

## 多电发动机技术及其应用前景研究

孙立业<sup>1</sup> 郝羿飞<sup>2</sup> 赵奉同<sup>3</sup>

(1. 中国航发沈阳发动机研究所 预研总体部, 沈阳 110015; 2. 沈阳市第二中学, 沈阳 110016;  
3. 沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院), 沈阳 110136)

**摘要:** 介绍了多电发动机的特点和优势, 综合研究了多电发动机技术现状和发展趋势。以未来应用为目标, 从发动机设计角度分析了应用多电技术的关键问题, 详细阐述了磁浮轴承和内置式起动发电机的关键技术研究方向, 并提出了利用成熟发动机为平台进行多电技术验证以促进技术成熟的思路, 为技术预研提供参考。

**关键词:** 多电发动机; 磁浮轴承; 内置式起动发电机; 关键技术

**中图分类号:** V235 **文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.2095-1248.2017.02.001

## More electric engine technology and its application prospect

SUN Li-ye<sup>1</sup> HAO Yi-fei<sup>2</sup> ZHAO Feng-tong<sup>3</sup>

(1. Department of Advanced Research and Development, AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Shenyang No. 2 High School, Shenyang 110016, China; 3. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The features and advantages of more electric engine were reviewed. The technical status and development trends of more electric engine were summarized. Targeting the future, the key problems on more electric technology applications are analyzed from the view of engine design. The research directions for key technologies of magnetic bearing and internal starter/generator are presented. Mature engines are utilized to demonstrate more electric technology to promote technological maturity, which is mentioned as a development idea. This paper provides reference for technical research.

**Key words:** more electric engine; magnetic bearing; internal starter/generator; key technology

全电飞机是一种以电气系统取代液压、气动和机械系统的飞机, 即所有的次级功率均以电的形式传输、分配, 如果电气系统部分取代次级功率系统, 就形成了多电飞机。多电飞机有很多优点, 包括提高了可靠性和维修性, 降低了使用和维护费用等<sup>[1-2]</sup>, 如果是军用作战飞机, 兆瓦级电力获取可用于装备大功率定向能武器<sup>[3-4]</sup>, 作战中将

获得巨大优势。由于飞机飞行和次级功率系统所需的动力(或功率)均来自发动机, 由此联想到多电发动机的概念。一般来说, 发动机只要能提供给飞机足够的电力, 不管发动机本身是否取消了机械液压系统, 也不影响飞机实现多电或全电。当然如果发动机本身也实现了多电设计, 将极大提升发动机的可靠性、维修性和保障性, 大幅提高

收稿日期: 2016-10-28

作者简介: 孙立业(1976-), 男, 辽宁省辽阳人, 高级工程师, 主要研究方向: 发动机总体设计, E-mail: sly7612@163.com。

发动机的综合性能。

## 1 多电发动机特点与潜在收益

### 1.1 多电发动机特点

所谓多电发动机,其主要技术特征是在航空发动机上用磁浮轴承(又叫电磁轴承或磁力轴承)取代传统的滚动轴承,用集成在发动机主轴上的起动发电机给发动机和飞机提供所需的电,并用全部电气化的传动附件取代机械、液压传动附件<sup>[5]</sup>。同时,发动机的控制系统也将由集中式全权限数字电子控制系统改为分布式控制系统。

多电发动机由于采用磁浮轴承和全电气化传动,可取消发动机原有的齿轮传动和外部附件齿轮箱及润滑系统,还可以省去复杂的轴承腔、迷宫式封严等结构。磁浮轴承在不工作或发生故障时(如电力失效),发动机转子无法处于悬浮状态,所以需要加装轻重量的辅助轴承(也叫备份轴承或保护轴承),以保证对转子的支承,保护磁浮轴承系统不受损坏。

固定在发动机轴上的一体化起动发电机是集起动机和发电机功能于一体的电机。它利用电机可逆原理,在发动机稳定工作前作为电起动机工作,带动发动机转子到一定转速后,发动机燃油点火并逐步进入稳定工作状态;此后,发动机反过来带动电机,使其成为发电机,向飞机和发动机用电设备供电。

### 1.2 应用多电技术的潜在优势

在发动机上应用多电技术有很多好处<sup>[6-8]</sup>,具体来说,包括以下方面。

(1) 多电发动机采用内置式一体化起动发电机,可取消中央传动和齿轮箱,减轻发动机的重量,减小迎风面积;发动机轴上提取的电功率可以为多电飞机的系统提供电力,还能为机载高能束武器提供能源;所产生的电功率可以考虑由两根以上的发动机轴分担,可以重新优化燃气发生器,有利于控制喘振和扩大空中点火包线,改善发动机适用性。

