

液压支架大功率供液系统的现状与智能化发展趋势

赵继云^{1,2}, 曹超^{1,2}, 王浩¹, 泮延召¹, 黄笛¹, 韩静^{1,2}, 苗运江¹

(1. 中国矿业大学机电工程学院 江苏徐州 221116; 2. 智能采矿装备技术全国重点实验室, 江苏徐州 221116)

摘 要: 煤矿井下采煤工作面供液系统为液压支架提供高压大流量液压动力, 其性能和可靠性是综采成套装备安全智能高效工作的关键。为进一步保障采煤工作面支护安全, 保证液压支架跟机速度, 总结供液系统发展现状、提炼智能供液关键技术需求和发展方向是实现大功率供液系统性能跃升的首要环节。以当前液压支架供液系统大功率化、智能化发展为背景, 系统地归纳分析了液压支架大功率供液系统的构型和工作原理, 论述并比较了多种泵控和阀控构型的稳压控制方法; 着眼于大功率供液系统压力和流量连续控制需求, 分析对比了相关研究中高压大流量高水基比例卸载阀和比例流量阀的先导驱动、结构原理、工作参数等方面的特点, 指出了高压大流量高水基连续控制阀研发的重点难点; 针对支撑按需供液精准控制的长管路动力传递环节建模和稳压控制方法, 论述了液压支架长管路非恒定流动力学建模方法的现实意义, 总结比较了面向液压支架周期复合动作的强时变供液系统稳压控制策略和方法; 围绕系统安全可靠保障需求, 综述了包含监测和诊断的供液系统智能运维技术研究现状。聚焦综采工作面可靠高效应用需求和高水基液压系统智能化技术前沿, 分析了限制供液系统控制性能突破的理论瓶颈, 全面地总结了目前大功率供液系统关键技术研发的不足; 论述了从元件和系统层面提升控制性能及其可靠性以支撑大功率液压支架供液系统智能化发展的必要性, 并提出了液压支架供液系统的未来技术发展方向。

关键词: 液压支架; 大功率; 高水基; 供液系统; 稳压控制

中图分类号: TD355 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0676-18

Current situation and intelligent development trend of high power liquid supply system of hydraulic support

ZHAO Jiyun^{1,2}, CAO Chao^{1,2}, WANG Hao¹, PAN Yanzhao¹, HUANG Di¹, HAN Jing^{1,2}, MIAO Yunjiang¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221116, China; 2. National Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Xuzhou, 221116, China)

Abstract: The liquid supply system of coal face in underground coal mine provides high pressure and large flow hydraulic power for hydraulic support, and its performance and reliability are the key to the safe, intelligent and efficient work of fully mechanized mining equipment. In order to further ensure the safety of coal face support and ensure the following speed of hydraulic support, summarizing the development status of liquid supply system and refining the key technology requirements and development direction of intelligent liquid supply system is the primary link to realize the performance improvement of high-power liquid supply system. Based on the background of high power and intelligent development of hydraulic support liquid supply system, the configuration and working principle of high power liquid supply system of hy-

收稿日期: 2024-11-03 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1341

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52104168); 国家自然科学基金资助项目 (U1910212)

作者简介: 赵继云 (1966—), 男, 江苏东海人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: jyzhao@cumt.edu.cn

通讯作者: 曹超 (1993—), 男, 江西景德镇人, 副教授, 博士。E-mail: caoch@cumt.edu.cn

引用格式: 赵继云, 曹超, 王浩, 等. 液压支架大功率供液系统的现状与智能化发展趋势[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 676-693.

ZHAO Jiyun, CAO Chao, WANG Hao, et al. Current situation and intelligent development trend of high power liquid supply system of hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 676-693.



移动阅读

draulic support are systematically summarized and analyzed, and the pressure stabilization control methods of various pump control and valve control configurations are discussed and compared. Focusing on the requirements of pressure and flow continuous control of high-power liquid supply system, the characteristics of pilot drive, structural principle and working parameters of high-pressure, large-flow and high-water-based proportional unloading valves and proportional flow valves in related studies are analyzed and compared, and the key and difficult points in high-pressure, large-flow and high-water-based continuous control valve are pointed out. Aiming at the modeling of power transfer link and pressure stabilization control method of long pipeline supporting accurate control of liquid supply on demand, the practical significance of unsteady flow mechanical modeling method of long pipeline of hydraulic support is discussed, and the pressure stabilization control strategy and method of strong time-varying liquid supply system oriented to periodic composite action of hydraulic support are summarized and compared. Focusing on the requirements of system security and reliability assurance, the research status of intelligent operation and maintenance technology of liquid supply system including monitoring and diagnosis is reviewed. Focusing on the reliable and efficient application requirements of fully mechanized mining face and the frontier of intelligent technology of high water-based hydraulic system, the theoretical bottleneck restricting the breakthrough of control performance of liquid supply system is analyzed, and the shortcomings of key technology research and development of high power liquid supply system are summarized comprehensively. The necessity of improving the control performance and reliability from the component and system level to support the intelligent development of the liquid supply system of high-power hydraulic support is discussed, and the future technical development direction of the liquid supply system of hydraulic support is put forward.

Key words: hydraulic support; high power; high water base; liquid supply system; pressure stabilization control

0 引言

液压支架是为采煤工作面人员和设备提供安全空间的支护装备,其高水基动力由高压大流量乳化液泵组通过长管路供应。综采工作面液压支架多架成组动作时,支架端压力降低、瞬时流量不足,往往导致工作面移架速度过慢或丢架^[1],影响采煤机正常运行,对自动跟机移架等自动化功能的实现也带来挑战^[2]。

近年来,随着煤矿开采技术快速发展,以超长、超高工作面为代表的千万吨工作面不断涌现^[3],意味着综采工作面供液系统的工作能力、控制精度、响应速度和可靠性等供液质量方面的要求进一步提高。为了实现工作面稳定高质量供液,保证采煤工作面连续高效运行,相关文献主要从高压大流量泵站、关键元部件、液压系统构型、供液系统控制等方面进行了相关研究^[4]。这些研究表明,液压支架供液系统面临着强时变用液工况,系统控制特性复杂。为此,结合高端流体控制元件,应用先进电液控制技术,利用智能化监控方法,实时匹配液压支架用液需求,是智能供液领域目前研究的热点与难点问题,但供液质量的决定因素复杂,相关研究着力于突破单一元件性能或单纯改善压力冲击,液压系统技术发展仍需要全面分析限制系统控制性能突破的瓶颈和关键技术研发的不足。为此,笔者从构型原理、电液控制元件、长管路特性、稳压控制方法、运维技术等方面对液压支架供液

系统研究现状进行了系统综述,并提出了未来技术发展方向,旨在为液压支架大功率供液系统智能化高效高可靠发展提供思路借鉴。

1 供液系统发展现状

供液系统的动力输出须保证液压支架快速执行降拉升推等动作,避免液压支架强时变用液量和负载条件下供液系统压力流量波动对液压支架初撑力及跟机速度的影响。2012年至2023年,综采工作面高度由7.0 m^[5]迅速攀升到10 m^[6],对供液系统所提供的压力流量要求越来越高,功率进一步增大,目前乳化液泵站供液总流量已达6 000 L/min以上,供液压力40 MPa^[7],泵站装机功率5 000 kW以上^[8],供液距离达6 300 m以上^[9]。例如红柳林煤矿7 m工作面供液系统采用3泵2箱配置,单泵流量1 250 L/min,压力37.5 MPa;神东上湾煤矿8.8 m工作面供液系统采用3泵配置,单泵流量1 350 L/min,压力37.5 MPa;曹家滩煤矿10 m工作面供液系统采用5泵2箱配置,单泵流量1 250 L/min,压力40 MPa,目前典型高压大流量乳化液泵参数见表1。

高产高效工作面液压支架供液系统具有供液压力高、供液流量大、供液距离长等特点。由于液压支架群需跟随采煤机快速移动,多执行机构分时异步动作切换快,加之目前大功率乳化液多泵的简单开关逻辑控制,致使液压支架供液系统面临强时变负载,压

表 1 国内外典型大流量乳化液泵
Table 1 Typical large flow rate emulsion pump of global manufacturers

企业名称	型号	电机功率/kW	额定流量/(L · min ⁻¹)	柱塞数量	工作压力/MPa
北京天玛智控科技股份有限公司	BRW2000/40	—	2 000	7	40.0
	BRW1250/40	1 000	1 250	5	40.0
无锡煤矿机械股份有限公司	BRW1600/40	1 250	1 600	5	40.0
	BRW1250/40	1 000	1 250	5	40.0
	BRW1000/40	800	1 000	5	40.0
	BRW800/40	630	800	5	40.0
浙江中煤机械科技有限公司	BRW1250/40B	1 000	1 250	7	40.0
	BRW1000/40B	800	1 000	7	40.0
Jereh	BRW1250/40	—	1 250	5	40.0
RMI	S500	375	542	5	40.0
	S375	280	430	3	37.5
KAMAT	K80070-5G	800	1 185	5	35.0
	K50000-5G	450	641	5	37.5
Hauhinco	EHP-5K 850S	855	1 148	5	42.0
	EHP-5K 400S	400	635	5	36.0

力冲击严重, 供应动力响应滞后, 使需液端与供液端流量不匹配, 难以及时保证液压支架的初撑力, 液压支架快速跟机作业受到影响, 严重影响了综采工作面设备的安全性、可靠性和生产效率。因此, 在矿山智能化建设要求下, 安全高效综采装备对供液系统压力和流量的连续精确控制要求越来越高, 如图 1 所示,

近几年相关研究工作也都围绕着供液系统构型原理、连续控制电液元件、长管路供液特性、稳压控制方法、智能运维技术等方面展开。

2 供液系统构型原理

高产高效工作面要求供液系统输出流量连续、压

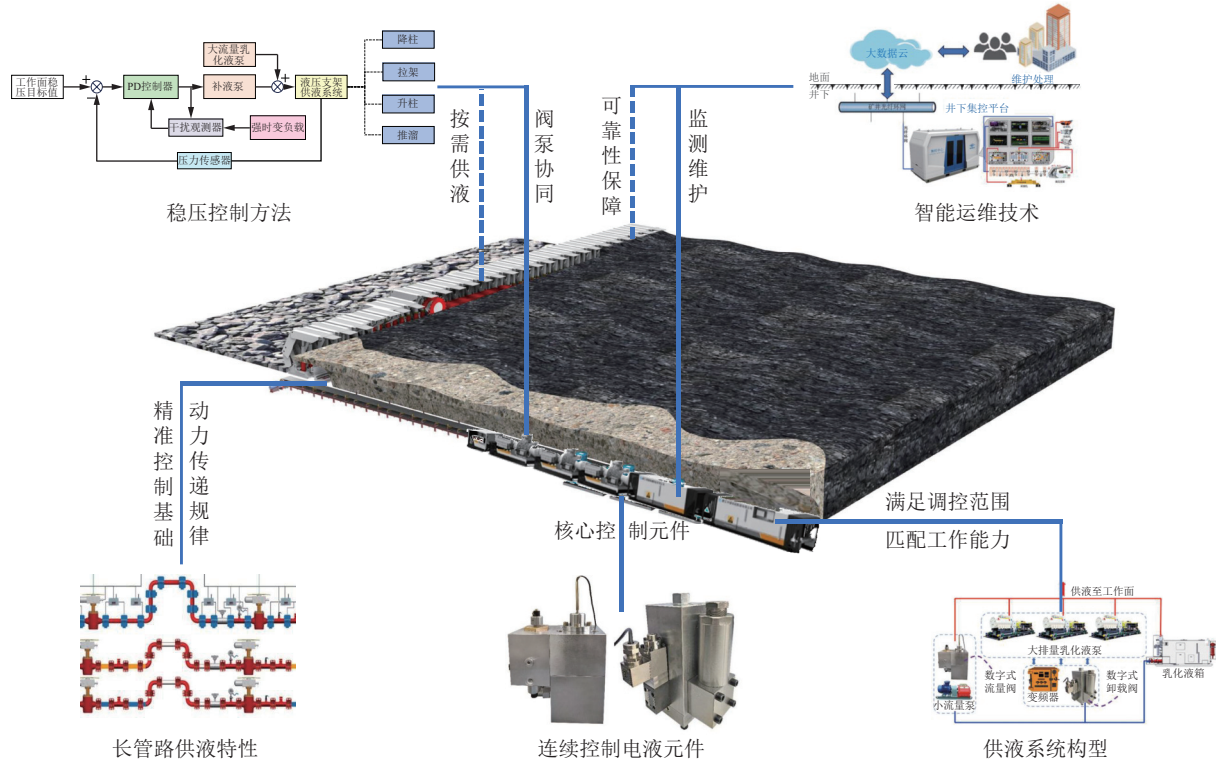


图 1 液压支架供液系统关键技术
Fig.1 Studies on key technology of hydraulic support liquid supply system

