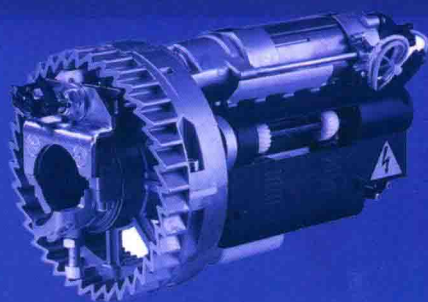


# 永磁同步电动机 及其控制系统设计

Yongci Tongbu Diandongji Jiqi Kongzhi Xitong Sheji

李玉峰 王森 赵为平 江秀红 著



非  
外  
借



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 永磁同步电动机及其 控制系统设计

李玉峰 王森 赵为平 江秀红 著



1201 4 04 111 12

·北京·

## 内 容 简 介

本书是在某项目子课题《高效率电动机及控制系统设计》基础上整理编写的,针对大功率永磁同步电动机及其配套智能控制系统的设计与实现进行了一定探讨。

全书由概论、高力能密度永磁同步电动机电磁设计、永磁同步电动机损耗计算与热负荷设计、永磁同步电动机强度分析与设计、永磁同步电动机控制技术、永磁同步电动机控制系统建模与仿真、永磁同步电动机控制系统硬件设计、永磁同步电动机控制系统软件设计共8章组成。

本书可作为普通高等院校电气类、自动化类、电子信息类本科生和研究生的扩展读物,也可供从事相关技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

永磁同步电动机及其控制系统设计/李玉峰等著.

—北京:国防工业出版社,2017.10

ISBN 978-7-118-11413-3

I. ①永… II. ①李… III. ①永磁同步电机-控制系统设计 IV. ①TM351.012

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第258174号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 8 $\frac{3}{4}$  字数 207千字

2017年10月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

“十二五”期间,随着国家相关政策的实施,通用航空迎来了前所未有的发展机遇。当前,尽管国内通用航空产业还处于初级阶段,产业环节还不完善,但随着通用航空技术的不断发展以及相关政策的不断完善,电动飞机动力装置的需求将大幅提升,发展通用航空对带动经济发展具有重大意义。

与采用内燃机作为主推进装置的飞机相比,采用电驱动系统作为主推进装置具有污染小、噪声低、能源利用率高、生命周期成本低、结构简单、可靠性高、热辐射小等优点,是通用航空飞机的理想选择。电驱动装置在电动飞机动力系统研制中处于核心位置。由于电动飞机工况的特殊性,要求主推进电动机具有重量小、功率大、转矩大、效率高、过载能力强和可靠性高等诸多特点。永磁同步电动机励磁磁场在定子相绕组中感应出的电动势为正弦波,采用矢量控制可以实现宽范围恒功率弱磁调速,具有噪声低、转矩密度高、功率密度大、脉动转矩小、控制精度高、过载能力强等特点,非常适合作为电动飞机的推进系统。

本书主要介绍无人机主推进高力能密度永磁电动机系统关键技术。全电飞机主推进电动机和控制系统是电动飞机主推进系统的核心所在,对主推进系统的分析是赶超世界电动飞机行业先进水平的关键。本书的编写意在帮助有志于分析此类无人机主推进高力能密度永磁电动机关键技术的科研人员解决技术难题。

本书结合编著者多年教学、实践经验,详细解释该领域分析中可能遇到的各种问题,力图将难于理解的知识点转化为相对易懂的叙述方法,力图使系统的结构原理学习简单化。首先为读者解决技术入门问题,进而为读者进一步学习、能够解决实际中所遇到的各种复杂技术难题打下坚实基础。全书共分8章:

第1章主要介绍电动机系统关键技术分析现状等知识,为初学者分析目前该项技术的发展趋势服务。

第2章主要结合无人机飞行工况介绍高力能密度永磁电动机分析方法,并介绍多种电磁方案优化仿真,介绍电动机转子磁路结构优化设计方案。

第3章主要介绍建立温度场三维流固耦合模型并进行分析。

第4章主要介绍电动机机壳、端盖的强度特性及定子与机壳、转子的振动特性,并通过分析整机的振动频率和质量参与系数,介绍在电动机与无人机发生共振时如何优化。

第5章主要介绍永磁同步电动机数学模型的建立,分析常用的永磁电动机控制策略和控制方法。

第6章完成永磁同步电动机矢量控制仿真分析,探索将遗传算法用于控制系统中。

第7章主要介绍永磁电动机控制系统硬件设计的指标和要求,包括硬件系统关键模块的电路设计、控制器壳体结构设计和散热器系统设计。

第8章主要给出控制系统总体设计和软件系统关键模块的编程流程,完成下位机和上位机软件的设计。

本书主要由电机控制课题组的老师完成,参与编写工作的有沈阳航空航天大学李玉峰(第1、5章)、赵为平(第6章)、江秀红(第8章),沈阳工程学院王森(第2、3、4章),长春工业大学王伟达(第7章)。此外,在本书的编写过程中,赵鑫老师、邵清亮老师、王宇鹏老师以及研究生郭群也做了大量整理和录入工作。

