

文章编号: 1000-8055(2003)04-0538-04

航空发动机多变量模糊 PD 控制

董 劲, 黄金泉

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 普通 PD 控制器以其简单、实用、易于实现, 在经典控制中倍受青睐。但是, 对于像航空发动机这样复杂的非线性系统, 这种控制器的控制效果就不够理想了。模糊控制理论的建立为这种问题的解决奠定了基础。本文针对航空发动机难于建立精确数学模型的特点, 提出了发动机模糊 PD 参数自适应控制方案, 并且对某型航空发动机进行了全包线内的数字仿真。仿真结果表明发动机模糊 PD 控制不仅不依赖于精确的对象模型, 而且具有满意的动、静态性能。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 模糊控制; 多变量控制; PD 控制

中图分类号: V 233. 7

文献标识码: A

Multivariable Fuzzy-PD Control for Aeroengine

DONG Jin, HUANG Jin-quan

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Due to its simplicity, utility and easy application, PD controller is used largely in classical automation systems. However, the performance of the controller can not satisfy complicated nonlinear systems such as aircraft engines. This problem can be solved on the basis of the fuzzy control theory. It is very difficult to formulate accurate models for aircraft engines. In consideration of this difficulty, a parameter self-adapting fuzzy-PD controller is put forward for aircraft engines. The full envelope simulation results indicate that not only the fuzzy-PD controller does not rely on the precisely accurate models but also possesses favorable dynamic and static control performances.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengines; fuzzy control; multivariable control; PD control

1 引言

航空发动机是一个结构极其复杂、强非线性的控制对象, 对其建立精确数学模型十分困难, 这就使得以被控制对象的精确数学模型为基础的经典控制和现代控制显得乏力。然而, 模糊控制理论恰恰能够很好地解决这一问题。此外, 近年来航空

发动机控制变量不断增加——具有七个变量的 F100 已经投入使用, 而且 GE23 和 PW 4000 也已经发展到 10 个控制变量^[1]。对这些多变量系统如果应用多变量模糊控制, 其空间划分会因为维数的增加而发生灾难性膨胀, 而且也需要针对性强的专家规则^[2~4], 这两方面都会大大增加控制器设计的难度。如果减少模糊控制规则, 则又会降低

收稿日期: 2002-09-24; 修订日期: 2003-01-10

基金项目: 航空科学基金资助项目(99C5207)

作者简介: 董劲(1977-), 男, 江苏徐州人, 南京航空航天大学能源与动力学院硕士生

控制器品质^[5]。基于以上原因, 本文提出采用对各个变量分开控制的模糊 PD 控制方案。

2 模糊 PD 控制系统结构和原理

模糊 PD 控制系统结构如图 1 所示。控制器以输入误差 e 和误差变化率 ec 为输入, 通过模糊推理在线调整 PD 参数 K_p, K_i 和 K_d 。

$$u(k) = u(k - 1) + K_p[e(k) - e(k - 1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)]$$
 (1)

式中: K_p 为比例系数, $K_i = K_p T / T_i$ 为积分系数, $K_d = K_p T_d / T$ 为微分系数。

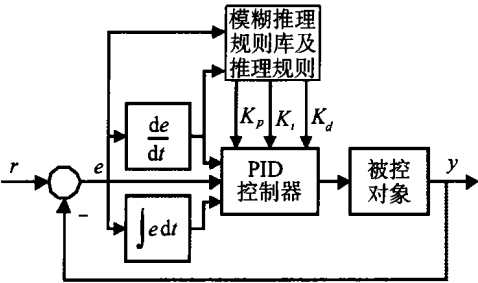


图 1 模糊 PD 控制器结构图

Fig 1 Structure of fuzzy-PD controller

根据专家经验总结出的对象在被控过程中不同 $|e|$ 和 $|ec|$ 状态时参数自适应调整的原则如下:

(1) 当 $|e|$ 较大时, 为了加快系统的响应速度, 避免较大的超调和防止引起微分溢出, 取较大的 K_p, K_i 为 0 和较小的 K_d 。

(2) 当 $|e|$ 中等大小时, 为了保证响应速度和较小超调量, 取中等的 K_p, K_i 和 K_d 。

(3) 当 $|e|$ 较小时, 为了拥有好的稳态性能, 取较大的 K_p, K_i 。此时, $|ec|$ 小则 K_d 大, $|ec|$ 大则 K_d 小, 通常取中等 K_d 以保证系统抗干扰性能^[6]。

