

文章编号:1000-8055(2011)11-2578-06

涡轴发动机导叶控制系统建模仿真 及其 PID 控制器改进

周剑波^{1,2}, 邓文革², 刘铁庚², 孙健国¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 通过对航空涡轴发动机数字式导叶控制系统各个环节分析计算,建立了系统的数学模型,在系统仿真分析的基础上,对 PID(proportion integral derivative)控制器进行了改进设计,提出了不完全微分先行二阶 PID 控制方法. 试验结果表明,使用不完全微分先行二阶 PID 控制方法,导叶控制系统性能明显改善:响应迅速,无振荡,仅有很小超调,满足了系统研制性能要求.

关 键 词: 涡轴发动机; 导叶控制系统; 数学模型; 建模仿真; PID 控制器

中图分类号: V233

文献标志码: A

Modeling simulation of turboshaft engine IGV digital control system and PID controller improvement

ZHOU Jian-bo^{1,2}, DENG Wen-ge², LIU Tie-geng², SUN Jian-guo¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

2. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Simulation of turboshaft engine IGV (inlet guide vane) digital control system was performed with system model, which was obtained through analysis and calculation. PID (proportion integral derivative) controller of IGV was improved based on the above work and a method called predetermined incomplete differential of the second order PID control was proposed. Test results show that the IGV digital control system is improved obviously. The response is more quick without oscillation, and agrees with the design requirements.

Key words: turboshaft engine; IGV (inlet guide vane) control system;
mathematical model; modeling simulation;
PID (proportion integral derivative) controller

航空发动机导叶(inlet guide vane, 简称 IGV)控制系统是通过感受发动机的换算转速,按一定规律来调节压气机进口导向叶片或前几级静叶的安装角,使各级气流通道面积满足发动机各

状态点要求,从而控制发动机压气机所需的空气流量,达到改善发动机性能,提高压气机喘振裕度的目的. 大多数高增压比轴流式压气机都采用这种调节方式^[1-3].

收稿日期:2011-08-10; 修订日期:2011-10-08

基金项目:航空支撑科技基金(04B52006)

作者简介:周剑波(1963—),男,湖南涟源人,研究员,博士生,主要从事航空发动机数控系统研制、故障诊断等方面研究.

导叶控制系统经历了从液压机械式到数字式的发展过程, 现在航空发动机导叶调节是全权限数控系统(FADEC)所包含的诸多功能之一。但在压气机的研制试验阶段, 寻求最佳匹配角度及其调节规律, 具有独立调节功能的导叶控制系统仍是必不可少的。

导叶控制系统也是一种典型的数字式电液伺服系统。目前, 这种电液伺服系统使用非常广泛, 如研制中的某型发动机数控系统就包含两个电液位置伺服系统: 导叶角度控制和油针位移控制。还有, 用于强度试验的电液加载系统、地面燃机的燃气流量阀的控制等也都是电液伺服系统。

不管是独立的数字式导叶控制系统, 还是全权限数控系统包含的导叶控制系统, 其组成及原理基本相同。数字式导叶控制系统主要由传感器、电子控制器、电液伺服阀、作动筒、油源等组成。数字式导叶控制系统工作原理可以参照图 1。电子控制器采集转速、温度、位移三个信号后, 根据转速、温度按控制规律计算出给定位移 H , 给定位移 H 与 L 比较得到误差信号 E_k , 经 PID(proportion integral derivative)控制器算出 p_k , 经伺服放大器转换成电流信号 I 控制电液伺服阀, 液压油源为电液伺服阀提供压力油源 p_s , 电液伺服阀根据电流 I 的大小和方向改变作动筒两腔的油压, 从而使作动筒活塞杆的输出位移发生变化, 并通过连杆机构控制导叶的转角 α , 这个过程不断重复, 直到误差 E_k 在要求的范围内(一个调节过程结束), 作动筒的位移即为导叶控制所要求的位移^[4-7]。