(2) 采用电气传动,附件可分散布置,从而减少发动机迎风面积;同时,相比机械(液压、气压)传动结构,电传动会减少零件数。

(3) 多电发动机由于采用非接触式的磁浮轴

承,可取消传统的润滑系统和轴承腔密封装置,减轻发动机的重量,降低复杂性,提高可靠性;而且可免除滑油带来的着火危险,维修性更好,安全性更高。

(4) 通过对磁浮轴承的控制可以对发动机转子进行振动主动控制和叶尖间隙控制,同时可进行状态监控,不仅可提高发动机效率和降低燃油消耗量,而且可靠性更高。

(5) 控制系统采用分布式控制技术,可以降低发动机控制系统的复杂性,减轻重量,提高可靠性,改善故障隔离特性,减少寿命期成本。

## 2 多电技术研究现状

实现多电技术在发动机上的应用,需要解决很多的技术问题,其中,磁浮轴承和内置式起动发电机是实现多电发动机最主要的两大关键,两者技术方案的选取、尺寸、重量、冷却设计等方面与发动机其它部件和系统的设计密切相关。

### 2.1 磁浮轴承技术的发展

磁浮轴承是一种全新的支承形式,它借助于永久磁铁或电磁铁产生的磁力使转子悬浮,并在控制器的控制下克服外载荷的作用使转子围绕其惯性中心旋转。它可以是径向的,也可以是轴向的,一个完整的磁浮轴承系统通常包括两个径向轴承和一个轴向轴承及其控制系统。每个径向轴承控制两个自由度,每个轴向轴承控制一个自由度,一套磁浮轴承系统控制转子的5个自由度。因磁浮轴承具有无接触、无摩擦、无磨损、无振动、无噪音、不需要润滑和密封等一系列优点,在能源交通、超高速精密加工、航空航天、机器人等高科技领域拥有广阔的应用前景。

对磁浮轴承的研究在150年前就已开始,从20世纪70年代以来,逐步在机床、涡轮机械等方面得到应用。将磁浮轴承用于航空发动机的研究始于20世纪90年代初,为促进技术成熟,欧美国家持续开展了技术研究和验证工作。1994年,美国普惠公司利用XTC-65核心机进行了100小时的磁浮轴承地面试验<sup>[9]</sup>,在后续研究中GE和普惠公司均开展了深入工作。1998年4月,欧洲启动了航空发动机用主动磁浮轴承计划(AM-BIT),目的是开发主动磁浮轴承和辅助轴承技

术,预测它们的性能,并确定它们在高温和高动态载荷条件下的工作极限,最后在试验台上验证了所获得的技术。由于 AMBIT 计划进展顺利,2002 年 1 月,欧洲启动了灵巧航空发动机用磁浮轴承计划(MAGFLY)。该计划为期 42 个月,参与该计划的包括航空发动机公司、轴承公司、大学和软件公司在内的 10 家机构。我国对磁浮轴承技术研究的力量主要集中在高校,技术层面基本上也接近了产品应用的水平。由于发动机上高温、高载荷、尺寸小、重量轻等多方面的严酷要求,预计磁浮轴承在航空发动机的成功应用至少还需 10 年以上的時間。

## 2.2 内置式起动发电机技术的验证

寻求一种高功率密度、适应发动机工作环境的起动发电机是研制多电发动机的关键之一,开关磁阻电机和双凸极电机两种方案先后被提出。三十多年来,人们对采用开关磁阻电机作为起动发电机的可行性开展了很多的研究,利用现有发动机平台,开展技术验证。1986 年,美国空军与 GE 公司签订合同论证“未来飞机发动机高温、轻量化开关磁阻起动发电机”,拉开了对多/全电飞机用开关磁阻起动发电机的研究序幕。1995 年,GE 公司根据美国空军的合同完成了在 F110-129 发动机上改装内置式起动发电机的初步设计<sup>[10-11]</sup>,对发动机原来的结构没有作大的改动,在 2 号和 3 号轴承之间的压气机轴上安装内置式起动发电机,发电功率为 375kW。普惠加拿大公司开展了多电发动机的技术研究,利用 JT15D 发动机,取消其附件齿轮箱及传动系统,在原先中央传动系统及斜齿轮啮合的位置安装了一个内置式起动发电机,开展内置式起动发电机的技术验证<sup>[12]</sup>。

