

基于分布式控制的航空发动机 电动燃油泵方案研究

高毅军^{1,2}, 黄金泉¹, 唐世建²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘要: 研究了基于分布式控制的航空发动机电动燃油泵方案。阐述了电动燃油泵的需求背景,进行了电动燃油泵的匹配分析,提出了电动燃油泵的解决方案。着重论述了燃调系统的实现方法,以及数字电子控制器硬件和软件实现方案,分析了电动燃油泵面临的技术瓶颈。电动燃油泵已进行了半实物仿真验证,主要技术指标均满足设计要求,表明该方案具有较好的工程应用前景。

关键词: 多电发动机;电动燃油泵;燃调系统;控制器;解决方案;分布式控制系统

中图分类号: V233.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2012) S0-0036-05

Aero-Engine Electromotion Fuel Pump Based on Distributed Control

GAO Yi-jun^{1,2}, HUANG Jin-quan¹, TANG Shi-jian²

(1. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. China Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: This paper focused on the research of aero-engine electromotion fuel pump based on distributed control. The technology background and electromotion fuel pump match were introduced briefly, and the solving project was discussed in detail. It studied the fuel controller, as well as digital electronic control software and hardware schemes. The bottle-neck of technology for the aero-engine electromotion fuel pump was analyzed. The electromotion fuel pump has been demonstrated with satisfying results which indicated it would be promising in engineering application.

Key words: more electric engine; electromotion fuel pump; fuel controller; controller; solving scheme; distributed control system

1 引言

随着航空技术的不断发展,飞行器对动力装置的要求更为苛刻,现有航空发动机技术面临更大挑战,同时也迎来新的机遇。20世纪后半叶,以美国为首的欧美发达国家提出了多电发动机理念,目标是通过机电的方式复制其功能,以寻求第二动力系统的合理化解途径,使发动机结构和性能全面优化。国外早在2004年就对多电发动机技术进行了验证,目前美国和英国在多电发动机技术研究方面已取得很大进展,估计2020年前多电发动机达到实用阶段。我国在多电发动机研究方面处于探索阶段。

电动燃油泵是多电发动机的核心部件之一,其使用将对传统燃油系统产生极大影响。现役航空发动机增压泵大多采用离心泵,主燃油泵和加力燃油泵通常采用齿轮泵,这些都是定量泵。由于齿轮泵转速与发动机转速直接相关,因此在某些飞行状态下,齿轮泵提供的燃油量远高于发动机所需燃油量,为此有大量燃油重新流回燃油箱,从而导致回油温度升高,因此需要对回油进行冷却,以防止燃油系统超温^[1,2]。另外,增压泵、燃油泵安装于附件机匣上,从发动机转子上提取动力。而多电发动机不再有为燃油泵提供机械传动轴的附件机匣,为此提出了电动燃油泵这一概念。具有智能控制器的电动燃油泵

收稿日期: 2012-02-17; 修回日期: 2012-05-24

作者简介: 高毅军(1975-),男,甘肃天水人,高级工程师,主要从事航空发动机燃油与控制系统研究。

转速与发动机转速无关,电动燃油泵根据发动机需要调整电机转速来控制燃油量,无需燃油流回。这减轻了系统重量,降低了系统复杂性,增加了系统可靠性。我国在电动燃油泵研究方面还处于起步阶段。

本文提出了基于DSP分布式控制的电动燃油泵解决方案,重点阐述了电动燃油泵的系统组成和工作原理,分析了设计中面临的技术瓶颈,提出了解决问题的途径。

2 解决方案

2.1 电动燃油泵匹配分析

电动燃油泵采用变速组合泵作为其机械液压系统实现方案。变速组合泵能解决燃油调节器回油和燃油温度升高问题,使发动机功率匹配更加合理,有效提高发动机效率。传统发动机燃油泵增压值与发动机转速的平方成正比,起动时,由于发动机转速低,燃油泵出口压力达不到燃烧室喷嘴雾化燃油的压力值。而变速组合泵可由变频高速低惯量电动机提供动力,起动过程中不受转速限制,能根据发动机状态需求随时调节电机转速,使出口压力满足燃油雾化要求。

小流量状态工作时,可降低驱动电机转速,使出口压力等于负载所需值,无节流损失,提高了效率。如图1所示,在设计点A工作时,对应设计流量 Q_s 的压力 P_s 正好等于负载,A点无压力损失。若在 Q_1 点工作,则转速 n 时,泵的供给压力为 P_1' ,而负载所需压力为 P_1 ,必将造成节流损失,效率降低,燃油温升提高。此时若将转速由 n 降至 n_1 ,则泵的出口压力 P_1 正好等于负载,无节流损失,效率相对提高,燃油温升减小。当然,若在 Q_2 点工作,效果会更好。