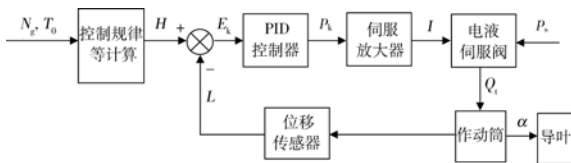


图 1 导叶控制系统框图

Fig. 1 IGV control system

PID 控制器的设计是数字式导叶控制系统研制的关键。PID 控制方法是数字控制系统中成熟的、应用广泛的一种控制方法。普通的电液伺服系统采用 PID 控制方法, 经合理的参数整定后, 能满足性能要求。但由于航空发动机导叶控制系统为气动负载, 采用燃油泵后压力作为动力油源 p_s , 两者都是随发动机转速变化而变化, 而且采用的是特殊介质——煤油^[8], 一般的经典 PID 控制

方法很难使系统达到要求的性能指标。为此, 在对航空发动机数字式导叶控制系统仿真分析的基础上, 对其 PID 控制器进行了改进与创新, 提出了不完全微分先行的二阶 PID 控制方法, 使系统的性能指标满足了要求, 解决了航空发动机研制中的难题。

1 系统建模及仿真

1.1 系统建模

对图 1 所示的航空发动机数字式导叶控制系统的各个环节进行分析计算, 可以建立系统的数学模型, 具体建模如下。

1.1.1 PID 控制器

PID 控制器有多种形式^[9-10], 根据以前设计类似电液伺服系统的经验, 可以暂时设计 PID 控制器为普通形式, 即

$$W_1(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

式中 PID 的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 在系统仿真和性能调试后具体确定。

1.1.2 伺服放大器

伺服放大器的放大系数由硬件电路及软件确定^[11-12]。根据硬件电路及软件编制, 可以计算出伺服放大器的放大系数 $K_1 = 8 \text{ mA/mm}$ 。

1.1.3 电液伺服阀的传递函数

根据电液伺服阀生产厂家提供的资料, 电液伺服阀可以用下面的传递函数近似表示:

$$W_2(s) = \frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{K_q}{\frac{1}{\omega_q^2} s^2 + \frac{2\zeta_q}{\omega_q} s + 1} \quad (2)$$

式中 ζ_q , K_q , ω_q 分别为电液伺服阀的阻尼比、流量增益、自然频率。电液伺服阀的阻尼比 ζ_q 在 0.7~1.0 之间, 可取 $\zeta_q = 0.8$, 在额定压力 $p_s = 21 \text{ MPa}$ 及额定电流 $I = 8 \text{ mA}$ 时, 电液伺服阀的流量增益 K_q 及自然频率 ω_q 分别为

$$Q_s = 10 \text{ L/min}$$

$$\omega_q = 90 \text{ s}^{-1}$$

则电液伺服阀的流量增益为

$$K_q = \frac{Q_s}{I} = 20833 \text{ mm}^3/(\text{s} \cdot \text{mA})$$

导叶控制系统实际应用中, 系统使用的常用压力为 4 MPa, 流量增益 K_q 及自然频率 ω_q 需按此压力进行修正, 即

$$K_q = 20833 \sqrt{\frac{4}{21}} = 9063 \text{ mm}^3/(\text{s} \cdot \text{mA})$$

$$\omega_{h1} = 90 \sqrt{4/21} = 39.279 \text{ s}^{-1}$$

则,电液伺服阀的传递函数为

$$W_2(s) = \frac{9063}{0.000648s^2 + 0.0407s + 1} \quad (3)$$

1.1.4 阀控作动筒的传递函数

根据参考文献[4,8],阀控作动筒的传递函数可以表示为

$$W_3(s) = \frac{L(s)}{Q(s)} = \frac{K_2}{\frac{1}{\omega_h^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_h}s + 1} \frac{1}{s} \quad (4)$$