20 世纪 90 年代初,美国威斯康星大学的 Li-po 教授提出了双凸极电机方案,双凸极电机具有开关磁阻电机的优点,功率密度进一步提高,很有发展潜力<sup>[13-14]</sup>。我国高校也开展了比较深入的技术研究。相对于开关磁阻电机而言,双凸极电机的技术成熟度要低些。

## 2.3 磁浮轴承和内置式起动发电机技术的综合研究及验证

磁浮轴承和内置式起动发电机在航空发动机上的应用研究分别取得了一定的进展以后,美国

和欧盟分别在 2000 年后开展了规模更大的技术预研。

在 2000 年,美国 GE 公司和艾利逊公司在 IHPTET 计划第 3 阶段的 XTC77/1 核心机验证机上联合验证了高温主动径向磁浮轴承、辅助轴承以及内置式起动发电机技术。2003 年美国开始实施通用经济可承受先进涡轮发动机(VAATE)计划,在智能发动机领域中,开展了内置式起动发电机和磁浮轴承进一步的技术验证。

2002 年 2 月到 2005 年 12 月,欧盟实施了电力优化飞机(POA)技术验证计划,英国罗罗公司以大型涡扇发动机为平台,开发验证多电技术<sup>[15]</sup>。2006 年 6 月,欧盟启动了更开放的电力技术(MOET)研究计划,罗罗公司进一步开展多电技术的研究和技术验证。2009~2014 年,欧盟实施清洁天空(CLEANSKY)研究计划,多电技术作为部件级技术列入多种发动机方案中,继续进行研究和验证。

## 3 应用多电技术的关键问题分析

### (1) 载荷与尺寸的问题

内置式起动发电机要实现内置,必须要有足够高的功率密度。以开关磁阻电机为例,根据经验关系式<sup>[16]</sup>  $D_a^2 l_\delta = \frac{6.1}{B_\delta A} \times \frac{k_i}{k_m} \times \frac{P_{em}}{n}$ ,其中  $D_a$  是转子外径,  $l_\delta$  是电枢计算长度,  $B_\delta$  是电机的磁负荷,  $A$  是电机的电负荷,  $k_m$  是方波电流系数,  $k_i$  是绕组电流系数,  $P_{em}$  是电磁功率,  $n$  是电机转速,可知电机功率与转子转速、电机的磁负荷和电负荷、电机轴向长度、电机转子直径的平方成正比。若想减小电机体积,减轻重量,提高功重比,就要提高转速和电机的磁负荷和电负荷水平。如果传统发动机中央传动系统所占的空间改由放置内置式起动发电机,以目前磁材料和技术水平所设计的开关磁阻电机,其发出的功率大约为传统中央传动系统传递功率的一半左右,距离发动机和飞机正常工作的功率需求有很大差距。

磁浮轴承若要在发动机上应用,必须要有足够高的单位体积承载力。以径向磁浮轴承为例,根据承载力计算公式<sup>[17]</sup>  $F = \frac{\lambda^2 \mu_0 J^2}{4x^2} A A_{cu}^2 \cos \alpha$ ,

其中  $x$  是定子与转子间气隙的长度,  $\lambda$  是线圈绕组的占空系数,  $\mu_0$  是空气磁导率,  $J$  是线圈绕组的电流密度,  $\alpha$  是每极所占圆周的半角度数,  $A$  是磁极面积,  $A_{cu}$  是定子线圈腔的横截面积, 可知承载力与线圈绕组占空系数的平方、线圈绕组的电流密度的平方、定子线圈腔横截面积的平方以及磁极面积成正比, 与定子、转子间气隙长度的平方成反比。其中, 占空系数与线圈绕线方式、绝缘要求有关; 电流密度主要由线圈的绝缘等级和冷却条件决定, 绝缘等级越高, 冷却条件越好, 允许的电流密度越大; 增大磁极面积或线圈腔横截面积均能增加磁浮轴承的承载能力, 但在一定的体积下, 这两个面积是此增彼减的关系, 并且线圈腔面积受到磁材料磁饱和强度的限制。从承载能力方面考虑, 定子与转子间的气隙小有利于提高单位体积的承载力, 但气隙设计受到加工、装配、成本、控制系统性能等多种因素制约。以目前磁材料和技术水平所设计的磁浮轴承, 若按满足发动机轴承的轴向和径向载荷要求, 尺寸会大大地超出轴承腔的尺寸限制, 距离发动机应用需求有极大差距。

