

文章编号: 1000-8055(2003)01-0051-09

磁浮多电航空发动机的研究现状 及关键技术

徐龙祥, 周 波

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 介绍了国际上磁浮多电发动机的研究现状、发展趋势及其核心关键技术如高温磁悬浮轴承、高温位移传感器、附件电传动技术、备用轴承和多电发动机的结构设计。介绍了美国的 IHPTET 计划中有关磁浮多电发动机的研制情况, IHPTET 计划和美国的德雷伯实验室(Draper Laboratory)、Synchrony 公司等多个单位进行了长期的合作, 共同研制该发动机的核心关键技术“高温磁悬浮轴承”; 从目前掌握的资料分析, IHPTET 计划中的磁浮多电发动机将采用 Synchrony 公司研制成功的“高温磁悬浮轴承”。1997 年底, 欧共体制定了类似的 AMBIT 研究计划, 期望率先研制出以磁悬浮轴承支撑的航空发动机, 参加该计划的有英国、德国、法国、奥地利和瑞士等 5 个国家。

关键词: 航空、航天推进系统; 多电发动机; 发动机; 磁悬浮轴承; 轴承

中图分类号: V 23; V 233. 6; V 233. 4⁺ 5

文献标识码: A

The Current Situation and Development Trend for More-Electric Gas Turbine Engines

XU Long-xiang, ZHOU Bo

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The current situation and development trend as well as key technologies such as high-temperature magnetic bearing, high-temperature displacement sensor, starter generator, and back-up bearing for more-electric gas turbine engines are reviewed. The information about this kind of aero-engine in IHPTET Project is also introduced. Draper Laboratory, Synchrony Company, as well as NASA Lewis Research Center have been cooperating on the IHPTET Project for years to develop the high-temperature magnetic bearing system, which is emphasized as the most important key technology for more-electric gas turbine engines. Based on the references available, it is most possible that the high-temperature magnetic bearing system developed by Synchrony Company will be used in IHPTET Project. By the end of 1997, a similar research project of AMBIT was drawn up in Europe Community. Britain, Germany, France, Austria, and Switzerland were involved in the AMBIT project.

Key words: aerospace propulsion; more-electric gas turbine engine; gas turbine engine; active magnetic bearing; bearing

收稿日期: 2001- 12- 17; **修订日期:** 2002- 05- 15

基金项目: 航空科学基金资助项目(99C52072)

作者简介: 徐龙祥(1959-), 男, 江西余江人, 南京航空航天大学机电学院教授, 博士, 主要从事磁悬浮轴承及其在航空领域应用研究。

1 引言

在 1988 年美国制定的 IHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology) 计划中, 其主要内容之一是研究以磁悬浮轴承支撑的多电或全电航空发动机, 1998 年在该计划的 10 年进展中称已经研制成功了能够满足上天要求的高温磁悬浮轴承系统。由于研制以磁悬浮轴承支承的航空发动机将会导致空中优势的变化和航空市场的重新分配, 经过紧急磋商后, 1997 年 12 月, 欧洲组成了一个由 5 个工业发达国家(英国、德国、法国、奥地利和瑞士)参加的联合舰队, 制定了 AMBIT (Active Magnetic Bearings in Aircraft Turbo-machinery) 研究计划, 专门研究以磁悬浮轴承支承的航空发动机。其目的就是要和美国争夺这个高技术领域的制高点, 期望率先研制出性能优良的新一代航空发动机, 抢占 21 世纪的航空市场, 保持欧洲的空中优势和安全。该计划从 1998 年 4 月正式启动, 具体由英国的帝国理工学院 (Imperial College) 负责, 参加单位有德国 Darmstadt 技术学院、德国 MTU 发动机公司、瑞士联邦技术学院 (ETH)、瑞士的磁悬浮轴承公司 (Mecos)、法国的 Tobomeca 发动机公司、奥地利的燃气轮机公司 (AEE) 共 7 个单位。