根据作动筒的尺寸及质量(0.85 kg),选取适当的油液弹性模数,可以算出作动筒的增益系数 $K_2 = 0.001143 \text{ mm}^2$,固有频率 $\omega_h = 425 \text{ s}^{-1}$ (具体推导计算从略),取阻尼比 $\zeta = 0.2$,则上式可变为

$$G(s) = \frac{82.87}{s(0.00648s^2 + 0.0407s + 1)(0.00000005s^2 + 0.000047s + 1)} \left[K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \right] \quad (6)$$

系统的闭环传递函数为

$$W(s) = \frac{L(s)}{H(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (7)$$

将以上建立的系统数学模型用 MATLAB 软

$$W_3(s) = \frac{0.001143}{0.00000005s^2 + 0.000047s + 1} \frac{1}{s} \quad (5)$$

1.1.5 位移传感器的传递函数

位移传感器为电磁式传感器,反应灵敏,可以看作系数为 $K_3 = 1$ 的比例环节。

1.2 系统的数学模型及仿真

由于数控系统的运行速度很快,和系统的动态性能相比,可以忽略单片机的数据处理时间.采用给定位移 $H(s)$ 作为输入量,并不影响系统的性能分析结果,基于这些考虑,根据上面分析计算,可以画出导叶控制的结构框图如图 2。

则系统的开环传递函数为

件进行仿真,选取阶跃输入量为 10 mm,即 $H = 10 \cdot 1(t)$,不断地调整 PID 控制器的系数.图 3(a)~(f)是系统用不同 PID 系数的仿真结果。

从仿真结果可以看出,系统是稳定的,无静

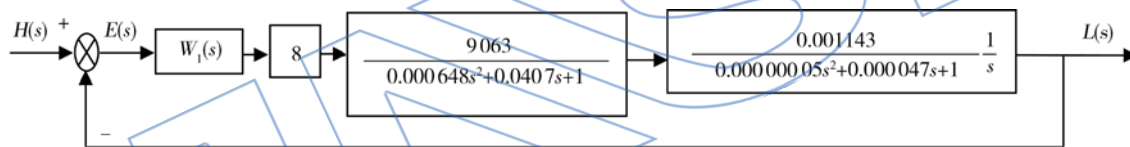
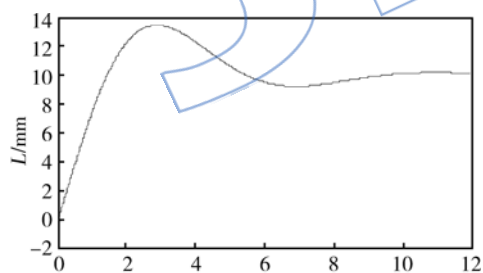
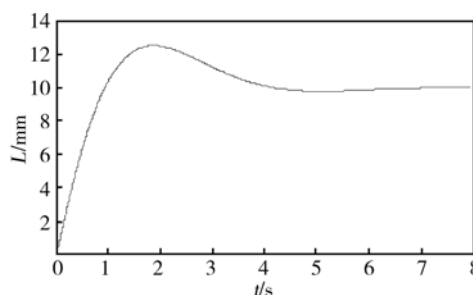


图 2 系统结构框图

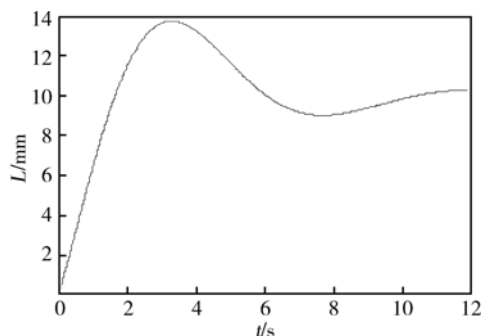
Fig. 2 Control system structure



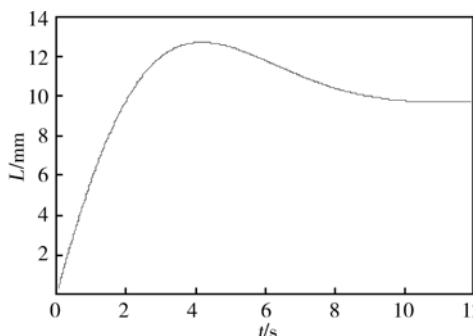
(a) $K_p=0.0354, K_i=0.0354, K_d=0.0354$



