

doi: 10.7690/bgzdh.2024.07.011

基于前馈—模糊 PID 策略的风洞控制器应用

金志伟, 杜宁, 邢盼, 景川

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对 2.4 m 跨声速风洞因强耦合、强非线性、大滞后等特性无法获得其精确数学模型, 使用经典 PID 算法控制精度无法满足试验要求的问题, 设计基于前馈—模糊 PID 策略的复合控制器, 并应用于风洞试验。试验结果表明, 该控制器的应用对于流场控制精度提高有良好的效果。

关键词: 风洞; 前馈; 模糊; 控制

中图分类号: TJ011; V211.74 **文献标志码:** A

Application of Wind Tunnel Controller Based on Feedforward-fuzzy PID Strategy

Jin Zhiwei, Du Ning, Xing Pan, Jing Chuan

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

Abstract: Due to the characteristics of strong coupling, strong nonlinearity and large time delay, the accurate mathematical model of the 2.4 m transonic wind tunnel can not be obtained, and the control accuracy of the classical PID algorithm can not meet the test requirements, so a composite controller based on feedforward and fuzzy PID strategy is designed and applied to the wind tunnel test. The experimental results show that the application of the controller has a good effect on improving the accuracy of flow field control.

Keywords: wind tunnel; feedforward; fuzzy; control

0 引言

风洞试验是获取飞行器气动力数据, 评估分析布局设计和预测飞行性能的主要手段。2.4 m 跨声速风洞(以下简称 2.4 m 风洞)是我国最大的跨声速地面气动力试验平台, 为我国航空航天事业以及气动力领域研究发展作出了卓越贡献。随着航空航天飞行器研究的快速发展, 先进气动布局、翼型的研究对风洞流场中重要指标总压和马赫数的控制精度要求越来越高。

2.4 m 风洞作为暂冲式跨声速风洞, 是一个典型的强耦合、强非线性、大滞后、时变、扰动频繁的多输入多输出系统, 很难精确得到其数学模型^[1]。目前, 在该风洞试验控制中使用传统的 PID 控制算法^[2], 该控制器参数固定不变, 无法针对试验对象的变化对控制器参数进行实时调整, 不能有效地应对系统中出现的非线性、强耦合、多干扰等特性, 造成总压和马赫数超调量大、控制精度低, 已经不能满足当前的先进飞行器型号试验的需求。笔者提出设计一种基于前馈—模糊 PID 策略的复合制器, 并应用到风洞试验中。

1 模糊控制与前馈控制简介

模糊控制是一种以模糊集合论、模糊语言变量

以及模糊推理为数学基础的计算机控制方法^[3]。

1965 年, 美国加利福尼亚大学电气工程系教授 L.A.Zadeh 提出了“模糊集合”概念, 1974 年, 英国伦敦大学教授 E.H.Mamdani 制造了一个用于锅炉和蒸汽机控制的模糊控制器。时至今日, 模糊控制已广泛应用于机器人控制、航空航天、通信等各个领域。模糊控制的优点是不要求掌握受控对象的精确数学模型, 而根据人工控制规则组织控制决策表来决定控制量的大小。此外, 在风洞运行的二十余年中积累了大量的现场运行数据, 并培养了一批具有丰富经验的现场操作人员, 可利用这些有利条件建立知识库, 将专家知识融入控制器的设计过程中。

前馈控制又被称为扰动补偿, 与反馈调节的原理完全不同, 是利用输入或扰动信号的直接控制作用构成的开环控制系统^[4]。前馈控制针对已知的确定性扰动预先给定控制量, 可以迅速抑制扰动带来的影响。当对象特性呈现大迟延、多干扰等难以控制的特性时, 前馈控制是一种及时有效的方法。

2 控制器设计方案

目前, 2.4 m 风洞使用的是经典 PID 控制器, 其线性控制特性与 2.4 m 风洞具有的强非线性存在

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-16

第一作者: 金志伟(1976—), 男, 山东人, 硕士。

较大差异，所以在风洞试验控制过程中存在：风洞充压过程中流场调节超调量较大；由于其控制算法简单，总压和马赫数控制精度较低；在调整 PID 参数时可能会导致流场出现大幅波动等不足。针对以上问题，笔者设计了基于前馈-模糊 PID 策略的控制器^[5]。

