

某涡扇发动机电子综合调节器综合测试系统*

张生良, 谢寿生

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 为了对某涡扇发动机的核心控制部件——电子综合调节器进行研究, 采用反向工程试验方法, 建立一种能反映其工作原理、静态特性、动态特性的测试平台。该平台包括系统的组成、硬件设计、软件设计、数据采集与处理和系统的应用。根据此测试平台所测的数据编制的功能控制软件为进一步实现 FADEC 提供了有力的依据。另外也表明, 该系统具有测试精度高、可靠性好、操作和维护方便等特点, 可用于教学及科研过程中。

关键词: 涡轮风扇发动机; 控制系统; 测试设备; 动态特性; 数据采集; 数据处理

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0190-03

Test system for FADEC of a aeroengine

ZHANG Sheng-liang, XIE Shou-sheng

(Coll. of Engineering, Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China)

Abstract: To study the performance characteristic of FADEC which is the most important components in the control system of a certain aeroengine, a test system reflecting the performance characteristic was established. In consequence the system outline, hardware, software and data acquisition and handling were discussed in detail. A control software can be concluded from the data based on the test system, which will be used in the FADEC system design. The simulation results show that the system has the advantages of being convenient and practical.

Key words: Turbofan engine; Control system; Test set; Dynamic characteristic; Data acquisition; Data processing

1 引 言

数字控制的研究是目前发动机推进技术的重要发展方向。近年来, 我国在发动机方面的投入力度不断加大^[1], 电子综合调节器是发动机的核心控制部件, 使用中故障频率较高。为了进一步掌握电子综合调节器的各种特性, 更好地指导工程实践, 同时为 FADEC 的设计和理论研究提供可靠的实验依据, 建立了综合调节器的实验系统, 并开展了实验研究。

2 测试系统组成

电子综合调节器主要分成四大部分: 燃油控制通道; 几何随动通道; 离散指令及超控保护通道; 综合调节器故障监测通道。测试系统则由综合调节器、板卡模块、信号调理模块、计算机以及故障显示模块等组成^[2]。配置了一些高性能的多用途板卡, 如 PCL-727,

PCL-836, PCL-813B 以及一个自制的继电器板卡。利用这些硬件资源来发送综合调节器所需要的输入信号以及采集综合调节器输出的各种信号。如利用 727 板卡的一些通道来发送电压模拟信号, 如 T_m 滑油温度、 t_f 燃油温度、 T_c^* 温度、 t_1 温度。利用 836 板卡发送 n_1 转速信号、 n_2 转速信号、 p_1 压力信号、 p_m 滑油压力信号、 Δp_{cx} 喘振信号、 α_1, α_2 角位移信号和振动信号。用 813B 板卡来采集电压信号, 如 S_1, S_8 及相对应的脉冲信号。自制的继电器板卡用来发送和采集开关量、数字量。

3 外围硬件设计

3.1 传感器的测量与模拟

在飞机试车时测得各有关传感器的信号类型与形式: 温度是电动势信号; 转速是频率和幅值变化的

* 收稿日期: 2002-05-08; 修订日期: 2002-08-06。

作者简介: 张生良 (1977—), 男, 硕士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

正弦波信号;压力、喘振、 α_1 、 α_2 角位移是幅值变化的方波信号。但正弦波信号与方波信号包含的信息不只是一种。经分析与研究,转速信号取频率分量,压力、喘振、角位移信号取幅值分量,区别在载波的频率。经拟合计算得出,转速与正弦波频率,压力、喘振、角位移信号与方波的幅值均成线性关系,其线性度均大于0.9999。 t_1 与电动势也是正比关系。

转速传感器的输出信号是正弦波,随着转速的增大其幅值也在变大,但是转速只是体现在频率分量上,故采用方波信号来替代正弦波信号,幅值在其正常工作的范围内即可,只改变频率来反映其速度变化。温度类的信号就是在相应的针脚上加上一定电动势的电压信号。压力、喘振、角位移信号等信号在相应的针脚上加上幅值可调的方波信号即可。

3.2 信号调理电路

为得到与综合调节器输入一致的信号,必须对板卡输出信号进行调理。如进行数字隔离、模拟隔离、极性转换、功率放大等。电压信号先用高共模抑制比、低噪音和低温飘的 OPA117 进行功率放大,再接一块 ISO124 进行模拟隔离。频率信号先用 TLP527 进行数字隔离,再加极性转换电路与功率放大电路等。

