

文章编号: 1000-8055(2009)09-2139-06

微型涡轮发动机综合测控系统设计

苏三买, 杨恒辉, 屠秋野, 蔡元虎

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 针对微型涡轮发动机测控要求, 设计了集试车、控制系统半物理模拟、电动供油试验功能于一体的综合测控系统。各传感器调理信号并接到测控计算机与电子控制器; 电子控制器通过串口接受测控计算机操纵指令, 并采集 p_2 进行转速间接闭环控制。详细介绍了转速测量方法、电动油泵(pulse width modulation, PWM)驱动设计, 并分析、设计了发动机控制律。测试软件以 LabWindows/ CVI 为平台, 采用多线程技术设计。应用表明, 系统结构简单、试验效率高, 可为同类发动机研发提供支持。

关 键 词: 微型涡轮发动机; 半物理模拟; 发动机试车; 电动供油试验; 综合测控系统

中图分类号: V263.4

文献标识码: A

Design of microturbo engine integrated measurement and control system

SU San-mai, YANG Heng-hui, TU Qiu-ye, CAI Yuan-hu

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To meet the requirement of microturbo engine measurement and control, a set of integrated measurement and control system was designed. The system can implement engine ground test, control system's semi-physical simulation and electric fuel pump test. Signal processing outputs of all sensors were connected to measurement computer and engine Electronic control unit (ECU). ECU receives commands from measurement computer by RS232, and also samples p_2 to complete speed control indirectly. Engine speed test and signal processing method, as well as electric fuel pump pulse width modulation (PWM) drive circuit were introduced in detail. Based on engine characteristics analysis, control law was designed. By adopting multithreading programming method, measurement computer software was developed in LabWindows/CVI platform. The application shows that the system test is more efficient and the design scheme is not only simple, but also practical. It can be applied to same kind of engine test and research.

Key words: microturbo engine; semi-physical simulation; engine ground bed test; electric fuel pump test; integrated measurement and control system

微型涡轮发动机作为无人机、导弹、航模等小型无人飞行器的动力装置, 需求量不断增大, 近年来, 国外在这方面发展迅速并逐渐形成系列, 如美

国的 JetCat USA 和荷兰 AMT Netherlands 公司的系列发动机^[1-2]。

微型涡轮发动机是航空发动机的一个特殊领

收稿日期: 2008-09-27; 修订日期: 2008-12-20

基金项目: 西北工业大学创新基金

作者简介: 苏三买(1968—), 男, 陕西府谷人, 副教授, 博士, 主要从事航空推进控制系统设计与仿真。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

域,它并非大发动机的缩型,通常具有高设计转速(50 000 ~ 150 000 r/min)、寿命短(几十小时)、结构简单、成本低等特点.根据国外研发的资料^[1],发动机通常采用混油润滑(燃油中添加 5% 的润滑油)、电动泵供油、基于微处理器的电子控制.

研制微型涡轮发动机,必须进行发动机试车、电子控制系统设计与试验(半物理模拟与数控试验)和供油元件(电动油泵)性能试验.由于与常规大型航空发动机特点与参数范围不同,因此不能照搬大型发动机的相关试验系统设计方法,设计时必须分析该类发动机的测试与对控制系统的要求.

国内近年来有多个单位开展微型涡轮发动机的研发^[3-4],至今定型产品不多,由于以往没有型号牵引,因此相关的测试系统甚少.

本文以某微型涡喷发动机为应用对象,针对研发需求,设计一套集发动机地面试车、数控系统半物理模拟、电动供油性能试验 3 个功能于一体的综合测控系统.

1 发动机及其对测试系统要求

发动机为单转子几何不可调节结构,由单级离心式压气机、环形蒸发管燃烧室、单级向心式涡轮、不可调收敛喷管等组成,并采用陶瓷球轴承和混油润滑.发动机最大转速 80 000 r/min.

根据工作要求,电动供油与发动机控制原理如图 1.电子控制器(ECU)采集发动机当前工作参数(排气温度 T_4 、压气机出口压力 p_2 等),并从上位机接收油门杆角度、飞行高度 H 与马赫数 Ma 等参数,计算所需供油量,然后输出脉冲宽度调制(PWM)指令给电动泵改变进入燃烧室的燃油流量,从而实现发动机状态闭环控制.