2 多电航空发动机的特点

2.1 磁浮多电航空发动机的描述

所谓磁浮多电航空发动机, 就是在航空发动机上用磁悬浮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源, 并用全部电气化传动附件取代机械式传动附件, 实现发动机和飞机的全电气化传动。国外将这种发动机称为多电发动机 (More-Electric Gas Turbine Engines), 也有的将其称之为全电发动机 (All-Electric Gas Turbine Engines)。下面是网站 www.grc.nasa.gov 对多电发动机的主要描述: “美国航天局 (NASA) 路易斯研究中心和美国军事研究实验室 (ARL) 相信, 商用多电发动机正在引起工业界的广泛关注。这种发动机的起动发电机集成在发动机的转子上并由磁悬浮轴承支撑。NASA 和 ARL 都把重点放在研究一种能够在未来航空发动机上应用的高温磁悬浮轴承。由于不需要润滑系统, 磁悬浮轴承可以提高多电发动机的可靠性并减轻其重量, 可以提高轴承的 DN 值并能够主动消除发动机的振

动。磁悬浮轴承在航空领域的应用, 将会导致一种高效率的多电发动机的诞生…”。

2.2 磁浮多电航空发动机的特点及意义

2.2.1 跟踪世界航空高科技发展前沿

国际上已将磁悬浮轴承列为 21 世纪先进航空发动机的关键高新技术之一。磁浮多电航空发动机不仅是美国 IHPTET 计划的主要内容之一, 而且是 1997 年 12 月欧共体制定的 AMBIT 研究计划的唯一目标。目前欧共体和美国投入了大量的资金, 期望占领这个航空高技术领域的制高点。

2.2.2 可减轻发动机的重量约 15%

由于采用磁悬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, 还可以省去结构复杂的轴承腔、腔密封装置和密封增压系统。美国 NASA 的研究结果表明, 可将发动机的重量减轻 15% 并提高 5% 的效率, 而且发动机的可靠性、维护性大大提高, 是未来高推重比发动机首选的动力传输方案。

2.2.3 显著提高轴承的工作温度

由于传统滚动轴承的温度极限只有 150°C 左右, 这不仅需要将轴承远离燃烧室或燃气涡轮, 而且需要设计充分的冷却系统对轴承进行冷却。由于磁悬浮轴承的工作温度可达 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$, 这不仅可以节省大量的冷却介质, 而且还可以将磁悬浮轴承尽量靠近燃烧室或燃气涡轮, 大大减小了发动机的轴向尺寸, 简化了发动机的结构, 提高了发动机的性能。

2.2.4 显著提高了轴承的 D_n 值

滚动轴承的 D_n 值一般都较小, 只有 $1.5\times 10^6\text{ r/mm/min}$ 左右, 这就限制了发动机转子轴颈处的线速度不能太大, 并导致转子动力学性能降低。磁悬浮轴承的 D_n 值一般可达滚动轴承的 3 倍, 从而可以采用较大的轴颈, 能够显著提高发动机的转子动力学性能。利于这一特点, 发动机的设计工程师们正在考虑是否可以将三轴发动机的内转子改由两个磁悬浮轴承来支承。

2.2.5 提高了发动机的安全性

滚动轴承一般都要用油润滑, 由于油和油雾的存在, 当发动机发生泄漏、零部件疲劳故障或联接件的失效时, 容易引起火灾事故。由于磁悬浮轴承不需要润滑, 从根本上杜绝了这种火灾事故的可能性。此外, 在传统的发动机上, 为了防止滚动轴承润滑油的泄漏, 往往采用迷宫密封装置。众所

周知, 迷宫密封装置会导致转子动力学的不稳定性, 采用磁悬浮轴承后这种由密封造成的不稳定性就消除了。

2.2.6 为大幅度提高发动机的整机性能提供了可能性

欧共体的 *AMBIT* 研究计划认为: 现代航空发动机的性能几乎已经达到了相当完美的程度, 要想进一步大幅度地提高航空发动机的性能, 就必须采用新型的零部件技术, 更新设计思想。*AMBIT* 计划认为, 以磁悬浮轴承支承的航空发动机的性能有可能得到大幅度的提高。

3 研究现状及核心关键技术

磁浮多电航空发动机的核心关键技术主要是高温磁悬浮轴承技术、附件电传动技术、发动机的结构设计、备用轴承、磁悬浮轴承与发动机控制系统的一体化控制等。

3.1 国际上高温磁悬浮轴承的研究概况

自从美国于 1992 年在“*Aeronautical Technologies for the Twenty First Century*”中将磁悬浮轴承列为 21 世纪先进航空发动机的关键技术以后, 各工业发达国家纷纷投入了大量的人力物

