。其中，平均故障间隔时间 MTBF（Mean Time Between Failures）高达 45000h，是内燃机可靠性的 10 倍。目前微型燃气轮机发电机组的发电效率已达到 30%；工作寿命长，运行费用和维护费用大大低于目前广泛应用的柴油机发电机组。微型燃气轮机发电机组已用于分布式供电系统、热电联供（一般以电热联供方式工作，效率高于 80%），以及混合动力电动车辆等。

微型燃气轮机在未来我国电力和动力系统中起着重要作用，微型燃气轮机发电机组可以用作备份电源（Stand-by Power）、优质可靠电源（Power Quality and Reliability）及联合发电（Cogeneration, CHP），可以广泛应用于航天、能源、交通和化工等领域。在军事领域，可用作边防、海防地区和重要国防设施的常用电源，也可用作军事通信和导弹发射等装备的备用电源。由于微型燃气轮机可以使用多种燃料，因此可以使用可再生资源 and 垃圾气体。在民用方面，它可以直接用于 25 ~ 500kW 的小型商业建筑物——包括饭店、宾馆、酒店、商店和小型写字楼等。此外，微型燃气轮机还可用于车辆动力，特别是作为小型原动机为电动车的蓄电池组充电，将成为 21 世纪混合动力汽车的新模式。

分布式供电系统（Distributed Generation, DG），或分布式能源系统（Distributed Energy Resource, DER）是相对于传统的集中式供电方式而言的。它将发电系统以小规模、分散式的方式布置在用户附近。它的主要特征是：设备小型化、燃料多元化、冷-热-电联产、控制智能化、管理网络化以及环境友好等。分布式发电是指各种小型、高效、灵活的电能生产技术，包括以矿物质为燃料的内燃机、小型或微型燃气轮机、燃料电池发电技术，以及利用太阳能、风能等可再生能源的发电技术。分布式能源系统是建立在分布式供电系统基础上，能够满足用户的多种能源需求，实现冷-热-电联供的能源系统，具有较高的能源利用率。

集中式与分布式有机结合是世界能源工业的重要发展方向。新一代的能源系统

将可能影响到人类的生活方式和社会发展的进程。近年来，世界上发生的几次大的停电事故，特别是最近美国、加拿大东部发生的大停电事故，每天的经济损失达 300 亿美元，充分反映采用集中供电模式的现代电力系统脆弱的一面。分布式发电则为改变单一集中供电模式提供了解决方案，同时为微型燃气轮机技术发展，以及它们的市场扩展提供了极好的平台。

据报道，到 2020 年，我国的国民经济生产总值 GDP 将翻两番，而一次能源最多只能达到翻一番。我们面临能源和环境双重压力，首先是能源总量不足。因此，必须利用先进科学技术，制定正确的能源规划，建立可持续发展能源结构，提高能源利用效率，降低环境污染，改善能源结构，发展高新能源技术。

先进燃气轮机技术是 21 世纪能源与动力系统的核心关键技术，也是目前世界上一个国家工业基础先进程度的重要标志。发展先进燃气轮机技术具有重大战略意义和广阔的产业化前景，对于我国相关领域中的高新技术发展有着极其重大的作用。燃气轮机发电机组是替代柴油发电机组的最佳动力设备，它由燃气轮机、发电机和控制系统等组成。燃气轮机由压缩机、燃烧室和涡轮机三大部分及相应的辅助设备组成。它是以加热的压缩气体作为工质，将燃料的能量转化为机械功，并通过转轴输出的热能发动机。燃气轮机发电机组的工作流程是大气中的空气被吸入压缩机中，压缩到某一压力，由于空气被压缩，它的温度也相应地升高到 100℃ 以上，然后被送入燃烧室，与喷入的燃料在一定压力下混合燃烧后产生高温气体，再流入涡轮机膨胀做功，直接带动发电机发电，通过控制屏输出电能，燃烧废气排入大气。

