



国之重器出版工程

国防现代化建设

航天先进技术研究与应用系列

航改微型 燃气轮机发电系统

Aero-Derivative Micro Gas
Turbine Power Generation System

段建东 赵克 孙力 著



中国工信出版集团



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对航天发动机改陆用发电的微型燃气轮机的控制进行研究。首先对航改微型燃气轮机发电技术进行概述;然后对微型燃气轮机发电系统各组成部分进行分析,分析各组成的工作原理、系统能量传输机理、系统功率变换实现及控制;最后重点对微型燃气轮机的若干关键技术进行研究。书中给出的数学建模、控制策略、效率优化方法等对于航天发动机的控制具有重要的借鉴意义。

本书可作为热能动力燃气轮机、电气工程分布式发电等专业教师和研究生的参考书,同时对从事微型燃气轮机发电技术、分布式发电系统研究的科研人员具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

航改微型燃气轮机发电系统/段建东,赵克,孙力著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2020.1

国之重器出版工程. 航天先进技术研究与应用系列

ISBN 978-7-5603-6568-8

I. ①航… II. ①段…②赵…③孙… III. ①航空发动机-改造-
燃气轮机-发电 IV. ①V235.1②TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 081185 号

航改微型燃气轮机发电系统

HANGGAI WEIXING RANQILUNJI FADIAN XITONG

策划编辑 王桂芝 刘 威

责任编辑 李长波 张凤涛 庞 雪

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 固安县铭成印刷有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16 印张 16.75 字数 326 千字

版 次 2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6568-8

定 价 88.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

随着社会的高速发展、人类对能源动力需求的不断增加,提高动力系统性能和能源利用效率显得尤为重要。微型燃气轮机具有高功率密度、高可靠性、高效率、低维护成本、低排放等特点,能够使用天然气、油田伴生气、柴油等多种燃料,不依赖于单一的能源形式,因此在航空航天、国防和其他工业领域,诸如船舶、油气开采等,具有广泛的应用前景,近年受到高度重视。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中列出的重点项目包括了微型燃气轮机技术,在国家“863”计划能源技术领域战略研讨中,确定了将燃气轮机发电技术研发作为主要战略目标之一。

在以燃料的多元化、设备的微型化、热电冷联产化、电站的网络化为特征的分布式发电系统研究中,微型燃气轮机(简称微燃机)发电系统作为小型、高效的发电装置,将有可能成为新型分布式发电技术的主流。同与其发电容量和应用场合相近的内燃机发电系统相比,它具有以下一些特点:(1)运动部件少,故障率低,寿命长;(2)燃料形式多样,排放低;(3)振动小,噪声低,隐蔽性好;(4)易于形成热电冷联产;(5)便于多台集成扩容。微燃机发电系统的这些特征,使其具有广阔的应用领域。例如,在石油钻井中,微燃机发电系统可以利用伴生气为燃料,一方面可为钻井平台提供动力,另一方面通过热电冷联产可为生活区提供热水、电能和冷气。这样既降低了钻井成本,又在现场很好地处理了伴生气的问题,对于油田高效生产和节能减排具有重要意义。在军事应用中,小型独立动力系统是移动式导弹发射系统、坦克、自行火炮等装备不可缺少的组成,采用微燃机动力系统可大幅度提高武器的隐蔽性和可靠性,因此具有重要的军



事应用前景。

微燃机发电系统之所以能够受到相关研发领域和应用领域的重视,很重要的原因在于其具有高响应、高效率等特点。但是现阶段,在一些特殊的应用场合微燃机发电系统仍受到限制,究其原因是微燃机发电系统的性能还不够完善,难以应对一些特殊的应用需求。分析总结目前的微燃机发电系统,特别是欧美国家一些技术先进的公司生产的微燃机发电系统,尽管其在技术上较为先进,但是还存在一些问题需要解决,还有待科技人员深入地研究诸如高温材料耐热性、高速气动轴承及输出电能质量、瞬时功率控制等问题。