基于前馈-模糊 PID 策略的控制器设计，包括模糊推理、PID 控制和前馈控制 3 部分^[6]，其特征在于控制器经过闭环反馈将控制量偏差及偏差变化率送入模糊推理部分，经过模糊推理实时得到 PID 控制部分的参数，并在攻角发生变化时，前馈控制部分根据攻角反馈设定前馈控制量，抑制攻角变化带来的扰动。利用现有的专家知识及运行数据，将专家知识融入控制器的设计，再通过模糊规则实时对 PID 控制器参数进行调整，以实现总压和马赫数控制精度的提高；当模型攻角发生变化时，以加入前馈量迅速抑制扰动，提升控制器的暂态品质，从而完成对整个风洞流场的控制^[7]。

模糊 PID 控制是在 $U(k)=K_p E(k)+K_i \sum E(k)+K_D E_c(k)$ 的常规 PID 调节器基础上，应用模糊集合理论建立参数 K_p 、 K_i 和 K_D 与偏差绝对值和偏差变化率绝对值间的二元连续函数关系：

$$\left. \begin{aligned} K_p &= f_1(|E|, |E_c|) \\ K_i &= f_2(|E|, |E_c|) \\ K_D &= f_3(|E|, |E_c|) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： E 为输出量偏差； E_c 为偏差变化率； K_p 为比例增益系数； K_i 为积分增益系数； K_D 为微分增益系数。根据不同的实验工况在线自整定参数 K_p 、 K_i 和 K_D 。

风洞系统为一个具有 3 输入 2 输出的多输入多输出系统，分别通过主排气阀、主调压阀开度，栅

指位移调整总压及马赫数。其中，主排气阀和主调压阀负责控制总压，栅指系统负责控制马赫数。对于 3 个输入量，分别使用 3 组 PID 控制器进行控制。模糊 PID 控制器设计如下：

1) 通过模糊化接口将总压及马赫数偏差和偏差变化率进行模糊化，即将采样得到的定量数据转变为定性描述的模糊变量。这一过程主要通过隶属函数的计算完成，隶属函数由专家知识预先确定。

2) 在获取模糊变量对于论域元素的隶属度后，根据查取规则库中的模糊规则对变量进行模糊推理和反模糊化过程。模糊规则也是由专家知识预先确定，其结构为“如果，那么”的形式，例如：如果 E 为大且 E_c 为中，则 $K_p=K_{pi}$ 、 $K_i=K_{li}$ 、 $K_D=K_{Di}$ 。

3) 模糊推理和反模糊化过程通过参数整定函数完成，可以得到模糊变量对应的控制器参数。由此建立 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 和 K_D 与偏差 E 及偏差变化率 E_c 之间的模糊函数关系，实现 PID 参数的模糊在线自整定，以满足系统在不同 E 、 E_c 下对控制器参数的不同要求。

如图 1 所示，在反馈作用下将总压及马赫数偏差和偏差变化率送入模糊参数调节器，偏差及偏差变化率的论域分别为 $[-E, E]$ 和 $[-E_c, E_c]$ ，共分为 7 个模糊子集 {NB, NM, NS, Z₀, PS, PM, PB}，其中 NB、NM、NS、Z₀、PS、PM、PB 分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。各模糊子集的隶属函数采用如图 2 所示模糊子集的隶属函数的形式。在得到总压及马赫数偏差和偏差变化率对应模糊子集的隶属度后，通过查取由专家经验确定的控制器参数调整规则表^[8]。例如：对于控制栅指位移的 PID 控制器中参数 K_p 调整规则如表 1 所示。