微型燃气轮机（Microturbine，简称 MT）是以超小型全径流式燃气轮机为原动机驱动发电机发电的设备。典型的微型燃气轮机是压缩机和涡轮机装配在同一个轴上的单轴电气发电设备（也有公司开发了两轴的）。它只包含一个转动部件，去掉了减速器及其相关的运动部件。这种直接驱动的高速动力设备比传统能源发电设备更加可靠和紧凑。按微型燃气轮机采用涡轮机的不同，可分为向心式和轴流式；按发电机类型可分为永磁式、磁阻式和单极感应式等。微型燃气轮机发电机组由微型燃气轮机（涡轮机、压缩机、燃烧室、回热器等）、发电机和数字电力控制器（Digital Power Controller，DPC）等组成，其中发电机、压缩机与涡轮机同轴。空气经压缩机增压、涡轮机排气预热，进入燃烧室与燃料混合、燃烧，产生的机械能经发电机转换为电能输出。发电机组输出 1500 ~ 4000Hz 的三相高频交流电，通过变换后成为 50 ~ 60Hz 的普通三相交流电。在大多数系统中，功率变换器和交流发电机也被用作微型燃气轮机的起动系统。在许多情况下，由两组 12V 蓄电池提供起动电能，而不需要具备从电网吸收能量的“暗起动”（black start）能力。表 1-1 列出微型燃气轮机概况。

微型燃气轮机可以分为两大类：一类是带回热器的，它从排除的废气中回收热能以通过增加燃烧温度提高热效率；另一类是早期的微型燃气轮机，一般不带回热

表 1-1 微型燃气轮机概况

商业用途	已经普及
功率范围	25 ~ 500kW
燃油	天然气、氢气、丙烷、柴油
效率	20% ~ 30% (带回热器)
排放	$\text{NO}_x < (9 \sim 50) \times 10^{-6}$
联合发电的热效率	$\leq 85\%$ (50 ~ 80℃)
商业化程度	小批量生产

器, 体积庞大而笨重, 热效率较低, 成本也较低。事实上, 一般微型燃气轮机都安装有热量回收装置 (回热器), 从废气中回收热能以提高进入燃烧室空气的温度, 从而使发电效率能够达到 28% ~ 30%, 而且回收的热能可以进一步用于联合发电系统。没有回热器的微型燃气轮机, 一般的发电效率仅有 14% ~ 17%。回热器是一种换热器, 将废气的热量转移到注入的空气中。在它进入燃烧室之前, 废气的温度将会降低到接近压缩机排气温度的, 并将注入的新鲜空气加热到接近涡轮机废气的温度, 通过提高温度来适应涡轮机工作要求, 并节省燃料消耗。图 1-1 示出带回热器的微型燃气轮机发电系统。

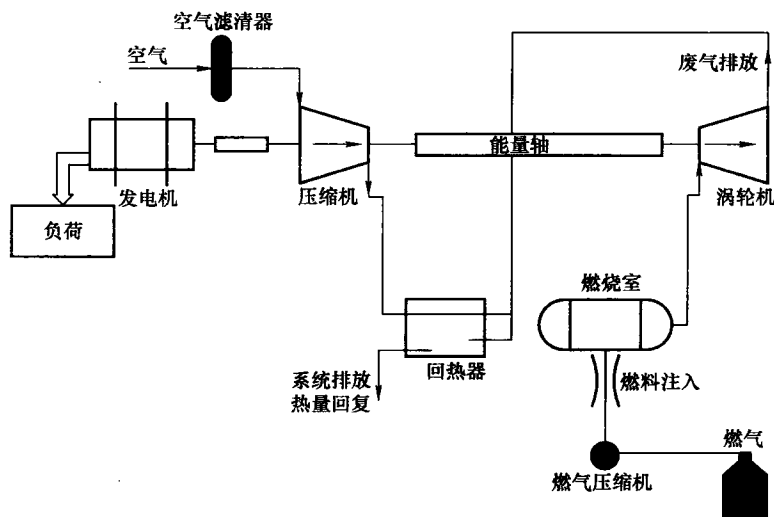


图 1-1 带回热器的微型燃气轮机发电系统

微型燃气轮机来源于大型载货汽车柴油机的涡轮增压器, 或飞机的辅助动力单元 (APUs)。大多数微型燃气轮机是单级 (single stage) 径流式, 转速高达 90000 ~ 120000r/min; 但是也有少数制造商开发了多级 (multiple stages) 低速微型燃气轮机系统。20 世纪 60 年代, 研制成功带有齿轮减速机构的微型燃气轮机雏形。在 20 世纪 40 ~ 60 年代, 功率在数百千瓦以下的燃气轮机就已发展和应用了。当时称为小型或小功率燃气轮机, 用于发电和驱动。机组的特点是每分钟数万转的燃气轮机经减速齿轮减速后去驱动负荷。压缩机用离心式; 涡轮机大多用轴流式, 部分用

