

美国能量优化飞机设计方法与关键技术

王子熙*

成都飞机设计研究所, 四川 成都 610091

摘 要: 随着功能的增强, 现代作战飞机将面临严重的功率和热耗问题。美国为解决这一问题开发了综合飞行器能量技术 (INVENT) 计划, 提出了能量优化飞机 (EOA) 概念。针对INVENT计划, 介绍了背景、发展规划及EOA的主要目标。通过建立“从头到尾”(tip-to-tail)模型, 分析了飞机系统能量设计的重要方法—MRIP, 阐述了EOA设计时的关键技术。

关键词: 综合飞行器能量技术; 发展规划; 能量优化飞机; MRIP

中图分类号: V37 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 05-0007-06

为解决下一代战斗机面临的严峻的能量和热管理问题, 美国空军研究实验室(AFRL)于2008年启动了综合飞行器能量技术(INVENT)计划, 并提出能量优化飞机(EOA)的概念。2010年6月, INVENT计划第二阶段(螺旋2)招标书发布, 其主旨是面向第6代能量优化飞机的综合飞行器能量技术开发。

1 INVENT计划背景

目前, F-22和F-35都是将自身的热量导入燃油中, 像是在“热瓶子中飞行”, 在地面起飞前、低空飞行或燃油所剩不多的情况下着陆时, 飞机自身的冷却问题凸现; 另一方面, 未来机载传感器和定向能武器会消耗更多能源, 也产生了更多热量。为解决未来飞机可能面临的能量和热管理问题, 2008年6月, AFRL启动了INVENT计划, 目的是使飞机产生更少热量并且寻找一种采用新的热沉、使用冲压空气冷却又不增加飞机红外特征的方法。而该计划的远期目标是研发能量利用最大化、复杂系统结构最小化、性能更优良的飞机, 即能量优化飞机。

为实现这一最终目标, 2011年底, 美国国防部成立了EOA指导委员会, 旨在设定目标并监督计划执行。该委员会提出了EOA技术开发要关注的四个方面^[1]: 平台级能量优化和系统综合、先进部件和子系统开发、完全综合的多层级建模与仿真和广泛的硬件在回路测试。2012年5月, 指导委员会

又发布了EOA计划的四项产品技术: 综合飞行器能量技术; 小型/微型无人机系统的功率和热管理技术; 综合推进、功率和热管理系统技术以及直升机平台多电/混合动力平台适应性技术。2012年9月, 指导委员会正式发布三军能量优化飞机国家计划信息征询书, 组织多个政府部门来计划、开发和执行该项目的科技投资战略。目前, AFRL已为INVENT计划提供了2.66亿美元的经费, 预计工业部门也将会投入相同数目的资金。

2 INVENT发展规划

INVENT计划是EOA的核心, 分三个阶段执行^[2]:

第一阶段(螺旋1), 研发近期技术, 其目标是将亚音速攻击以及持续的情报、监视与侦察所需的油耗降低10%, 将地面维持时间提高1倍, 低空飞行时间提高至原来的4倍, 将动力与热管理任务能力提高15%-20%。第一阶段的工作目前已完成。

第二阶段(螺旋2), 研发中期技术, 其目标是通过系统综合将航程/续航时间提高50%, 功率和制冷容量提高5倍, 按需供给, 无热约束等。螺旋2阶段工作于2010年启动, 目前各项研究正在进行。螺旋2阶段工作分三步完成, 如表1所示^[3]。

第三阶段(螺旋3), 研发远期技术, 主要面向高超声速平台、超声速远程攻击系统等。研究高马赫数下的动力与热管理, 将功率与制冷容量提高10倍以用于高负载循环定向能

收稿日期: 2013-12-15; 录用日期: 2014-02-15

*通讯作者. Tel.: 15902814955 E-mail: 93326732@qq.com

引用格式: WANG Zixi. Design method and key technologies of US energy optimized aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(05): 7-12. 王子熙. 美国能量优化飞机设计方法与关键技术探析[J]. 航空科学技术, 2014, 25(05): 7-12.

