

航空机电系统综合技术发展分析

Development of Aviation Electromechanical System Integration Technology

郭生荣 / 中航工业金城南京机电液压工程研究中心

摘要: 航空机电系统综合技术是未来航空领域一大重点发展方向, 本文对其进行了较为系统地研究。首先阐述了机电系统综合技术的概念; 其次介绍了从控制综合到子系统综合的演变过程, 以及技术应用现状; 最后提出了机电系统综合技术需要发展的关键技术, 为未来机电系统综合技术的发展指明新的研究方向。

Abstract: In the future, electromechanical system integration technology will be one of key direction in aviation. In this paper, electromechanical system integration technology is surveyed. Firstly, the conception of electromechanical system integration technology is demonstrated. Then the developments of control integration and subsystems integration are introduced, including technology application. Lastly, the key technologies are presented, which will provide a new research direction for electromechanical system integration technology.

关键词: 机电系统; 综合化; 发展重点

Keywords: electromechanical system; integration; key development

0 引言

航空机电系统是保障飞机飞行必不可少的系统, 随着飞机性能的不断提高,

机电系统所承担的飞行保障任务越来越重, 使传统机电系统正从各自独立发展快速向机电综合方向发展, 如图1所示。

航空机电系统综合技术是指将提供二次能源的环境控制、第二动力、液压、电源、飞机燃油等机电子系统进行

健康管理和多变量综合控制功能的发动机/螺旋桨全权限数字式电子控制系统全面应用, 同时采用光电敏感元件、高温电子设备和灵活的控制逻辑。控制系统的重量将大幅度减轻, 环境适应性将进一步增强。

6) 减速器方面, 重载、高速、高效、轻质是其发展目标。其中新结构传动机构/零件(如面齿轮)、轴承/齿轮轴一体化设计、超高强度传动零件新材料和复合材料机匣等是研究方向。

7) 螺旋桨方面, 先进风扇气动设计技术、将逐步应用对转螺旋桨设计技术, 以提高涡桨飞机在高速飞行条件下的性能。螺旋桨的结构由铝合金大梁、玻璃钢外壳结构发展到碳纤维大梁、泡沫填充、玻璃钢外壳结构, 成形工艺有

预浸料层铺和编织外壳整体注射成形, 从而使螺旋桨重量大幅度减轻。

6 结束语

涡桨发动机在未来亚声速运输类飞机上的应用前景巨大。国外先进大涵道比涡扇发动机有逐渐向涡桨发动机构型、性能靠近的趋势给我们以启示: 是否可以直接以涡桨发动机为基础, 通过提高燃气发生器的性能和发展新构型的涡桨发动机(对转螺旋桨、开式转子、带外涵螺旋桨等)等途径实现在运输类飞机上先进动力技术的赶超。

AST

参考文献

[1] FORECAST INTEERNATIONAL

©2012. Analysis 3 The Market for Aviation Turboprop Engines 2012–2021, 2012.

[2] 世界中小型航空发动机手册编委会. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.

[3] 方昌德. 航空发动机的发展研究[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.

[4] 凌天铎. 中小型航空发动机用压气机性能水平的发展[Z]. 株洲: 中航工业航空动力机械研究所.

