

锚杆台车自动锚固控制系统的开发与实验验证

顾松林

安百拓（南京）建筑矿山设备有限公司，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090001

摘 要： 随着矿山和隧道工程的快速发展，锚杆支护作为一种有效的加固手段，在保障工程安全方面发挥着重要作用。然而，传统锚杆支护作业依赖人工操作，存在锚固位置不准确、作业效率低、劳动强度大等问题。为解决这些问题，本文提出了一种锚杆台车自动锚固控制系统，旨在实现锚杆支护作业的自动化和智能化。该系统集成了先进的自动控制技术、传感器技术和数据融合技术，能够自动计算锚固参数、控制机械臂运动，并实时监测作业状态。通过实验验证，该系统表现出良好的控制性能和作业效率，具有广泛的应用前景。

关 键 词： 锚杆台车；自动锚固；控制系统；实验验证

Development and Experimental Verification of the Automatic Anchoring Control System for Anchor Trolley

Gu Songlin

Epiroc (Nanjing) Construction & Mining Equipment Co. Ltd. Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： With the rapid development of mining and tunnel engineering, anchor bolt support, as an effective reinforcement method, plays a significant role in ensuring engineering safety. However, traditional anchor bolt support operations rely on manual operations, which have problems such as inaccurate anchoring positions, low operation efficiency, and high labor intensity. To address these issues, this paper proposes an automatic anchoring control system for anchor bolt trolleys, aiming to achieve the automation and intelligence of anchor bolt support operations. This system integrates advanced automatic control technology, sensor technology and data fusion technology, capable of automatically calculating anchoring parameters, controlling the movement of the robotic arm, and monitoring the operation status in real time. Through experimental verification, this system demonstrates excellent control performance and operational efficiency, and has broad application prospects.

Keywords： anchor bolt trolley; automatic anchoring; control system; experimental verification

一、技术开发

（一）系统设计原则

在锚杆台车自动锚固控制系统的开发过程中，我们遵循了一系列核心设计原则以确保系统的可靠性、高效性和易用性。首先，系统采用了模块化设计理念，使得各个功能模块既能够独立运行，又能相互协同工作，便于后期的维护与升级。其次，安全性被置于首位，通过多重安全保护机制，确保在复杂工况下操作人员和设备的安全。此外，系统还注重了实时性与稳定性，确保在各种工况下都能快速响应并稳定运行。最后，考虑到用户友好性，系统设计时注重了人机交互的便捷性，使得操作人员能够轻松上手并高效完成锚固作业^[1]。

（二）自动控制模块分析

1. 锚固参数智能计算

在锚杆台车自动锚固控制系统的技术开发中，锚固参数智能计算是核心组成部分，它直接影响着整个系统的精确性和自动化水平。这一功能基于地质力学模型和大数据分析，能够根据作业现场的地质条件，如岩石的强度、层理走向、地下水位等参数，

实时计算出最佳的锚固深度、锚索张力和锚固力矩等关键数据。

通过先进的算法，系统能够综合考虑多种地质因素，确保计算结果的准确性和可靠性。这种智能化的计算方式，不仅提高了作业效率，还大大减少了因人为判断失误而导致的安全风险。此外，锚固参数智能计算模块还具备自我学习和优化的能力，能够根据实际作业过程中的数据反馈，不断调整和完善计算模型，以适应更复杂多变的地质环境。这一创新技术的应用，标志着锚杆台车自动锚固控制系统在智能化和自动化方面迈出了重要的一步^[2]。

2. 机械臂运动控制

在锚杆台车自动锚固控制系统中，机械臂运动控制是核心技术之一，它决定了锚固作业的精确度和效率。机械臂需能精确模拟预设的运动轨迹，以确保锚杆能准确无误地植入到预定位置。这涉及到高精度的伺服驱动、动态路径规划以及实时的反馈控制。同时，结合机器视觉技术，机械臂能实时调整运动路径，以适应地下环境的微小变化^[3]。

此外，动态路径规划算法的应用，使得机械臂能够在复杂多变的地下环境中，快速且准确地规划出最优的运动路径。这一算法不仅考虑了地质条件、锚杆位置等静态因素，还融入了机械臂

