

燃气涡轮的模糊控制实现

胡小川* 向敬成 姚伯威 田增山

(电子科技大学电子工程学院, 电子机械系 成都 610054)

【摘要】 燃气涡轮工作转速受进油量、进气量和试验装置特性等多种因素的影响, 由于这些因素之间有很强的交叉耦合, 很难建立精确的数学模型, 因此按经典控制理论很难对燃气涡轮的转速进行控制。针对燃气涡轮系统的转速控制问题, 文中提出了一种实用的自寻优 FUZZY PI 模糊控制方案。利用模糊推理合成规则, 得出了模糊控制结果, 并用于实际系统控制, 获得了成功。

关键词 燃气涡轮; 模糊控制; 模糊变量; 模糊控制规则; 模糊推理合成规则

中图分类号 TP273.1

1 系统简介

一种新的航空发动机从开始设计到定型生产, 要经过许多各种类型的试验。航空发动机的零部件试验设备 SB412 是由燃气涡轮带动后面的试验装置, 模拟航空发动机的工作状态来进行各种试验。燃气涡轮在工作状态时有一最佳的油/气比, 其转速受进油量、进气量和试验装置特性等多种因素的影响, 而且由于这些因素之间有很强的交叉耦合, 因而, 对燃气涡轮的工作过程这种非线性、强耦合的对象, 很难建立精确的数学模型。按经典控制理论很难对燃气涡轮的转速进行控制。以前对燃气涡轮转速的控制, 一直都由具有长期操作经验的人员, 手动调节进油量和进气量来完成。但由于在试验过程中具有很强的噪声、振动等不良因素, 工作环境相当恶劣。同时, 试验装置的特性也经常变化, 再加上操作人员自身的一些原因, 手动控制燃气涡轮转速的精度不高, 不能保证试验结果的准确性。

2 控制方案的提出

对此类试验设备的控制, 目前国内还没有成功的经验和方法。本文对燃气涡轮这样一个具有非线性、强耦合、时变、有强烈噪声干扰和纯滞后等特性的系统, 采用了自寻优模糊控制系统^[1, 2], 如图 1 所示。转速模糊控制器根据转速信号对进油量和进气量进行调节。对于油/气比的控制, 利用转速与油/气比之间的峰值特性, 采用自寻优控制, 自动搜索最佳油/气比, 油/气比模糊自寻优控制器不断发出试探信号, 通过对进油量的测量, 搜索最佳的油/气比。

3 控制方案的实现

3.1 转速模糊控制器

由于燃气涡轮的转速由进油量和进气量决定, 而进气量通过油/气比模糊自寻优控制器根据进油量自动地进行调整, 给出一个最佳进气量, 因而燃气涡轮的转速可由调整进油量的大小来控制^[3]。为此转速模糊控制器以转速误差 $e(t)$ 和转速误差的变化率 $\dot{e}(t)$ 作为输入, 进油量的增量 $u(t)$ 作为输出, 其原理如图 2 所示。

对 $e(t)$ 、 $\dot{e}(t)$ 和 $u(t)$ 的模糊子集及其论域定义如下: $\dot{e}(t)$ 和 $u(t)$ 的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ 。 $e(t)$ 的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$ 。 $e(t)$ 的论域量化为 14 个等级, 即 $\{-6, \dots, -0, +0, \dots, +6\}$ 。 $\dot{e}(t)$ 的论域量化为 13 个等级, 即 $\{-6, \dots, -1, 0, +1, \dots, +6\}$ 。 $u(t)$ 的论域量化为 15 个等级, 即 $\{-7, \dots, -1, 0, +1, \dots, +7\}$ 。