力稳定,以保证液压支架快速且稳定工作,如何实现供液系统压力流量和负载的匹配是当前综采智能供液技术的难题。通过设计供液系统构型,采取不同构型原理控制乳化液泵站的输出流量和压力是解决上述问题的主要着力点之一。目前工作面实际使用的液压支架供液系统构型主要有:卸载阀顺序卸载构型、变频泵控构型、超高压泵与多泵联动构型。

卸载阀顺序卸载多泵并联构型如图2a所示,由预先调定好压力的卸载阀顺序控制多台乳化液泵的供液和卸载,当压力小于下限时,电磁先导阀得电,加载下一台乳化液泵,增加供液流量;当压力大于上限时,电磁先导阀失电,卸载一台正在运行的乳化液泵,降低供液流量^[10],直至压力稳定。王国法等^[11]发明了多级电磁卸载装置,可以对不同流量和不同压力下的泵站压力脉动进行分级调节,通过智能控制策略与机械结构的配合,完成泵站系统的多级电磁卸载。

变频多泵并联构型如图2b所示,根据供液系统的出口压力改变供电频率,实现泵站软启动,并通过调节电机转速调控乳化液泵输出流量,进而控制系统压力^[12]。

超高压泵与多泵联动构型^[13]如图2c所示,这种构型适合长距离供液、液压支架初撑力不能得到有效保障的工况,但采用超高压泵站供液需要额外铺设一条超高压管路系统。刘永亮等^[14]利用BRW200/45型超高压乳化液泵站满足大采高液压支架的高初撑力、

高工作阻力,以及快速移架和安全支护的需求;国能神东集团使用额定流量250 L/min的超高压乳化液增压泵,有效缓解工作面瞬时大量用液响应慢的问题,满足了液压支架快速注液的工作要求^[15];王国法等^[11]利用高压小流量泵向供液系统快速向全工作面提供35~45 MPa、20~200 L/min高压乳化液,对乳化液长管路输送后的压力损失进行补偿,为支架初撑力提供可靠保证。

分析上述供液系统的构型发现,卸载阀顺序卸载多泵并联构型是对乳化液泵站输出流量的有级控制,无法实现乳化液泵站的流量连续输出,导致供液系统在卸载阀调定的压力范围内频繁剧烈波动,系统冲击大、效率低;变频多泵并联构型虽然能够做到连续控制,降低了卸载阀的频繁动作,但大功率泵电机变频加减速时间较长、响应慢、调节精度低且调节范围有限。超高压泵与多泵联动构型对于长管路供液的大采高液压支架初撑力提供了保障,但仍然无法避免上述变频多泵并联构型存在的问题,而变频电机能够稳定工作的频率范围有限,因此二者均无法对泵的流量进行全范围连续控制。

综采工作面液压支架执行机构运行工况复杂多变,属于多执行机构强时变负载和非稳定流量需求工况,现有液压支架供液构型难以满足支架实时且连续供液需求。继承以往液压支架与供液系统之间的“大马拉小车”式动力配置形式,目前大采高液压支架供

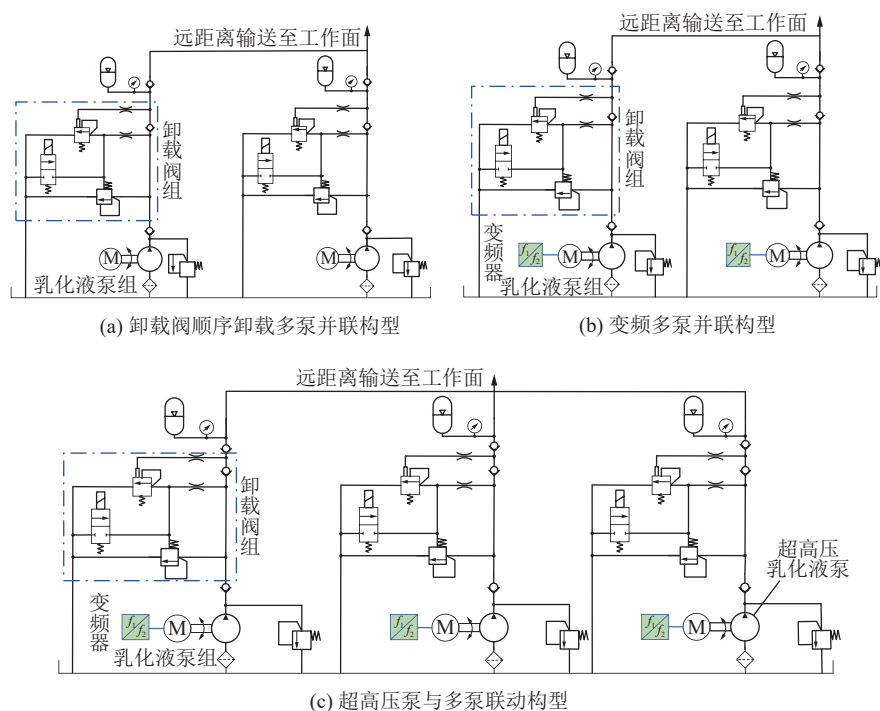


图2 液压支架供液系统构型

Fig.2 Hydraulic support liquid supply system configurations

液系统构型仍是增加供液系统单泵流量和多泵总流量,增大供液管径,意味着液压支架用液需求与供液系统最大供液能力之间相差巨大,致使供液过剩和响应滞后进一步加剧,加之液压支架开关控制形式,液压支架也面临着压力流量强冲击,威胁着液压支架的稳定性和可靠性。为此,马英等^[4]提出了一种如图 3a 所示的分布式蓄能器供液构型,在每个液压支架上随架安装蓄能器,平衡了工作面液压系统瞬时大流量供给不足与平均供液能力过剩的矛盾;张德生等^[16]提出在液压支架快速供液系统中将蓄能器巷道集中布置和工作面分布式布置,集中式布置可减小泵站系统的压力波动,分布式蓄能器用来补偿供液能力的不足,提高供液系统的敏捷性;周如林等^[17]通过电液控三位四通换向阀直接为立柱乳化液缸供液,在保障系统压力稳定性的前提下,提升了液压支架移架的效率;李福洪^[18]提出了液压支架立柱快速供液系统,在传统液

压支架供液系统中添加双进双回多路阀块,优化了立柱动作过程中压力流量匹配关系。可见,面对液压支架与供液系统之间增大的供需矛盾,现有方法主要是通过局部优化降低液压支架承受的压力冲击、提升液压支架的响应速度,全局化系统化的供液系统动力高效快速匹配方案还有待形成。

在液压支架快速跟机工作中,强时变负载使得工作面供液系统压力根本就不可能“稳住”,目前乳化液泵的“稳压控制供液”根本就不可能实现,因此需研究开发液压支架供液系统新型供液构型,优化传统“控制目标”以满足工作面强时变载荷和多变流量需求问题。基于上述需求,研究人员相继提出旁路补液、比例阀控等其他供液系统新构型。曹超等^[19]将快速补液泵引入回路,提出了如图 3b 所示的快速泵控补液构型,在原有变频多泵并联基础上加入能够快速响应的伺服补液回路,并通过压力反馈对补液泵进行转速

