

平行模糊控制：虚实互动、相互增强的自学习控制方法

陈德旺 欧纪祥

Parallel fuzzy control: a self-learning control method with virtual-real interaction and mutual enhancement

CHEN Dewang, OU Jixiang

引用本文：

陈德旺,欧纪祥. 平行模糊控制：虚实互动、相互增强的自学习控制方法[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 267-273.

Dewang CHEN,Jixiang OU. Parallel fuzzy control: a self-learning control method with virtual-real interaction and mutual enhancement[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 267-273.

您可能感兴趣的其他文章

平行设计：面向平行制造体系的非标机械方案设计流程

Parallel design: non-standard mechanical scheme design procedure in parallel manufacturing
智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 274-284

平行医疗机器人

Parallel surgical robots

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 222-233

元宇宙与平行系统：发展现状、对比及展望

Metaverses and parallel systems: the state of the art, comparisons and prospects
智能科学与技术学报. 2023. 5(1): 121-132

平行轮胎的基本架构与关键技术

Basic framework and key technologies of parallel tires

智能科学与技术学报. 2022. 4(3): 445-457

平行电池：智能生态化电池技术与服务体系的框架和流程

Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services

智能科学与技术学报. 2021. 3(4): 521-531

基于平行控制的离散非线性系统的事件触发近似最优控制

Parallel control-based event-driven approximate optimal control of discrete-time nonlinear systems

智能科学与技术学报. 2021. 3(4): 435-443

平行模糊控制：虚实互动、相互增强的自学习控制方法

陈德旺^{1,2}, 欧纪祥¹

(1. 福建理工大学交通运输学院, 福建 福州 350118;
2. 福州大学计算机与大数据学院, 福建 福州 350108)

摘要: 模糊控制具有可解释性和容易实现等优点, 但是自学习能力较弱, 难以有效利用控制过程中积累的大数据。平行控制是一种新型智能控制方法, 能有效利用互联网和大数据, 实现虚实互动、相互增强的智能控制。新方法将模糊控制与平行控制相结合, 提出了平行模糊控制的定义和框架, 并对其可能的应用进行了探讨。平行模糊控制有可能扩展模糊控制的发展方向, 也可能成为平行控制的一个新思路, 在保证可解释与可信自动控制的基础上, 有效利用大数据和基于数据驱动的一些机器学习算法实现自学习的控制。

关键词: 平行模糊控制; 模糊控制; 平行控制; ACP方法; 自学习控制

中图分类号: TP13

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202322

Parallel fuzzy control: a self-learning control method with virtual-real interaction and mutual enhancement

CHEN Dewang^{1,2}, OU Jixiang¹

1. School of Transportation, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China
2. College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

Abstract: Fuzzy control has advantages such as interpretability and ease of implementation. However, it is limited by its weak self-learning capability, which makes it difficult to effectively utilize the large amount of data accumulated in the control process. Parallel control is a new intelligent control method that enables intelligent control with virtual-real interaction and mutual enhancement, effectively using the Internet and big data to achieve intelligent control. Fuzzy control and parallel control were combined as a new method, and the definition and framework of parallel fuzzy control were proposed and its possible applications were discussed. Parallel fuzzy control has the potential to extend the development direction of fuzzy control and become a new thinking for parallel control. It can effectively utilize big data and some machine learning algorithms based on data-driven to achieve self-learning control, while ensuring interpretability and credibility.

