

# 燃料电池汽车高温环境下散热与噪声控制的模糊PID策略优化研究

王 敏 王士英

海南海马汽车有限公司 海南 海口 570216

**摘要:** 本文聚焦于燃料电池汽车在高温环境下的散热效能与噪声控制问题,提出了一种基于模糊PID控制策略的优化方案。通过引入模糊逻辑动态调整PID参数,结合整车控制器(VCU)的高级控制逻辑,实现了散热与噪声的双重优化。实验结果表明,该策略显著提高了高温环境下的散热效率,并有效降低了噪声水平,提升了整车的驾驶舒适性。

**关键词:** 燃料电池汽车; 高温环境; 模糊PID控制; 散热优化; 噪声控制

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

随着燃料电池汽车技术的不断发展,其高温环境下的散热与噪声控制问题日益凸显。高温不仅影响燃料电池的性能和寿命,还加剧了散热系统的负担,同时产生的噪声降低了驾驶舒适性。因此,研究高效、智能的散热与噪声控制策略对于燃料电池汽车具有重要意义。本文旨在通过引入模糊PID控制策略,解决高温环境下的散热与噪声控制难题。

### 1.2 国内外研究现状

国内外学者在这方面进行了广泛研究<sup>[1]</sup>。传统控制策略如开关控制和PID控制在一定程度上满足了散热需求,但在高温高负荷工况下,其控制精度和响应速度难以满足要求。近年来,模糊控制、神经网络等智能控制策略逐渐被应用于汽车热管理领域,取得了显著成效。本文也提出了一种基于模糊PID控制策略的散热与噪声控制优化方案。

## 2 燃料电池汽车热管理系统概述

### 2.1 燃料电池汽车热管理系统组成

燃料电池汽车热管理系统构成复杂,是保障燃料电池高效运行的关键。其核心包括燃料电池堆、冷却系统、加热系统及传感器和控制器。燃料电池堆转化化学能为电能时产生大量热量,需冷却系统散发,该系统由散热器、冷却风扇和水泵组成,实现热量传递。加热系统如PTC加热器,用于低温快速升温燃料电池堆。传感器监测温度、流量、压力等参数,控制器根据数据调节各组件,确保燃料电池堆温度精确控制,保障系统高效稳定运行。

### 2.2 燃料电池汽车热管理控制策略

传统燃料电池汽车热管理控制策略主要包括开关控制和PID控制<sup>[3]</sup>。开关控制通过简单的开关动作控制冷却风扇的启停,但难以实现精细的温度控制,且易导致风扇频繁启停,影响乘坐舒适性和系统寿命。PID控制通过比例、积分、微分三个环节实现温度控制,但在非线性、时变系统中,PID控制的参数整定较为困难,且难以适应复杂多变的工况。因此,探索更加先进、智能的控制策略成为燃料电池汽车热管理领域的研究热点。

## 3 基于模糊PID控制策略的散热与噪声控制优化

### 3.1 模糊PID控制策略原理

模糊PID控制策略结合了模糊控制和PID控制的优点<sup>[4]</sup>。模糊控制通过模糊逻辑处理系统中的不确定性和非线性因素,实现对PID参数的动态调整。模糊PID控制策略通过引入模糊逻辑控制器,根据系统实时状态动态调整PID参数,提高系统的控制精度和响应速度。

### 3.2 控制策略设计与实现

#### 3.2.1 稳态边界条件控制策略

在燃料电池汽车稳态运行条件下,对风扇转速占空比控制策略进行了全面优化,采用模糊PID控制策略以实现精细智能的散热与噪声控制。该策略引入模糊逻辑控制,根据燃料电池冷却水出口温度实际值与设定值的偏差及其变化率,动态调整PID比例、积分和微分参数,精确控制风扇转速占空比。

同时,将模糊PID控制策略与整车控制器(VCU)高级控制逻辑相集成,实现风扇转速占空比的实时动态调整。VCU实时接收并分析车速、燃料电池冷却水出口温度等多维度信号,基于算法模型动态优化散热性能与NVH性能(参见图1)。

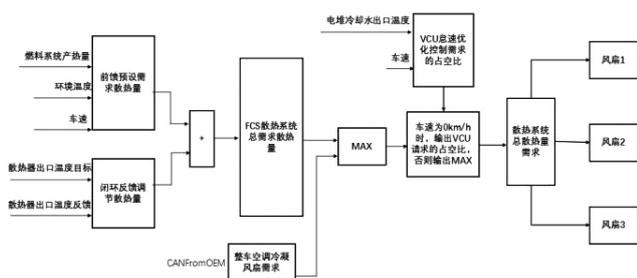


图1 燃料电池系统逻辑框架参考

此外，采用分层控制策略，依据燃料电池冷却水出口温度的精细分层，设定风扇转速占空比的合理区间。在低温时采用低占空比降低噪声（详细参数参见表1），随温度升高依据模糊PID控制器输出逐渐增大占空比，确保燃料电池有效散热。显著提升了热管理系统的适应性和控制精度。

表1 燃料电池控制器最高风扇限制/噪声参考

燃料电池冷却水出口温度/°C	69	71	73	74	> 74
风扇转速占空比	50	60	70	80	90
一排成员内耳dB(A)	46.01	50.44	53.72	55.13	60.57
车辆近场dB(A)	74.75	78.92	81.99	84.94	87.52