3 模糊 PD 控制器设计

3.1 确定隶属函数

输入语言变量误差 e 和误差变化 ec 的值取为: 负大 NL、负中 NM、负小 NS、零 NP、正小 PS、正中 PM、正大 PL。对其采用三角形隶属函数, 如图 2 所示。

对 K_p 和 K_d 归一化为 0 至 1 之间的参数 K'_p 和 K'_d ^[7]。

$$K'_p = (K_p - K_{p,min}) / (K_{p,max} - K_{p,min})$$
 (2)

$$K'_d = (K_d - K_{d,min}) / (K_{d,max} - K_{d,min})$$
 (3)

取 $T_i = \alpha T_d$, 则:

$$K_i = K_p / (\alpha T_d) = K_p^2 / (\alpha K_d)$$
 (4)

这样, K_p, K_i 和 K_d 就由 K'_p, K'_d 和 α 决定。 K'_p, K'_d 的语言值取: 大 L 和小 S, 对应的隶属函数是:

$$\mu_S(x) = -0.25 \ln x \text{ 或 } xS(\mu) = e^{-4\mu}$$
 (5)

$$\mu_L(x) = -0.25 \ln(1 - x)$$

$$\text{或 } xL(\mu) = 1 - e^{-4\mu}$$
 (6)

式中 x 代表 K'_p 和 K'_d , 隶属函数如图 3 所示。

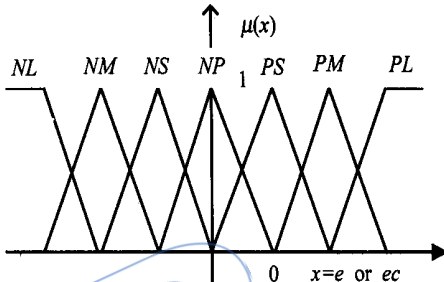


图 2 e, ec 的隶属函数

Fig 2 Fuzzy membership functions of e and ec

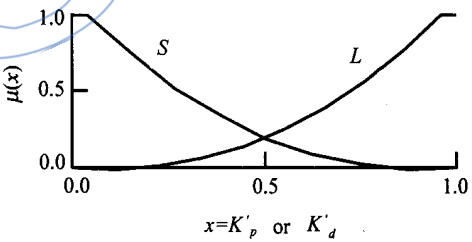


图 3 K'_p, K'_d 的隶属函数曲线

Fig 3 Fuzzy membership functions of K'_p, K'_d

3.2 参数调整规则

图 4 和图 5 分别是某二阶系统在单位阶跃输

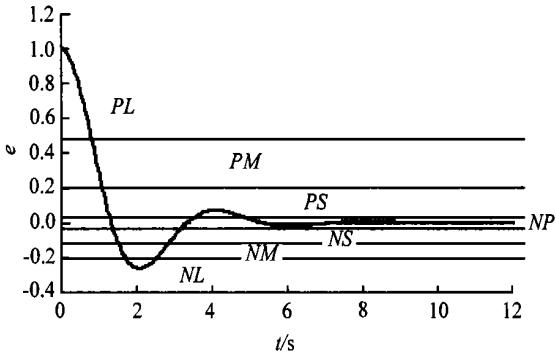


图 4 误差 e 的语言变量定义

Fig 4 Definition of linguistic variable e

入信号作用下响应的误差 e 曲线与误差变化率 ec

曲线。控制专家一般将它们划分为如图所示的 7 个区域。根据本文第二节中专家经验,可以确定

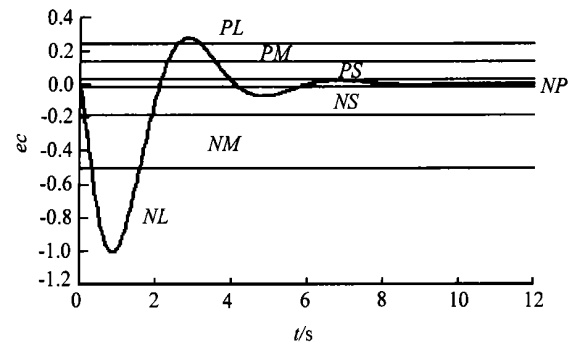


图 5 误差变化率 ec 的语言变量定义
Fig 5 Definition of linguistic variable ec

表 1 K_p' 的调整规则表
Table 1 The rules of K_p'

ec	e						
	NL	NM	NS	NP	PS	PM	P
NL	L	L	L	L	L	L	L
NM	S	L	L	L	L	L	S
NS	S	S	L	L	L	S	S
NP	S	S	S	L	S	S	S
PS	S	S	L	L	L	S	S
PM	S	L	L	L	L	L	S
PL	L	L	L	L	L	L	L

