

文章编号: 1000-8055(2007)02-0274-06

微型涡轮发动机快速原型 控制系统

张天宏, 王继业

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 提出一种基于工业控制计算机的面向微型涡轮发动机(MTE)控制的快速原型控制系统。它提供完整的与执行机构及传感器电路的接口,并提供基于 Windows 平台的控制器软件实时开发环境。快速原型设计技术可以极大地提高嵌入式控制系统的开发效率。基于该快速原型控制系统不但可以实现对发动机的控制,而且可以实时记录试验结果,并提供友好的人机界面,后者对发动机控制系统的试验研究是非常重要的。台架试车表明,该快速原型控制系统是切实有效的。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 微型涡轮发动机; 快速原型; 控制系统; Windows; 台架试车
中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A

A rapid prototype control system for micro turbine engine

ZHANG Tian-hong, WANG Ji-ye

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To meet the requirements of micro turbine engine (MTE) control, this paper proposed a kind of rapid prototype control system based on the industrial control computer, which can provide integral interface for actuators and sensors of the MTE control system and Windows-based real-time control software development environment. The technology of rapid prototype can significantly improve the development efficiency of embedded control systems. This rapid prototype control system can not only control MTE, but also log the experimental results in real-time with friendly man-machine interface, which is very important for MTE control study. The effectiveness of this rapid prototype control system was validated by a series of test bed experiments.

Key words: aerospace propulsion system; micro turbine engine (MTE); rapid prototype; control system; Windows; test bed experiment

快速原型控制属于系统仿真和开发方法学的范畴^[1]。它是指在产品开发的初期,通过快速地建立控制对象和控制器的模型,对相应的控制模型或控制算法进行多次离线和在线的试验来验证控制系统软硬件方案的可行性。快速原型控制技术

的特点是,软硬件开发环境开放、控制方法和控制策略柔性化、控制算法和逻辑处理易于实现,提供直观、易用、实时的人机交互开发界面,更进一步地可以提供对最终目标产品程序代码的自动生成。

收稿日期: 2006-01-09; 修订日期: 2006-03-29

基金项目: 国防科研基金重大资助项目

作者简介: 张天宏(1968-),男,江苏仪征人,南京航空航天大学能源与动力学院副教授,博士,主要从事航空发动机控制与测试技术研究。

对于复杂的嵌入式控制系统,采用快速原型控制技术可以极大地提高开发效率和研究水平,克服传统的基于实际物理平台的设计方法耗时长、成本昂贵和风险高的缺点^[2,3].

航空发动机电子控制系统是典型的复杂嵌入式控制系统^[4].其中的电子控制器,它担负着对飞行环境和发动机工作状态的采集、控制逻辑和算法的处理、控制指令的实施以及与飞机系统的通信等重要任务,它具有任务复杂、实时性强、可靠性要求高的特点.因此,快速原型控制技术对于航空发动机电子控制系统的研制具有重要意义.

本文针对某 MTE,基于工控机的软硬件环境,建立了快速原型控制系统.它提供完整的与执行机构及传感器电路的接口,提供基于 Windows 平台的控制器软件实时开发环境.基于该系统,开展了发动机的台架试验研究.

1 MTE 控制系统的基本原理

本文的控制对象是一种厘米级的单转子涡轮喷气发动机,它的额定转速为 150 000 r/min,额定推力 60 N^[5].它采用高速直流电机起动,带动离心式压气机转子,为预燃燃料丙烷的燃烧提供合适的气流量;丙烷点燃后产生高温,使主燃料煤油蒸发气化;气化的煤油在燃烧室燃烧推动涡轮工作.图 1 是该发动机控制系统组成示意图^[6].电子控制器(ECU)根据转速信号 n , 尾气温度信号 t_a 和油门杆指令信号 p_{th} , 产生控制指令,控制起动电机、点火器、丙烷阀、燃油阀和燃油泵等执行机构动作,并指示发动机的当前状态.

相对于一般的大型航空发动机,该 MTE 的

起动控制过程比较复杂^[7,8].这种微型发动机因为尺寸小、转速范围宽、空气流量小、对燃油流量大小变化比较敏感,经常导致起动过程悬挂而失败.起动控制的难点在于,需要协调好各执行机构的动作时机,并确定合适的起动供油规律.