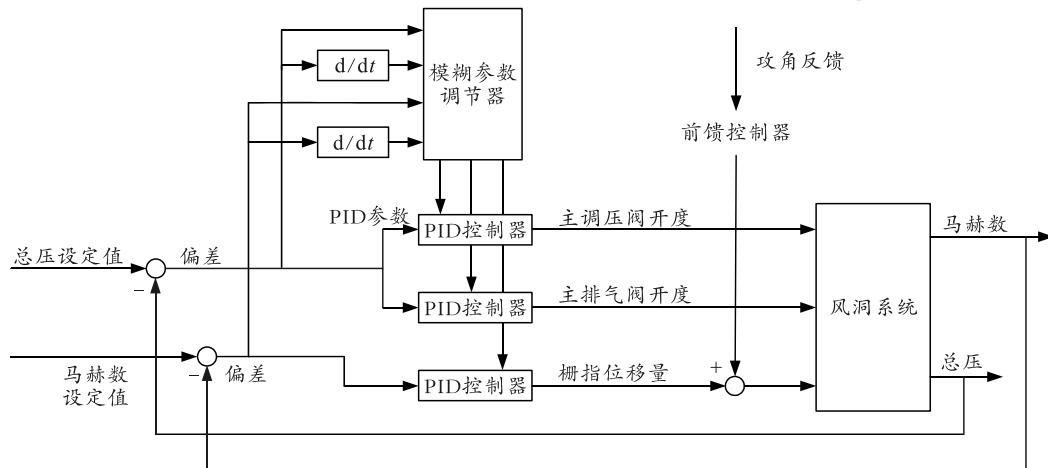


图 1 前馈-模糊 PID 控制器原理

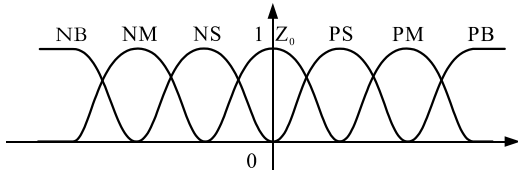


图 2 模糊子集的隶属函数

表 1 栅指 K_P 参数调整规则

E_c	E						
	NB	NM	NS	Z_0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z_0	Z_0
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z_0	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z_0	NS	NS
Z_0	PM	PM	PS	Z_0	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z_0	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z_0	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z_0	Z_0	NM	NM	NM	NB	NB

结合总压及马赫数偏差和偏差变化率对应模糊子集的隶属度以及控制器参数调整规则表，通过参数整定函数求取控制器参数设定值。例如：对于控制栅指位移的 PID 控制器中参数 K_P ，整定函数有：

$$K_P = f(E, E_c) = \sum_{i=1}^n \mu_i(E, E_c) K_{Pi} / \sum_{i=1}^n \mu_i(E, E_c) \quad (2)$$

式中： μ_i 为隶属函数； n 为论域子集个数； K_{Pi} 由参数调整规则表查出。对于系统中其他控制器的参数 K_P 、 K_I 和 K_D ，参数整定函数与该式相同。

模糊 PID 控制方法将模糊控制与 PID 控制结合，扬长避短，既具有模糊控制灵活而适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点，极大提高了控制器的控制精度^[9]。

前馈控制是针对已知干扰出现的，同时加入适当的控制量以抵消扰动对控制品质造成破坏的控制方法。攻角变化作为风洞试验的主要且已知的干扰量，严重影响被控量的动态品质，在攻角发生变化时的几个控制周期内人为地加入前馈控制量，以迅速抑制扰动量，提升控制器的控制效果。在模糊 PID 控制器的基础上增加前馈控制器，获得前馈—模糊 PID 控制器。其输出由模糊 PID 及加入的前馈量叠加得出，加入前馈量的大小以及持续的控制周期个数，由风洞试验过程中具体的攻角变化范围及专家经验确定。前馈控制量由在模糊 PID 控制器给出控制量的基础上乘以大于 1 的系数来确定，该系数的大小以及持续的周期数由当前攻角大小、将要变化的攻角数以及专家的经验决定^[10]。