向心式；用回热时较多采用回转式回热器，部分用板式回热器；转子用滚动轴承支承。在 20 世纪 60~90 年代，主要工作集中在提高效率、试验高温陶瓷材料等方面。其中，最主要工作集中在汽车用燃气轮机研究，目标是使其能在汽车中获得实用。直到 1995，随着空气力学、高温材料、制造工艺等基础学科的发展和应用，微型燃气轮机发电机组才得到迅速发展。美国、英国等国家相继研制成功 30~300kW 不用减速齿轮的微型燃气轮机直接驱动高速交流发电机，产生的高频交流电变频为 50Hz/60Hz 的微型燃气轮机产品。这样，将燃气轮机与发电机设计成一体，不仅大大简化了结构，而且使整台发电机组的尺寸显著减小、重量减轻、可靠性提高，使微型燃气轮机获得强大的生命力。现已有多家公司在研制和生产这种燃气轮机。鉴于 20 世纪 90 年代燃气轮机最大容量已从大型的数万千瓦至 300MW 以上，发展到小型的几十千瓦至几百千瓦，相对而言其功率较微小，故称为微型燃气轮机。小型燃气轮机机组的功率范围在 1~10MW 之间。微型燃气轮机的发展方向是进一步提高可靠性、改善热效率、扩大功率范围和降低制造成本等。

1.2 微型燃气轮机发电机组与内燃机发电机组的比较

1.2.1 内燃机发电机组特点

1. 历史和现状

内燃机的发展超过 100 年，是第一种化石燃料驱动的分布式发电技术。Otto 循环（火花点火）和 Diesel 循环（压燃点火）发动机，几乎在世界的每一个领域都获得了广泛的应用，功率范围从小型手持式微小动力设备到 60MW 的内燃机发电厂。内燃机是一种活塞在气缸中作往复直线运动的发动机一般功率比较小的发动机主要用于运输动力，并且经过很小改动即可用于发电动力；功率比较大的发动机用于发电、机械驱动或船舶动力。目前，世界各地生产的内燃机可以满足任何发电机组的功率需求，而且内燃机具有高效率、低成本优势；但是维修要求高，柴油发电设备的排气污染比较严重。

图 1-2 为分布式发电系统中的

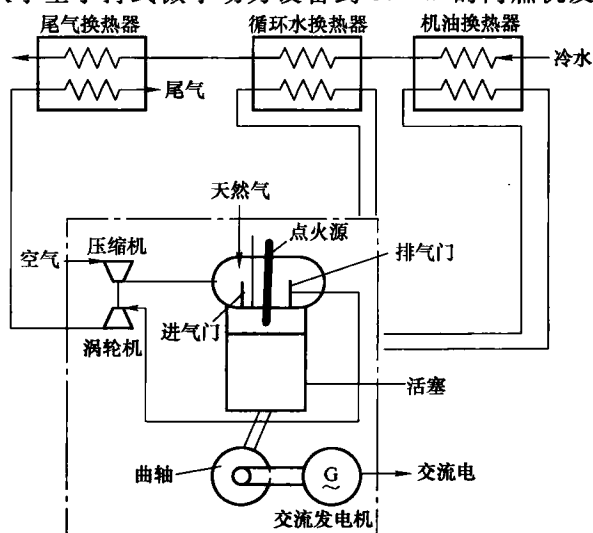


图 1-2 分布式发电系统中的内燃机配置示意图

内燃机配置示意图。

2. 内燃机发电机组的运行

几乎所有的发电用内燃机都是四冲程的，经历进气、压缩、做功和排气四个冲程完成一个工作循环。过程开始于燃料与空气混合，一些发动机采用增压或高增压，以提高发动机的功率输出。其作用是使进入气缸的气体，被进气系统中的小压缩机预先压缩。燃料与空气的混合物被引入气缸中，然后在活塞从下止点向上止点运动时被压缩。在柴油机中，空气和柴油是被分别引入的。在空气被发动机中的活塞压缩后，柴油开始喷入。当活塞运动至接近上止点时，火花塞产生电火花点燃混合气（大多数柴油机混合气由压缩而点火）。双燃料发动机在电火花周围，使用少量柴油引燃大量的天然气着火燃烧。燃烧压力和燃气驱动活塞在气缸中从上止点向下运动。活塞的运动能量被曲轴转变成旋转能量。当活塞到达下止点时，排气门开启，废气从气缸中排出。

