

# 航空发动机空气起动系统的前馈-反馈复合控制

雷 勇, 李 辉, 石小江\*  
(中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)

**摘要:** 针对“在台架试验中用于带转航空发动机的空气起动系统在起动时存在一定常阶跃扰动, 造成空气起动机带转航空发动机至点火转速时间过长, 导致起动失败, 而常规 PID 反馈控制无法消除扰动”的问题, 提出了前馈补偿的方法。首先通过系统辨识方法获得对象及扰动的传递函数, 设计了基于两者模型的动态前馈补偿控制器, 并与 PID 反馈控制器组成了复合控制器。实际使用结果表明, 前馈-反馈复合控制器使空气起动机进口压力上升时间减小了 6 s, 极大提高了系统的抗扰动特性, 保证了发动机的顺利起动。

**关键词:** 阶跃扰动; 系统辨识; 动态前馈补偿; 复合控制器

中图分类号: TP273.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)05-0586-04

## Feedforward-feedback composite control for aero engine air starting system

LEI Yong, LI Hui, SHI Xiao-jiang  
(The Gas Turbo Establishment of China, Jiangyou 621703, China)

**Abstract:** Aiming at the air starting system for starting aero engine had a steady step disturbance in the test, it caused the aero engine to arrive the ignition rotational speed time to grow, thereby the aero engine started failure, but the general PID feedback controller could not eliminate the disturbance, a method was presented to feedforward compensation. First, the transfer function of the object and disturbance was obtained by the means of system identify. Then, according to their model, a dynamic feedforward compensation controller was designed, it and PID feedback controller composed the composite controller. The actual use result indicate that the feedforward-feedback composite controller makes the rising time of the inlet pressure to decrease 6 s, it greatly improves the system features to resist disturbances, and ensures the engine starting smoothly.

**Key words:** step disturbance; system identify; dynamic feedforward compensation; composite controller

## 0 引 言

在工厂、工业生产过程中, 控制系统总是在各种外部干扰作用下工作的。系统的外部扰动主要分为随机扰动和确定性扰动<sup>[1]</sup>。而在常用的 PID 负反馈控制系统中, 仅当被控量偏离给定值的情况下, 调节器才会起控制作用, 从而补偿扰动的影响。显然, 这种控制系统的控制作用总是落后于扰动的作用。对于一些扰动较为剧烈的状况, 负反馈控制器无法及时、准确地消除扰动的影响。而前馈控制是按扰动量进行的开环控制, 当影响系统的扰动出现时, 就按扰动量直接产生校

正作用<sup>[2]</sup>, 因此针对可测量的扰动, 前馈-反馈复合控制即可以获得显著的扰动补偿效果, 又具有常规 PID 控制的优点<sup>[3]</sup>。

本研究针对在台架试验中用于带转航空发动机的空气起动系统存在的问题, 提出了前馈补偿方法。

## 1 系统简介

某些航空发动机在台架进行试验时, 采用的是空气起动机来进行带转、起动, 其进口需要提供一定压力、温度和流量的压缩空气, 保证空气起动机的运转及带载能力。起动机的供气系统如图 1 所示, 该系统为

一带确定阶跃扰动的恒值系统。

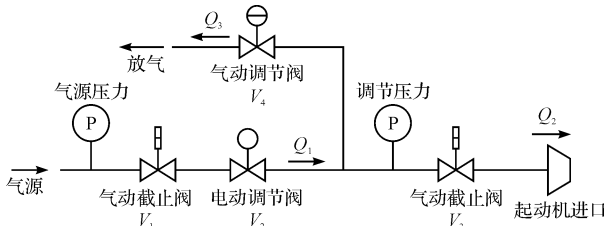


图1 空气起动机供气系统

系统的工作过程如下:气源供气压力为一定值,通过电动调节阀  $V_2$  限制总供气流量,确保供气流量恒大于空气起动机所需流量,一般处于开度 90% 左右。打开  $V_1$ , 截止阀  $V_3$  关闭,通过旁路调节阀  $V_4$  自动调节放气流量,保证调节压力为一恒值,当启动空气起动机时,截止阀  $V_3$  按启动信号自动打开,压缩空气进入起动机进口,起动机开始运转。要保证空气起动机快速、平稳启动及运转,需保持进口压力始终为一定值。