表 1 美国德雷伯实验室(Draper Laboratory)的研究工作^[1~5]
Table 1 The research work at Draper Laboratory, USA^[1~5]

应用对象	单轴发动机转子, 由两个径向磁悬浮轴承和一个轴向磁悬浮轴承支承	
磁浮轴承工作温度	510℃	
备用轴承类型	滚动轴承	
材 料	磁悬浮轴承转子叠片 磁悬浮轴承静子叠片 磁悬浮轴承励磁线圈	牌号为 Hiperco 50 HS 的钴铁软磁合金 牌号为 Hiperco 50 的钴铁软磁合金 高温陶瓷绝缘导线
最高转速	22000 r/min, $D_n=4.5\times10^6\text{ r}\cdot\text{mm}/\text{min}$, 轴颈直径 $D=\Phi205\text{ mm}$	
载荷	前轴承: 18700 N; 后轴承: 17000 N; 轴向轴承: 12000 N	
位移检测方法	用磁通传感器检测转子位移	
主要贡献	认为用来制造高温磁悬浮轴承的钴铁软磁合金的性能对热处理工艺很敏感, 并认为材料供应商提供的热处理工艺不能保证软磁材料在高温下的性能最优化; 对高温下的备用轴承进行了研究。	
结构设计(如图 1 所示)		

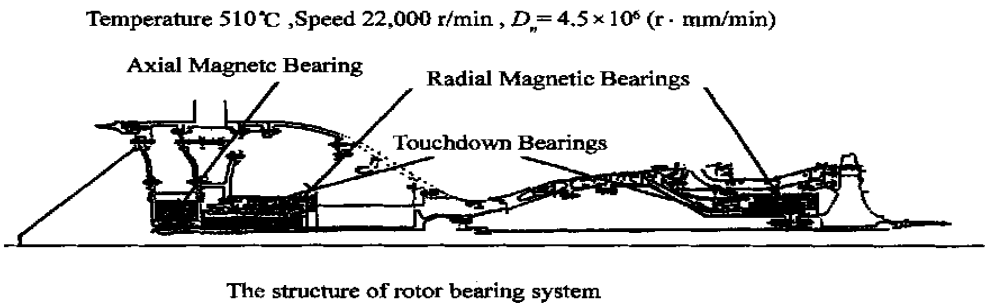


图 1 多电发动机的转子轴承结构示意图
Fig 1 The structure of rotor bearing system

表 2 美国 Synchrony 公司的研究工作^[6,7]
Table 2 The research work at Synchrony Inc , USA^[6,7]

转子轴承系统结构	一个径向磁悬浮轴承最少需要 3 个传感器和 3 个线圈。如下图 2 及图 3 所示, Synchrony 公司的研究人员在每个径向磁悬浮轴承上用了 6 个传感器和 6 个线圈, 其中的 3 个不相邻的传感器和线圈组成一个径向磁悬浮轴承, 实际上每个径向磁悬浮轴承相当于有两个径向磁悬浮轴承同时在工作, 当某一个轴承出现故障时, 另一个轴承可以正常工作。这种结构显著提高磁悬浮轴承系统的可靠性。轴向轴承也是这样设计的。
位移检测方法	用电容传感器检测转子位移 ^[7] , 在文献[8]中采用了无传感器检测技术。
材料	与德雷伯实验室(Draper Laboratory)用的材料相同
实验装置	实验装置的最高工作温度为 440℃, 转速为 12000 r/min
线圈的冷却系统	用空气对磁悬浮轴承线圈进行冷却, 以防止线圈过热
主要贡献	对磁悬浮轴承的线圈和传感器进行了冗余设计, 提高了磁悬浮轴承系统的可靠性。研制的高温磁悬浮轴承系统被 IHPTET 计划选中(如图 4 所示), 认为该公司研制的磁悬浮轴承系统满足了航空发动机上天要求。

表 3 美国 GE 公司和 NASA Lewis 研究中心的研究工作^[8~11]
Table 3 The research work at GE Company and NASA Lewis Research Center, USA^[8~11]