表1 INVENT计划螺旋2阶段执行计划
Table 1 Implementation plan of INVENT spiral 2

阶段	目标	开发时间
阶段1	考虑子系统与飞行器需求的综合并进行概念设计开发	12个月
阶段2	考虑开发通用子系统、飞行器系统和发动机系统,用于综合地面演示	30个月
阶段3	关注硬件的综合地面演示并验证模型和演示对全机的全部效益	18个月 2014年开始,2016年结束

武器,以及长时间情报、监视与侦察任务。

3 EOA设计方法

为解决飞机的能量问题,INVENT计划改变了现有的设

计理念,采用一种按动态需求进行设计的方法。目前,飞机系统都是按照峰值功率进行设计,这导致在功率需求低的时候效率极其低下。解决这个问题的方法就是按照整个飞行包线中的平均功率和热载荷进行设计,以避免将发电机设计得过于庞大。为了满足峰值功率需求,例如使用定向能武器,可以采用能量存储技术。为了设计具有自适应能力的动力与热管理系统,INVENT计划探索了一种基于模型的设计方法,提出了一种名为建模需求与实现计划(MRIP)^[4]的设计框架。

MRIP用动态数学模型取代静态数据表格,精确地描述系统之间的交互作用和瞬态响应。该方法详细描述了建模需求,能够综合与分析实现动态、按需的系统,并确保建模标准化,使得建立的模型和仿真的结果与实际需求逼近。根据MRIP基本原理,设计的飞机模型见图1,即“从头到尾”