2 快速原型控制系统设计

快速原型控制系统设计的要点在于:把握好设计需求,从快速性、有效性的角度制定总体方案;通过选择或设计合适的硬件接口建立硬件平台;通过选择合适的软件开发环境,从软件设计的实时性、可靠性以及使用和维护的方便性角度进行软件设计.

2.1 总体方案

作为 MTE 的控制平台,该快速原型控制系统需要具备的特征是:(1)高精度的定时机制,要满足毫秒级的控制步长需要,这是实时控制的基础;(2)开发和维护的方便性,即要便于修改控制算法和参数,便于硬件资源的配置和软件的更新;(3)实时状态监视,即对试验过程中的状态参数进行实时采集、显示、记录,这是试验研究的重要手段;(4)安全可靠,要求提供软硬件的安全保护措施,防止发生意外,在危险发生时可以采取紧急保护手段;(5)试验结果的后处理,能进行数据回放分析,便于改进控制规律;(6)易于移植到目标控制器.

基于上述需求分析,提出了一种基于工业控制计算机(工控机)的快速原型控制系统设计方案,它提供完整的与执行机构及传感器电路的接口,提供基于 Windows 平台的控制器软件实时开

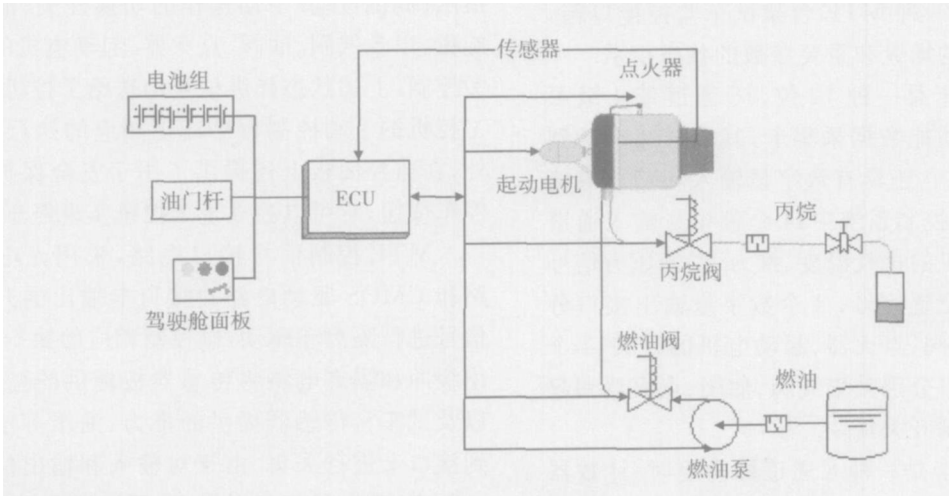


图 1 MTE 控制系统组成原理
Fig. 1 Framework of the MTE control system

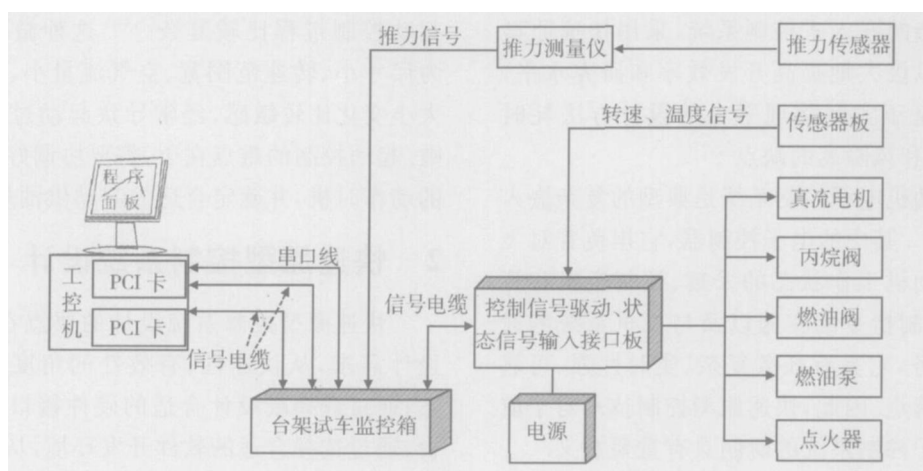


图2 基于工控机的快速原型控制系统总体结构

Fig. 2 Architecture of the rapid prototype control system based on industrial control computer

发环境. 该快速原型控制系统的总体结构如图2所示.

