

doi: 10.7690/bgzdh.2015.04.012

模糊控制在风洞主气流压力自动调节系统中的应用

杨海滨, 张 伟, 罗承友, 荣祥森, 吉次自古

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了克服某风洞主气流压力、温度不能自动同步控制的缺陷, 提高风洞的自动化水平, 分析了主气流压力控制原理, 在系统设计时引入了模糊控制的概念, 定义了输入输出变量, 建立了模糊控制规则表和解模糊化方法, 完成了 PLC 控制程序设计, 对模糊控制策略进行了优化, 并选取了马赫数 5 和马赫数 6 这 2 种常规状态进行了调试。调试结果表明: 随着温度的上升, 压力自动调节效果良好, 基本达到了与温度的同步上升, 并且精度满足试验要求。从而提高了风洞试验的自动化水平, 证明了模糊控制在该系统中应用的合理性。

关键词: 压力; 温度; 模糊控制; 自动; 调节

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标志码:** A

Application of Fuzzy Control in Wind Tunnel Main Airflow Pressure Auto-adjust System

Yang Haibin, Zhang Wei, Luo Chengyou, Rong Xiangshen, Jici Zigu

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to overcome the fault that the pressure and temperature of main airflow can't be controlled synchronously and improve the automation level of the wind tunnel, this author analyses the pressure control principle of main airflow. Fuzzy control concept was introduced in the system design, input and output variables were defined, fuzzy control regulation and measure of undoing faintness was found, PLC control program was projected, fuzzy control strategy was optimized. Two general states, viz. $Ma=5$ and $Ma=6$, were adjusted. The test result show that, along with temperature ascending, auto-adjust effect of pressure is favorable. Pressure and temperature can basically ascend in phase, and the precision can satisfy test demand. Accordingly, automation level of the wind tunnel test has been heightened. It has proved the rationality of fuzzy control in the system.

Keywords: pressure; temperature; fuzzy control; automatic; adjust

0 引言

模糊控制是模拟人的思维、推理和判断的一种控制方法, 它将人的经验、常识等用自然语言的形式表达出来, 建立一种适用于计算机处理的输入输出过程模型, 是智能控制的一个重要研究领域。相对于传统控制, 模糊控制能避开对象的数学模型(如状态方程或传递函数等), 对人们关于某个控制问题的成败和经验进行加工, 总结出知识, 进一步从中提炼出控制规则^[1-2]。

笔者针对某风洞主气流压力、温度需要同步控制的特点, 在温度自动控制的基础上, 根据以往控制岗位人员的操作经验, 建立模糊控制规则表, 设计出适合于该风洞运行的模糊控制器, 以实现主气流压力随着温度的上升而自动调节的工艺过程。

1 风洞试验工况简介

图 1 为风洞主气流压力控制原理图, 风洞稳定段需要的总压范围为 0.5~12 MPa。

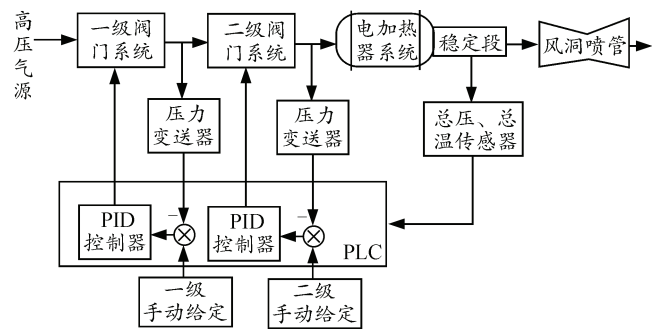


图 1 主气流压力控制原理

因此, 主气流压力设计为两级阀门控制系统, 控制对象有 2 个: 一是一级调压阀后压力, 其目的是给二级调压阀提供稳定的入口气流压力, 起到“粗调”的作用; 二是二级调压阀后压力, 用于稳定段总压的精确控制, 起到“精调”的作用。

一级和二级调压阀后压力的控制均采用单回路闭环 PID 控制, 其给定方式为岗位人员通过手动调节电位计旋钮, 缓慢增加压力给定值, 通过调节二级阀后压力从而达到调节稳定段总压的目的。