由流体力学可知,通过阀门的流量与阀门前后的压差成正相关的关系,即:

$$Q = k \times \frac{F}{\sqrt{\xi}} \times \sqrt{\frac{\Delta P}{r}} \quad (1)$$

式中: $Q$ —通过阀门的流量, $\Delta P$ —阀门前后形成的压差, $k$ —系数, $F$ —流通面积。

由式(1)可知,当起动机开始启动时,截止阀  $V_3$  打开,系统整个流通面积增加,气源与外部环境压差一定,空气流量  $Q_1$  增加,在气源压力、电动调节阀  $V_2$  流通面积一定时,必导致调节压力下降,从而引起起动机进口处空气压力、流量下降系列反应,形成一个确定的阶跃扰动。

在系统采用数字 PID 控制器调节时,其抗扰动能力较弱,调节压力受到扰动下降约 130 kPa,空气起动机进口处压力测点在截止阀  $V_3$  打开后,压力缓慢上升,到达稳态时间约为 8 s,致使起动机带转发动机到达稳定转速时间过长,影响了发动机启动过程。因此,针对数字 PID 控制器存在的缺点,需了解系统中被控对象、扰动信号的特性,设计鲁棒性更强的控制算法。

## 2 对象模型辨识及扰动评估

### 2.1 对象模型辨识

被控对象的辨识信号采用伪随机二位式序列(以下简称 M 序列)信号,M 序列是一种很好的辨识输入信号,它具有近似白噪声的性质,不仅保证有较好的辨识结果和精度,而且它的信号幅值、周期、时钟节拍容易控制,在工程上易于实现<sup>[4]</sup>。

本研究根据实验测得对象的截止频率  $f_m \approx 0.8 \text{ Hz}$ , 设定 M 序列参数为:  $\Delta t = 0.3 \text{ s}$ ,  $N_p = 31$ , 幅值  $a$  为从 25% ~ 50% 变化, 数据采集频率为 10 Hz, 获得实测对象响应数据如图 2 所示。

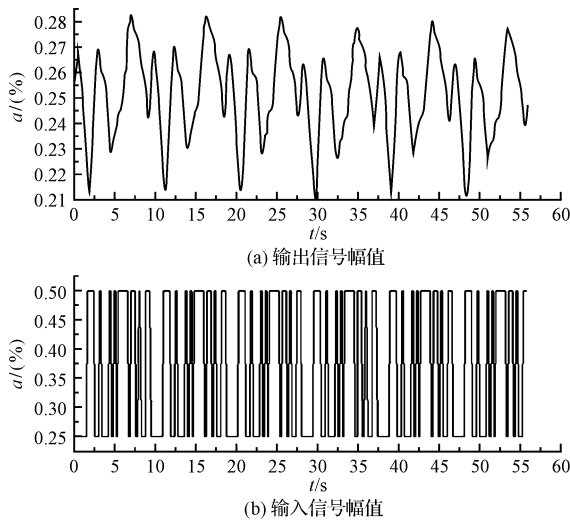


图2 气动调节阀  $V_4$  的 M 序列响应

最小二乘法<sup>[5]</sup>是系统参数辨识中最常用的方法,适用于白噪声模型<sup>[6]</sup>,被控对象建模采用基于最小二乘算法的 OE(输入误差)模型,其形式为:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + e(t) \quad (2)$$

