

基于满意 PID 控制的 MCMS-10 试验机电控系统研究 *

胡 涑¹, 吴怀超², 殷 松², 陈 华³

(1. 贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025;

3. 重庆机电职业技术学院 电气与电子工程学院, 重庆 402760)

摘 要: 为揭示高压轴向柱塞泵滑靴副摩擦磨损性能, 需提供 1 台高精度、高性能以及主轴转速恒定可靠的滑靴副摩擦磨损试验机。但在测试滑靴副时, 试验机主轴的速度调控和位移的精确控制非常难以把握。当试验机主轴转速在 3 000 r/min 的基础上升高时, 试验机油温急剧升高, 会对滑靴副性能测试的精度产生极大的影响。针对 MCMS-10 试验机的电控系统, 设计出硬件图, 采用满意 PID 算法控制其主轴转速和位移两个参数。最后通过组态软件设计实时监控画面并开展试验分析。结果表明: 将满意 PID 算法运用到 MCMS-10 试验机电控系统中, 不但精度非常高, 而且在主轴转速约为 3 200 r/min 时, 油温始终保持在 65 ℃ 左右。

关键词: 高压柱塞泵; 滑靴副摩擦试验机; 电控系统; 满意 PID 算法

中图分类号: TM 34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0113-07

Research on Electronic Control System Based on Satisfactory PID Control in MCMS-10 Tester *

HU Lai¹, WU Huaichao², YIN Song², CHEN Hua³

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education,

Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing Electromechanical Vocational Institute, Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to reveal the friction and wear performance of the slipper pair of high-pressure axial piston pump, a high-precision, high-performance the slipper pair friction tester with electronic control and a stable and reliable spindle speed was required. However, in the slipper pair test, it was very difficult to realize the precise control of the spindle speed and the tester displacement. And when the spindle speed of the tester increased from 3 000 r/min, the oil temperature of the tester rose sharply, which would have a great influence on the accuracy of the slipper pair performance test. Aiming at this problem, the electronic control system for the MCMS-10 testing machine was studied, the control scheme of the electrical control system was analyzed, the hardware diagram of the electronic control system was designed, and the satisfactory PID algorithm was used to control the rotation speed and displacement of the testing machine's main spindle. Finally, through the configuration software real-time monitoring and experiment, it was found that, when the satisfactory PID algorithm was applied to the MCMS-10 test control

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB046404); 贵州省高层次创新型人才培养计划项目(黔科合平台人才【2016】5659)

作者简介: 胡 涑(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机床电气控制。

吴怀超(1975—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为摩擦、润滑工程与电液控制技术。

system, not only the accuracy was very high, but $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the spindle speed around $3\ 200\text{ r/min}$. This study could be a good reference the oil temperature was always kept at around for similar researches in the future.

Key words: high pressure plunger pump; slipper pair friction tester; electronic control system; satisfactory PID algorithm

0 引言

高压轴向柱塞泵不但广泛应用于工程机械、冶金矿山设备和石油化工设备等主机行业,而且在水利工程、航海物流等领域亦有着大量的应用。高压轴向柱塞泵的工作方式千变万化。滑靴副作为其 3 大摩擦副之一,在高速、高压等工况恶劣的条件下,极易发生磨损、胶合,直接影响柱塞泵的可靠性及使用寿命。1983 年,日本学者 Naohiro 等^[1]在斜盘转动的模型泵中实测了滑靴副的油膜厚度。土耳其学者 Koc 等^[2-4]分别在 1992 年、1996 年和 1997 年对油膜厚度、润滑特性和摩擦磨损程度进行了测量试验和分析。1989 年,韩德才等^[5]对实际工况下的滑靴副油膜动态特性做了相关的试验研究。虽然国内外均在实际工况下对滑靴副摩擦磨损测试进行了分析,但对摩擦磨损试验平台进行的研究较少。在国内,只有哈尔滨工业大学建立了滑靴副摩擦磨损润滑特性试验台,但与实际情况还有一定差距。目前,我国对于 35 MPa 及以上的高压轴向柱塞泵的研究技术不完善,其原因是滑靴副摩擦磨损性能测试平台中的控制精度还达不到理想的要求。大多数滑靴副摩擦试验机主轴转速在 $3\ 000\text{ r/min}$ 的基础上升高时,油温开始急剧升高,同时其试验机主轴的位移和速度不稳定,对于滑靴副试验精度影响非常大。

