

喷气发动机转速数字控制器优化设计

西北工业大学 杨生发

一、数字控制器系数优化

喷气发动机转速数字控制系统的构成和动态模型如图1所示。数字控制器由微机编程实现。该闭环系统由PID控制器进行串联校正、角度负反馈为位置反馈校正。

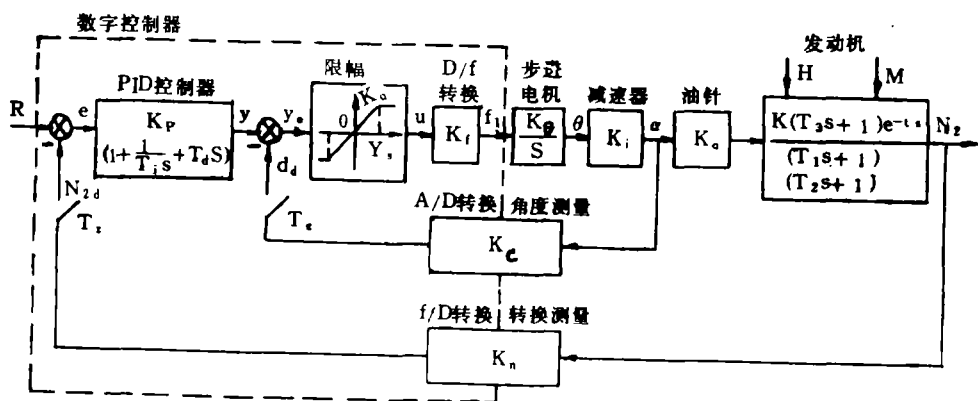


图1 转速数字控制系统结构图

PID控制器有两种模型有待选择。数字控制器的特征参数： K_p 、 T_i 、 T_d 、 K_a 、 Y_s 、 K_c 优化后才能有效地改善系统的动态品质，把这六个参数定为系统优化参数，根据对系统动态性能的要求选用选择性好的三种目标函数进行优化。目标函数如下

$$\text{误差积分型: } J_1 = \int_0^{15} t(|e| + |e'|) dt \quad (1)$$

$$\text{二次型: } J_2 = \int_0^{15} t(4e^2 + u^2) dt, \quad J_3 = \int_0^{15} (5te^2 + u^2) dt \quad (2)$$

发动机动态参数： K (r/min/l/h)， $T_1(s)$ ， $T_2(s)$ ， $T_3(s)$ 随工作状态不同在很大范围内变化，选地面设计点为参数优化点，动态性能最差的工作状态为验算点。先在优化点按上面六种情况分别进行参数优化，再用所得结果计算验算点系统动态响应，选择PID模型及相应的优化参数值使系统在设计点最优，在验算点次优。

本文采用单纯形法分粗、精两个阶段进行优化参数值搜索。初始单纯形步距 $h = 0.05$ ，压缩因子 $\lambda = 0.7$ ，扩张因子 $\mu = 1.5$ ，粗搜索积分步长 $\Delta t_1 = 0.05$ ，相对收敛误差 $\varepsilon_1 = 0.005$ ，精搜索时 $\Delta t_2 = 0.005$ ， $\varepsilon_2 = 0.001$ 。用FORTRAN77语言编写通用程序把优化(主程序)和仿真(子程序)结合起来进行。