收稿日期: 2014-10-30; 修回日期: 2014-12-03

作者简介: 杨海滨(1972—), 男, 四川人, 硕士, 高级工程师, 从事目标探测与毁伤研究。

主气流调节过程中，为了防止高压气源释放的气体不会冷凝从而影响风洞流场的建立，必须对主气流进行加热，因此在两级阀门之后有一个大容量的电加热器对气体加热，这样就增加了一个大的惯性环节，从而使得稳定段总压的控制变得复杂^[3]。

由于风洞必须在总温、总压同时满足要求时才能进行试验，目前常规的试验流程是：一级阀门打开后，进行一级减压和压力“粗调”。当二级阀门打开后，加热器内有气流时就投入功率进行加热。随着稳定段总温的上升，岗位人员调节电位计，使得稳定段总压同步上升，最终要求总温、总压同时达到试验要求值。在调节过程中，温度的控制是自动完成的；而压力的调节则依靠人工经验，根据温度的上升情况来调节压力的快慢。

由于加热的物理过程本身比较慢，而且气流的温度和压力的影响较复杂。即当压力上升快时，温度的上升受其影响会变慢甚至下降；反过来，当压力上升慢时，温度的上升会变快甚至出现超调。这样对岗位人员的要求比较高，而且操作的自动化程度也比较低。笔者就是试图找到一种随着温度上升能够自动调节压力的控制策略，并且能同时保证总压 0.5% 的控制精度。

2 具体实施方案

由于气流的温度和压力的影响复杂，难以用一般的函数关系表达，因此本项目中在原控制程序的基础上，增加模糊控制功能模块。根据主气流系统一、二级阀门的工作特性，为了简化控制程序，一级阀门系统的控制仍然采用单回路闭环 PID 控制，其给定方式通过计算机设定一个固定值和给定的斜坡上升时间，模拟人工给定方式；二级阀门系统采用模糊控制策略，通过配方设置各个马赫数下试验的目标温度和压力，其控制原理如图 2。

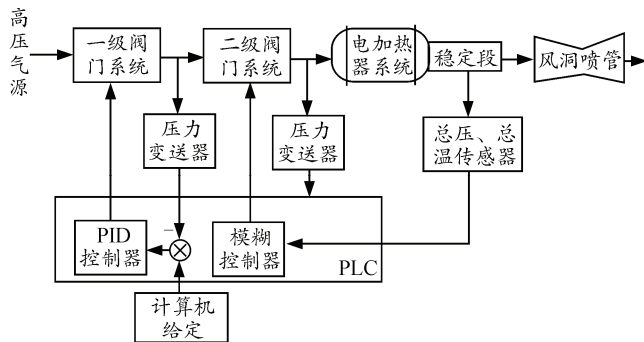


图 2 采用模糊控制后的主气流压力控制原理

2.1 定义输入输出变量

模糊控制器的设计首先要确定模糊控制器的输

入输出变量。根据主气流系统控制的特点，选择当前压力所占目标压力的百分比即压力系数 P 和当前温度所占目标温度的百分比即温度系数 E 为输入变量，调压阀的电液伺服阀控制输出量 U 为输出变量。

输入变量 P 取值：{零，正小，正中，正大，正超大，正极大，超小，超中，超大，超超大，超极大}，表示符号：{ZE, PS, PM, PB, PC, PN, OS, OM, OB, OC, ON}，论域为：[0, 1.25]。

输入变量 E 的取值：{零，正小，正中，正大，正超大，正极大}，表示符号：{ZE, PS, PM, PB, PC, PN}，论域为：[0, 1]。

输出变量 U 的取值：{负极大，负超大，负大，负中，负小，零，正小，正中，正大，正超大，正极大}，表示符号：{NN, NC, NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB, PC, PN}，论域为：[-2.5, 2.5]。

2.2 确立语言变量隶属函数

隶属函数是对模糊概念的定量描述。通常采用的模糊隶属函数有：三角形隶属函数、正态分布隶属函数和梯形隶属函数等。为了简化计算，本项目模糊逻辑控制的隶属函数曲线选取三角形。输入变量 P 、 E 和输出变量 U 的隶属函数分别如图 3~图 5。