作者简介

罗安阳, 研究员, 中航工业发动机总体性能设计技术首席技术专家, 中航工业动研所副总设计师, 长期从事航空发动机型号、预研总体设计及规划论证工作。

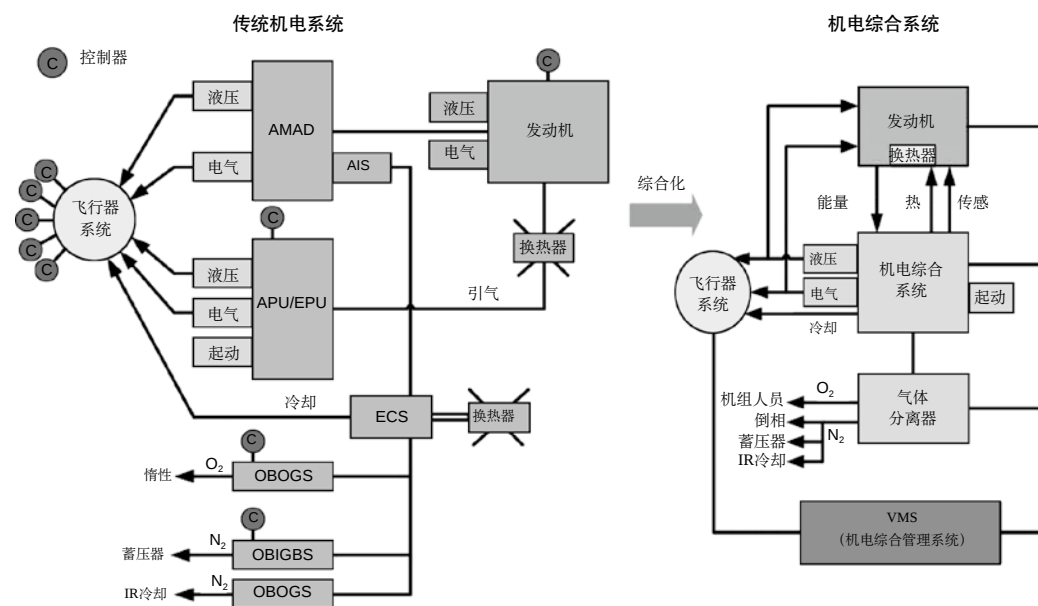


图1 机电系统综合化发展

物理、功能综合,形成一个综合化系统,根据飞机不同状态调整系统,自动选择最佳能量和热沉源,实现系统性能、功能、效率和成本最优化,最终完成二次能源获取、传输与使用的飞行保障功能。机电综合主要包括动力与热管理系统(PTMS)、电作动系统(EAS)、电源系统(EPS)、燃油热管理系统(FTMS),由集成在飞行器管理系统(VMS)下的机电综合管理系统(IEMS)对系统的信息进行综合处理,达到信息的适时认知和共享。

1 机电系统综合技术发展历程

美国空军从20世纪80年代开始实施了一系列机电综合研究计划,这些研究计划不仅在时间上具有连续性,在研究内容上也具备继承性,如图2所示。

1) 公共设备管理系统(UMS)计划

传统的机电各子系统采用大量的专用控制器,通用性差导致可靠性低、信息共享能力差。上世纪80年代英国验证机计划(EAP)出现的公共设备管理

系统(国内称机电综合管理系统)由四个处理器机组成,替代了原来传统系统中使用的20~25个专用控制器和6个电源转换模块,以实现机电控制系统布局优化和控制信息共享。公共设备管理系统减轻了重量、减小了体积、降低了费用,增强了系统可靠性,减轻了飞行员的工作负荷,提高了可维护性。该成果已应用在F-22、F-35战斗机和A380、波音787客机上。

2) “热油箱”燃油热管理系统计划

随着电子设备热载荷的增加,利用冲压空气作为热沉已经无法满足飞机需求,为解决飞机热管理需求和发动机引气使用限制的矛盾,上世纪80年代,美国空军实施了“热油箱”燃油热管理系统计划,通过充分利用JP8+100 耐高温燃油作为热沉的蓄热作用,减少环控系统对发动机引气的需求,降低了燃油代偿损失,提高了热管理效率。但F-22装备的以燃油为热沉的综合环控系统没能完全解决热管理的问题。

3) 多电飞机(MEA)计划

为了提高飞机性能和可靠性,希望所有二次能源均用电能形式分配,上世纪70年代就提出了全电飞机设想,实现飞机各部件电气化,但由于需要解决的问题很多,短时间难以实现,作为全电飞机方案的初级阶段,美国空军提出了多电飞机计划。该计划要求机电系统开展以电能为主要操作能源的机电部件技术探索,如启动发电、固态配电、电力作动器、功率电传、电力刹车、电力环控等领域探索技术途径,为美国2030年服役