快速原型控制系统包括硬件和软件两部分. 硬件部分由工控机、PCI板卡、监控箱、驱动电路、执行机构和传感器板等组成. 软件运行于工控机中, 用来控制各执行机构的开关状态、控制油泵供油量的大小、采集监控数据, 并实时显示和记录试验过程参数, 后者对微型发动机控制规律的研究是非常必要的.

2.2 硬件平台

快速原型控制系统的硬件部分以工控机为核心. 根据控制系统开发的通用性和快速性要求, 配置了 PCF9112、PCF1780 两块信号接口卡和相应的接口端子板. 利用自行设计的 MTE 控制信号接口电路, 实现与起动电机、点火器、油阀、气阀、油泵以及传感器电路板的连接. 为了方便台架试车, 专门设计了一种 MTE 台架试车监控接口箱, 用于试车过程的操纵和重要参数的状态指示.

PCF9112 卡是一种 12 位、16 通道带 4 级可编程增益的多功能数据采集卡, 其采样速率达到 110 KHz, 此外, 它还具有数字量输入和输出等接口. 在快速原型控制系统中, 4 个模拟量输入通道分别采集发动机的排气温度、推力、供油压力信号以及油门杆的位置信号; 4 个数字量输出接口分别控制气阀、油阀、点火器、起动电机的开关; 4 个数字量输入接口分别采集气阀、油阀、点火器和起动电机手动控制开关指令.

PCF1780 卡是一种 8 通道综合定时/计数器卡, 它采用 AM9513 定时计数器芯片, 并通过 CPLD 实现复杂的时序和逻辑组合, 可以实现计数、频率测量、周期测量、PWM 测量、频率量输

出、PWM 输出等 12 种工作模式. 在快速原型控制系统中, 考虑到发动机的转速范围宽, 利用 1 个定时计数器通道, 采用动态测量周期的方法, 测量多个转速脉冲信号的周期, 进而求出其转速的大小; 通过另外 2 个定时计数器通道的组合, 输出用于控制燃油泵直流电机的 PWM 信号. 由于采用 10 MHz 时基, 其中转速信号的测量精度可以达到最大转速时误差在 40 r/min 以内, PWM 信号在其频率为 3 000 Hz 时控制精度可达到 0.04 % 以内, 完全可以满足发动机控制及状态监视的要求.

在 MTE 台架试车监控接口箱中, 安装 PCF9112、PCF1780 接口卡的端子板. 在其面板上, 提供发动机试车过程中的重要工作状态指示, 包括发动机的转速、温度、推力和油门位置的数字指示, 以及气阀、油阀、点火器、起动电机的开关状态指示; 提供自动/手动操作的切换开关、油门指令旋钮, 以及气阀、油阀、点火器、起动电机的手动开关控制. 上述状态操纵信号均送给工控机, 然后由工控机的手动控制程序产生相应的执行指令. 此外, 在监控面板上还提供了用于安全保护的紧急停车按钮, 它可以独立于工控机实现停车控制.

MTE 控制信号接口电路, 采用光电隔离电路和 CMOS 驱动电路对接口卡输出的开关控制信号进行隔离和驱动, 以控制相应的执行机构; 采用缓冲和隔离电路将传感器板提供的温度、转速以及试车台传感器提供的推力、油压等信号传送到接口卡进行采集. 由于对输入和输出信号进行了隔离, 避免了相互干扰, 从而提高控制系统的可靠性.

2.3 软件设计

MTE 快速原型控制系统软件设计的关键是保证实时性、可靠性以及使用和维护的方便性. 控制系统软件基于 Windows 平台设计, 采用 VC 开发环境, 提供基于虚拟仪器技术的人机接口界面, 从而保证软件使用和维护的方便性. 采用多媒体定时器, 实现毫秒级精度的定时采集与控制. 利用 PCI 接口卡的专用 API 函数实现对板卡资源的操作.