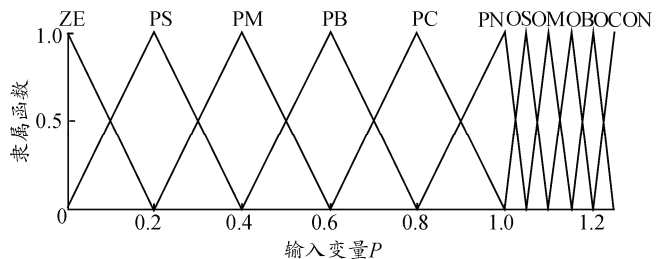


图 3 输入变量 P 的隶属函数

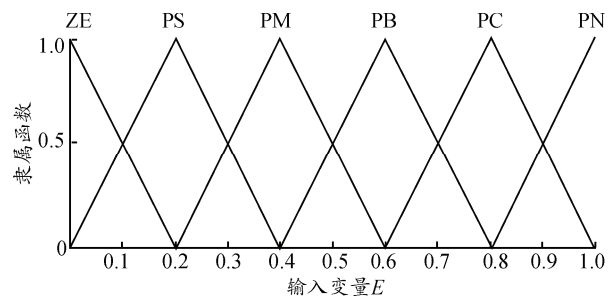


图 4 输入变量 E 的隶属函数

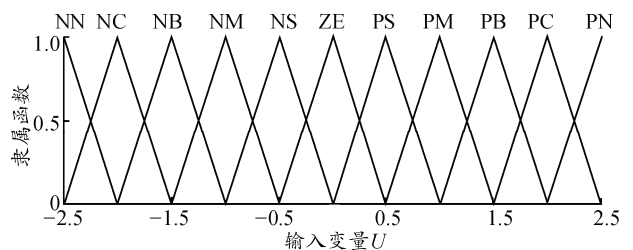


图 5 输出变量 U 的隶属函数

2.3 建立模糊控制规则表

模糊规则是模糊推理系统的基础，是模糊集合理论最重要的建模工具。模糊控制器的控制规则往往是根据手动控制的大量实践经验总结出来的。

本项目采用模糊控制器结构中最常见的二维模糊控制器^[4]，采用经验归纳法建立模糊控制规则，即根据人的控制经验和直觉推理，经整理、加工和提炼后构成模糊规则系统的方法。对应二维模糊控制器得到形如：if P =X and E =Y then U =Z 的一系列模糊控制规则语句，如：

If P =PB and E =PS then U =NS;

If P =PS and E =PC then U =PB;

...

其控制思想非常清晰，如当 P 为正小 (PS)， E 为正超大 (PC)，即加热器内初始温度比较高，主气流压力比较低时，此时认为风洞刚刚进行完一次试验，将要进行下一次试验，试验间隔时间比较短，因此稳定段初始温度较高，而压力正处于缓慢调节上升阶段，为缩短开车时间，应使控制量输出为正大 (PB)，加快压力上升趋势。根据此经验推理，建立如表 1 的主气流压力模糊控制规则表。

表 1 主气流压力模糊控制规则

E	P										
	ZE	PS	PM	PB	PC	PN	OS	OM	OB	OC	ON
ZE	PS	ZE	NS	NM	NB	NC	NN	NN	NN	NN	NN
PS	PS	PS	ZE	NS	NM	NB	NC	NN	NN	NN	NN
PM	PM	PM	PS	ZE	NM	NB	NC	NN	NN	NN	NN
PB	PC	PB	PM	PS	ZE	NM	NB	NC	NN	NN	NN
PC	PN	PB	PM	PS	NS	NM	NB	NC	NN	NN	NN
PN	PN	PC	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NC	NN	NN

2.4 解模糊化方法

经过模糊推理得到的控制输出是一个模糊隶属函数或者模糊子集，反映了控制语言的模糊性质，是一种不同取值的组合。然而在实际应用中要控制 1 个物理对象，只能在某一时刻有 1 个确定的控制量，这就必须要从模糊输出隶属函数中找出 1 个最能代表这个模糊集合及模糊控制最有可能性分布的精确量，这就是解模糊。常用的解模糊化方法有质心法、最大隶属度法、系数加权平均法等^[5]。