(b) $K_p=0.0707, K_i=0.0707, K_d=0.0354$



(c) $K_p=0.0707, K_i=0.0707, K_d=0.1061$



(d) $K_p=0.1414, K_i=0.0707, K_d=0.2121$

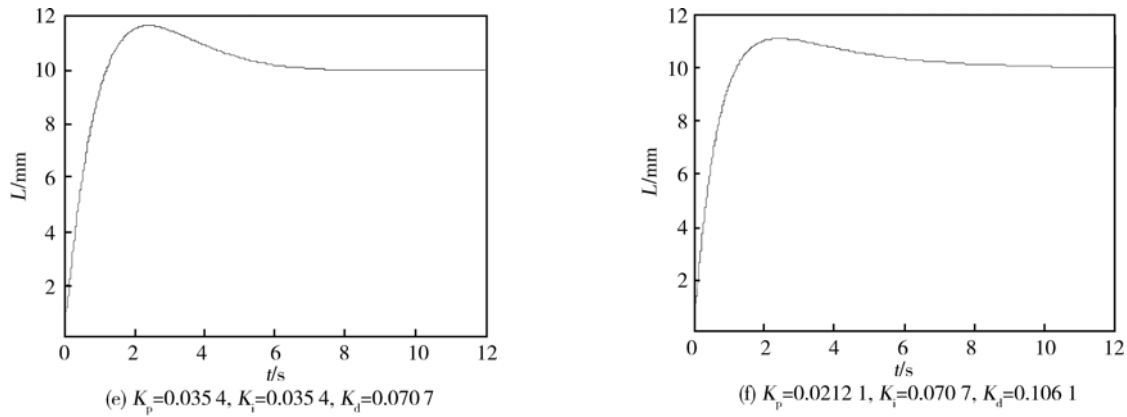


图 3 不同 PID 参数的位移阶跃响应

Fig. 3 Step response of different PID parameters

态误差,响应速度一般(离研制要求中响应时间 0.35 s, 还有很大差异),有超调,选取适当的 PID 控制器系数后,可以提高系统的响应速度,减少超调量. 图 3(e)和图 3(f)系统仿真结果较好,说明此时的 PID 控制器的系数较为匹配,但仍不能满足性能要求,为此本文提出新的改进设计.

2 PID 控制器的设计及改进

2.1 系统试验方案

本文在前面数字仿真的基础上进一步开展导叶控制系统试验研究,系统试验方案如图 4 所示: 液压油站介质为煤油,导叶控制系统通过串口与计算机进行通讯,负载为某型发动机压气机导叶.

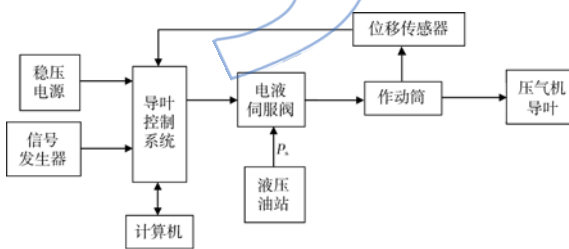


图 4 导叶控制系统试验图

Fig. 4 Test of IGV control system

2.2 PID 控制器设计及系统性能调试

根据前面的仿真分析,就可以在软件中设计 PID 控制器了. 普通的 PID 计算公式如下(误差信号 $E_k = H - L$):

$$p_k = p_p + p_i + p_d \quad (8)$$

式中(其中符号下标有 -1 的表示上一次计算结果).