开关量 起动、点火、停车、油路切换、超温指示、超转指示等.

2 系统硬件设计

2.1 系统总体方案

系统总体包括测控系统部分、油路部分等.其中测控系统总体原理框图如图 2.

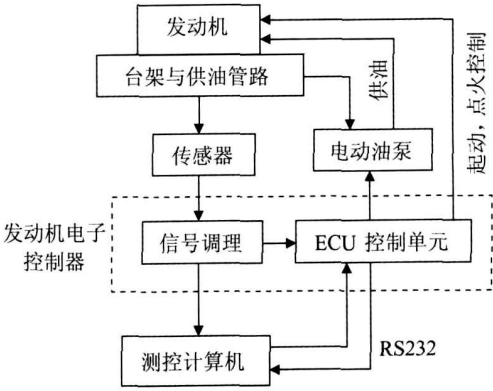


图 2 测控系统总体方案

Fig. 2 Tset system design scheme

发动机安装在定制的推力测量台架上,并在台架与油路的各测量接口,安装相应传感器.传感器信号接入电子控制器的信号调理电路模块,经处理为标准信号后,同一信号分两路并行输出,一路提供给前端测控计算机进行数据采集,另一路给发动机电子控制器的 ECU 控制单元.

测控计算机通过循环采集各传感器调理后的信号,实现对发动机试车时的数据记录,同时通过 RS232 接口与电子控制器通讯,一方面通过测控计算机的界面参数设定,把对发动机的控制指令传送给电子控制器,另一方面从电子控制器读取所记录的数据,实时监控电子控制器的工作状况,上下位机配合实现数控试车或半物理模拟.

图 2 中虚线框部分为发动机电子控制器,ECU 控制单元通过信号调理采集发动机工作参数,同时接收测控计算机的控制指令,通过控制算法控制电动油泵改变供给发动机的燃油.

为实现发动机试车供油与电动油泵性能试验,设计系统油路原理如图 3.当进行控制系统半物理模拟和油泵性能试验时,油路中三通阀不加电处于常闭状态,燃油通过节流阀回油箱,调节节流阀改变泵出口负载,模拟燃烧室反压;当进行发动机试车时,三通阀加电接通,燃油经单向阀进入发动机.油路系统中,三通阀同时用作停车断油电磁阀.

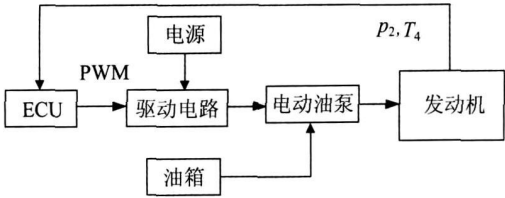


图 1 发动机供油与控制方案

Fig. 1 Engine fuel and control block

为实现发动机试车、控制系统和电动油泵试验,经分析,系统需要测试以下参数:

模拟量 发动机转速(N)、压气机出口压力(p_2)、排气温度(T_4)、供油量(m_f)、供油压力(p_m)、发动机推力(F)、进气温度(T_1)、进气压力(p_1).

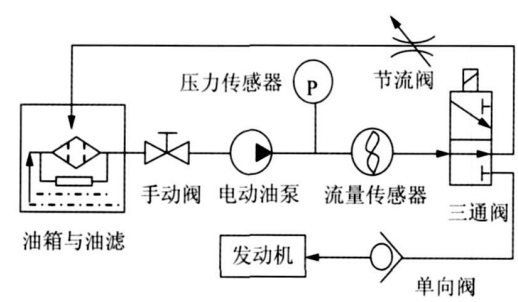


图 3 油路及传感器安装原理图

Fig. 3 Schematics of fuel flow and sensor position

2 2 硬件设计

系统中测控计算机采用研华 USB_4711 外置式 12 位 16 通道 AD, 两通道 DA 的 USB 数据采集模块. 前端测试物理量中除转速外, 其它均采用常规传感器, 信号调理电路成熟; 电子控制器中 ECU 采用 MCS51 系列单片机, 内部集成 PWM 信号输出口、A/D 转换器, 满足发动机 ECU 对控制输入输出信号的要求. 电子控制器中, 核心是电动油泵驱动与流量控制. 下面对转速信号调理和电动油泵驱动控制进行设计.