对于幅值可调的方波信号没有再用另一套单片机系统实现,而是就现有资源进行合理设计,达到幅值连续可调的效果。设计采用一块模拟多路开关 CD4051,把输出电压按一定的所需频率切换到双极性所对应的正负电压上,这样软件只调输出电压即可达到幅值可连调的目的。其中负电压是由放大系数是-1的放大电路产生。实验结果也表明这是简单可行、可靠性高的一种做法,精度可达0.1mV。

4 软件设计

4.1 软件结构

测试系统的软件采用 VC6.0 开发,可运行于 Windows 环境中。软件采用面向对象的技术,将每一个相对独立的功能用一个对话框对象来实现,并采用了大量生动、丰富的图形界面,使用户操作方便。

信号发生模块是模拟并发送各传感器的信号;信号调整模块是按各传感器的信号特性,在软件界面上改变其特性值以改变其 n_1 、 n_2 、 t_1 和 T_4^* 等信号的值,并在此加入阶跃或脉冲量;信号采集与显示模块是采集系统的输出信号,如正比于占空比 S_1 、 S_8 的电压信号,并在软件界面上显示占空比 S_1 及 S_8 的变化

趋势。此外还可以采集 S_1 和 S_8 所对应的脉冲信号,以便对两种输出信号的动态特性进行比较。

信号采集模块采用多线程技术。要连续发送并同时采集多路模拟量与数字量。采用多线程技术是最好的选择。可同时执行多个线程,不要用户干涉,即提高了反应速度,又提高了执行效率。本系统采用多线程中的工作者线程,可以直接从采集卡端口读数据。

根据香农采样定理,采样频率必须大于等于信号频率的两倍。 S_1 对应脉冲信号的最高频率是 40Hz。故在 Windows 平台下,引入能精确到 1ms 多媒体定时器函数来进行定时数据采集。

4.2 数据处理

采集信号一般含有各种噪声和干扰,为了准确测量,除了在硬件上采取了相应的滤波技术外,还对所采的信号进行频谱分析,然后进行数字滤波,以进一步克服随机噪声和偶然噪声。数字滤波技术能克服模拟滤波技术的不足,它采用程序实现,不增加硬件,可靠性好,稳定性高。经反复试验,采用下述综合数字滤波技术可得到比较满意的测量结果。

(1)限幅滤波法可以消除偶然的脉冲噪声而引起的误差。同时本系统采用一阶差分法剔除奇异项。其准则是:给定一个误差限 W ,若 t 时刻的采样值为 x_t ,预测值是 x_t' ,当 $x_t - x_t' > W$ 时,则认为此值是奇异项,应予以剔除,而以预测值 x_t' 取代 x_t 。

(2)采用 IIR 滤波器。由于不考虑相位特性,实现同样的滤波要求,FIR 滤波器的阶数比 IIR 滤波器的阶数要高得多。再则 IIR 滤波器的频率响应和单位脉冲响应比 FIR 滤波器平滑。综合考虑,本系统采用 IIR 滤波器作为设计类型。在 IIR 滤波器中采用切比雪夫低通滤波器。同时采用双线性变换法对切比雪夫低通滤波器进行设计。滤波效果如图 1 所示。

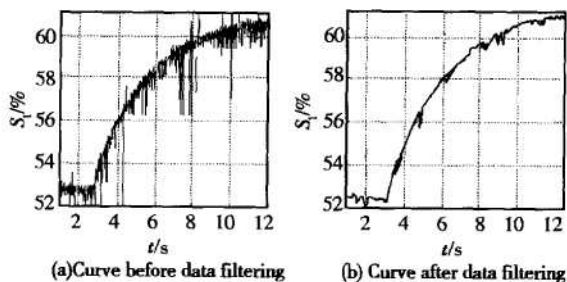


Fig.1 Comparison of cure before and after data filtering

频谱分析。目的在于了解数据的形态与频率构成,找出有关分量产生的原因,以便采取措施有效地

消除或抑制噪声。由对信号进行频谱分析后的频谱特性可知其频率成份有:3000Hz 左右的频率;400Hz 的频率;50Hz 的工频噪声以及白噪声。故数字滤波器的截止频率取 47Hz。

5 系统应用与分析

5.1 燃油流量控制通道静态特性

图 2 中的曲线是从不同生产批次的综合调节器上测得。 n_1, n_2, T_4^* 调节通道在战斗状态与训练-战斗状态下所测得的 6 条响应曲线完全重合,这与原理一致。但曲线形状与理论差别较大。该曲线的形状将直接影响发动机供油量,即影响发动机工作状态。

