

多电航空发动机研究现状及关键技术

吴志琨¹, 李军², 时瑞军¹

(1. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 株洲 412002)

(2. 中国人民解放军总参陆航部 驻株洲地区军事代表室, 株洲 412002)

摘 要: 多电发动机作为多电飞机的核心部件, 受到欧美国家的高度重视。介绍了国内外多电发动机的总体研究现状和发展趋势, 重点分析了整体式起动/发电机、磁浮轴承、电动燃油泵和电动作动器等多电发动机核心部件的技术特点和性能优势, 同时对内置式整体起动/发电机技术、高温主动磁浮轴承技术和分布式控制技术等多电发动机的关键支撑技术进行了讨论。多电发动机结构紧凑、重量轻等优势必将使其得到应用及发展。

关键词: 航空发动机; 多电发动机; 关键技术

中图分类号: V235

文献标识码: A

Current Research Status and Key Technologies of More-electric Aeroengine

Wu Zhikun¹, Li Jun², Shi Ruijun¹

(1. China Aviation Power Machinery Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

(2. Military Delegate Office in Zhuzhou Area, Bureau of Army Air Corps, Headquarters of the General Staff, the Chinese People's Liberation Army, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: As the key part of more-electric aircraft(MEA), the more-electric engine(MEE) has been paid high attention by western countries. The research status and developing trends of MEE are reviewed. Then, the advanced technical characters of the key components such as integral starter-generator, magnetic bearing, electric pump and electric actuator are analyzed. The key technologies of high temperature interior integral starter-generator, active magnetic bearing and distributed control are also discussed. The MEE will be applied and developed in the future for its compact and lightweight structure.

Key words: aeroengine; more-electric engine; key technology

0 引言

随着现代电力、电子技术的高速发展, 新的多电化、全电化动力系统概念已经使现代动力系统的面貌发生了深刻变化。目前, 在陆地和海洋, 全电车辆和舰船已经进入了实用阶段, 并将很快大规模使用, 其优良的综合性能已经得到了证实; 同时, 随着航空技术的不断发展, 要求航空发动机具备很高

的性能指标、良好的操作性和维修性, 且飞机使用了大量消耗电能各类机载设备, 导致其对发动机电功率的需求也越来越大, 而动力系统多电化、全电化的概念为解决上述问题提供了途径, 并将引领整个航空工业进入一个全新的技术水平^[1-4]。

作为多电飞机的核心技术, 多电航空发动机部分采用电力作为航空发动机和飞机上的次级功率系统原动力, 即使用电力驱动系统部分代替原有的由液压、气压、电和机械能驱动的混合次级功率系统^[5-6]。在多电发动机中, 主要的次级功率均用电的形式分配、传递和控制。例如, 使用电力作

收稿日期: 2012-03-28; 修回日期: 2012-05-14

通信作者: 吴志琨, 47190557@qq.com

动器来取代液压作动器和气动作动器等执行部件；用电动泵取代机械传动的滑油泵和燃油泵。多电发动机的使用可以大大降低系统重量和成本，提高发动机的维护性和可靠性。作为全电飞机发展过程中的重要阶段，由电力系统取代部分次级功率系统形成的多电飞机和多电航空发动机系统，将为最终实现全电飞行器奠定技术基础^[5]。

本文从国内外多电发动机研究现状出发，对其技术特点及各部件的关键技术进行了详细地介绍和讨论，并对国内多电发动机研制中存在的问题提出了建议。

1 多电发动机国内外研究状况

1.1 国外

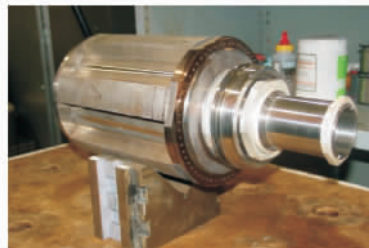
美国和欧共体在 20 世纪 90 年代先后以整体起动/发电机技术和主动磁浮轴承技术为突破口，展开了多电发动机的技术研究，并实施了发电机的专项和综合性研究计划，开发和验证了主动磁浮轴承、整体式起动/发电机、分布式控制系统、电动燃油泵、电动滑油泵和电力作动装置等主要系统部件^[3-5]，为研制多电发动机进行了必要的技术筹备。