本书还得到了北京乾勤科技有限公司的大力支持,公司技术人员给予了热情的技术解答,并提出了若干宝贵意见。在本书出版之际,谨向他们致以最诚挚的谢意。由于编者水平和时间的限制,在永磁同步电机控制系统方面的观点、方法可能有些偏颇,书中难免有错误和不妥之处,恳请有关专家和各位读者批评指正。

作者

2017.9

# 目 录

第 1 章 概论 .....	1
1.1 电动飞机主驱动电动机研究背景 .....	1
1.2 电动飞机及主驱动电动机研究动态 .....	2
1.2.1 电动飞机研究现状 .....	2
1.2.2 主驱动电动机关键技术研究现状 .....	6
第 2 章 高力能密度永磁电动机电磁设计 .....	10
2.1 高力能密度永磁电动机有限元分析 .....	10
2.1.1 永磁电动机有限元分析假设条件 .....	10
2.1.2 永磁电动机有限元分析模型 .....	10
2.2 高力能密度永磁电动机电磁性能设计 .....	13
2.2.1 高力能密度永磁电动机分析方法研究 .....	13
2.2.2 高力能密度永磁电动机设计研究 .....	16
2.2.3 结构参数对力能密度的影响 .....	21
2.3 主驱动电动机磁路结构优化设计研究 .....	25
2.3.1 隔磁桥形状对磁路性能影响 .....	25
2.3.2 转子外径圆弧形状对磁路性能影响 .....	29
2.3.3 永磁体位置对磁路性能影响 .....	31
第 3 章 永磁电动机损耗计算与热负荷设计 .....	34
3.1 高力能密度永磁电动机损耗计算 .....	34
3.1.1 考虑磁滞回环下铁芯损耗计算 .....	34
3.1.2 永磁体温度对铁耗影响分析 .....	36
3.1.3 一般损耗计算 .....	40
3.1.4 热导率计算 .....	41
3.2 基于流固耦合温度场求解与分析 .....	42
3.2.1 温度场求解物理模型 .....	42
3.2.2 温度场求解基本假设及边界条件 .....	43
3.2.3 主驱动电动机温度场求解计算模型 .....	44
3.2.4 主驱动电动机温度场求解方法 .....	45
3.3 不同工况下温度场分析与热负荷研究 .....	49
3.3.1 运行工况及温度场关键参数确定 .....	49
3.3.2 爬升初期与巡航初期主驱动电动机各部件温度分布 .....	51
3.3.3 巡航初期电动飞机机舱内冷却介质温度分布 .....	55

3.3.4	各飞行工况下主驱动电动机的温升分析	56
3.4	高力能密度永磁电动机热负荷设计	57
3.4.1	不同负载状态下热负荷特性分析	57
3.4.2	主驱动电动机爬升阶段热负荷分析	57
3.4.3	实际工况主驱动电动机热负荷分析	59
<b>第4章</b>	<b>永磁电动机强度分析与设计</b>	<b>61</b>
4.1	高力能密度永磁电动机强度分析	61
4.1.1	边界条件与基本假设	61
4.1.2	控制量计算	62
4.2	永磁电动机主要部件机械强度计算	64
4.2.1	机壳应力分析	64
4.2.2	前后端盖应力分析	64
4.3	支撑筋对永磁电动机强度的影响	67
<b>第5章</b>	<b>永磁同步电动机控制技术</b>	<b>69</b>
5.1	永磁同步电动机数学模型	69
5.1.1	$A、B、C$ 三相静止坐标系下的PMSM数学模型	69
5.1.2	$\alpha、\beta$ 两相静止坐标系下的PMSM数学模型	70
5.1.3	$d、q$ 坐标系下的PMSM数学模型	71
5.2	永磁同步电动机控制策略	72
5.2.1	矢量控制技术	72
5.2.2	直接转矩控制	74
5.2.3	矢量控制技术和直接转矩控制技术的比较	75
5.3	PMSM电流控制方法	76
<b>第6章</b>	<b>永磁同步电动机控制系统建模与仿真</b>	<b>77</b>
6.1	PMSM矢量控制系统仿真模型	77
6.1.1	坐标变换模块	77
6.1.2	空间电压矢量(SVPWM)模块	79
6.1.3	逆变器和PMSM	83
6.1.4	PI模块	84
6.1.5	PMSM矢量控制系统仿真模型	84
6.2	遗传算法	84
6.3	仿真和试验结果	86
<b>第7章</b>	<b>永磁同步电动机控制系统硬件设计</b>	<b>89</b>
7.1	硬件系统设计指标及要求	89
7.1.1	硬件系统设计指标	89
7.1.2	硬件系统设计要求	89
7.2	硬件系统电气设计概述	90
7.3	硬件系统关键模块设计	91
7.3.1	电源模块设计	92