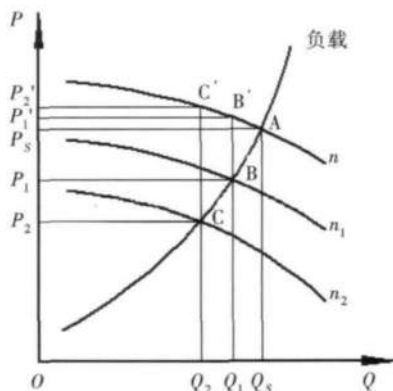


图1 电动泵流量压力特性曲线

Fig.1 The characteristics of electromotion pump flow pressure

根据发动机主、副油路喷嘴特性,可获得电动泵流量压差性能曲线,如图2所示。图中, ΔP_{f1} 和 ΔP_{f2} 分别为主、副油路压差, ΔW_{f1} 和 ΔW_{f2} 分别为主、副油路流量。从图中可知,曲线的规律性较好。

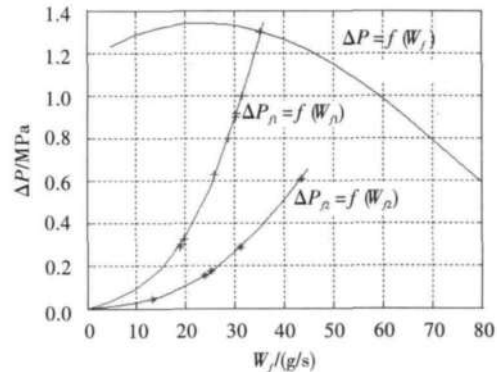


图2 电动泵流量压差性能曲线

Fig.2 The differential pressure performance of electromotion pump flow

为提高小于设计流量区段泵的效率,及充分利用大于设计流量的泵的高效率区段,电动燃油泵的设计参数为:

$$\Delta P_{f1} = f(W_{f1})$$

$$\Delta P_{f2} = f(W_{f2})$$

$$Q_{sj} = 0.8W_{f\text{总}}$$

$$P_{sj} = 1.8 \text{ MPa} + 0.8\Delta P_c$$

式中: $W_{f\text{总}}$ 为总流量, Q_{sj} 为设计流量, P_{sj} 为设计压力, ΔP_c 为控制器计算的压差。

2.2 系统组成

电动燃油泵结构如图3所示,由电动燃油泵电子控制器、组合泵、功率变换模块和电机等部件构成。其动力装置为高速开关磁阻电机,燃油系统采用组合泵方案,离心泵和齿轮泵设计为同轴组合泵。电动燃油系统采用分布式控制方式,通过控制电机转速向发动机燃烧室提供所需燃油,并按发动机要求对燃油流量进行调节,确保发动机可靠工作。

2.3 组合泵方案

发动机控制系统采用分布式架构,电动燃油系统为发动机控制系统的一个子系统。发动机控制系统与各子系统之间通过CAN总线传输信息,向发动机各系统发布控制指令^[3]。电动燃油泵电子控制器通过CAN总线接收控制系统发出的工作指令,控制开关磁阻电机,电机驱动离心增压泵和齿轮泵工作。离心增压泵保证齿轮泵泵前压力在既定范围内,避免齿轮泵产生汽蚀。