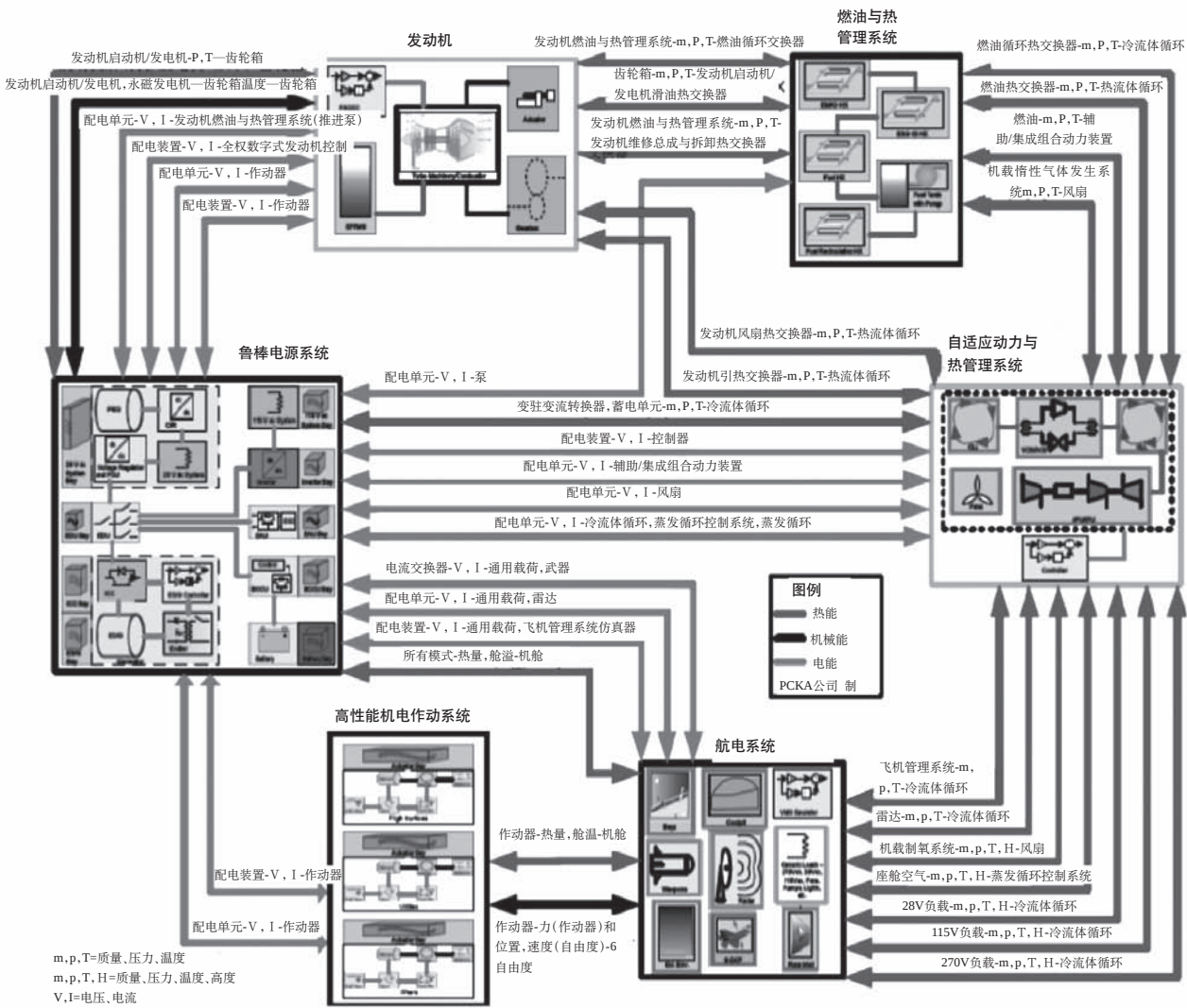


图1 基于MRIP的全机能量“从头到尾”模型
Fig.1 Aircraft energy “tip-to-tail” model based on MRIP

(tip-to-tail)模型。该模型主要由6个子系统构成,分别是发动机或推进系统、航电系统(AVS)、自适应动力与热管理系统(APTMS)、燃油热管理系统(FTMS)、高性能机电作动系统(HPEAS)以及鲁棒电源系统(REPS)。该模型不仅显示了子系统之间机械能、热量和电能的信息交换流,而且还体现了各系统之间高度的关联性。

为了确保工程目标的实现,MRIP提供部件描述以及必须实现的动作,而且需要模型建立在不同程度的保真度和运行时间性能上。MRIP的两级建模保真度分别是时段级和任务级,见图2。时段级模型致力于高带宽动态,仿真计算执行时间要比实时慢10~100倍,因此,仿真条件要限定在一个1~100s的时间周期内,即最严酷工况条件的时间段内。例如,电气系统在其中微秒级的瞬态就可造成飞机失事,瞬态叠加会对给定部件的热控制带来严重影响。任务级模型的保真度有所降低,并要求在合理的时间范围内运行整个任务。该模型的运行时间要比实际时间快10倍。两个等级的保真度是实现能量优化飞机开发的根本。两个保真度等级中的模型必须是一致的,以确保时段级和任务级模型实现无缝转换。

在电气系统的时段级仿真模型中,电能在全机的流动以及电能流经的子系统所需具备的功能如图3所示。

在热管理系统的任务级仿真模型中,热能在全机的流动以及热能流经的子系统所需具备的功能如图4所示。

优化运算时间性能是高保真度模型需要解决的关键问题之一。MRIP提供了提高运算时间性能的方法,给出了与模型保真度一致的运算时间性能参考指标等。

MRIP还定义了模型间接口的界面参数以及物理变量的方向性。例如机械动作、热交换、电流等行为特征只要在一个模型中的方向是一致的,可以定义为正或负。其目的时将不同的模型进行有效的集成。MRIP还允许修改部件模型以减少系统综合延迟时间。

此外,为了确保MRIP的一致性、模型的可操作性,INVENT项目系统综合团队还开发了脚本,用于训练模型,测试其可操作性,并验证预期的设计性能是否符合规范。在测试脚本中,多达200个模拟案例在单个模型中运行,报告会自动产生,显示模型设计性能结果,并标记出任何运行时间误差和低于指标的试验点。这些信息反馈给供应商,由他们来调试模型,消除发现的问题。测试验证过程的自动化可以为系统花费极少的时间成本,综合快速评估很多模型。此外,这些测试脚本有可能成为系统集成并进行交付时测试模型的标准。

