

综采工作面液压支架自适应调高控制策略与试验研究

刘欣文

神东煤炭集团补连塔煤矿综采一队 内蒙古 鄂尔多斯 017200

【摘要】：综采工作面液压支架在复杂地质条件下运行时，常因顶板压力和煤层厚度变化导致支架高度调节不及时，从而影响生产安全与作业效率。自适应调高控制策略通过实时监测工作面压力和位移信号，结合智能控制算法，实现对支架高度的自动调节，有效提升支护稳定性与工作效率。基于试验研究表明，该策略能够显著减少支架失稳与顶板冒落风险，同时改善液压系统能耗水平。研究结果验证了自适应调高控制的可行性与应用价值，为后续综采自动化和智能化提供了技术支撑。

【关键词】：液压支架；自适应调高；综采工作面；控制策略；试验研究

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.029

引言

煤炭资源开采过程中，综采工作面液压支架承担着顶板支护和工作空间安全的重要任务。随着煤层赋存条件复杂化，传统人工调节和固定控制模式逐渐暴露出反应迟缓、适应性不足的问题，易造成支护失稳和安全隐患。为提升矿井生产效率和作业安全，自适应调高控制成为研究的重点方向。该策略能够在煤层厚度波动和顶板压力变化的情况下，依托实时数据采集和智能算法分析，快速调整支架高度，确保支护状态与实际工况相匹配。试验研究显示，自适应控制不仅能降低人工操作强度，还能优化液压系统运行效率，减少设备磨损。推动自适应调高控制策略的应用，既符合煤矿机械化、智能化的发展趋势，也为矿山安全生产提供了切实可行的保障路径。

1 综采工作面液压支架运行中调高控制问题分析

（1）顶板压力变化对液压支架稳定性的影响

综采工作面地质环境复杂多变，尤其在煤层推进过程中，顶板压力常伴随时空演化不断波动。当采空区逐渐扩大，顶板暴露面积增大，岩层自重以及周期来压等因素引发顶板压力突然增高，造成液压支架受力剧烈变化。如果支架调高系统响应滞后，极易发生支架抱死、偏载甚至失稳现象。长期处于异常受压状态还可能导致柱缸密封损坏和液压系统疲劳损耗，影响设备寿命。在顶板软弱或破碎带区域，支架不能根据压力变化及时调节高度，还可能形成漏顶、冒顶等重大安全隐患。需高度关注顶板载荷变化对支架稳定性产生的影响，从源头控制载荷不均问题，才能保障综采作业的连续性与可靠性。

（2）煤层厚度波动带来的高度调节难点

不同煤矿赋存条件存在显著差异，煤层厚度在综采推进方向上常出现不规则变化，表现为厚薄不均、局部夹矸、层间泥岩软化等现象。传统固定节奏的支架调高策略难以根据煤层起伏及时响应，常造成支架顶部空隙过大或底部受压不均，进而削弱对顶板的有效支护。尤其在向斜构造、褶皱带及断层密集区，煤层厚度变化更为频繁且难以预判，这就要求支架具备更高的自适应能力进行动态调节。人工操作存在反应滞后、人为

判断误差等问题，无法实现连续高效调高，导致支架频繁出现支护不平衡状态，严重时会影响综采机行进和设备安全。有必要构建精准感知煤层厚度变化并快速调节支架高度的控制系统。

（3）人工与固定控制方式的局限性解析

液压支架传统的调高操作主要依赖人工经验进行判断与干预，或使用基于固定程序设定的控制模式进行周期性调节。然而这两种方式均存在适应性不足的问题。在煤层厚度变化剧烈、地应力分布复杂的条件下，人工调节效率低、误差大，无法满足快速精细控制的要求。固定控制策略在高度调节频率与调整幅度上缺乏灵活性，不能根据实时工况变化进行动态优化。人工操作还存在工作强度高、劳动风险大、信息反馈滞后等劣势，容易因操作不及时或不当导致支架异常动作，增加设备故障和安全事故发生概率。由此可见，单一依靠人工或固定逻辑控制已无法胜任当前综采工作面的高频次、高强度支护需求，必须引入具备实时感知与动态响应能力的智能控制手段。

2 自适应调高控制策略设计原理与实现路径

（1）压力与位移传感器监测信号的获取与处理

自适应调高控制的实现依赖于高精度传感器网络对现场数据的实时采集与反馈。液压支架关键部位布置的压力传感器可实时获取顶板载荷变化、液压油压强波动等参数；位移传感器则监测立柱伸缩长度与支架高低变化过程。这些信号经过初步过滤与降噪处理后，将被输入控制核心进行状态识别与趋势判断。数据融合技术的引入可显著提升传感信号的鲁棒性与稳定性，消除单一传感通道可能引起的误差放大效应。采用边缘计算架构可在采集端进行初步分析与响应决策，缩短信息传递路径，提高控制响应速度。监测系统不仅提供当前工况判断依据，还可用于趋势分析与风险预测，为控制系统提供完整的数据支持链条。