整个软件分成两部分, 即实现人机界面的主控程序和实现实时采集及控制逻辑的控制程序. 主控程序基于 Windows 对话框结构设计, 实现发动机状态操纵、显示、记录等人机界面功能. 以下重点介绍控制程序.

合理的模块划分, 可以确保控制程序的可靠性, 同时便于向嵌入式目标控制器移植. 具体包括以下模块: 实时调度程序模块、外部接口输入/输出模块、手动控制模块、自动起动控制模块、开环控制模块、闭环控制模块、安全保护模块、停车控制模块、控制器的参数定义模块.

(1) 实时调度程序模块. 该模块由 Windows 多媒体定时器周期性触发. 它根据主控程序的操作、发动机的工作状态, 负责其他控制模块的实时调度. 实时调度程序流程图 3.

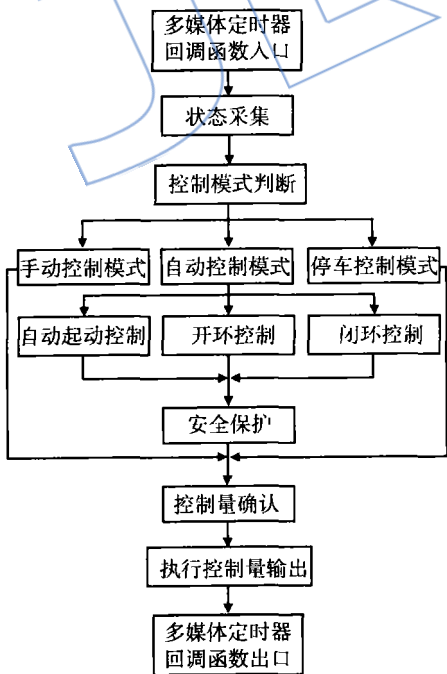


图 3 实时调度程序流程图

Fig. 3 Flow diagram of the real time scheduler

(2) 外部接口输入/输出访问程序模块. 该模块负责对发动机及台架系统的数据采集和向执行机构输出控制指令.

(3) 手动控制模块. 该模块负责将监控接口箱提供的操作指令转换成对各个执行机构的控制指令, 用于检查控制系统单元功能及起动控制规律的摸索.

(4) 自动起动控制模块. 该模块根据 MTE 的起动控制规律, 适时地接通或关闭各执行机构, 并产生适当的油泵控制 PWM 指令. 它是 MTE 控制程序设计的难点, 需要不断改进, 以适应可靠起动控制要求.

(5) 开环控制模块. 在起动成功后采用开环控制方式, 用于发动机对象特性的识别.

(6) 闭环控制模块. 该模块使发动机的转速跟踪油门杆指令, 以克服发动机及控制系统中存在的各种扰动, 使发动机维持期望的工作状态. 由于在宽广的工作范围内, MTE 的特性呈现明显的非线性, 于是采用了油门位置前馈和转速 PID 闭环的复合控制规律, 其中的前馈控制量是根据开环稳态特性中转速与供油量的关系得到的. 这种复合控制规律, 一方面使供油量的调整及时跟踪油门杆的指令, 另一方面避免了闭环控制量的大幅度调节, 从而保证了控制的安全性和控制效果.

(7) 安全保护模块. 实现超温、超转的安全保护, 根据情况切换到停车控制模式.

(8) 停车控制模块. 该模块负责关断所有执行机构, 并进行必要的停车散热处理.

(9) 控制器的参数定义模块. 用于对控制过程中使用的各种控制参数进行集中定义, 便于维护.

在试验开始时即锁定自动控制模式或手动控制模式. 自动起动控制模式结束, 且油门杆推出慢车位置时, 可以根据主控程序界面模式进入开环控制模式或闭环控制模式. 停车控制模式可由油门杆退回到停车区域、自动控制模式下超温或监控箱上紧急停车按钮按下而激活.