Key words: parallel fuzzy control, fuzzy control, parallel control, ACP approach, self-learning control

0 引言

模糊控制是一种基于模糊数学的控制系统设计

方法, 通过使用模糊逻辑来处理模糊或不确定性的输入, 以产生相应的控制输出。模糊控制的发展最早可以追溯到1965年Zadeh^[1]提出模糊集合理论。

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-05-04

通信作者: 陈德旺, dwchen@fjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.61976055); 福建省财政厅教育和科研专项资金项目 (No.GY-Z21001); 福建理工大学科研启动基金项目 (No.GY-Z22071)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61976055), The Special Fund for Education and Scientific Research of Fujian Provincial Department of Finance (No.GY-Z21001), Scientific Research Foundation of Fujian University of Technology (No.GY-Z22071)

在此之后,模糊逻辑得到了广泛的研究和应用,特别是在控制领域。1975年,Mamdani等人^[2]提出了模糊控制器的概念,使用模糊规则来控制一个蒸汽发生器。之后,模糊控制在工业、交通和经济等领域得到了广泛的应用。现在,模糊控制已成为控制理论中的一个重要分支,为解决实际系统中的复杂和非线性问题提供了有效的工具。随着计算机技术和人工智能的快速发展,模糊控制在控制领域的应用也越来越广泛^[3]。

模糊控制的优势明显,主要体现在其应用范围非常广泛,能适应各种场景下的控制需求;模糊规则通过自然语言或图形来表示,直观易懂,便于设计和调试;模糊推理模拟人的思维模式,使模糊控制具有可解释性;并且模糊控制不需要精确的数学模型,能够在不知道系统动态特性和参数的情况下进行控制,这使控制系统的设计与实现更加灵活^[4]。但传统的模糊控制是由人工制定规则的,因此其自学习能力比较有限。当控制系统遇到一些未知的情况时,模糊控制的规则往往需要手动进行调整或添加新的规则,这给控制系统的实时性和灵活性都带来一定的限制。除此之外,模糊控制还存在理论基础不够完善和运算复杂度高不足^[5]。

平行控制是一种数据驱动的计算控制方法,是近年来在控制领域中发展的新兴技术之一。控制系统中的计算、传感和执行等过程并行化,将多个控制器相互耦合组合成一个整体的控制系统,实现了高效、精确、鲁棒地控制。平行控制的发展源于计算能力的提高和大数据技术的发展,它借鉴了数据挖掘、机器学习和模式识别等领域的技术,将这些技术应用于控制领域,实现了控制过程的智能化和自适应性^[6]。同时,平行控制也解决了传统控制方法中存在的单点故障、计算瓶颈等问题,提高了控制系统的鲁棒性和可靠性。近年来,平行控制已经在复杂生产和国家安全等重要领域取得成效,并且得到了学术界和工业界的广泛关注和认可。未来,随着计算能力的不断提升和人工智能技术的发展,平行控制将会进一步发展和完善,成为控制领域中的重要技术之一^[7]。

随着工程系统和社会系统愈加复杂,工程问题的复杂度也日益提高。模糊控制和平行控制都具有很好的处理复杂控制问题的能力。为了充分发挥两种控制方法的优势,平行模糊控制将平行控制和模糊控制相结合,形成一种新的控制方法。平行模糊

控制利用平行控制的数据处理和实时性优势,通过采集和处理大量的实时数据,实现控制器的自适应和优化^[8];同时,利用模糊控制的可解释性和鲁棒性优势,将系统的模糊化处理与控制器的设计相结合^[9],并引入机器学习算法,实现更加精确、可信和灵活的自学习控制。它将成为平行控制新的研究方向,也将作为模糊控制优化改进的新思路,为控制方法的发展注入新的活力和动力。

本文首先简单介绍了模糊控制和平行控制的定义和发展,根据平行控制与模糊控制具有互补的优势,提出了一种虚实互动、互相增强的自学习控制方法——平行模糊控制。接着,本文阐述了平行模糊控制的定义、框架、实现方法和研究意义等,然后介绍了平行模糊控制系统,并探讨平行模糊控制可能的应用领域。最后,对平行模糊控制的理论进行总结,并对未来的研究和可能的发展进行了展望。