（2）智能控制算法在高度调节中的应用机理

支架调高控制策略的核心在于智能算法对采集数据的动态解析与精细调节命令生成。目前广泛采用的控制算法包括模

糊控制、PID 调节、神经网络预测等模型。其中，模糊控制可在变量不确定或边界模糊情况下完成规则判断，实现柔性响应；PID 算法则以其结构简单、调节稳定性好等优点，在实际控制中发挥基础性作用。为提升控制精度，可引入改进型模糊-PID 复合算法，对压力-位移耦合特性进行精准建模，在瞬时冲击载荷和非线性变形条件下，依然保持调高动作的准确性与稳定性。算法模块需具备在线自学习能力，根据工况历史数据动态修正控制参数，实现适应性增强与运行优化。

（3）液压执行单元对控制指令的快速响应机制

液压支架调高的最终执行环节在于液压系统的驱动与反馈能力。控制系统发出的调高指令需由液压阀组及时响应，通过精密比例阀控制油路开启程度，实现立柱升降动作的连续、可控调节。为确保响应速度与调节稳定性，液压单元应采用高响应伺服元件，结合蓄能器系统调节油压波动，降低冲击负载对结构的影响。反馈回路设计至关重要，需实时监测调高结果并形成闭环控制逻辑，实现调高效果的即时校正与误差补偿。通过提高液压系统动态特性与执行精度，可显著提升整体控制策略的可靠性，使液压支架调高过程实现毫秒级响应与毫米级控制精度，满足复杂工作面实时动态支护需求。

3 液压支架自适应调高控制试验平台搭建过程

（1）试验系统硬件组成与关键装置功能设计

试验平台建设需模拟综采工作面实际工况，整体系统包括控制主机、液压动力单元、模拟支架装置、传感器阵列和监控显示终端等多个模块。平台控制主机配置工业级嵌入式处理器，集成算法控制核心与数据分析模块，可完成多通道信号采集、处理与反馈。液压单元包含高压油泵、电磁比例阀与蓄能器，负责模拟支架升降操作。模拟支架按照实际结构比例缩放设计，保留立柱、横梁、底座等关键结构，并设置可调节载荷系统模拟顶板压力变化。平台还配置图形化操作界面，实现参数设置、动态显示与实验数据导出等功能，为控制策略的验证与优化提供稳定、高仿真的物理试验环境。

（2）控制策略在试验平台上的运行验证步骤

自适应控制策略验证流程包括初始参数设定、实验条件布置、动态调节测试和数据采集分析四个环节。根据平台实际尺寸与载荷范围设定传感器标定值与控制目标参数。随后，通过加载装置对模拟顶板施加周期性变化压力，模拟综采面顶板波动情况。控制系统实时采集压力与位移数据，并依据算法发出调高指令，液压系统据此执行立柱动作。调高过程中监测支架响应时间、升降速度及高度控制精度，并记录传感器反馈数据与执行结果。最终将不同工况下的数据进行对比分析，评估控制策略在复杂应力状态下的适应性与稳定性，为实际应用提供技术依据与改进方向。

（3）实验数据采集与结果可靠性保障措施

为确保实验数据的科学性与可重复性，需构建稳定的采集系统与严谨的数据管理流程。各类传感器需定期标定，确保信号输出的准确性与一致性；采集系统采用高采样率数据卡与抗干扰屏蔽线缆，防止外界噪声影响数据质量。实验过程中引入多通道同步记录技术，将压力、位移、流量、温度等关键参数统一归档，便于后续分析。建立数据异常检测机制，对信号突变、丢失等情况进行自动识别与剔除，提升数据可靠性。通过多轮对比试验与误差分析验证实验结果的稳定性，确保所获得控制性能指标真实反映系统运行状况，为策略应用效果评估提供坚实数据基础。

4 自适应调高控制试验结果与运行性能分析

（1）支架稳定性提升效果的定量评价指标

试验结果表明，在多种模拟工况下，自适应调高控制能够及时响应顶板载荷变化，支架在运行过程中始终保持良好的平衡状态。高度自动调节动作平稳连贯，未出现明显的迟滞或过调现象。系统在瞬时负载冲击下具备一定缓冲能力，可有效避免结构冲击和支护失稳。不同位置支架之间的调节协调性较好，整体支护面趋于一致，表明系统具备较强的同步控制能力。在复杂应力环境中，支架调高控制的精度和响应效率保持稳定，具有较强的适应性和控制效果，能够满足综采工作面高动态支护的需求。