二、算例和计算结果分析

为便于与文献^[1~3]的成果比较,选JT15D-4型发动机为算例,且以地面台架 $N_2 = 90\%$ 状态为优化点,高度 $H = 9.144\text{Km}$,马赫数 $Ma = 0.6$, $N_2 = 94.62\%$ 为验算点。优化点的参数^[1, 2]为: $K = 9.8473$, $T_1 = 0.276$, $T_2 = 0.1431$, $T_3 = 0.1571$, 稳态值 $N_{20} = 30062$, $G_{t0} = 600(\text{L/h})$, $\alpha_0 = 25.59(^{\circ})$, $R_0 = 120.248$ 。验算点的参数^[3]为: $K = 20.5$, $T_1 = 0.6322$, $T_2 = 0.4698$, $T_3 = 0.459$, $N_{20} = 31,000$, $G_{t0} = 372$, $\alpha_0 = 15.92$, $R_0 = 124$ 。忽略燃烧延迟取 $\tau = 0$ 。系统其它参数为: $K_f = 20\text{Hz}$, $K_j = 1/32$, $K_o = 1.5^{\circ}/\text{脉冲}$, $K_h = 0.0041/\text{r/min}$, $K_g = 23.37\text{L/h}/^{\circ}$, $T_z = 0.05\text{s}$ 。阶跃输入取小偏离 $R = 2.21\%$, $R_0 = 2.778$ (相当于 $\Delta N_2 = 694.5\text{r/min}$), 在优化点取正阶跃, 在验算点取负阶跃。全部计算在IBM-PC微机上进行。

系统在优化点用两种PID模型、三种目标函数分别进行优化。优化参数值及系统品质指标见表1, 采用增量式PID时系统阶跃响应见图2。

优化结果表明: PID模型和目标函数对优化参数值影响很大但都可获得超调量很小响应较快的动态过程; PID控制器用位置式模型时必须进行反馈校正且响应速度较慢, 用增量式模型时不必进行反馈校正已为PI控制使系统简化且响应速度较快, 故应采用增量式模型; 用 J_1 优化时响应速度最快, 但 u 、 G_t 的超调量太大不易实现, 用 J_2 优化时响应速度较慢。而 u 、 G_t 单调变化, 系统工作可靠, 用 J_3 优化时响应速度最慢且PID用增量式模型时优化参数值已不可用, 故以用 J_2 优化为宜。

应用表1中的优化结果在验算点计算系统阶跃响应, 动态品质指标见表2。由表2可知: N_2 超调量增大, 调节时间延长系统动态性能明显下降, PID控制器用增量模型比用位置式

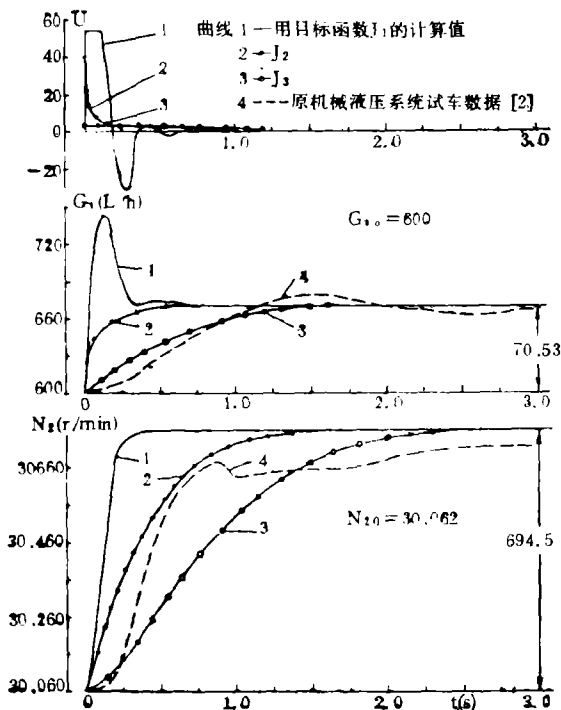


图2 系统阶跃响应(1、2、3分别为用 J_1 、 J_2 、 J_3 的计算值, 4为原机械液压系统试车数据^[2])