7.3.2	IGBT 驱动电路设计 .....	92
7.3.3	通信模块电路设计 .....	94
7.3.4	信号检测电路设计 .....	95
7.3.5	温度及速度模拟检测接口设计 .....	96
7.3.6	PWM 信号接口设计 .....	96
7.3.7	电动机转动方向接口设计 .....	96
7.3.8	电动机保护电路设计 .....	97
7.3.9	开关量输入输出接口设计 .....	98
7.3.10	控制器电容板设计 .....	98
7.3.11	JTAG 接口电路设计 .....	100
7.4	控制器壳体结构设计 .....	100
7.4.1	控制器壳体电磁兼容设计 .....	100
7.4.2	控制器壳体轻量化设计 .....	101
7.5	散热系统设计 .....	103
7.5.1	功率模块损耗分析 .....	103
7.5.2	散热器的热阻计算 .....	104
7.5.3	散热器系统分析与最终优化方案 .....	104
<b>第 8 章</b>	<b>永磁同步电动机控制系统软件设计 .....</b>	<b>106</b>
8.1	CCS3.3 集成开发环境 .....	106
8.2	PMSM 控制系统软件总体框架 .....	107
8.3	软件系统关键模块 .....	109
8.3.1	主程序 .....	109
8.3.2	CAN 通信模块 .....	112
8.3.3	QEP 模块 .....	113
8.3.4	SCI 通信模块 .....	114
8.3.5	中断服务子程序 .....	118
8.3.6	AD 采样与滤波模块 .....	121
8.4	下位机显示系统设计 .....	122
8.5	上位机监控软件设计 .....	124
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>127</b>



# 第 1 章 概 论

## 1.1 电动飞机主驱动电动机研究背景

2010 年 11 月 14 日,国务院、中央军委印发的《关于深化我国低空空域管理改革的意见》指出,我国将逐步开放 3000m 以下空域,这势必使得整个通航产业迅猛发展,相关行业和企业有望迎来拐点,通航经营成本将逐步降低。通用航空,是指使用民用航空器从事公共航空运输以外的民用航空活动,包括工业、农业、林业、渔业和建筑业的作业飞行,以及医疗卫生、抢险救灾、气象探测、海洋监测、科学试验、教育训练、文化体育等方面的飞行活动,具有机动灵活、快捷高效、环境适应能力强等特点,能够直接为国民经济基础设施建设行业提供服务。

“十二五”期间,国家相关政策的实施,为通用航空的发展提供了前所未有的机遇。低空开放、支线航空和大飞机项目正加速发展,国民经济的快速增长、旅游外贸的加速发展、人民生活水平的不断提高,极大地促进了通用航空的发展,给航空装备制造业带来了巨大的发展空间,发展通用航空对带动经济发展具有重大意义。

当前,尽管国内通用航空产业处于初级阶段,产业环节不完善,但未来的产业需求有较大的成长空间。根据民航局规划,2020 年我国通用航空发展目标是实现规模化发展,飞行总量达 200 万小时,未来几年的飞行量增速约 19%。根据中航工业的预测,以 2015 年我国通用飞机保有量约 2500 架来计算,2020 年我国通用飞机保有量将突破 9000 架。从目前国内保有量估计,未来几年通用飞机保有量年增速超过 25%。随着通用航空技术的不断发展以及相关政策的完善,电动飞机动力装置需求将大幅度提升。

通用航空飞机主要采用内燃机或电动机作为主推进装置。主推进装置是指航空动力系统为飞行器提供动力,推动飞行器前进的装置。该装置的动力可分为燃油动力、电动和其他 3 类,燃油动力是指使用汽油、煤油和甲醇等燃料为发动机提供动力,电动系统则是指以电池推动电动机作为动力,将燃料电池用作推进动力或辅助能源。传统飞机大部分采用内燃机作为主推进,排出的废气中含有有害气体成分较高,严重污染环境。如果电动飞机全部采用内燃机作为主推进装置,那么由此带来的环境污染问题将十分严重。通用航空飞机采用电驱动系统作为主推进装置,尤其采用永磁电动机系统,具有污染小、噪声低、能源利用率高、生命周期成本低、结构简单、可靠性高、热辐射小等优点,是通用航空应用的理想选择。电动飞机这一驱动功能的实现涉及电动机、电力电子、微处理器、蓄电池等多学科技术领域,是赶超世界飞机行业先进水平的关键。

与其他类型电动机相比,电动飞机采用永磁电动机作为主推进具有巨大优势:第一,永磁电动机采用钕铁硼作为励磁源,具有高剩磁、高磁能积的特点,其效率高达 93% 以上,极利于增加电动飞机的续航范围;第二,永磁电动机比励磁式电动机的能量密度高,相

同功率下体积小、重量轻,极适合作为电动飞机的驱动系统;第三,永磁同步电动机的气隙磁密可设计成正弦波,与矩形波永磁电动机相比具有转矩脉动小和铁芯损耗小的优势。

## 1.2 电动飞机及主驱动电动机研究动态

### 1.2.1 电动飞机研究现状

#### 1. 国内外电动飞机研究现状

电动飞机一般包括电动载人飞机和电动无人飞机,国外对电动载人飞机的研究始于近几年,研究成果主要如下。

2007年12月23日,法国成功试飞世界首架由电力驱动的轻型飞机 Electra,如图 1.1 所示。该轻型飞机的动力系统由法国 APAME 组织开发,Electra 采用轻型锂聚合物提供能量。法国一名试飞员对该常规电动飞机 Electra 进行了测试,该飞机绕着阿尔卑斯山南部共飞行 48min,飞行距离达到 50km。该飞机是首架以电池为动力的机翼固定型传统飞机。