为此,本文将对 MCMS-10 滑靴-斜盘摩擦磨损试验机电控系统进行研究。设计其试验机整机的电控系统,采用满意 PID 算法控制,使其控制系统精度达到滑靴副测试要求。

1 MCMS-10 试验机系统方案研究

1.1 系统控制要求

以 MCMS-10 滑靴-斜盘摩擦磨损试验机主轴为研究对象。试验平台二维装配图如图 1 所示。

图 1 中,主运动是试验机主轴旋转运动。其动力由外部交流电机输入给同步带,再传递到主轴,主轴与上摩擦副夹持装置通过锥度为 5° 的圆

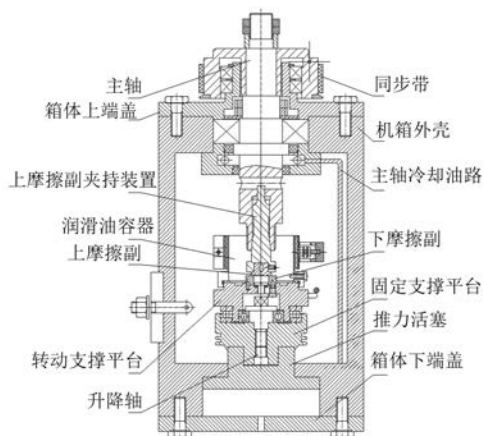


图 1 试验平台二维装配图

锥面配合传递转矩给上摩擦副,同时,上摩擦副与下摩擦副进行摩擦磨损试验。由此可见,主轴与上摩擦副夹持装置配合的旋转速度和进给精度的合理程度将直接影响滑靴副性能测试精度。主轴旋转的速度快慢与精度高低会受到试验机控制系统精度高低的影响。

1.2 主轴调速电路设计

需要达到对油温、流量等模拟量的采集监控,并实现摩擦试验机主轴电机速度因滑靴副测试性能和工艺的不同而变化的生产控制要求。将利用 PLC 编程的灵活性及控制功能来构建测控系统。MCMS-10 试验机主轴驱动控制系统选用 FX3U-32MR 型号 PLC 及其模拟量输入、输出模块、温度变送器 KZW-KT-T、回油过滤器 QU-A25 * 10S、CS-V 型压差发信器、智能涡轮流量计 HJLWGY-DN10A、富士多功能变频器 FRN18.5G1S 4C、易科工业触摸屏 DEV-500TE 和变频调速电机等组成。以 PLC 为系统核心,如图 2 所示,利用 PLC 对模拟量进行实时控制,以达到对主轴电机转速的在线控制和运行环境的实时监控。同时,在试验机主轴电机运行时,引入 PID 速度闭环控制系统,使试验机主轴电机的输出转速达到非常稳定的状态;速度反馈信号由模拟量编码器 EAS58C10-A6PR-8192 检测并且变送输出。其特点是:传输距离远,分辨位数高,抗干扰能力强。PLC 模拟量

输出模块的频率设定信号通过变频器接收,且根据输入模拟量的大小的变化来实时调整主电路中交流电压的频率,以至于驱动试验机主轴电机运行。通过 PLC 和 HMI 可以实现对所有现场在线设备控制程序的管理和安全联锁控制等功能,并对事故信号进行报警处理及打印报表等^[6-7]。