3. 内燃机排放控制技术

燃烧过程产生 NO_x （因为不适当的燃油/空气混合比和过度的气缸冷却所致）、 CO 、 HC 和 PM 排放。柴油机应用广泛，但日益苛刻的排放法规已经使它难以适应柴油发电机的要求。像可选催化反应器（selective catalytic reduction, SCR）一样的控制技术是非常昂贵的，柴油机正在被用于紧急和备份电源，它们的设备安装成本低、性能轨迹记录及其有效的训练机制使人们拥有技术选择性。

双燃料发动机提供给人们效益和可靠性相结合的燃料可变选择，使用天然气的排放效益更好。和单一燃料柴油机相比，双燃料发动机的效率更高，产生的 NO_x 和 PM 排放更低。通过采用预燃烧室，使用更少柴油点火，可以获得更低的排放。更新的天然气发动机聚焦在高空燃比稀燃技术。稀燃发动机具有高效率、低排放的优点；但是功率输出也会降低，不过可以通过采用增压技术来获得适当的功率补偿。

内燃机的安装成本和年度费用取决于当地的排放控制法规。表 1-2 列出内燃机发电机组排放控制技术对安装成本与运行费用的影响。从表中可以看出，在严格控制（LAER）地区比部分控制（Non-LAER）地区高得多。这一差距随着单元尺寸增加而减少。

表 1-2 内燃机发电机组排放控制技术对安装成本与运行费用的影响

功率/MW	部分控制		严格控制		
	排放控制	安装成本 /（美元/kW）	排放控制	安装成本 /（美元/kW）	年度费用 /（美元/kW）
0.2 ~ 1.0	稀燃 LB	30	LB + SCR	230	36
1.0 ~ 5.0	稀燃 LB	30	LB + SCR	130	10
5.0 ~ 10.0	稀燃 LB	30	LB + SCR	105	5

注：LB—Lean-Burn 稀燃；SCR—Selective catalytic reduction 可选催化反应器。

附加的排放控制设备可以与柴油机、双燃料单元和天然气单元合成一体，但是在严酷的、极端的、臭氧稀薄的区域仍然具有很高的难度。另外，柴油机可以安装 PM 收集袋来控制微颗粒物排放。更新的稀燃发动机是 NO_x 控制的有效手段，也包括一些可以进一步降低排放的技术改进。

4. 内燃机发电机组的应用

内燃机被广泛用于各种分布式发电系统中，见表 1-3。

表 1-3 内燃机在分布式发电系统中的应用

用 途	适用性	说 明
连续发电	好	高效率导致低燃油成本，用户所在地区的排放法规对柴油机有约束
联合发电	较好	热量来源于废气、冷却介质和机油散热器。一般热输出质量（160 ~ 600℃）比燃气轮机和固体氧化物燃料电池 SOFC 较低
峰值发电	好	在各种动力发电设备中，柴油发电机组作为峰值发电的成本最低，启动也是最快的
绿色发电	一般	使用天然气的火花点火发动机比其他发动机的排放更好，但是 CO 、 NO_x 比燃气轮机更高， CO_2 比燃气轮机更低
附加发电	较好	作备份电源用途较好，但供电质量不如燃料电池和微型燃气轮机

5. 制造商

内燃机由世界各地的大型集团公司生产。现行发展趋势集中在提高效率、降低排放和降低成本。另外，一些公司签署了加入风险、市场、分配的相互协定。根据这一协定，他们可以共享研究、开发和开辟全球新市场的成本。美国代表性的制造商见表 1-4（连同一些有用的模型和现行项目）。

表 1-4 美国内燃发电机组的部分制造商

制造商	型 号	说 明
Caterpillar	从紧凑型模块化到 4040MW	提高效率 and 降低成本的焦点集中在燃烧、进气、排气传感器和发动机设计
Waukesha Engine	天然气（燃油辅助）稀燃发动机	通过改善进气、排气、燃烧和系统集成，开发新的气体燃料发动机
Cummins Engine	5 ~ 2000kW 柴油和汽油机	开发高压天然气发动机系统；备份电源、常用电源和负载管理应用
Jenbacher AG	联合发电，电气功率 70 ~ 2700kW	GE 动力系统公司和 Jenbacher 集团已经扩展了他们的分布式发电协议
Wartsila Corp.	柴油、稀燃、双燃料柴油机，功率 1 ~ 300MW	已经宣布加入与 GE 动力系统公司合作风险计划