2008年12月9日,美国电动飞机公司研发的 ElectraFlyer-C(图 1.2)进行了首次试飞,该飞机以锂电池供电,能够以 112km/h 的速度安静地飞行 1.5~2h,最高时速达 144km/h。ElectraFlyer-C 飞机是碳纤维外壳超小型充电飞机,主要组成部分包括电动机控制器、再生冷却式液体火箭发动机、数字仪表、螺旋桨、电池组、电动机控制器。ElectraFlyer-C 飞机的主推进源为 13.5kW 的直驱电动机。当能量从电池输送到直驱电动机时,控制器只损失 2%的能量,飞机整体能效可达 88%。



图 1.1 Electra 电动飞机

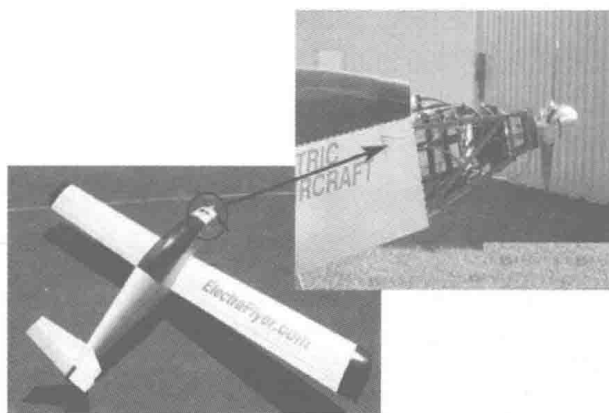


图 1.2 ElectraFlyer-C 电动飞机

2009年6月8日,意大利 SkySpark 公司研发的纯电动飞机 Alpi 300(图 1.3)进行了首次试飞。在6月10日意大利都灵举办的“2009年世界航空运动会”上,Alpi 300 创下了 250km/h 的飞行速度记录。这架 Alpi 300 型的双座轻型飞机,由一个 75kW 的电动机驱动,使用了无刷技术和锂聚合物电池,飞机上的电子控制系统能够调节转速和扭矩,使其动力达到了往复式发动机也无法实现的效果。

2010年12月,由法国研制成功的双引擎飞机 CriCri(图 1.4)创下了 261km/h 的飞行速度记录,刷新了之前电动飞机的最高飞行记录。



图 1.3 Alpi 300 电动飞机

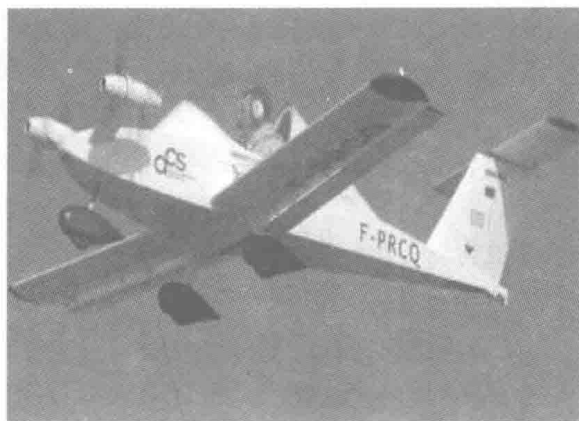


图 1.4 CriCri 电动飞机

2011 年 CAFE 绿色飞行挑战赛上,美国 Pipistrel 公司研制的电动飞机 Taurus G4(图 1.5) 夺魁并获得美国航天航空局(NASA)颁发的 135 万美元奖金,创下航空史上奖金数额之最,这也意味着绿色电动航空将揭开崭新的一页。据悉,Taurus G4 拥有两个独立机舱,机身由轻巧的碳纤维合金制成,分置于中央螺旋桨两侧,可同时搭载四名乘客;由锂聚合物蓄电池提供的强大动力足可完成 300 英里<sup>①</sup>的行程,因而被视为史上最强大的电动飞机。Taurus G4 电动飞机规格参数:双机身设计、超轻型结构;翼展长 75 英尺<sup>②</sup>;螺旋桨宽 6.5 英尺;动力为 450 磅<sup>③</sup>锂聚合物蓄电池。该飞机采用内燃机与电动机混合动力驱动,极大地降低了飞机耗油量。

2012 年 7 月,美国全电动飞机 Long-ESA(图 1.6)试飞成功,并以平飞状态 326km/h 的速度打破此前电动飞机的飞行纪录,成为目前最快的全电动飞机。但该电动飞机的主推进无刷电动机采用液体冷却方式,不利于提高电动机的功率密度和转矩密度。