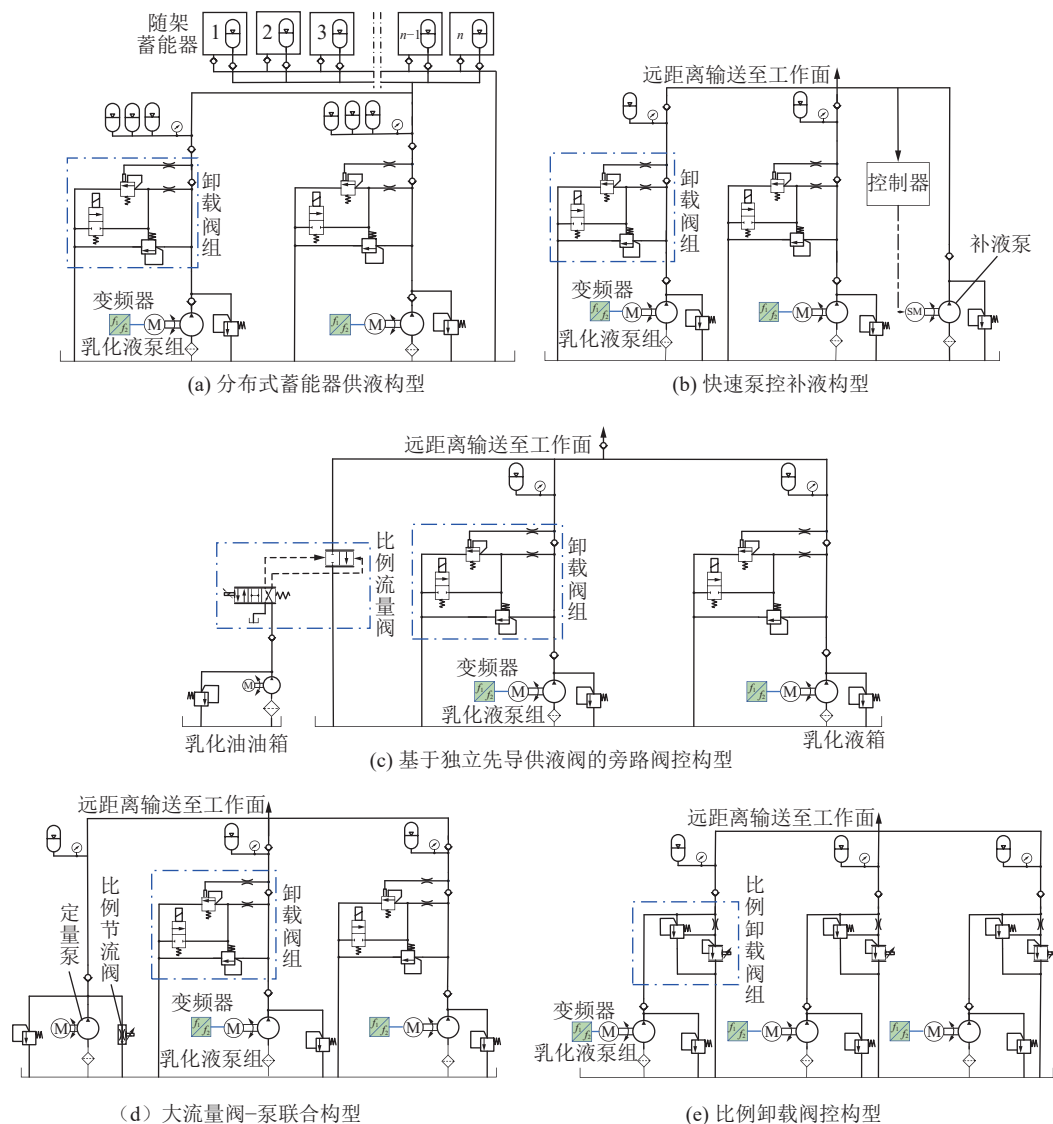


图 3 新提出的供液系统构型

Fig.3 Newly proposed liquid supply system configurations

控制, 这种系统构型在拓宽了泵站实时流量调节范围的同时降低了系统压力波动。赵继云等^[20]提出了 3 种供液系统构型, 如图 3c 所示的基于独立先导供液阀的旁路阀控构型, 在供液系统的出口并联一个先导阀为高频响比例伺服阀的高压大流量比例流量阀, 先导阀采用独立乳化油源, 避免了低黏介质条件下比例先导阀可靠性不足对系统控制效果的限制; 还将构型中的旁路流量阀更换为水液压高速开关阀作为先导的比例流量阀^[21], 采用纯水或高水基介质作为先导阀的工作介质, 形成了如图 3d 所示的大流量阀-泵联合供液构型^[22], 上述 2 种构型在现有变频器控制的泵控乳化液泵站系统中, 增加了旁路阀控供液回路, 提高了整个系统的响应速度, 减弱了流量波动和压力冲击; 如图 3e 所示的比例卸载阀控供液系统构型^[20]利用比

例卸载阀代替乳化液泵站上的电磁卸载阀, 可以实时调节卸载阀的卸载和恢复压力, 实现各乳化液泵分级连续调节卸载压力和恢复压力, 进而减小大功率泵的卸载压力冲击。

近年所提出的供液系统新构型对比见表 2, 这些构型主要通过乳化液泵站的压力或流量连续调节方式避免系统压力长时间处于供液系统设定的恢复压力以下, 保障液压支架初撑力, 还降低了卸载阀频繁启闭引起的压力波动次数, 有些构型还避免液压支架需液量小时开启大流量泵造成的浪费, 这些构型多是利用连续泵控、连续阀控或两者组合的形式实现系统连续调控, 但目前高压水液压泵工作转速提升空间有限, 限制了泵控系统的响应速度, 因此连续控制阀控是大功率供液系统控制形式的未来趋势和发展方向。

表 2 新提出供液系统构型对比

Table 2 Comparison of newly proposed liquid supply system configurations

构型名称	技术特点	优点	缺点	适用性
分布式蓄能器供液构型(图3a)	每台液压支架上随架配置“蓄能器+单向阀”	平衡压损, 降低冲击	增加供液系统复杂性, 不确定因素多	适用于液压支架压力波动大的系统
快速泵控补液构型(图3b)	引入快速响应的泵控补液回路, 通过压力反馈对流量进行控制	流量调节速度快, 调节精度高	大流量供液系统快速补液范围不足	适用于中小功率供液系统
基于独立先导供液阀的旁路阀控构型(图3c)	并联独立先导供液比例流量阀, 利用比例流量阀旁路调整流量	提高系统响应速度, 降低流量波动及压力冲击	需额外提供工作介质及动力源	适用于大范围流量连续控制供液系统
大流量阀-泵联合构型(图3d)	增加旁路比例节流阀控供液回路, 与变频泵联合控制	提高系统响应速度, 降低流量波动及压力冲击	节流阀流量调节范围有限	适用于变频响应速度快的系统
比例卸载阀控构型(图3e)	使用比例卸载阀代替乳化液泵站上的电磁卸载阀	连续调节, 降低压力冲击	对卸载阀响应速度及控制要求高	适用于多泵分时卸载供液系统

3 供液系统高水基控制阀

供液系统高水基控制阀是供液系统中压力流量控制的核心元件, 其动态响应特性、稳定性及可靠性等性能直接影响供液系统的供液质量以及液压支架的工作稳定性。目前供液系统规模越来越大, 相应的供液系统中所使用的高水基控制阀的压力、流量等级要求越来越高。在供液系统高压、大流量、强冲击的工况下, 一方面可通过阀体结构和材料的优化来应对阀的高压冲击、密封泄漏、气蚀破坏等问题, 另一方面改变控制阀的开关控制为连续控制, 研制具有连续控制功能的数字式控制阀, 实现供液系统压力和流量的连续精确调节, 将有利于主动降低系统和元件的压力冲击、改善供液系统控制效果和供液质量, 更是一种有价值的选择。

3.1 开关控制阀

大功率供液系统广泛使用开关式控制阀控制系统压力和流量, 所使用的开关式控制阀包括吸排液阀、

卸载溢流阀、安全阀等。由于大功率供液系统面临液压支架压力和流量强时变用液需求, 开关式控制阀在启闭过程中会造成很大的压力冲击和波动, 且由于高水基介质黏度低、润滑性差、汽化压力低等特殊理化性能, 在高压、大流量条件下容易形成紊流流态, 在控制阀内极容易出现冲蚀和气蚀等破坏。为适应高压大流量、强冲击的工况环境, 研究者从阀体结构优化、防气蚀破坏等方面开展了研究。

AMIRANTE 等^[23]在阀芯上增设斜面改变流体流经阀口时的入射角, 同时设计了一种在阀芯上开半圆柱形流线孔结构, 有效减小了阀芯所受的液动力; JAZI 等^[24]利用声学分析和特征曲线分别对截止阀中的气穴现象进行检测, 对数据结果曲线的波形进行分析判断, 了解其振幅与频率, 实现对整个空化过程的检测; 张宇等^[25]优化了卸载阀基体结构, 改变阀芯开口锥度, 增加阀套出口距离阀套边缘线的距离, 在阀腔内构建环装槽提高阀腔内压力的同时在阀芯内部开设引流孔提高背口压力来缩小压差, 有效改善了气

蚀现象;董庆震^[26]在主阀芯的前端设计了 10 个“凸”型非全周阀口,这种异型阀口通过改变流道让流体介质分流或对冲,使流体介质消耗更多的能量,以达到多级降压的效果,从而更好解决高压超大流量工况下高水基阀容易出现的气蚀问题;刘毅^[27]通过阀体采用表面镀铬、镍等工艺处理的奥氏体不锈钢,阀芯和阀座采用耐蚀合金材料,提高了安全阀的防腐抗磨性能;张敬敏^[28]将复合织构引入到安全阀芯表面,产生了良好的动压润滑特性,并采用正圆台径向孔结构作为阀芯出液孔结构,改善了安全阀阀芯出液径向孔处的气蚀问题;罗开成^[29]采用 O 形密封圈加聚四氟乙烯骨架的组合密封结构提高了安全阀的密封性能;朱楠楠^[30]设计吸排液阀的阀芯锥角宽度大于阀座锥角宽度,保证锥阀磨损后的阀芯仍可使用,有利于延长阀的使用寿命,且阀芯与阀座锥角保持一定角度差,使二者为线密封配合,长期工作密封面磨损后,仍可自动找准密封线,保证密封性能。

虽然研究者对阀体结构、阀内流场进行优化来应对高压冲击、气蚀破坏等问题,但是高水基供液系统高压大流量及强时变负载引起的强冲击工况严重限制了高压大流量开关式控制阀的优化空间,气蚀、冲击问题不能完全避免,控制阀可靠性和寿命严重不足,响应滞后,不能满足高产高效工作面液压支架快速响

应的需求。

3.2 高水基比例卸载阀

现有开关式电磁卸载阀不能及时响应综采工作面采煤过程强时变负载对供液系统的要求,无法满足智能化综采工作面按需供液、节能高效控制的目标。基于以上原因,采用具有比例控制功能的卸载阀来代替现有的开关式电磁卸载阀实现大功率乳化液泵的连续卸载,从而达到压力连续控制的目的,成为一种必然的选择。相关研究着眼于先导阀结构、主阀结构,反馈形式等方面,研制了多种适用于高压、大流量条件下的高水基比例卸载阀。

华中科技大学王振耀等^[31]设计了如图 4a 所示的本安型电磁铁驱动式比例卸载阀,在比例电磁铁和先导阀之间设置放大杠杆来放大推力;赵继云^[32]提出了 2 种比例卸载阀结构,分别为如图 4b 所示的由防爆伺服电机加丝杠驱动的伺服比例卸载阀;如图 4c 所示的由防爆比例电磁铁驱动的比例卸载阀。从表 3 比例卸载阀的结构对比可以看出,主阀均为插装式结构,先导阀采用密封性较好的球阀或锥阀结构,大多选用比例电磁铁作为电-机械转换器,通过控制先导阀开口度大小,调节主阀芯上下腔压力,实现主阀比例卸载,结合系统压力传感器构建供液系统压力闭环控制模式。

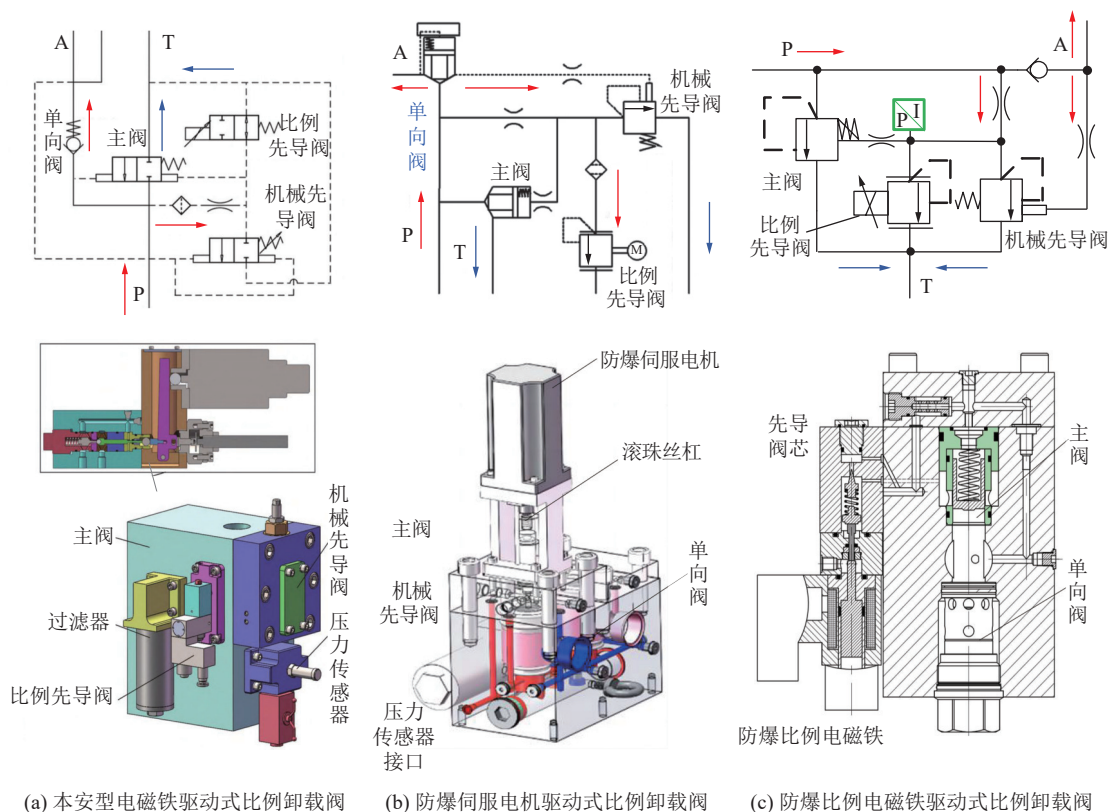


图 4 高水基比例卸载阀结构及工作原理

Fig.4 Structure and working principle of high water-based proportional unloading valves