6. 发展问题

(1) 技术

1) 双燃料发动机具有低排放(使用天然气)、良好经济性,同时具备柴油机的高效率和可靠性。开发的微型引燃装置可以减少柴油使用,同时排放较少。

2) 获得更高的比功率可能是减少每千瓦成本的关键,但这就要求发动机部件具有更高的耐久性(更高的强度和热负荷)。耐久性更高的部件也可以减少发电机组的维修费用。

3) 改善增压器、气门座圈,以及火花塞周围区域的部件冷却,也可以获得更长的部件寿命。

(2) 效率

1) 燃烧室设计对燃料的完全燃烧、提高效率和降低 NO_x 排放都是十分重要的。

2) 在一个循环中,燃料怎样喷入、何时喷入气缸对燃料燃烧是十分重要的,会影响功率、效率和排放。高效率发动机将运行在高压水平,需要使用长寿命的高能点火系统。通过改善点火时间设置、增加可靠性、减少维修要求,以及采用激光点火能够改善燃油效率、降低排放。

有效的增压是提高平均有效压力(BMEP)的关键。提高平均有效压力能提高效率。增压发动机可以获得更高的比功率,设备体积更小。

1.2.2 微型燃气轮机发电机组的特点

1. 历史和现状

用于微型燃气轮机(实际上应该是微型燃气轮机发电机组)的技术,源自于航空辅助动力系统、柴油机涡轮增压器和汽车设计,主要是发电功率在 25 ~ 500kW 的小型发电系统,许多公司的产品已经在 2001 年左右陆续进入市场。

2. 微型燃气轮机运行

微型燃气轮机由压缩机、燃烧室、涡轮机和发电机等组成。压缩机和涡轮机是典型的径流式设计,像汽车发动机的涡轮增压器。大多数微型燃气轮机采用单轴设计,使用高速永磁发电机产生可变电压和频率的交流电(AC),使用变换器产生 50Hz 或 60Hz 交流电。大多数微型燃气轮机被设计为连续运行,并且可以获得较高大电力变换效率。图 1-3 示出分布式发电系统中的微型燃气轮机配置示意图。

3. 排放控制技术

微型燃气轮机排放可以和其他大型燃气轮机比较,例如 Capstone 微型燃气轮机(30kW)的 NO_x 排放低于 9×10^{-6} ,霍尼韦尔(Honeywell Parallon 型)75kW 微型燃气轮机 NO_x 排放为 50×10^{-6} 。由于大多数微型燃气轮机的排放数据基于制造商的发表与主张,必须由现场测试来证实,所以要规定微型燃气轮机的精确排放水平是比较困难的。与水/蒸气喷射的较大工业燃气轮机比较,在微型燃气轮机中的排放控