自身的运动学特性和动力学约束，确保了运动轨迹的可行性和高效性。实时的反馈控制系统，则通过集成多种传感器，如位置传感器、力传感器等，实时监测机械臂的运动状态和受力情况，一旦发现偏差或异常情况，立即进行调整和纠正，从而保证了锚固作业的稳定性和安全性。

（三）传感器与数据融合

在锚杆台车自动锚固控制系统中，传感器与数据融合是关键技术之一，它确保了系统对复杂工况的精确感知和智能决策。通过高精度的传感器，如压力传感器、位移传感器和环境监测传感器，系统能够实时监测锚固过程中的关键参数，如钻进力、锚杆位置和周围环境的稳定性^[4]。

数据融合技术则整合了来自不同传感器的多源信息，通过先进的数据处理算法，消除噪声并提高信息的准确性。例如，当传感器数据表明钻进力异常增大时，系统能够快速判断可能是遇到了地下异常结构，从而调整锚固策略以确保锚固效果。

此外，数据融合技术还能实现多传感器间的互补和校验，进一步提升系统的可靠性和鲁棒性。例如，位移传感器和压力传感器的数据可以相互验证，确保锚杆位置的准确性和钻进力的合理性。这种综合感知能力，使得锚杆台车自动锚固控制系统能够在复杂多变的地下环境中，做出更为精准和智能的决策，从而大大提高了锚固作业的质量和效率。

二、系统实现

（一）硬件平台构建

1. 锚杆台车改装

在锚杆台车自动锚固控制系统的技术开发过程中，硬件平台构建中的锚杆台车改装是至关重要的一步。改装工作旨在将传统的锚杆台车升级为具备自动化控制能力的新型设备。这涉及到对原有机械结构的改造，以适应新的传感器和控制系统的安装，同时保持设备在复杂地质条件下的稳定性和可靠性^[5]。

改装过程包括对台车的动力系统、传动系统以及工作装置进行全面升级。动力系统方面，引入了更高效的发动机和传动装置，以提高台车的整体性能和作业效率。传动系统的优化确保了动力传递的平稳性和精确性，这对于实现锚杆的精准定位至关重要。

工作装置的改装则更加复杂，需要精确调整机械臂的结构和动作逻辑，以便与新的控制系统无缝对接。这一过程中，特别注重了机械臂的灵活性和稳定性，确保在复杂多变的地下环境中，能够准确执行各种锚固动作。同时，对台车的整体结构进行了加固处理，以提高其承载能力和抗冲击能力，确保在长时间高强度作业下的可靠性。

2. 控制系统集成

在控制系统集成部分，我们着重解决了锚杆台车自动锚固过程中的核心挑战。通过深度融合机械、电子和软件工程，我们构建了一个高效、精确的自动化系统。控制系统集成了高精度的传感器，如力矩传感器和位置传感器，以实时监测锚固过程中的各项参数，确保每个步骤都在预设的精确参数范围内进行。例如，我们引用了

PID 控制理论，设计了控制算法，以调整机械臂的动作，使其能够根据地质条件变化进行动态调整，确保锚固的稳定性。

在软件系统开发中，我们创建了一个直观的用户界面，操作人员可以通过触摸屏轻松设定作业参数和工作模式。此外，系统还集成了故障诊断和自我修复功能，能够在检测到异常时自动调整或向远程操作中心发送警报。为了提升人机交互体验，我们采用了直观的图形化编程，使得非专业技术人员也能快速理解和操作控制系统^[6]。

（二）软件系统开发

1. 人机交互界面

一个直观且用户友好的人机交互界面是确保操作人员能够高效、准确地使用锚杆台车自动锚固控制系统的关键。设计团队需要考虑到不同技术水平的操作员，界面应简洁明了，同时提供丰富的操作提示和错误反馈。例如，可以采用色彩编码来区分不同状态的设备，或者利用图标和动画来直观展示机械臂的实时动作。此外，界面应支持自定义设置，允许用户根据个人习惯调整显示参数和工作流程，以提高工作效率。