在进行嵌入式目标控制器的软件移植时, 上述 (1)、(2) 程序模块可根据实际平台作适当修改, (3)~(9) 模块可以直接移植.

3 台架试车验证

3.1 手动控制

作为一种 MTE 控制系统的快速原型平台, 提供试车过程的手动控制功能是非常必要的. 当监控面板上的自动/手动切换开关处于“手动”状

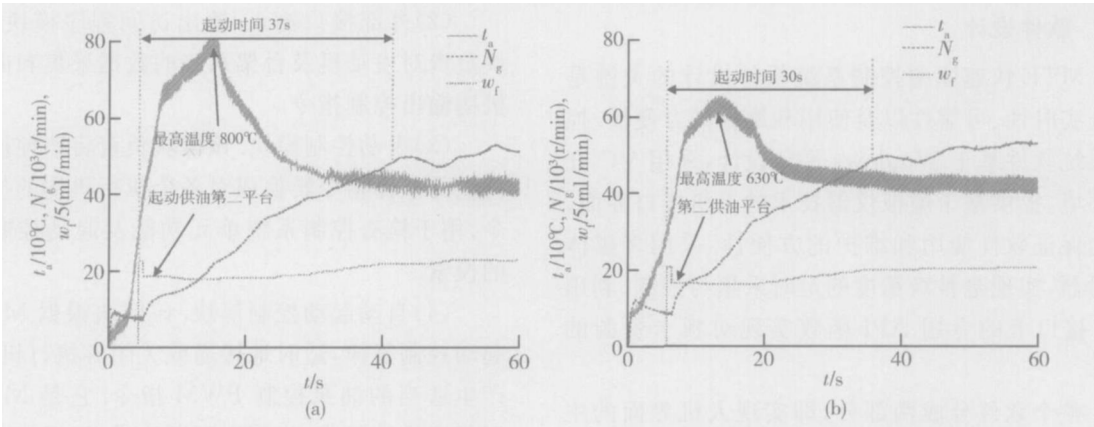


图 4 起动过程的试车曲线
Fig. 4 Test bed experimental results of the starting processes

态时,控制程序在启动时就锁定在手动控制状态,并执行手动控制程序.此时,可以通过监控面板上的点火、起动电机、气阀、油阀按钮对相应执行机构进行独立控制,通过调节监控面板上的油门旋钮进行供油量的调节.手动控制程序负责采集上述控制指令,然后通过输出接口卡产生相应的控制动作.其中供油量控制是根据油门杆位置换算成适当的 PWM 信号进而控制油泵电机实现的.

实践证明,由于该控制系统的快速原型平台设计了手动控制功能,为检查台架试车系统中测量和控制环节的功能带来很大便利,提高了工作效率.

3.2 自动起动控制

起动控制是整个 MTE 控制的难点,尤其是起动控制规律,需要经过不断的探索、改进.快速原型控制系统为起动控制规律的研究提供了很大的方便.

当监控面板上的自动/手动切换开关处于“自动”状态时,控制程序在启动时就锁定在自动控制状态,并执行自动起动控制程序.起动控制过程需要按照时间序列依次执行点火、加速、供气、再加速、供油、加油等动作,对各个动作的切换时刻、切换条件、加油规律等需要加以判断.采用状态机程序设计方法,可以有效解决自动起动控制程序的周期性重入和工作状态的可靠切换.共采用了 15 个起动工作状态.

起动控制规律涉及的调整项目包括状态的切换时刻、切换条件和加油规律等,可调参数达 30 多个.这里采用参数定义模块进行集中管理,便于调试.一个理想的起动控制规律应该满足:安全可靠地进入到慢车、起动时间尽量短、排气温度不超温,并且适合比较宽广的起动环境.

实际上,要获取一个可靠的起动控制规律需要进行大量的试验研究^[6],图 4(a)、(b)为参数调整前后起动过程的试车曲线.图 4 中, t_g 为喷口排气温度, N_g 为转子转速, w_f 为供油量.由于供油规律中第二平台的合理缩短,使起动过程的时间由 37 s 缩短到 30 s,最高尾气温度下降了 170 $^\circ\text{C}$.可见起动性能得到了明显的改善.