2 2 1 转速传感器与信号调理设计

发动机最大转速 80000 r/min, 加之压气机的叶轮材料为铸铝, 转速测量困难. 鉴于此, 通常在微型涡轮发动机控制系统中不测量转速, 而是通过测量 p_2 压力进行转速间接控制. 但在发动机研制与试车过程中, 必须对转速进行监控, 为此采用某军品研究所研发的强磁大间隙磁电转速传感器, 传感器固定在发动机机匣外, 在发动机中心转子轴(合金钢)前端采用充强磁的六角螺帽作为紧固件(螺帽边缘到传感器约 60 mm), 当转子旋转时, 传感器输出小信号脉冲, 该脉冲通过 LM358 两级放大, 整形后进入 LM2907 频/压转换, 最后输出正比于转速的标准电压信号. 脉冲放大、整形、频/压转换电路原理如图 4

发动机转速最大频率 8 kHz(每转 6 个脉冲), LM2907 最大输入频率 15 kHz, 其输出电压为

$$V_{out}=f_{in} \cdot R_T \cdot C_2 \cdot K \tag{1}$$

式中 K 为信号增益.

为保证频/压转换的线性度与动态响应, C_2 取 1000 pF, 输出电压可通过可变电阻 R_T 调节.

2 2 2 电动油泵驱动设计

电动油泵为直流有刷电机带内啮合齿轮泵的一体化结构, 采用电机电压负反馈电流补偿进行流量控制, 电机驱动采用 PWM 加大功率开关管

调速驱动方案^[5]. 信号采样与 PWM 驱动电路原理如图 5.

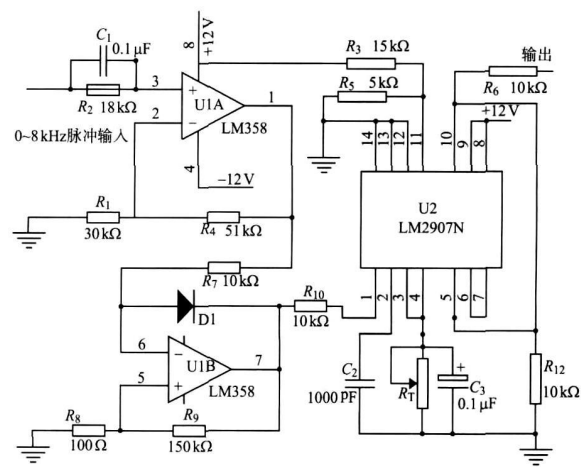


图 4 转速信号调理电路

Fig. 4 Speed sensor signal processing circuit

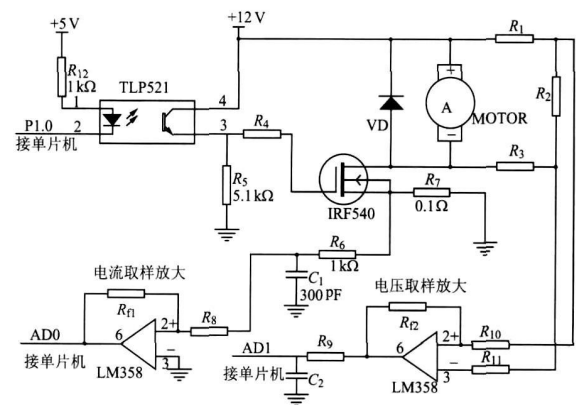


图 5 电动油泵驱动与信号采样原理图

Fig. 5 Electric fuel pump drive and signal sampling circuit

电流采样通过 0.1 Ω 高精度取样电阻获取电流反馈信号. 电压采样通过并联在电机电枢两端的 3 个电阻 (R_1, R_2, R_3) 分压获取, 信号从 R_2 两端引出经 LM358 差分放大, 输出给前端 ECU 数据采集.