4 EOA关键技术

能量优化飞机最关键的三个子系统是:自适应动力与热管理系统(APTMS)、鲁棒电源系统(REPS)及高性能机

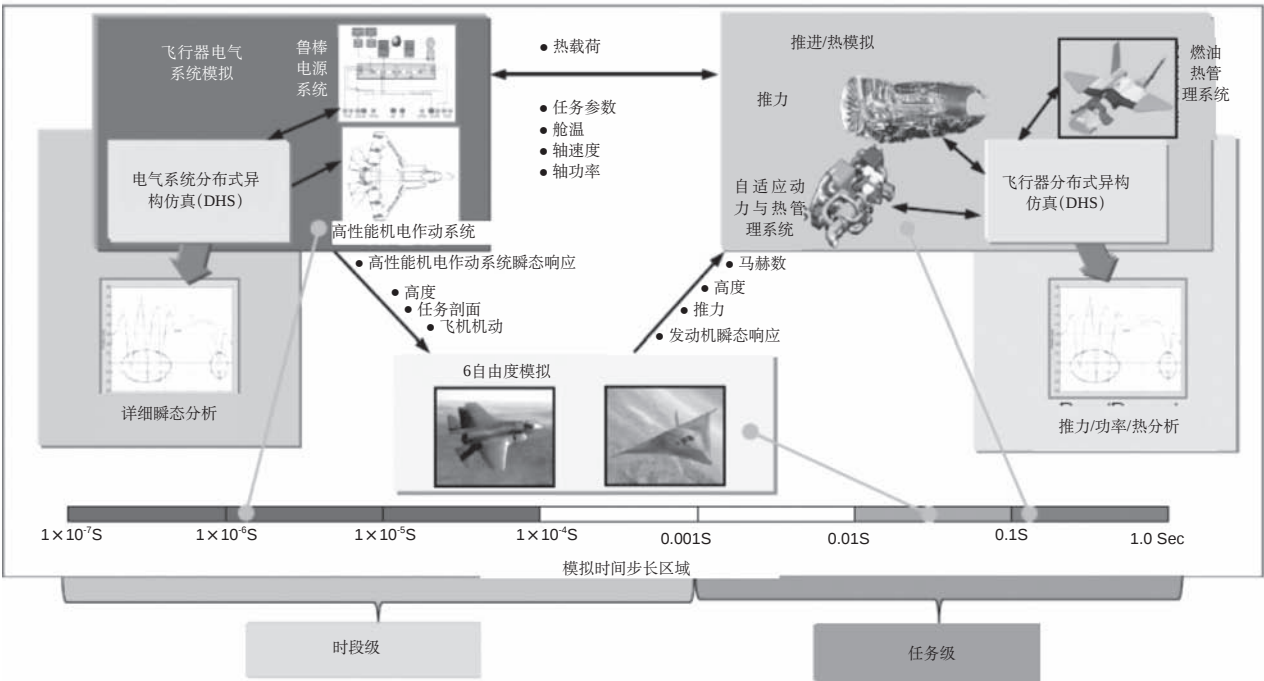


图2 时段级与任务级建模
Fig.2 Segment level and mission level model

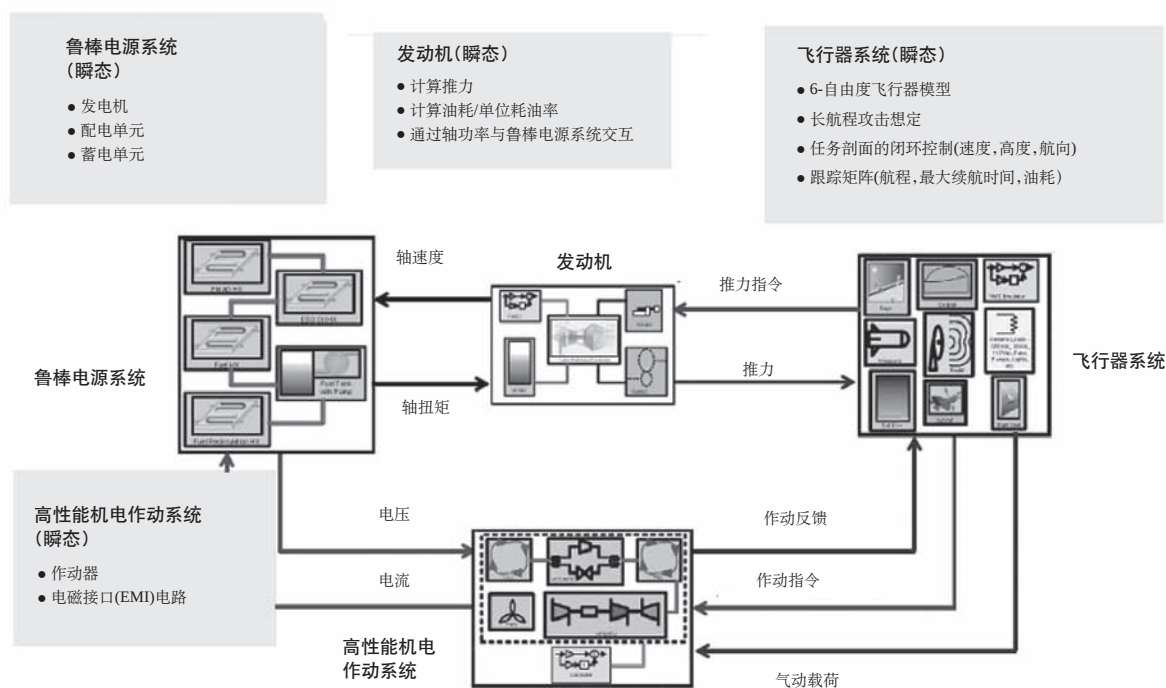


图3 电能时段级“从头到尾”模型中的流转

Fig.3 Electric energy conversion in segment level "tip-to-tail" motel

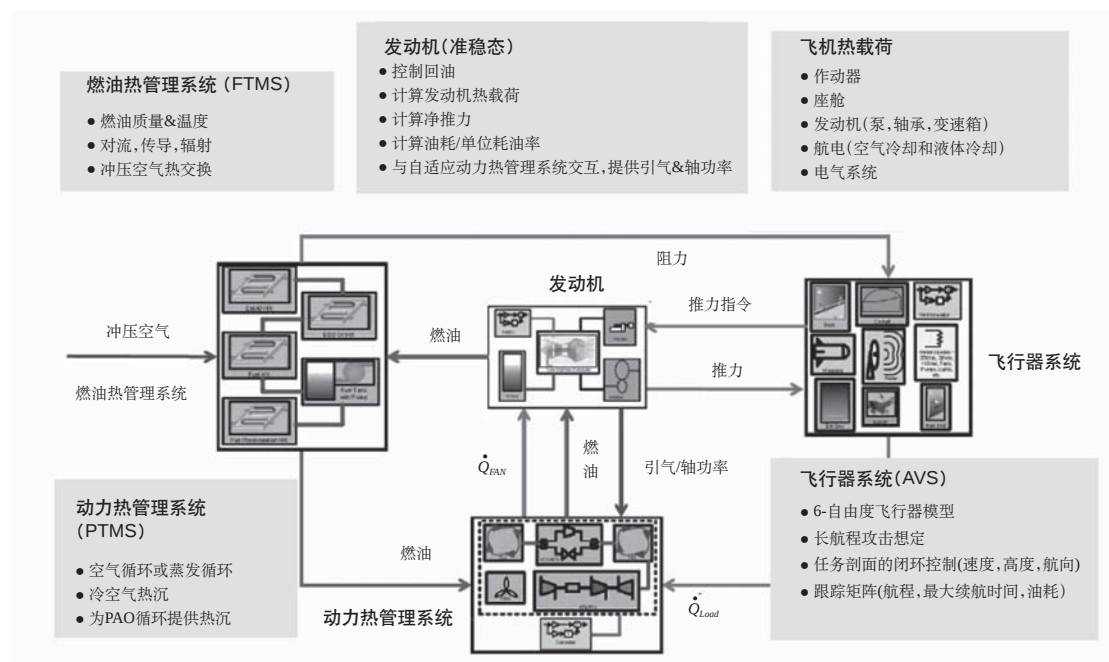


图4 热能在任务级“从头到尾”模型中的流程

Fig.4 Thermal energy conversion in mission level "tip-to-tail" motel

电作动系统(HPEAS)。2010年,发布的INVENT计划第二阶段招标书对这三个子系统应当具备的能力^[3]进行了详细阐述。

4.1 APTMS

APTMS能够根据不同工况调整工作模式,自动选择最佳动力源和热沉源。在螺旋2阶段,APTMS子系统的目标能力是:

(1) 能够自动选择最佳可用热沉(燃油、冲压空气),并探索新的热沉形式,能够自动并动态控制冷却,对载荷和燃油系统进行热管理。