1 平行模糊控制的定义

1.1 平行控制与模糊控制的交叉领域

模糊控制是指使用模糊推理来确定控制器的输出,它以模糊理论为突破口,将隶属关系从经典数学的0(不属于)和1(属于)转化为0与1之间的模糊集合,而后通过自然语言和if-then语义逻辑定义控制规则以供模糊逻辑推理,可以对不确定和非线性系统进行有效的控制。具体来说,模糊控制通常先采用合适的隶属函数获得输入论域的集合并量化当前的输入,然后根据经验规则进行模糊推理,按照当前输入的触发规则进行加权平均来得到控制量,最后将控制量转化为实际控制信号^[10]。

平行控制则是一种新型的控制方法,它将实际问题拓展到虚空间,通过虚实互动、大数据驱动和计算实验,使多个控制器并行运行,把它们的输出合并成一个控制信号,对复杂系统进行控制和管理^[11]。平行控制的数学形式是对控制向量的时间导数进行建模,而不是对控制向量本身进行建模,它可以通过高精度数字孪生模型来实现。具体实现流程主要是:①根据具体情况建立数字孪生模型;②根据数字孪生模型和文献[12]中的算法,设计平行控制器;③在实际系统中应用平行控制器;④对平行控制器进行调整和优化。

平行控制和模糊控制都是控制理论中的重要分支,虽然他们在设计逻辑和算法基础上有着一定的

不同,但他们在一些应用领域有着交叉和互补之处。他们都通过各自的特点,巧妙地避开了复杂工程问题无法精确建模的问题。因此,平行控制和模糊控制在理论上是可以相结合的,不仅可以充分发挥二者的优势,还能在一定程度上克服它们各自的局限性,并提高控制性能,尤其是处理复杂系统的控制问题。例如,在一些自适应控制系统中,平行控制部分用于控制系统的精度和效率,而模糊控制部分用于处理环境的不确定性和变化,使得平行模糊控制得以在不同的工作条件下实现自适应控制^[13]。

1.2 平行模糊控制的实现

平行模糊控制是一种基于平行控制和模糊控制相结合的智能控制技术,它将平行控制中的人工系统、实际系统和各操作单元等模块与模糊控制中的模糊控制器相结合,通过从数据中学习规则,根据模糊规则推理与计算、模糊控制和决策等技术手段实现对实际系统的智能控制,从而达到优化系统性能、提高系统可靠性和稳定性等目的。平行模糊控制的实现过程中还会运用到机器学习等相关算法,对系统进行建模和学习,进一步提高了控制系统的精度和鲁棒性。

作为一种基于大数据,以计算实验和模糊推理为关键环节的针对复杂系统控制问题的新型智能控制方法,平行模糊控制实现的基本思路是“fuzzy-ACP”方法。“fuzzy-ACP”是一种基于模糊理论和计算模型的平行模糊控制方法,其中“ACP”方法——人工社会(artificial societies)、计算实验(computational experiments)和平行执行(parallel execution)是实现系统控制和优化的关键要素^[14]。

平行模糊控制首先利用模糊逻辑对人工系统进行建模和表示;然后通过模糊控制来设计和实现控制系统,并通过模糊推理和计算实验进行分析和评估,以达到优化控制系统的目的;最后借助平行执行实现模糊控制规则的在线调整,得以完成对复杂系统的控制和管理。它能很好地利用数据驱动,从大量数据中学习出模糊规则,利用模糊逻辑来描述这些规则以供推理计算,根据控制目标和性能的实际效果,对控制策略进行自适应优化(如增加新的模糊规则),将优化后的控制策略应用于实际控制的系统中,并持续优化和调整控制策略。平行模糊控制的基本框架如图1所示。