1998年8月27日收稿, 1998年11月2日修改定稿

* 男 29岁 博士生

上述的误差模糊集选取了 8 个元素，区分了负零和正零，主要是为了提高稳态精度。

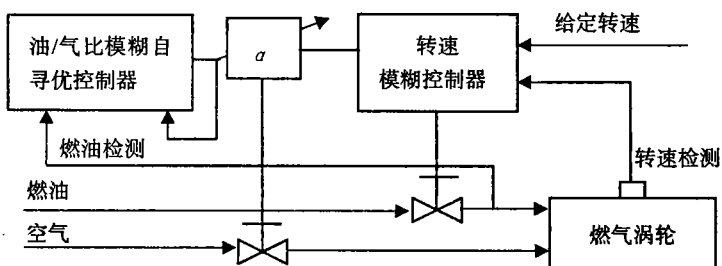


图 1 燃气涡轮转速模糊控制系统

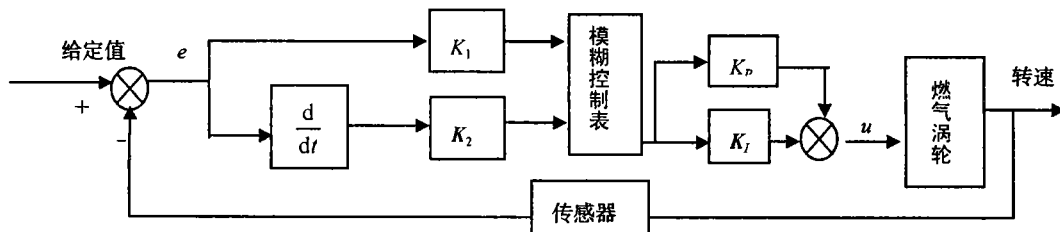


图 2 转速模糊控制器

分析、归纳操作人员长期的操作经验和多次现场试验的结果，我们得出了模糊控制规则，如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

e	u	\dot{e}						
		NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	u	PB	PB	PB	PB	PM	O	O
NM	u	PB	PB	PB	PB	PM	O	O
NS	u	PM	PM	PM	PM	O	NS	NS
NO	u	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PO	u	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	u	PS	PS	O	NM	NM	NM	NM
PM	u	O	O	NM	NB	NB	NB	NB
PB	u	O	O	NM	NB	NB	NB	NB

各模糊变量均按正态分布型隶属函数计算，并考虑实际具体情况，便可得到赋值表(略)。应用模糊推理合成规则，即可得到模糊控制结果(略)。控制表的输出要经过一个输出环节转换为实际控制量，再加入到被控对象上进行控制。常用的输出环节有比例输出和积分输出两种形式，前者阶跃响应快，但为有差控制；后者可接近无差控制，但响应较慢，且超调较大。本系统采用两者相结合的比例积分输出结构，具有超调小、暂态时间短的优点^[4,5]。

上述模糊控制器有 4 个可调参数，即量化因子 K_1 、 K_2 ，比例系数 K_p 和积分系数 K_i 。增大 K_1 、 K_2 可以提高系统对误差及其变化的分辨率，使控制精度提高，但 K_1 、 K_2 太大不利于系统的稳定性。增大 K_p 或 K_i 都能使响应速度加快，但可能引起振荡。根据实际调整的经验，可取 $K_1 \approx K_2$ ， $K_p = (2\sim 3) K_i$ 。当 K_1 和 K_2 取值较大时，应适当减少 K_p 和 K_i 。若采样周期较长，则 K_p 和 K_i 可选得大一些。在系统中，转速模糊控制器的采样周期为 5 s。

3.2 油/气比模糊自寻优控制器

燃气涡轮的耗油量与油/气比之间存在极值关系。这种极值关系受多种因素的影响，会产生漂移。在系统中，以最小耗油量为指标，对油/气比进行控制。

通常的步进或自寻优搜索的步长是固定的。若步长太小，收敛速度过慢，则对于一些不可控扰动的响应就难以适应；若步长太大，则搜索损失增大，有时还会引起振荡，影响系统正常工作。为了提高搜索速度，减小搜索损失，可以采用变步长的方法。在离极值点较远、曲线较陡处，选用大步长；而在极值点附近，曲线平缓处采用小步长进行搜索。通过模糊逻辑判断可以实现步长的自动改变^[6]。应用模糊集合理论设计的模糊自寻优控制器如图 3 所示，它以耗油量为指标，寻找最佳的油/气比。在每个采样周期测量耗油增量 Δy ，根据 Δy 和上一周期寻优步长决定本次寻优步长。 ΔY 和 ΔX 分别是耗油增量和步长的模糊语言变量。 K_y 为 Δy 的量化因子， K_x 为比例因子，它把 ΔX 转换为步长的实际值。

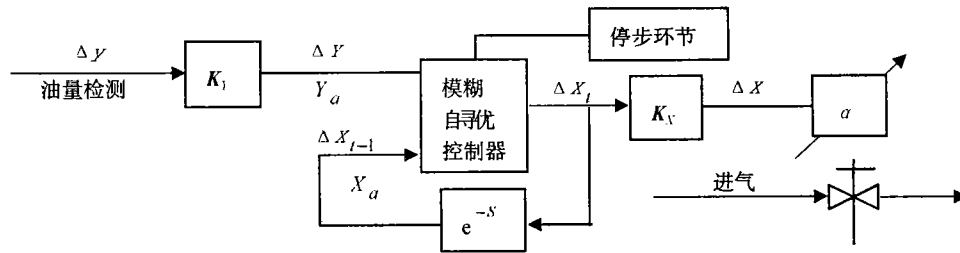


图 3 模糊自寻优控制器

对 ΔX 和 ΔY 的模糊子集及其论域定义如下 ΔX 的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, PS, PM, PB\}$ ，论域量化为 12 个等级，即 $X_a = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ ， ΔY 的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$ ，论域量化为 14 个等级，即： $Y_a = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ 。