比例项 $p_p = K_p \times E_k$

积分项 $p_i = p_{i-1} + K_i \times E_k$

微分项 $p_d = K_d \times (E_k - E_{k-1})$

根据仿真结果,选取图 3(e),(f)的 PID 系数,此时系统的阶跃响应见图 5.

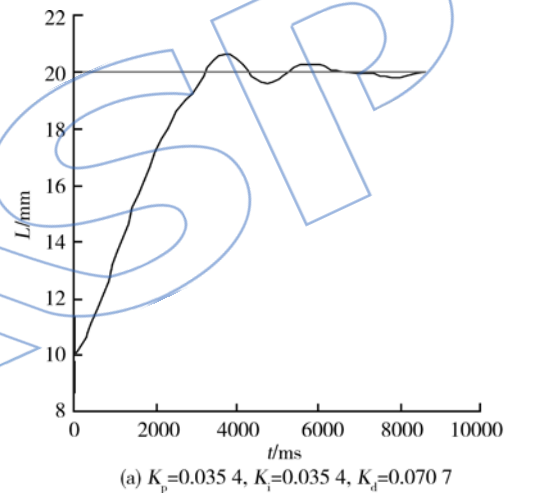
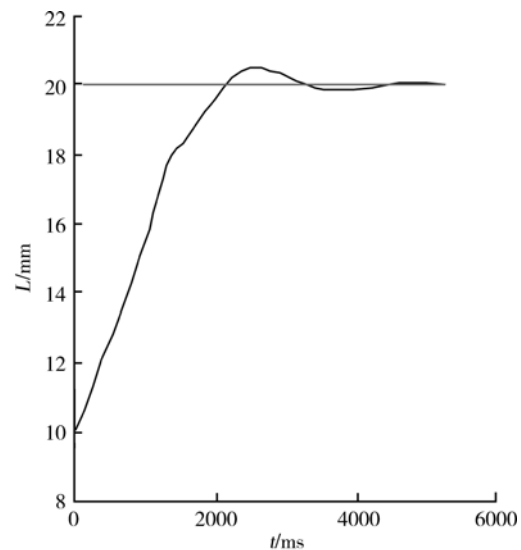
(a) $K_p=0.035\ 4$, $K_i=0.035\ 4$, $K_d=0.070\ 7$ (b) $K_p=0.212\ 1$, $K_i=0.070\ 7$, $K_d=0.106\ 1$

图 5 实际系统的阶跃响应

Fig. 5 Step response of real system

实际系统阶跃响应和仿真结果比较,趋势基本一致,说明系统数学模型基本正确,但实际系统阶跃响应性能差一些:响应慢些,有几个周期的振荡.分析原因是系统的数学模型不够准确,过于理论化:建模时,未考虑采样延迟和液压延迟;忽略了某些环节(如作动筒动作时,油源压力的波动等);一些参数计算和选择也不够准确(如液压阻尼系数,电液伺服阀的自然频率等).

2.3 PID 控制器的改进及系统性能调试

从上面的结果可以看出,实际系统响应偏慢,超调也过大,系统的性能达不到研制要求.为了满足系统的稳态、动态性能要求,必须对 PID 控制器进行改进.

首先,在普通 PID 控制器的基础上增加了二阶环节,对误差信号 E_k 进行平方处理,即

$$p_k = p_p + p_i + p_d + p_2 \quad (9)$$

式中 p_2 为二阶环节,计算公式为

$$p_2 = K_2 \times |E_k| \times E_k$$

如果把 $K_2 \times |E_k|$ 看作一个系数,则该环节实质相当于一个变参数的比例项,即比例系数随误差变化而变化,和一般比例项相比,二阶项处理结果使 p_2 在误差大时更大,误差小时更小,有利于提高系统的响应速度,减少超调量.选取适当系数后,此时实际系统阶跃响应如图 6 所示.