转子系统	双转子结构。磁悬浮轴承的结构与 Synchrony 公司的结构相同, 在每个径向磁悬浮轴承上用了 6 个传感器和 6 个线圈, 目的是提高磁悬浮轴承系统的可靠性。轴向轴承也是这样设计的(如图 5 所示)。
材料	转子: Ti 6Al-2Sn-4Zr-2Mo 磁悬浮轴承: 钴铁软磁合金
位移检测方法	无传感器检测技术
备用轴承	用传统的发动机的滚动轴承作为径向备用轴承, 直径间隙为 0.254 mm; 轴承被用来作为轴向备用轴承
主要贡献	经过详细计算, 认为采用磁悬浮轴承后, 大型航空发动机可以减轻约 90 kg 的重量

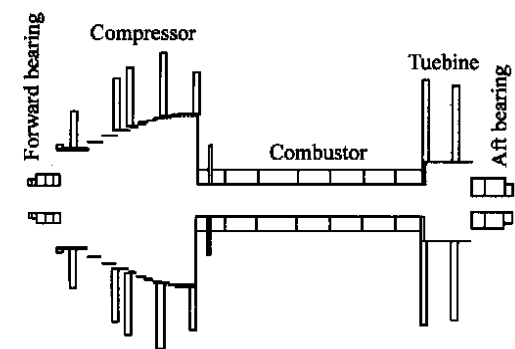


图 2 转子轴承结构
Fig. 2 The rotor-bearing system

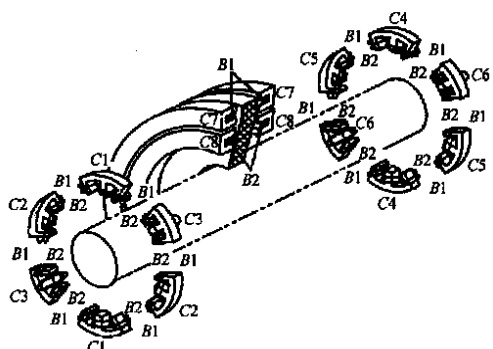


图 3 容错轴承结构
Fig. 3 The structure of a redundant bearings system

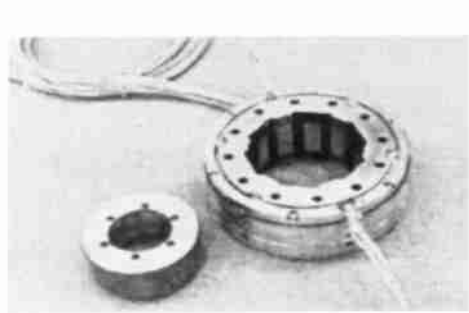


图 4 高温磁悬浮轴承照片

Fig. 4 The high-temperature magnetic bearing designed by Synchro Inc.

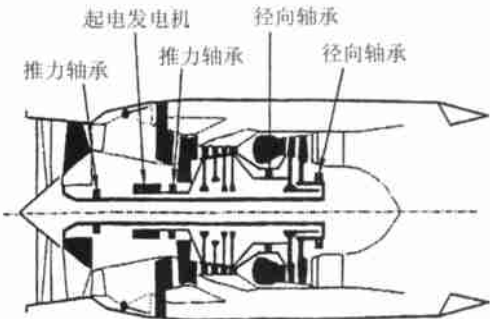


图 5 转子轴承结构

Fig. 5 The structure of rotor-bearing system

表 4 美国 Avcon 公司的研究工作^[12]
Table 4 The research work at Avcon Inc^[12]

磁悬浮轴承系统	轴向磁悬浮轴承和低温磁悬浮轴承采用永久磁铁产生偏置磁场, 重量只有普通磁悬浮轴承的 27%; 高温磁悬浮轴承用钴铁软磁合金制造。			
位移检测方法	低温磁悬浮轴承和轴向磁悬浮轴承采用涡流位移传感器, 高温磁悬浮轴承采用他们自己开发研制的电感式的位移传感器。			
备用轴承	轴承内径 100 mm, 滚珠直径为 12 mm			
磁悬浮轴承几何尺寸和重量	设计参数	低温磁悬浮轴承	轴向磁悬浮轴承	高温磁悬浮轴承
	承载力/N	2224	6227	8896
	轴承外径/mm	223	223	188
	轴承内径/mm	152	152	120
	轴承长度/mm	75	72	72
	轴承重量/kg	9. 6	12. 2	6. 8
整个磁悬浮轴承系统的重量: 42. 2 kg (包括 13. 6 kg 的控制系统)				
主要贡献	第一次报道了航空发动机用磁悬浮轴承的研究结果, 并采用永磁和电磁混合的磁悬浮轴承来减轻磁悬浮轴承系统的重量。			