的高能武器平台奠定基础。与以往传统飞机相比,多电飞机结构简单,重量轻,可靠性高,维修性好,生存能力强,使用费用较低,性能价格比高,电传操纵和电力操纵容易协调,地面支援设备少,机上接口简单。MEA计划已经在C-130、C-141、F/A-18和F-16等飞机上进行了多电飞机部件和系统的飞行试验,该成果已应用在F-22、F-35战斗机上,同时也应用在民用飞机A380、B787上。

4) 子系统综合技术演示验证(J/IST)计划

MEA计划在技术实施之初,仅考虑了小系统之间的综合,如启动和发电的综合,没有考虑大的、多个系统的综合,也没有考虑到飞机隐身和机动的限制而产生的越来越严重的热管理问题。美国空军于1995年开始实施子系统综合技术演示验证计划,包括56项演示验证内容,目的是更好地解决F-35的热管理问题,该计划将辅助动力装置、应急动力装置、环境控制系统和热管理系

统的功能集成为一个系统,同一涡轮机既可以提供动力又可以提供冷却,具有自启动、发动机启动、冷却和应急动力4种模式。为F-35提供成熟的子系统技术,降低了工程发展阶段和工程制造阶段采用综合子系统的技术风险,并使该机具有较好的经济可承受性。

5)综合飞行器能量技术(INVENT)计划和能量优化飞机(EOA)计划

2008年6月,美国空军研究实验室(AFRL)启动“综合飞行器能量技术”计划,向工业界发布招标书提出:能量优化飞机“的概念。在“能量优化飞机”国家计划的四项核心产品技术中,INVENT计划是启动最早的一个,也是其核心。该计划分为三阶段进行:第一阶段关注近期技术,这些技术应用到F-35飞机上,解决其热管理问题,包括将地面维护时间翻一番、低空飞行时间提高到原来的4倍等;目前正在进行第二阶段,关注中期技术,用以满足下一代能量优化飞机的需求,包括通过系统综合将航程/续航时间提高10%,功率和制冷量提高5倍,按需供给,无热约束等;第三阶段关注远期技术,主要面向高超声速平台、超声速远程攻击系统等。INVENT计划将演示三个关键系统:自适应动力与热管理系统(APTMS)、鲁棒电源系统(REPS)、高性能机电作动系统(HPEAS),目的在于从能量角度,探索按需、按负载周期工作的系统综合与优化新方法,提高系统整体的能源利用率,解决过去不论系统处于何种状态都提供定量的电源、液压、燃油冷却等引起的能量浪费问题,最终解决飞机的热管难题。该计划探索了一种基于模型的设计方法,并制定了一种“综合飞行器能量技术建模需求与实现计划”框架。

2 机电系统综合技术应用现状

1)军用飞机机电系统综合化技术

F-22 战斗机中应用的燃油热管理系统通过环控系统的液冷热换热器、液压系统热交换器和润滑系统热交换器等,利用燃油作为整机热载荷的热沉,从而实现了对机电系统的燃油热管理,减小了系统重量,提高了整个飞机性能。F-22以综合飞机子系统控制器(IVSC)为顶层、公共设备控制处理器(UCP)为底层,共同构成了机电综合管理系统的两级结构。IVSC根据飞机总的输入状态,通过UCP向各机电系统发出命令和信息,各机电系统响应IVSC的命令和信息执行动作,但与IVSC无直接的通信联系;UCP实现对各机电系统的基本控制功能。

F-35战斗机是第一个采用多电技术的战斗机,具有综合化、多电化特征的系统包括分布式供电系统、动力与热管理系统(核心为组合动力包)、风扇涵道散热器、内置起动发电机、电液作动器(EHA)、电储能器等,其中组合动力包、电液作动器、风扇涵道散热器等都是首次应用。动力与热管理系统实现了辅助动力系统、应急动力系统、环境控制系统、燃油系统、电源系统等飞机机