为了进一步提升用户体验，我们还集成了语音控制功能，使得操作人员可以通过语音指令来控制系统，这在嘈杂或需要双手操作的工作环境中尤为重要。同时，系统提供了详尽的操作日志和数据分析功能，帮助操作人员了解设备的使用情况和性能表现，从而进行针对性的维护和优化。总的来说，这个人机交互界面旨在提供全面、灵活且易于操作的控制体验，以满足各种复杂工况下的需求^[7]。

2. 控制算法实现

在锚杆台车自动锚固控制系统中，控制算法的实现至关重要。我们采用了先进的控制策略，结合锚杆台车的实际工作场景，开发了高效且稳定的控制算法。该算法能够实时接收来自传感器的数据，如机械臂的位置、速度以及锚杆的拉力等，然后根据预设的控制逻辑和参数，计算出最优的控制指令，以驱动机械臂完成精确的锚固操作。

为了实现更精细的控制，我们还引入了自适应控制算法，能够根据工作环境的变化自动调整控制参数，从而保持系统的稳定性和准确性。此外，为了避免因设备故障或操作失误导致的安全事故，我们还设计了多重安全保护机制，如超限报警、紧急停机 etc，确保系统在任何情况下都能安全运行^[8]。

在控制算法的实现过程中，我们充分利用了现代计算技术的优势，采用了高性能的处理器和优化的算法结构，以提高系统的实时性和响应速度。同时，我们还对算法进行了严格的测试和验证，确保其在实际应用中能够表现出优异的性能。

三、实验验证

（一）试验场建设与测试环境

1. 模拟工况设定

在实验验证阶段，模拟工况设定是评估锚杆台车自动锚固控制系统性能的关键环节。为了模拟实际地下工程的复杂环境，我们设计了多种工况，包括不同地质结构和空间限制条件。例如，我们模

拟了软岩、硬岩以及破碎带等不同地质条件下的锚固操作，以检验系统在不同地质结构下的适应性和稳定性。同时，我们还考虑了地下空间狭小、光线不足等特殊环境，设计了相应的模拟工况，以评估系统在受限空间内的操作灵活性和准确性。通过这些模拟工况的设定，我们能够全面而准确地评估锚杆台车自动锚固控制系统的性能，为后续的优化和改进提供有力的数据支持^[9]。

2. 安全防护措施

在锚杆台车自动锚固控制系统的研究与开发过程中，安全防护措施是至关重要的一个环节。系统设计必须遵循“安全第一，预防为主”的原则，确保在实际操作中能有效避免意外伤害和设备损坏。为了实现这一目标，我们采取了多重安全防护措施。首先，在系统硬件层面，我们为锚杆台车配备了紧急停止按钮和过载保护装置，一旦系统出现异常或操作人员需要紧急停机，可以立即触发这些装置，以保护设备和人员的安全。其次，在软件层面，我们设计了故障预警和诊断系统，通过实时监测系统的运行状态，及时发现并预警潜在的故障，为操作人员提供足够的时间采取应对措施。此外，我们还对操作人员进行了严格的安全培训，确保他们熟悉系统的安全操作规程，能够在紧急情况下正确应对，减少事故的发生概率。

（二）控制性能评估

1. 锚固精度分析

在锚杆台车自动锚固控制系统的开发中，锚固精度分析是评估技术创新效果的关键环节。通过精确计算和控制锚固参数，系统能够确保锚杆准确无误地置入预设位置，从而提高支护效果和施工质量。为了全面评估锚固精度，我们采用了多种测试方法。首先，在实验室内模拟了多种工况条件，对不同地质结构和锚固需求进行了系统测试。通过对比理论计算值和实际锚固位置，我们分析了系统的误差来源，并进行了针对性的优化。其次，在现场应用中，我们利用高精度测量设备对锚杆位置进行了实时监测，进一步验证了系统的锚固精度。测试结果表明，锚杆台车自动锚固控制系统在多种工况下均表现出较高的锚固精度，能够满足工程实际需求，为支护工程提供了可靠的技术保障。