式中: $q$ —位移算子。

在进行模型的参数辨识时,必须首先确定模型的阶次。若模型的阶次不合适,参数估计会产生很大的误差,所建模型与实际对象就会存在较大的差异。

模型定阶方法通常有 3 种:FPE 准则(最终预报误差准则);自相关和偏相关函数定阶法;AIC 和 BIC 定阶准则<sup>[7]</sup>。已知 BIC 确定的模型阶数是其真值的一致估计<sup>[8]</sup>:

$$BIC(n) = \ln(\hat{\sigma}^2) + (n) \cdot \frac{\ln N}{N} \quad (3)$$

式中: $n = nb + nf + nk$ ,  $\hat{\sigma}^2$ —模型的残差方差。

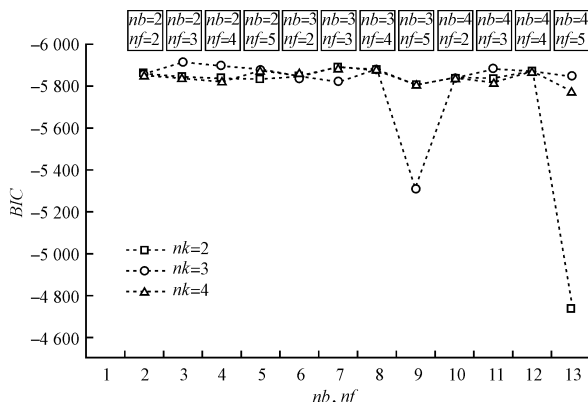


图3 模型的 BIC 值

模型的 BIC 值如图 3 所示,由 BIC 准则确定对象模型阶数为:nb=2,nf=3,nk=3。

本研究将气动调节阀 V<sub>4</sub> 的 M 序列响应数据去除趋势项后定义为 iddata 数据,采用 Matlab 的 oe() 辨识函数获得对象模型为:

$$G(z) = \frac{0.0076736z(z-0.9273)}{(z-0.9575)(z^2-1.782z+0.8187)} \times z^{-2} \quad (4)$$

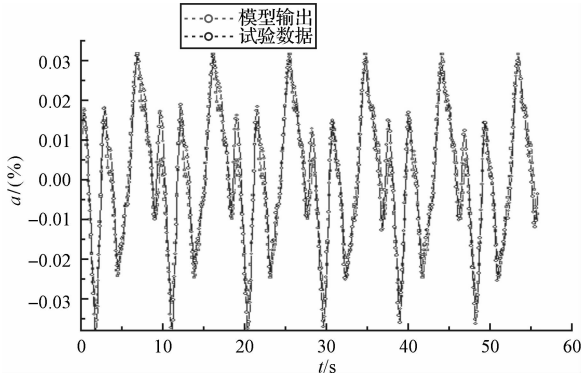


图 4 模型输出及另一组试验数据对比

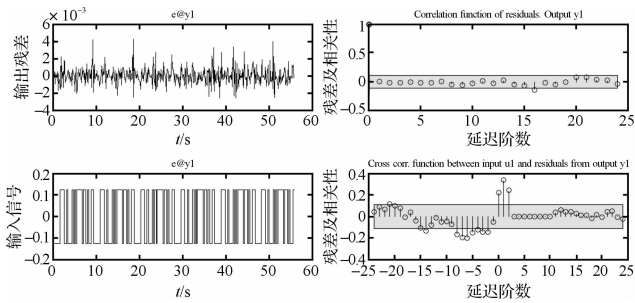


图 5 模型的残差及相关分析

模型输出及另一组试验数据对比,模型的残差及相关分析如图 4、图 5 所示。从对比结果看,模型与实测数据拟合程度较高,残差近于白噪声,所建模型可以真实代表实际对象。

### 2.2 扰动模型建立

针对系统中的阶跃扰动,是由于当启动时,调节阀 V<sub>4</sub> 处于某稳定状态,截止阀 V<sub>3</sub> 打开所造成,而截止阀 V<sub>3</sub> 只有开/关两种状态,不存在中间调节过程,相当于只是一个单位阶跃信号,对系统输出的扰动是一定的,并且多次测量结果具有较高的重复性,可以将其看作为一单位阶跃信号经一确定传递函数后获得。

扰动模型输出及试验数据对比如图 6 所示。本研究将阶跃信号到压力开始变化的时间作为延迟阶数,输入/输出数据同时从开始变化时对齐,采用 pem() 函数进行辨识得到模型,最后加入延迟阶数。得到扰动模型如下:

$$G_n(z) = \frac{-0.00039363(z+17.3)}{(z-0.8375)} \times \frac{(z-0.57)(z+0.345)}{(z^2-1.554z+0.684)} \times z^{-15} \quad (5)$$