### 3.2.2 动态边界条件控制策略

在动态运行环境中，燃料电池控制器对关键参数严格监控与策略调整，旨在实现散热效率与噪声控制的双重优化。具体控制策略及其实施细节如下：

#### 3.2.2.1 实时监测与动态调整策略

##### (1) 参数监控与信息交互：

◎燃料电池系统控制器通过CAN网络实时监控核心部件参数，并与网关、整车控制器、空调控制器及燃料电池HV控制器等核心部件实现无缝信息交换。

◎实时监控六大关键参数：车速、散热器出口目标温度、散热器出口实际温度、环境温度、燃料电池系统产热量以及空调冷凝风扇需求，确保数据的全面性和准确性。

##### (2) 动态调整风扇占空比：

◎基于监控参数，燃料电池控制器查询预设查表（如查表2-3）以确定风扇占空比的初始设定值，为动态调整提供基准。

◎将监控参数输入至燃料电池系统控制器的模糊PID算法模型中，该模型根据实时数据动态计算并调整风扇占空比输出，实现精细化控制。

◎调整后的占空比信号被发送至风扇控制器，以控制风扇转速，从而精准满足燃料电池系统在动态运行中的散热需求，确保散热效率与噪声控制的双重优化。

表2 燃料电池系统策略标定

(燃料电池功率-车速-电子风扇占空比-噪声限值对应关系)

燃料电池功率区间kw	50~30		70~50	
车速区间km/h	65~55	75~65	85~75	120~85
电子风扇占空比%	60	70	80	90
噪声限值dB(A)	62	64	66	70

表3 整车空调冷凝器风扇策略标定

(空调制冷性能-电子风扇对应关系)

空调需求风扇占空比	电子风扇最低占空比
$0 \leq \text{空调需求} \leq 30\%$	0
$30\% < \text{空调需求} \leq 50\%$	20%
$50\% < \text{空调需求} \leq 80\%$	25%
$80\% < \text{空调需求} \leq 100\%$	30%

### 3.3 实验验证与结果分析

稳态策略反馈：测试车辆在多次减速至静止（0km/h）的过程中，主散热器风扇占空比处于高噪音区（50%以上）的时间缩短至3秒，且噪音分贝迅速下降（参图2）。这一变化有效减少了驾驶员的不舒适感，显著提升了驾驶舒适性。

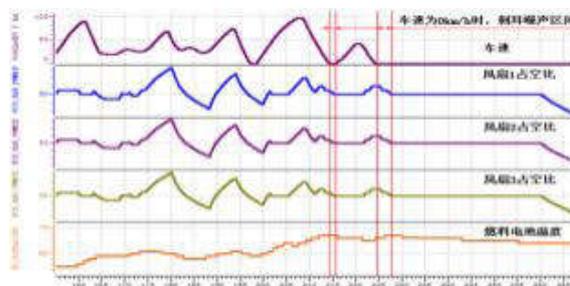


图2 工况采集数据

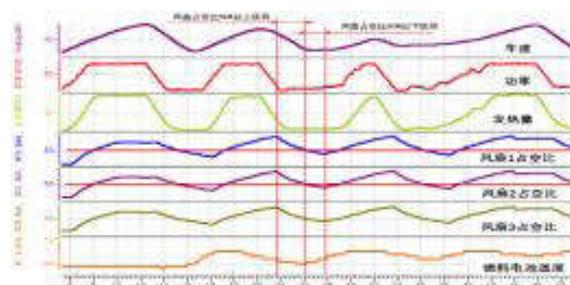


图3 工况采集数据

动态策略反馈：在风扇高占空比导致的高分贝噪声区域，下降斜率高达13.6%/s，展现出快速响应能力。具体而言，风扇占空比从50%以上下降30%仅需2.2秒，而在占空比低于50%的区域，下降8%则需1.9秒（参见图3）的控制策略，不仅确保了噪音的快速降低，还保证了在整个过程中燃料电池温度的有效控制，始终维持在75°C的限值以下，展现了出色的热管理与噪声控制性能。

## 4 与其他控制策略的比较分析

### 4.1 与传统PID控制策略的比较

与传统PID控制策略相比,本文提出的模糊PID控制策略在控制精度、响应速度以及适应性方面均表现出显著优势。传统PID控制策略难以处理系统中的不确定性和非线性因素,导致控制效果有限。而模糊PID控制策略通过引入模糊逻辑控制器,实现了对PID参数的动态调整,提高了系统的控制精度和响应速度。

### 4.2 与其他先进控制策略的比较

与近年来提出的其他先进控制策略相比,如神经网络控制等,本文提出的模糊PID控制策略在复杂性和实用性方面更具优势。神经网络控制虽然具有强大的非线性处理能力,但其模型复杂、计算量大,难以在实际应用中实现。而模糊PID控制策略则结合了模糊控制和PID控制的优点,既具有模糊控制的高性能,又具备PID控制的精准度,且实现相对简单、易于应用。

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

本文提出了一种基于模糊PID控制策略的高温环境散

热与噪声控制优化方案,并通过实验验证了其有效性。该方案显著提高了高温环境下的散热效率,并降低了噪声水平。同时,该方案还具有良好的鲁棒性和适应性,能够在不同工况下保持稳定的控制效果。

### 5.2 未来展望

未来工作将进一步优化模糊PID控制策略的参数整定方法,提高系统的控制精度和响应速度。同时,将探索模糊PID控制策略在燃料电池汽车其他领域的应用潜力,如动力电池热管理等。此外,还将结合智能网联汽车技术发展趋势,研究基于大数据和人工智能的热管理控制策略,为燃料电池汽车的商业化应用提供更加高效、智能的解决方案。

## 参考文献

- [1]黎清敏.基于智能控制算法的新能源汽车电池管理系统优化策略探析[J].汽车测试报告,2024,(10):35-37.
- [2]孟祥廷.燃料电池发动机热管理系统设计与优化[D].山东大学,2020.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2020.001513.
- [3]王红.虚拟仿真在新能源汽车热管理系统设计与优化中的应用[J].南方农机,2024,55(09):136-139.