表 5 日本 Ebara 公司的研究工作^[13]
Table 5 The research work at Ebara Company L td , Japan^[13]

工作温度	400℃
位移检测方法	电感传感器
备用轴承	用滚动轴承作备用轴承, 滚动体是陶瓷滚珠, 内外滚道是不锈钢; 用 MoS ₂ 作为备用轴承的润滑剂, 其最高工作温度可达 400℃
运行情况	已经连续安全地运行了 1500 h
应用	化工行业
主要贡献	虽然该公司研制的高温磁悬浮轴承不是用于航空发动机, 但是在世界范围内第一次提供了高温磁悬浮轴承长期、稳定工作的成功经验。此外用加有石墨添加剂的润滑脂对在 400℃左右工作的备用轴承进行润滑。

力,对航空用的磁悬浮轴承系统进行了攻关研究。1994 年美国率先在航空周刊杂志上公布了在 XTC-65 发动机的验证机上成功地使用了磁悬浮轴承并通过了 100 小时的试验的报道。由此极大地激发了航空界和磁悬浮轴承研究人员的热情,在随后短短的 4 年里,高温磁悬浮轴承的研究取得了突破性的进展,发表了大量的研究论文和科研成果。表 1~7 分别介绍了国际上主要研究单位的研究工作。

表 6 欧共体 AMBIT 计划的研究工作
(具体由瑞士 ETH 大学磁悬浮轴承研究中心完成)^[14]

Table 6 The research work on high-temperature magnetic bearing of AMBIT project ^[14]	
工作温度	550℃
位移检测方法	高温涡流位移传感器
备用轴承	滚动轴承
磁悬浮轴承材料	钴铁合金, 牌号: A FK 502 R
应用领域	航空发动机
主要贡献	研制成功了高温涡流位移传感器

表 7 南京航空航天大学的研究工作
Table 7 The research work at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

工作温度	550℃
位移检测方法	高温涡流位移传感器
备用轴承	滚动轴承
磁悬浮轴承材料	国产钴铁合金, 牌号: 1J22, 励磁线圈和传感器的线圈用高温陶瓷绝缘导线绕制, 传感器的骨架用玻璃陶瓷制造
应用领域	航空

3 2 高温磁悬浮轴承系统的核心关键技术

3 2 1 高温位移传感器技术

目前市场上能够买到的位移传感器只能在 180℃以下工作,无法适应发动机的工作环境。虽

然可以采用冷却的方式,但需要复杂的冷却系统,不能充分发挥磁悬浮轴承的优点。因此,研制、开发能够在 550℃左右工作的位移传感器是实现高温磁悬浮轴承的最关键的核心技术之一。目前国外已经用电感传感器和涡流传感器实现了高温磁悬浮。研制高温位移传感器的主要困难在于: (1) 传感器在 0℃~ 550℃大温度范围内的温度补偿技术: 在高温下,由于线圈的电阻等参数变化较大,传感器的灵敏度会发生较大的变化,而且会产生很大的温漂; (2) 传感器的生产工艺: 由于传感器非常小,线圈的直径也很小,往往只有 0.1 mm,如何将这么细的线焊接出来并能够在 550℃高温下稳定工作,是一个非常棘手的技术问题。

3 2 2 高温磁悬浮轴承机械系统的制造技术

普通的磁悬浮轴承的机械系统只能在 180℃以下工作,其主要原因是励磁线圈的绝缘层是普通的绝缘漆。如果要进一步提高工作温度,就需要采用耐高温的绝缘材料作为励磁线圈的绝缘层。目前国外普遍采用高温陶瓷绝缘导线绕制磁悬浮轴承的励磁线圈,这种导线的外表覆盖了一层厚度只有 6 μm 左右的陶瓷绝缘材料,能够在 1000℃以下工作。但是,这种陶瓷绝缘导线有 2 个不足: (1) 是陶瓷绝缘层比较脆,在绕制励磁线圈的过程中容易破裂、脱落,造成短路事故; (2) 是这种陶瓷绝缘层的使用寿命在 550℃只有 2500 小时左右,约束了它在工业上的广泛应用。鉴于上述原因,目前迫切需要一种新的励磁线圈的材料与制造工艺,能够保证在绕制线圈的过程中不会出现短路现象,而且在 550℃的高温环境下有更长的使用寿命。