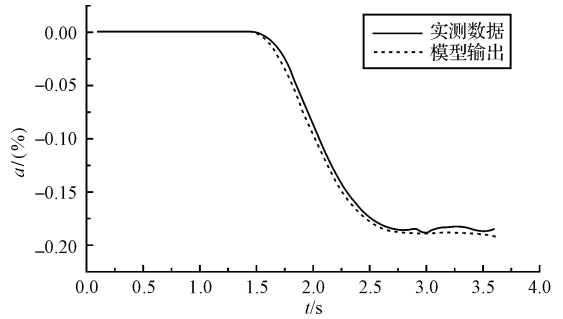


图 6 扰动模型输出及试验数据对比

### 3 PID 反馈-前馈控制算法

PID 反馈控制是按照系统的输出与设定的偏差值来进行控制的,只有当输出量发生偏移时,才能产生抑制输出量偏移的控制作用,很明显其在时间上存在滞后。而在前馈控制中,不存在被控量的反馈,直接按照一定的规律控制系统输出,前馈控制具有一定的预见性,但前馈控制对于补偿的效果没有检验手段。

因此为了解决两种控制方法各自的局限性,在工程中往往利用它们相应的特点,将前馈、反馈结合起来应用,形成“前馈—反馈复合控制”,如图 7 所示。这样,既发挥了前馈校正作用的优点,又保持了反馈控制能克服多种扰动以及对被控量最终检验的长处。

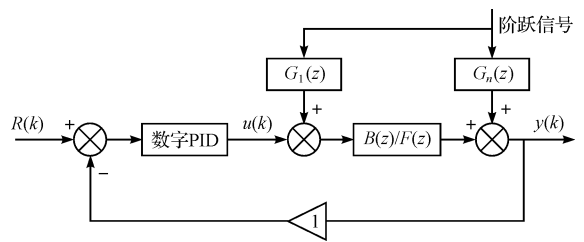


图 7 系统的反馈-前馈控制框图

对线性系统,理论上前馈控制补偿的完全不变性条件是:

$$G_n(z) + G_1(z)B(z)/F(z) = 0 \quad (6)$$

由此得出前馈补偿装置传递函数:

$$G_1(z) = -G_n(z)F(z)/B(z) \quad (7)$$

完全不变性前馈补偿在实际工程实现时,其前馈函数必须是稳定的,并且分子中不能存在纯超前项。

设对象通用模型为:

$$G(z) = \frac{(z-a_1)(z-a_2)\cdots(z-a_n)}{(z-b_1)(z-b_2)\cdots(z-b_m)} \times z^{-p} \quad (8)$$

扰动通用模型为:

$$G_n(z) = \frac{(z - c_1)(z - c_2) \cdots (z - c_i)}{(z - d_1)(z - d_2) \cdots (z - d_j)} \times z^{-k} \quad (9)$$

因此由式(7、8、9)可得,对象及扰动模型需具备以下条件,才可实现完全不变性补偿:

(1) 被控对象为最小相位系统,即模型传递函数的零点全部位于  $s$  域的左半平面( $z$  平面的单位圆内),所以其逆系统是稳定系统<sup>[9]</sup>。

(2) 对象及扰动模型阶数需满足:

$$(i + m + p - k) \leq (j + n) \quad (10)$$

式中: $n$ —对象模型零点阶数, $m$ —对象模型极点阶数, $p$ —对象模型延迟阶数, $i$ —扰动模型零点阶数, $j$ —扰动模型极点阶数, $k$ —扰动模型延迟阶数。

由获得的对象及扰动模型可知,其满足上述两个条件,可以采用完全不变性条件直接设计前馈控制器。本研究利用输出恒等于 0 的条件,直接采用阶跃信号经扰动模型获得的干扰量计算出完全控制的补偿量,只针对该特定的扰动进行补偿<sup>[10]</sup>。