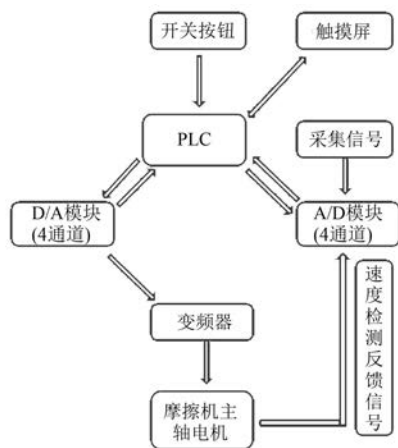


图2 MCMS-10 试验机控制系统组成

2 信号转换与电控系统设计研究

2.1 系统信号转换

MCMS-10 试验机主轴电机运行时,模拟量输入模块将接收现场各种信号(各传感器信号、电机输出转速反馈信号及主轴位移反馈信号),进行 A/D 转换并送至上位机,以实现摩擦磨损试验机主轴电机旋转速度的闭环控制和运行环境的实时监控处理。因为模拟量输入模块不但输入阻抗较高,并且信号传输电路与 PLC 距离较远,所以需使传感器的采集信号经过变送器转变为标准信号 DC 4~20 mA,再由模拟量输入模块的各通道进行 A/D 转换并经 PLC 程序的模拟量运算后在触摸屏上显示。图 3(a)所示为 A/D 转换示意图,转换周期为 200 μ s。同样,D/A 模块将 PLC 输出的数字量转换成模拟电压信号送至变频器以达到试验机主轴电机变频调速的目的。如图 3(b)所示,通过模拟输入进行频率设定。A 点由偏置 F18 与偏置基准点 C50 决定,B 点由增益 C32 和增益基准点 C34 决定。在该控制系统中,偏置与增益的数据均以基本频率作为 100% 进行设定,偏置基准点与增益基准点的数据均以模拟输入的全量程(10 V)作为

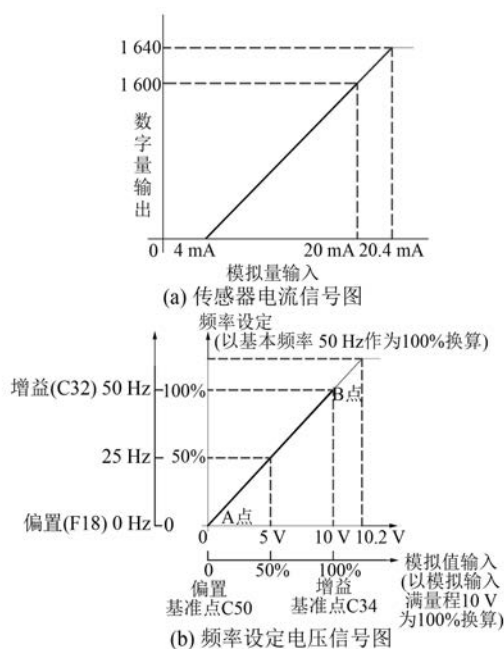


图3 控制系统模拟量信号转换示意图

100% 设定^[8]。

2.2 电控系统设计

2.2.1 硬件电路设计

根据图 2,设计出电器控制原理图,如图 4 所示。

该电控系统采用三相五线制接电方式和高低压配电系统。电控系统分为主电路和辅助电路两部分。为了保证主电路中主轴电机 M1 得到稳定的信号参数值输入,采用零相电抗器 ACL-74B,其目的为降低变频器发出的无线噪声;同时安装三相源 EMI 滤波器、三相变频器输出滤波器。电信号通过变压器 JKB3-400 变压 220 V 到辅助电路,PLC 从开关电源 DC 24 V 和 AC 220 V 两个端口接入,通过辅助电路达到对主电路的精确控制。

2.2.2 PLC 控制电路

根据图 4 和控制系统组成(图 2)的要求,对 PLC 控制系统 I/O 点进行分配,如表 1 所示。根据表 1 和主轴闭环系统控制特点,选用三菱 FX3U-32MR 作为控制系统核心元件。PLC FX3U-32MR 外围接线图如图 5 所示。