电功能子系统的综合化,组合动力包将辅助动力/应急动力装置的压气机、涡轮、环境控制系统的涡轮和开关磁阻启动/发电机综合在一个轴上,由磁轴承支撑,转子转速为61,000r/min,从而减轻了重量,缩小了体积,提高了可靠性,这种动力热管理系统对涡轮机械系统和电力管理系统作了集成。取消了用于提供维修电源和冷却的地面保障车辆,能够在整个飞行包线内为主发动机提供起动电源,为飞机提供冷却,并在主系统发生故障时提供应急电源。

2)民用飞机航空机电系统综合化技术

A380飞机是第一个采用多电技术的客机,总发电功率是910kW,采用液压作动器、电液作动器和电备份液压作动器(EBHA)的组合方案,使飞机的设计更为简单,地面保障设备减少,飞机性能大为提高。A380还是第一个采用固态功率控制(SSPC)的辅助配电系统和集成安全监视系统的民用飞机。此外,A380还采用由希斯帕诺苏泽公司和霍尼韦尔公司合作制的以电为动力的推理反向作动器系统(ETRAS)。A380是基于飞机总线网络架构下的机电系统综合,但是其综合方式特点主要

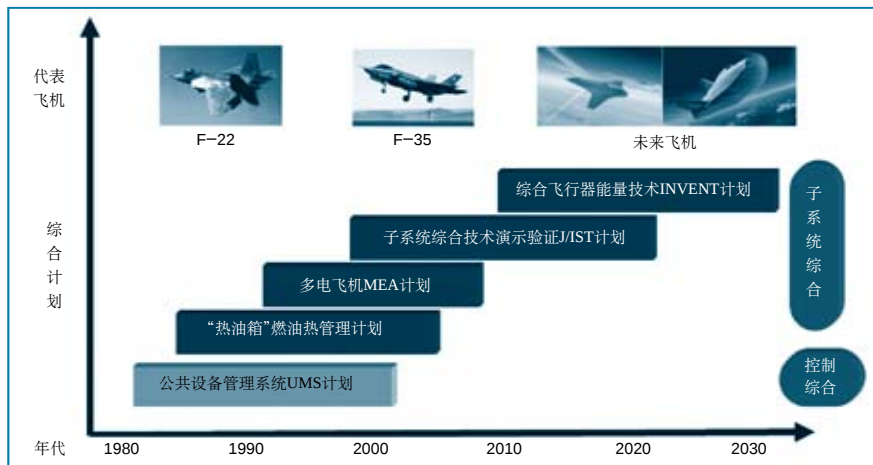


图2 军机电系统综合发展历程

还是以系统功能为原则,各个机电系统相对独立,采用二余度的AFDX开关网络互联作为传输的中枢。

波音787飞机是一个新技术产物,采用多电技术使传统的飞机结构发生了根本性的变化,许多需要发动机引气作为原动力的系统改由电源供电,由于没有了引气系统,飞机机械系统的复杂性便大大降低,与传统飞机相比,波音787上取消了以下子系统:发动机气压起动系统、APU驱动的压缩机、预冷器、大量的管路阀门和空气控制系统、泄漏和过热检测系统等。而且波音787飞机的机电综合管理系统本身具有较高的信息融合量,它服务于公共核心资源解算系统(CCS),并通过CCS可与任务管理、座舱、飞控/推进系统等飞机其他系统进行数据通信,达到更高层次的全机资源共享。

3 机电系统综合技术发展重点

1) 基于模型的机电综合系统顶层设计与仿真技术

基于模型的机电综合系统顶层设计与仿真技术是基于模型的设计方法,用动态的数学模型取代静态的数据表格,可以精确地描述系统之间的交互作用和瞬态响应,建立了自适应动力与热管理系统、燃油热管理系统与飞行器系统、发动机组成热模型仿真回路,高性能电作动系统、高鲁棒性电源系统与飞行器系统、发动机组成电能模型仿真回路,广泛采用硬件在回路测试,支持平台级能量优化,解决飞机能量问题。

2) 机电综合管理技术

机电综合管理系统通过共享机电电子系统的硬件设备(物理综合),实现各机电子系统间的信息共享(功能综合),同时与飞控系统、推进控制系统、航空电子系统等飞机其他系统连接,使信