#### (2) 磁浮轴承和辅助轴承的载荷分配问题

由于磁浮轴承的承载能力有限, 即便未来技术进一步发展, 若让发动机在各种工况下的转子载荷都由磁浮轴承来承担也几乎是不可能的, 辅助轴承将在较大的机动飞行过载情况下共同承担转子轴向和径向载荷, 防止磁浮轴承转、定子碰撞; 同时, 在发动机发生喘振等特殊情况下, 辅助轴承将额外提供支承。由于没有高效的润滑和冷却, 相比有润滑系统润滑的传统轴承, 辅助轴承寿命受到严重影响。在发动机的一个寿命期内, 如何恰当地分配磁浮轴承和辅助轴承的设计载荷, 是设计必须解决的关键问题之一。

#### (3) 冷却设计的问题

磁浮轴承和内置式起动发电机在工作过程中均要产生很多的热量, 这也是多电技术得到应用所必须考虑的关键问题。磁浮轴承的发热主要由铜损耗和铁损耗两部分组成, 与铜损耗相比, 铁损耗相对小很多。因此, 发热计算主要考虑铜的发热损耗, 即电流在励磁线圈中的发热。磁浮轴承支承发动机转子, 对于高、低压转子的后支点来说, 由于在涡轮部件处, 工作环境温度是很高的, 并且受尺寸空间和冷却介质流量等方面限制, 难

以采用良好的冷却设计, 所以主要考虑提高磁浮轴承的耐受温度以及减少磁浮轴承的发热量。

工作环境所需, 内置式起动发电机一般需要能耐受  $200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  的温度, 由于导线不是由超导材料构成, 内置式起动发电机无论是在起动还是在发电状态均要产生不少的热量。由于功率高 (几百千瓦或更高), 表面冷却的效果不佳, 往往需考虑采用比较复杂的内部冷却。

#### (4) 转子重量与整机动力学的问题

发动机应用多电技术, 采用了磁浮轴承和内置式起动发电机, 与采用机械轴承的常规发动机转子相比, 多电发动机转子质量要大, 转子质心位置也发生变化; 另外, 磁浮轴承刚度比机械轴承刚度要低约一个数量级, 使得多电发动机转子振动特性与常规发动机有显著差异。为了保证发动机正常工作条件下振动可接受, 转子弯曲型临界转速距最大工作转速的裕度有一定的要求。对于磁浮轴承支承的转子, 由于支承刚度低, 一般来说转子弯曲型临界转速也会降低, 磁浮轴承依靠自身的控制系统对刚度和阻尼有一定的调节能力, 是否可打破传统的弯曲型临界转速距离最大工作转速的裕度限制, 这是一个值得深入研究的问题。

## 4 磁浮轴承和内置式起动发电机关键技术及研究方向

#### (1) 高温、高强、高饱和磁感应强度磁性材料

内置式起动发电机和磁浮轴承均需要软磁材料, 为满足在航空发动机上的应用, 软磁材料的性能需要进一步提高, 需要研制饱和磁感应强度  $2.5 \sim 3$  特斯拉 (甚至更高) 的软磁材料, 这是缩小起动发电机和磁浮轴承尺寸、重量的关键之一。

#### (2) 电磁线圈绝缘材料

现代的高温绕组绝缘材料有陶瓷、聚酰亚胺、聚酯和酚醛环氧树脂等。因磁浮轴承工作环境温度高, 导线绝缘材料需选用陶瓷, 陶瓷材料需要在性能不衰退的情况下能承受振动和不同工作状态环境温度变化的影响。

内置式起动发电机一般安装在高压转子压气机的一侧, 工作环境温度相对低些。但起动发电机本身要发热, 导线绝缘材料虽然不需要选用陶瓷材料, 但选用的非金属耐温材料需要在发动机