本书是哈尔滨工业大学电磁驱动与控制研究所课题组多年来从事微燃机发电技术研究的成果总结,针对微燃机发电系统进行研究,书中给出的数学建模、控制策略、效率优化方法等对于航天发动机的控制具有重要的借鉴意义。本书首先对微燃机发电技术进行概述,介绍微燃机发电系统的发展历史与趋势、现有的技术特点、国内外的研究现状、未来的发展趋势及目前存在的主要问题;然后对微燃机发电系统各组成部分进行分析,分析其工作原理、系统能量传输机理、系统功率变换实现及控制;最后重点对微燃机发电系统的若干关键技术进行研究,分别是微燃机发电系统非线性数学建模、微燃机本体的控制策略研究、微燃机本体效率优化控制研究、微燃机启动控制技术、高速永磁同步电机的控制技术、高基频 PWM 整流器的研究、并网逆变器的控制技术、孤岛运行下三相四桥臂技术研究、微燃机发电系统冲击问题及基于超级电容储能的混合发电技术研究、微燃机-超级电容混合发电系统功率协调控制。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请专家和读者批评指正。

作者

2019年8月



目 录

第1章 概述	1
1.1 微燃机发电技术的国内外研究现状	2
1.1.1 微燃机发电系统的拓扑结构	2
1.1.2 国外发展状况及趋势	4
1.1.3 国内发展现状	6
1.2 电控系统的主要问题与关键技术	7
1.2.1 电控系统结构及性能要求	8
1.2.2 高速永磁电机的启动控制技术	9
1.2.3 冲击负载问题	11
1.2.4 系统功率平衡问题	13
1.2.5 系统全工况稳定性问题	15
1.2.6 系统效率问题	17
1.2.7 集成扩容并网控制技术	18
1.2.8 离网运行混合型负载供电技术	20
第2章 微燃机发电系统结构及工作机理	23
2.1 基于超级电容储能的发电系统架构	24
2.1.1 系统架构	24
2.1.2 基于超级电容储能的功率补偿原理	25
2.2 微燃机本体组成	27



2.2.1	压气机	27
2.2.2	透平	27
2.2.3	燃烧室	27
2.2.4	回热器	28
2.2.5	高速轴承	28
2.2.6	微燃机控制器	29
2.3	高速电机	31
2.3.1	高速电机的关键技术	31
2.3.2	高速永磁同步电机的转子损耗	32
2.3.3	永磁同步电机系统效率优化	35
2.4	功率变换器	37
2.4.1	高速永磁同步电机的 PWM 整流器	37
2.4.2	微燃机发电系统的控制策略	41
2.4.3	基于超级电容的分布式发电系统	43
2.4.4	微燃机系统功率控制	45
2.5	微燃机发电系统瞬时功率流分析	48
2.5.1	能量转换过程	48
2.5.2	瞬时功率流	49
第3章	微燃机发电系统非线性数学建模	52
3.1	微燃机非线性数学模型	53
3.1.1	静态数学模型	54
3.1.2	动态数学模型	58
3.1.3	模型实例化及仿真实现	60
3.1.4	模型验证	62
3.2	PMSM 动态数学模型	69
3.2.1	三相静止坐标系下的数学模型	70
3.2.2	两相静止坐标系下的数学模型	70
3.2.3	dq 旋转坐标系下的数学模型	71
3.2.4	xy 坐标系下的数学模型	73
3.3	基于变换器开关函数的统一数学模型	74
3.4	电功率变换系统瞬时功率模型	78
3.4.1	永磁同步电机与 PWM 整流器的一体化模型	78
3.4.2	超级电容储能单元模型	80



3.4.3	逆变器模型	81
第4章	微燃机发电机组的状态反馈控制及效率提升	84
4.1	微燃机全工况状态反馈强鲁棒性控制	85
4.1.1	控制系统结构	85
4.1.2	全工况固定收敛特性状态观测器	88
4.1.3	全工况固定收敛特性状态反馈控制律	90
4.1.4	仿真验证	91
4.2	微燃机效率优化控制	94
4.2.1	效率优化条件	94
4.2.2	效率优化控制方法及仿真分析	97
4.2.3	效率优化对状态反馈控制的影响	100
第5章	基于 MTPA 的直接转矩启动控制	104
5.1	启动系统介绍	105
5.2	启动子系统直接转矩控制策略的机理	106
5.3	启动子系统设计的关键技术	111
5.3.1	定子电阻的影响与补偿	111
5.3.2	转子速度检测与初始磁链的判断	112
5.3.3	转矩角的准确计算	114
5.4	启动子系统实现 MTPA 的优化设计	115
5.4.1	磁链参数的给定与定子电流的关系	115
5.4.2	MTPA 控制与磁链自调节	118
5.5	系统实现与实验结果	122
第6章	永磁同步电机瞬时功率控制及效率优化	123
6.1	永磁同步电机瞬时功率控制	124
6.1.1	瞬时功率控制系统结构	124
6.1.2	滑模观测器锁相环转子位置检测	124
6.1.3	瞬时功率检测及控制	126
6.1.4	仿真分析	128
6.2	开关频率对功率环节的影响与系统效率的优化	132
6.2.1	基于 Simplerer 的功率系统电流谐波分析	132
6.2.2	基于 Maxwell 2D 的电机涡流损耗分析	135
6.2.3	开关器件的损耗与系统效率的优化	137