息高度融合,保证机电系统的控制、管理及监控功能达到最优,从而优化飞机整体性能,减轻飞行员的工作负担。机电综合管理技术是以综合控制性能最优为设计理念,根据各机电子系统功能的共性与差异,进行综合控制模式的划

分,包含闭式环控系统、主动重心控制、变压力液压控制、精确剩余燃油警告、优化燃油/时间轨迹、电载荷管理、燃油/热管理、超前动力瞬态抑制管理等模式。机电综合控制性能寻优技术为各种综合控制模式的性能最优提供策略和

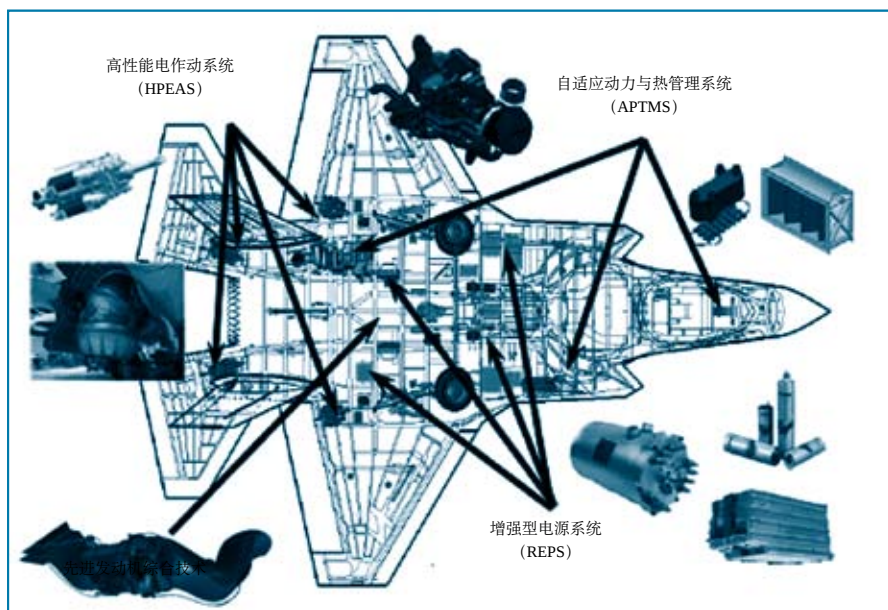


图3 综合飞行器能量技术

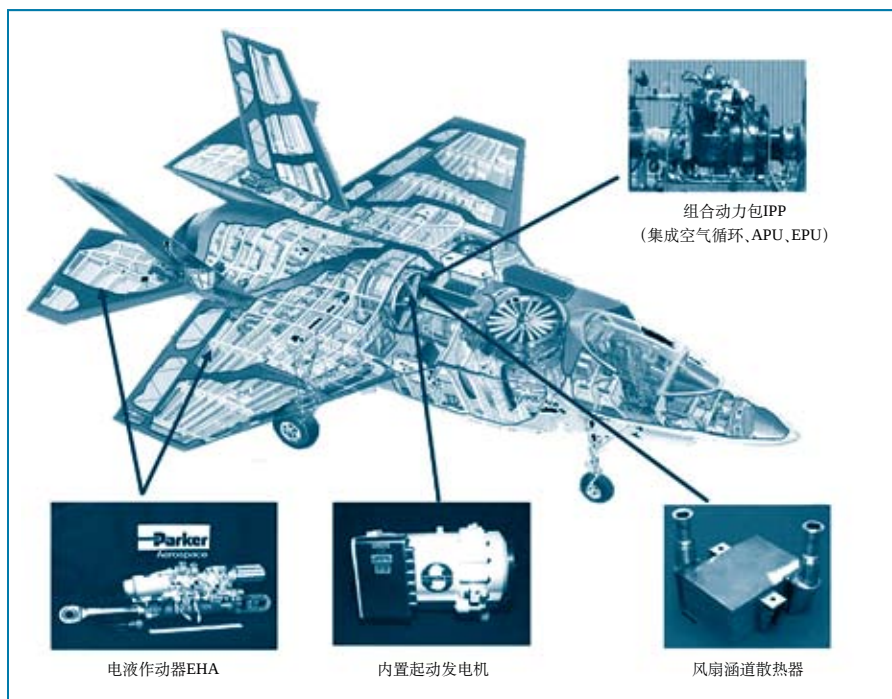


图4 F-35战斗机机电系统综合

方法,利用机电系统的资源优化方法和最优控制理论,可实现机电系统的最优控制。

3) 自适应动力与热管理系统技术

动力与热管理系统是机电综合的中枢和核心,是飞机各种二次能源的动力源,美国空军已将其纳入到美国空军九大科学技术体系中,作为“推进与动力”技术体系中的一大研究方向。