根据图 5 和表 1,PLC 输入量直接与 PLC 输入端子相连;电磁阀可直接与 PLC 的输出端子相连。选用位移传感器得到的电压信号作为回路油

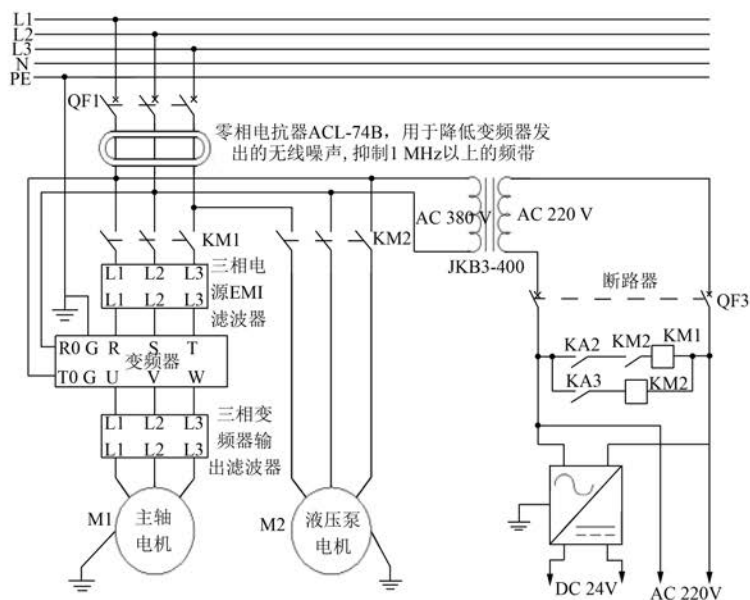


图 4 MCMS-10 试验机电控系统主线路图

表 1 PLC I/O 分配表

PLC 地址	输入点	PLC 地址	输出点
X000	警报	Y0	变频器警报指示灯
X001	位移、压力、流量、温度信号 QF2	Y2	控制主轴电机 KM1 线圈
X002	主轴电动机 M1 启动按钮 SB1	Y3	主轴电机启动指示灯 L1
X003	主轴电动机 M1 停止按钮 SB2	Y5	液压泵电机接触器 KM2 线圈
X004	机床急停按钮 SB3	Y6	压差发信器指示灯 L2
X005	锁钮 SB4	Y7	换向阀工作线圈 KA4
X006	压差发信器	Y10	换向阀左位工作指示灯 L3
X007	三位四通换向阀复位启动按钮 SB5	Y11	换向阀右位工作指示灯 L4

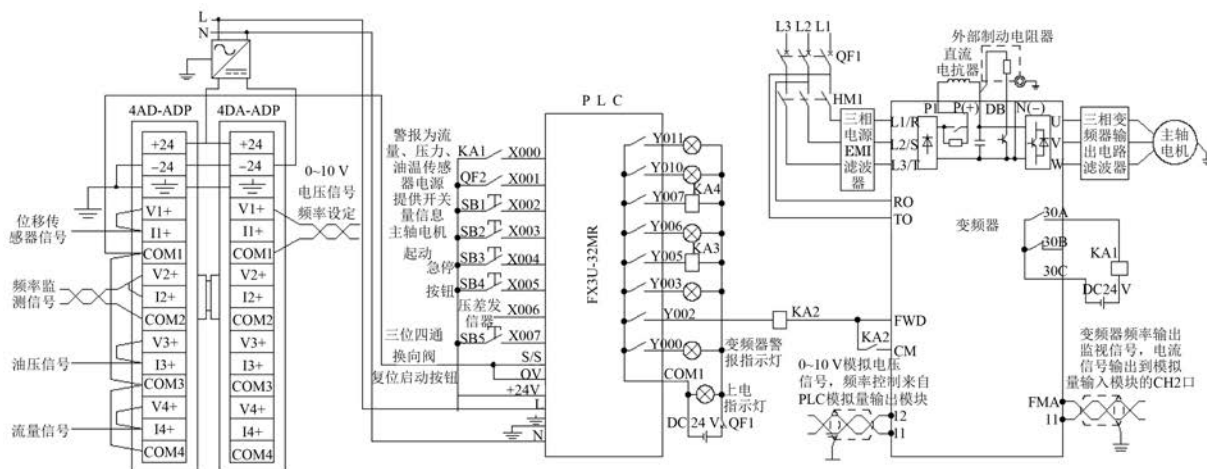


图 5 PLC FX3U-32MR 外围接线图

液压力和速度的测试和监控信号。通过接入 PLC 模拟量 I/O 模块的输入端子得到数字量,上位机通过串口通信程序对试验数据进行采集和处理,并通过程序实现试验机主轴速度和位置的自动控制。