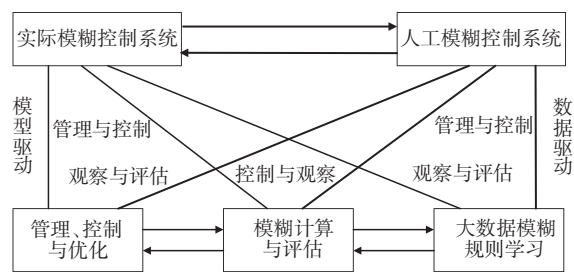


图1 平行模糊控制的基本框图

1.3 平行模糊控制的意义

平行模糊控制是一种结合了平行控制和模糊控制的新型控制方法。它在处理不确定性和非线性系统方面的复杂问题上,能充分发挥模糊控制的解释性和鲁棒性等优势,同时通过平行控制的框架提高控制系统的精确性和实时性。平行模糊控制的具体意义体现在以下几个方面。

- 平行模糊控制能改善控制系统的性能。平行模糊控制方法具有较高的控制精度和稳定性,能够实现对非线性和不确定性系统的精确控制,同时能够应对外部环境变化和系统参数的扰动。

- 平行模糊控制提高了控制系统的实时性和可解释性。平行控制是一种平行执行的控制方法,可以实现高效的实时控制,使得平行模糊控制能应对复杂的实时控制问题;模糊控制具有高可解释性,能够将系统的控制策略以自然语言的形式进行表达,并模仿人的思维方式进行分析推理,使平行模糊控制系统的设计和调试更加方便。

- 平行模糊控制能够利用机器学习算法进行自学习,并实现控制策略的优化,从而提高控制系统的性能和鲁棒性,具有很高的自适应能力。

- 平行模糊控制方法能够适用于多个领域,如智能交通、工业控制和智能制造等,能够处理不同领域的非线性和不确定性系统,具有较高的应用价值。

- 平行模糊控制将平行控制和模糊控制相结合,使两者的优势互补,在理论研究方面可以拓宽两种控制方法的应用范围,同时也能促进两种方法的深入研究和控制理论的发展。

平行模糊控制方法是一种具有很高应用价值的新型控制方法,它将平行控制和模糊控制的优势相结合,可以在处理复杂系统时取得更好的控制效果,为未来的智能控制和自动化领域带来新的技术突破。

2 平行模糊控制系统

2.1 平行模糊控制系统的框架

平行模糊控制系统是一种基于平行模糊控制理论和“fuzzy-ACP”方法设计的智能控制系统。平行模糊控制系统也是一种自适应控制系统，系统框架包括输入、输出、控制器、被控对象和反馈元件等控制单元。

在复杂系统中，实际被控对象的数学模型往往无法准确建立，因此需要将一个人工系统作为参考模型，使实际系统与人工系统不断逼近，而“fuzzy-ACP”方法就是实现两者相互趋近的有效手段。因此平行模糊控制的控制器主要由规则学习与培训、模糊计算与评估和模糊控制与决策3种操作模式组成一个完整的操作单元。被控对象则是包括人工模糊系统和实际模糊系统，两者互动趋近，并通过平行执行和管理来调整控制器和输出控制信号。干扰信号的作用是模拟外部环境中的各种不确定性因素，通过加入干扰信号，控制系统可以更加全面地考虑这些不确定因素，增加系统的鲁棒性和稳定性。反馈元件可以实时监测被控系统的实际输出信号，并将该信号反馈回控制器，以便及时纠正和减少误差，从而实现系统的自适应控制。平行模糊控制系统的闭环控制结构如图2所示。

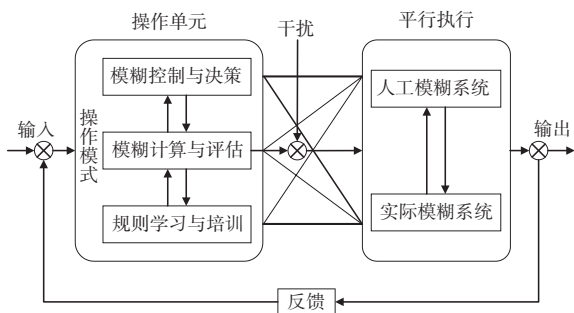


图2 平行模糊控制系统的闭环控制结构

2.2 平行模糊控制的组成及作用

平行模糊控制由以下几个部分组成。①人工模糊控制系统：主要负责制定控制目标、设计控制策略和对控制过程进行监控，可以理解为整个控制系统的决策者。②实际模糊控制系统：指被控制的物理系统或过程，实际系统的行为和状态信息数据通过传感器获取，然后经过数据处理后，作为推理和计算模块的输入。③机器学习算法：主要用于自适应控制、数据挖掘、模型识别与预测等方面。通过机