5.2 数据应用与动态建模

5.2.1 由所测数据编制控制软件

电子综合调节器燃油控制通道由 n_1, n_2, T_4^* 及燃油流量调节通道组成。其功用是把 n_1, n_2 和 T_4^* 调节通道输出的偏差信号进行最小值选择,再把这个偏差量调制成平衡占空比信号去控制执行机构—电磁活门来调节发动机供油量。在所测数据中可得出转速、温度的偏差量与电压的关系,这个电压与 S_1 的关系即上述的静态特性曲线。在此基础上编制的控制软件得出的结果与实测数据的误差小于 0.03%。

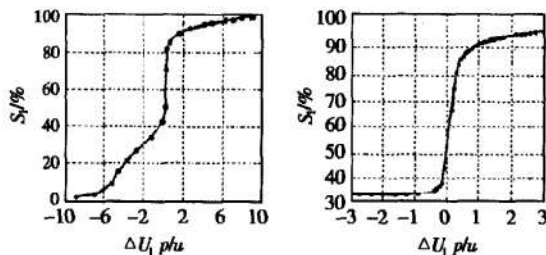


Fig. 2 Comparison of performance characteristic

5.2.2 系统动态辨识

在未知系统结构特性的情况下,利用输入输出数据以及相应的系统辨识方法可以得到系统的动态数学模型。现以电子综合调节器燃油控制通道为例。选取的激励信号为阶跃信号。由于该型发动机在最大状态调节规律按 t_1 分成两段,即 $-60^\circ\text{C} \sim +15^\circ\text{C}$, $15^\circ\text{C} \sim 215^\circ\text{C}$,而在每一段工作通道不相同,分别为 n_1 调节通道和 T_4^* 调节通道,因此在每一段必须选取不同的阶跃输入信号。在第一阶段选取 $1.02n_1$ 的阶跃量,在第二阶段选取 $1.04T_4^*$ 的阶跃量。图 3 为不同控制通道下的动态响应曲线及辨识模型。

综合调节器燃油通道的输出即为电磁活门上的

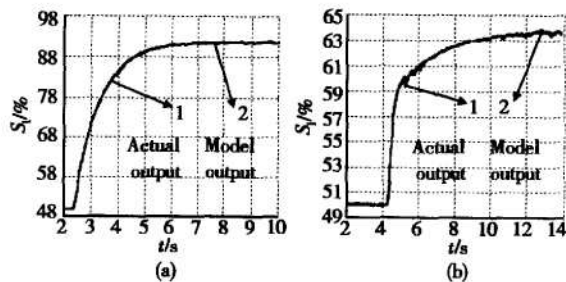


Fig. 3 Identification of dynamic mathematical model

S_1 信号,其大小和变化过程直接反映燃油流量的变化过程。由图 3 可知在不同规律下,不同阶跃量,其输出不同,也可看出动态曲线中有明显的变化,表明它是一个变结构的系统。在实际的辨识过程中也已证明了这一点,单纯地以一阶或二阶去辨识,结果误差较大,故采用了一种新的辨识算法,该算法通过自寻优,得到系统结构的跳变时刻,在此时刻之前是二阶模型,之后的是一阶模型。误差准则取 $\min(J) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e(k)|^2 = \frac{1}{N} e(k)^T e(k) = \frac{1}{N} \|e(k)\|^2$,这种算法对于图 3(a)的误差是 0.010449,而以传统递推最小二乘法辨识的误差为 0.228862,其精度大大提高。

5.3 理论分析

在动态响应中出现明显的变结构特性是由于其静态特性中有明显的变结构特性,阶跃量是在占空比等于 $50\% \pm 4\%$ 时加的。如果它对应的电压值在静态曲线中间的线性段,则是单纯的一阶或二阶系统,如果超出中间段进入最右段或最左段就会出现动态响应中明显变化的情况。鉴于此,在设计控制软件时,可以在不同的控制段加上不同的动态模型。

6 结 论

测试系统可以模拟发动机各个传感器的信号特性及综合调节器的各种工作状态。可以从多方面对综合调节器进行研究;对一些发动机具有破坏性的试验,可以在此系统超范围、连续、重复地试验;有关结果可为 FADEC 的研制提供理论与实践依据,也可以用于理论和数值模拟计算验证。

参考文献:

- [1] 谢寿生. 某型加力涡扇发动机[R]. 西安:空军工程学院, 1998.
- [2] 周宗才. 某型飞机推进系统控制[R]. 西安:空军工程学院, 1997.

(编辑:梅 瑛)