3 系统软件设计

3 1 电子控制器软件设计

电子控制器接收上位测控计算机的油门杆指令, 程控发动机起动、点火、停车, 同时采集发动机 p_2 与 T_4 信号, 改变电动油泵的流量实现转速间接闭环控制. 控制软件包括电动油泵流量小闭环和转速控制大闭环, 其中电动油泵流量控制具体

方法参见文献[5].

3.1.1 电子控制器控制流程

电子控制器程序为死循环结构,上电自检完毕后,进入20ms控制循环,根据油门杆角度指令程控发动机起动、点火、加减速与稳态控制,控制过程中监控排气温度 T_4 ,修正供油量.

3.1.2 发动机模型与控制器设计

微型涡轮发动机一般采用如下控制规律:

$$m_f \rightarrow N = \text{const} \quad (2)$$

由于发动机定型装机时不设转速测量装置,因此通过测量 p_2 压力来反映转速.

发动机为单转子、几何不可调结构,在标准大气条件、高度与马赫数为零时,转速 N 、压气机空气流量 m_a 与 p_2 压力为一一对应关系.测量 p_2 可插值计算对应工作点转速.

$$p_2 = f(N); \quad m_a = f(N) \quad (3)$$

当在高空飞行时,根据相似原理可得:

$$\frac{p_2^*}{p_1^*} = f\left(\frac{N}{\sqrt{T_1^*}}, m_a \frac{\sqrt{T_1^*}}{p_1^*}\right) \quad (4)$$

其中上标*表示总参数.根据气体动力学,计算关系如下:

$$p^* = p \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (5)$$

$$T^* = T \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right] \quad (6)$$

其中 Ma 为马赫数, κ 等于1.33,为等熵指数.

测量飞行高度处的静参数 T_1 和 p_1 ,飞行器给发动机提供马赫数,根据上述关系可计算发动机的工作转速.

为提高 p_2 的测量精度,采用过采样技术.通过采集发动机实际试车过程的动态工作 p_2 压力和燃油流量 m_f ,利用系统辨识原理,通过分段线性化建立发动机数学模型可简化为如下形式:

$$p_2(s) = \frac{K_t}{T_t + 1} m_f(s) \quad (7)$$

式中 K_t 为放大系数; T_t 为时间常数.

控制器采用增量式PID(proportion integration differentiation)算法,相应的控制律为

$$\Delta m_f(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (8)$$

其中

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)$$

3.2 测控计算机软件设计

系统中测控计算机的功能主要包括:

- 1) 数据采集、记录与显示发动机试车数据;
- 2) 电子控制器控制指令给定(油门角度);
- 3) 监控电子控制器与发动机状态.

其中2)和3)通过RS232通讯传输.

系统采用LabWindows/CVI设计,界面分虚拟仪表显示、历程曲线、控制器指令给定、发动机状态指示、按钮操作等区域.试验时,底层程序需执行数据采集与处理、数据显示与记录、与电子控制器通讯三项任务,各任务间相互关联,并发运行.针对此,系统采用多线程技术编程.

LabWindows/CVI提供了两种多线程的机制:线程池和异步时钟.本系统采用异步定时器技术来实现数据采集、处理任务.首先创建异步定时器函数:TSQ.iTimerID = New AsyncTimer(g_msDelay, count, enabled, DAQTimerCallback, NULL).其中g_msDelay为定时时间,根据试车要求,取值20ms;DAQTimerCallback是定时器回调函数,完成系统数据采集与处理任务.