由式(7)计算、整理后推得前馈传递函数为:

$$G_1(z) = \frac{0.051z(z - 0.9575)(z + 17.3)(z - 0.57)}{z^3(z - 0.9273)(z - 0.8375)} \times \frac{(z + 0.345)(z^2 - 1.782z + 0.8187)}{(z^2 - 1.554z + 0.684)} z^{-12} \quad (11)$$

$$G_1(z) = G_2(z) \times z^{-12} \quad (12)$$

## 4 试验结果

公式(11)的实际物理意义为:在系统接收到起动指令后,延时 1.2 s,将单位阶跃信号作为前馈通道的输入,经过  $G_2(z)$  传递函数运算,将其输出叠加到 PID 控制器的输出,补偿系统输出受到的干扰。

实际控制结果曲线如图 8 所示。

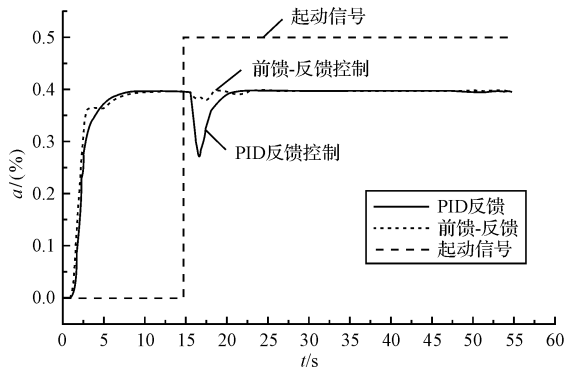


图 8 前馈-反馈控制与 PID 反馈控制结果对比

从实际控制结果看出:系统采用纯 PID 反馈控制时,当空气起动机开始起动时,空气调节压力受到扰动,下降到 273 kPa,然后压力开始逐步恢复,整个受扰和恢复过程时间约为 6 s。

在系统采用前馈—反馈复合控制算法后,空气起动机起动时,调节压力受扰程度明显改善,空气起动机进口处压力测点在气动  $V_3$  开后,起动机进口处压力测点值到达稳态上升时间由 8 s 减小为 2 s,极大改善了控制效果。该控制算法较经典的 PID 反馈控制具有更好的鲁棒性。

## 5 结束语

针对具有定常阶跃扰动的空气起动系统,提出了应用完全动态前馈补偿的实现方法。试验结果表明,前馈-反馈复合控制与纯 PID 反馈控制相比,对外部动态扰动的抑制效果好,改善了系统动态性能,且在工程上容易实现。改进的控制算法缩短了空气起动机带转发动机至点火转速时间,保障了发动机成功起动。

## 参考文献 (References):

- [1] 唐功友,高德欣. 带有持续扰动的线性系统的前馈-反馈最优控制[J]. 系统仿真学报,2005,17(6):1519-1521.
- [2] 余人杰,俞光响,高祖纲. 计算机控制技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989.
- [3] WANG D J. Further results on the synthesis of PID controller[J]. **IEEE Transaction on Automatic Control**, 2007, 52(6):1127-1132.
- [4] 李言俊,张 科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [5] GOZZO F. Recursive least-squares sequence estimation[J]. **IBM Journal of Research and Development**, 1994, 38(2):131-156.
- [6] 刘 亮,汪林海,张 波. 超小型旋翼飞行器遥操作仿真模型控制函数的辨识[J]. 机电工程,2009,26(6):13-16.
- [7] AKAIKE H. Bayesian analysis of the minimum AIC procedure[J]. **Annals of Institute of Statistical Mathematics**, 1978, 30(Part A):9-14.
- [8] 吴 超,陆 超,韩英译,等. 计及模型定阶的低频振荡模式类噪声信号辨识[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):1-5.
- [9] 冯之敬,马 骋,赵广林. 非圆车削加工切削力的辨识[J]. 清华大学学报:自然科学版,2000,40(5):47-49.
- [10] 栾尊禄. 计算机前馈控制技术的应用[J]. 航天工艺,1998(4):40-44.

[编辑:李 辉]