

文章编号:1671-251X(2024)S2-0198-04

矿用支护锚杆推进机器人结构设计

王栋, 王利

(济宁市煤矿安全生产监测监控中心, 山东 济宁 272000)

摘要:矿用支护锚杆推进机器人能够自动完成井下锚杆支护任务,提高煤矿巷道施工过程的安全性。分析了支护锚杆推进机器人的滑轨、油缸和旋转电动机等关键结构,从推杆前进、钻轴旋转、锚杆入孔、复位回归等方面介绍了支护锚杆推进机器人运动过程,提出了基于模糊 PID 的锚杆机器人推进运动控制策略。仿真结果表明:引入模糊 PID 控制后,钻杆速度得到了显著提升,迅速且准确地达到了预定的目标值,大约耗时 2 s 即进入稳定运行状态,且稳态时偏差较小,充分证明了采用模糊 PID 控制策略结合 S 曲线加减速方法对钻杆推进速度进行控制,能够达成理想的控制效果和精度。

关键词:矿用机器人; 支护锚杆; 推进结构; 模糊 PID

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Structure design of bolting propulsion robot for mine

WANG Dong, WANG Li

(Jining Coal Mine Safety Production Monitoring and Control Center, Jining 272000, China)

0 引言

随着我国煤矿浅层资源的快速消耗及开采掘进技术的进步,深部开采已经逐渐成为煤矿资源开采的主流模式。但深部开采中的巷道建设工程受到地质条件和岩性的影响,会给施工造成极大困难,巷道掘进过程中的动力灾害严重威胁工作人员的生命安全。

锚杆支护是提高井下巷道稳固性的有效手段^[1-2],很多学者在锚杆支护上进行了大量研究。张大欢等^[3]利用 TBM 施工技术速度快、扰动小和自动化程度高的特点,通过理论计算得到了锚杆和锚索关键支护参数,提高了支护效果。马泽源^[4]对巷道支护方式的现状及存在的问题进行了分析,提出了“注入浆锚杆+大应力锚索”协同支护技术,解决了传统支护方式中支护强度低、支护严重失效等技术难题。臧欢欢^[5]根据较窄巷道工作面锚杆钻孔的需求,研究了窄型液压钻杆车的结构和工作原理,通过测试表明,钻杆车能够在狭窄巷道实现多自由度推进与灵活控制。然而上述研究多是基于手动支护实现,操作困难,危险系数高。

本文提出了一种矿用支护锚杆推进机器人,重点研究其推进结构设计,模拟其在狭窄孔洞内安装支护的过程,设计推进结构模糊 PID 控制策略,提升锚杆入孔的运动灵活性和控制准确度。

1 推进结构关键部件设计

推进结构关键部件包括钻杆底座、滑轨、链传动设备、推进油缸和液压电动机,如图 1 所示。利用导轨式推进方式提高运动控制的精度,旋转电动机为设备钻孔时提供切方向的旋转力,设备的推进力由液压油缸提供。

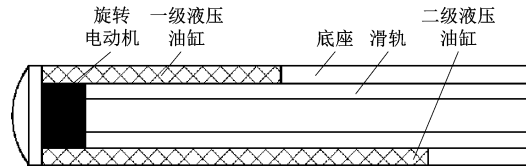


图 1 推进结构组成

1.1 滑轨设计

滑轨是推进机构工作时承受作用力的主要部件,直接影响工作的效率 and 安全性。由于旋转和推进机构件固定在滑轨上,引导钻孔结构在纵向和横向上的给进,所以将滑轨设计为直线导轨型,方便设

收稿日期:2024-10-25;责任编辑:盛男。

作者简介:王栋(1986—),男,山东济宁人,高级工程师,现主要从事煤矿地质测量防治水技术、围岩稳定性控制方面的工作,E-mail:BNBHGSY676876@163.com。通信作者:王利(1980—),男,山东邹城人,高级工程师,现主要从事围岩稳定性控制方面的工作,E-mail:781589428@qq.com。