表 3 各类高水基比例卸载阀对比

Table 3 Comparison of high-water based proportional unloading valves

机构	电-机械转换器	先导阀结构	主阀结构	阀内测量	最大压力/ MPa	最大流量/ (L · min ⁻¹)	优点	缺点	适用性
华中科技大学	本安型电磁铁 (图4a)	球阀	二通插装阀	压力传感器	50.0	1 200	额定压力大, 可靠性高	杠杆因摩擦磨损, 影响主阀压力控制精度	大流量乳化液泵动态阶梯卸载
中国矿业大学	防爆伺服电机 (图4b)	锥阀	二通插装阀	压力传感器	40.0	1 000	伺服电机输出力矩大, 抗干扰能力强	整阀体积大, 防爆伺服电机成本高	乳化液泵动态阶梯卸载
	防爆比例电磁铁(图4c)	锥阀	二通插装阀	压力传感器	31.5	800	结构简单, 成本低	比例电磁铁输出力矩小, 乳化液泵动态阶梯卸载额定压力低	梯卸载

3.3 高水基比例流量阀

高水基比例流量阀兼具比例调节与换向的功能, 既可以控制液流的方向, 又可以按比例控制流量的大小, 与乳化液泵旁路连接时能够连续控制供液系统流量, 降低供液系统的压力冲击, 提高元件可靠性与使用寿命。研究人员优化了电-机械转换器、先导级结构、主阀结构和反馈形式, 研制了多种适用于高压、大流量条件下的高水基比例流量阀。

英国的 Water Hydraulics 公司研制了一款三位四通水压比例阀, 该阀采用比例电磁铁驱动, 阀芯采用双弹簧对中式结构, 阀口采用平面密封, 但阀芯与阀套之间采用间隙密封, 不适用高压场合^[33]; 韩国国立釜山大学的 PARK^[34]研制了一种高速电磁开关阀作为先导级的二位二通水压比例阀, 由 PWM 信号来控制高速开关阀, 从而达到对控制腔压力的控制; Tiefenbach 公司提出一种采用多个 BLS1 系列的二通比例先导阀结合高精度位移传感器, 实现对主阀芯位置的精确控制^[35]; ZHANG 等^[36]设计了如图 5a 所示的双阀芯增量式比例流量阀, 采用“主动式阀芯”结构, 与阀套形成上下 2 个独立控制腔, 先导级由 2 个步进电机作为电-机械转换器的先导阀构成, 分别控制上、下控制腔压力, 配合安装的位移传感器对主阀芯进行位置控制; WANG 等^[37]设计了如图 5b 所示的高速开关比例流量阀, 先导级由 2 个高水基高速开关阀组成, 包括 1 个常闭式高速开关阀控制流入到主阀控制下腔的流量, 常开式高速开关阀控制从主阀控制下腔流出的流量, 主阀采用“对称缸式”锥阀结构, 主阀芯中间设有压力平衡孔, 使主阀上腔压力与主阀芯入口压力相同, 主阀芯上装有 LVDT 位移传感器, 将位移传感器的输出信号和输入信号作比较闭环控制主阀芯的位移; 赵继云等^[21]提出了如图 5c 所示的比例伺服阀驱动的双介质比例流量阀, 先导阀采用独立油源作为工作介质, 以提高整阀可靠性和频响; 北京天玛公司张阳等^[38]提出了如图 5d 所示的机械杠杆反馈式比例流量阀, 通过设置在主阀芯上的杠杆实现位移反馈或主阀芯上的位移传感器和主阀出口的压力传感器

形成闭环控制; 韩明兴^[39]研制了如图 5e 所示的音圈电机驱动的比例流量阀, 采用音圈电机结合杠杆机构作为驱动, 通过主级阀芯上的位移传感器进行位移闭环控制; 廖瑶瑶等^[40]提出了如图 5f 所示的三芯随动式水基比例阀, 采用伺服电机和丝杠螺母机构驱动, 先导阀和主阀均采用座式结构, 先导进液阀芯、先导回液阀芯集成在主进液阀芯内部, 三者构成机械反馈。

从表 4 高水基比例流量阀的对比可以看出, 主阀均为插装式结构, 先导阀采用密封性较好的球阀或锥阀结构, 电-机械转换器有步进电机、音圈电机或伺服电机几种形式。其工作原理分为两种, 一种是采用多个二位二通换向阀分别控制主阀两个控制腔的压力, 从而实现对流量的比例控制; 另一种为采用一个二位三通换向阀控制主阀 2 个控制腔的压力, 从而实现对流量的比例控制; 阀内反馈机制基本都是采用位移传感器的反馈构建闭环控制模式。

综合上述分析发现, 目前设计的高水基比例卸载阀最大压力为 50 MPa, 最大流量为 1 200 L/min; 高水基比例流量阀最大压力为 40 MPa, 最大流量 1 100 L/min, 在压力流量设计参数上能够满足供液系统使用要求, 但在稳定性、可靠性和控制响应方面还有进一步提升的空间。结构方面, 目前高压大流量高水基比例阀采用伺服电机、步进电机或比例电磁铁作为电-机械转换器时往往需要通过滚珠丝杠或杠杆结构驱动先导阀芯, 结构惯量大, 限制了阀的频响, 高水基条件下采用音圈电机等快响应驱动形式的高可靠先导阀结构有待突破; 阀内流固作用机理方面, 由于高水基介质黏度低、润滑性差、汽化压力低等特性, 高水基比例阀在实时调控过程中受到的机液动力耦合作用复杂, 其阀口液动力、密封特性影响因素、磨损机理等关键问题尚未系统阐明, 阀的可靠性和寿命还有待进一步提高; 控制方法方面, 高水基比例阀面临强时变负载和振动、压力强冲击等严重干扰, 阀内参数动态稳定测量困难, 阀内测量和控制方法集成化不足, 适合工业应用的比例阀轻量化抗干扰控制方法缺乏研究。

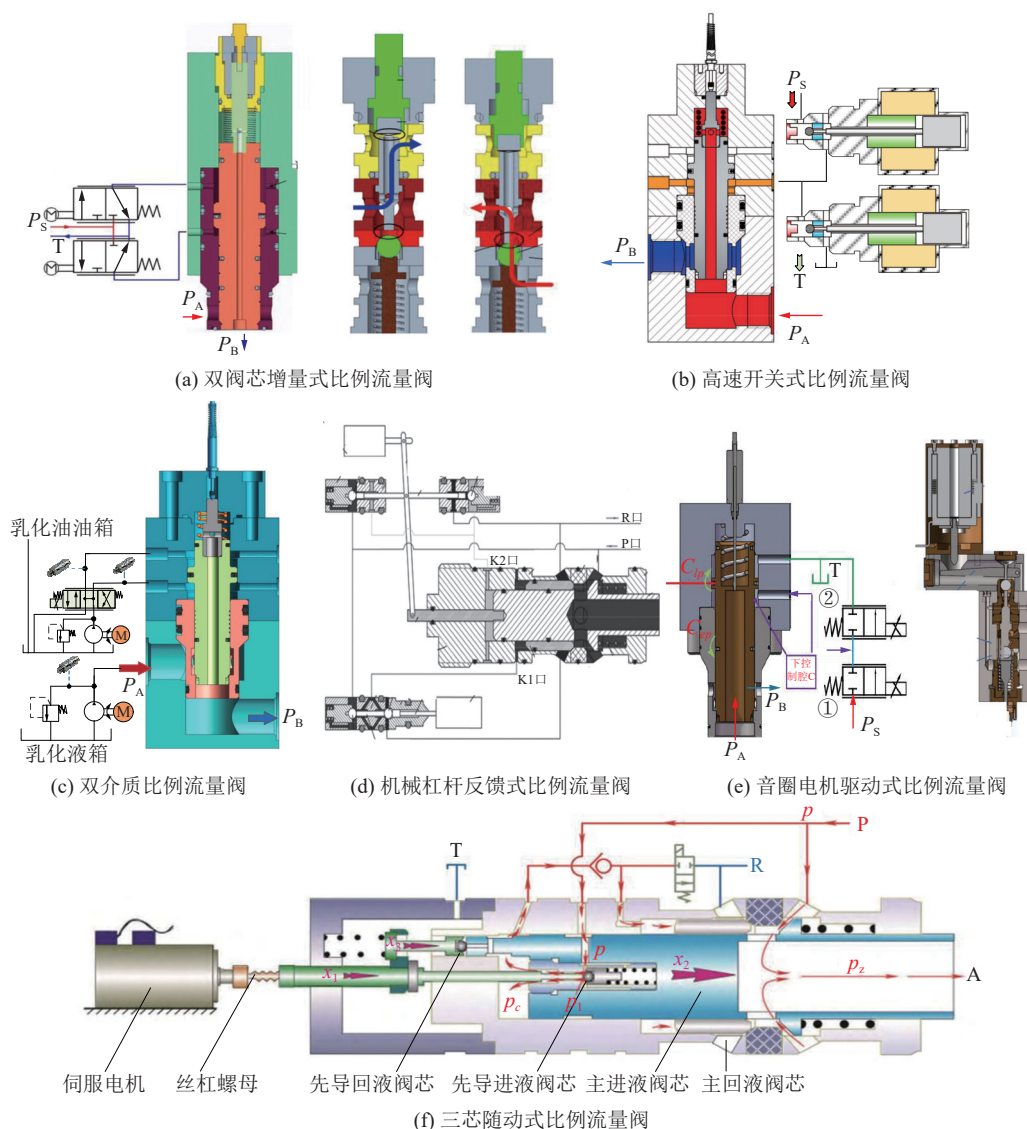


图 5 高水基比例流量阀结构及工作原理

Fig.5 Structure and working principles of high water-based proportional flow valves

4 供液系统长管路动态特性

目前,长距离集中供液成为高产高效矿井供液系统的一种常用选择,有利于简化巷道设备配置,提高系统可靠性。但随着供液系统供液距离的不断增加,供液网络中动力衰减和迟滞效应更为剧烈,再加之工作面多变的负载特性,使供液系统难以准确及时获得载荷变化及实时需求信息,供液系统的流量压力输出控制滞后液压支架实际工作动力需求,将进一步影响大功率供液系统稳压控制效果。因此,掌握大功率强时变负载下供液系统长管路传递特性,将需液端与供液端之间的动力响应滞后和压力传递损失特性精准掌握及控制成为保障稳压控制效果的关键环节。