器学习算法，控制器可以自动地学习和优化模糊规则，提高控制器的自适应能力和智能化程度。④数据采集与处理模块：该模块负责采集系统内部和外部的各种数据，并对数据进行处理，以便为控制器提供准确的输入。该模块的作用是提高数据的可靠性和精度。⑤模糊推理和计算模块：该模块将学习到的规则用于模糊推理，调节参数进行计算、分析与评估，以便为控制器提供决策支持。该模块的作用是提高控制器的智能化程度和适应性。⑥模型预测与优化模块：该模块负责建立系统的动态模型，并通过模型预测和优化技术来改进控制器的性能，以便满足不同的控制需求。该模块的作用是提高控制器的性能和稳定性。

这些部分相互协作，形成了一个完整的平行模糊控制系统，在解决控制问题时将体现出极大的作用，尤其是针对大型工程系统的复杂问题（如图3所示）。平行模糊控制通过不断优化自身的控制策略，可以实现更加智能、高效的控制效果。

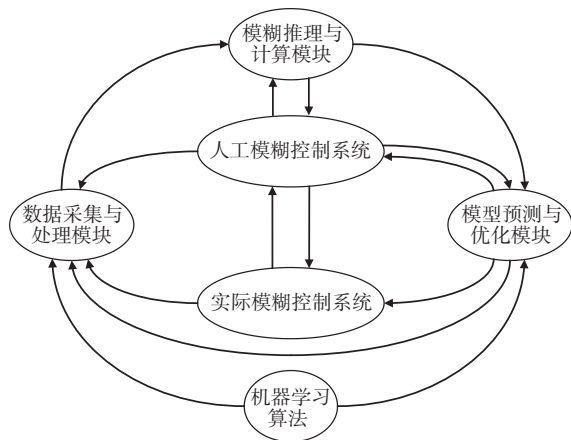


图3 平行模糊控制系统各模块的关系

3 平行模糊控制的应用

平行模糊控制有非常广阔的应用前景，特别是在控制系统模型复杂程度高、动态性强等情况下更加优越。例如，智能交通^[15-17]、工业控制^[18-19]和智能制造^[20]等领域，都需要对具有社会复杂性和工程复杂性的大规模、高维度、强耦合、多主体等特征的系统进行有效的控制。平行模糊控制可以提供一种更适合于这些领域的解决方案。

3.1 自动驾驶

自动驾驶是一种利用计算机、传感器和控制器等技术，实现车辆在没有人为干预的情况下，按照

预定的路线和目标,实现安全、高效行驶的技术。自动驾驶涉及多个复杂系统的协调和控制,例如车辆运动学、车道检测、障碍物识别、轨迹规划、速度控制等。这些系统都存在着不确定性、非线性和复杂性问题,给自动驾驶的设计和实现带来了挑战。

平行模糊控制是一种将平行控制和模糊控制相结合的智能控制方法,它可以利用多个模糊控制器的优势,提高系统的鲁棒性和适应性。平行模糊控制可以根据不同的工作条件或目标,选择或组合不同的子系统,从而实现对复杂系统的有效控制。因此平行模糊控制在自动驾驶领域有着广泛的应用前景。

汽车的自动驾驶系统(autopilot system, APS)通常包括感知数据层、决策规划层和车辆控制层,在平行模糊自动驾驶控制系统中,采集实际模糊APS的道路环境和驾驶数据进行感知层的处理,然后在人工模糊APS的平行管理下实现决策和控制(如图4所示)。