20 世纪 80 年代，美国主要在多电飞机 (MEA) 计划和高性能涡轮发动机综合技术 (IHPTET) 计划下组织进行了以主动磁力轴承替换先进军用发动机主轴承滚动轴承的研究，并将其列为 1997~2003 年的第三阶段任务。NASA 刘易斯研究中心和陆军研究实验室也有一项专门的多电燃气涡轮发动机计划。2000 年，美国 SatCon 公司研制了军用燃气涡轮发动机的高转速 (50 000 r/min)、高温 (600 °C) 磁悬浮轴承^[6]。由英国、德国、法国、奥地利和瑞士组成的欧洲联合团队，于 1998~2000 年期间实施了航空发动机用高温主动磁力轴承 (AMBIT) 研究计划，专门开发和验证以磁力轴承支撑的多电航空发动机，其目的就是要率先研制出性能优良的新一代航空发动机，抢占 21 世纪的航空发动机市场。2002~2005 年，欧盟实施了电力优化飞机 (POA) 技术验证计划，在该计划的多电航空发动机研究项目中，欧盟以配备 A330 飞机的瑞达 500 发动机为平台，进一步开发和验证了电气装置、整体起动/发电机和主动磁力轴承，POA 计划中起发电机的静子和转子外形

图如图 1 所示。空客公司通过 A380 的研制，实施了“多电推进系统”(E-PPS) 计划，以传统发动机为基础，首次将电气反推力系统应用到民用飞机中，大量的飞行数据表明，相对于传统机械液压系统，采用多电技术的发动机其性能、重量和可靠性都得到了较大改善^[4]。



(a) 静子



(b) 转子

图 1 POA 计划的起发电机

Fig. 1 Picture of the POA programme PM

1.2 国内

我国在多电发动机技术的研究上也取得了一定的成果，如磁浮轴承及其相关技术在航空发动机上的研究已完成原理试验验证，并在单轴发动机上完成了试验样机设计及其台架试验^[6]；内置式起动/发电机完成了原理样机试验室研究，并取得较好的效果。但需要指出的是，关于多电发动机的研究成果较为零散，没有形成严密、有效的技术体系，大部分研究还处于摸索阶段，技术成熟度低。

大量验证表明，多电发动机技术相对于传统发动机，结构更紧凑、重量更轻、维修性和适应性更好、可靠性更高^[1,4-5,7-8]。

2 多电发动机主要技术特点

航空发动机作为飞机的推进装置，同时还需为飞机系统提供电源、环控引气以及液压装置驱动

力。对于传统发动机,燃油泵、滑油泵以及发电机等附件通过附件机匣提取发动机功率,这种功率提取方式导致发动机结构变得复杂。而在传统发动机基础上改进的多电发动机,采用内置式整体起动/发电机为发动机和飞机提供所需的电源,用全电气化传动附件取代机械液压式传动附件,发动机的控制系统也由集中式全权限数字电子控制系统改为分布式控制系统,发动机的燃油泵、滑油泵和作动器也改为电力驱动^[5,9]。传统发动机和多电发动机结构对比如图2所示。

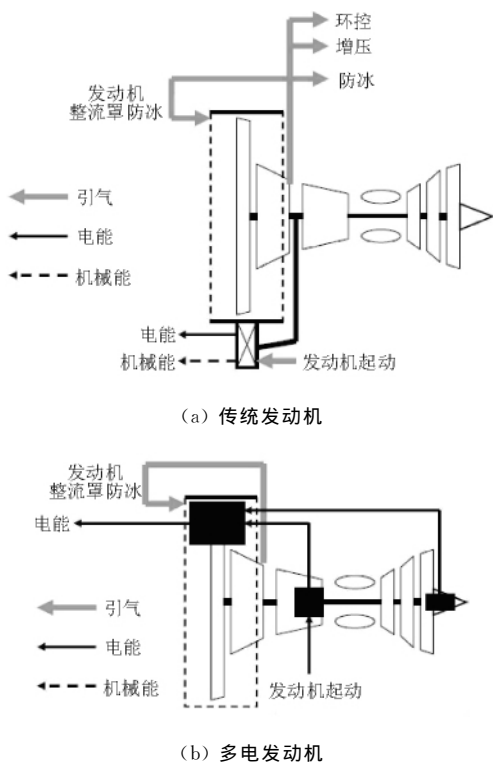


图2 传统发动机和多电发动机结构对比

Fig. 2 Comparison of Conventional Engine and MEE

这种结构上的改动,带来了以下优点^[10-14]:

(1) 取消了液压系统,提高了发动机的可靠性、安全性,降低了结构的复杂性,减少了发动机的重量及安装和使用费用;

(2) 使用安装在发动机轴上的内置式整体起动/发电机,能够获得更高的功率,取消了功率提取轴、减速器和附件机匣,减少了发动机的迎风面积,降低了发动机的起动功率,特别是低温条件下起动;

(3) 使用主动磁浮轴承系统,无需润滑和密封,减少了冷却系统,取消了润滑和密封结构,从而

减轻了发动机的重量;