许多学者对此开展研究, GUO 等^[41]考虑管道长度,建立了双缸驱动液压支架的数学模型,将管路简化为等效电容、电阻和电感的集总,但未考虑管路中

压力流量的瞬态变化情况;赵雄鹏^[42]建立了大采高液压支架软管与直通接头压力损失理论模型,通过理论计算、AMESim 软件仿真和试验三者对比分析,研究了供回液管路的压力损失及动态特性,改进了计算液压支架接头压损的算法,但模型中局部压损式的阻尼系数采用经验值估算,精度不高,而且忽略了实际工况中的刚性管道;车鹏等^[43]通过理论分析和计算研究了不同供液方式下的压力损失状况,得出梯形供液方式压力损失最小,同时考虑了沿程压力损失和局部压力损失,但供液管路和支路数量较少,无法准确描述实际工况;韩存地等^[44]通过基于仿真软件 COMSOL 建立供液管路模型模拟不同流量下的压力损失,研究了供液管路入口流量与压力损失的关系,但只考虑稳态流动情况,而忽略了实际工况中的非恒定流动;胡云飞等^[9]通过理论计算值与现场实际应用验证,证

表 4 各类高水基比例流量阀对比
Table 4 Comparison of high-water based proportional flow valves

机构	电-机械 转换器	先导阀 结构	主阀 结构	反馈机制	最大压力/ MPa	最大流量/ (L · min ⁻¹)	优点	缺点	适用性
中国矿业 大学	双步进电机 (图5a)	双二位 三通球阀	插装阀	位移-电反馈	40.0	500	响应速度快, 抗干 扰能力强	步进电机动态负载 下振动影响精度和 稳定性	液压支架推溜速度控 制/大惯量乳化液泵 软启
	开关电磁铁 (图5b)	双高速开关阀	插装阀	位移-电反馈	40.0	500	抗污染性强, 结构 简单, 成本低	高速开关阀流量小 导致整阀响应低	液压支架推溜速度 控制
	比例电磁铁 (图5c)	滑阀	插装阀	位移-电反馈	40.0	500	控制精度高, 响应 快, 重复精度高	需额外配置 工作介质	联合变频乳化液泵旁 路控制
北京天玛 智控	电机(图5d)	球阀、锥阀	插装阀	位移-力反馈	—	—	结构简单、适应性 强、调节精度高	结构复杂、机械结 构摩擦磨损导致阀 性能损失	液压支架油缸方向 流量比例控制
华中科技 大学	音圈电机 (图5e)	球阀	插装阀	位移-电反馈	32.0	1 100	响应速度快、控制 精度高	结构复杂, 机械结 构易引入非线性因 素, 温升严重	联合变频乳化液泵 旁路控制
太原理工 大学	伺服电机 (图5f)	球阀、锥阀	插装阀	位移随动	31.5	500	单向比例换向、结 构紧凑	安装调试难度大、 成本高、维护复杂	液压支架油缸方向 流量比例控制

明了使用内衬不锈钢管远距离供液过程中管路腐蚀及管路压降明显降低; 叶警涛^[45]通过搭建远距离供液系统模型, 利用动力学和 CFD 数值仿真, 研究了远距离供液系统的压力损失与供液管路薄弱环节内流场及流固耦合振动特性, 考虑了液阻、液感和液容等参数的不同处理方式, 适用于研究双进双回环形供液系统。上述研究分析长距离供液系统压力损失时, 普遍进行稳态计算, 没有考虑管道内压力流量的瞬态变化, 而液压支架长管路供液系统具有高压、大流量、紊流及强时变负载的特点, 相关长管路压力损失分析方法无法准确揭示液压支架供液系统长距离动力传递特性; 在管路动力学建模方面缺乏考虑紊流工况、长管路内部压力冲击等因素。为此, 刘浩^[46]针对管路动态摩擦力进行分析, 采用适用于紊流状态的 Brunone 摩擦模型中的附加剪切力摩擦项进行建模, 建立了符合高压大流量高雷诺数紊流工况的管路非恒定流动力学模型, 通过特征线法数值求解, 探究了长管路压力损失动态变化过程, 分析不同边界条件长管路压力传递特性影响, 揭示了液压支架连续动作下增压波或减压波在管路中交替传递引起的管路内部压力冲击及压力响应时间动态变化规律, 但数值解析过程复杂。

同时, 液压支架长距离回液管路中存在回液阻力大的问题, 回液阻力会使液压支架液压系统的背压升高, 从而降低液压支架执行机构的动作效率, 影响支护效果。尤其在远距离、大高差回液管路中背压较大, 导致立柱升降柱和推移操作缓慢甚至无法正常运行。因此, 一些学者对回液背压治理方式展开研究, 郭艳蓉^[47]通过计算进回液管路压力损失、各类阀件压力损失及管路附件局部压力损失等得出长管路供液过程

中的总压力损失, 建立了考虑频率相关摩擦项的集中参数模型, 加快了对系统阶跃信号的响应速度和管路中压力波的衰减速度, 与传统的集中参数模型相比, 所建管道模型对称分布且考虑了频率相关动态摩擦项; 张德生等^[48]通过在回液管路中设置管道泵, 实现工作面回液的近零背压, 解决了回液阻力的限制, 提高了液压支架动作的响应速度; 周如虹等^[49]通过在支架主回液管路上采用回液断路阀来代替平面截止阀, 有效阻断了相邻液压支架间的背压。

现有大部分研究往往忽略供液系统长管路非恒定流动状态, 少部分考虑紊流状态的长管路动力学模型在液压支架复杂工况对应的边界条件下求解困难, 目前还难以及时准确掌握支架供液压力损失动态变化规律, 继而无法通过对供液压力衰减的动态补偿保障供液系统稳压控制精度, 保障系统供液动力稳定性与准确性。因此, 对长距离供液系统的动态特性分析仍是一个值得关注和研究的课题。

5 供液系统稳压控制方法

供液系统构型优化、连续控制元件研发、长管路供液特性研究, 都是从供液系统结构、元件处着手以期降低系统压力波动, 提高供液质量, 但液压支架供液系统供液量、支架动作速度以及系统压力之间存在复杂的耦合关联关系, 在强时变负载下, 如何及时匹配执行端的用液需求, 大功率供液系统闭环智能联动和乳化液均衡输出智能控制方法是解决此问题、实现其稳压控制的重要环节。因此, 如何通过控制策略和算法稳定供液系统压力、降低压力波动是当前综采智能供液控制亟待解决的难题。

杨涛等^[50]通过分析乳化液泵站流量、压力对液压支架各工序的影响,设计了主供液管路压力反馈的泵站组合形式的控制系统,在每台乳化液泵站设有单泵控制器,此外还设有主控制器,以实现手动控制与自动控制;翟国栋等^[51]通过泵出口流量和压力反馈的变频稳压控制形式,改善了支架系统工作效率;王国法等^[52]提出了3种变频驱动方式:第1种为4台变频器分别控制4台乳化液泵并联组成,根据工作面需液量顺序启动或停止,且可以自动切换任一泵为主泵,避免单泵长期运行;第2种为1台乳化液泵由变频器驱动,另外3台乳化液泵共用1台组合开关工频驱动,开始供液时变频泵为主泵,供液不足时加载1台工频泵,变频泵自动切换为补液泵;第3种为4台乳化液泵共用1台变频组合开关控制。

李然等^[53]提出通过阶梯式压差控制技术、泵站均衡磨损技术,优化各泵联动效果,同时提出近工作面蓄能稳压装置及时快速供液的方案,用以进一步解决供液系统压力波动大的问题,智能按需供液技术如

图 6a 所示;刘波^[54]采用变频-卸载联动控制算法,如图 6b 所示,通过系统实际压力与变频基准压力、控制器卸载上限和控制增压下限的比较,控制变频器输出频率的变化,从而控制泵站输出,实现泵站变频与卸载阀的联动控制,使系统压力在压力区间内波动;崔耀等^[55]采用大采高支架与大流量泵站联动控制技术,以决策树方法为基础,建立如图 6c 所示大数据自主决策模型,设计多泵变频联动专用算法;赵康康^[56]提出了一种所基于跟随压力波动频率变频的多泵启停联动与卸载阀自适应阶梯控制的系统稳压方法,并设计了一套乳化液泵智能供液控制系统;姚伟等^[57]利用模糊算法判断压力差值、差值变化率,进而控制卸载阀的思路;ZHANG 等^[58]采用 PID 算法判断压力变化,并控制卸载阀动作,试图将压力控制在某个目标值附近,尽管仿真结果较为理想,但并未得到实际验证;曹超等^[19]提出了如图 6d 所示的液压支架供液系统快速泵控补液稳压控制方法,根据系统压力变化趋势、执行机构结构参数,准确得出执行机构不同动作

