

机械臂控制系统的设计与优化

赵 明

北京煜鼎增材制造研究院股份有限公司 河北 雄安 070001

摘要：本文主要研究机械臂控制系统的设计与优化。详细阐述了机械臂控制系统的整体架构，包括硬件和软件部分的设计。通过对传统控制算法的分析，引入先进的优化算法来提升机械臂的控制性能，如在轨迹跟踪、定位精度等方面的改进。实验结果表明，经过优化后的机械臂控制系统在各项性能指标上有显著提升，为机械臂在工业生产、医疗等领域的广泛应用提供了更有力的技术支持。

关键词：机械臂；控制系统；设计；优化算法

1 引言

机械臂作为一种能够模拟人类手臂部分功能的自动化设备，在工业生产、物流搬运、医疗手术辅助、太空探索等众多领域得到了广泛应用。随着科技的不断进步和各行业对自动化程度要求的日益提高，对机械臂控制系统的性能要求也越来越高。一个高效、精确且稳定的机械臂控制系统能够确保机械臂准确地完成各种复杂任务，提高生产效率和产品质量，降低生产成本。因此，对机械臂控制系统进行设计与优化具有重要的现实意义和应用价值。

2 机械臂控制系统设计

2.1 机械臂结构设计

机械臂的结构设计是其控制系统设计的基础，不同的应用场景对机械臂的结构有不同的要求。常见的机械臂结构包括关节型、直角坐标型、圆柱坐标型和极坐标型等。以关节型机械臂为例，它通常由多个关节连接的连杆组成，具有较高的灵活性和工作空间。在设计关节型机械臂结构时，需要考虑关节的运动范围、连杆的长度和强度等因素。通过合理的结构设计，可以减少机械臂运动过程中的惯性力和振动，为精确控制提供良好的机械基础。

2.2 硬件系统设计

2.2.1 传感器选型与布局

传感器在机械臂控制系统中起着至关重要的作用，它能够实时获取机械臂的位置、速度、加速度等状态信息，为控制系统提供反馈信号。常用的传感器有位置传感器（如编码器）、力传感器和陀螺仪等。编码器用于测量关节的角度位置，力传感器可检测机械臂末端执行器所受到的力，陀螺仪则用于测量机械臂的角速度。在传感器布局时，要根据机械臂的结构和控制需求，合理确定传感器的安装位置，确保能够准确、全面地获取所

需信息。

2.2.2 控制器选择

控制器是机械臂控制系统的核心，它负责根据传感器反馈的信息和预设的控制算法，生成控制信号来驱动机械臂的各个关节运动。目前，常用的控制器有可编程逻辑控制器（PLC）、数字信号处理器（DSP）和工业个人计算机（IPC）等。PLC 具有可靠性高、编程简单等优点，适用于逻辑控制要求较高的场合；DSP 运算速度快，适合进行复杂的数字信号处理，在实时性要求较高的控制算法实现中应用广泛；IPC 则具有强大的计算能力和丰富的软件资源，便于开发复杂的人机交互界面和实现高级控制算法。根据机械臂的具体应用需求和性能要求，选择合适的控制器是保证控制系统性能的关键。

2.2.3 驱动系统设计

驱动系统用于将控制器发出的控制信号转换为机械臂关节的实际运动。常见的驱动方式有电机驱动（如直流电机、交流伺服电机）和液压驱动等。交流伺服电机具有较高的精度、响应速度和控制性能，在现代机械臂中应用较为广泛。驱动系统的设计需要根据机械臂关节的负载特性和运动要求，合理选择电机的型号和驱动器的参数，确保能够提供足够的驱动力和精确的速度控制。

2.3 软件系统设计

2.3.1 控制算法实现

控制算法是机械臂控制系统软件的核心部分，它决定了机械臂的运动性能和控制精度。传统的控制算法如比例 - 积分 - 微分（PID）控制算法，具有结构简单、易于实现等优点，在早期的机械臂控制系统中得到了广泛应用。然而，随着对机械臂性能要求的提高，传统 PID 控制算法在处理复杂任务和具有强非线性、时变特性的系统时存在一定的局限性。为了克服这些局限性，近年来出现了许多先进的控制算法，如自适应控制算法、滑

模变结构控制算法、模糊控制算法和神经网络控制算法等。这些先进控制算法能够更好地适应机械臂系统的复杂特性，提高系统的控制性能和鲁棒性。

2.3.2 人机交互界面设计

人机交互界面是操作人员与机械臂控制系统进行交互的重要窗口，它直接影响操作人员对机械臂的操作体验和工作效率。一个良好的人机交互界面应具备简洁明了、易于操作的特点。通过人机交互界面，操作人员可以方便地对机械臂进行参数设置、任务规划、手动操作和监控等。在设计人机交互界面时，要充分考虑操作人员的需求和使用习惯，采用直观的图形化界面设计，如使用按钮、菜单、图表等元素来展示信息和进行操作。同时，还应具备良好的实时性，能够及时反馈机械臂的运行状态和响应操作人员的指令。