动力与热管理系统原理图如图3所示,它将辅助动力装置、应急动力装置、闭式空气循环控制系统和开关磁阻起动/发电机综合在一起,实现自启动模式、发动机起动模式、冷却模式和应急动力模式,能够在整个飞行包线内为主发动机提供起动电源,为飞机提供冷却,并在主发动机发生故障时提供应急电源,成为整个飞机能量管理不可或缺的一个部分。

自适应动力与热管理(APTMS)技术是航空机电系统综合技术的关键技术,通过系统集成和优化方法解决现有的飞机热管理问题。APTMS的涡轮可以采用高温轴承技术、高温涡轮技术、变几何涡轮技术、先进换热器技术、高效压气机和先进结构,这些先进部件和技术有助于减少涡轮机体积和重量,提高工作效率。APTMS采用的是高电抗永磁电机(HRPM),在不同工作模式下既可作为发电机又可作为电动机,其新型控制和保护算法可减轻重量、提高可靠性和安全性。主要研究方向包括“超前—整定—滞后”发电控制技术、轴无传感器控制技术、直流总线电压脉动补偿技术和先进的自调效率技术等。功率电子设备的改进也是可以研究的方向:半导体材料的利用例如与封装和传热新技术结合的SiC和GaN,集成冷却底板的机壳技术,以及使用塑料和复合材料,磁耦合消除等方法,还有能显著