图 1.5 Taurus G4 电动飞机

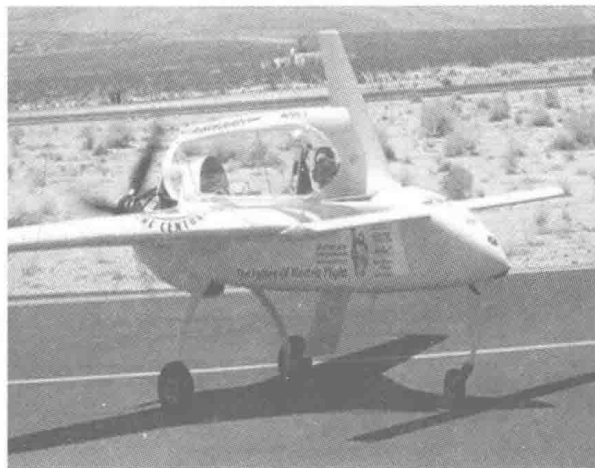


图 1.6 Long-ESA 电动飞机

2013 年 4 月 16~18 日,美国海军研究实验室(NRL)研制的“离子虎”(Ion Tiger)燃料

① 1 英里=1.6km。  
 ② 1 英尺=0.3048m。  
 ③ 1 磅=0.4536kg。

电池动力电动飞机成功进行了首飞。此次试飞中,“离子虎”电动飞机使用液氢燃料作为主推进源,连续飞行了 48h 多,成为续航能力较强的电动飞机。

在我国,通用航空飞机的研究尚属起步阶段,电动飞机的研制更未见相关报道。不过随着低空领域的开放和国家政策的鼓励,国内相关院校和科研机构逐步将研究重点转移到电动飞机研制上,而电动飞机作为通用飞机的发展热点方向之一,随着研究水平提高,型号和种类会越来越多,市场也越来越广阔。

## 2. 主推进电动机研究现状

在通用航空领域,主推进电动机在电动飞机动力系统研制中处于核心位置,由于电动飞机工况的特殊性,要求主推进电动机具有重量轻、功率大、转矩大、效率高、过载能力强和可靠性高等诸多特点。

电动飞机最早采用有刷直流电动机作为推进源,随着新型材料、电力电子器件以及电动机控制理论等技术的不断发展,交流感应电动机、开关磁阻电动机、无刷直流电动机和永磁同步电动机逐渐显示出优越性,在电动飞机领域中应用的越来越广泛,各类型电动机性能对比如表 1.1 所列。

表 1.1 主推进电动机性能对比

项目	直流电动机	交流感应电动机	开关磁阻电动机	无刷直流电动机	永磁同步电动机
转速范围/(r/min)	4000~6000	12000~20000	2000~8000	50~10000	50~10000
功率及转矩密度	低	中	高	高	较高
过载能力/%	200	300~500	300	300~500	300~500
转矩脉动	较小	较小	较大	较大	较小
效率/%	80~87	80~90	78~86	85~95	85~97
电动机重量	重	中	轻	轻	轻
功率因数	—	<0.85	<0.94	>0.92	>0.95
尺寸大小	大	中	小	小	小
结构强度	差	好	一般	好	优良
控制性能	较好	好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	高	高

### 1) 直流电动机

直流电动机具有频繁启停、控制简单、调速方便、起动时加速驱动力大和技术成熟等优点,已广泛应用于航空航天领域,但电动机存在效率较低,体积及重量较大,机械特性软,过载能力不高,长期运行后碳刷与机械换向器易损坏,寿命较短等缺点,这使得直流电动机作为主推进电动机容错能力将极大降低,不适合作为电动飞机主动力源。

### 2) 交流感应电动机

交流感应电动机又称异步电动机,具有结构牢固、易于冷却和使用寿命长等优点,效率和功率密度均比直流电动机高,功率密度或转矩密度比直流电动机增加一倍,可矢量控制或直接转矩控制以实现无级变速,传动效率大为提高,但存在起动电流大、过载能力差等问题,可广泛应用于电动客车、石油和矿山领域。

### 3) 开关磁阻电动机

开关磁阻电动机于 1970 年首先由英国 Leeds 大学步进电动机研究小组研制成功。

电动机结构坚固、制造工艺简单、散热效果好、成本低,能够四象限运行,具有较强的再生制动能力,调速系统运行性能较普通交流调速系统好。但开关磁阻电动机固有的转矩波动,可能导致较大的噪声和振动,限制其作为电动飞机主推进源。

#### 4) 无刷直流电动机

无刷直流电动机是一种高性能的电动机,采用电力电子器件换向,解决了机械换向器的弊端。无刷直流电动机可采用脉冲宽度调制控制,即具有交流感应电动机结构简单、运行可靠、维护方便等优点,又具备运行效率高、输出转矩大和控制器简单等特点,但成本高、散热要求高,存在转矩波动弊端,在国外电动飞机上有一定的应用。

#### 5) 永磁同步电动机

永磁同步电动机励磁磁场在定子相绕组中感应出的电动势为正弦波,采用矢量控制可以实现宽范围恒功率弱磁调速,具有噪声低、转矩密度高、功率密度大、脉动转矩小、控制精度高、过载能力强等特点,十分适合作为电动飞机的推进系统。

在结构上看,永磁电动机可分为表贴式永磁电动机和内置式永磁电动机。表贴式永磁电动机的永磁体通常呈瓦片形,并位于转子铁芯外表面上,其特点是直、交轴电抗相等,存在转矩波动的弊端。而内置式永磁电动机的永磁体位于转子内部,永磁体外表面与定子铁芯内圆之间有铁磁极靴,可保护永磁体。其直、交轴的电感不等,使得电动机永磁转矩能够叠加磁阻转矩,利于提高电动机过载能力、功率密度和转矩密度。由于电驱动电动飞机要求主推进电动机体积和重量轻、失步转矩倍数强且效率高,与表贴式永磁电动机相比内置式永磁电动机更适合作为电驱动电动飞机的主推进源。