3 2 3 高可靠性的磁悬浮轴承系统研究

虽然磁悬浮轴承没有机械接触,其可靠性从理论上讲比机械轴承要高的多。但是,由于电子线路与信号联接等方面存在故障,严重地威胁了磁悬浮轴承系统的安全性。因此,特别需要研究具有容错能力的高可靠性的磁悬浮轴承系统。即使部分电子线路、传感器等方面出了故障,这种磁悬浮轴承系统也能够正常工作。

3 2 4 磁悬浮轴承电子控制系统电磁兼容性的研究

目前普遍采用开关功率放大器来驱动磁悬浮轴承的励磁线圈的电流,这种功放最大的不足在于对外界电子设备的干扰。在发动机和飞机上有大量的电子控制仪器,如何消除开关功放的干扰

是一个迫切需要解决的问题。

3.2.5 大不平衡与大冲击载荷情况下磁悬浮轴承控制系统的研究

飞机在起飞、着陆、机动飞行等情况下,会产生很大的冲击载荷。特别是当发生发动机叶片断裂事故时,发动机至少还要工作 30 min,由此产生很大的、作用时间很长的不平衡载荷。因此,需要研究发动机的转子—磁悬浮轴承系统由于受到上述冲击载荷与不平衡载荷时转子动力学的本征行为,并开发相应的控制软件。

4 附件电传动技术

4.1 国际上起动发电机的研究概况

全电或多电发动机要求采用电力起动机,并与发电机结合,形成无刷起动发电机。可以取消发电机的附件机匣,可进一步简化发动机的结构并减轻重量。

国外早期的许多战斗机就采用了起动发电机技术,不过是有刷的。如米格-19、米格-21、F-86 和 F-5 等战斗机均采用了有刷直流起动发电机以减小发动机的重量,提高飞机的作战能力。为了适应航空高科技的发展,新型的无刷起动发电机将是主流发展方向。70 年代美国开始研究无刷起动发电双功能系统。70 年代末期,美国通用电气公司完成了用钕钴永磁交交型变速变频起动发电系统的可行性研究,80 年代初在 A-10 攻击机上试飞并取得了成功。

起动发电机采用稀土永磁电机的优点是:电机结构简单、体积小、重量轻、过载能力大、效率高。美中不足的是:永磁电机不能调节励磁,调压困难;当电枢内部短路时,不能用灭磁的方法保护电机,而必须在电机与发动机之间加脱扣装置才能将电机与发动机脱开。由于这些原因,永磁起动发电机并没有得到推广应用。虽然目前航空电源普遍采用三级式的电励磁同步电机,由此构成的起动发电系统已进入装机与实用阶段,但是这种起动发电机包含了主发电机、交流励磁机、副励磁机和旋转整流器等,结构过于复杂,限制了这种起动发电机的应用。

因此,寻求一种新型的起动发电机已成为研制全电或多电发动机的核心技术之一。近年来,人们对采用开关磁阻电机作为航空起动发电机的可行性进行了大量的理论与试验研究。开关磁阻电机的转子对温度不敏感,在高温环境下有良好的

性能,尤其适合在高速下工作,有利于提高电机的功率密度。但是,由于开关磁阻电机绕组上的电流是脉冲电流,运行时容易产生噪声与振动;此外,开关磁阻电机不论是以电动机方式工作还是发电机方式工作都是只在半周内出力,不利于进一步提高电机的功率密度。90 年代初,美国威斯康星大学的 Lipo 教授发明了双凸极电机,不仅具有开关磁阻电机的优点,而且绕组上的电流是非脉冲电流,在全周期内出力,具有很高的功率密度。初步研究表明,在额定功率相同、外形尺寸基本一致的情况下,双凸极电机的转矩/电流比是永磁无刷直流电机的 1.7 倍、开关磁阻电机的 1.6 倍、同步电机的 1.2 倍、感应电机的 3.2 倍;转矩/惯量比是永磁无刷直流电机的 5.8 倍、开关磁阻电机的 1.4 倍、同步电机的 3.6 倍、感应电机的 10 倍^[15]。此后,发表了很多有关双凸极无刷电机的研究论文^[16~19]。对双凸极无刷电机的研究表明^[15~19],这种电机的性能优良,是起动发电机的有竞争力的方案,需要进行深入、全面的研究。