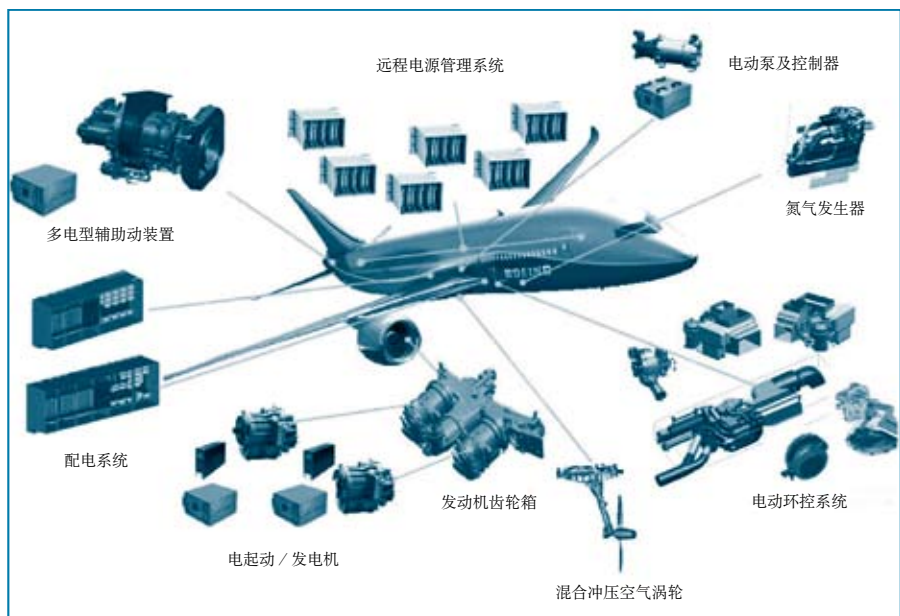


图5 波音787飞机多电化

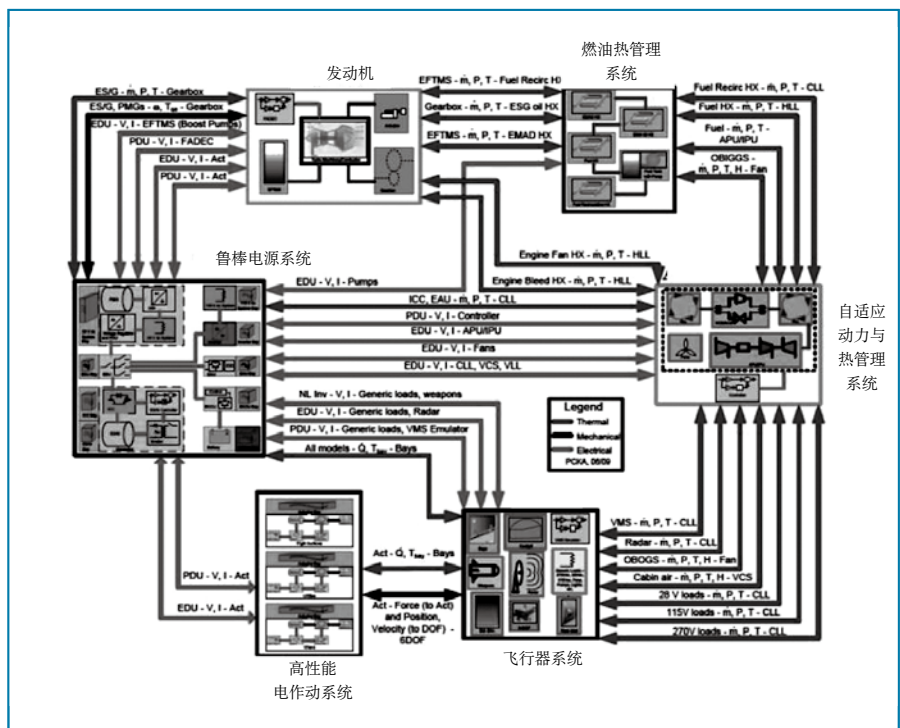


图6 INVENT计划建模与仿真框架

减轻重量的有源滤波器,有利于提高机电系统封装密度和冷却性能。

4) 高性能电作动技术

电作动技术的关键问题是开发具有大电功率、轻巧灵活的高性能电作动

器,需要开展的研究方向有减轻功率和重量要求的金属氧化物半导体控制技术,实现电动环控系统、冷却风扇和燃油泵的脉宽调制电动机变速控制技术

及微处理机技术,具有容错能力的机电

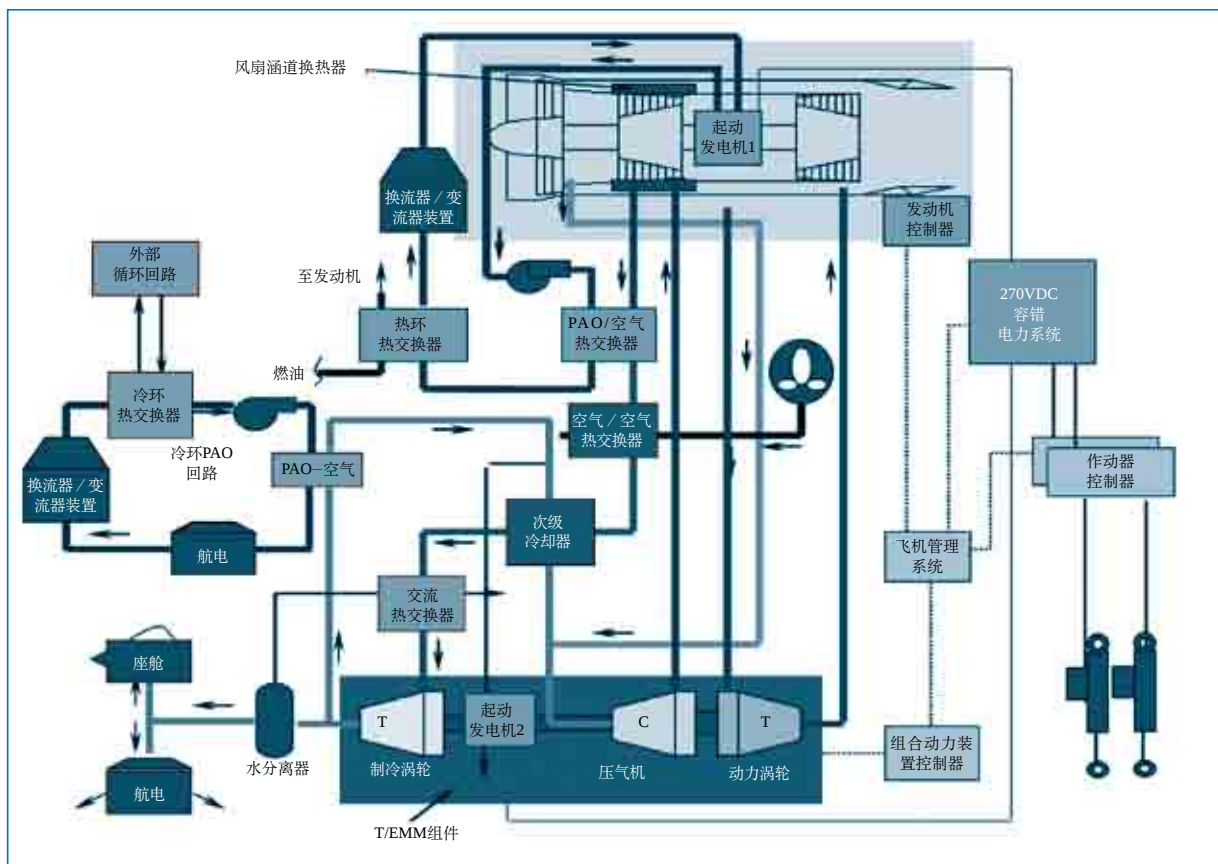


图7 动力和热管理系统原理图

作动器和电动静液作动器,以及高压直流稀土永磁无刷电动机和开关磁阻式电动机等。同时需要开展光传操纵技术,以弥补电传输易受将来电磁脉冲武器的电磁和雷电干扰。

5) 鲁棒性好的机载电源技术

机载电源技术主要集中在具有高功率密度的机载电源和高可靠性、容错能力强的配电技术。预计未来飞机机载电源的功率需求将会大幅提高,每个发动机提供的电力将达500kW,以满足对电力容量的需求;为了减轻输电电缆的重量,需要采用更高的电压,如230V交流电或270V直流电;对于电作动器要求在整个飞行航线中都要保证飞行控制作动器的电力,虽然允许短时间中断,但是决不允许长时间的电力中断;随着飞机上用电负载的增加,只能依靠

计算机实现对负载的自动管理,通过固态功率控制器(SSPC)和机电功率控制器(MEPC)实现对负载的控制、状态检测、故障隔离及系统重构。

AST

参考文献

- [1] I. Moir, A. Seabridge. Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration (Third Edition) [M]. London, 2008.
- [2] A. A. AbdElhafez, A. J. Forsyth. A Review of More-Electric Aircraft [C]. 13th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, 2009(5).
- [3] Eric A, Walters S I. Invent modeling, simulation, analysis and optimization [R]. AIAA, 2010.

[4] Yu S, Ganev E. Next generation power and thermal management system [R]. SAE, 2008.

[5] O'Connell T C, Liu C, Walia P. A hybrid economy bleed, electric drive adaptive power and thermal management system for more electric aircraft [R]. SAE, 2010.

[7] Kaslusky. Aircraft power and thermal management system with electric co-generation [P]. USA: US20100170262, 2010(7).

作者简介

郭生荣, 研究员, 中航工业机电系统总体综合技术首席技术专家, 长期从事机电系统总体综合技术、液压技术、辅助动力总体技术的研究与设计工作。