表 2 K_d' 的调整规则表
Table 2 The rules of K_d'

ec	e						
	NL	NM	NS	NP	PS	PM	PL
NL	S	S	S	S	S	S	S
NM	L	L	S	S	S	L	L
NS	L	L	L	S	L	L	L
NP	L	L	L	L	L	L	L
PS	L	L	L	S	L	L	L
PM	L	L	S	S	S	L	L
PL	S	S	S	S	S	S	S

K_p' , K_d' 和 α 例如: 当误差 e 为 PL 、误差变化率 ec 为 PM 时, 为了避免较大的超调量, 应取适中的 K_p' 和 α , 较大的 K_d' 。即: K_p' 取 S , K_d' 取 L , α 取 3 。同理, 可以得出其他规则。整理后所得参数调整规

则^[7]如表 1、表 2、表 3 所示。

表 3 α 的调整规则表

Table 3 The rules of α

ec	e						
	NL	NM	NS	NP	PS	PM	PL
NL	2	2	2	2	2	2	2
NM	3	3	2	2	2	3	3
NS	4	3	3	2	3	3	4
NP	5	4	3	3	3	4	5
PS	4	3	3	2	3	3	4
PM	3	3	2	2	2	3	3
PL	2	2	2	2	2	2	2

3.3 模糊推理运算和重心法反模糊化

由规则表得到: IF $e(k) \subset NL$ AND $ec(k) \subset NL$ THEN $K_p' \subset L$, $K_d' \subset S$, $\alpha = 2$ 等 49 条模糊推理规则。现在以 K_p' 为例, 进行模糊推理运算。假设 e 和 ec 的论域分别是 $[-6, 6]$ 和 $[-3, 3]$, 相应的论域中心是 $-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6$ 和 $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ 。某一采样时刻得到的 $e = 3.2$, $ec = 1.2$, 则由隶属函数可得:

$$\begin{aligned} \mu_{e,PS} &= 0.4 ; \quad \mu_{e,PM} = 0.6 \\ \mu_{ec,PS} &= 0.8 ; \quad \mu_{ec,PM} = 0.2 \end{aligned}$$

由推理规则 IF $e(k) \subset PS$ AND

$ec(k) \subset PS$ THEN $K_p' \subset L$ 可得:

$$\mu_{L1} = \mu_{e,PS} \wedge \mu_{ec,PS} = 0.4 \wedge 0.8 = 0.4$$

由推理规则 IF $e(k) \subset PS$ AND

$ec(k) \subset PM$ THEN $K_p' \subset L$ 可得:

$$\mu_{L2} = \mu_{e,PS} \wedge \mu_{ec,PM} = 0.4 \wedge 0.2 = 0.2$$

由推理规则 IF $e(k) \subset PM$ AND

$ec(k) \subset PS$ THEN $K_p' \subset S$ 可得:

$$\mu_{S1} = \mu_{e,PM} \wedge \mu_{ec,PS} = 0.6 \wedge 0.8 = 0.6$$

由推理规则 IF $e(k) \subset PM$ AND

$ec(k) \subset PM$ THEN $K_p' \subset L$ 可得:

$$\mu_{L3} = \mu_{e,PM} \wedge \mu_{ec,PM} = 0.6 \wedge 0.2 = 0.2$$

再由以上 4 条, 可以得到 K_p' 的隶属度为:

$$\mu_S = \mu_{S1} = 0.6$$

$$\mu_L = \mu_{L1} \vee \mu_{L2} \vee \mu_{L3} =$$

$$0.4 \vee 0.2 \vee 0.2 = 0.4$$

可以算出: $K_{p,S}' = e^{-4\mu_S} = e^{-4 \times 0.6} = 0.0907$;

$K_{p,L}' = e^{-4\mu_L} = e^{-4 \times 0.4} = 0.2019$, 运用重心法^[3,8], 从而得到精确的:

$$K_p' = \frac{K_{p,s}\mu_S + K_{p,L}\mu_L}{\mu_S + \mu_L} =$$

$$\frac{0.0907 * 0.6 + 0.2019 * 0.4}{0.6 + 0.4} = 0.1352$$

运用以上方法分别计算出精确的 K_d' 和 α , 然后用下列公式计算出精确的 K_p , K_i 和 K_d :

$$K_p = (K_{p,\max} - K_{p,\min})K_p' + K_{p,\min} \quad (7)$$

$$K_d = (K_{d,\max} - K_{d,\min})K_d' + K_{d,\min} \quad (8)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d) \quad (9)$$