2.3 系统软件电路设计

2.3.1 满意 PID 控制

根据 MCMS-10 试验机实际要求,当滑靴副性能测试时,试验机主轴转速在 3 000 r/min 以上,其温度不能超过 60 ℃;同时要求主轴位移能够精确定位、主轴速度保持一定范围内恒定,所以有控制对象函数

$$\frac{x(s)}{u(s)} = \frac{k_m}{s(T_ms + 1)} \quad (1)$$

式中: $x(s)$ ——电控系统的输出量;

$u(s)$ ——控制输入量;

k_m 、 T_m ——系统的放大倍数和时间常数。

系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$X(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T \quad (3)$$

式中: x_1 ——试验机主轴位移量;

x_2 ——试验机主轴速度量。

控制规律为 $u_1 = F$, $u_2 = GX(t)$ 。MCMS-10 试验机控制系统实际控制时是在 u_1 和 u_2 之间切换,并且切换顺序 u_1 为始,如果达到条件或者到达位置时,切换至 u_2 。在 u_2 控制下,试验机电控系统的误差指标得到满足,同时试验机主轴实现准确定位。试验机整个电控系统的满意 PID 控制流程如图 6 所示。

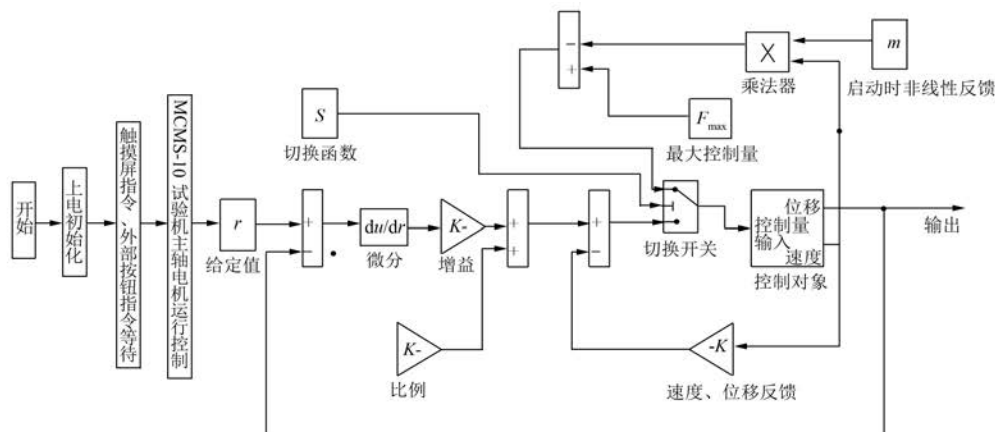


图 6 MCMS-10 试验机满意 PID 控制流程图

图 7 所示为采用满意 PID 控制的 MCMS-10 试验机主轴电机输出转速梯形图。PID 控制使用自动调节功能,微分增益 $\alpha D=0\%$,滤波系数 $L=70\%$ 。

控制流程为:打开锁钮 SB4(X5),让试验机上电;按下 SB1(X2),交流接触器 KM2 线圈得电,主轴电机转动指示灯 L1(Y3)点亮,表示主轴已通过三相源 EMI 滤波器、变频器、三相变频器输出滤波器起动。同时 KM2(Y5)线圈得电,KM2 常开触点闭合,液压泵起动,换向阀电磁铁 KA4(Y7)得电,换向阀开始工作。如遇紧急情况,按下 SB3(X4)机床急停按钮,或者工作完毕按下 SB2(X3)主轴电机停止按钮,则主轴电机停止。