（2）能耗优化与液压系统效率改进情况

液压系统在自适应控制策略作用下，能根据工作状态智能分配流量与压力，避免不必要的高负载运行，减少液压能量的浪费。在调高过程中，控制系统能够合理调节节流阀与比例阀的开度，提升油液利用率，降低系统冗余功耗。支架动作频率与力度实现精准匹配，有效防止频繁启停造成的能耗波动。液压泵组运行稳定，热量产生相对较少，有助于延长液压元件寿命。整体而言，该策略不仅提升了支架系统的运行效率，也为井下电力系统减轻了压力，具有明显的节能潜力。

（3）顶板冒落风险降低与安全性能提升表现

系统通过实时监测与调节支架高度，能够在顶板压力突变前完成预警性支护，有效降低冒落风险。尤其在顶板较软区域，自适应调高实现了更紧密的支护贴合，避免形成空顶区域或局部应力集中。支架运行状态与顶板接触状态维持良好，减少了因支护不及时引发的安全隐患。支护过程中的动态稳定性增强，使得作业空间具备更高的可预测性与安全性。控制策略不仅提升了设备的运行可靠性，也强化了整个综采系统的风险控制能力，为井下安全生产提供了更强的技术保障。

5 自适应调高控制策略在矿井实际应用前景

（1）在复杂地质条件下的推广适应性评估

综采工作面常处于构造带、断裂发育区或煤岩交替频繁地段，自适应调高控制系统可根据不同区域的地质响应动态调整

支架状态,展现出良好的工况适应能力。系统具备学习与调节双重功能,能逐步形成与特定煤层结构相匹配的调高逻辑。在顶板条件极差或软岩压力频繁波动的区域,该控制策略也能维持较强的稳定性与支护连续性。其模块化设计与多参数兼容性,使得在不同矿区实现快速部署成为可能。对比传统控制手段,其自动化程度高、控制精度强,更适合推广至技术要求较高的矿井。

(2) 与综采自动化和智能化系统的融合潜力

智慧矿山技术不断深入应用,推动综采设备逐步实现高度自动化与信息化,自适应调高控制系统在此背景下具备关键技术支撑作用。通过构建高效的通讯架构与模块化控制单元,该系统可与智能采煤设备形成联动机制,提升作业协调性与系统响应速度。平台具备实时数据交互和状态感知能力,可实现对采煤机运行参数的自动跟踪与支架动态调节。借助多源数据融合技术,还可与地质构造识别系统协同运行,增强支架调高策略的前瞻性与精准性,为实现智能综采全过程控制提供强有力的支撑。

(3) 对矿山安全生产与经济效益提升的意义

参考文献:

- [1] 韩志伟,吕俊峰.液压支架智能控制系统优化设计及应用研究[J].煤炭技术,2023,42(7):145-149.
- [2] 周明辉,陈天泽.基于多传感融合的综采工作面支架控制策略研究[J].矿山机械,2022,50(4):78-82.
- [3] 杜思源,高俊岭.复杂顶板条件下液压支架自适应调高系统设计与试验[J].煤矿机械,2023,44(1):65-69.
- [4] 程立波,蔡子骞.煤矿智能化综采面液压支护系统控制技术探析[J].工矿自动化,2024,50(5):92-96.
- [5] 鲁安琪,孟钊.基于模糊控制的液压支架调高策略仿真与实验[J].中国煤炭,2022,48(10):113-118.

自适应调高控制系统的应用可在保障作业人员安全的显著提升设备运行效率与支护精度,减少由于支架失稳带来的安全事故与维修停机时间。稳定的支护状态有利于延长设备使用寿命,降低备件更换频率与维护成本。在煤炭价格波动背景下,提升单产单进水平与减少非计划停产成为提升经济效益的重要途径。该系统通过提升支架运行的可靠性和响应性,间接提高了采煤系统的综合作业效率与资源回收率。其推广应用具有显著的安全保障价值与经济效益促进作用。

6 结语

本文围绕综采工作面液压支架自适应调高控制策略展开系统研究,从控制问题识别、策略设计、试验验证到应用前景评估,形成了一套较为完善的技术路径。研究结果表明,自适应控制在提高支架运行稳定性、降低液压系统能耗以及提升顶板支护安全方面具有显著优势。该策略在复杂地质环境下表现出良好的适应性和可操作性,为推动综采工作面向智能化、精细化方向发展提供了重要的技术支撑与实践基础,具备广泛的推广价值。