4 航空发动机多变量控制仿真和结果分析

应用以上方法, 以低压转速 N 和压比 P_{36} 为控制变量, 对某型航空发动机进行全数字仿真, 仿真结果如图 6、图 7 所示。

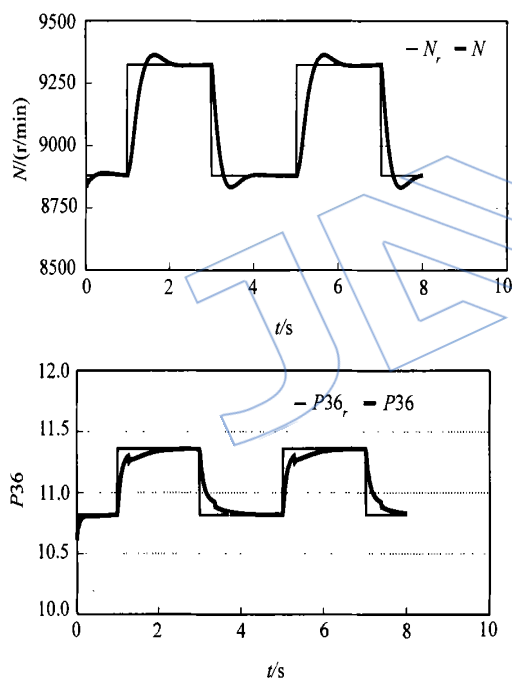


图 6 $H = 0 \text{ km}, M a = 0.2$ 时转速、压比响应

Fig 6 Responses of N and P_{36} at $H = 0 \text{ km}, M a = 0.2$

从仿真结果来看, 虽然飞行包线内不同状态的参数差别很大, 但是这种模糊 PD 控制方案仍然能够很好地跟踪给定输入信号。这也表明此种模糊 PD 控制系统不仅具有较强的鲁棒性, 而且有着良好的解耦性和动静态性能。此外, 它还简单、易于实现。因此, 这种模糊 PD 控制方案不失为一个好的多输入多输出系统控制方案。

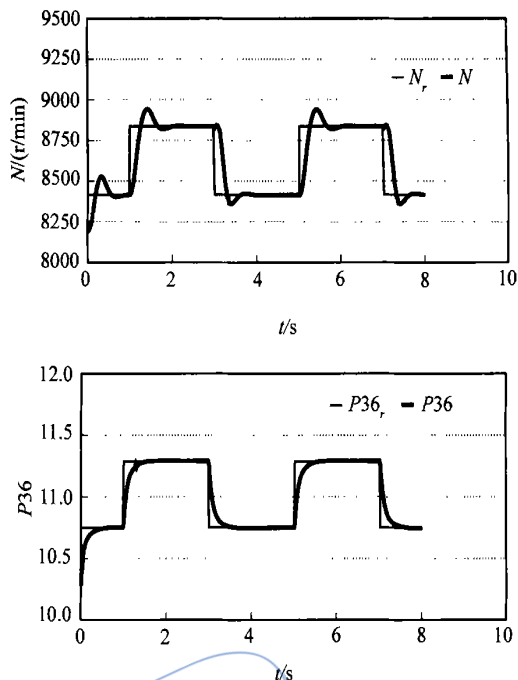


图 7 $H = 10 \text{ km}, M a = 0.8$ 时转速、压比响应

Fig 7 Responses of N and P_{36} at $H = 10 \text{ km}, M a = 0.8$

5 结论

本文在常规 PD 控制器的基础上, 针对难以建立航空发动机精确数学模型的特点, 采用模糊推理的方法来自适应地调节 PD 控制器的参数, 从而形成模糊 PD 控制器。通过某型航空发动机全包线内的数字仿真, 验证了这种方法的不仅具有很好的鲁棒性, 而且具有很好的解耦性和动静态性能。这为航空发动机的多变量控制提供了一种方法。

参考文献

- [1] 黄金泉. 航空发动机神经网络自适应控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1998
- [2] 刘曙光, 魏俊民, 竺志超. 模糊控制技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2001: 62- 64
- [3] 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995: 66- 67, 115- 117
- [4] 李仁厚. 智能控制理论和方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 76- 77, 86- 91
- [5] 余永权, 曾碧. 单片机模糊逻辑控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995: 224- 231
- [6] 方中祥, 李华聪, 吴琪华, 等. 一种双变量自校正模糊 PI 控制在发动机控制中的应用[J]. 航空学报, 1998, 19(1): 111 - 113
- [7] 王鸣. 一种模糊自整定 PD 参数控制器的设计与仿真[J]. 安徽机电学院学报, 1999, 14(2): 35- 40