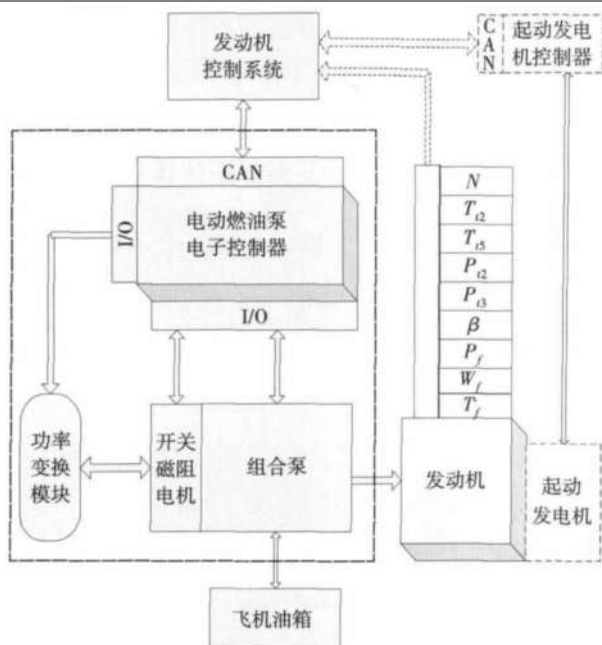


图3 电动燃油系统结构框图

Fig.3 The structure of electromotion fuel system

组合泵是电动燃油泵的重要部件,如图4所示,燃油系统由组合泵、旁路活门、电机、燃油滤、换向电磁阀、最小压力活门、温度传感器和电子流量计组成。

组合泵的工作原理为:电动燃油泵电子控制器实时计算发动机所需燃油量,发出控制指令,调节电机转速对燃油流量进行控制;在发动机主、副油路上,通过电子流量计进行测量,将采集的信号传输给电动燃油泵电子控制器,电动燃油泵电子控制器根据实际流量需求和反馈求差值,通过电机转速实施流量调节,实现燃油流量的闭环控制。发动机工作时,换向电磁阀通电,最低压力活门和主油路开启活门的弹簧腔与系统低压油接通,防止弹簧腔为死腔。

燃油经齿轮泵增压后到达最低压力活门,当燃油压力达到设计值时,最低压力活门打开,燃油通过副油路进入燃烧室;当燃油压力进一步升高达到某一值时,主油路开启活门打开,燃油同时经主油路和副油路进入燃烧室。

发动机停车时,换向电磁阀断电,此时弹簧腔与系统低压油断开,泵后高压燃油进入弹簧腔,迅速使弹簧腔油压与活门前油压平衡,活门在弹簧力的作用下迅速关闭,截断通往燃烧室的燃油,控制发动机停车。

电动燃油泵燃油系统将离心增压泵与齿轮泵设计为同轴组合泵,主泵为离心泵,开关磁阻电机通过

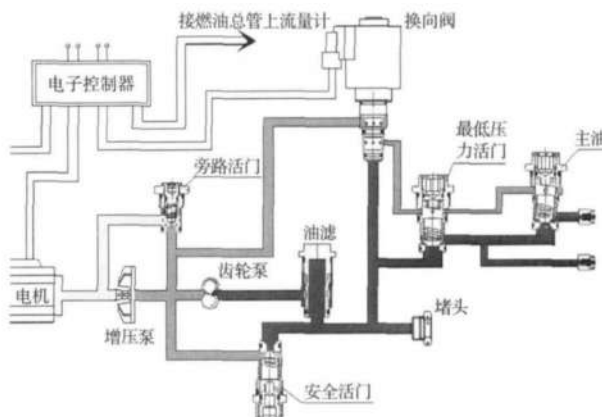


图4 电动燃油泵燃油系统原理图

Fig.4 The principle of electromotion fuel pump system

传动轴为其提供动力。离心泵设计在齿轮泵前,以保证齿轮泵进口压力的稳定性。在离心泵出口设计了旁路活门,其打开压力在一定区间连续可调。旁路活门设计为单元件,其调整位置为活门端头调整钉。齿轮泵止推轴承设计为动止推轴承和静止推轴承。动止推轴承在弹簧力作用下可在端面磨损的情况下使轴承自动补偿,以保证端面间隙,从而保证组合泵供油效率。齿轮泵轴端采用浮动密封装置,密封性好、可靠性高。电动燃油泵壳体外形如图5所示。

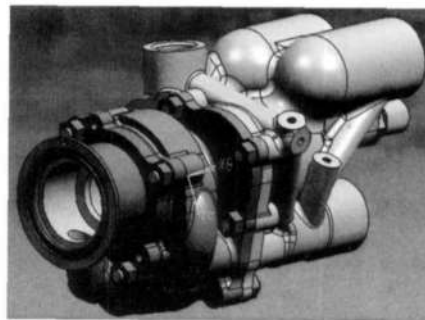


图5 电动燃油泵三维图

Fig.5 The three-dimensional diagram of electromotion fuel pump

2.4 电机方案

电动燃油泵驱动装置采用开关磁阻电机方案,电源电压为270 V(直流),输出功率约为1 kW,采用燃油循环冷却方式,其冷却燃油由增压泵提供。开关磁阻电机镶嵌在燃油泵壳体内,采用一体化结构。开关磁阻电机采用12/8结构,电机绕组展开图如图6所示,其定子极12个齿极上分别绕制集中绕组,每极27匝。空间相差90°的四个极上的绕组相互并联为一相,当该相绕组通电时,相邻两极的极性相反。