2.3.3 系统通信模块设计

在一些复杂的应用场景中，机械臂控制系统可能需要与其他设备或系统进行通信，如与上位机进行数据交互、与其他机械臂协同工作等。因此，系统通信模块的设计也是软件系统设计的重要组成部分。常用的通信方式有串口通信、以太网通信和现场总线通信等。在设计通信模块时，要根据通信需求和通信距离等因素，选择合适的通信方式，并遵循相应的通信协议，确保数据传输的准确性和可靠性。

3 机械臂控制系统优化

3.1 基于先进控制算法的优化

3.1.1 自适应控制算法优化

自适应控制算法能够根据系统的运行状态和外部环境的变化，自动调整控制器的参数，以适应系统的时变特性。在机械臂控制系统中，由于机械臂的负载、摩擦力等参数可能会随着工作条件的变化而发生改变，采用自适应控制算法可以有效地提高系统的控制精度和鲁棒性。例如，模型参考自适应控制（MRAC）算法通过将机械臂系统的实际输出与参考模型的输出进行比较，利用自适应律调整控制器的参数，使机械臂系统的输出尽可能地跟踪参考模型的输出。实验结果表明，采用MRAC算法的机械臂在负载变化时，其轨迹跟踪误差明显小于传统PID控制算法。

3.1.2 滑模变结构控制算法优化

滑模变结构控制算法是一种非线性控制算法，它通过设计滑模面和切换函数，使系统在滑模面上按照预定的滑动模态运动，从而具有对系统参数变化和外部干扰的强鲁棒性。在机械臂控制系统中，滑模变结构控制算法可以有效地克服机械臂系统的非线性和不确定性因

素，提高系统的控制性能。为了减少滑模变结构控制算法在切换过程中产生的抖振现象，可以采用趋近律方法对滑模变结构控制算法进行改进。例如，采用指数趋近律可以使系统状态更快地趋近滑模面，同时减少抖振的幅度。

3.1.3 智能控制算法优化

智能控制算法如模糊控制算法和神经网络控制算法具有较强的自学习和自适应能力，能够处理复杂的非线性系统。模糊控制算法通过将人类的控制经验和知识转化为模糊规则，利用模糊推理来实现对系统的控制。在机械臂控制系统中，模糊控制算法可以根据机械臂的位置误差、速度误差等信息，通过模糊推理得到控制量，从而实现对机械臂的精确控制。神经网络控制算法则通过对大量数据的学习，建立系统的模型并实现对系统的控制。例如，采用BP神经网络对机械臂的动力学模型进行辨识，然后利用辨识得到的模型设计控制器，能够有效提高机械臂的控制精度和动态性能。

3.2 硬件性能优化

3.2.1 传感器精度提升

传感器的精度直接影响机械臂控制系统的控制精度。为了提高传感器的精度，可以采用高精度的传感器元件，并对传感器进行校准和补偿。例如，对于编码器，可以采用高分辨率的编码器，并通过软件算法对编码器的零点漂移和非线性误差进行补偿。同时，还可以采用多传感器融合技术，将多种传感器的信息进行融合处理，提高系统对机械臂状态信息的获取精度。

3.2.2 控制器性能优化

随着硬件技术的不断发展，控制器的性能也在不断提升。为了充分发挥控制器的性能，可以对控制器进行硬件升级和软件优化。例如，选择更高性能的处理芯片，增加控制器的内存容量，优化控制器的软件代码，提高控制器的运算速度和数据处理能力。此外，还可以采用分布式控制架构，将控制任务分配到多个控制器上进行并行处理，提高系统的实时性和可靠性。

3.2.3 驱动系统性能优化

驱动系统的性能对机械臂的运动性能有重要影响。为了优化驱动系统的性能，可以采用高性能的电机和驱动器，并对驱动系统进行参数优化。例如，选择具有高功率密度和高转矩惯量比的电机，优化驱动器的控制参数，如电流环、速度环和位置环的增益等，提高驱动系统的响应速度和控制精度。同时，还可以采用先进的电机控制技术，如矢量控制技术和直接转矩控制技术，进一步提高电机的控制性能。