3 应用效果分析

在完成基于前馈—模糊 PID 策略控制器设计后，将新控制投入到 2.4 m 风洞吹风试验中进行实际应用，并对原控制器与基于前馈—模糊 PID 策略

的新控制器试验效果进行对比分析。图 3 和 4 是 M 为 0.85 的吹风曲线，图 5 和 6 是 M 为 0.6 的吹风曲线。

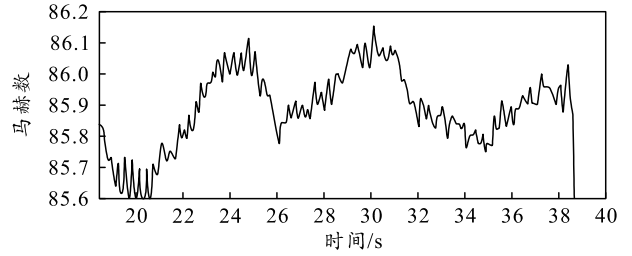


图 3 $M=0.85$ 传统 PID 控制器试验效果

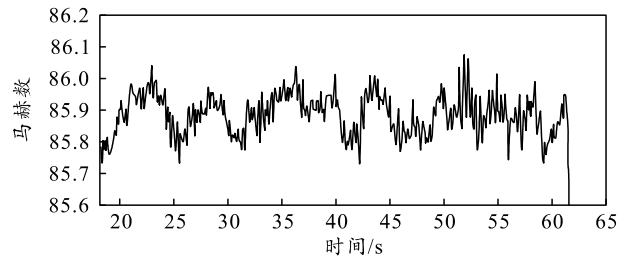


图 4 $M=0.85$ 新控制器试验效果

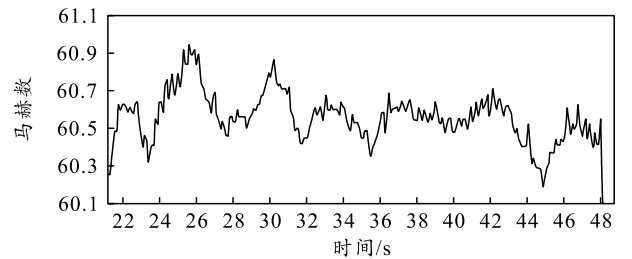


图 5 $M=0.6$ 传统 PID 控制器试验效果

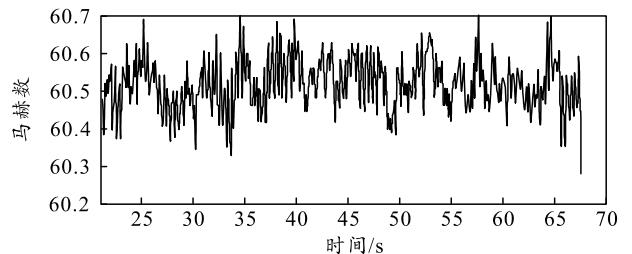


图 6 $M=0.6$ 新控制器试验效果

从试验曲线可以看出，当 $M=0.85$ 时，传统 PID 控制器控制精度 $\leq \pm 0.0025$ ，新控制器控制精度 $\leq \pm 0.0015$ ；当 $M=0.6$ 时，传统 PID 控制器控制精度 $\leq \pm 0.004$ ，新控制器控制精度 $\leq \pm 0.002$ 。综上所述，新控制器对风洞流场的调节效果优于传统 PID 控制器^[11]。

4 结论

笔者设计一种基于前馈—模糊 PID 策略的复合控制器，并投入到风洞试验中进行实际应用。试验结果表明：基于前馈—模糊 PID 策略的复合控制器，在流场控制中的效果优于传统 PID 控制算法，对 2.4 m 风洞流场控制精度提升起到了积极作用。

参考文献:

- [1] 王瑞波, 吴军强, 郭秋亭, 等. 2.4 m 跨声速风洞试验质量影响因素分析及改进措施研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(1): 37-41.
- [2] 李尚春, 周平, 张俊生, 等. 2.4 m×2.4 m 跨声速风洞多变量控制[J]. 贵州科学, 2002, 20(4): 138-143.
- [3] 李悟早, 郭术义, 任思杰. 模糊控制理论综述[J]. 河南科技, 2019(11): 12-15.
- [4] 万建华. 一种前馈控制补偿器的设计方法[J]. NG 可靠性与环境试验设备及测试分析仪器, 2010, 28(3): 62-64.
- [5] 余云飞, 李中望, 邓旭辉, 等. 基于模糊 PID 的简易风洞控制系统设计[J]. 西安航空学院学报, 2020, 38(1): 47-52.
- [6] 刘自鑫, 吕恕, 钟守铭, 等. 网络化系统控制器设计的

