

工程勘察钻进数据采集设备的 自动控制系统设计与应用

赵建勃, 罗帅训, 董朝晖, 刘旭光
(陕西西探地质装备有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要:本文阐述了工程勘察钻进数据采集设备的研制背景和性能要求。重点介绍了工程勘察钻进数据采集设备的主要结构和性能参数,工程勘察钻进数据采集设备的电气控制系统及重要电器元件选型。详细阐述了钻头输出恒定转速的自动闭环控制方案。最后经过施工现场试验,验证了工程勘察钻进数据采集设备能够输出恒定转速,精确采集并存储钻头转速、扭矩、钻进速度、钻进压力等 4 个主要钻进参数。

关键词:PLC;电液比例控制;PID 控制;自动化;智能化

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)12-0023-07

Design and application of the automatic control system for geo-technical drilling data acquisition equipment

ZHAO Jianbo, LUO Shuaixun, DONG Zhaohui, LIU Xuguang
(Shaanxi Xitan Geological Equipment Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710089, China)

Abstract: This paper describes the development background and performance requirements for geotechnical drilling data acquisition equipment. The main structure and performance parameters of geotechnical drilling data acquisition equipment are introduced together with the selection of the electrical control system and the important electrical components. The automatic closed-loop control scheme for constant rpm output at the drill bit is described in detail. Field test has verified that the geotechnical drilling data acquisition equipment can output a constant drilling rate, and accurately collect and store four main drilling parameters.

Key words: PLC; electro-hydraulic proportional control; PID control; automation; intelligence

0 引言

随着我国经济和基础设施建设的发展,岩体工程(如边坡工程、硐室工程、基础工程等)应用越来越广泛,为了快速、准确地获取岩体力学的基本参数,识别岩体结构面,确定岩体质量,为工程节约时间和成本。通过在施工现场采集岩体钻进过程中的钻头转速、扭矩、钻进速度、钻进压力 4 个主要钻进参数,建立其与岩体强度、岩体力学参数、岩体级别和岩体结构面之间的关系,开发工程勘察专家系统,实现快速获取岩体力学基本参数,识别岩体级别及岩体结构面,快速确定岩体质量,以节约施工时间和成本,

进而提高我国岩土工程勘察信息化、自动化、智能化水平。

工程勘察钻进数据采集设备主要用来准确采集钻进过程中的钻头转速、扭矩、钻进速度、钻进压力 4 个主要参数,并将这 4 个主要参数上传到上位机专家系统库中,该专家系统是基于《工程岩体分级标准》(GB/T 50218-2014)规范,具有岩石级别智能识别模型、岩体基本力学参数识别模型,岩体结构面智能识别模型、岩体质量等级识别模型。通过专家系统库进行岩体力学基本参数和岩体结构面识别,确定岩体质量等级,给出最优钻进策略,及时调整钻

收稿日期:2020-07-10; 修回日期:2020-11-23 DOI:10.12143/j.tkge.2020.12.004

作者简介:赵建勃,男,汉族,1977 年生,地质机械专业,从事地质机械研发和销售管理工作,陕西省西安市阎良国家航空基地迎宾大道 32 号, xazjb@163.com。

引用格式:赵建勃,罗帅训,董朝晖,等.工程勘察钻进数据采集设备的自动控制系统设计与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):23-29.

ZHAO Jianbo, LUO Shuaixun, DONG Zhaohui, et al. Design and application of the automatic control system for geo-technical drilling data acquisition equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(12):23-29.

头转速和钻进速度,提高钻进效率^[1-2]。

1 工程勘察钻进数据采集设备设计要求

工程勘察钻进数据采集设备主要功能:

(1)能够精准快速地采集钻进过程中的钻头转速、扭矩、钻进速度、钻进压力4个钻进参数,进而验证4个钻进参数与岩土力学参数的关系。

(2)用户可以分别设定两个不同钻进参数,来测量剩余两个钻进参数的变化。

(3)当参数设定完成后,该设备能够自动钻进,不需要人为干涉。

(4)钻头转速要求0~1000 r/min,精度要求1 r/min。

(5)钻头扭矩要求0~1000 N·m,精度要求1 N·m。

(6)钻头钻进速度要求0.1~100 mm/s,精度要求0.1 mm/s。

(7)钻头钻进压力0~10 kN,精度要求1 N。

(8)需具备数据传输和数据存储功能,将4个钻进参数传输给上位机存储起来,方便用户做后期数据处理和数据分析工作。

(9)能够显示4个钻进参数的变化曲线和设备的运行状态。

(10)能够满足在复杂环境的施工现场进行参数采集,能够对岩体进行0°~90°参数采集。

(11)参数采集过程中需要整套设备固定稳定。

(12)能够移动方便,对不同采集点进行参数采集。

2 工程勘察钻进数据采集设备结构和技术参数

2.1 工程勘察钻进数据采集设备结构

工程勘察钻进数据采集设备机械结构主要包括:底盘、机架、操作台、电机控制柜、油箱、电机油泵动力单元、立柱托架、立柱、动力头、上下夹持器。如图1所示。

2.2 工程勘察钻进数据采集设备技术参数(见表1)

3 工程勘察钻进数据采集设备控制系统设计

3.1 工程勘察钻进数据采集设备电气控制系统

工程勘察钻进数据采集设备控制系统以PLC控制器作为该触探仪的控制核心,各动作命令开关主要用于输入控制命令,包括电动机的启动停止命

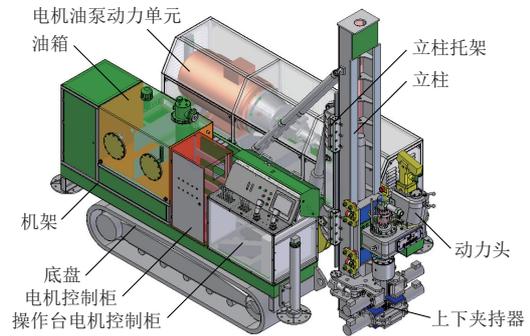


图1 工程勘察钻进数据采集设备结构

Fig.1 Structure of geotechnical drilling data acquisition equipment

表1 工程勘察钻进数据采集设备技术参数

Table 1 Technical parameters of geotechnical drilling data acquisition equipment

名称	参数
动力头最大行程/mm	1700
额定提升力/kN	40
允许最大加压力/kN	18
动力头快速升降/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~22/0~28
动力头慢速升降/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~2.3/0~4.3
主泵压力/MPa	28
副泵压力/MPa	18.5
整机质量/kg	7300
外形尺寸(垂直时)/mm	4320×2200×4100
外形尺寸(运输时)/mm	4600×2200×1900
钻孔倾角/(°)	水平0~90,前倾5
钻孔深度/m	50
常用钻杆直径/mm	42/50
电机功率/kW	90
最大扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	2458
动力头转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~1000

令、称重命令、加压减压命令、夹持器命令、卸扣命令、自动运行开始命令。各压力传感器主要用于采集液压系统工作压力监控整个液压系统的压力情况;液压油缸的给进压力和提升压力,用于计算液压油缸提供的给进力和提升力。无线压扭复合传感器测量钻进过程中钻头钻进压力和钻头扭矩,转速传感器测量钻头转速、位移传感器测量钻头钻进速度,数据采集卡将这4组信号采集后通过RS232串口通信传送给PLC控制器用于计算、存储、控制设备的钻进动作。PLC控制器通过控制回转正反比例阀实现钻头的回转;控制快速/慢速提升给进比例阀实现钻头提升和钻进动作;通过比例减压阀实现钻头在钻进时的钻进压力控制;控制比例溢流阀实现钻头回转时的扭矩限制。PLC控制可以与显示器进行通信,将设备的运行数据实时显示,并且可以

设定钻进参数进行人机交互。PLC 控制器可以和上位机进行通信,将采集到的 4 组数据上传到上位机的专家系统库,专家库经过计算处理,将优化好的控制策略传回给 PLC 控制器,PLC 控制器再控制设备各个动作。数据记录仪可以在本地实时记录设备钻进过程中采集到的 4 组参数,防止数据丢失^[3-4]。系统框图如图 2 所示。