(2) 需要支持低负载周期的特殊任务环境负载(如飞机自我保护、电子攻击等)瞬时高功率冷却,和/或保障冷燃油蓄能的额外峰值冷却能力。

(3) 能够通过使用燃油,和/或主动冷却/热循环冷却以及燃油热能存储来保障高功率、低负载周期的特殊任务载荷热管理。

(4) 为具有潜在热能存储的优化飞机的全机系统整合发动机和机体燃油热管理系统。

(5) 提供发动机启动所需的动力、应急动力和局部动力。

(6) 产生最少的内部热能,将飞机和发动机系统冷却液分配损失降至最低,达到最小能量消耗,并对质量、体积、可用性等飞机整体性能影响最小。

目前,APTMS由EADS的下属公司仙童控制(Fairchild Control)、诺斯罗普·格鲁门公司、PCKA公司和美国空军等负责研制,目前已经成功通过了初期的设计评审。未来,APTMS还将用最先进的部件改善系统整体性能,包括与飞机主要动力系统集成,例如主推进系统、主发电系统和飞行作动器等;采用低压级引气,减少油耗量;其涡轮机可能采用高温轴承技术、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等^[5]。

4.2 REPS

REPS的目标任务是满足峰值需求并管理再生载荷,同时为飞行关键系统提供高可靠的功率。在螺旋2阶段,REPS子系统的目标能力是:

(1) 混合电源具备按需供给能力,提供有效峰值功率,并为短期载荷(伺服系统、武器系统等)管理再生功率。

(2) 为临界飞行载荷提供高可靠功率,相当于故障防护三重安全设计性能。

(3) 考虑基于预测的方法,在增加额外硬件的场合增强路线可靠性。

(4) +270 Vdc或 ± 270 Vdc双向通道结构具备平行、多源发电的能力,双向仅用于紧急模式。

(5) 瞬态多转子高功率发电机支持低负载周期载荷,例如飞机自我保护和/或其他特殊任务载荷。

(6) 当发动机多个转子的功率用于发电时,发动机转子之间能够交换电功率。

(7) 隔离故障并迅速稳定故障能量,使其最小化,避免分配系统中引起功率中断或严重危害临界飞行载荷的故障。

(8) 具有能抵御内部和外部电磁噪声干扰的电磁接口硬件(EMI),其性能指标是Mil-Std-461标准中的数倍。

(9) 按稳态事件考虑,所有条件下的功率品质性能包括峰值和再生功率,性能指标至少符合标准Mil-Std-704F。

(10) 通过电能存储减轻峰值和再生功率的影响,使得对发动机系统影响最小化。

(11) 稳定的发电机能够使得发动机转子一直成为具有最大机械效率的系统,并使其对发动机的不利影响最小化。

罗·罗公司负责REPS子系统的设计与开发,目前项目正在研制过程中。

4.3 HPEAS

HPEAS能够为飞控、公共设备系统和发动机提供故障运行/故障安全作动。在螺旋2阶段,HPEAS子系统的目标能力是:

(1) 在宽广温度范围内的完全操作能力,包括严密输出力容差的感应和伺服功能。

(2) 当认为需要时,实现高把持载荷能力和直接旋转作动连接(例如薄机翼直接连接)。

(3) 峰值和再生功率最小化。

(4) 减少或消除发动机系统的油压热载荷。

(5) 机舱环境中被动冷却与机电作动器的发动机驱动电力综合。

(6) 故障运行/故障安全是最低要求;如果功率损失或超出温度限制则需要故障中立;所有故障模式都需要故障容错和故障隔离。

(7) 高可靠性预测与具有寿命预测的健康管理可改善失控概率和飞行损失概率。

(8) 综合各种方法进行干扰阻抗、故障预测和干扰切除,以使HPEAS系统中没有故障能引起系统级操作的中断。

目前,HPEAS系统由波音与UTC航宇系统公司(古德里奇公司和汉·胜公司重组而成)合作开发,重点进行先进作动器集成套件的设计、开发和测试。该技术将用来开发下一代战斗机和空中机动运输系统的主飞控作动系统。

5 结束语

从机电系统发展的趋势看,美国第6代战斗机将属于能量优化飞机。它强调从整体上进行能量优化,按照功率和热载荷的平均需求来设计飞机系统,并通过基于模型的设计方法来实现这一点。INVENT计划第一阶段已开发了能量优化飞机的部分技术,有些技术将用于F-35升级。第二阶段的工作目前正在进行中,AFRL计划将这些技术应用到2030年后服役的飞机上。而美国国防部EOA指导委员会计划在INVENT计划研究成果的基础上,酝酿一个更广泛的军用航空平台技术倡议,以此解决美国的飞机能量问题。 **AST**

参考文献

- [1] 孙友师.美国将能量优化飞机研究提升至国家层面[J].航空情报,2012(32).
SUN Youshi.USA Promotes the EOA to Nation Level[J]. Aeronautical Intelligence,2012(32). (in Chinese)
- [2] Steven M.Iden.Integrated Vehicle Energy Technology (Invent)

Overview[R]. 4-May-2012, AFRL.

- [3] AFRL. Integrated Vehicle Energy Technology (INVENT) Development Program for the 6th Generation Energy Optimized Aircraft(EOA)[R]. AFRL, BAA-10-03-PKP.
- [4] Eric A. Walters, Steve Iden. INVENT Modeling, Simulation, Analysis and Optimization[M]. AIAA, 2010; 287.
- [5] 罗志会,王小平,黄纯洲.新一代飞机自适应动力与热管理系统研究[J].航空科学技术,2012(5):38-41.
- LUO Zhihui, WANG Xiaoping, HUANG Chunzhou. The APTMS Study of The New Generation Aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012(5): 38-41. (in Chinese)

作者简介

王子熙(1983—)女,硕士,馆员。主要研究方向:飞行器发展研究。

Tel: 15902814955

E-mail: 93326732@qq.com

Design Method and Key Technologies of US Energy Optimized Aircraft

WANG Zixi*

Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China

Abstract: With the enhanced functions, the modern combat aircrafts are facing increasingly serious problem of power and heat consumption, the INVENT plan and the EOA concept which USA intends to solve the problem are developed. For the plan, it's background and development plan and the EOA's main object are introduced. The MRIP which is an important aircraft system energy design method is analyzed through building the "tip-to-tail" model, and the key technologies of EOA design are elaborated.

Key Words: INVENT; development plan; EOA; MRIP

Received: 2013-12-15; Accepted: 2014-02-15

*Corresponding author. Tel.: 15902814955 E-mail: 93326732@qq.com