- 感知数据层:实际驾驶中的传感器数据,包括障碍物、车道线等环境数据和加速度、转角等驾驶数据。这些输入数据将被处理和模糊化,而后提供给自动驾驶系统进行决策。

- 决策规划层:根据车辆的状态和环境的变化,通过模糊逻辑和计算评估进行决策和规划,实时做出合适的控制指令。

- 车辆控制层:在人工模糊APS和实际模糊APS的平行执行和管理下,平行模糊自动驾驶系统会输出车辆的加减速、转向、刹车等控制动作和车辆状态,以实现更加平稳和高效的驾驶。

平行模糊控制在自动驾驶领域有很重要的现实

意义和广阔前景。它不仅可以提高自动驾驶系统对复杂环境和不确定因素的适应能力和自学习能力,还能提升其安全性和效率。同时,它也为进一步发展智能交通系统提供了新思路和新方法。

3.2 工业控制的水泥窑问题

工业控制是指利用电子电气、机械和软件等手段,使工厂的生产和制造过程更加自动化、高效化、精确化,并具有可控性和可视性的技术。工业控制在国内外都有广泛的应用和发展,尤其是在水泥窑这类高能耗和高复杂度的行业,工业控制可以提高生产效率和质量,降低能耗和排放,实现节能减排和绿色发展。

平行模糊系统是一种基于模糊逻辑和平行学习的自学习控制方法,可以处理复杂系统中存在的不确定性、非线性和耦合性等问题。平行模糊控制的优势得益于模糊逻辑和平行执行。模糊逻辑是一种利用语言变量和模糊集合来描述客观世界中普遍存在的模糊现象的数学工具,可以实现人类知识和经验的形式化表示和推理^[21]。平行执行是一种将复杂系统分解为多个自治、互动、协作的个体,并通过协调机制实现全局目标的计算范式,可以提高系统的适应性和可扩展性。

水泥窑控制问题^[22]是平行模糊控制适用的问题之一。实现基于平行模糊控制的水泥窑控制系统要先将控制目标转化为模糊变量,例如温度参数可以模糊化为“高温”“低温”“中等温度”等;然后依靠数据处理技术对输入参数进行预处理,并从数据中学习模糊规则进行培训;接着通过模糊规则推理和云端计算实验,在虚拟模型中对结果进行评估和分析,从而尽可能得到最优的控制和管理策略。水泥窑系统可以分解为多个水泥窑子系统,并通过

