

一种小型涡扇发动机多电控制系统设计

唐钰婷, 仇小杰

(中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要: 针对小型涡扇发动机控制系统轻质量、低成本、智能化的研制需求,以小型涡扇发动机为控制对象设计了一种多电控制系统。在该多电控制系统方案中,发动机控制器采集传感器信号、接收一体化制导机操纵指令,按供油规律控制电动燃油泵供油,实现发动机燃油控制。详细介绍了系统的总体设计和闭环控制算法设计,以及关键部件发动机控制器和电动燃油泵的设计。该多电控制系统已完成了工程实现和试验验证,试验结果表明,设计的多电控制系统可满足小型涡扇发动机的燃油控制要求,具有良好的应用前景。

关键词: 航空发动机;多电发动机;多电控制系统;电动燃油泵;燃油控制

中图分类号: V213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2021) 06-0018-04

A more electric control system for small turbofan engine

TANG Yu-ting, QIU Xiao-jie

(AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: To meet the development needs of light weight, low cost, intelligence of small turbofan engine control system, a more electric control system was designed, for which a certain turbofan engine was taken as the control object. The engine controller collected the sensor signals, received the control instructions from the integrated guidance machine, and controlled the fuel supply of the electric fuel pump according to the fuel supply law to realize the engine fuel control. The overall design of the system, the design of the closed-loop control algorithm, and the design of the key components like engine controller and electric fuel pump were introduced. Engineering implementation and test verification of the system were also completed. The test results show that the designed more electric control system can meet the fuel control requirements of small turbofan engines and has a good application prospect.

Key words: aero-engine; more electric engine; more electric control system; electric fuel pump; fuel control

1 引言

自20世纪90年代起,市场对作为小型飞行器动力装置的小型涡轮发动机的需求量逐步增大。同时,随着电力电子技术的发展,国外很多发达国家已着手进入多电发动机应用领域^[1-4]。发动机控制系统是多电发动机的核心之一,先进的数字电子控制系统已经开始发展电力驱动、智能化、分布式的控制技术^[5-6],对发动机控制系统降低复杂性、减轻质量、提高可靠性、改善维修性和降低成本提供了切实可

行的解决途径^[7-10]。目前,国外围绕小型涡轮发动机研制配套的多电控制系统已经较为成熟,开始形成系列化发展格局;而国内对小型涡轮发动机应用多电控制系统的技术研究和工程化实现,是未来航空发动机控制技术的重要发展领域^[11]。

本文以某小型涡扇发动机为应用对象,针对其提出的对控制系统进行改进设计,以小体积、轻质量、低成本、高可靠性为改进目标,在保持发动机原有主要控制功能和控制规律不变的基础上,设计了一种结构简单、灵活智能的多电控制系统,同时完成

收稿日期: 2021-06-24

作者简介: 唐钰婷(1988-),女,四川成都人,工程师,硕士,主要从事航空发动机控制系统总体设计与研究。

了系统的工程实现和试验验证。

2 控制系统设计

2.1 总体方案设计

根据该型涡扇发动机单转子、几何不可调节的结构特点,多电控制系统设计为图1所示的典型单变量控制系统,控制量为燃油流量,被控量为发动机转速。

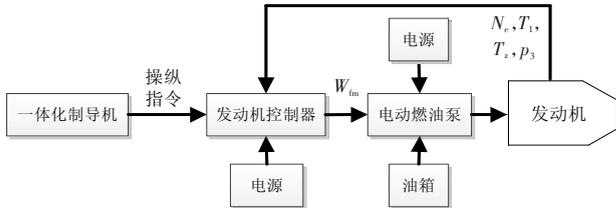


图1 多电控制系统总体方案

Fig.1 The overall design scheme of the more electric control system

发动机控制器实时采集发动机工作参数(发动机物理转速 N_e 、进口温度 T_1 、风扇后温度 T_2 、压气机后压力 p_3 等)并接收一体化制导机通讯发送的操纵指令(飞行高度 H 、目标转速 N_{cor} 、起动指令等),按照发动机控制规律计算出所需的燃油给定 W_{fm} ,然后通讯发送给电动燃油泵,通过精确控制电机转速来实现供油流量的调节,从而控制发动机的各个工作状态,实现发动机的起动、加速、巡航、停车等控制功能及其他限制功能。

此方案具有分布式控制的优点,将电动燃油泵转速与发动机转速解耦。电动燃油泵只作为整个控制系统的供油执行部件,按核心计算控制单元的指令对燃油流量进行精确控制。电动燃油泵的控制有明显的功率特征,其分布出来成为一个智能节点后,也降低了系统的复杂性,提高了系统的可靠性。同时,电动燃油泵的供油模式为按需供油,直接根据发动机的需要控制燃油流量,无需回油,降低了发动机

油耗。

2.2 闭环控制算法设计

根据发动机对控制系统的控制需求,确定控制系统的控制回路为转速控制回路,即通过控制发动机燃油流量进行发动机工作状态控制。控制系统的闭环控制算法原理见图2。发动机控制器内部的闭环控制通过接收到的转速指令和采集到的转速反馈计算出对应状态下的燃油流量给定,并发送给电动燃油泵;电动燃油泵内部构建以速度环为外环、电流环为内环的双闭环控制结构,依据接收到的燃油给定指令实现电机转速的快速调节,进而改变齿轮泵输出给发动机的燃油流量。

由此闭环控制算法原理可知,控制系统已经构成了发动机转速的外闭环和电动泵转速的内闭环的两个回路的串级控制,在内回路中抑制电动燃油泵对象的干扰,降低对发动机对象的影响,同时提高系统的响应速度和控制精度。

2.3 发动机控制器设计

发动机控制器是控制系统的核心控制单元,要负责与一体化制导机的指令交互及信息反馈,完成规定的发动机供油时序和供油量计算,作为中央控制器和子控制器一起完成发动机的起动、稳态和过渡态控制,以及工作状态监视和故障诊断、隔离的任务。发动机控制器的设计包括硬件设计和软件设计,同时需要兼顾小型化、易扩展的要求。

依据本多电控制系统的方案规划,发动机控制器硬件需要具备以下功能:

- (1) 为传感器提供激励电源;
- (2) 对传感器信号进行采集处理;
- (3) 开关量输入信号采集;
- (4) 对控制输入和控制输出进行转换;
- (5) 提供嵌入式软件运行的CPU平台,提供相应中断源;
- (6) 协同控制软件可实现的自检;

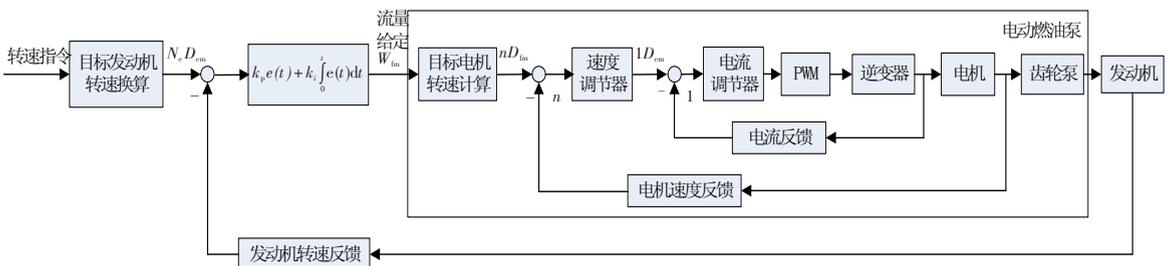


图2 控制系统闭环控制算法原理

Fig.2 Schematics of the control system closed-loop control algorithm

- (7) 电源监测和看门狗；
- (8) 与一体化制导机、电动燃油泵双向通讯。

发动机控制器结构原理如图3所示,主要由信号处理模块、输入模块、控制模块、输出模块、隔离驱动模块、通讯模块和电源模块等组成。

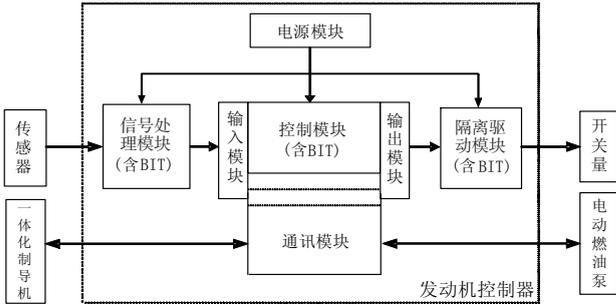


图3 发动机控制器结构原理

Fig.3 Structure schematic diagram of engine controller

发动机控制器软件为嵌入式软件,加载在发动机控制器内部,采用定时中断的方式达到实时性要求,负责实现硬件底层接口编程、数据采集、通讯处理和应用层控制算法、控制规律、控制策略。控制软件总流程如图4所示。

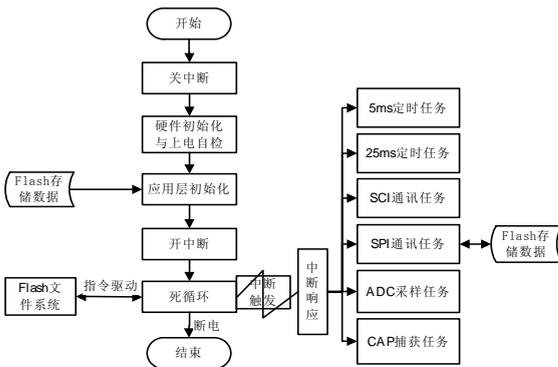


图4 控制软件总流程

Fig.4 Control software flow chart

2.4 电动燃油泵设计

考虑该型发动机的使用特点和质量、体积与成本,电动燃油泵采用一体化设计,主要由永磁同步电机、电机控制器、燃油齿轮泵、定压活门、起动电磁阀、燃油分布器等组成,如图5所示。根据电动燃油泵负载特性,在泵前、泵后压力不变时,电动燃油泵转速与燃油流量成特定关系。电动燃油泵工作时,电机控制器根据接收到的燃油流量给定计算出电机转速,通过精确控制与电机转轴固连的燃油齿轮泵的转速来调节供油量,燃油经过燃油分布器后进入发动机。

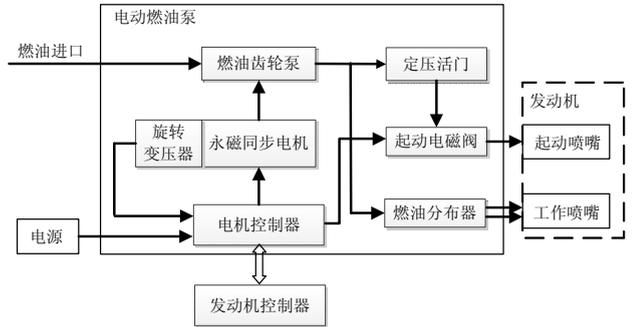


图5 电动燃油泵工作原理

Fig.5 Schematics of the electric fuel pump

电机选用体积小、质量轻、功率密度高、过载倍数大、发热量小、效率高的永磁同步电机。电机控制器作为电动燃油泵的关键部件,负责处理电动燃油泵与发动机控制器的通讯,并完成电机功率驱动、传感器信号(绕组温度、绕组电流、旋转变压器)和开关量输入信号采集、回路(转速环、电流环)闭环控制、起动电磁阀驱动等功能,内部加载电动燃油泵的控制软件。永磁同步电机选取矢量控制技术控制,其相对于直接转矩控制,输出转矩更平稳,电流利用率更高,具有更好的启动、制动性能。永磁同步电机矢量控制的电流控制策略选取转矩电流比最大控制,相比其他控制方式可输出的力矩更大,电磁损耗也更小。

3 试验验证

3.1 半物理模拟试验

在半物理模拟环境中进行试验,以验证设计的多电控制系统的控制效果。发动机采用模型,发动机控制器和电动燃油泵采用实物,传感器采用DA输出进行动态模拟。以控制系统稳态和加减速试验为例,发动机转速闭环控制试验曲线见图6,电动燃油泵转速闭环控制试验曲线见图7。图中, N_{eg} 为发动机物理转速给定, n_{Dem} 为电机转速给定, n 为电机转速反馈。图6中发动机转速稳态控制精度为 $\pm 0.02\%$,加速时间为2.9 s,减速时间为3.65 s。

半物理模拟试验结果表明,该多电控制系统可以保证发动机稳定工作,性能指标满足设计要求,可以参加发动机地面台架试车。

3.2 发动机地面台架试车

发动机地面台架试车结果如图8所示,包含发动机起动、慢车、稳态、过渡态和停车的整个地面试车动态特性曲线。由图可知,整个试车过程中,该多

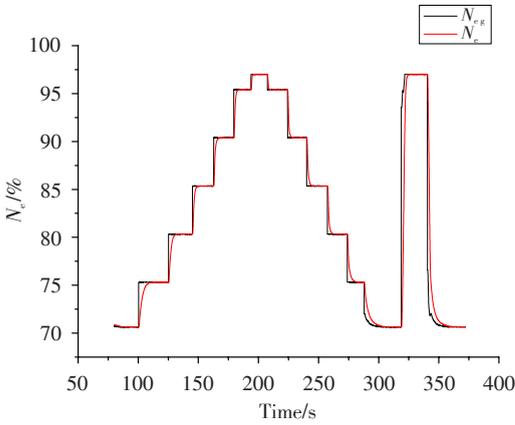


图6 发动机转速闭环控制半物理试验曲线
Fig.6 Engine speed closed-loop control curve of semi physical test

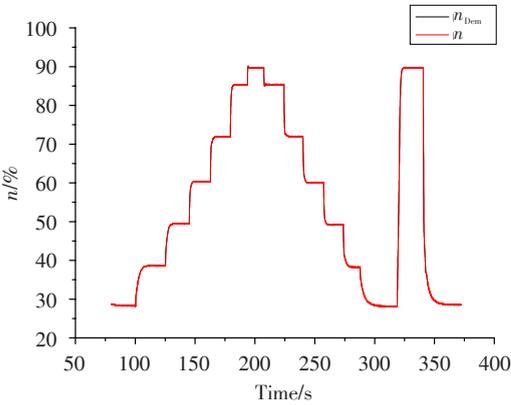


图7 电动燃油泵转速闭环控制半物理试验曲线
Fig.7 Electric fuel pump speed closed-loop control curve of semi physical test

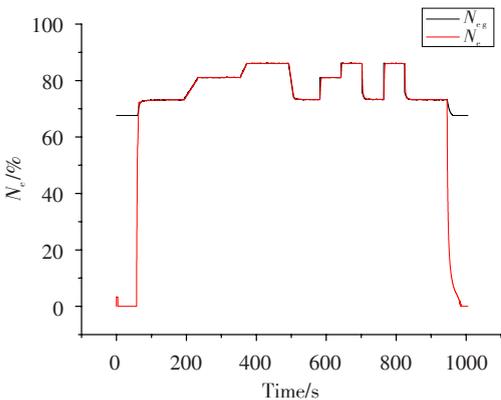


图8 发动机地面台架试车曲线
Fig.8 Engine ground test curve

电控制系统具有良好的控制效果,实现了预定的功

能性能,满足发动机使用要求。

4 结论

结合某小型涡扇发动机改进燃油控制系统的需要,依据发动机的应用背景和研制诉求,设计了一种小型涡扇发动机多电控制系统。针对发动机对象的特点,设计了控制系统的多电分布式总体方案,并在此方案基础上根据控制需求设计了系统闭环控制算法,对关键部件设计提供了解决方案,降低了系统的复杂性,提高了系统的可靠性。设计的小型涡扇发动机多电控制系统完成了工程实现,并在半物理模拟试验环境和地面台架试车环境进行了试验验证,结果表明其可满足小型涡扇发动机的控制要求,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Brand J H, Dooley K A, Dowhan M J, et al. More electric small turbofan[R]. SAE Technical Paper Series 2004-01-1804, 2004.
- [2] Newman R. The more electric engine concept[R]. SAE Technical Paper Series 2004-01-3128, 2004.
- [3] Hirst M, McLoughlin A, Norman P J, et al. Demonstrating the more electric engine: a step towards the power optimised aircraft[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5 (1):3—13.
- [4] McLoughlin A. Engine powerplant electrical systems[R]. MOET Project Consortium, 2009.
- [5] 王 曦,程 茵. 国外航空推进控制技术的发展[J]. 航空发动机, 2009, 35(3):6—8.
- [6] 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.
- [7] 高毅军,黄金泉,唐世建. 基于分布式控制的航空发动机电动燃油泵方案研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25:36—40.
- [8] 孙环宇,苏三买. 微型涡轮发动机电动供油流量控制系统设计[J]. 测控技术, 2008, 27(8):53—58.
- [9] 刘 桐. 电动燃油泵结构设计与控制系统研制[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [10] 张 宏. 智能电动泵在发动机燃油控制系统中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [11] 姚 华. 航空发动机全权限数字电子控制系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2014.