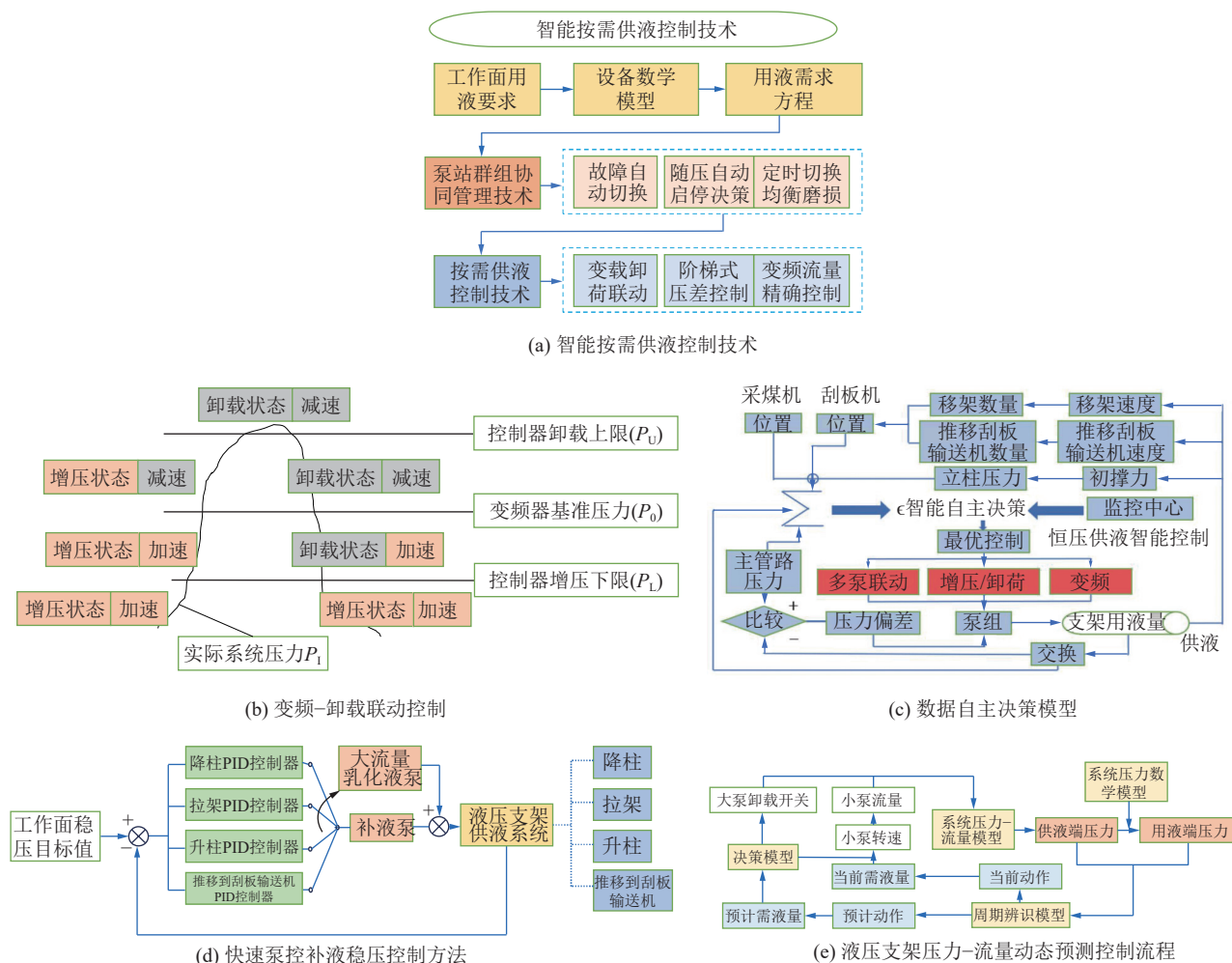


图 6 稳压控制方法原理

Fig.6 Principles of pressure stabilization control method

的需液量,形成稳压补液流量计算方法,设计了针对液压支架不同工作阶段的 PID 控制器,采用 PID 算法对伺服泵进行控制快速供液,以降低供液系统的压力冲击。付翔等^[59-60]提出了交叠关系的供液系统与液压支架协同动作控制逻辑,设计了供液系统与液压支架的协同自适应控制模型,建立了考虑支架动作数量、动作类型、动作行程和压力限制等诸多因素的稳压供液流量的神经网络回归模型,实现了基于支架动作过程的稳压供液预测;王国法等^[11]提出基于预测用液负载的供液关联决策技术,建立自动跟机模式液压支架压力流量解耦机理模型,提出“用液量实时计算+用液模型超前预测”的复合控制方案,通过与自适应高效能变流控制技术相结合,显著降低系统压力冲击;赵继云等^[61]提出了一种液压支架压力-流量动态预测控制方法(图 6e),能够实时监测煤矿井下液压支架群的压力变动,并依据液压支架周期性工作流程和长管路动力传递特性,动态预测执行机构的需液量,实时调节多泵联动供液系统的供液量,实现支架组多工作模式下系统压力流量的自适应调节,满足井下供液系统

的智能化稳压和节能控制要求,相关稳压控制方法具体特点见表 5。

在快速自动跟机模式下,实现压力流量稳定控制的前提是对当前液压支架执行动作的准确判断,目前通过所建立的模型对液压支架压力、位移等信号判别进行决策,控制系统模型复杂,控制算法计算量大,复杂模型的决策速度难以匹配液压支架自动跟机速度要求,因此基于数据和模型共同驱动的稳压预测控制技术研究是供液系统未来重要的研究方向。当前对于大功率供液系统的控制技术研究大多集中在供液系统本身的压力调节及流量控制方面,几乎都未考虑支架运行中跟机速度的执行约束以及长距离供液管道动态特性等影响因素;尽管有一些供液流量与支架动作匹配的研究成果,甚至使用神经网络算法进行流量预测及调节,但都是在传统乳化液泵组的变频调节基础上进行改进,然而这种传统的变频调节方式在应用于长距离供液时一定会带来响应滞后问题,无法对最后的压力控制起到作用,无法实现对供液系统实时或超前补偿。

表 5 稳压控制方法对比

Table 5 Comparison of pressure stabilization control methods

稳压控制方法名称	优点	缺点	适用性
智能按需供液控制技术 (图 6a)	能够减缓各泵动作区间重叠导致的压力波动	需液量强时变,泵、阀、变频器等控制对象多,控制决策困难	适用于卸载频次低、多泵分时供液控制
变频-卸载联动控制(图 6b)	实现变频与卸载阀的联动控制,动态调节系统的卸载压力区间	强时变条件下多泵动态卸载区间难以准确掌握	适用于小流量多泵联合供液控制
数据自主决策控制(图 6c)	动态适应液压支架工作过程	决策参量多,控制算法计算量大,系统实时性不足	适用于工作面液压支架自动跟机的供液系统
快速泵控补液稳压控制 (图 6d)	算法简单,流量调节速度快,调节精度高	应用在大流量供液系统中补液范围不足	适用于中小功率供液系统
液压支架压力-流量动态预测控制(图 6e)	对变频器控制响应要求低	对液压支架动作周期性预测准确性要求高	适用于地质条件好,液压支架动作周期性偏差小的工作面

6 供液系统智能运维技术

液压支架供液系统是集机、电、液为一体的复杂系统,潜在故障点多,故障模式多样化,其常见故障见表 6,监测和运行维护是保障综采供液系统良好运行状态的关键环节,是综采工作面安全、高效生产的必要保障。

在监测方面,目前所应用的监测方式主要为集中式和分布式监测。分布式监控系统通过主站对所有分站远程控制,实现各个分站协同工作;每个分站通过对多个重要参数实时监测,对每台泵实现控制,分布式监控系统更适合井下苛刻环境,是目前主流形式。国内众多厂商如北京天玛、浙江中煤、无锡煤机等公司主要对泵站减速箱内油液的油温、油压、油位和泵

站进口压力、出口压力及吸液箱内液温等状态参量进行在线监测^[53],典型监测界面如图 7 所示。雷波泵站监测基于单片机设计,使用 CANBUS 总线传输,能够根据工作面的压力信号和液压支架移动信号,采用分布式对泵站系统进行控制和监测^[62];卡马特泵站监测系统基于 PLC 设计,采用分布式可实现对乳化泵、预增压泵和乳化液箱进行控制和监测;豪辛柯公司乳化液泵站采用集中式控制系统,仅在泵上安装接线盒,将需要采集的检测点和控制点直接通过电缆与主控制台相连,实现被控设备的远程监测^[53]。

常规状态参量在线监测主要依靠各种传感器将各状态参量的数据同步传至综采集成供液系统的监测诊断系统中,通过与预先设定允许工作门槛值的实时对比,来判断或诊断泵站运行的健康性,同时能够

表 6 液压支架供液系统常见故障汇总

Table 6 Summary of common faults in hydraulic support liquid supply system

故障形式	常见故障定位	主要故障成因
泵体泄漏	柱塞表面、柱塞盘根	① 冲击导致柱塞密封失效;② 接触副在冲击下高频磨损导致泄漏;③ 冲击变形导致的间隙增大
轴瓦损伤	乳化液泵轴瓦	① 润滑油泄漏导致曲轴及轴瓦剧烈摩擦;② 乳化液渗入导致润滑油黏度过低;③ 冲击导致轴颈和轴瓦的配合间隙改变;④ 磨损导致摩擦表面受力不均;⑤ 轴瓦和轴颈摩擦产生裂纹,在润滑油作用下产生疲劳裂纹
控制阀泄漏	吸排液阀、卸载阀、安全阀、单向阀	① 冲击导致的阀内密封失效;② 工作介质污染导致的冲蚀磨损
控制阀卡滞	卸载阀、安全阀、吸排液阀	① 工作介质污染导致阀芯卡滞;② 冲击导致阀芯机械结构损坏;③ 弹簧疲劳失效、断裂;④ 电磁干扰
管路爆裂	管路、管接头	① 瞬时压力冲击;② 管路连接件共振
异常噪声	滑块油封安装板、联轴器、齿轮箱、卸载阀	① 振动导致的装配失效;② 冲击导致的机械结构损坏;③ 润滑失效
温度异常	润滑系统、控制阀、乳化液泵轴承、乳化液	① 润滑介质变质;② 堵塞导致的节流损失;③ 重载下轴承磨损或损坏
润滑失效	轴承、齿轮、柱塞	① 润滑油受污染;② 曲轴和齿轮的旋向相反导致润滑油无法进入润滑孔;③ 乳化液浓度过低

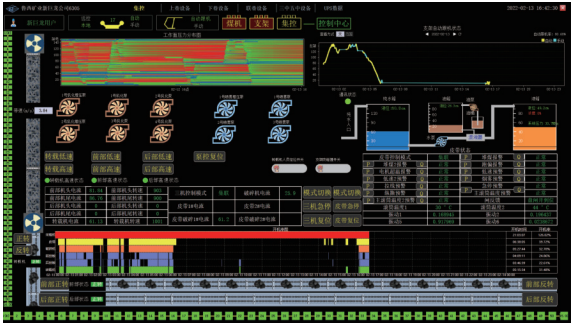


图 7 供液系统典型监测界面

Fig.7 Typical monitoring interface of liquid supply system

提供报警和自动停机保护等功能^[52],如雷波公司研发了如图 8 所示的 Agilis 集成式智能控制装置,将智能电机驱动和自适应系统控制等结合,通过互联网进行远程主动性能管理,使乳化液泵在整个生命周期内保持可靠性和稳定性,并且采用模块化设计以方便操作维护,同规格产品可节省 25% 的空间占用。

在运维方面,目前主要针对乳化液泵站开展振动噪声在线监测诊断,通过传感器将振动或噪声等表征机械状态的特征参量转化为电信号,经过放大采集、信号处理和分析后,对故障信息或故障零部件进行报

警或诊断。杨秀宇等^[63]通过选择合适的 VDM 参数,能够在强背景噪声下提取乳化液泵滚动轴承的磨损信号;张振^[64]构建了基于支持向量机和贝叶斯网络的故障诊断模型,对乳化液泵故障作故障形式判断和产生的原因分析,同时以前 1 h 运行状态作为标签,预测后 1 h 设备的健康状态;牛锐祥等^[65]提出了一种基于神经网络的乳化液泵站分级故障诊断方法,通过基于深度自编码网络的第一级诊断,判别系统压力、乳化油位、温度等状况,自适应识别乳化液泵故障形式,通过专家系统的第二级诊断,进行精确故障定位;马宝玉^[66]提出将支持向量机网络应用于乳化液泵泵阀弹簧故障诊断系统,通过训练故障特征频率下的特征向量,构建诊断模型,结合柱塞位移信号实现对吸排液阀故障的定位;刘浩^[46]则针对供液管路中减压波及增压波相遇位置进行分析,通过压力波传递速度、管路长度及管路两端产生压力波间隔时间推导出管路冲击位置,为管路故障排查定位提供了前提条件。

上述监测系统已在工作面供液系统中广泛应用,但运维方法目前均处于实验室研究尝试阶段,基本针对某个元件或某类故障开展诊断辨识,还未结合供液系统压力等工作参量数据,难以形成系统化的运维体系和方法,现阶段针对供液系统监测与故障诊断的研究还处于理论探讨阶段,仅是对设备单个元件进行监测,依靠有限的几个压力表和指示器来指示系统的工作状态,设备运行状况的监测及故障排除仍需借助操作人员的经验和手工操作。当前综采工作面供液系统普遍缺乏相应的预警预判、主动监测控制与故障诊断措施,不具备异常状态提前感知和主动干预能力,在出现异常和故障情况时不能及时发现并进行有效的检修。综采集成供液系统实际出现的故障较为复杂,设备元部件所受激励力频率范围广,难以识别,关

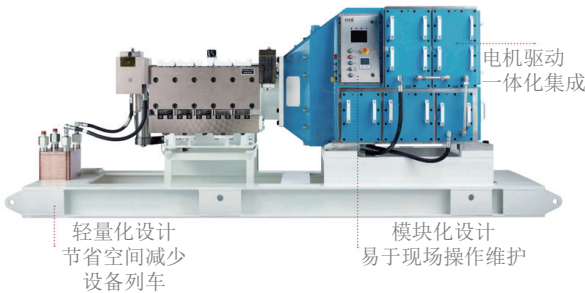


图 8 雷波 Agilis 智能控制集成

Fig.8 RMI Agilis intelligent control device

键元部件的故障监测诊断技术尚未攻克;此外,当前供液系统事故和故障预防方法采用简单逻辑判断,难以满足供液系统全局实时运行参数监测判别需求,爆管等事故时有发生,基于供液系统运行参数的主动监测感知预警和智能干预控制方法未能突破;包含故障监测诊断技术、主动监测感知预警和智能干预控制的供液系统完整智能运维体系尚待建立。