各工作状态下均能长时间稳定工作。

### (3) 非接触式高温位置传感器

磁浮轴承和起动发电机工作中均需要位置传感器随时监视轴的位置,传感器要求体积小、高温下稳定工作,并且从发动机起动到最大工作状态不同工况下均要保持精确测量能力。

### (4) 轻重量小型化功率电子设备

磁浮轴承功率放大器和起动发电机功率变换器均需要轻重量、大功率密度、有容错能力,它们安装在发动机上,要能在高载荷和较高的环境温度下可靠工作。

### (5) 轻重量分布式控制

磁浮轴承和起动发电机控制器安装在发动机上,除了适应发动机载荷和环境温度条件并具有容错能力外,还要结构紧凑、重量轻;同时与发动机控制系统一体化设计,采用分布式控制。

### (6) 内置式起动发电机冷却设计技术

起动发电机功率大,线圈导线目前并不是超导材料,另外软磁材料工作中也会发热,起动发电机总的发热量比较多,需要采用内部冷却的方案,把冷却介质通入空心导线以及电机定子内部将热量直接带走。

如果高温超导材料能取得巨大突破,并在电机上应用,将大大简化内置式起动发电机冷却设计。

### (7) 磁浮轴承转子动力学分析及优化技术

磁浮轴承支承转子,磁浮轴承的刚度和阻尼不仅取决于结构参数、平衡位置,还取决于控制功率,其中刚度是转子的位置和线圈电流的函数。所以,多电发动机转子动力学设计分析与磁浮轴承控制系统的设计密不可分,需要综合设计。

## 5 结论

(1) 多电发动机有良好的应用前景,需求是很明确的,但由于技术难度大,与工程应用尚有很大距离,关键技术方面除了磁浮轴承和内置式起动发电机以外,辅助轴承、电驱动燃油附件和执行机构、分布式控制系统等均需要开展大量的研究工作,逐步成熟。

(2) 以未来应用为目标,找准目前水平与产品应用之间的技术差距,利用成熟发动机或核心机作为技术验证平台,先进行多电特征部件功能

性验证,再开展高性能多电特征部件的全面技术验证,有利于技术加速成熟。

(3) 开展多电发动机关键技术预研,要紧密结合发动机的使用需求,从发动机设计的角度综合考虑问题,把握好技术研究方向,如内置式起动发电机的高功率密度、磁浮轴承的高单位体积承载力等。

## 参考文献(References):

- [1] CRONIN M J. The All-electric Airplane revisited. Aerospace Power System Technology [R]. 1988, SAE No. SP-758, Paper No. 881407: 9-27.
- [2] 朱新宇,彭卫东. 多电飞机及其技术应用[J]. 中国民航飞行学院学报, 2007, 18(6): 8-11.
- [3] 李开省. 多电飞机技术的发展[J]. 国际航空, 2009(1): 73-75.
- [4] NORRIS, 胡军. 美国的下一个军用发动机国家技术计划[J]. 国际航空, 2016(10): 79-79.
- [5] NEWMAN RICHARD. The More Electric Engine Concept [R]. World Aviation Congress, 2004, SAE2004-01-3128.
- [6] 徐龙祥,周波. 磁浮多电航空发动机的研究现状及关键技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 197-204.
- [7] 胡晓煜. 多电发动机技术发展初探[J]. 国际航空, 2003(7): 43-45.
- [8] 梁春华. 未来的航空涡扇发动机技术[J]. 航空发动机, 2005, 31(4): 54-58.
- [9] 姜晓莲,王斌. 浅谈未来航空发动机技术的发展[J]. 航空科学技术, 2010(2): 10-12.
- [10] RICHTER E, ANDERSON R E, SEVERT C. The integral starter/generator development progress [R]. SAE920967.
- [11] RICHTER E, ANSTEAD D H, BARTOS J W, et al. Preliminary design of an internal starter/generator for application in the F110-429 engine [R]. SAE951406.
- [12] BRAND J H, DOOLEY K A, DOWHAN M J, et al. More Electric Small Turbofan [R]. General Aviation Technology Conference & Exhibition, 2004, SAE 2004-01-1804.
- [13] 孟小利,严仰光. 双凸极永磁电机的发展及现状[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(3): 330-334.
- [14] 戴卫力,马长山,朱德明. 双凸极电机的结构设计与系统控制[M]. 机械工业出版社, 2012. 1.
- [15] 胡晓煜. 罗尔斯·罗伊斯公司引领未来多电发动机技术[J]. 中国民用航空, 2003(9): 60-62.
- [16] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 机械工业出版社, 2000.
- [17] 胡业发,周祖德,江征风. 磁浮轴承的基础理论与应用[M]. 机械工业出版社, 2006. 3.

(责任编辑: 陈素清 英文审校: 赵欢)