备在狭窄巷道工作。依据推进的深度设计行程,滑轨行程长度为 0~1 800 mm,在旋转电动机的作用下使推进钻头实现 360° 旋转。滑轨结构如图 2 所示。

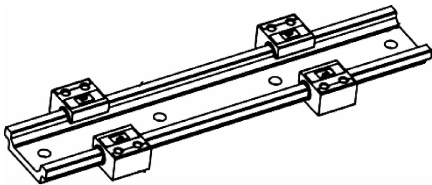


图 2 滑轨结构

滑轨选用优质合金结构钢 40Cr 钢板焊接制作,其抗拉强度 ≥ 980 MPa,屈服强度 ≥ 785 MPa,硬度为 HB301~HB340,使滑轨具有较高的硬度和韧性。

1.2 油缸设计

滑轨两端安装两级推进油缸,协助同完成复杂的推进任务:一级推进油缸主要负责驱动钻杆座进行精确的位移推进;二级推进油缸承担在液压系统的驱动下,促使整个滑轨进行移动的任务。两级油缸结构设计如图 3 和图 4 所示。

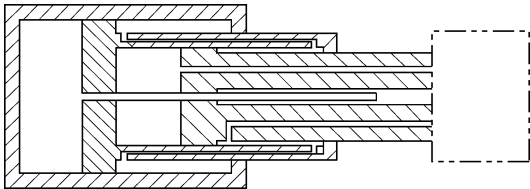


图 3 一级推进油缸结构

一级推进油缸的主要功能是驱动钻杆座在预设的滑轨内进行推进动作,这一过程中,其通过自身的动力输出,引领电动机座及附属部件整体向前移动,进而实现钻孔作业中的关键推进步骤,确保钻孔过程顺利进行。二级推进油缸的主要职责是推动滑轨

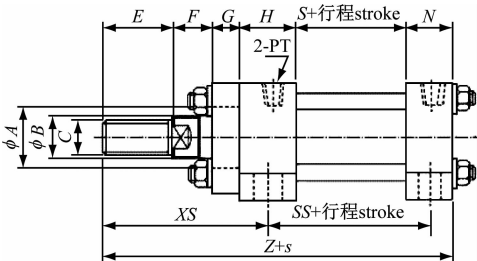


图 4 二级推进油缸结构

进行移动,在二级推进油缸的伸缩作用下,滑轨能够在其底座所限定的行程范围内灵活运动。这种设计不仅确保了在钻孔作业时,滑轨能够精确地将钻杆送达指定的工作位置,同时,在完成钻孔任务后,还能有效地引导钻杆安全退回到初始位置,提高了作业效率和安全性。

1.3 旋转电动机选型

旋转电动机工作时需要克服滑台板座处上方轴

承的滚动摩擦阻力矩,保证钻杆 360° 高精度旋转控制,因此选用 110J12160EC-1000 型三相步进伺服电动机,其全闭环控制、低发热、高效率、低噪声、大力矩、高速度、平滑精准的高速响应及高可靠性等优点,能够满足本文旋转电动机的功能设计要求。旋转电动机关键参数见表 1。

表 1 旋转电动机关键参数

参数	值	参数	值
保持转矩/(N·m)	18	转子惯量/(kg·cm ²)	15.6
步距角/(°)	1.2	质量/kg	9.6
额定电压/V	380	机身长度/cm	156
额定电流/A	6.6		

2 锚杆推进运动过程

- 锚杆推进机器人预期动作过程如下。
- 1) 推杆前进。此时一级推进油缸输出动力,引领电动机机座及附属部件整体向前移动。
 - 2) 钻轴旋转。此时旋转电动机工作,带动钻头 360° 旋转,促使紧固于主轴末端的执行器开始旋转,直至预紧力电动机的轴线线精准地与预设目标锚孔的中心轴线重合,从而确保后续操作的精确性与对准度。
 - 3) 锚杆入孔。锚杆置入,电动机启动,通过精密的同步带传动机制,驱动双丝杠同步旋转。这一动作促使原本静止的预紧力电动机轴端开始缓缓前移,将锚杆平稳而准确地推入预定的目标锚孔中。待锚杆完全进入锚孔后,预紧力电动机随即启动,其轴端开始旋转,进而带动螺母旋转,实现锚杆的紧固与预紧,确保锚固的稳固性与可靠性。
 - 4) 复位回归。锚杆推入工作完成后,锚杆置入电动机反转,预紧力电动机归于初始位。