2.3.2 通信程序设计

当变频器通过 PLC 连接进行摩擦磨损试验

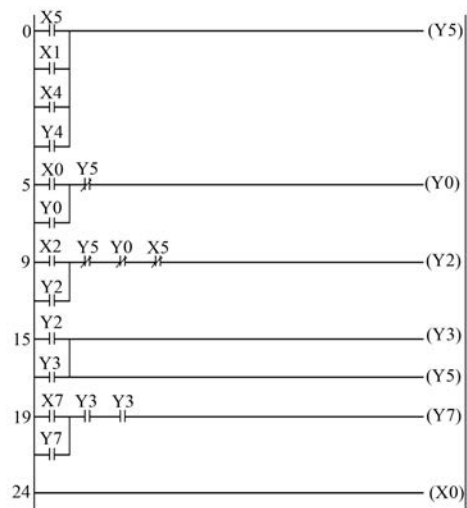


图 7 采用满意 PID 控制的试验机主轴电机输出转速梯形图

机主轴电机旋转控制时,需对变频器的相关参数进行设置,其设置参数如表 2 所示。同时,为保证 FX3U-32MR 能够正常与上位机进行通信,需在 PLC 中运行上下位机通信程序,其功能是设置 PLC 的通信参数:波特率为 9 700 bps、8 位数据位、1 停止位以及偶校验。

表 2 变频器的主要参数及设置值

参数名称	编号	参数值
频率设定方法	F01	1
运行操作	F02	1
基本频率/Hz	F04	50
起动频率/Hz	F23	1
基本频率电压/V	F05	380
上限频率/Hz	F15	50
下限频率/Hz	F16	0
停止频率/Hz	F25	1
电机保护用特性选择	F10	2
电机控制方式选择	F42	0

在 PLC 上的模拟量模块通过功能扩展板连接,并按照从基本单元开始的连接顺序,为每台模拟量特殊适配器分配各 10 个特殊的辅助继电器和特殊的数据寄存器^[9]。为了使模拟量模块正确读写数据,需编写模拟量的通信程序。通信程序中,对 FX3U-4DA-ADP 的通道输出频率设定信号,将特殊辅助继电器 M8260 始终设置为 OFF 状态,目的是使 FX3U-4DA-ADP 的通道输出电压信号。同时,FX3U-4AD-ADP 采集现场各种传感器信号,并将 M8270~M8273 设置为 ON 状态,其目的是各通道输入为电流信号;同样, M8274~M8277 设置为 ON 状态,PLC 由 RUN 切换为 STOP 时,各通道输出保持解除;D8274~D8277 用于设置各通道信号采集的平均次数;D8270~D8273 用于保存各通道 A/D 转换的输入数据。

3 上位机监控画面设计与试验结果分析

为了检验理论是否符合实际滑靴副摩擦磨损试验机要求,基于以上参数设置,运行组态王软件,并对触摸屏监控界面进行开发。一般的组态王软件可通过 IE 浏览器对所建立的工程进行远

程浏览与操作控制^[10]。根据摩擦磨损试验机的测试控制要求,通过触摸屏监控画面实现主轴电机运行环境的监测、液压油温度及电机旋转速度的在线显示与调整,其组态监控画面如图 8 所示。

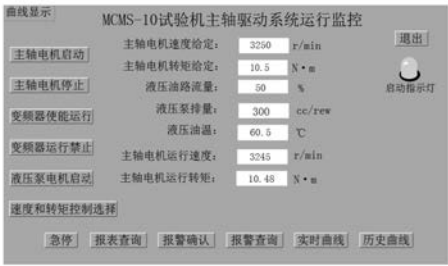


图 8 主轴电机运行监控画面

根据 MCMS-10 试验机性能,给定主轴电机转速 3 250 r/min,电机转矩为 10.5 N·m,其主轴运行速度为 3 245 r/min,运行转矩为 10.48 N·m。同时,根据其主轴电机运行监控画面进行实际试验。MCMS-10 试验机整机实物如图 9 所示。试验机试验控制监控图如图 10 所示。



