航空发动机动力传输系统的技术发展思考

李宏新,李国权
(中航工业沈阳发动机设计研究所 航空发动机动力传输航空科技重点实验室,沈阳 110015)



李宏新(1969),男,自然科学研究员,主要从事航空发动机型号工程研制与科研管理工作,现任中国航空工业集团公司首席专家,航空发动机动力传输航空科技重点实验室主任,沈阳发动机设计研究所副所长。

收稿日期:2013-03-01

摘要: 动力传输系统是航空发动机设计的重要组成部分。结合航空发动机动力传输系统技术的应用与研究,介绍了国外发动机动力传输系统的技术特点。结合中国发动机动力传输系统技术的实际,从动力传输系统的设计原理、系统组成部件和系统检测等几个方面对中国发动机动力传输系统的发展现状进行了分类描述和分析;指出了发动机动力传输系统存在的主要技术问题,同时阐述了未来航空发动机动力传输系统的技术发展方向。

关键词: 航空发动机;动力传输系统;机械系统;润滑系统;传动系统;轴承;密封

Technology Development Thought on Aeroengine Power Transmission System

LI Hong-xin, LI Guo-quan
(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Power Transmission of Aeroengine, AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Power transmission system plays an important role in aeroengine design. Combined with investigation of aeroengine power transmission system technology, the technology characteristics and application of foreign aeroengine power transmission were introduced. Combined with practice of aeroengine power transmission technology in China, the system were expounded in terms of its design principle, components development, oil system condition monitoring. The classification description and analysis of the development status of aeroengine power transmission technology were performed. The main technology problems of aeroengine power transmission in China were pointed. The technology development direction of aeroengine power transmission system design in the future were exposited.

Key words: aeroengine; power transmission system; mechanical system; oil system; transmission system; bearing; seal

0 引言

航空发动机的转子需以轴承来支撑,而功率提取仍以机械传动为基础。航空发动机动力传输系统又称为航空发动机机械系统(以下称机械系统),包含传动系统、润滑系统、主轴轴承、主轴密封系统 4 大部分。随着航空发动机的发展,机械系统的重要性被逐渐体现,成为继压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室、控制系统之后的发动机技术发展的六大部件(系统)之一。由于新一代先进航空发动机对机械系统提出更高更新的要求,决定了其必须具有体积小、质量轻、安全性高、可靠性高等性能特点,而且其在发动机上实现的功能多、组成构件多,又决定了其在发动机上的可靠性相对偏低。近年来,中国航空发动机技术已经从测仿研制走向自行研制的道路,但与国外先进国家相比,还存在着较大差距。

本文根据相关资料,对航空发动机机械系统的发展现状进行分析,并指出中国在该系统的研究中所存在的主要技术问题,提出未来发动机机械系统的技术发展方向。

1 航空发动机机械系统的研究现状

1.1 国外发展趋势与特点概述

美、俄、英、法等国极其重视航空推进技术的发展,投入巨资进行了一系列航空推进技术基础研究,先后为 F-22、F-35、T50、EF2000 等新一代战斗机匹

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

配了先进动力装置,取得了显著成效,研制出了具有代表性的推重比 10 一级的 F119、F135、АЛ-41Ф、EJ200 涡扇发动机和功质比为 10.4 的 T800 涡轴发动机。为了满足高性能发动机的需求,在 2001 年,欧洲开始了为期 3 年的“先进传动润滑系统设计概念”(ATOS)研究项目[1],以提升发动机的性能、提高可靠性、降低污染、减轻质量、降低成本和缩短研制周期。美国 F100 发动机在已经定型并装备部队后,与空军签定了部件改进计划(CIP),以解决在飞行过程中或生产期间所暴露的各种问题,提高其可靠性、维护性和耐久性;1983 年 9 月美国 F119 发动机开始技术验证机研制,至 2005 年 12 月装备作战部队具备初步作战能力(IOC),共经历了 22 年,在 F119 发动机 EMD 阶段,共组建了近 100 个一体化产品小组,其中包括 5 个机械系统专业的一体化产品小组。