3 基于模糊 PID 的推进运动控制

在众多实际作业场景中,被控对象常因负载波动及外部环境的动态变化,导致其特性参数发生不可预测的调整,这极大地挑战了传统经典 PID 控制方法的效能与稳定性。为有效应对这一难题,模糊自适应 PID 控制理论应运而生。其融合了模糊逻辑与自适应控制策略,通过模糊推理机制,能够智能、动态地调整 PID 控制器中的比例、积分和微分参数,以达到最优控制效果。相较于经典 PID 控制,模糊自适应 PID 不仅展现出更高的灵活性,还显著增强了系统对复杂多变环境的适应能力,从而确保了控制过程的精确性与稳定性。模糊 PID 控制器结构如图 5 所示。

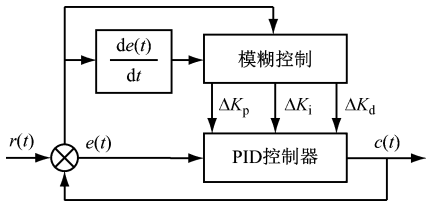


图 5 模糊 PID 控制器结构

3.1 推进运动速度仿真模型

研究表明，直线加减速策略在时间上展现出显著优势，能够迅速完成动作。然而，当进给速度提升至某一阈值时，会伴随电动机抖动现象，影响运行稳定性。相比之下，S 曲线型加减速方法尽管在建模上更为复杂，且因速度变化频繁而耗时较长，但确保了电动机在整个过程中保持平稳运行，有效优化了矩频特性，这一特点在实际工程应用中表现尤为突出，展现出卓越的性能和稳定性。建立基于 S 型曲线的钻杆运动速度控制传递函数：

$$G(s) = \frac{251.08}{s^2 + 2.23s + 251.08} \frac{1.18}{s + 2.13} \quad (1)$$

利用 Matlab/Simulink 平台，根据式(1)及其对应的 PID 控制策略，建立推进系统运动模糊 PID 控制仿真模型，如图 6 所示。

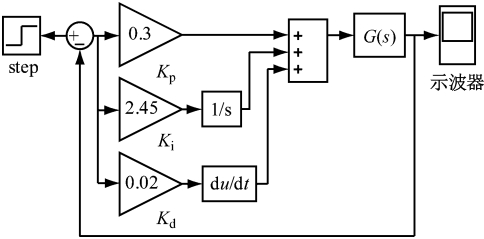


图 6 模糊 PID 仿真模型

根据模糊控制器的组成，按照步骤依次完成系统的模糊化、模糊推理和解模糊。

1) 模糊化。建立误差 e ，误差变化率 ec ，比例变化量、积分变化量和微分变化量的语义变量，此处 ec 的语言变量论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ，根据经验设置， ΔK_p 的语言变量论域为 $\{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 1, 2, 3\}$ ， ΔK_i 语言变量论域为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ ， ΔK_d 语言变量论域为 $\{-0.03, -0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03\}$ 。

2) 建立模糊控制规则。模糊控制规则用来调节 PID 参数，本文使用“IF...AND...THEN”的模糊控制规则形式，结合控制经验得到模糊控制表，见表 2—表 4。

3) 解模糊。解模糊是一个过程，旨在通过多样化的技术手段来优化隶属度函数的计算结果输出，从而实现对控制对象更为精确的管理与调控。本文选用了重心法作为解模糊的主要方法。通过式(2)

能系统地计算出最符合实际情况的控制指令。

表 2 ΔK_p 模糊规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 ΔK_i 模糊规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4 ΔK_d 模糊规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n u_c(z_i) z_i}{\sum_{i=0}^n u_c(z_i)} \quad (2)$$

通过模糊自适应方法整定 PID 参数，最终得到比例系数 $K_p=0.3$ ， $K_i=2.45$ ， $K_d=0.02$ 时控制效果较为理想，相应的输出结果如图 7 所示。可看出，在未实施模糊 PID 控制策略时，系统的响应输出震荡明显，不稳定状态持续了约 3 s 后才逐渐趋近于期望状态，表明系统的初始调控性能欠佳。引入模糊 PID 控制后，钻杆速度得到显著提升，迅速且准确地达到了预定的目标值，约耗时 2 s 系统即进入稳定运行状态，且稳态时偏差较小，充分证明了采用