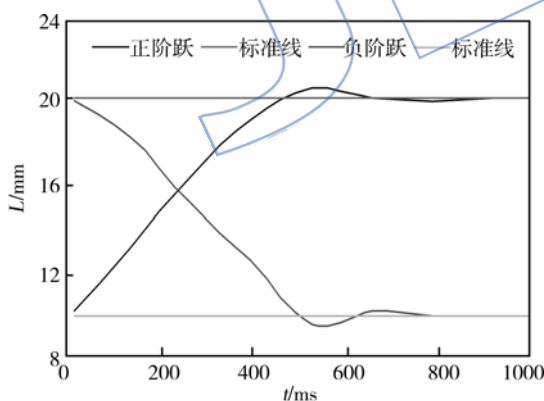


图 6 增加二阶环节后实际系统的阶跃响应

Fig. 6 Step response of second order PID control system

和前面的调试结果(图 5)比较,系统的阶跃响应速度有较大提高,但超调量依然偏大, PID 控制器仍需改进.为了使系统满足性能要求,对 PID 控制器作了大量的探索和创新,整个系统进行了反复调试,最后提出的 PID 控制器含有如下几个环节(见图 7):①不完全微分先行;②比例项;③

加限制的分阶段积分;④二阶项.

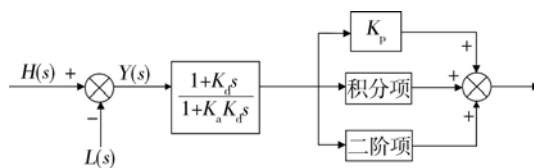


图 7 不完全微分先行二阶 PID 控制器

Fig. 7 Predetermined incomplete differential of second order PID control system

包含以上环节的 PID 控制器,称之为不完全微分先行二阶 PID 控制器,其具体设计过程如下:

1) 求误差信号

$$E_k = H - L$$

2) 求不完全微分处理后信号 $Y_k^{[5]}$, 即

$$Y_k = K_b Y_{k-1} + (1 - K_b) [E_k + K_d (E_k - E_{k-1})] \quad (10)$$

式中 $K_b = \frac{K_a K_d}{1 + K_a K_d}$, K_a 为不完全微分系数.

3) 求比例项

$$p_p = K_p \times Y_k$$

4) 求二阶项

$$p_2 = K_2 \times |Y_k| \times Y_k$$

5) 求积分项

$$p_i = p_{i-1} + K_i \times Y_k$$

其中

$$K_i = \begin{cases} K_{i1} & (|Y_k| < a) \\ K_{i2} & (a \leq |Y_k| < b) \\ 0 & (|Y_k| \geq b) \end{cases}$$

以上式中将积分处理结果的最大值加以限制,即 $|p_i| < p_{im}$.

采用此改进后的 PID 控制器,具体调定各式的系数后,实际系统的阶跃响应如图 8 及表 1 所示.从最终的调试结果可以看出,系统性能明显改善:响应迅速,无振荡,仅有很小超调,满足了系统的研制性能要求.

和普通的 PID 控制器比较,不完全微分先行二阶 PID 控制器主要是增加了二阶项、不完全微分先行、加限制的分阶段积分等环节,这几个环节的效果如下:二阶项是在不增加超调的情况下,明显提高响应速度;不完全微分先行是减少超调量,又能抑制高频干扰;加限制的分阶段积分是既保持积分作用,又减小了超调量.把图 5(b),图 6 的正阶跃及图 8 的正阶跃放在一起进行比较,可以看出这几个环节的实际效果(见图 9).