(上接第 30 页)

从上图中可看出, 2 个文献方法中个别服务器出现严重负载不均现象, 本文中方法中各服务器均得到合理运用, 处于较为均衡的状态, 降低了单个服务器的负载压力, 提高了计算机网络灵活性。

3 结论

为完善电子档案数据管理能力, 设计一种基于单标签 RFID 的电子档案分类管理系统, 单标签 RFID 技术能很好地展现不同电子档案内容的差别。通过性能各异的功能模块共同组建电子档案分类管理系统, 在系统内代入模糊聚类算法优化分类性能, 让用户在最短时间内完成电子档案信息甄别与入档, 实用性强, 电子档案整理效率得到明显提升。

参考文献:

- [1] 任盛源, 景明勇, 张好, 等. 基于原子的射频识别标签近场散射场矢量测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1): 298-303.
- [2] 姚晓峰, 武利秀. 无线射频识别技术的应用研究[J]. 材料保护, 2020, 53(7): 210-211.
- [3] 霍光煜, 张勇, 孙艳丰, 等. 基于语义的档案数据智能分类方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(6): 247-253.
- [4] 朱赛赛, 贾修一, 李泽超. 一种基于全局和局部标记相关性的多标记分类算法[J]. 电子学报, 2020, 48(12): 2345-2351.

- 矩阵分解方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(4): 18-21.
- [7] 聂松林, 李芹, 尹方龙, 等. 直驱泵系统的单神经元 PID+前馈控制策略[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(9): 821-830.
- [8] 杨海滨, 张伟, 罗承友, 等. 模糊控制在风洞主气流压力自动调节系统中的应用[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 39-42.
- [9] 李登辉. 基于云模型的 BBO 算法优化模糊 PID 控制研究[J]. 无线互联科技, 2018(9): 94-100.
- [10] 陈帅, 汪成文, 张震阳, 等. 改进模糊 PID 方法及其在电液伺服控制中的应用[J]. 机电工程, 2021, 38(5): 559-565.
- [11] 赵笑笑. 基于模糊理论与常规 PID 控制的模糊 PID 控制方法研究[J]. 山东电力技术, 2009(6): 54-57.
- [5] 李文川, 高思源, 章鑫, 等. 基于随机 Petri 网的企业 RFID 技术采纳内化建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(2): 470-480.
- [6] 赵越, 耿艳栋. 一种基于 RFID 的机房装备智能化管理技术[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 331-335.
- [7] 钟叶, 武岳山, 沈玉龙. 面向 RFID 供应链应用系统的标签处理过程建模方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 197-198.
- [8] 左晋佳, 张晓娟. 基于信息安全的双区块链电子档案管理系统设计与应用[J]. 档案学研究, 2021(2): 60-67.
- [9] 杨海杰, 石进, 卢明欣. 基于链上链下的电子文件可信管理系统模型[J]. 档案管理, 2022(2): 12-16.
- [10] 高慧筠. 区块链技术在电子健康档案开放共享中应用的动力学分析[J]. 档案与建设, 2020(8): 35-39, 44.
- [11] 王辉, 陈博, 刘玉祥. 基于区块链的人事档案管理系统研究[J]. 计算机科学, 2021, 48(S2): 713-718.
- [12] 李贞贞, 肖宛如, 刘威. 政务云环境下机关档案管理系统设计[J]. 北京档案, 2020(12): 29-31.
- [13] 张忠林, 曹婷婷. 基于重采样与特征选择的不均衡数据分类算法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(6): 1327-1333.
- [14] 段中兴, 毕瀚元, 张作伟. 基于 D-S 证据理论的不完整数据混合分类算法[J]. 信息与控制, 2020, 49(4): 455-463, 471.
- [15] 张斌, 吴浩明. 一种面向连接的快速多维包分类算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(6): 1526-1533.
- [16] 李骏, 李晓燕, 马尽文. 基于高斯过程混合模型的瓦斯安全状态分类研究[J]. 信号处理, 2021, 37(7): 1198-1206.