4.2 双凸极起动发电机的关键技术

- (1) 双凸极电机相同的建模与仿真。
- (2) 高频双向功率变换器。
- (3) 降低双凸极电机损耗的方法。
- (4) 双凸极电机的实验研究。

(5) 高功重比双凸极起动发电机的研制,具体指标为:电机工作温度为 250℃,电机最大功率为 120 kW,转速为 16000~55000 r/min,与该转速对应的功率/重量比为 6~20 kW/kg。

5 磁浮多电航空发动机的结构设计

在航空发动机上应用磁悬浮轴承,决不是在原有滚动轴承的位置上用磁悬浮轴承取代滚动轴承。如何充分结合磁悬浮轴承和发动机两者的特点,革新原有的发动机结构设计思想,创造性地设计出全新的航空发动机结构,对整个项目的进展有举足轻重的影响。主要关键技术有:

- (1) 单转子磁浮发动机的结构设计。
- (2) 双转子磁浮发动机的结构设计。
- (3) 三转子磁浮发动机的结构设计

传统的三转子发动机需要一个内装在转子上的轴承来支承一根细长的内转子。很明显,磁悬浮轴承不可能作为内装在转子上的轴承。由于磁悬浮轴承的 D_n 值可以很大,因此三转子磁浮发动机结构设计的核心是研究能否将发动机的转子直径增加,仅用

两个轴承来支承三转子发动机的内转子。

6 备用轴承的研制

在民用设备的磁悬浮轴承系统中,需要装一对滚动轴承作为备用轴承,以防在磁悬浮轴承系统发生故障时短时(一般几分钟)支承高速旋转的转子。在航空发动机上,备用轴承尤其重要。当磁悬浮轴承系统发生故障时,备用轴承不仅要能够支承高速旋转的转子,而且要求能够工作 30 min 以上,以保证飞机有足够的时间安全着陆。此外,在过载情况下(如着陆、叶片断裂或机动飞行时),由于磁悬浮轴承系统的过载能力有限,此时备用轴承还能够短期承担一部分载荷并保护磁悬浮轴承系统不受损坏。国际上有些学者和公司对备用轴承进行了初步的研究^[20~23],但尚不充分。

通常采用普通的滚动轴承作为备用轴承,由于转子与备用轴承之间有 0.25 mm 左右的间隙,接触的瞬間转子在备用轴承上的冲击很大,而且转子运动不稳定,不仅会损坏备用轴承,严重时还会破坏转子。这种备用轴承在地面设备上还勉强可以使用,但在航空、航天等重要领域就不能满足要求,所以近年来发表了很多论文研究新型的备用轴承如箔片气体轴承^[24~26]和零间隙的滚动轴承^[27~29]。

7 发动机控制与磁悬浮轴承控制系统一体化设计

磁悬浮轴承控制器与发动机控制器是磁浮发动机的两个子控制系统,因此需要将这两个子控制系统集成在一起。主要研究磁浮轴承与发动机一体化控制系统的建模与仿真,着重解决两个控制系统之间的耦合问题。

参考文献

- [1] Kelleher W P, Kondoleon A S. A Magnetic Bearing Suspension System for High Temperature Gas Turbine Applications[A]. Proceedings of MAG'97[C]. Washington: 15-24 1997.
- [2] Kelleher W P, Kondoleon A S. A Magnetic Bearing Suspension System for High Temperature Gas Turbine Applications, Part 3- Magnetic Actuator Development[R]. Orlando, Florida: Presented at the International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, June 2- 5, 1997.
- [3] James R Scholten. A Magnetic Bearing Suspension System for High Temperature Gas Turbine Applications—Control System Design[A]. ASME Turbo Expo'97[C]. Orlando,

Florida U SA, 1997.