系统运行时,采集的数据在主线程和异步定时器辅助线程间传递,需对其进行保护,避免间歇性的逻辑错误发生.LabWindows/CVI专门提供了相应的数据通道——线程安全队列(TSQ)用于保护数据变量.在辅助线程中将采集处理后的数据写入安全队列,在主线程中读出数据显示并保存.图6为软件多线程流程图.其中数据采集部分程序代码如下:

```
int CVICALLBACK MyTimerCallback (int
reserved, int the TimerId, int event, void *
callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    WTSQDAQ_Data (10);
    return 0;
}
```

WTSQDAQ_Data(10)函数完成10次数据采集并进行均值滤波处理.下面是单通道数据采集程序代码:

```
void WTSQDAQ_Data (int PollTimes)
{
    int I, PollTimes = 10;
    float fData, float fVoltage;
    // 配置输入信号范围、触发方式、通道号
    ptAIVoltageIn, gain = 0;
```

```
ptAIVoltageIn.TrigMode = 0;
ptAIVoltageIn.chan = Channel;
ptAIVoltageIn.voltage = &fVVoltage;
fData=0. 0;
for (i= 0; i< PollTimes; i++ )
{  DRV_AIVoltageIn (DriverHandle,
    &ptAIVoltageIn) ;
    fData+= fVVoltage;
}
fData= fData/ PollTimes; }
```

4 系统应用

上述系统设计过程中, 前期在图 3 三通阀断电情况下, 完成电动油泵性能试验^[5]; 采用另外一台计算机作为实时模型机, 与电子控制器配合完成控制半物理模拟试验.

系统调试完毕, 用于某型微型涡轮发动机研制过程数控试车, 其中发动机起动和点火由电子控制器程控, 油门杆指令由上位机通过通讯给定. 图 7 为测控计算机软件界面. 图 8 为试车转速历程曲线.