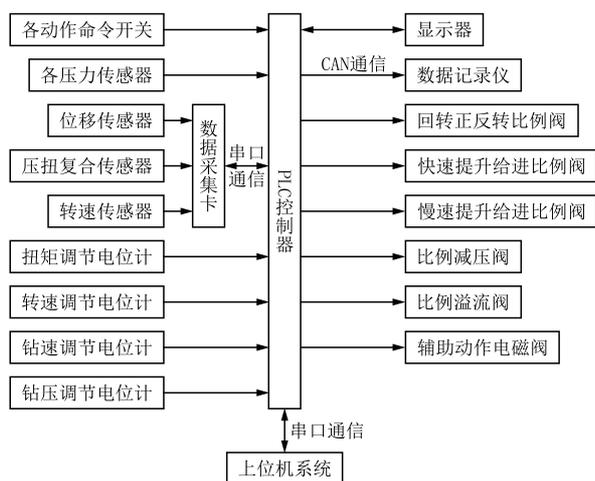


图 2 工程勘察钻进数据采集设备电气控制系统框图

Fig.2 Block diagram of the electrical control system for geotechnical drilling data acquisition equipment

作为控制系统核心的 PLC 控制器选用贺德克公司的 TTC200 型高速控制器(见图 3),此款控制器可靠性高,非常适用于施工环境的复杂的野外施工。该控制器 CPU 为 MPC555(32 bit)40 MHz;数据存储空间 EEPROM 可支持 100 万次擦写;具有 2 路 CAN2.0B,1 路 RS232,1 路 LIN,丰富的通信接口;防护等级为 IP65;具有丰富的 IO 接口:8 路模拟量输入 AI(0~5 V,10 bit),可设置为电阻、电压、电流型输入;12 路模拟量(0~10 V,10 bit)/开关量输入;8 路开关量输出 PWM(2.5 A)具有电流反馈,开路检测、短路保护功能;4 路开关量输出 PWM(4 A);16 路开关量输出 DO(4 A)具有开路检测、短路保护功能。

钻头的转速通过安装在回转主轴上的转速传感器进行检测,转速传感器型号为 S12(见图 4),具有分辨率高、频响高等优点,响应频率为 0.3 Hz~10 kHz、可靠性高。

钻头的钻进位移和钻进速度通过安装在给进液压油缸内部的磁致伸缩传感器进行检测,磁致伸缩



图 3 TTC200

Fig.3 TTC200



图 4 S12 转速传感器

Fig.4 S12 rpm sensor

传感器是应用磁致伸缩技术研制而成的,广泛应用于测量精度高和测量可靠的位移中,具有精度高、分辨率高、重复性好、稳定可靠、非接触式测量、寿命长、安装方便、环境适应性强等特点。

本设备选用 MTS 公司的磁致伸缩传感器,型号为 HT-SGLADM2431700K0S。其性能指标为:

非线性误差: $<0.05\%F.S$;

重复性误差: $<0.002\%F.S$;

迟滞: $<0.002\%F.S$;

分辨率:采用 16 Bit D/A 转换。

钻头的钻进压力和回转扭矩通过完整的无线压扭复合传感器检测,无线压扭复合传感器主要由无线压扭复合传感器和无线接收模块组成(如图 5 所示)。无线网络系统的发射端采用 2 节 5 号干电池供电即可,传输频率为 300 次/s 时,电池能连续不间断使用 3~5 d;系统通过软件可设定自动休眠功能,如果接收端关机,传输端将会自动进入休眠状态,其安装位置如图 6 所示。

设备采集的 4 个钻进参数可以通过安装在操作台上的 RS232 接口传送上位机(如图 7 所示),还可以保存到安装在操作台内部的数据记录仪中(如图 8 所示)。



图5 复合压扭传感器

Fig.5 Composite pressure and torsion sensor



图6 转速传感器和复合压扭传感器安装位置

Fig.6 Installation position of the rpm sensor and the composite pressure and torsion sensor



图7 上位机通讯接口

Fig.7 Upper computer communication interface



图8 数据记录仪

Fig.8 Data recorder

4 钻头恒定转速自动控制系统

专家系统库中岩体基本力学参数识别模型,是通过钻进参数与岩石力学参数之间的理论关系建立起来的,在进行岩石钻进过程中,若钻头的转速恒定,钻头在岩石内部受到的压力和扭矩,对于同一种岩石来说是恒定的。所以采集钻进参数时,需要钻头保持恒定转速,采集钻头扭矩和钻头压力。该设备采用液压负载敏感反馈技术、电液比例控制技术及PID控制技术来实现钻头恒定转速的闭环控制。

液压负载敏感控制技术,在设备待机状态时,使泵工作在最小流量输出状态,减小功率损失,减少系统发热,具有良好的节能效果。液压负载敏感系统无论负载如何变化,系统压力都可以随着负载的变化而变化,泵输出的流量只和阀芯行程有关,只要阀芯行程保持不变,系统的流量是恒定的。