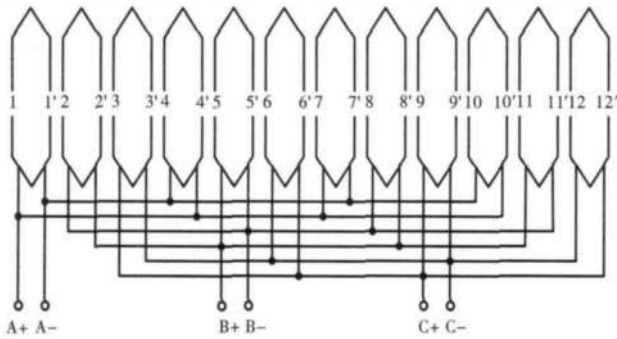


图6 电机绕组展开示意图

Fig.6 The sketch of electromotor

2.5 电动燃油泵电子控制器方案

航空发动机控制系统要求采用高集成度、耐高温的电子元器件构建智能化的,部件之间采用高速总线的分布式控制^[4],电子控制器电子器件的工作温度有望达到200℃。分布式控制结构如图7所示。系统可靠性由数字控制器中的双冗余电子通道、备份传感器、备份执行机构、冗余CAN总线、高可靠性的元器件、燃油泵传动装置、抗干扰控制算法、发生故障时恢复信息和重构控制、系统的内部自监视和自诊断等保证。

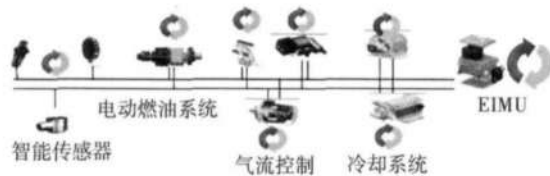


图7 分布式控制结构图

Fig.7 The distributed control structure

电动燃油泵电子控制器采用分布式控制器,与发动机控制器之间的数据交换通过CAN总线来实现^[4],其原理见图8。主要功能是控制开关磁阻电机以实现发动机燃油的控制。硬件主要包括DSP处理器,位置检测电路,电流检测电路,倍频电路,过流、过压及欠压保护电路,D/A转换电路,转速输入输出电路,逻辑电路及驱动电路等。

电动燃油泵电子控制器工作原理是:数字电子控制器根据位置检测器检测到定、转子间相对位置信息,通过接受发动机控制器给定的工作指令,开通相应定子相绕组的主开关元件,此时对应相绕组中有电流流过,产生磁场。磁场总是趋于磁阻最小,而产生的磁阻性电磁转矩使转子转向极对极位置。当转子转到被吸引的转子磁极与定子激磁相重合(平衡位置)时,电磁转矩消失,控制器根据新的位置信

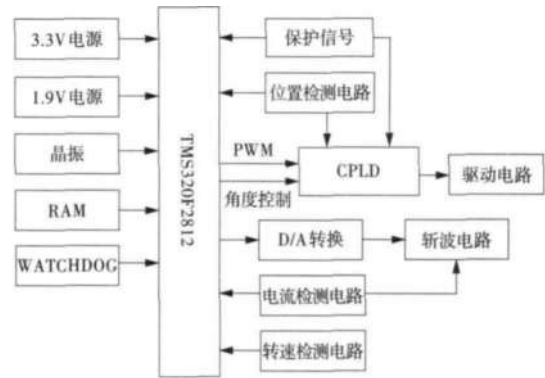


图8 电动燃油泵电子控制器原理图

Fig.8 The principle of electronic controller in electromotion fuel pump

息,在定、转子即将达到平衡位置时向功率变换器发出命令,关断当前相的主开关元件,导通下一相,则转子向下一个平衡位置转动。控制器根据相应的位置信息,按一定控制逻辑连续导通和关断相应相绕组的主开关,可产生连续同转向的电磁转矩,使转子在一定转速下连续运行;再根据一定的控制策略控制各相绕组的通、断时刻及绕组电流的大小,可使开关磁阻电机在既定条件下运行,满足向发动机供油的需求。

2.6 控制软件

电动燃油泵电子控制器的控制软件利用面向对象的高级语言编写,采用模块化设计,程序的可读性好,便于读写和修改。控制策略采用角度优化+PWM控制。通过最优导通角加PWM控制策略的方式进行控制,可保证电机具有较好的控制性能。最优导通角和转速关系存于电子控制器ROM中。PWM控制采用斩单管策略(即对于每一相,下桥臂PWM斩波,上桥臂恒通),可减小转矩脉动,减小开关管损耗50%。控制软件流程如图9所示。

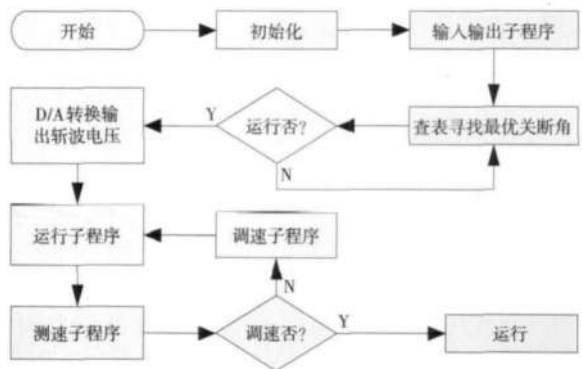


图9 控制器软件流程框图

Fig.9 The flow chart of control software

3 方案验证

电动燃油泵已在试验室条件下进行了半实物仿真验证,其主要技术指标均已达到设计要求,表明该设计方案可行,为深入开展电动燃油泵的研究奠定了坚实基础,也为多电发动机突破关键技术提供了第一手资料。

4 结束语

我国已具有数十年液压机械控制产品的研发经验,掌握了较为先进的设计、工艺、测试等技术^[5],使电动燃油泵的研制成为可能。

电动组合泵是目前电动燃油泵研究的主流方向。它增加了系统对燃油的抗污染能力,提高了燃油系统小流量效率,将小流量时燃油温度升高降到最低,获得了更高的工作效率。电动燃油泵采用高速低惯量电机驱动,但目前的技术瓶颈是电机转动惯量大、动态响应性差,加之电机的温度升高严重影

响电机效率,电动组合泵是在综合考虑这些因素后提出的。另外,减小电机的体积和质量、增加系统动态性能、冷却电机定子、提高系统可靠性,是工程设计阶段必须面对和解决的难题。

参考文献:

- [1] 胡晓煜. 罗尔斯-罗伊斯公司引领未来多电发动机技术[J]. 中国民用航空, 2003, 33(9): 60—62.
- [2] 张绍基. 航空发动机燃油与控制系统的研究与展望[J]. 航空发动机, 2003, 29(3): 1—5.
- [3] 张娟. 先进飞机中燃油系统的综合化控制与管理[J]. 航空计算技术, 2008, 38(2): 96—99.
- [4] Thompson H A. A CAN Bus-Based Safety-Critical Distributed Aeroengine Control Systems Architecture Demonstrator[J]. Microprocessors and Microsystems, 1999.
- [5] 刘铭, 黄纯洲, 李勤. 飞机机载机电系统多电技术的发展现状[J]. 航空科学技术, 2005, (6): 10—13.
- [6] Denton J D. Loss Mechanism in Turbomachines[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115: 621—656.
- [7] Puterbaugh S L, Brendel M. Tip Clearance Flow-Shock Interaction in a Transonic Compressor Rotor[R]. AIAA 95-2549, 1995.
- [8] Doukelis A. The Effect of Tip Clearance Gap Size and Wall Rotating on the Performance of a High-Speed Annular Compressor Cascade[R]. AIAA 2005-4024, 2005.
- [9] Saha N, Ma R, Devenport W J. Characterizing Unsteady Periodic Disturbances in the Tip Leakage Vortex of an Idealized Axial Compressor Rotor Blade[R]. AIAA 2001-0386, 2001.
- [10] Choi M, Baek J H. Role of the Hub-Corner-Separation on the Rotating Stall[R]. AIAA 2006-4462, 2006.
- [11] 熊宇飞. 转子叶尖间隙测量在风扇和压气机性能试验中的应用[J]. 航空发动机, 2002, 28(1): 20—23.
- [12] 袁巍, 周盛, 陆亚钧. 压气机间隙流与处理机匣作用的三维数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 885—888.
- [13] Smith G D J, Cumpsty N A. Flow Phenomena in Compressor Casing Treatment[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106: 532—541.

(上接第35页)

0.5 mm)内,随着叶尖间隙的增大,流量、压比、效率都有不同程度的下降,其中压比下降最少,效率下降明显。

(2) 当转子叶尖间隙从0.0 mm变化到0.2 mm时,效率下降不是很明显;当转子叶尖间隙从0.2 mm增大到0.5 mm时,效率大幅下降。

(3) 转子叶尖间隙的变化不仅影响叶片尖部的气流角,同时影响整个叶高范围内的流动,并且这种影响逐级累加,对后面级影响最大。

(4) 随着转子叶尖间隙的增大,叶尖区间隙流能量逐渐增大,造成叶片通道内流动损失增大,同时造成流动堵塞。

(5) 间隙流与激波相互作用,会改变激波结构,影响叶片扩压能力。

参考文献:

- [1] Smith G D J, Cumpsty N A. Flow Phenomena in Compressor Casing Treatment[J]. Journal of Engineering for Gas