大量理论研究和工程实践中,研究人员强调更多的是电动机的功率密度。电动机的功率密度虽然较高,但这是靠提高电动机转速实现的,电动机的输出转矩并不高,这在要求输出力矩较大、重量较轻的场合非常不利。相同功率、不同转速时,低速电动机体积大,重量重;高速电动机体积小、重量轻,但输出转矩小。而电动飞机主驱动永磁电动机更注重的是力能密度,力能密度的计算如式(1.1)所示。力能密度可划分为3个区间,即低力能密度、高力能密度和超高力能密度,如图1.7所示。对于应用在电动飞机上的主驱动电动机,要求具备非常高的力能密度,以降低电动飞机重量,增加续航能力以及扩大续航范围。

$$\rho = \frac{P \cdot T}{G^2} \quad (1.1)$$

式中: $\rho$ 为力能密度; $P$ 为电动机功率; $T$ 为电动机转矩; $G$ 为电动机总质量(包括冷却系统)。

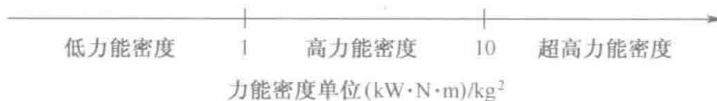


图 1.7 力能密度划分区间

国外电动飞机(图1.1~图1.6)采用有刷直流电动机或者永磁无刷直流电动机作为主推进源,效率最高达92%,最高巡航能力已达326km/h,最大功率已达190kW。但作为电动飞机主推进源,采用有刷直流电动机效率较低,换向器和电刷的存在使得电动飞机安全性下降,而采用无刷直流电动机作为主推进源存在转矩脉动等缺点。国外大多数电动

飞机主驱动电动机带有齿轮箱或者采用液体冷却,不利于电动飞机力能密度的提高。

目前,电动飞机主驱动电动机正朝着直驱空冷高效高力能密度永磁同步电动机方向发展。图 1.8 所示为法国 Electraviva 公司生产的 CriCri 电动飞机的主推进电动机 E-MOTOR,功率为 16.5kW,轴输出转矩为 32N·m,电动机质量为 12kg,力能密度达到 3.67(kW·N·m)/kg<sup>2</sup>(如果加上 2kg 变速箱,则力能密度减为 2.69(kW·N·m)/kg<sup>2</sup>)。作为电动飞机的主驱动,力能密度决定电动飞机主驱动电动机性能。相比普通电动机,永磁电动机力能密度高得多,这一特性使得永磁电动机在电动飞机驱动领域有了较大的发展。

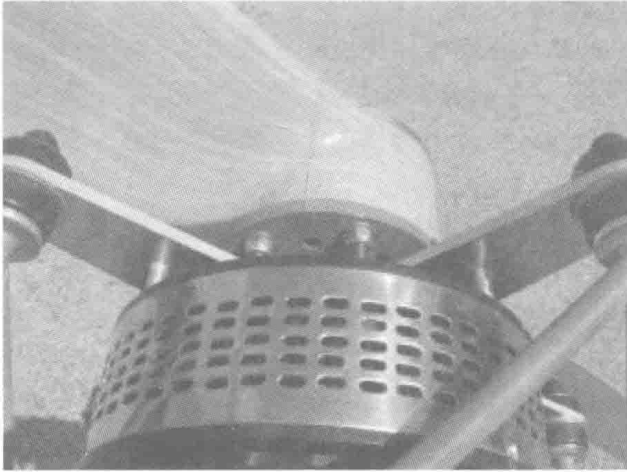


图 1.8 CriCri 电动机

国内力能密度较高的电动机主要应用在电动汽车领域,很少应用于在航空领域。180WD-M12030 型号永磁电动机已成功应用在旅游观光车上,该电动机额定功率为 3.5kW,运行转速为 3000r/min,质量为 18.2kg,峰值扭矩为 36N·m,力能密度仅为 0.38(kW·N·m)/kg<sup>2</sup>。

电动飞机上的主驱动电动机工作于强风冷环境中,且采用开启式结构,可极大降低冷却系统的重量,提高电动飞机的飞行效率。主驱动电动机所处飞行工况比较复杂,分为地面滑跑、起飞爬升、巡航、降落和着陆 5 个阶段。在各工况中,爬升阶段时电动机保持最大功率密度和转矩密度运行,虽然此阶段主推进系统载荷高,但是持续时间很短,可以提高此阶段电动机工作负荷。主驱动电动机冷却方式为强迫空气冷却,利用这种工作环境特点,将其设计成开启式结构,以提高通风散热效果与电动机力能密度。

### 1.2.2 主驱动电动机关键技术研究现状

与电动飞机主推进电动机相关的关键技术包括:电磁性能分析、电磁设计以及铁芯损耗计算研究;温度场计算与热负荷设计研究;机械强度与振动问题研究。

沈阳工业大学特种电动机研究所唐任远教授编著的《现代永磁电动机理论与设计》一书中,采用以等效磁路解析求解为主,结合磁场数值计算的方法对各种永磁电动机的原理、结构、设计进行了研究,总结了近年来永磁电动机的研究成果。先利用等效磁路法电动机设计软件进行电磁核算,其求解速度快,然后应用参数化分析技术对电动机进行优化设计。

电磁方面的研究成果如下:

(1) H. N. Phyu 提出采用场路耦合时步有限元法分析高速永磁同步电动机的不同磁场对非线性电场的影响,发现磁化取向直接影响电动机效率、振动以及转矩脉动,这为永磁同步电动机磁场分析提供了新的研究方法。

(2) Zhu Z. Q. 利用集总参数场路结合法建立了 FSPM 的模型,分析了定转子磁极宽度和转子裂比对 FSPM 转矩性能影响,得出 12/13 和 12/14 定转子极数配合下电磁转矩比 12/10 提高 10%,并通过试验进行有效验证。之后又提出了一种 E 形绕组结构磁阻电动机,一定程度上提高了转矩密度,可应用于电动汽车或混合动力汽车,但如何从根本上提高 FSPM 的转矩密度,并没有进行理论推导。

(3) Seungchan Park 采用场路耦合时步有限元法分析了永磁无刷直流电动机的运行性能,计算了一台外转子无刷直流电动机电流变化规律,所分析模型中考虑了外转子实芯钢中的涡流,但没有考虑功率管交替导通时绕级换流过程和绕组连接中点电位变化问题,模型不够完善。

(4) 利用解析法对永磁同步电动机的空载磁场、电枢磁场、负载磁场以及损耗进行研究取得重大成果,但解析法不能应对复杂的电动机结构,不能有效处理磁场饱和。

(5) 采用有限元法求解高速永磁电动机端部区域电磁场,计算空载及额定负载状态下端部区域磁密分布,可定量分析气隙磁密在端部区域变化情况,对分析电动机端面附近区域的转子护套、气隙、定子齿顶及定子轭部磁密径向分量和轴向分量有一定帮助。R. Islam 等基于永磁同步磁阻电动机结构及工作原理,采用有限元法分析结构参数对主要电磁参数的影响,已经证明了永磁含有率(永磁体厚度与铁芯厚度的比值)和气隙直接影响电动机转矩密度,它们对磁阻特性的影响远远大于对转子永磁磁链的影响。研究人员对 SR-PM 电动机进行了初步研究,对于如何更好地设计、仿真和驱动控制 SR-PM 电动机以提高力能密度,还有许多工作要做。

(6) 针对时步有限元法求解永磁无刷直流电动机的不足,刘瑞芳等通过把单流和换流模式下的等效电路引入场路耦合时步有限元法中,合理地考虑了续流二极管的作用,给出了改进后的分析模型,并对求解三相六状态永磁无刷直流电动机的数值方法进行了详细分析。

(7) 张凤阁等研究特殊结构下新型外永磁转子爪极电动机,在对电动机结构、材料、特点和运行机理分析基础上推导了转矩密度和齿槽转矩的计算公式,从理论上分析出这种类型电动机转矩密度和齿槽转矩比常规交流电动机高的本质。

(8) 在体积一定的情况下,转矩密度随极数的增加而增加,但电动机齿槽转矩很大,需要进一步研究抑制齿槽转矩的方法。Zhao Fei 等对于双重 U 形绕组定子结构的两极永磁同步电动机,通过 90°电角度和两相励磁电流 90°漂移新型电动机的齿槽转矩被削弱,采用三维有限元法分析了新型电动机的反电势,齿槽转矩和电磁转矩,但该方法只局限在两相电动机面,对三相永磁电动机并不适用。

(9) 王凤翔对于额定转速 60000r/min 的高速永磁电动机高速电动机铁耗的分析与计算,通过实测有取向电工钢片不同频率和不同轧制方向的铁芯损耗,对试验数据进行回归分析得出了铁耗计算模型中磁滞和涡流损耗系数,并考虑旋转磁场及谐波磁场分量的影响得出了高速电动机的铁芯损耗。

(10) Liang Yanping 等基于场路耦合时步有限元法研究了 710kW 高压感应电动机的铁耗,并考虑交替和旋转磁场,建立了 Bertotti 铁耗模型,为电动机损耗分布的计算提供了一定的参考。

电动机温度场一直是研究的热点问题,国内外许多学者在电动机温度场方面做了大量研究。主要成果如下:

(1) 程树康采用热网络法以及有限元法计算了风冷以及水冷感应电动机的温度场,并对比了两种方法的计算结果,同时计算了冷却槽的结构以及冷却介质对温度场的影响。

(2) 李伟力和陈伟杰等采用有限体积法计算了三维冷却介质流动时电动机及冷却介质的温度。用有限体积法对 5000kW 主泵屏蔽电动机端部齿压板和锥形环的温升进行了数值计算,找到了工厂试验过程中电动机端部温升过高的原因。

(3) 丁树业等结合电磁场分析结果,通过改进齿压板结构,采用有限体积元法计算了发电机定子径向通风沟内二维流体场,进一步采用有限元法计算了定子三维温度场。综合运用电磁场、流场、温度场数值的求解方法,考虑 3 种场之间的相互影响,对其线棒附加损耗及发热情况进行了计算分析。

(4) 戈宝军等采用流体相似理论和三维有限元法计算了异步电动机定子三维温度场,并根据通风道内流体流速求出了散热系数,同时计算了冷却气体以不同的人射角度时定子温度的分布。