图 9 MCMS-10 试验机实物图



图 10 试验机试验控制监控图

根据图 10,主轴转速在 3 287 r/min 时,其实际温度在 65.5 ℃,结合图 8 所设计的主轴电机运行监控画面,温度相差无几。

4 结 语

针对 MCMS-10 滑靴副-斜盘摩擦磨损试验机

电控系统开展研究,提出运用满意 PID 算法控制其主轴电机系统。运用组态软件对试验机主轴运行系统监控画面进行设计,同时通过试验得出: MCMS-10 试验机在转速达到 3 287 r/min 时,内部油液温度为 65.5 ℃,有效降低了油液温度,同时能够满足滑靴副测试的精度要求。

【参考文献】

- [1] NAOHIRO I I, ATSUSHI Y I. Characteristics of a slipper bearing for swash plate type axial piston pumps and motors[J]. Bulletin of the JSME, 1983, 26 (219): 1583-1589.
- [2] KOC E, HOOKE C J, LI K Y. Slipper balance in axial piston pumps and motors [J]. Transactions of the ASME, 1992, 114: 766-772.
- [3] KOC E, HOOKE C J. Investigation into the effects of orifice-size, offset and overclamp ratio on the lubrication of slipper bearings [J]. Tribology International, 1996, 29(4): 299-305.
- [4] KOC E, HOOKE C J. An analysis of the lubrication mechanisms of the bush-type bearings in high pressure pumps[J]. Tribology International, 1997, 30 (8): 553-560.
- [5] 韩德才, 周铁农, 潘永阁. 实际工况下滑靴油膜动特性的实验研究[J]. 东北重型机械学院学报, 1989, 13(1): 35-38.
- [6] 寇志伟, 崔啸鸣, 徐明娜, 等. 基于 PLC 与触摸屏的变频调速测控系统[J]. 电机与控制应用, 2014, 41 (12): 57-60.
- [7] 李红萍, 贾秀明, 李艺鸿, 等. 基于 MCGS 的风机变频监控系统设计[J]. 电机与控制应用, 2012, 39 (11): 48-49.
- [8] 李燕, 廖义奎, 王永. 图解变频器应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [9] 李江全, 蒙贺伟. 三菱 FX 系列 PLC 数据通信及测控应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [10] ALYINTAS Y, ASLAN D. Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66 (1): 349-352.

收稿日期: 2018-05-31

(上接第 58 页)

- [6] 李立毅, 唐勇斌, 刘家曦, 等. 多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 69-77.
- [7] 孙玉坤, 胡文宏, 朱志莹, 等. 单绕组磁悬浮开关磁阻电机结构优化设计[J]. 控制工程, 2015(5): 939-945.
- [8] 黄哲理, 赵光, 汪国梁. 模拟退火法在电机全局优化设计中的应用研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(2): 8-15.
- [9] KRASNOGOR N, SMITH J. A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2005, 9(5): 474-488.
- [10] COTTA C. Handbook of memetic algorithms [M]. Heidelberg: Springer, 2012.
- [11] 宋受俊, 葛乐飞, 刘虎成, 等. 开关磁阻电机设计及其多目标优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 197-204.
- [12] 孙玉坤, 袁野, 黄永红, 等. 磁悬浮开关磁阻电机多目标优化设计[J]. 电机与控制学报, 2016, 20 (11): 32-39.
- [13] LIU X, HAN B. The multiobjective optimal design of a two-degree-of-freedom hybrid magnetic bearing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(9): 1-14.
- [14] ZHANG J, WANG H, CHEN L, et al. Multi-objective optimal design of bearingless switched reluctance motor based on multi-objective genetic particle swarm optimizer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(1): 1-13.
- [15] 宋受俊, 葛乐飞, 张蔓. 开关磁阻电机多目标协同优化设计[J]. 电机与控制学报, 2015, 20(1): 68-75.

收稿日期: 2018-04-25