7 大功率供液系统存在的问题

通过上述国内外研究现状分析,可以看出:针对液压支架大功率供液系统及其智能控制方法研究,尚存在如下问题:

1) 供液系统构型方面,目前实际应用的液压支架供液系统采用多定量泵构型及其压力流量控制方法,虽然可以通过变频调节系统供液流量,通过卸载阀控制系统的供液压力,但均无法与液压支架多缸工作机构负载压力和负载流量的强时变特性需求“实时匹配”,系统压力很难稳定,压力冲击大、噪声振动大,供液“需求”与“供给”始终存在时间差和数量差,供液质量差、效率低,实际应用中未见更有效的供液系统压力流量控制方法,严重影响液压支架供液系统高效控制,影响支架跟机作业,同时损害系统元件的寿命。

2) 供液系统控制阀方面,为了解决压力、流量不能连续调节的问题,虽然开发了大流量高水基比例卸载阀与高水基比例流量阀,但在高水基条件下,阀的

密封性、防气蚀、抗干扰能力等方面需要进一步研究,其中适用于高水基介质的高可靠大推力防爆电-机械转换器是供液系统连续控制阀研发亟待突破的关键。

3) 供液质量控制方面,目前为了解决供液流量与支架动作匹配实时性问题,虽然有研究采用了诸如神经网络等算法进行流量压力预测,并据此实施乳化液泵的控制,但仍然是在传统多泵供液变频控制构型的基础上进行的,且支架工作状态预测的准确性、长距离供液管路及大功率定量泵变频控制响应滞后等之间的耦合作用,导致现有研究的预测控制算法仍然难以适应供液系统特性的实时控制需求。

4) 供液系统监测保障方面,供液系统覆盖范围广,其多点被动监测的监测方式难以主动感知系统故障,无法实现元件、管路等供液系统全局的监测覆盖和预测性维护,诊断和维护方面还缺乏能够可靠应用的技术手段,无法通过对包括传动机构、电液元件、供液管路、控制系统在内的供液系统工作状态全面感知,供液系统故障定位、诊断预警等技术研发还处于初级阶段,难以构建形成完整的供液系统智能运维体系。

8 未来发展路径与方向

面向综采装备智能化和高产高效工作面建设目标,智能精准控制是大功率供液系统未来可靠发展的必由之路,如图9所示,围绕检测、元件、控制、运维等制约供液系统供液质量的多个环节,未来仍需从以

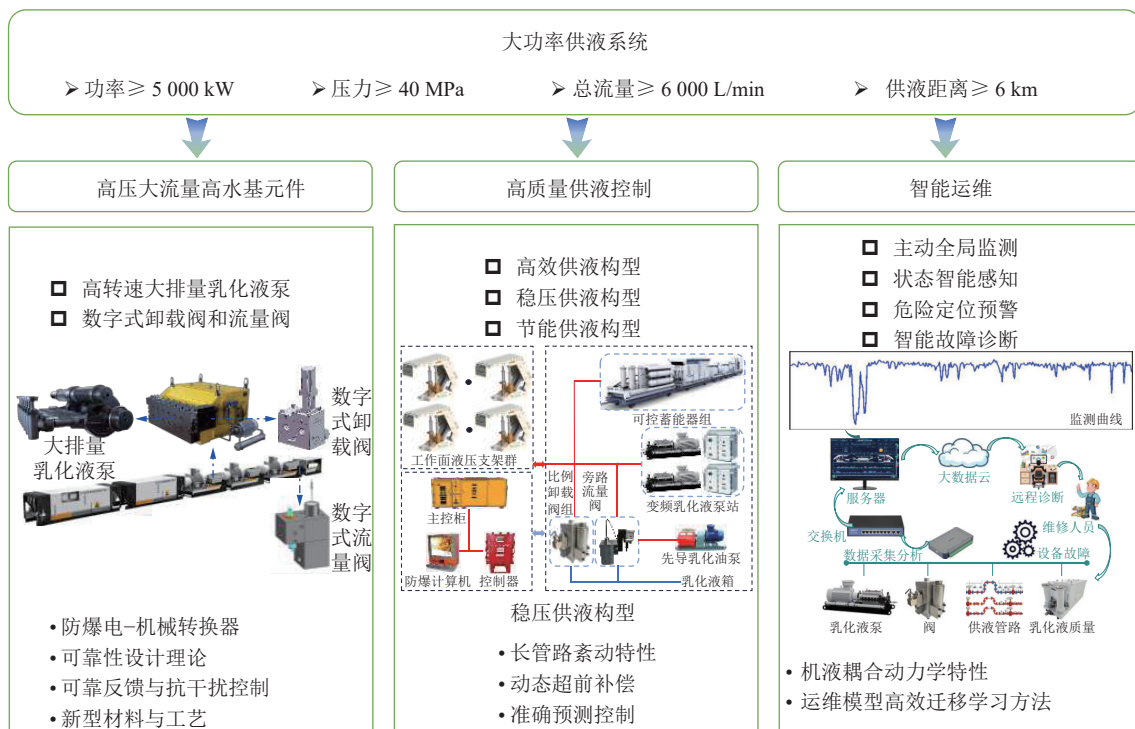


图9 供液系统未来发展路径与方向

Fig.9 Future development path and direction of liquid supply system

下 3 方面着力破解一批关键技术:

1) 高压、大流量、高可靠性高水基连续控制阀和乳化液泵制约着当前供液体系智能化发展和可靠性提升。面向大功率液压动力需求,有必要提高乳化液泵工作转速,结合先进材料、工艺和设计理论,开发高压高速高水基柱塞泵,提升矿井有限空间内供液系统的功率密度。面向大功率多泵供液系统的全范围压力和流量控制需求,必须开发 40 MPa、500 L/min 以上的高可靠数字式连续卸载阀和流量阀,厘清井下适用于供液系统的连续控制阀频响、线性度、滞环等指标的实际应用需求,重点突破防爆高水基电液阀的电-机械转换器设计选型、材料制备和制造工艺,建立高压大流量高水基可靠性优化设计理论与方法,构建高压大流量高水基连续控制阀级间可靠反馈和低参量抗干扰控制模式。

2) 建立起液压支架用液端和供液系统供液端之间实时匹配的控制机制是实现工作面高质量供液的核心,必须结合负载敏感系统、分布式电液系统等先进电液系统构型,创新井下供液系统高效可靠构型原理,精准掌握大功率高水基供液系统长管路紊动特性和准周期特性,构建动态超前补偿供液动态决策机制,建立适应不同供液系统规模的机器学习准确预测控制方法,开发多泵多阀供液系统稳压供液、节能供液等多模式控制系统,改善供液质量,保证液压支架初撑力,提升液压支架跟机速度,降低液压系统冲击,保障综采装备安全高效可靠工作。

3) 供液系统空间分布范围广,作为机电液高度耦合的装备系统,其运维系统需要改变目前多点被动监测的局面,必须能够主动智能监测供液系统全局,智能感知系统工作状态,智能定位和预警系统危险,智能诊断系统故障。为此,准确构建供液系统机液耦合动力传递动力学特性和电液控制系统模型是奠定供液系统智能运维的理论基础,建立定位、诊断、判别模型的高效可迁移学习方法是支撑供液系统智能运维的技术关键。

9 结 语

高产高效和智能化工作面不仅要求液压支架供液系统高效供液,更要求高可靠稳定供液,智能化工作面液压支架高效供液系统及其控制技术已成为煤矿智能化工作面建设的核心关键。本文系统地分析比较了当前液压支架供液系统各种构型原理、稳压控制方法及性能,总结对比了可实现供液系统连续控制的高压大流量高水基比例阀的结构特点和特性参数,评述了当前长距离集中供液条件下供液系统长管路

动态特性的建模分析方法,介绍了针对不同液压支架供液系统构型的稳压控制逻辑和方法,从监测和运维方面概述了当前供液系统智能运维技术的现状。通过对液压支架供液系统的上述关键技术发展现状的分析和总结,从供液系统构型、供液系统控制阀、供液质量控制及供液系统监测保障 4 方面,指出当前阻碍高压大流量供液系统智能化发展的瓶颈问题,并提出智能供液系统开发有待进一步突破的关键技术和发展趋势。

参考文献(References):

- [1] 刘清,韩秀琪,徐兰欣,等.综采工作面采煤机和液压支架协同控制技术[J].工矿自动化,2020,46(5): 43-48.
LIU Qing, HAN Xiuqi, XU Lanxin, et al. Cooperative control technology of shear and hydraulic support on fully-mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 43-48.
- [2] 任怀伟,张帅,薛国华,等.液压支架自动跟机动态规律研究[J].工矿自动化,2023,49(9): 47-54.
REN Huaiwei, ZHANG Shuai, XUE Guohua, et al. Research on the dynamic law of automatic following of hydraulic support[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(9): 47-54.
- [3] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1): 1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, et al. New development of intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [4] 马英,张德生,赵叔吉,等.综采工作面分布式蓄能供液系统研究及应用[J].煤炭科学技术,2024,52(9): 238-247.
MA Ying, ZHANG Desheng, ZHAO Shuji, et al. Research and application of liquid supply system with distributed energy accumulators in fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 238-247.
- [5] 石超.红柳林智能化示范矿井建设历程与创新发展[J].智能矿山,2023,4(4): 37-44.
- [6] 闫景,马腾.一刀煤装满一列车[N].榆林日报,2023-12-16(1).
- [7] 叶健.1 250 L/min、40 MPa 高压大流量乳化液泵站[J].智能矿山,2022,3(1): 36-37.
- [8] 刘欣,杨臻,杨春平,等.1250 L/min 大流量高端智能型乳化液泵系统助力红柳林煤矿千万吨采煤工作面[J].智能矿山,2023,4(7): 44-47.
- [9] 胡云飞,张凯,王亮,等.综采工作面超长距离供液压损研究分析[J].采矿技术,2022,22(5): 142-145.
HU Yunfei, ZHANG Kai, WANG Liang, et al. Research and analysis of ultra-long distance hydraulic supply loss in fully mechanized mining face[J]. Mining Technology, 2022, 22(5): 142-145.
- [10] 卢海承.乳化液泵站电磁卸荷系统参数匹配特性研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2019.
LU Haicheng. Research on parameter matching characteristics of electromagnetic unloading system in emulsion pump station[D]. Beijing: General Institute of Coal Science Research, 2019.
- [11] 王国法,张良,李首滨,等.煤矿无人化智能开采系统理论与技术