电液比例控制是介于普通液压阀的开关式控制和电液伺服控制之间的控制方式。电液比例控制能够实现对流量和压力连续地、按比例地跟随控制信号变化,其性能优于开关式控制。与电液伺服控制相比,其控制精度和响应速度虽然较低,但成本低、抗污染能力强。

PID控制是控制领域中最常用的控制策略,其通过对目标值和实际值的偏差进行比例、积分、微分计算使实际值达到设定目标值。PID控制器相对简单,参数易于调整,稳定性好^[5-12]。

钻头回转液压系统由阀控马达液压系统组成,主要包括变量柱塞液压泵、电液比例换向阀、定量柱塞液压马达3部分。其原理如图9所示。通过电液比例换向阀的阀芯行程控制液压泵的输出流量,控制液压马达的回转速度,从而控制钻头的转速。电液比例换向阀的阀芯行程根据PLC控制器输出的控制电流的大小按比例动作。

电液比例控制系统本身是开环控制系统,比例放大器根据设定值控制电液比例换向阀打开,调定某一固定的流量,从而使液压马达输出一个恒定的回转速度。但是随着地层的情况变化,加载到钻杆上的负载也是不断变化,马达的输出扭矩也会随之发生变化,从而使马达的回转速度也会发生变化,无法达到恒定回转速度的条件^[13-15]。

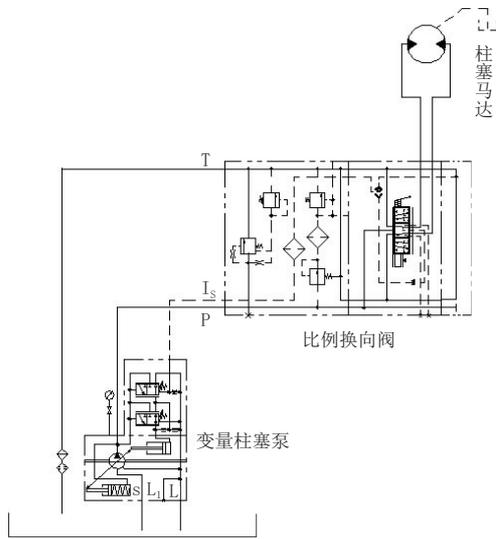


图 9 钻头回转液压控制原理

Fig.9 Schematic diagram of hydraulic control of drill bit rotation

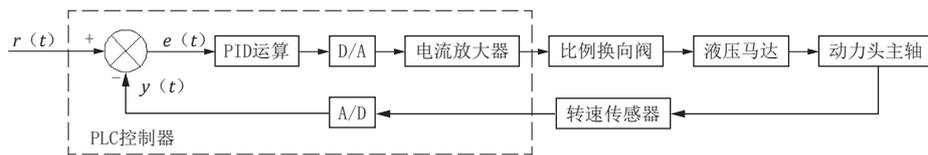


图 10 PID 闭环控制系统

Fig.10 Block diagram of the PID closed loop control system

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_1} \sum_{i=0}^n e(i) + \frac{T_D}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} + u_0$$

$$= u_p(n) + u_i(n) + u_d(n) + u_0$$

式中: $u_p(n) = K_p e(n)$ 称为比例项; $u_i(n) = K_p(T/T_1) \sum_{i=0}^n e(i)$ 称为积分项; $u_d(n) = K_p(T_D/T) [e(n) - e(n-1)]$ 称为微分项。

由上式计算出来的 $u(n)$ 为第 n 次采样后控制器输出的控制量,但是为了计算出 $u(n)$,需要本次与上次的偏差信号 $e(n)$ 和 $e(n-1)$,而且积分项中要把历次偏差信号 $e(i)$ 相加,需要占用 PLC 内部寄存器很大的空间,将上式递推写成下式:

$$\begin{cases} \Delta u(n) = a_0 e(n) + a_1 e(n-1) + a_2 e(n-2) \\ a_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_1} + \frac{T_D}{T} \right) \\ a_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T} \right) \\ a_2 = -K_p \frac{T_D}{T} \end{cases}$$

为了达到恒定回转速度的条件,在液压控制系统基础上增加 PID 闭环控制系统^[9],PID 闭环控制系统框图如图 10 所示。

PID 控制器的方程如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

式中: $u(t)$ ——控制器输出的信号; $e(t)$ ——给定值和实际值之间的偏差信号; K_p ——比例系数; T_1 ——积分增益; T_D ——微分增益。