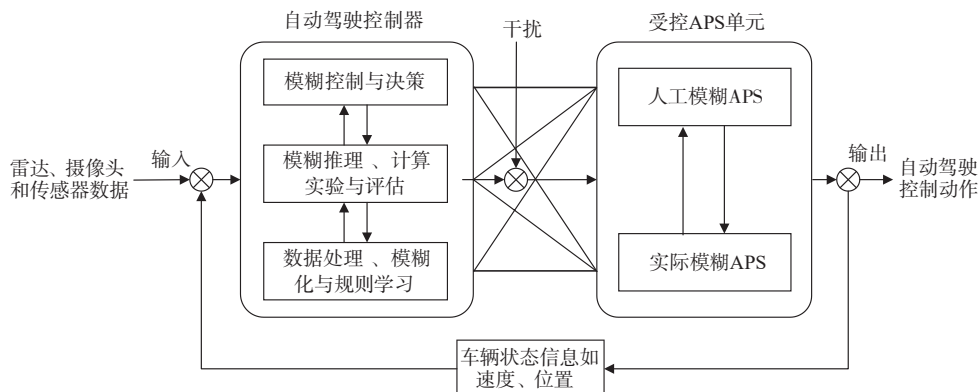


图4 基于平行模糊控制的自动驾驶系统

平行执行和管理直接实现子系统的信息交换和协同优化,借助反馈参数自适应调整,最后输出进料速

度、炉内转速和温度等相应的控制指令(如图5所示)。

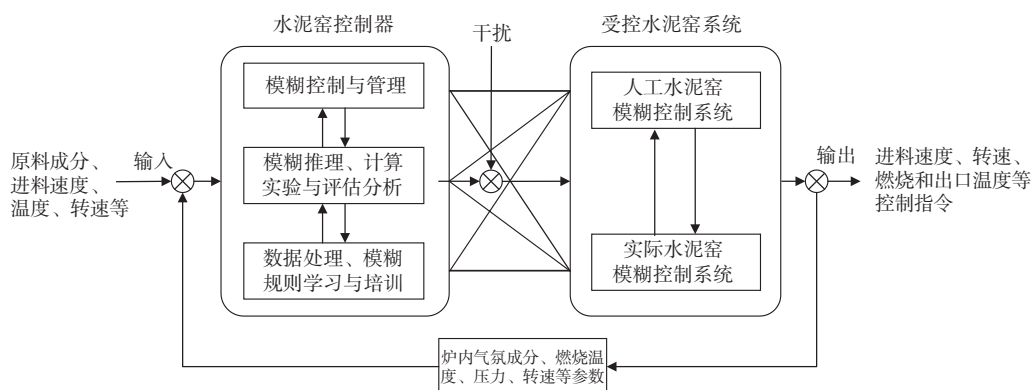


图5 平行模糊水泥窑控制系统

平行模糊系统可以为水泥窑等工业控制领域带来新的思路和方法,提高其智能化水平,并解决一些传统方法难以克服的问题。这对于推动我国工业转型升级、增强竞争力和环境保护等都具有重要意义。

4 总结与展望

4.1 总结

本文提出了平行模糊控制这一新型控制方法,突破了传统控制方法对模型精确性、可解释性和自学习能力等方面的限制,构建了一个完整的平行模糊控制框架,采用新的“fuzzy-ACP”方法实现平行模糊控制。这种方法可以充分利用平行控制和模糊控制各自的优势,为控制系统中的非线性、不确定性和复杂性问题的提供了一种智能高效的解决方案。

平行模糊控制的优势在于可以将多个控制器并行运行,通过合并它们的输出得到更加精确的控制信号。同时,模糊控制的可解释性强,可以为控制器提供人性化的设计,使控制器更易于理解和应用。此外,平行模糊控制还可以适应不同的控制问题和场景,具有很好的灵活性和适应性。

然而,平行模糊控制也存在一些局限性和不足。例如,对于复杂的系统和控制问题,需要进行大量的参数调整和优化,这会增加系统设计和调试的难度。同时,平行模糊控制需要将多个控制器进行并行设计,并且需要引入机器学习算法进行优化,可能导致算法设计较为复杂。

4.2 展望

平行模糊控制作为一种新的控制技术,有望在不同领域中得到广泛的应用和研究。未来,随着计算机技术和数据处理能力的进一步提升,平行模糊控制在控制系统中的应用将变得更加普及和重要。我们可以期待更多基于平行模糊控制的创新应用的涌现,在此针对平行模糊控制的发展提出以下展望。

- 平行模糊控制的机理和性质等理论仍然需要更深入的研究。未来,可以进一步探索平行模糊控制的理论基础,提出更加精准有效的算法和方法,使其在实践中更加可靠和实用。
- 平行模糊控制涉及多种技术和算法的结合,包括模糊逻辑、机器学习和并行执行等。未来的研究可以探索大数据和云计算的前沿研究,结合更加高效和准确的算法实现,例如基于深度学习的平行模糊控制^[23]等,以实现更加智能和自适应的控制。
- 未来可以进一步探索平行模糊控制所应用的复杂系统领域和场景,拓展其应用范围,如在医疗健康、环境保护、能源管理等领域的应用。在不同的应用场景下,平行模糊控制需要针对具体问题进行调整,提高应用效果和实际应用价值。

参考文献:

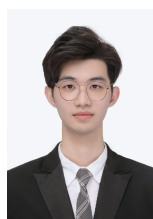
- [1] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [2] MAMDANI E H, ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1975, 7(1): 1-13.
- [3] 刘向杰,周孝信,柴天佑. 模糊控制研究的现状与新发展[J]. 信息与控制, 1999, 28(4): 283-292.