国外航空传动系统设计公司在传动系统研制过程中有着完整的设计软件及配套的各种强度及性能测试试验技术。在设计中,将各个部件的受力和变形等对其自身和相关联部件产生的影响综合考虑到强度计算中,比较详细地分析传动部件的静态和动态,计算方法能够比较准确地模拟真实工作情况,并通过完善的试验方法取得准确的试验数据,以获得精确的应力水平。设计的螺旋锥齿轮线速度达到了 189 m/s。为最大限度地提高功(推)质比,发动机传动系统与附件采用一体化设计技术。重视高速齿轮的动力学研究和动态设计,并在相应的规范中做了明确规定。在大涵道比发动机上,开展了齿轮传动风扇的大功率传动技术研究和验证,已开始型号研制;随着军用多用途歼击机的发展,开展了升力风扇传动技术的研究,已经应用在 F135 发动机上,使得美国联合攻击战斗机(JSF)F-35 飞机技术得到进一步提升。

目前,齿轮传动仍是发动机传动系统的主要形式,但根据有关资料,国外在新型传动方面也进行了大量研究,包括自由行星传动、面齿轮传动、电磁传动、滚柱传动、液压传动、喷气传动和分流涡轮传动等,这些研究为发动机传动系统的发展提供了新的思路。

从国外的公开资料中可以看到,对润滑系统设计技术的研究、润滑系统部件的研究及高温润滑油的应用研究一直是航空发动机技术研究的重点之一。在润滑系统设计技术方面,其主要是在润滑系统循环量的精确设计、热分析、轴承腔油气二相流流动与换热、滑油通风系统设计与分析和仿真技术等领域开展了大量基础研究。在部件方面,各个部件从高速、高效、紧凑、轻质量、小外廓等方面进行先进技术研究,将滑油箱、滑油滤、滑油供回油泵、离心通风器、通风活门等部件与附件机匣集成设计,并取得了成果。在高温型(Ⅲ型)润滑油的研制和应用方面,美国已成功地进行了高温滑油的研制,并应用在 SR71(黑鸟)高空侦察机 J58 发动机上,使用温度最高达到 300 ℃。俄罗斯也开展了高温型润滑油的研制,其研制的 BT301 型高温润滑油应用到巡航导弹的润滑系统中,其最高使用温度达到 260 ℃,比现有Ⅱ型滑油提高了 50 ℃。

先进发动机国家十分重视提高密封的性能,如应用在压气机和涡轮叶尖的级间等流路的刷式密封设计,已给发动机带来的意想不到的收益。美国对用于二次流路、压气机及涡轮级间的全寿命期内性能更稳定的气膜密封正在积极研究。

发达国家一直把主轴轴承看作与发动机 3 大部件同等重要。在进行的发动机主轴轴承试验时数已达到 30 余万小时,试验 DN 值达 4 百万,并开发了 SHABERTH 和 CYBEAN2 个大型经典轴承计算分析程序。从发展趋势上看,国外新型发动机主轴轴承结构与发动机总体结合越来越紧密,主轴承内环趋向于与发动机主轴一体化,主轴承外环与安装边一体化,这有助于减少零件数量、减轻发动机质量、提高发动机可靠性。此外,新型材料的高硬度的陶瓷滚动体混合轴承已经在发动机上得到应用,磁浮轴承也正在开展工程应用技术研究。

1.2 国内研究现状

中国于 20 世纪 60 ~ 80 年代开展了 WP6、WP7、WP7 甲 / 乙、WS6、WP13 以及昆仑等航空发动机的仿制和研制工作,经历了由测绘仿制、改进改型到自行研制的发展阶段,初步建立了科研生产和维护保障体系。步入 80 年代后期,结合第 3 代太行发动机的研制,对推质比 8 一级涡扇发动机的设计技术进行了广泛研究,至 21 世纪初期实现了航空发动机由第 2 代向第 3 代的历史性跨越,并开始第 4 代航空发动机工程研制。机械系统的研究已逐步从测绘研制走向了自行设计的道路。林基恕于 2005 年编著的《航空燃气涡轮发动机机械系统设计》[2]一书较为详细地阐述了机械系统 4 大专业的原理、系统计算、部件原理、部件设计、典型部件、状态监测等。该论著在中国是首次对航空发动

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

机机械系统进行系统的论述，标志着中国航空发动机机械系统设计基本走出了仿制道路。另外,对滑油系统的防虹吸、滑油泵、防气塞的高空性散热器和通风器[3-5]等进行了深入研究；在热分析和密封等方面一些学者也从不同方面进行了研究[6-10],发展了基于有限元和网络法的滑油系统热分析方法;对附件机匣、轴承腔等进行了部件的热分析方法研究；对密封的机理、特点及研究中的问题进行了分析。这些研究有力地提高了中国的设计水平,在不明显增加传动系统质量的条件下,传动总功率不断增加,主轴承的滑油主体油温不断提高;刷式密封技术得到工程应用,指尖密封取得突破性进展。