- [4] Francis P Marchand Jr. Touchdown Bearing Development for a Magnetic Bearing System Used in a High Temperature Gas Turbine[R]. Orlando, Florida: Presented at the International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, June 2- 5, 1997.
- [5] Antkowiak B M, Nelson F C. Rotordynamic Modeling of an Active Magnetic Bearing Gas Turbine Engine[A]. Draper Laboratory Paper[C]. Orlando, Florida U SA: ASME Turbo Expo'97, 1997.
- [6] Field R J, Iannello V. A Reliable Magnetic Bearing System for Turbomachinery[A]. Proceedings of the 6th International Symposium on Magnetic Bearings[C]. Boston: 42-51. 1998.
- [7] Iannello V. Magnetic Bearing Systems for Gas Turbine Engines[A]. Proceedings of MAG'95[C]. Washington: 77-86. 1995.
- [8] Storace A F, et al. Integration of Magnetic Bearings in the Design of Advanced Gas Turbine Engines[J]. J. of Eng. For Gas Turbines and Power, 1995, 117: 655- 665.
- [9] NASA Conference High Temperature Magnetic Bearings for Gas Turbine Engines[Z]. <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/RT1995/5000/5230k.htm>.
- [10] Kandebo S W. Pratt Engine meets phase 1 HPTET goals[J]. Aviation Week and Space Technology (New York), November 14, 1994: 38- 39.
- [11] James P Lyons, et al. Design and Control of a Fault-Tolerant Active Magnetic Bearing System for Aircraft Engines[A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Magnetic Bearings[C]. Zurich, Switzerland: 449- 454. 1994.
- [12] Crawford M eeks, et al. Lightweight Magnetic Bearing System for Aircraft Gas Turbine Engines[A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Magnetic Bearings[C]. Zurich, Switzerland: 429- 434. 1994.
- [13] Ohsawa M, et al. High Temperature Blower for Molten Carbonate Fuel Cell Supported by Magnetic Bearings[A]. Proceedings of the 6th International Symposium on Magnetic Bearings[C]. Boston: 32- 41. 1998.
- [14] Xu Longxiang, et al. Development of Magnetic Bearings for High Temperature Suspensions[A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic Bearings[C]. Zurich, Switzerland: 117- 122. 2000.
- [15] Liao Y, Lipo T A. A New Double Salient Permanent Magnet Motor for a Adjustable Speed Drive[J]. Electric Machines And Power Systems, 1994, 22(2): 259- 270.
- [16] Elbuluk M E, et al. Potential Starter/Generator Technologies for Future Aerospace Application[J]. IEEE AES System Magazine, Oct. 1996: 17- 24.
- [17] Ferreira C A, Jones S R, et al. Detailed Design of a 30-kW Switched Reluctance Starter Generator System for a Gas Turbine Engine Application[J]. IEEE Trans on Ind Applicat, 1995, 31(3): 553- 561.

- [18] Rajesh P D, et al The Flux-Reversal Machine: A New Brushless Doubly-Salient Permanent-Magnet Machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1995, 33(4): 925-934
- [19] 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): 330-335
- [20] Francis P Marchand Jr Touchdown Bearing Development for a Magnetic Bearing System Used in a High Temperature Gas Turbine[R]. Orlando, Florida: International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, June 2- 5, 1997.
- [21] Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler, Alfons Traxler Active Magnetic Bearings[M]. Zurich: Hochschulverlag AG an der ETH Zurich: 141- 146 1994
- [22] Maslen E H, Barrett L E Feasible Whirl of Rotors in Auxiliary Bearings[A]. Proceedings of MAG'95[C]. Alexandria, Virginia: August 10- 11 1995
- [23] Kirk R G Evaluation of AMB Turbomachinery Auxiliary Bearings[J]. Journal of Vibrations and Acoustics, Transactions of the ASME, April, 1999, 121
- [24] Foil Bearing Used as Back-up for Magnetic Bearing[Z]. <http://www.wohawkinnovative.com/fall98.htm>.
- [25] Erik E Swanson Performance of a Foil-Magnetic Hybrid Bearing [R]. Munich, Germany: Proceedings of TURBOEXPO 2000, 2000
- [26] Hybrid Foil Magnetic Bearing Tested [Z]. <http://www.wohawkinnovative.com/fall98.htm>.
- [27] Chen H M, et al Zero Clearance Auxiliary Bearings for Magnetic Bearing Systems[R]. ASME Paper No. 97- GT- 112
- [28] Chen H M, et al Test of a Zero Clearance Auxiliary Bearing[A]. Proceedings of the Mag'97 Industrial[C]. Alexandria, Virginia: Conference and Exhibition on Magnetic Bearings, 111- 119 1997.
- [29] Zero-Clearance Auxiliary Bearing Developed Mohawk Innovative Technology [Z]. <http://www.miti.cc/feb99.htm>, Feb, 1999