2. 操作效率对比

在锚杆台车自动锚固控制系统的实践探索中，操作效率对比

是评估技术创新效果的关键指标。传统的手动锚固作业依赖于工人经验，效率低下且易受人为因素影响。通过引入自动化控制，我们旨在提升锚杆置入的速度和准确性。为了量化操作效率的提升，我们设计了对比试验。一方面，我们记录了手动锚固作业下完成特定任务所需的时间，并分析了影响作业效率的关键因素。另一方面，在相同工况下，我们使用锚杆台车自动锚固控制系统进行了作业效率测试。通过对比两组数据，我们发现自动化控制系统显著缩短了锚杆置入的时间，同时减少了人为操作失误，提高了整体支护作业的效率。这一结果表明，锚杆台车自动锚固控制系统在提升操作效率方面具有显著优势^[10]。

（三）现场应用试验

在现场应用试验阶段，锚杆台车自动锚固控制系统经历了严格的实地验证，以确保其在复杂工况下的可靠性和效率。试验团队在多个具有代表性的矿山和隧道施工现场进行了试验，涵盖了多种地质条件，如岩石硬度变化、断层破碎带等。通过长时间的连续作业测试，系统展现出了出色的稳定性和适应性。在各种复杂地质条件下，锚杆台车自动锚固控制系统均能够准确快速地完成锚固作业，未出现明显的故障或性能下降。此外，试验团队还收集了大量的运行数据，用于进一步优化系统性能和提升用户体验。这些数据包括锚固深度、锚杆倾斜角度、作业时间等关键指标，为后续的系统改进提供了依据。现场应用试验的成功，不仅验证了锚杆台车自动锚固控制系统的可靠性和效率，也为该技术的广泛应用奠定了坚实基础。

四、结束语

锚杆台车自动锚固控制系统的成功开发与实验验证，标志着我国在隧道和矿山施工自动化领域取得了重要进展。该系统不仅提高了锚固作业的精度和效率，还显著降低了施工人员的劳动强度和安全风险。通过严格的实验验证，我们证明了该系统在各种复杂工况下的可靠性和稳定性。未来，我们将继续深化对该系统的研究，不断优化其性能，以满足更多样化的施工需求。同时，我们也期待该技术能够为隧道和矿山施工行业带来更多的创新和变革，推动整个行业的持续发展。

参考文献

- [1] 李红红. 机械自动化在矿山机械制造中的应用策略探讨 [J]. 中国金属通报, 2021, (01): 69-70.
- [2] 徐勤亮. 自动锚杆钻车三角钻臂轨迹规划方法研究 [D]. 煤炭科学研究总院, 2020.D01: 10.27222/d.cnki.gmkzy.2020.000030.
- [3] 李力恒. 智能化锚杆钻车自动寻孔定位控制系统的开发 [D]. 太原理工大学, 2023.D01: 10.27352/d.cnki.gylgu.2023.001057.
- [4] 刘华英. 智能化矿用锚杆钻车自动钻进与锚固控制系统的开发 [D]. 太原理工大学, 2023.
- [5] 范要辉. 锚杆台车自动化控制研究与展望 [J]. 煤矿机械, 2021, 42(11): 70-72.
- [6] 孙骥. 隧道锚杆台车工作臂轨迹规划及优化研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2023.
- [7] 王平. 英格索尔兰德研制的锚杆台车 [J]. 有色金属（矿山部分）, 1986, (02): 60+54.
- [8] 卢二伟, 蒋先尧, 李鑫, 等. 智能锚杆支护台车在谦比希铜矿的应用 [J]. 中国有色金属, 2023, (S1): 288-290.
- [9] 韩冰, 文皓亮, 汪小平, 等. 锚杆台车在复杂破碎矿岩体支护中的应用技术研究 [J]. 世界有色金属, 2023, (04): 44-46.
- [10] 姚晓坡, 付大裕, 杜孟超. 基于高原锚杆台车的动力匹配分析计算 [J]. 建筑机械, 2022, (01): 97-101.