分析、归纳操作人员长期的操作经验和多次现场试验的结果，我们得出了自寻优搜索过程的模糊控制规则，如表 2 所示。其中 ΔX_{t-1} 为上一周期寻优步长， ΔX_t 为本次寻优步长。

表 2 模糊自寻优控制规则表

ΔY	ΔX_t	ΔX_{t-1}					
		NB	NM	NS	PS	PM	PB
NB	ΔX_t	NB	NB	NB	PB	PB	PB
NM	ΔX_t	NM	NB	NB	PB	PB	PM
NS	ΔX_t	NS	NM	NM	PM	PM	PS
NO	ΔX_t	NS	NS	NS	PS	PS	PS
PO	ΔX_t	PS	PS	PS	NS	NS	NS
PS	ΔX_t	PS	PM	PM	NM	NM	NS
PM	ΔX_t	PM	PB	PB	NB	NB	NM
PB	ΔX_t	PB	PB	PB	NB	NB	NB

各模糊变量均按正态分布型隶属函数计算，并考虑实际具体情况，即可得到赋值。应用模糊推理合成规则，得到了模糊自寻优控制结果。

自寻优的过程就是查表运算过程。增加 K_y 和 K_x ，可以提高搜索速度，但是 K_x 的值还影响搜索损失，所以可根据对收敛速度的要求选择 K_y ，而根据对搜索损失的要求选择 K_x 。图 3 中 α 为油/气比比例因子，系统启动时赋初值；系统在工作状态时，其值由上一寻优周期的 α 和 ΔX 确定。

即

$$a_i = a_{i-1} + K \Delta X$$

在实际运用中，为了保证油/气比自寻优过程的稳定性，加入了一个停步环节。若由于干扰使燃气涡轮转速出现较大波动时，暂停搜索，系统采用其他方式进行控制。

自寻优控制是一种稳态最优比控制，其采样频率应低于对象固有频率的 2~5 倍。因此油/气比自寻优的采样周期应为转速调节采样周期的 2~5 倍。本系统选取自寻优采样周期为 15 s，即为转速调节回路采样周期的 3 倍。

4 现场运行效果和结论

在采用了本系统后，不仅排除了人为误差的影响，而且模糊控制比手动控制超调小、响应快、转速控制精度高，控制效果要好得多。油/气比自寻优控制收敛速度很快，一般经过 6~8 个周期即可达到最佳值。整个系统运行稳定，没有振荡，在转速控制回路加入干扰后，系统能很快恢复。

本模糊控制系统以转速模糊控制器调节进油量并对进气量进行比值控制，以油/气比模糊自寻优控制器调节油/气比比值，采用推理合成方法，构成模糊控制器，对燃气涡轮的转速进行控制，其控制方案合理，控制效果令人满意。

参 考 文 献

- 1 Saridis G N. Self-organizing control of stochastic systems. Marcel Dekker Inc, 1977
- 2 Andersen T R, Nielsen S B. An efficient single output fuzzy control algorithm for adaptive application. Automatica. 1985, 21(5): 539~545
- 3 李士勇, 夏承光. 模糊控制和智能控制理论与应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990
- 4 章正斌, 吴汝善, 于健. 模糊控制工程. 重庆: 重庆大学出版社, 1995
- 5 姚伯威. 水泥回转窑的一种 Fuzzy 控制实现. 电子科技大学学报, 1995, 24(6): 610~613
- 6 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995

A Reality of Fuzzy Control for Gas Turbine

Hu Xiaochuan Xiang Jingcheng Yao Bowei Tian Zhengshan

(College of Electronic Engineering, Dept. of Electromechanical Eng., UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract When gas turbine works, rotational speed is affected by oil, air and so on, and there are strong cross-coupling between these factors. It is difficult to found an accurate mathematical model for the working process of gas turbine, so, the rotational speed of gas turbine can not be controlled by classical control theory. For the control problem of rotational speed of gas turbine, a useful self-optimizing fuzzy-PI control scheme is presented. According to fuzzy inference synthesize rule, the fuzzy control result is obtained. The fuzzy control result is used to control practical system and has met with success.

Key words gas turbine; fuzzy control; fuzzy variable; fuzzy control rule; fuzzy inference synthesize rule