上式为模拟系统模型,本系统是以 TTC200 控制器为基础建立的 PID 控制系统,需要根据采样时刻对偏差值进行数字化,写成离散形式的 PID 方程,然后再根据离散方程进行控制程序的设计。离散化后控制量的计算公式如下:

根据上式,本系统的 PID 调节过程为:PLC 控制器首先检查设定的钻头转速和实际钻头转速的偏差,当偏差较大时,PID 调节器开始起作用,此时起主要作用的是比例调节环节,比例调节可以缩短系统的响应时间。此时 PLC 控制器根据 PID 调节器输出跨度较大的电流,驱动阀芯开口度增大,增加比例阀的流量,使液压马达的输出速度快速接近设定值。当偏差较小时,比例调节停止,积分环节开始起调节作用,此时 PLC 控制器根据 PID 调节器输出跨度较小的电流,使液压马达输出的速度缓慢接近设定值,直到达到设定值^[10-12]。

5 工程勘察钻进数据采集设备工程现场地应用

试验地点为陕西省佛坪县大河坝乡引汉济渭工程三河口水利枢纽施工现场(见图 11)。现场试验时,采用设定钻头转速和钻头钻进速度,分别为 300 r/min 和 0.3 mm/s,400 r/min 和 0.5 mm/s。参数通过显示器参数设置界面进行设定(如图 12 所示)。设定好参数之后,按下开始按钮,设备按照设定好的参数自动进行回转钻进。采集到的数据会以 Excel 表格的型式保存到 U 盘当中(参见表 2、表 3),方便

技术人员后期进行数据分析。当结束时,按下停止按钮,自动钻进结束。



图 11 施工现场图片

Fig.11 Pictures of construction site



图 12 显示器参数设置界面

Fig.12 Parameter setting on display interface

表 2 转速 300 r/min, 钻速 0.5 mm/s

Table 2 Rpm at 300r/min, with penetration rate at 0.5mm/s

时间/ s	转速/ (r · min ⁻¹)	扭矩/ (N · m)	钻压/ kN	钻速/ (mm · s ⁻¹)	钻头位 移/m
116.0	293	46	3.5	0.5	0.087
116.5	293	44	3.3	0.5	0.088
117.0	294	44	3.3	0.5	0.088
117.5	293	45	3.3	0.5	0.089
118.0	293	45	3.3	0.5	0.089
118.5	296	44	3.1	0.5	0.090
119.0	303	40	3.3	0.5	0.090
119.5	303	47	3.2	0.5	0.090
120.0	303	47	3.2	0.5	0.091
120.5	305	44	3.3	0.5	0.092

表 3 转速 400 r/min, 钻速 0.5 mm/s

Table 3 Rpm at 400r/min, with penetration rate 0.5mm/s

时间/ s	转速/ (r · min ⁻¹)	钻压/ kN	钻速/ (mm · s ⁻¹)	钻头位移/ m
300.0	393	1.6	0.5	0.227
300.5	392	1.5	0.5	0.228
301.0	392	1.5	0.5	0.228
301.5	392	1.6	0.5	0.229
302.0	392	1.7	0.5	0.229
302.5	392	1.7	0.5	0.230
303.0	392	1.7	0.5	0.230
303.5	392	1.7	0.5	0.230
304.0	392	1.8	0.5	0.231
304.5	392	1.8	0.5	0.231

根据厂内和现场试验,工程勘查钻进数据采集设备还有一些需要改进的地方:

(1)设备质量偏大,运输成本高,移动较为笨重。依据现场试验实际情况,设备不需要 90 kW 的能力,今后改进需减小设备功率,从而减小设备的体积和质量,降低运输成本,便于搬迁。

(2)为保证设备的可靠性,显示器选用了按钮操作,操作比较繁琐,尤其在设置参数时更为麻烦,今后可考虑触摸屏操作。

(3)PLC 控制器和数据采集卡的模拟量采集 IO 口精度不够,PLC 控制器 IO 口精度是 10 Bit,数据采集卡 IO 口精度为 12 Bit,对于钻头的位移测量和钻进速度测量略显不足。