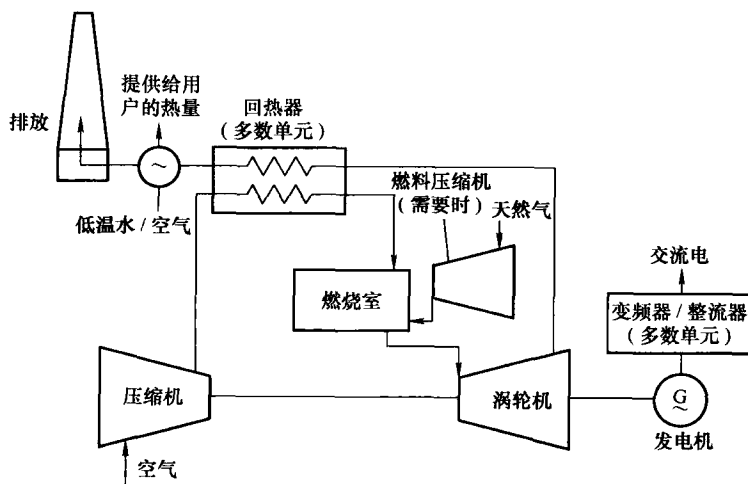


图 1-3 分布式发电系统中的微型燃气轮机配置示意图

制技术，主要集中在燃烧室设计和火焰控制。然而，由于其体积小，其单元往往处于降低到用户要求的水平之下，所以许多微型燃气轮机安装不受排放法规的约束。

4. 微型燃气轮机的应用

微型燃气轮机被广泛应用于分布式发电系统中，主要用途如表 1-5 所示。

表 1-5 微型燃气轮机在分布式发电系统中的应用

用途	适应性	说 明
连续发电	较好	虽然最终成本比现在的各种发电技术更低，但低热效率意味着高的燃油成本；在环境温度较高时，最大输出功率将下降
热电联供 CHP	较好	所有的热回收都简单地来源于废气，为了获得高发电效率就需要回热器；但是回热器限制了热输出的质量，因为多数热输出被用于进气预热，随着回热量增加，整个系统效率将降低
峰值发电	较好	较短的运行时间将弥补效率低的劣势，并且不带回热器的低成本将使微型燃气轮机更适合作峰值发电应用；但内燃机更便宜、更适合
绿色发电	一般	由于 NO_x 、CO 排放低，微型燃气轮机比内燃机更清洁，但没有燃料电池和可再生能源清洁，且低效率也导致高 CO_2 排放
附加发电	较好	基于发电机的电能变换器提供更好供电质量

美国生产微型燃气轮机的主要制造商及其产品的情况见表 1-6。

表 1-6 美国微型燃气轮机制造商及其产品类型

制造商	产品类型	说 明
Capstone 燃气轮机公司	微型燃气轮机系统	已经生产了数千台 30kW、60kW 的商业化微型燃气轮机，效率高达 28%
Honeywell 动力系统公司	Parallon 75 微型燃气轮机	已经获得通用公司等订单

(续)

制造商	产品类型	说 明
Elliot 能源系统公司	35 ~ 500kW 微型燃气轮机	带回热器的单轴润滑油轴承、50Hz/60Hz 变换器; 45kW 商业化微型燃气轮机效率高达 30%
Ingersoll-Rand 公司	发电厂微型燃气轮机	商业化产品于 2001 年投放市场
DTE 能源公司	ENT-400 微型燃气轮机	商业化产品于 2002 年投放市场

5. 发展问题

(1) 技术问题

1) 大多数微型燃气轮机和高速永磁发电机采用单轴产生非常高频率的交流电, 通过使用电力变换器将高频交流电变换为 60Hz 的交流电。和双轴结构比较, 单轴微型燃气轮机具有更简单的设计和结构, 因此几乎不需要维修。然而, 具有双轴结构减速齿轮箱的感应发电机, 能够直接产生 60Hz 交流电, 所以不需要变换器。也就是说, 双轴设计的机械驱动装置是必要的。

2) 微型燃气轮机以高速旋转 (40000r/min 以上), 因而要求高可靠性的轴承系统。目前采用两种结构: 适应性薄膜空气轴承系统和机油泵压力润滑系统。空气轴承系统消除了机油润滑系统, 结构更简单, 维修要求低, 而且没有寄生的机油泵负荷。然而, 一般的润滑轴承维持时间更长。

3) 对于微型燃气轮机制造商而言, 降低成本是一个主要障碍。功率调节和电网连接的电子电路成本是很高的。然而, 标准化互连设备和更高产量可以有助于降低这些成本。

(2) 效率

1) 回热器 (空气-空气换热器使用废气预热燃烧室进气) 可以提高微型燃气轮机热效率达 20% ~ 30%, 而不用回热器的微型燃气轮机热效率仅有 14% ~ 20%。为了获得高效率, 要求更高的发动机工作温度, 迫使人们采用像陶瓷一类的材料, 以改善回热器材料特性。

2) 微型燃气轮机效率受到天然气压力水平限制。使用高压天然气 (345 ~ 414kPa) 比使用低压天然气高 1% ~ 4%。

3) 几家制造商正在开发燃料电池与微型燃气轮机结合的动力发电系统。这些系统依靠燃料电池产生 (主要是固体氧化物燃料电池 SOFC) 热气体运行, 通过微型燃气轮机产生附加电力。商业化混合系统预期可以达到异常高的电力效率 (大于 60%)。

(3) 应用

1) 来源于煤和生物质能的固体燃料通过汽化器产生的气体燃料, 可以帮助涡轮机获得更广泛接受, 特别是在国际市场和那些天然气严重缺乏的国家。然而, 这