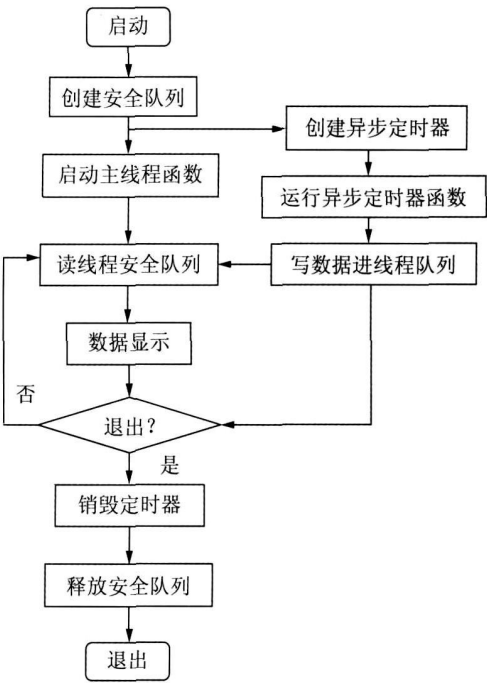


图 6 多线程数据采集流程

Fig. 6 Multi-threaded flow chart of data acquisition

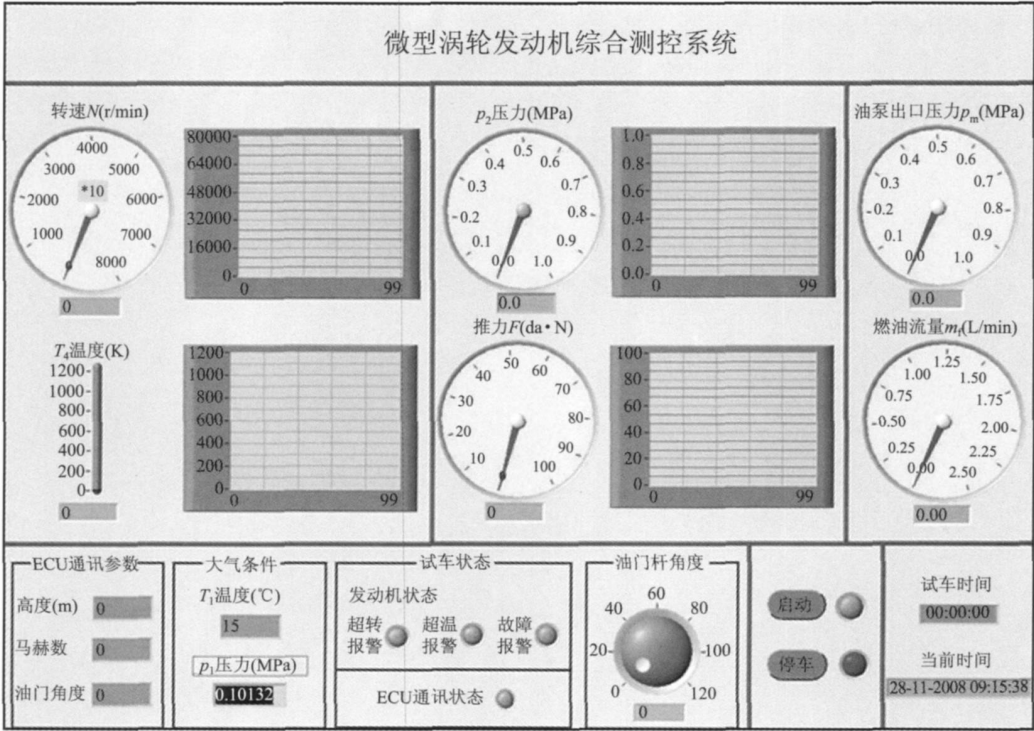


图 7 测控计算机软件界面

Fig. 7 Measurement and control system software interface

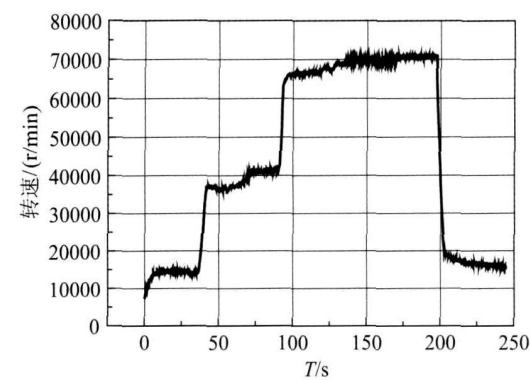


图 8 转速历程曲线

Fig. 8 Speed curve of engine bed test

5 结 论

本文针对微型涡轮发动机研制过程中供油装置性能试验、控制系统半物理模拟试验、发动机试车的特点,设计了一套综合测控系统并用于某微型发动机研制过程试验.应用结果表明:系统具有结构简单、实用性好、可操作性强等特点,有效提高该类发动机研制过程的试验效率,加快发动机的研制进度.同时,基于本系统硬件基础,通过编制不同测试软件和 ECU 控制程序,可用于同类发动机其它性能测试,也可用于本专业实验教学.

参考文献:

[1] JetCat USA, LLC. JetCat P60SE / P70 / P80 / P120SE /

P160SX / P180 / P200 Instruction manual V6 0 ECU [DB/OL] . [2008-07-27] . <http://www.jetcatusa.com/manuals.html>.

[2] AMT Netherlands B V. High performance gas turbine [DB/OL] . [2008-07-27] . <http://www.amtjets.com>.

[3] 北京航天宏恩动力技术有限公司. HN-40-65 微型涡轮喷气发动机 [DB/OL] . [2008-07-27] . <http://www.hnjet.com>.

[4] 大连三科科技集团. DSK-50 涡轮喷气发动机 [DB/OL] . [2008-07-27] . <http://www.sankegroup.com/fadongji.html>.

[5] 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): 53-55
SUN Huanyu, SU Sanmai. Design of electronic pump fuel control system for micro-turbo-engine [J]. Measurement and Control Technology, 2008, 27 (8): 53-55 (in Chinese)

[6] 张天宏, 黄向华, 曹谦. 微型涡轮发动机控制系统仿真及台架试验 [J]. 推进技术, 2006, 27(5): 445-449
ZHANG Tianhong, HUANG Xianghua, CAO Qian. Control system simulation and bed test for micro turbine engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(5): 445-449 (in Chinese)

[7] 张天宏, 黄向华. 航空小型动力装置试验台测试系统 [J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 189-192
ZHANG Tianhong, HUANG Xianghua. A test system for mini aviation power unit [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 189-192 (in Chinese)

[8] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1989
ZHANG Baocheng. Aeroengine test and measurement technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1989 (in Chinese)