1.3　突破关键技术

随着高推比发动机及长寿命大涵道比发动机的发展,中国对机械系统开展了大量的研究工作,采取多种措施满足高推质比、长寿命、高可靠性的目标,突破了一些关键技术，基本建成了机械系统设计体系,使中国发动机机械系统的研制上了 1 个新台阶,主要体现在以下几个方面:

(1)针对传动系统进行了整体动态特性及齿轮修形和润滑等方面的技术研究,开展了附件机匣与滑油系统一体化技术研究，开发了传动系统设计软件,在设计阶段开展机匣及齿轮的动态特性分析等。

(2)针对润滑系统开展了将滑油箱等滑油附件与附件机匣一体化设计,开展了滑油系统的热分析技术研究,建立了热分析方法,针对离心通风器研制并使用了多种叶轮式离心通风器,完成了蜂窝式离心通风器的性能试验研究。开展了采用小型化高可靠性传感器监控和预测发动机滑油系统状态的健康管理技术研究。

(3)刷式密封技术在设计、制造工艺、对偶摩擦涂层的筛选等方面实现了从无到有,并对普通型和低滞后型刷式密封进行了一些性能与耐久性试验,并实现了工程应用。

(4)在主轴轴承技术方面,开发了轴承分析设计软件,研制了多型新材料,优化了轴承制造工艺,完善了检测手段。

但与国外相比,在可靠性、安全性以及设计理念等方面还存在着一定的差距。

2　存在主要问题

机械系统构件多和使用环境恶劣等特点,决定了其在发动机上较低的可靠性,据资料显示,目前国内外在役发动机中,2/3 的故障是产生于机械系统及燃油系统,对此,需要解决如下主要问题:

(1)设计体系尚需要在工程应用中不断健全,在广度和深度方面补充完善,强化对设计的规范作用。

(2)设计理念需要持续改变。要改变附件传动设计必须适应附件的理念,要树立附件机匣是相对总体的思想，使附件设计适应附件机匣的转速及外廓,采用一轴多附件优化设计,大大减少传动轴数量,提高可靠性和维护性。

(3)不断改善相关专业发展的制约,一部分附件设计落后,部分封严引气参数、轴向力、散热器燃油入口等边界条件不能准确给出,部分针对传动和轴承等系统动态性测试技术的应用还有待提高。

(4)滑油系统附件与附件机匣一体化设计问题,如一体化的滑油附件设计与管理、内部流路的优化、一体化对传动机匣温度场与变形的影响等。

(5)一些基础理论还很薄弱,如附件机匣整体振动、噪声及变形分析、圆锥齿轮接触分析、修形理论、两相流动参数、轴承定寿等技术还不够成熟。

(6)试验条件相对落后,试验理念有待更新。突出体现在模拟真实环境的能力不够、仿真度不高,在试验器上暴露的问题不充分等。

(7)加工制造方面还存在问题。限于中国整体精密制造工业技术水平的制约,工艺精细化与规范化程度不足,有些设计要求难以达到,加工制造过程还存在着相对粗放、检测能力不足等问题,这也将导致发动机可靠性的降低。

(8)新材料难以满足设计要求,如高强度齿轮材料缺少齿轮专用材料数据,新的轴承材料缺少寿命系数、材料与锻件热处理工艺稳定性和工程化问题等。

3　技术发展方向

航空发动机机械系统的研究可分为 5 个方面:传动系统技术;滑油系统技术;主轴承技术;密封技术;磁浮轴承与多电发动机技术的设计、制造、材料和工艺等。在机械系统的发展方面,国内学者也进行了一些探讨,在一定程度上探明了发展方向。林基恕等在

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

2001 年对航空发动机机械系统进行了展望[11],指明了在推比 8 ~ 10 一级航空发动机的机械系统发展方向。但要研制更高推比的发动机,以及长寿命、高可靠性大涵道比发动机还需要进行更加深入地研究。李国权在 2009 年对航空发动机的滑油系统的技术与应用进行了综述[12],并对滑油系统的未来发展进行了阐述。赵振业院士还针对中国的实际提出了抗疲劳制造技术研究,这对提高机械系统的可靠性具有非常重要的意义。整个机械系统应向几个方面发展。