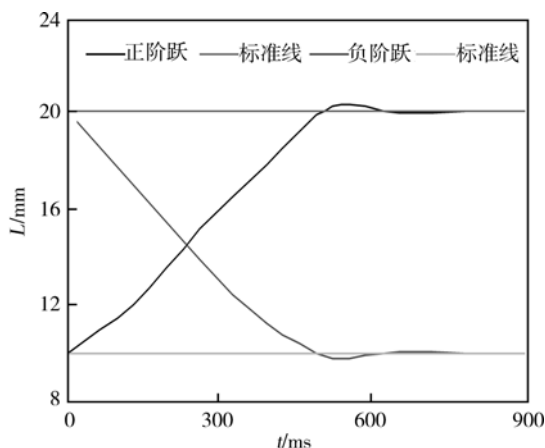


图 8 采用改进 PID 控制器实际系统的阶跃响应

Fig. 8 Step response of improved PID control system

表 1 调试数据

Table 1 Debugging data

负阶跃			正阶跃		
t/ms	H/mm	L/mm	t/ms	H/mm	L/mm
0	20.00	20.00	0	10.00	10.00
131	10.00	16.89	131	20.00	11.98
262	10.00	13.88	262	20.00	15.09
393	10.00	12.83	393	20.00	17.75
524	10.00	9.85	524	20.00	20.14
655	10.00	10.13	655	20.00	19.93
786	10.00	9.97	786	20.00	20.03
917	10.00	10.00	917	20.00	19.97
超调量/%		1.5			1.4

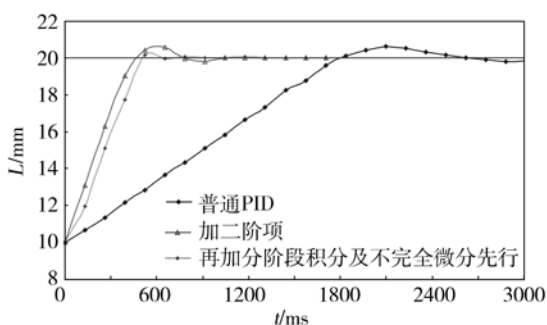


图 9 PID 控制器改进的实际效果

Fig. 9 Effect of improved PID control system

3 结 论

通过系统建模仿真分析,在大量调试的基础

上,提出了不完全微分先行二阶 PID 控制方法,使导叶控制系统性能满足了研制技术要求,解决了航空发动机研制中的难题。

参考文献:

- [1] 姚文荣,孙健国. 基于在线可变导叶角的涡轴发动机优化控制[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1930-1934.
YAO Wenrong, SUN Jianguo. Online optimization control of turboshaft engines based on variable inlet guide vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1930-1934. (in Chinese)
- [2] Smith R H, Chisholm J D, Stewart J F. Optimizing aircraft performance with adaptive, integrated flight/propulsion control[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1991, 113(1): 87-92.
- [3] Gastineau Z. Robust internal model turbomachinery control[D]. Dallas, Texas: Mechanical Engineering Department, Southern Methodist University, 1998.
- [4] Sun J, Elder R L. Numerical optimization of a stator vane setting in multistage axial-flow compressor[J]. Journal of Power and Energy, 1998, 212(4): 247-259.
- [5] 熊劲松,侯安平,袁巍,等. 可调叶片的发展趋势及其气动问题的探讨[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 112-116.
XIONG Jinsong, HOU Anping, YUAN Wei, et al. Some discuss on technology trend and aerodynamics problem of adjustable blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 112-116. (in Chinese).
- [6] 邓文革,文建彬. 航空发动机导叶数控装置[R]. 北京: 中航总公司发动机自控学会学术讨论会, 1992.
- [7] 邓文革. 某型发动机双通道数字式导叶控制器研究[R]. 西安: 中航总公司发动机自控学会学术讨论会, 1998.
- [8] 王占林. 液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
- [9] 李玥,健国. 基于遗传算法的航空发动机多目标优化 PID 控制[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 174-178.
LI Yue, SUN Jianguo. Multi-objective optimization of aeroengine PID control based on multi-objective genetic algorithms[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 174-178. (in Chinese)
- [10] 吴勇,谢寿生,唐奇,等. 基于支持向量机的航空发动机 PID 解耦控制[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2349-2355.
WU Yong, XIE Shousheng, TANG Qi, et al. PID decoupling controller for aero-engine based on support vector machines[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2349-2355. (in Chinese)
- [11] 陈金雕. 计算机控制技术[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [12] 陈建铎. Intel 单片机应用技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.