(4) 使用电气驱动代替发动机引气系统,降低引气系统的复杂程度;

(5) 采用主动控制,减小叶尖间隙,提高了部件与发动机的效率;

(6) 因磁浮轴承能耐受更高温度,可根据需要,布置在接近燃烧室或涡轮的部位,使发动机结构更紧凑;

(7) 降低了控制系统的复杂性,提高了可靠性,降低了寿命期成本;

(8) 通过各类智能装置进行自检和诊断,从而降低了发动机的维修成本。

通过多电发动机技术的应用,表明该技术能有效地使发动机的成本降低15%,而NASA认为能降低燃油费用5%;采用电气驱动使得电气元件减少35%,电缆减少40%,附件重量减少40%,并节省安装时间60%,可靠性提高20%,维护费降低5%^[15]。

总的来说,采用电力系统取代复杂的机械系统,可大大增强系统的功能性并降低系统的复杂程度,减轻发动机重量,节约成本,提高发动机性能,优化发动机的结构,以及获得更高的可靠性和维修性^[1,3]。

3 多电发动机主要组成部件及其关键技术

多电发动机在传统发动机的基础上应用新技术,并对其进行了局部结构改动,改动部件主要包括内置式整体起动/发电机、主动磁浮轴承、电动燃油泵和电力作动器等。各部件及其关键技术介绍如下:

3.1 主要组成部件

3.1.1 整体起动/发电机

目前,美国和欧洲都在研究内置式整体起动/发电机,其为集起动机和发电机功能于一体的电机。在发动机稳定工作前作为电起动机工作,将发动机带转到一定转速,在发动机供油点火燃烧并进入稳定工作状态后,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。由于内置式整体起动/发电机直接安装于发动机转子轴

上,取消了附件机械传动部分,使得发动机的重量大大减轻,迎风面积减小,同时也易于获得更大的电功率^[6]。该新技术的应用大大减轻了机载设备的重量,能满足现代飞机对功率电源的需求,因而是发动机附件的一个重要发展趋势。

内置式整体起动/发电机不仅需解决高温铁磁材料、涡流损失控制、电磁屏蔽、高可靠性和强容错能力且易于实现多余度的不中断供电以及与发动机的综合控制等问题,同时还需具备对负载控制、状态检测、故障隔离及系统重构等能力。

3.1.2 磁浮轴承

磁浮轴承为航空发动机获得双倍推力的关键机电系统部件,其利用电磁力,通过控制系统使得旋转轴的中心位置位于轴承作动器中心。由于主动磁浮轴承采用非接触式轴承,取消了滑油润滑系统、冷却系统和密封系统,简化了机械和空气动力设计,降低了轴承系统的复杂性,减轻了发动机的重量。由于轴与轴承间的摩擦力和磨损较小,使得发动机的尺寸减小,驱动力、维护成本较低,可靠性得到了改善^[6,9,16]。

主动磁浮轴承的关键基础技术包括:能适应高温环境下稳定工作的位移传感器;能在高温环境下保证线圈不会出现短路的绝缘材料;消除发动机和飞机上大量使用的电子设备带来的电磁干扰等。

3.1.3 电动燃油泵

目前航空发动机主燃油泵由发动机附件传动齿轮箱驱动,其转速与发动机的转速直接相关,为保证根据发动机需求提供准确的燃油流量,需将燃油泵多余的燃油重新流回至燃油箱,导致了功率的损耗及油温的升高,同时也增加了燃油冷却装置。当采用电动燃油泵时,可根据发动机的需要,通过电子控制器直接调整燃油泵的转速和燃油阀的位置以获得发动机实际需求的燃油量,而无需或最大程度的减少燃油流回,这样既省掉了传动结构和相应的润滑系统,也降低了燃油控制系统的复杂性^[3],同时,还提高了发动机的可靠性。

小型轻质化的变流量电动燃油泵和高精度可控步进电机的研制为其技术难点。

3.1.4 电力作动器

电力作动器是全电发动机的重要部件之一。传统航空发动机所采用的作动器需要独立液压源,可靠性差、易污染、重量大、维护性差、且通常都有

泄漏的问题,当作动系统出现故障时,难以判断作动器的故障原因。采用电力作动器时,结合数字电子和控制系统容错设计技术,电力作动器的工作状态、性能衰减都能够实时监测,在故障出现时能进行有效地识别和隔离,从而进一步提高了可靠性。由于电力作动器使用的功率源为电力源,使得其对安装位置的要求更灵活,更易于使用和维护。

目前,用于飞行控制、环境控制、刹车、燃油和发动机起动系统的电力作动系统已得到验证。对多电发动机而言,电力作动技术发展的关键技术有:

(1) 符合发动机控制动静态要求的电动机设计技术;

(2) 具有容错性能的机电和电动静液作动系统设计技术;

(3) 具有故障诊断和隔离功能的智能电力作动器设计技术。

3.2 分布式控制技术

目前航空发动机的控制系统是一种集中式全权限数字电子控制系统(FADEC),为了进一步提高发动机控制系统的性能,满足日益复杂的控制需求,减小发动机附件系统的重量并提高可靠性,改善发动机控制系统故障的隔离特性,分布式控制技术受到了国内外航空发动机控制界的重视。而多电发动机概念的出现为分布式控制技术在航空发动机上的应用提供了便利,两种技术的结合将最大程度的发挥各自优势。美国在IHPTET计划的第三阶段将验证一种模型基分布式的发动机主动稳定控制系统。

目前,分布式控制系统的关键技术有:分布式控制系统的总体结构和运行模式;余度多路传输光纤总线;多余度数字处理机及并行处理技术;耐高温的灵巧传感器和作动器;发动机状态监视和故障诊断技术。

4 结束语

多电发动机作为一种新颖的发动机,在提高发动机性能、优化发动机结构、降低耗油率和发动机重量、提高可靠性和维修性等方面较传统发动机均有较大优势,能够更好地满足未来经济性和环境性等要求。我国虽然在主动磁浮轴承、分布式控制等

技术领域取得了一定进展,但技术成果分散性大,技术成熟度较低,相比欧美国家差距还比较大,我国应打破行业壁垒,共享研究资源和成果,广泛吸收和跟踪国外先进技术,加强和规范多电发动机整体研究的技术规划,加强关键技术研究的力度,走自主研发的道路,以期尽早开展并研制成功具有自主知识产权的多电航空发动机。

参考文献

- [1] Hirst M, McLoughlin A, Norman P J. Demonstrating the more electric engine: a step towards the power optimised aircraft[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(1): 3-13.
- [2] Adam McLoughlin. Engine powerplant electrical systems [R]. MOET Project Consortium, 2009.
- [3] Morioka N, Oyori H. Fuel pump system configuration for the more electric engine[R]. SAE Technical Paper, 2011.
- [4] Catherine Buchheit. More electric propulsion system[R]. MOET Project Consortium, 2009.
- [5] AbdElhafez A A, Forsyth A J. A review of more-electric aircraft[R]. ASAT-13-EP-01, 2009.
- [6] 王戈一. 磁悬浮多电发动机的研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(4): 15-20.
Wang Geyi. Study of a more-electric engine with active magnetic bearings[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(4): 15-20. (in Chinese)
- [7] Christian Zahringer, Karel Stastny. Towards the powerhouse for more electric aircraft-dedicated engine concepts[R]. ISABE-2009-1166, 2009.
- [8] Pluijms A Schmidt. Performance comparison of more electric engine configurations [R]. ASME-GT-2008-507, 2008.
- [9] 梁春华. 欧美积极开展多电发动机研究[J]. 国际航空, 2009(5): 61-63.
Liang Chunhua. Carrying out research on more-electric engine actively in the west[J]. International Aviation, 2009 (5): 61-63. (in Chinese)
- [10] Maldonado M A, Korba G J. Power manager and distribution system for a more-electric aircraft[R]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1999(14): 3-8.
- [11] 方昌德. 多(全)电发动机[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(2): 54-58.
Fang Changde. More-electric gas turbine engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(2): 54-58. (in Chinese)
- [12] 贾淑芝, 吴新, 李斌. 多电发动机分布式控制系统总体方案研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 6-8.
Jia Shuzhi, Wu Xin, Li Bin. Concept research on distributed control system of more electric engine[J]. Aero-engine, 2011, 37(6): 6-8. (in Chinese)
- [13] 姜晓莲, 王斌. 浅析未来航空发动机技术的发展[J]. 航空科学技术, 2010(2): 10-12.
Jiang Xiaolian, Wang Bin. Brief discuss on future aero engine technology [J]. Aeronautical Science and Technology, 2010(2): 10-12. (in Chinese)
- [14] Philip Butterworth Hayes. All-electric aircraft research speeds up[R]. Aerospace America, 2009.
- [15] Charrier J J, Kulshreshtha A. Electric actuation for flight & engine control system: evolution, current trends & future challenges[R]. AIAA-2007-1391, 2007.
- [16] 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, 2002, 18(1): 51-59.
Xu Longxiang, Zhou Bo. The current situation and development trend for more-electric gas turbine engines [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 18(1): 51-59. (in Chinese)

作者简介:

吴志琨(1978—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机控制。

李军(1979—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机总体技术。

时瑞军(1973—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机控制。

(编辑:马文静)