本项目采用质心法，结合加权平均，计算控制输出精确值。所谓质心法，就是取模糊隶属度函数曲线与横坐标轴围成面积的质量中心作为代表点。其计算公式为

$$u = \frac{\sum x_i \cdot u_N(x)}{\sum u_N(x)}$$

式中： u 为模糊控制输出精确值； $u_N(x)$ 为隶属函数； x_i 为隶属度。

2.5 程序设计

本项目中的主气流压力采用西门子 PLC-300 进行控制，通过 STEP7 V5.4 编程。采用模糊控制后，在原程序的基础上增加三角形隶属函数模糊化处理功能块 ufFuzzyDeal 和模糊算法功能块 Fuzzy-Control，采用 S7-SCL 控制语言进行程序设计^[6]，完成隶属函数模糊化处理运算和模糊控制输出。

3 关键技术难点及解决方法

3.1 模糊规则的建立

模糊规则的建立是模糊控制算法成功与否的关键。笔者采用人工经验与实际调试结果相结合的方法，对模糊规则进行设计和优化。

首先，确定模糊输入输出参数。针对主气流压力调节的特点，既要考虑能够实现压力和温度的匹配控制即自动化要求，又要考虑调压过程和温度上升过程时间尽量短，因此选择当前压力和温度所占目标压力和温度的百分比为输入变量，电液伺服阀控制输出量为输出变量。

其次，确定模糊输入输出参数的论域。基于风洞主气流调压和调温的特性，笔者认为主气流压力是可以出现超调的，而温度是不会出现超调的，因此输入变量 P 的取值范围定为 $[0, 1.25]$ ，而输入变量 E 的取值范围定为 $[0, 1]$ 。输出变量 P 的取值范围为电液伺服阀控制范围 $[-2.5, 2.5]$ 。

再次，确定模糊状态。所用模糊状态越少，控制算法就越简单。反之设定的模糊状态数越多，其规则数就越多，控制就更平滑；但同时运算量加大，有可能会影响控制的实时性。根据最终的调试情况，模糊输入变量 P 、 E 和输出变量 U 取值最终确定为表 1 中的范围。

最后，根据人工经验和调试结果设计和优化模糊规则表的输出。

3.2 模糊控制策略的优化

由于模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差，难以达到较高的控制精度，因此，必须对模糊控制策略进行优化。

本项目采用模糊控制与 PID 分段控制的策略，即压力和温度百分比 P 和 E 均小于 90% 的情况下，采用模糊控制策略，保证压力和温度的协调匹配上

升过程。当 P 和 E 均大于 90% 的情况下，认为此时已接近试验所需的总压和总温范围，即转入 PID 控制过程，进入总压调节精调阶段。经过多次调试，优化 PID 控制参数，保证了总压的最终调节精度。

4 系统调试结果

主气流压力调节系统 PLC 模糊控制程序编制完成后，在高压气源为 16.3 MPa，一级调压阀给定压力为 5.2 MPa 时，分别进行了马赫数 5 和马赫数 6 的调试试验。