3.1 传动系统设计满足高推质比、高可靠性和长寿命的设计要求

(1)针对在役发动机传动系统进行深化验证,开展系统研究。重点针对附件机匣在工作及安装状态的受力变形及工作状态进行仿真分析,解决在役发动机附件机匣的轴承衬套、套齿等的磨损以及高速质载齿轮的寿命问题;实现对整个齿轮传动系统在接近发动机实际工作状态下动态分析,解决发动机附件机匣传动系的振动问题;进行齿轮振动、齿轮修形与疲劳强度等技术研究,解决附件机匣的可靠性和耐久性问题。

(2)通过理论研究、仿真、试验验证等技术途径,实现附件机匣与滑油系统附件一体化设计技术的突破,通过转变设计理念,实现大规模减质,以满足高推质比的需要,集中维护点,以提高维护性、减少外部管路等零件数量。

(3)开展先进发动机的载荷谱技术研究,进行下一代高性能齿轮钢的齿轮材料性能研究,进行高速质载齿轮的优化设计技术研究,以期在新材料及先进设计技术上取得突破。

(4)开展附件机匣整体变形分析和振动噪声及修形等技术研究,对齿轮轴支点布局形式、轴承安装形式、机匣内摩擦副的润滑等进行深入分析。

(5)进一步开展传动系统轴系同心度控制与高精度齿轮制造技术和装配技术研究,提升工艺能力。

3.2 降低滑油系统部件质量和滑油消耗量,提高系统可靠性

(1)针对在役发动机的滑油系统使用中存在的各种问题,以提高发动机可靠性为中心进行滑油系统深化验证工作。主要解决滑油腔回油温度高、轴承与附件寿命增长、滑油消耗量、滑油光谱金属含量标准优化等问题。开展轴承供油量和发热量的关系计算分析、搅拌热对回油温度的影响分析、燃油系统 / 滑油系统 / 散热系统的交互影响分析、对转中介轴承最佳供油量的试验以及故障诊断技术等研究工作。开展润滑系统轴承腔及通风系统计算方法、数值模拟及仿真分析、参数测试、新结构离心通风器等研究和验证,掌握滑油系统相关参数的分析及测量方法。

(2)应用高速及与附件机匣一体化的附件、高效滑油散热技术等满足高推质比的需要,探索Ⅲ型高温润滑油的应用技术研究;进行二相流条件下的滑油系统的精确热分析和系统全流路仿真,合理协调散热器在燃油路中的位置,将滑油热管理系统与燃油系统、飞机的热管理系统进行一体化设计、充分协调燃油、飞机与滑油热管理系统的关系,使热管理系统实现高效、合理。

(3)进行高效(蜂窝及金属海绵型)油气分离器技术以及低滑油消耗量的总体技术研究,并进行滑油系统附件全寿命期试验研究,进行新型滑油屑沫检测技术研究,以适应发动机 PHM 系统的需要,提升发动机视情维护能力。

3.3 延长主轴密封的寿命,加强新型流道密封的研究

一方面,对传统主轴承密封强化长寿命和可靠性增长研究,如长寿命石墨密封、高低压反转轴间接触式密封、反转轴间气膜密封技术等;另一方面,研究新型无滞后刷式密封以及指尖密封技术,提高流路密封的封严性能及工作的可靠性。

3.4 加强长寿命、高负荷主轴轴承技术研究

进行长寿命主轴承设计技术、热分析技术、轴承损伤容限分析以及检验标准完善、疲劳寿命等效加速试验技术、磨损寿命试验技术、陶瓷混合轴承设计应用的研究等。

除此之外,还要加强轴承材料、冶金与制造工艺等方面的研究,主要包括高强轴承材料及工艺、轴承表面完整性技术、抗疲劳制造技术、残余应力控制技术、2 次淬硬技术、轴承无损检测技术等。

3.5 开展新技术研究

当前,世界多电或全电发动机研制取得了较大进展,其中磁浮轴承与电动滑油系统附件的技术研究取得突破。磁浮轴承技术代表着发动机转子支承的 1 种革新方法,其成功应用将使未来发动机具有新的特征:发动机质量减轻,取消滑油系统和传动系统,减少功率消耗,简化轴承腔密封结构,减小叶尖和密封间

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

隙、减少飞机机动飞行时转子与机匣的偏移,减少封严用气,具有优良的振动响应特性,轴承可以达到无限寿命。

对此,应重点进行基础和应用研究,突破一批关键技术,包括高精度、高稳定性专用传感器技术、高稳定性专用功率放大器技术、高温磁浮轴承设计与制造、高性能辅助轴承设计与制造、小型化磁浮轴承电气控制系统设计与制造、内置式起动/发电机与磁浮轴承集成一体化技术研究。