为了满足发动机在比较宽广的环境条件下能够可靠起动,还需要开展大量的试验研究,尽可能地模拟各种可能的工作条件,并不断完善控制规律.

3.3 全过程的台架试车

图 5 是一个从自动起动到慢车,然后加速到 100 000 r/min,再减速停车的完整的台架试车过程曲线.其中慢车以上采用了转速闭环和油门指令前馈的复合控制规律.

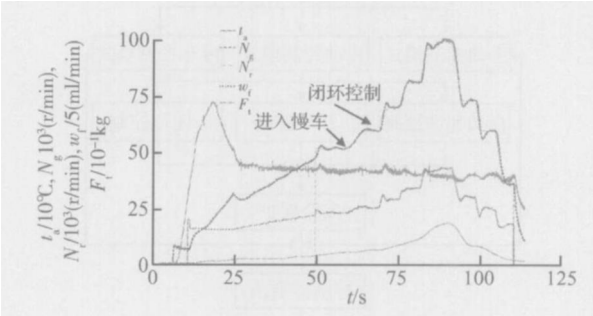


图 5 全过程的试车曲线
Fig. 5 Test bed experimental results of a whole processes

图 5 中, N_r 为油门杆对应的指令转速, F_t 为发动机输出的推力.从试车曲线可以看出,快速原型控制系统可以满足 MTE 台架试车的所有任务.

4 结 论

本文将快速原型设计思想应用于 MTE 控制系统的研究和开发过程中,提出了一种基于工业控制计算机的 MTE 快速原型控制系统,该系统充分体现了实时性、准确性、可靠性和方便性。详细阐述了快速原型控制系统软硬件设计的关键环节。基于该系统,进行了手动控制试验、自动起动控制试验和全过程的台架试车试验。试验过程及试验结果表明,该快速原型控制系统,对于研究复杂的起动控制规律、提高目标控制系统的开发效率具有明显的效果,为目标控制器的研制打下了坚实的基础。事实上,该系统还具有较强的通用性,基于该系统,已经成功开展了针对三种不同规格的 MTE 的台架试车试验。快速原型控制系统的设计思想同样可以应用于大型航空发动机控制系统。

参考文献:

- [1] 石琦文,孙晓民. 基于 MATLAB 的车用快速控制原型软件平台的研究与实现[J]. 计算机工程与应用,2005,13:108-110.
SHI Qiwen, SUN Xiaomin. Research and implementation on MATLAB based rapid control prototype software platform for vehicle[J]. Computer Engineering And Applications, 2005,13:108-110.
- [2] Faithfull P T, Ball R J, Jones R P. An investigation into the use of hardware-in-the-loop simulation with a scaled physical prototype as an aid to design[J]. Journal of Engineering Design, 2001,12(3):231-243.
- [3] Deppe M, Zanella M, Robrecht M, et al. Rapid prototyping of real-time control laws for complex mechatronic systems: a case study[J]. The Journal of Systems and Software, 2004,70(3):263-274.
- [4] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001,16(2):97-102.
SUN Jianguo. Prospects of the aeroengine control development in the early time of the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001,16(2):97-102.
- [5] 黄国平,温泉,李博,等. 微型涡轮发动机顶层设计研究[J]. 航空动力学报, 2003,18(6):832-838.
HUANG Guoping, WEN Quan, LI Bo, et al. Top level design of micro turbine jet engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2003,18(6):832-838.
- [6] 曹谦. 微型涡喷发动机控制规律及原理样机研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2005,3.
CAO Qian. Research on the control law and prototype of MTE[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,3.
- [7] Gerendas M, Pfister R. Development of a very small aero-engine[R]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2000, 45th ASME international Gas Turbine and Aero-Engine Technical Congress and Exposition, 2000-GT-0536.
- [8] 刘振德,陈玉春,蔡元虎,等. 简单控制规律下涡轮发动机特性的研究[J]. 推进技术, 2001,22(6):476-479.
LIU Zhende, CHEN Yuchu, CAI Yuanhu, et al. Research on characteristics of turbojet engine with simple control program[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001,22(6):476-479.