表 1 优化参数值及系统动态品质指标

PID 模 型		位 置 式			增 量 式		
目 标 函 数		J_1	J_2	J_3	J_1	J_2	J_3
优 化 参 数 值	K_p	5.514738	4.526456	3.268867	9.738919	5.290708	0.04710
	T_i	2.530556	0.587179	5.666932	0.114922	0.235357	0.00850
	T_d	0.167121	0.131778	0.398512	0.007219	0	0
	K_a	2.335982	3.278403	1.353492	8.996368	3.577145	5.30970
	Y_s	7.609201	10.49741	2.836373	5.927635	10.62916	7.96310
	K_c	0.07255	0.353881	0.05002	0	0	0
N_2 品 质	$\sigma p\%$	0.39%	0	0.65%	0.17%	0.10%	0.80%
	$t_p s$	0.95		4.65	0.60	2.00	2.90
	$t_s s$	0.60	1.15	2.05	0.25	1.00	1.85

表 2 验算点系统动态品质指标

PID	位 置 式			增 量 式		
J	J_1	J_2	J_3	J_1	J_2	J_3
t_p	0.65	0.55	2.10	0.30	1.10	1.70
$\sigma p\%$	26.28%	87.79%	17.73%	5.38%	8.80%	29.96%
$t_s(s)$	3.80	1.70	9.10	0.35	1.45	3.90

模型动态性能好,适应发动机动态参数变化的能力强,用 J_2 优化的优化参数值动态性能最好。

综上所述数字控制器中PID应采用增量式模型,结构参数应该用 J_2 优化,优化参数值见表1。系统在优化点的阶跃响应曲线见图2中曲线2,动态品质指标见表1。图2中曲线1为原机械液压式转速控制系统台架试车记录之阶跃响应曲线^[2], N_2 无超调, $t_s = 6.13s$ 。系统在验算点的动态品质指标见表2,原机械液压式控制系统在验算点^[3] N_2 及 G_1 均有一次大幅度振荡调节时间长得多。可见本文提出的优化转速数字控制系统动态性能明显地优于原机械液压式控制系统。

三、结 论

本文提出的优化转速数字控制系统在理论上动态品质明显地优于原机械液压式控制系统,可能提高发动机恒定转速控制的动态品质。

数字控制器中PID采用增量式模型并对控制作用 u 限幅,用目标函数 J_2 优化参数后不必采用位置反馈校正,实现优化的PI控制,从而简化了系统,提高了可靠性。本方法也可推广应用于其它类似系统的设计。

参 考 文 献

- (1) 陈秀崧,“JT15D-4涡轮风扇发动机运动方程推导及计算”,六〇八所,1981年。
- (2) 马乾坤,“JT15D-4发动机燃油调节器台架试验报告”,六〇八所,1979年。
- (3) 王荃贞,“JT15D型发动机动态模拟试验报告”,北京航空学院,1979年。

(责任编辑 王庆康)

COMPUTATION OF DYNAMIC PROCESS WITH LARGE DISTURBANCE FOR SPLIT-SHAFT GAS TURBINE

Lu Zehua and Ye Bosheng (*Tsinghua University*)

Taking Spey core engine used in a gas-stream combined cycle as an example, this paper deals with computation of dynamic process with large disturbance for split-shaft gas turbine with a variable-coefficient divisional small-disturbance for linearization method.

OPTIMIZING DESIGN FOR TURBOENGINE DIGITAL SPEED CONTROLLER

Yang Shengfa (*Northwestern Polytechnical University*)

A method for optimizing characteristics of digital speed controller of a turbo-engine is presented. A dynamic model of this system has been developed. According the chosen quadratic property criterion, six characteristic quantities of the digital controller are optimized by system simulation in a digital computer. As JT15D-4 turbofan is taken for example, its digital speed controller system optimized by the present method is obviously better than the original hydromechanical system.

STUDY ON EXCHANGE OPERATION BETWEEN TWO MICROCOMPUTERS IN AEROENGINE DIGITAL CONTROL

Xu Qihua and Wu Qihua (*Northwestern Polytechnical University*)

Communication and trouble-selfdetection of microcomputers in dual-computer system of aeroengine digital control are considered, and exchange operation between two microcomputers is discussed emphatically. The simulation tests of the exchange operation in dual-computer engine speed control system have been performed. The results of the tests are satisfactory.