3.3 系统集成优化

3.3.1 机械臂动力学参数辨识与补偿

机械臂的动力学模型是设计控制系统的重要依据，但由于机械臂的结构复杂，其动力学参数往往难以精确获取。通过对机械臂的动力学参数进行辨识，可以得到更准确的动力学模型，从而为控制系统的设计和优化提供更可靠的依据。常用的动力学参数辨识方法有最小二乘法、递归最小二乘法和神经网络法等。在得到机械臂的动力学参数后，可以通过前馈补偿等方式对机械臂的动力学特性进行补偿，提高系统的控制性能。

3.3.2 系统协同优化

在一些多机械臂协同工作的场景中，需要对多个机械臂的控制系统进行协同优化，以实现整个系统的最优性能。系统协同优化可以从任务分配、轨迹规划和运动协调等方面入手。例如，采用分布式任务分配算法，根据各个机械臂的性能和任务需求，合理分配任务，提高系统的整体效率；采用协同轨迹规划算法，使多个机械臂在运动过程中避免碰撞，同时实现最优的运动轨迹；采用运动协调控制算法，使多个机械臂的运动保持同步，提高系统的协同工作能力。

3.3.3 系统可靠性优化

机械臂在实际应用中需要长时间稳定运行，因此系统的可靠性至关重要。为了提高机械臂控制系统的可靠性，可以采用冗余设计、故障诊断和容错控制等技术。冗余设计是指在系统中增加备份设备或模块，当某个设备或模块发生故障时，备份设备或模块能够及时接替工作，保证系统的正常运行。故障诊断技术用于实时监测系统的运行状态，及时发现故障并进行定位和诊断。容错控制技术则是在系统发生故障时，通过调整控制策略，使系统仍然能够保持一定的性能指标，完成基本的任务。

4 实验验证与结果分析

为了验证优化后的机械臂控制系统的性能，搭建了实验平台。实验平台由机械臂本体、传感器、控制器、驱动器和上位机等组成。在实验中，对优化前后的机械臂控制系统进行了对比测试，测试内容包括轨迹跟踪精度、定位精度和负载能力等。

4.1 轨迹跟踪实验

设定机械臂的期望运动轨迹为一条复杂的空间曲线，分别采用优化前的传统 PID 控制算法和优化后的自适应控制算法进行轨迹跟踪实验。通过传感器实时采集机械臂末端执行器的实际位置信息，与期望轨迹进行对比，计算轨迹跟踪误差。实验结果表明，采用优化后的

自适应控制算法，机械臂的轨迹跟踪误差明显减小，在整个运动过程中，平均轨迹跟踪误差从优化前的 $\pm 3\text{mm}$ 降低到了 $\pm 1\text{mm}$ 以内，提高了机械臂的轨迹跟踪精度。

4.2 定位精度实验

在定位精度实验中，让机械臂在不同的位置点进行定位操作，分别测量优化前后机械臂的定位误差。实验结果显示，优化后的机械臂控制系统定位精度有显著提升，定位误差从优化前的 $\pm 5\text{mm}$ 降低到了 $\pm 2\text{mm}$ 以内，能够满足更高精度的定位需求。

4.3 负载能力实验

在负载能力实验中，逐渐增加机械臂末端的负载重量，观察机械臂在不同负载情况下的运行状态。实验结果表明，经过优化后的机械臂控制系统，在相同的驱动条件下，能够承受更大的负载，负载能力提高了约20%，有效地拓展了机械臂的应用范围。

通过对实验结果的分析可以看出，经过对机械臂控制系统在控制算法、硬件性能和系统集成等方面的优化，机械臂的各项性能指标得到了显著提升，验证了优化方案的有效性和可行性。

5 结束语

本文对机械臂控制系统的设计与优化进行了深入研究。通过合理的机械臂结构设计、硬件系统设计和软件系统设计，构建了一个完整的机械臂控制系统。在此基础上，从先进控制算法、硬件性能和系统集成等多个方面对机械臂控制系统进行了优化，采用了自适应控制算法、滑模变结构控制算法、智能控制算法等先进控制算法，提升了传感器精度、控制器性能和驱动系统性能，进行了机械臂动力学参数辨识与补偿、系统协同优化和系统可靠性优化等。实验结果表明，优化后的机械臂控制系统在轨迹跟踪精度、定位精度和负载能力等方面都有显著提升，能够更好地满足工业生产、医疗等领域对机械臂高性能的要求。未来，随着科技的不断发展，机械臂控制系统的设计与优化将朝着智能化、网络化和高精度化的方向继续发展，为机械臂在更多领域的广泛应用提供更强大的技术支持。

参考文献

- [1]张涛.机械臂系统原理与设计[M].北京:机械工业出版社,2020:150-180.
- [2]李洪亮.基于智能算法的机械臂控制系统优化研究[J].自动化技术与应用,2022,41(5):55-60.
- [3]王朝阳.机械臂控制系统的创新设计[C]//全国机械工程学术会议论文集.上海,2021:200-205.