- LIU X J, ZHOU X X, CHAI T Y. Status and development of fuzzy control[J]. Information and Control, 1999, 28(4): 283-292.
- [4] WANG L X. A course in fuzzy systems and control[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1996.
- [5] 王立新. 模糊系统: 挑战与机遇并存: 十年研究之感悟[J]. 自动化学报, 2001, 27(4): 585-590.
- WANG L X. Fuzzy systems: challenges and chance my experiences and perspectives[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(4): 585-590.
- [6] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489.
- WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489.
- [7] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.
- YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [8] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 293-302.
- WANG F Y. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 293-302.
- [9] 陈德旺, 蔡际杰, 黄允浒. 面向可解释性人工智能与大数据的模糊系统发展展望[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 327-334.
- CHEN D W, CAI J J, HUANG X H. Development prospect of fuzzy system oriented to interpretable artificial intelligence and big data[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 327-334.
- [10] 赵文迪, 陈德旺, 卓永强, 等. 深度神经模糊系统算法及其回归应用[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2350-2358.
- ZHAO W D, CHEN D W, ZHUO Y Q, et al. Deep neural fuzzy system algorithm and its regression application[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(11): 2350-2358.
- [11] 王飞跃, 邱晓刚, 曾大军, 等. 基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(4): 1-10.
- WANG F Y, QIU X G, ZENG D J, et al. A Computational Experimental Platform for Emergency Response Based on Parallel Systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2010, 7(4): 1-10.
- [12] 王飞跃. 平行控制与数字孪生: 经典控制理论的回顾与重铸[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 293-300.
- WANG F Y. Parallel control and digital twins: control theory revisited and reshaped[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 293-300.
- [13] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- WANG S Y, SHI Y, FENG Z X. Research on control method based on fuzzy PID controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172.
- [14] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
- WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [15] SUGENO M, MURAKAMI K. Fuzzy parking control of model car [C]//Proceedings of 23rd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2007: 902-903.
- [16] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [17] 赖文柱, 陈德旺, 何振峰, 等. 地铁列车驾驶技术发展综述: 从人工驾驶到智能无人驾驶[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(3): 335-343.
- LAI W Z, CHEN D W, HE Z F, et al. Overview of metro train driving technology development: from manual driving to intelligent unmanned driving[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(3): 335-343.
- [18] RADU-EMIL, PRECUP. A survey on industrial applications of fuzzy control[J]. Computers in Industry, 2011, 62(3): 213-226.
- [19] LI Q, SU Y, YIN F, et al. A parallel intelligent control system and its industrial application[C]//Proceedings of 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Piscataway: IEEE Press, 2021: 9-12.
- [20] ZHONG R Y, XU X, KLOTZ E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review[J]. Engineering, 2017, 3(5): 616-630.
- [21] MENDEL J M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(3): 345-377.
- [22] 余宁. 水泥窑系统控制技术综述[J]. 水泥技术, 2001(6): 66-70.
- YU N. Control technology review of cement kiln system[J]. Cement Technology, 2001(6): 66-70.
- [23] 段艳杰, 吕宜生, 张杰, 等. 深度学习在控制领域的研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(5): 643-654.
- DUAN Y J, LV Y S, ZHANG J, et al. Deep learning for control: the state of the art and prospects[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(5): 643-654.

作者简介



陈德旺 (1976-), 男, 博士, 福建理工大学交通运输学院教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 福州大学计算机与大数据学院博士生导师, 福建省“闽江学者”特聘教授, 主要研究方向为人工智能算法、模糊系统和智能交通系统。



欧纪祥 (2001-), 男, 福建理工大学交通运输学院硕士研究生, 主要研究方向为可解释人工智能。