- 研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 34–53.
- WANG Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34–53.
- [12] 张文全. 乳化液泵变频与电磁卸载智能联动控制研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(3): 196–198.
- ZHANG Wenquan. Research on intelligent linkage control technology between variable frequency and electronic unloading of emulsion pump[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(3): 196–198.
- [13] 王国法. 液压支架控制技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [14] 刘永亮, 李艳杰, 崔耀. 超大采高工作面智能集成供液系统研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 387–392.
- LIU Yongliang, LI Yanjie, CUI Yao. Research and application of intelligent integrated liquid supply system for super high mining face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 387–392.
- [15] 罗文. 国能神东煤炭集团重大科技创新成果与实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 1–43.
- LUO Wen. Major scientific and technological innovation achievements and practices of CHN Shendong Coal Group[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 1–43.
- [16] 张德生, 牛虎明, 杜毅博, 等. 一种液压支架快速供液系统: CN113217064A[P]. 2021-08-06.
- [17] 周如林, 乔子石, 孟令宇. 综采工作面液压支架立柱快速供回液方案研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(11): 74–80.
- ZHOU Rulin, QIAO Zishi, MENG Lingyu. Study on the fast fluid supply and return scheme of hydraulic support column in fully mechanized working face[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(11): 74–80.
- [18] 李福洪. 液压支架立柱快速供液系统研发与应用[J]. 智能矿山, 2024, 5(2): 67–71.
- [19] 曹超, 赵继云, 高凯, 等. 液压支架供液系统快速泵控补液稳压方法研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 2024: 1–12. [2024-06-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240613.1528.007.html>.
- CAO Chao, ZHAO Jiyun, GAO Kai, et al. Study on the method of fast pump-controlled rehydration and pressure stabilization for hydraulic support liquid supply system[J/OL]. Coal Science and Technology, 2024: 1–12. [2024-06-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240613.1528.007.html>.
- [20] 赵继云, 王浩, 曹超, 等. 基于独立先导供液阀的液压支架电液比例控制系统及方法: CN117646640A[P]. 2024-03-05.
- [21] 赵继云, 王浩, 曹超, 等. 一种高压大流量高水基插装式数字节流阀及控制方法: CN115681236A[P]. 2023-02-03.
- [22] 赵继云, 王云飞, 满家祥, 等. 一种大流量阀-泵联合控制乳化液泵站及其控制方法: CN110307193B[P]. 2020-07-03.
- [23] AMIRANTE R, MOSCATELLI P G, CATALANO L A. Evaluation of the flow forces on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3): 942–953.
- [24] JAZI A M, RAHIMZADEH H. Waveform analysis of cavitation in a globe valve[J]. Ultrasonics, 2009, 49(6-7): 577–582.
- [25] 张宇, 陈国瑜, 王传礼. 锥台微造型对水液压安全阀阀芯润滑的影响研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(12): 10–12.
- ZHANG Yu, CHEN Guoyu, WANG Chuanli. Study on the influence of cone micro-modeling on valve core lubrication of water hydraulic relief valve[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(12): 10–12.
- [26] 董庆震. 高压超大流量高水基卸荷阀的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- DONG Qingzhen. Research on high pressure, super-large flow and high water-based unloading valve[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [27] 刘毅. 煤矿液压支架纯水安全阀的结构与性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009.
- LIU Yi. Research on the structure and performance of pure water safety valve for coal mine hydraulic support[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2009.
- [28] 张敬敏. 水液压支架安全阀复合织构阀芯设计与分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- ZHANG Jingmin. Design and analysis of composite texture valve core for safety valve of hydraulic support[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [29] 罗开成. 液压支架安全阀密封结构的改进[J]. 液压与气动, 2004, 28(10): 63–64.
- LUO Kaicheng. The improvement of the relieve valve seal structure in hydraulically powered roof support[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, 28(10): 63–64.
- [30] 朱楠楠. 矿用乳化液泵吸排液阀流场分析与仿真研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- ZHU Nannan. Flow field analysis and simulation research on suction and discharge valve of mine emulsion pump[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2013.
- [31] 王振耀, 刘银水, 王伟, 等. 大功率水压比例卸荷阀功率级动态特性仿真研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 62–67.
- WANG Zhenyao, LIU Yinshui, WANG Wei, et al. Simulation on dynamic characteristics of power stage of high power hydraulic proportional unloading valve[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 62–67.
- [32] 赵继云. 井下高压大流量高水基数字阀及其控制方法研究[R].
- [33] LIU Y S, YANG Y S, LI Z Y. Research on the flow and cavitation characteristics of multi-stage throttle in water-hydraulics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2006, 220(2): 99–108.
- [34] PARK S H. Development of a proportional poppet-type water hydraulic valve[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(9): 2099–2107.
- [35] Tiefenbach Wasserhydraulik. 2/2 proportional solenoid valves-suitable for water and oil hydraulics[EB/OL]. [2024-06-15]. https://tiefenbach-wasserhydraulik.eu/chinesisch/Prospekte%20PDF/Chinesisch/17_C.pdf.
- [36] ZHANG H, ZHAO J Y, WANG Y F. Research on high water-based digital valve with dual-spool and control strategy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2024, 238(2): 819–836.

- [37] WANG H, ZHAO J Y, CAO C, et al. Modeling and simulation analysis of a novel proportional water flow valve with a digital pilot stage[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2024: 09544089231224325.
- [38] 张阳, 周如林, 乔子石, 等. 比例阀: CN116378736A[P]. 2023-07-04.
- [39] 韩明兴. 音圈电机驱动双先导级大流量水压比例插装阀关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
HAN Mingxing. Research on key technology of voice coil motor driven double pilot stage large flow hydraulic proportional cartridge valve[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [40] 廖瑶瑶, 陶泽, 廉自生. 三芯随动式水基比例阀位置跟随特性[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(6): 131-140.
LIAO Yaoyao, TAO Ze, LIAN Zisheng. Position control characteristics of the water proportional valve with three-core follow-up mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(6): 131-140.
- [41] GUO Y N, ZHANG Z, LIU Q Y, et al. Decoupling-based adaptive sliding-mode synchro-position control for a dual-cylinder driven hydraulic support with different pipelines[J]. *ISA Transactions*, 2022, 123: 357-371.
- [42] 赵雄鹏. 液压支架供回液管路压力损失与动态特性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
ZHAO Xiongpeng. Research on pressure loss and dynamic characteristics of hydraulic support supply and return pipeline[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018.
- [43] 车鹏, 吴勇, 赵玉贝, 等. 液压支架供液方式压力损失分析[J]. *液压气动与密封*, 2013, 33(7): 69-72.
CHE Peng, WU Yong, ZHAO Yubei, et al. Pressure loss analysis of hydraulic support different feed liquid manner[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2013, 33(7): 69-72.
- [44] 韩存地, 刘安强, 王亮, 等. 综采工作面超远距离供液管路压力损失研究[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(11): 38-40.
HAN Cundi, LIU Anqiang, WANG Liang, et al. Study on pressure loss of ultra long distance liquid supply pipeline in fully mechanized mining face[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(11): 38-40.
- [45] 叶警涛. 液压支架长距离供液系统动力传递特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
YE Jingtao. Research on power transmission characteristics of hydraulic support long distance liquid supply system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [46] 刘浩. 液压支架长管路供液系统周期演变特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
LIU Hao. Study on cycle evolution characteristics of hydraulic support long pipeline liquid supply system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [47] 郭艳蓉. 液压支架供液管路动态特性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
GUO Yanrong. Dynamic characteristics analysis of liquid supply pipeline of hydraulic support[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [48] 张德生, 谭震, 马英, 等. 一种低背压回液管路控制系统: CN113250727A[P]. 2021-08-13.
- [49] 周如虹, 翟荣涛. 液压支架液压系统优化设计及发展[J]. *煤炭与化工*, 2014, 37(5): 114-115.
ZHOU Ruhong, ZHAI Rongtao. Hydraulic support hydraulic system optimization design and development[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2014, 37(5): 114-115.
- [50] 杨涛, 李文英. 基于压力控制的多泵并联乳化液泵站系统研究[J]. *煤矿机械*, 2008, 29(9): 111-113.
YANG Tao, LI Wenying. Research of multi-emulsion pump station system based on pressure control[J]. *Coal Mine Machinery*, 2008, 29(9): 111-113.
- [51] 翟国栋, 赵振凯, 曲建光, 等. 庞庞塔煤矿综采工作面恒压供液系统研究[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(1): 44-45.
ZHAI Guodong, ZHAO Zhenkai, QU Jianguang, et al. Research on constant pressure liquid supply system of fully mechanized working face in pangpangta coal mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(1): 44-45.
- [52] 王国法, 李占平. 大采高工作面乳化液泵站变频驱动方式优化设计[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(4): 66-69.
WANG Guofa, LI Zhanping. Optimization design of emulsion pump station using variable frequency driving method in working face with high mining height[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(4): 66-69.
- [53] 李然, 刘波, 王大龙, 等. 工作面智能供液技术进展与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 247-253.
LI Ran, LIU Bo, WANG Dalong, et al. Progress and application of intelligent fluid supply technology in working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 247-253.
- [54] 刘波. 基于云边缘架构的集成供液控制系统设计[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(6): 35-41.
LIU Bo. Design of integrated liquid supply control system based on cloud-edge-end architecture[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(6): 35-41.
- [55] 崔耀, 王旭峰, 潘占仁. 上湾煤矿 8.8 m 超大采高智能化综采控制系统研究与应用[J]. *智能矿山*, 2023, 4(4): 45-51.
- [56] 赵康康. 基于变频乳化液泵的智能联动压力控制系统[J]. *煤炭技术*, 2024, 43(2): 235-238.
ZHAO Kangkang. Intelligent linkage pressure control system based on frequency conversion emulsion pump[J]. *Coal Technology*, 2024, 43(2): 235-238.
- [57] 姚伟, 于功江, 宋杰. 高压大流量乳化液泵站压力稳定技术[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(8): 78-79, 83.
YAO Wei, YU Gongjiang, SONG Jie. Pressure stabilization technology of high pressure and high flow emulsion pump station[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(8): 78-79, 83.
- [58] ZHANG C, ZHAO S H, GUO G, et al. Modeling and simulation of emulsion pump station pressure control system based on electro-hydraulic proportional relief valve[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 190-191: 860-864.
- [59] 付翔. 支架运行自适应智能供液理论与技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
FU Xiang. Research on theory and technology of adaptive intelli-

- gent liquid supply for stent operation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [60] 付翔, 王然风, 赵阳升, 等. 基于交叠协同逻辑的液压支架运行自适应稳压供液控制方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1891–1900.
- FU Xiang, WANG Ranfeng, ZHAO Yangsheng, et al. Self-adaptive control method of fluid feeding with steady pressure for hydraulic support based on overlapping synergetic logic[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1891–1900.
- [61] 赵继云, 曹超, 王峰, 等. 一种液压支架智能供液系统及工作方法: CN113719307B[P]. 2022-05-03.
- [62] 任伟. 国外主流矿用乳化液泵站控制系统的介绍与比较[J]. 煤矿开采, 2011(5): 65–67.
- REN Wei. Introduction and comparison of foreign main-stream controlling systems of mine emulsion pump[J]. Coal Mining Technology, 2011(5): 65–67.
- [63] 杨秀宇, 邵斌, 贾少毅, 等. 强背景噪声下滚动轴承轻微磨损故障特征提取方法[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 153–159.
- YANG Xiuyu, SHAO Bin, JIA Shaoyi, et al. Fault feature extraction method for rolling bearing with slight wear under strong background noise[J]. Coal Engineering, 2023, 55(5): 153–159.
- [64] 张振. 液压支架故障诊断与预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- ZHANG Zhen. Research on fault diagnosis and prediction of hydraulic support[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [65] 牛锐祥, 丁华, 施瑞, 等. 一种乳化液泵分级故障诊断方法[J]. 液压与气动, 2021, 45(11): 47–53.
- NIU Ruixiang, DING Hua, SHI Rui, et al. A hierarchical fault diagnosis method for emulsion pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(11): 47–53.
- [66] 马宝玉. 基于压力脉动波形畸变的高水基柱塞泵配流阀弹簧故障识别[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- MA Baoyu. Fault identification of valve spring in high water-based piston pump based on pressure pulsation waveform distortion[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.