第 7 章 基于直接功率控制的并网变换器设计	140
7.1 基于直接功率控制的并网变换器机理分析	141
7.1.1 并网变换器的结构及数学模型	141
7.1.2 直接功率控制的基本思想	143
7.2 PWM 并网变换器相关控制技术的改进	144
7.2.1 虚拟磁链的引入	144
7.2.2 基于微网电压幅值波动的磁链观测器设计	146
7.2.3 瞬时功率计算和 Bang-Bang 功率控制的改进	149
7.3 功率前馈型改进虚拟磁链观测器直接功率并网策略	150
7.3.1 功率前馈型 IVF-DPC 机理	150
7.3.2 基于虚拟磁链的功率前馈型直接功率控制仿真研究	152
7.3.3 实验研究	154
第 8 章 离网运行三相四桥臂变换器的研究	157
8.1 三相四桥臂变换器的工作原理	158
8.2 基于单周控制的双闭环控制策略	163
8.2.1 离网运行三相四桥臂变换器的总体结构	163
8.2.2 基于单周控制的四桥臂逆变电压信号生成方法	165
8.2.3 双闭环系统控制策略	168
8.3 系统仿真与分析	172
8.3.1 稳态仿真	172
8.3.2 动态仿真	176
第 9 章 冲击性负载辨识与瞬时功率补偿	179
9.1 无补偿发电系统冲击性负载特性	180
9.1.1 微燃机控制系统输出功率特性	180
9.1.2 PWM 整流器功率传输特性	181
9.1.3 负载冲击扰动时系统响应的时域分析	185
9.2 冲击性负载辨识	186
9.2.1 逆变器功率传输特性	186
9.2.2 负载辨识及其直流端等效	187
9.3 瞬时功率快速补偿控制	188
9.3.1 补偿控制系统结构	188
9.3.2 瞬时功率跟踪控制	189
9.3.3 微燃机输出功率预测方法	190



9.3.4	瞬时功率补偿控制器设计	191
9.3.5	仿真分析	194
第 10 章	基于超级电容储能的冲击补偿实验模拟	198
10.1	实验系统物理模拟等效方法	199
10.2	模拟实验系统构建	203
10.2.1	系统结构	203
10.2.2	微燃机冲击负载时输出特性模拟	204
10.2.3	微燃机启停模型及模拟	207
10.3	补偿系统瞬时功率控制实验	212
10.3.1	冲击加载瞬时功率快速补偿	212
10.3.2	冲击减载瞬时功率快速吸收	215
参考文献	218
名词索引	244



本章主要概述微燃机发电技术的发展状况。首先对微燃机发电系统的拓扑结构进行介绍,主要包括系统组成结构、基本工作原理、运行模式、主要性能指标等内容。然后对微燃机发电技术的国外和国内的发展状况及趋势进行详细分析,对目前的微燃机发电系统商业产品进行性能对比,由于微燃机发电系统优势明显,应用领域广阔,因此不仅国外发展势头强劲,国内市场需求也在不断增长。最后对电控系统的主要问题与关键技术进行综述,后面的章节主要围绕这些问题和关键技术展开。



随着人类社会高速发展,对能源动力的需求不断增加,提高动力系统性能和能源利用效率显得尤为重要^[1-4]。微燃机具有高功率密度、高可靠性、高效率、低维护、低排放等特点,能够使用天然气、油田伴生气、柴油等多种燃料,不依赖于单一的能源形式,在航空航天、国防和其他工业领域,诸如船舶、油气开采等,具有广泛的应用前景,近年受到高度重视^[5-7]。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中列出的重点项目包括了微燃机技术,在国家“863”计划能源技术领域战略研讨中,确定了将燃气轮机发电技术研发作为主要战略目标之一。航天科技集团与哈尔滨工业大学的航天科技创新平台将微燃机发电系统列为重点支持项目。本书结合课题组的研究工作,对微燃机发电系统中存在的若干问题进行了较为深入的研究。