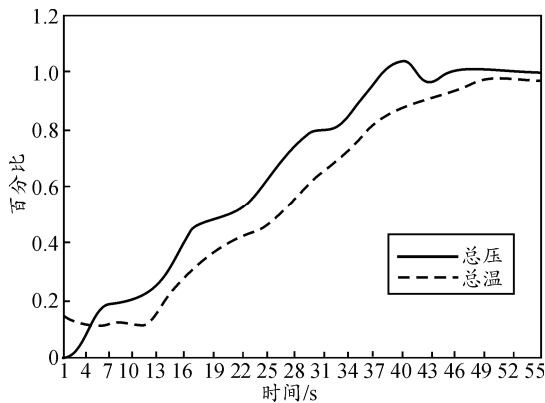


图 6 马赫数 5 时总压、总温调节曲线

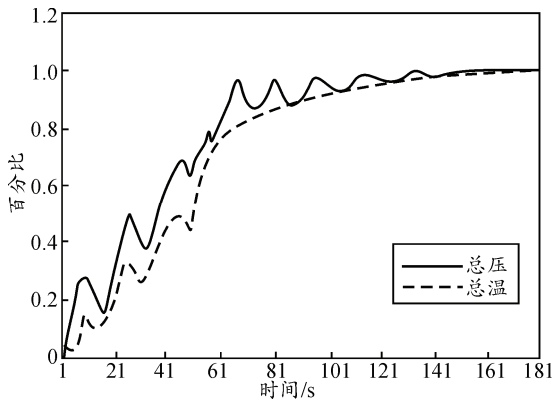


图 7 马赫数 6 时总压、总温调节曲线(1)

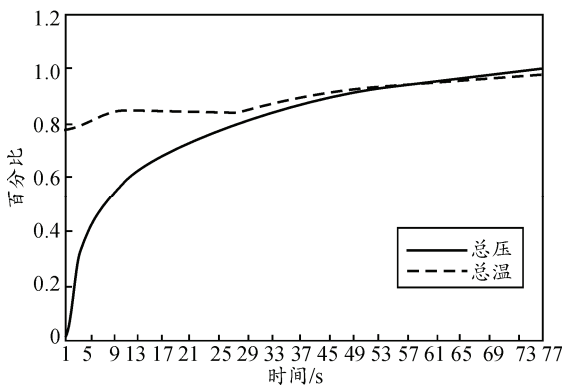


图 8 马赫数 6 时总压、总温调节曲线(2)

经多次优化模糊控制参数和 PID 参数^[7]，最终得到了总压和总温随时间的上升曲线，曲线中总压

和总温均为百分比值 P 和 E 。图 6 为马赫数 5 的调节曲线，可以看出：随着总温的上升，总压较为平滑地跟随上升，并且总压第一次达到额定值较总温稍有提前，这是因为总压有超调，需要一定的稳定时间来实现与总温的同步。图 7 为马赫数 6 在较低温度下的调节曲线，可以看出总压和总温是曲线上升的，这是因为压力和温度相互影响造成的，即在压力上升很快时，温度会有所下降；而根据模糊控制规则，温度下降时压力也会随着下降，因此出现了压力和温度的波动。图 8 为马赫数 6 在较高温度下的调节曲线，可以看出起始温度高时总压的调节速度也加快了，从而缩短了压力调节时间。

从几张总压、总温调节曲线可以看出：随着温度的上升，压力与温度的上升基本能达到同步，从而实现了主气流压力的自动调节且精度满足 0.5% 的试验要求。

5 结束语

该项目针对某风洞中存在的实际特点，在风洞主气流温度自动控制的基础上引入模糊控制的方法。通过马赫数 5 和马赫数 6 这 2 种常规状态的调试运行，表明了该风洞中应用模糊控制实现主气流压力自动调节效果良好，基本达到了与温度的同步上升，并且精度满足 0.5% 的试验要求。提高了试验的自动化程度，降低了劳动强度，达到了预期的效果。项目的实施结果也表明了在该系统中应用模糊控制规则的合理性和控制策略优化的合理性。同时，该项目的运行对于那些采用模糊控制原理解决类似的具有相互影响的变量的自动控制问题具有一定的应用和推广价值。

参考文献:

- [1] 张鹏, 薛江平, 金志伟, 等. 模糊综合评估技术在装备管理工作中的应用[J]. 兵工自动化, 2013(7): 55-58.
- [2] 胡浩, 黄文玲. 压力仿真系统模糊自适应 PID 控制[J]. 四川兵工学报, 2010(7): 112-114.
- [3] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 33-47.
- [4] 李士勇. 模糊控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011: 73-97.
- [5] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 99-109.
- [6] 刘华波, 张赞宁. 基于 SIMATIC S7 的高级编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 223-299.
- [7] 段云龙. 基于模糊自适应 PID 控制的弹药公路运输模拟系统的仿真[J]. 四川兵工学报, 2014(1): 80-83.