(下转第 214 页)

对人体的伤害,如为矿工配备耳塞和耳罩。耳塞是插入外耳道的小型防护装置,其材料一般具有良好的弹性和吸音性能,如硅胶耳塞。耳塞通过堵塞外耳道,减少进入耳朵的声能。耳罩则是覆盖整个外耳的防护装备,内部有吸音材料和密封结构,通过形成一个相对安静的空间来降低传入耳朵的噪声强度。另外,合理安排矿工在高噪声环境中的工作时间,实行轮岗制度,减少矿工连续暴露在高噪声环境中的时间,降低噪声对人体的累积伤害。

5 结论

1) 围绕矿井噪声源对人体的损害及云南省煤矿噪声治理的现状,深入探讨了自动识别与噪声控制技术,旨在应对矿井复杂环境下日益突出的噪声问题,改善井下工作环境,保障矿工健康,提升矿井生产的安全性与效率。

2) 阐述了矿井噪声源自动识别技术,从井下关键区域部署传感器采集数据、数据处理、特征提取、模式识别分类、定位算法确定位置及结果输出反馈等环节,形成完整的自动识别流程,为精准定位噪声源提供手段。同时,针对矿井噪声控制技术,从声源控制、传播途径控制、接收者防护 3 个层面入手,探

(上接第 200 页)

模糊 PID 控制策略结合 S 曲线加减速方法对钻杆推进速度进行控制,能够达到理想的控制效果和精度。

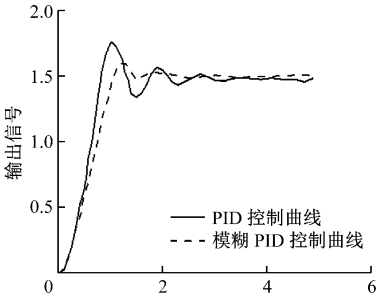


图 7 仿真输出曲线

4 结语

为自动完成井下锚杆支护任务,设计了矿用支护锚杆推进机器人的滑轨、油缸和旋转电动机等关

键结构,分析了钻杆推进的运动方式,建立了模糊 PID 钻杆推进速度控制模型,分析了其输出性能,证明了推进运动控制方法的可行性。

3) 矿井噪声源自动识别与控制技术的综合应用,有望克服现有噪声治理中的困难,为云南省矿山企业提供切实可行的噪声治理思路 and 方案,提高井下噪声治理水平,改善井下工作环境,保护矿工身心健康,保障矿井安全生产。未来仍需进一步关注噪声识别和控制相关技术的成本优化、技术完善及推广普及,不断提升矿井噪声治理的整体水平。

参考文献:

[1] 郑倩. 煤矿设备噪音对矿工的危害及防治[J]. 现代商贸工业, 2014, 26(7): 180-181.

[2] 王浩, 蒋承林, 史莉莉. 煤矿井下噪音危害分析及对策[J]. 中国安全生产科学技术, 2011(12): 183-187.

[3] 张小正, 徐廷廷. 任意形状管道内噪声源识别的等效源法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(12): 1604-1610.

[4] 姜增辉. 基于 LabVIEW 的噪声源识别方法研究及系统开发[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.

[5] 黄鹏程, 马吉恩, 郑国丽, 等. 自通风型牵引电机气动噪声特征分析与控制研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 1-8.

参考文献:

[1] 任有为. 煤矿支护锚杆推进机器人关键结构设计[J]. 装备制造技术, 2023(11): 212-214.

[2] 吴志强. 巷道支护用小型锚杆推进机器人的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

[3] 张大欢, 胡阳, 刘震宇, 等. TBM 掘进煤矿深井巷道锚杆支护设计[J]. 江苏建筑, 2023(5): 87-89.

[4] 马泽源. 应力区巷道“注浆锚杆+大应力锚索”协同支护技术应用[J]. 机械管理开发, 2023, 38(10): 291-293.

[5] 臧欢欢. 窄型液压锚杆钻车推进及钻孔机构研发与应用[J]. 同煤科技, 2017(2): 13-15.