6 结语

通过工程试验,工程勘查钻进数据采集设备电气系统设计合理,可靠。钻机可以根据设定的钻头转速和钻头钻进速度,能够自动进行钻进。PLC 控制器根据钻头转速的 PID 控制策略可以控制钻头输出恒定转速,使设备可以精确采集钻进过程中的 4 组主要钻进参数,并保存记录。工程勘查钻进数据采集设备是对工程勘查设备自动化、智能化的尝试,对于勘查类施工设备要想实现真正的自动化,笔者认为需要熟悉勘查的施工工艺,能够根据施工工艺和地内复杂多变的负载情况,提出适合于勘查类设备的控制算法,本文只是采用常规 PID 控制器算法,并不是最优的控制算法,设备自动化控制有待提高。随着国家大力发展人工智能,互联网,物联网,5 G,大数据、云平台技术,将这些先进技术应用到工程勘查方面,通过这些技术获取海量的钻进参数数

据和岩土力学参数数据,建立专家系统库,建立合适的数学模型,为设备建立“大脑”,实现设备的智能化。

参考文献 (References):

- [1] 何明明.基于旋切触探技术的岩体力学参数预报研究[D].西安:西安理工大学,2017.
HE Mingming. Research on the prediction of rock mass mechanics characteristic based on the rotary penetration technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [2] 薛倩冰,张金昌.智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):9-14.
XUE Qianbing, ZHANG Jinchang. Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4):9-14.
- [3] 刘江,谭宝成,牟云霞,等.PLC在电液比例控制系统中的应用[J].机电一体化,2008(1):77-79,88.
LIU Jiang, TAN Baocheng, MOU Yunxia, et al. PLC in electro-hydraulic proportional control system application [J]. Mechatronics, 2008(1):77-79,88.
- [4] 廖常初.大中型PLC应用教程[M].北京:机械工业出版社,2005.
LIAO Changchu. Large and medium sized PLC application course[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [5] 张海平.液压速度控制技术[M].北京:机械工业出版社,2014.
ZHANG Haiping. Hydraulic speed control technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [6] 孙保山,殷新胜,田宏亮,等.基于负载反馈技术的履带式钻机液压系统[J].煤炭科学技术,2011,39(3):95-99.
SUN Baoshan, YIN Xinsheng, TIAN Hongliang, et al. Hydraulic system of crawler type drilling rig based on load feedback technology[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3):95-99.
- [7] 任俊杰,李永霞,李媛,等.基于PLC的闭环控制系统PID控制器的实现[J].制造业自动化,2009,31(4):20-23.
REN Junjie, LI Yongxia, LI Yuan, et al. The realization of PID controller in closed-loop control system based on PLC[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(4):20-23.
- [8] 黄虎.全液压钻机负载敏感智能控制系统研究[D].成都:成都理工大学,2015.
HUANG Hu. Research on load sensitive control system of full hydraulic drilling rig [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [9] 刘永,杨彬.液压系统流量PID闭环控制实验[J].湖北汽车工业学院学报,2016,30(1):52-55,59.
LIU Yong, YANG Bin. Study on closed loop control experiment of hydraulic system flow PID[J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2016, 30(1):52-55,59.
- [10] 廖亦凡.机械臂液压驱动系统设计与模糊免疫PID控制策略研究[D].长沙:湖南师范大学,2006.
LIAO Yifan. Manipulators, hydraulic driven system designing and research on fuzzy immune PID control strategy [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2006.
- [11] 余祖耀,陈壮.基于S7-300的比例阀控液压缸的PID静态补偿控制[J].机械与电子,2016,34(4):43-50.
YU Zuyao, CHEN Zhuang. PID static compensation control strategy of hydraulic cylinder controlled by proportional valve based on S7-300[J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(4):43-50.
- [12] 陈小军,吴向东.基于液压比例位置控制的数字PID设计与实现[J].机械工程与自动化,2009(6):126-128.
CHEN Xiaojun, WU Xiangdong. Design and realization of digital PID control algorithm for hydraulic proportional position control system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(6):126-128.
- [13] 贺鹏.电液比例速度控制系统的设计及特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2002.
HE Peng. Design and characteristics of electro hydraulic proportional speed control system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002.
- [14] 许益民.电液比例控制系统分析与设计[M].北京:机械工业出版社,2005.
XU Yimin. Analysis and design of electro-hydraulic proportional control system [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [15] 宁赛.电液比例泵控马达速度控制策略研究[D].北京:北京理工大学,2005.
NING Sai. Control method research on the electro-hydraulic proportional pump-controlled motor speed system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.

(编辑 王建华)