1.1 微燃机发电技术的国内外研究现状

1.1.1 微燃机发电系统的拓扑结构

微燃机出现于20世纪40年代,起始采用的是简单循环多轴结构,但由于无回热器的原因,其效率低于内燃机的效率,加上笨重的齿轮变速箱,因此限制了微燃机的发展^[8,9]。之后随着高效紧凑型回热器、高速气动轴承、高速永磁发电机、功率电力电子变换等技术的发展,现代先进微燃机从20世纪90年代开始快速发展^[10,11]。与内燃机相比,微燃机具有功率体积比大、燃料形式多样、噪声小、排污少、易于形成热电冷联供系统等优点,是分布式发电系统的重要电源形式之一。现代微燃机发电系统结构如图1.1所示,系统的主要组成包括微燃机、高速永磁同步电机、整流器、启动电池和逆变器。其中,微燃机的4个重要组成部分为压气机、回热器、燃烧室和透平,其燃料系统包括调节阀和闸阀。现代微燃机发电系统的结构特点为:采用单级径向压缩机和透平、低排放环形燃烧室、高效回热器、空气轴承、与透平同轴连接的高速永磁发电机和高性能功率变换系统等。

微燃机的工作原理为:低温低压空气经过空气过滤器后进入压气机,经压气机压缩后变为高压高温空气,然后进入回热器进行预热。回热器由高温通道和低温通道构成,高温通道的进端和出端分别称为热进端和热出端,低温通道的进端和出端分别称为冷进端和冷出端。回热器吸收热端废气中的热能量,加热冷端空气,这样实现了废气能量的再利用,可以有效提高微燃机的效率。回热器冷出端空气与燃料混合后进入燃烧室,混合气体燃烧产生高温高压燃气,推动透平等熵膨胀做功产生机械转矩,机械转矩一方面驱动压气机旋转使系统自持工作,另一方面驱动发电机使其输出电能。燃料流量的大小决定了系统输出功率的大

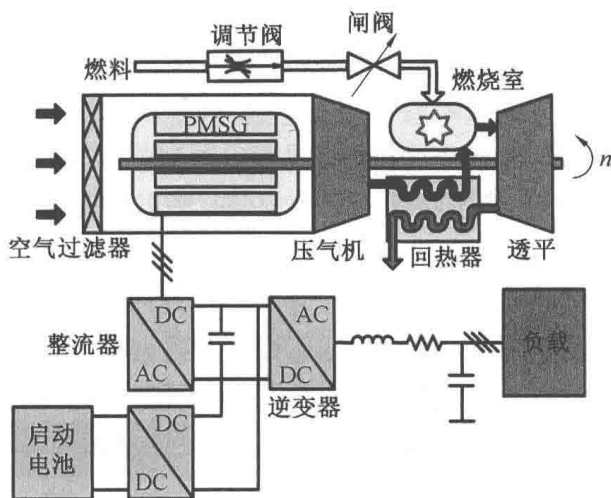


图 1.1 现代微燃机发电系统结构图

小,燃料流量受调节阀控制,闸阀控制燃料的通断。

上面简要介绍了微燃机本体的工作原理,微燃机发电系统的工作过程可分为3种模式:启动模式、发电模式和冷却停机模式。下面将分别介绍3种模式的工作原理及各部件的功能。

1. 启动模式

微燃机本体没有从静止状态到工作状态的自启动能力,必须依靠外力拖动到一定的转速才能正常工作。启动电池的主要功能就是为微燃机启动提供能量,DC/DC变换器将电池电压变换为直流母线电压,电机驱动器将直流电变换为交流电驱动发电机升速,微燃机作为负载从静止状态升速到点火转速。点火成功后系统继续升速,微燃机输出功率逐渐增加,同时启动电池输出功率逐渐减少,当系统达到自持转速后启动模式结束。

2. 发电模式

发电模式是微燃机发电系统的主要运行方式,进入发电模式后微燃机开始输出机械功率,永磁发电机将机械功率变为电功率,整流器将发电机输出的高频电变换为直流电^[12]。逆变器为负载提供三相电源,负载最终完成电能的利用^[13]。在此模式下启动电池通过DC/DC变换器充电,为停机模式和下次启动储存能量。

3. 冷却停机模式

发电模式时微燃机燃烧室排气温度高达800℃,如果系统突然停机,冷却系统将停止工作,内部高温会造成微燃机系统严重损坏。因此,停机前需要进行冷却,直到排气温度降到安全范围内。此时燃烧室和燃料系统停止工作,高速永磁