(5) 崔淑梅等建立了空心脉冲电动机的温度场有限元模型,对绕组和气隙进行了合理的等效简化,提出了一种计算电动机内空气温度的迭代算法。

(6) 王凤翔等根据高速永磁电动机通风系统内流体流动和传热的特点,建立了定子轴向通风系统三维流体场数学模型,基于 CFD 流体计算软件 Fluent 对高速永磁电动机的定子温升进行了计算和分析。

(7) 郭伟等详细研究了发电机正常运行时转子周期性温度分布情况。对气隙斜流冷却方式的氢内冷汽轮发电机局部风路堵塞时的转子温度分布进行了分析。综合考虑通风系统特殊性和电动机发热计算,采用 Ansys 软件进行了有限元分析,得出了计算定子温度场的简化模型,对灯泡贯流式水轮发电机的定子三维温度场进行了数值模拟。

(8) 罗应力等在充分考虑谐波磁场与电流的情况下,利用时步有限元方法对电动机各部分损耗密度进行了准确计算,得到了不同电压及负载条件下的定、转子铜耗与铁耗。

(9) 丁树业等采用有限体积法对三维流体场和温度场控制方程进行耦合计算,对 3MW 发(电)动机内部的流体流动性能、传热特性以及发(电)动机定、转子铁芯、定转子绕组以及绝缘的温升分布进行了分析。

(10) 丁树业等建立了包含形状复杂的散热翅及接线盒等结构部件的三维流动与传热的物理模型。应用有限体积法,对变频供电情况下的永磁同步驱动电动机内各部件温升及流体流动进行了数值求解,并着重分析了电动机内主要结构部件的温升空间分布特性。

(11) 陆义萍等基于有限体积法对 110MW 空内冷汽轮发(电)动机转子轴向通风道内旋转湍流流场进行了数值模拟,分析了各部分通风段内的空气速度、流量分布特性,以及通风道结构尺寸对转子各通风道风量分配的影响。

(12) 李伟力等基于有限体积法对 250MW 大型水轮发(电)动机转子侧流体场与温



度场进行了研究,分析了磁极间隙内流体流动形态对励磁绕组温度分布的影响和不同入口流量对磁极间隙内流体速度分布的影响,以及在转子磁极间增加挡风结构对冷却效果的改善作用。

(13) 李伟力等采用有限体积法对采取不同铁芯厚度、风沟尺寸及数量通风结构下 200MW 空冷汽轮发电机的流体场、温度场进行了数值仿真,对不同结构下风沟内空气流速、定子铁芯及股线的温度分布进行了对比分析。

科研人员所做的上述工作大都将重点放在电动机温度场计算上,主要针对发(电)动机定子、转子、冷却介质或者绝缘单独进行热性能分析,而忽略了热量传递过程中的整体连续性。温度场分析主要针对温度场计算方法及损耗计算或散热系数确定,而对电磁场、流体场及温度场的耦合场对电动机热负荷特性的影响研究的非常少。

在电动机强度方面,早在 20 世纪 40 年代,各国的学者曾对感应电动机、同步电动机和直流电动机的强度、振动和噪声进行过许多研究,近年来关于永磁电动机机械强度与振动理论研究成果如下:

(1) H. K. Jung 等研究了 42V 一体化永磁发(电)动机不同转子的强度分析,并采用 AT-MGPSO 算法研究了转子不同位置及角度隔磁桥对机械应力的影响。

(2) 高阳等对应用于涡轮压缩机上最高转速超过 100000r/min 的高频永磁同步电动机,在有限元基础上研究了转子的固有频率,并给出了相应求解方法。

(3) 黄守道等给出降低混合动力电动汽车上的内置式永磁同步电动机转子铁芯机械压力的方法,综合考虑机械和电磁特性,利用有限元分析仿真和设计方法以及动态速度剖面耐久性试验,分析了电动机转子强度。

(4) 刘建林等研究了表贴式和内置式永磁电动机的机械强度问题,建立了护套过盈量与最高转速的关系模型,采用接触有限元法和等效环法对应力进行了分析,提出了设计转子结构必须综合考虑过盈配合、转子热膨胀和离心力。

(5) 陈远扬等根据高速永磁电动机的设计特点,重点论述了永磁材料和转子结构形式的选取、主要尺寸的确定与转子强度的分析和计算方法。

(6) 王华秋等对时序数据建模与辨识技术进行了分析,建立了自回归移动平均(AR-MA)时序预测模型,通过对 LS-SVM 模型加入鲁棒性和时序性约束条件,研究了基于鲁棒最小二乘支持向量机的电动机振动故障诊断方法。

(7) 王珂等基于磁-固耦合法对异步电动机振动进行了研究,利用有限元软件将异步电动机的变电磁力进行了频谱分析并校正,通过优化电动机定、转子齿槽数降低了电动机的电磁振动。

(8) 李文等研究了变频器驱动异步电动机振动频谱特征,在驱动过程中,由于高阶振动谐波转矩等因素,使得异步电动机振动特征更加复杂,振动频谱特征分析为振动抑制算法的设计提供了一定的参考。

诸多科研人员在电动机电磁场、温度场和机械场 3 个方面的取得了许多成果,但是对应用于电动飞机主驱动高力能密度电动机的研究较少,本书将重点对电动飞机主驱动电动机进行电磁分析和设计,进行温度场及机械结构分析,进行热负荷设计。