此外,机械系统还应加强升力风扇传动技术和齿轮传动风扇发动机的传动技术研究,解决垂直起降飞机和超大涵道比民用飞机发动机的技术瓶颈。

4　结束语

综上所述,航空发动机机械系统应着重围绕以下方面重点发展:

(1)针对使用中存在的问题,对现役发动机进行深化验证,实现自主保障。

(2)更新观念,利用现代计算机技术、材料技术以及已建成的设计体系,精确设计,从而减轻零部件质量,简化外部管路,集中布置维护点,以适应更高推质比发动机对机械系统的质量、可靠性和维护性的技术性能要求。

(3)进行传动系统整体变形、振动及噪声分析、全寿命滑油系统附件、高性能密封及长寿命轴承等机械系统研究,以满足中、大涵道比发动机长寿命、高可靠性的要求。

(4)完善滑油系统的检测体系,使之适用于发动机 PHM 系统, 为发动机从定期维护转向视情维护奠定基础。进行高效离心通风器及低滑油消耗量的滑油系统研究,满足长航时发动机对滑油系统的要求。

(5)跟踪国际先进发动机技术,加快磁浮轴承及多电发动机技术研究。

(6)开展升力风扇及齿轮传动风扇(GTF)发动机的传动技术研究,为垂直起降飞机和超大涵道比民用飞机发动机的发展奠定基础。

参考文献:

[1] Klingsporn M. Advanced transmission and oil system concepts for modern aero-engines[R]. ASME 2004-GT-53578.

[2] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京:航空工业出版社,2005:1-236.
LIN Jishu. Design of gas turbine engine mecainical system[M]. Beijing:Aviation Industry Press, 2005:1-236. (in Chinese)

[3] 李国权. 航空发动机滑油系统的防虹吸 [J]. 航空发动机,2007,33(1):34-36.
LI Guoquan. Preventing siphon of aeroengine oil system [J]. Aeroengine, 2007,33(1):34-36.

[4] 李国权,黄建. 航空发动机滑油泵气塞的预防措施[J]. 航空发动机,2011,37(1):1-3.
LI Guoquan, HUANG jian. Aeroengine oil pump airlock preventive methods [J]. Aeroengine, 2010,36 (1):1-3. (in Chinese)

[5] 李勇,李国权. 航空发动机离心通风器的试验研究[C]// 辽宁省航空学会动力装置专业第十四届学术交流会论文集,沈阳:中航工业沈阳发动机设计研究所,2004:85-89.
LI Yong, LI guoquan. Experiment research of aeroengine centrifugal ventilator [C]//14th Science Conference of Power Plant of Liaoning Province Aviation Academy, Shenyang: AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, 2004:85-89. (in Chinese)

[6] 刘振侠,黄生勤,吕压国,等. 航空发动机滑油系统通用分析软件开发[J]. 航空动力学报,2007,22 (1):12-17.
LIU Zhenxia, HUANG Shengbo, LYU Yaguo et al. General analysis software of aeroengine lubrication system design [J]. Journal of Aerospace Power ,2007,22 (1): 12-17.(in Chinese)

[7] 葛治美,韩振兴. 航空发动机轴承腔热分析计算[J]. 航空动力学报,2005, 20(3):483-486.
GE Zhimei, HAN Zhenxing. Thermal analysis of aeroengine bearing compartment[J]. Journal of Aerospace Power,2005, 20 (3):483-486. (in Chinese)

[8] 苏壮,李国权. 航空发动机滑油系统断油时主推力球轴承的瞬态热分析[J]. 航空发动机,2009,35(2):24-29.
SU Zhuang, LI Guoquan. Transient thermal analysis of main thrust ball bearing during fuel cut off for aeroengine oil system [J]. Aeroengine,2009,35(2):24-29. (in Chinese)

[9] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究 [J]. 航空发动机,2012,38(3):1-4.
HU Guangyang. Application research of seal technologies for aeroengine[J]. Aeroengine,2012,38(3):1-4. (in Chinese)

[10] 郭梅,邢彬,史妍妍. 航空发动机附件机匣结构设计及齿轮强度分析[J]. 航空发动机,2012,38(3):9-11.
GUO Mei, XING Bin, SHI Yanyan. Structural design and strength analysis of accessory gearbox system for aeroengine [J]. Aeroengine,2012, 38(3):9-11. (in Chinese)

[11] 林基恕,张振波. 21 世纪航空发动机动力 (下转第 30 页)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn