

智能接触疲劳试验装备设计与验证

1.重庆理工大学机械工程学院；2.杭州轴承试验研究中心（联合国援助）博士后工作站；3.机械工业轴承产品质量检测中心（杭州）ISO/IEC 检测/校准 CNAS L0309；4.重庆澳哈科技有限公司；5.重庆理工大学电气与电子工程学院；6.大华技术股份有限公司

杨岩^{1*} 李兴林^{2,3} 梁举科⁴ 陈古波⁵ 李建尧^{1,6}

【摘要】本文结合接触疲劳试验的要求，设计了接触疲劳试验机的关键零部件，并对试验机主轴箱进行了动力学特性分析。根据接触疲劳试验机的工作要求，设计了试验机侧控系统和试样表面图像采集系统。搭建了试验环境，验证了机械系统、侧控系统及图像采集的功能。试验结果表明：试验机机械系统可满足接触疲劳试验的要求；试验转速相对误差小于 0.5%、试验载荷调控误差小于 1%；图像检测系统的平均误差为 2.58%；机械系统、侧控系统及图像检测系统的关键指标满足试验机的设计要求。

【关键词】接触疲劳；试验转速；试样载荷；侧控系统；图像采集

0 前言

滚动接触疲劳试验是研究材料在模拟工况条件下滚动接触疲劳性能的主要方法，滚动接触疲劳试验机是开展滚动接触疲劳试验的主要装备，用于测试齿轮、轴承等基础零部件材料接触疲劳寿命^[1]。为了确保疲劳试验能够得到精确、可靠的试验结果，试验机需准确模拟试验工况，并具备长时间不间断运行且准确记录运行数据的功能。因此，稳定、可靠的系统是试验机正常运行的重要保障。

近年来，疲劳试验技术相关的研究受到国内外学者越来越广泛的关注^[2-4]。华子恺等^[5]针对人工髋关节疲劳性能的测试问题，研发的专用测试装置能够有效对人工髋关节的疲劳进行标准测试与评估；谭伟等^[6]设计的节能型变速器疲劳试验机系统采用共直流母线能量回收技术能适应大功率、大转速试验环境，且节能效果可达 90%；白继平^[7]等提出了一种采用 2D 高频转阀控制液压缸实现谐振疲劳试验新方法，该方法能有效提高电液疲劳试验的频率；李旭东等^[8]介绍了一种能在大载荷、高转速下对轴承用球进行滚动疲劳试验的新型试验机，其试验系统同时监测着多种信号，能够分析判断接触疲劳状

态；Sebastian 等^[9]研制了一种大型梁共振接触疲劳试验机，采用谐振式测试系统使其具有较高的负载频率，大大降低了试验时间和成本。此外，试验机的测控系统也有着大量的研究，V.Manoj 等^[10]研制的三辊滚动接触疲劳试验机，采用 AXPERT-VT300 控制器，实现了试验速度精确调控；杨育林等人^[11]研发的一种杠杆加载式超硬涂层材料滚动接触疲劳试验机，其控制系统采用计算机结合速度控制器的方式，实现了精确监控和诊断试件接触表面疲劳状态等功能；王磊^[12]等人研发了一种气动加载的五球疲劳试验机，采用带有跟踪滤波的智能电控系统，可实现试验机大载荷、高转速运行等功能；游红等^[13]人针对电液伺服疲劳试验机给研发了基于 EDC220 控制器和 S7-300 PLC 的双下位机控制系统，有效解决了试验机长时间运行容易数据丢失问题；陶立辉等^[14]人基于 STM32 单片机研发了合金材料疲劳试验控制机制系统，实现了试验机的无极调速、间隔控制及疲劳次数统计功能。

现有的疲劳试验机控制系统虽能够基本满足试验要求，但仍存在不能准确控制滑差率、试验载荷等试验条件，需要人工停机检测疲劳状态，疲劳状态判断不精准且无法捕捉初始疲劳状态，在线检测能力不强，依靠单一检测信号且无法对各试验参

1 国家自然科学基金面上项目(51875068)

2 国家国际合作专项(2015DFR70480)

数做出实时准确检测。为了解决上述问题，自主设计的新型智能滚动接触疲劳试验机，采用机器视觉和振动分析相结合实时检测疲劳状态，复合闭环控制准确模拟试验工况，软件系统能够自动记录试验数据实现无人值守。

本文主要结合接触疲劳试验的要求，设计了接触疲劳试验机的机械系统、测控系统及试样表明图像采集系统，并通过试验验证了侧控系统和图像采集系统的可行性和合理性，并通过试验数据分析了侧控系统和图像采集系统关键指标的精度。

1 疲劳试验原理及要求

1.1 试验原理

滚动接触疲劳是试样在纯滚动或滚滑摩擦时，表面在接触压应力长期反复作用下引起的一种表面疲劳破坏现象，其接触形式主要分为点接触和线接触两种。本文的相关研究主要针对线接触滚动接触疲劳试验展开，其试验原理如图 1 所示。

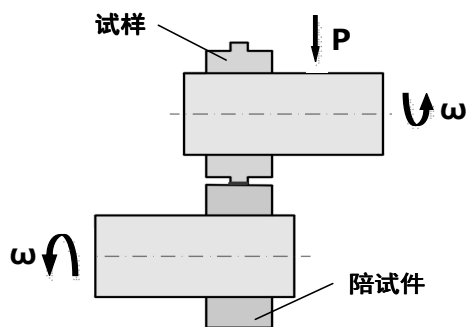


图 1 线接触滚动接触疲劳试验原理

图 1 中，试样和陪试件装配在对应的主轴上，通过动力源传递至各主轴的动力驱动其旋转。通过调控两主轴的转速，可模拟不同的试验滑差率。试样和陪试件之间的接触压应力由施加在试验模块主轴上的载荷间接提供。

1.2 试验控制要求

为了确保滚动接触疲劳试验的准确性，试验要求尽可能的模拟材料或零部件的真实滚动接触工况。结合 YB /T 5345—2014《金属材料滚动接触疲劳试验方法》行业标准的要求，滚动接触疲劳试验机需满足以下两点要求：

(1) 两试样的相对运动状态保持不变，即试验滑差率保持不变；

(2) 两试样的接触压应力波动应尽量小，即试验载荷误差尽量小。

2 试验机整体设计

2.1 试验机主体结构

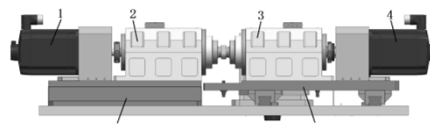
本文基于模块化设计方法将滚动接触疲劳试验机结构分为试验模块、陪试模块及加载模块，各模块的主要功能如下：

(1) 试验模块：试样按相关标准精度要求装配在该模块主轴端部，并通过该模块的伺服电机驱动试样旋转，模拟试验系统的工况；

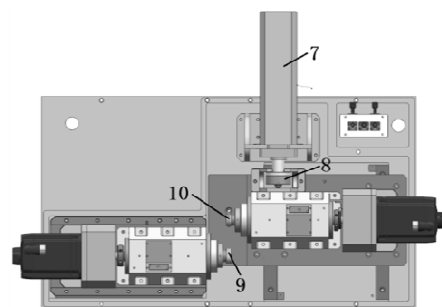
(2) 陪试模块：陪试件按国标精度要求装配在该模块主轴端部，并通过该模块的伺服电机驱动陪试件旋转，模拟陪试系统的工况；

(3) 加载模块：为试样和陪试件提供接触压应力，载荷通过伺服电缸进行控制。

试验机结构组成如图 2 所示，主要控制指标及精度如表 1 所示。



1-陪试模块驱动电机；2-陪试模块主轴箱；3-试验模块主轴箱；4-试验模块驱动电机；5-试验模块；6-陪试模块
(a) 主视图



7-加载模块；8-载荷传感器；9-陪试件；10-试样
(b) 俯视图

图 2 试验机结构组成

表 1 主要控制指标及精度要求

序号	名称	参数
1	试验转速范围	0-3000r/min
2	加载载荷范围	0-2000kg
3	转速控制精度	±1%
4	试验载荷精度	±1%

2.2 关键部件动力学特性分析

结合试验机主试验箱结构特点和轴承特性，建立了如图 3 所示的主试验箱刚柔耦合动力学模型，并验证模型的有效性。在此基础上，研究了转速和径向载荷对主轴头部的影响。

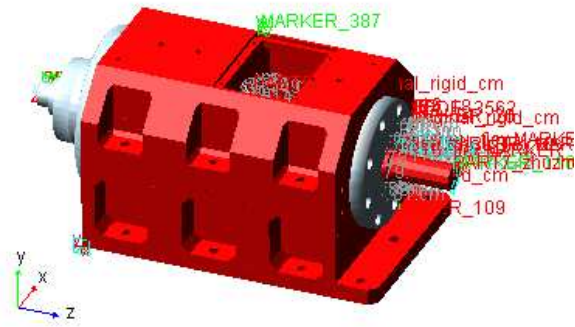


图3 主试验箱系统刚柔耦合动力学模型

结合疲劳试验机的实际工况，基于前述建立的主试验箱系统刚柔耦合，在主试验箱端头施加 10kN 径向载荷，分析转速 500r/min 到 2000r/min 的几种工况下主试验箱系统动力学特性，提取到主轴端头的振动特性如图 4 所示。

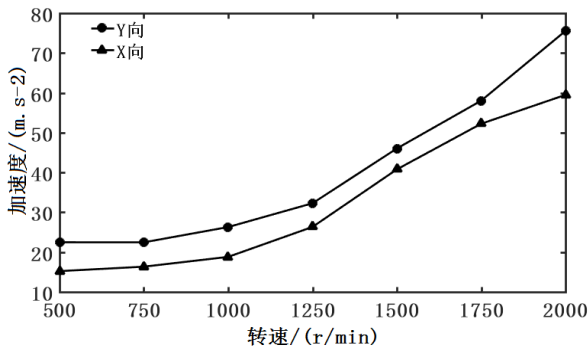


图4 转速对主轴振动的影响

可以发现，随着转速的提高，两个方向的振动都逐渐增大。在转速 1000r/min 以内的几种工况下，主轴振动变化比较缓慢，运行比较平稳。

结合实际工况，选定径向载荷 2.5kN-20kN，驱动转速 1000r/min，仿真分析几种工况下的振动特性，提取到轴端的振动如图 5 所示。

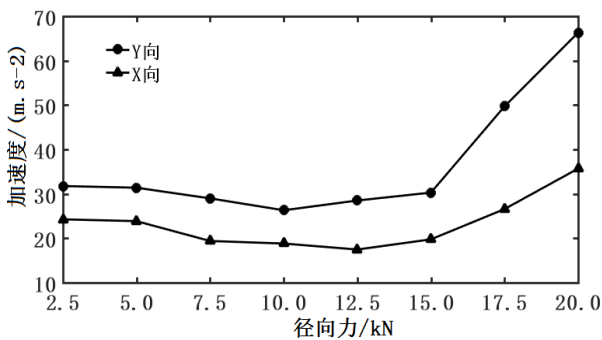


图5 径向力对主轴振动的影响

与随着转速增加振动幅值不断增加的情况不同，随着径向力的变化，两个方向的加速度值都经历先

减小再变大的过程。此种情况表明：适当的径向载荷可抑制主轴头部的振动。

3 试验机测控系统设计

3.1 硬件系统设计

西门子运动控制器集运动控制、逻辑控制和工艺控制功能于一体，可快速可靠地控制多台伺服电机^[18-19]。本文采用西门子运动控制器作为主控制器，对试验主轴驱动电机和陪试主轴驱动电机的速度控制及加载电机的力位进行控制。

3.2 软件系统设计

试验机控制系统软件主要完成各轴电机的运动控制、逻辑控制、数据采集处理、故障处理和人机交互等功能。本文以运动控制器的编程软件和虚拟仪器软件 LabVIEW 为软件开发平台，采用模块化结构设计了试验机下位机驱动软件和人机交互软件。软件系统主要功能模块如图 6 所示。

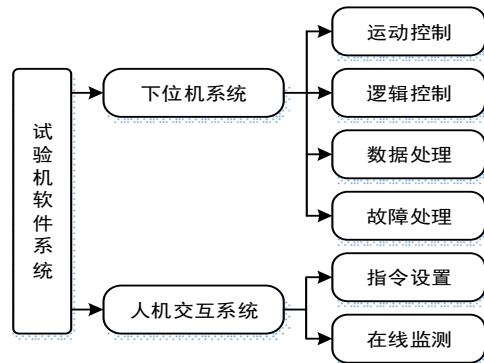


图6 软件控制系统框图

4 试样表面图像采集系统设计

4.1 系统组成

目前，滚动接触疲劳试验中常采用基于声发射、振动信号、超声波等检测方法检测接触疲劳状态，这些方法虽能检测到试样疲劳，但不能直观记录滚动接触疲劳的演变，更不能量化疲劳破坏^[15]。

本试验机采用机器视觉检测方式，不仅能实时检测疲劳状态也能在线定量分析疲劳性能数据。其疲劳状态视觉检测结构如图 7 所示。CCD 相机和光源置于固定于试验台的龙门架的桁架上，不仅可以方便调节相机位置，相比一般的单臂结构还能减少试验机振动对相机的影响。试样置于顶部有小孔的油盒内，在油液润滑的同时也能采集到视觉图像。

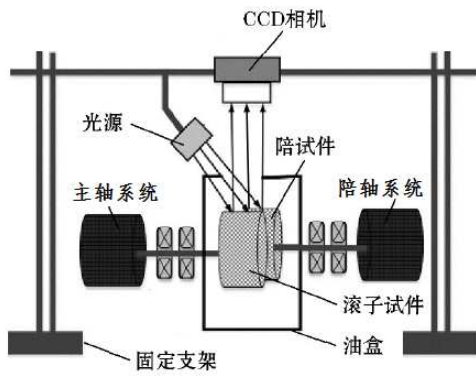


图7 疲劳检测结构示意图



图9 试验转速测试现场

5 试验验证

5.1 试验环境搭建

将本文设计的试验机运动控制系统搭载于自主研制的某型滚动接触疲劳试验机，完成运动控制系统功能测试的硬件环境搭建，试验现场环境如图8所示。

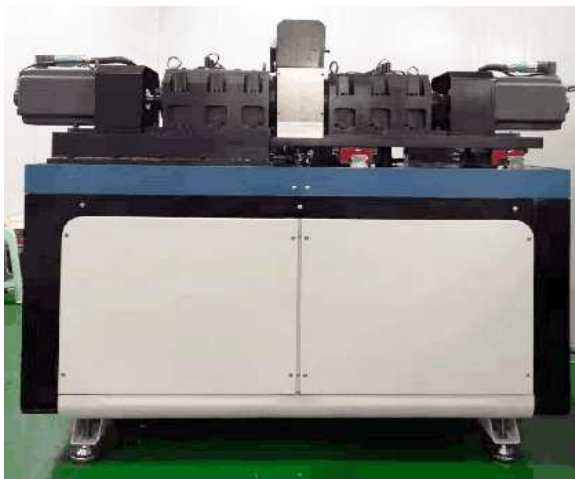


图8 试验现场环境

5.2 测控系统功能验证

在试验机空载的条件下，通过上位机输入试样主轴为指定转速，等待运行速度平稳后使用红外测速仪测量主轴的实际转速，测试过程如图9所示，结果如表2所示。

表2 试验转速测试数据

#	预设转速 (r/min)	实际转速 (r/min)	相对误差 (%)
1	500	499	0.2
2	1000	999	0.1
3	1500	1499	0.06
4	2000	1999	0.05
5	2500	2499	0.04
6	3000	2999	0.03

由表2可知，试验转速测试的相对误差均远小于0.5%，符合试验机测控系统的设计要求。

试验机静态载荷测试是在试样主轴和陪试主轴静止的条件下，单独测试测控系统对试验加载力的测量精度，现场环境如图10所示，试验结果如表3所示。

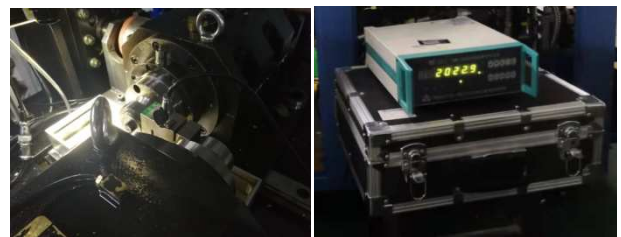


图10 试验载荷测试现场

表3 静态试验载荷测试数据

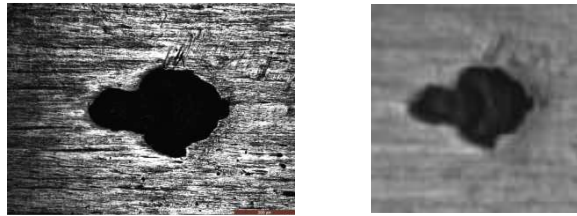
#	设定载荷 (kg)	实测载荷 (kg)	相对误差 (%)
1	100.4	100.0	0.39
2	498.7	500.6	0.38
3	900.3	900.1	0.02
4	1210.2	1200.7	0.78
5	1600.4	1602.9	0.16

由表3可知，试验载荷调控误差小于1%，满

足试验机测控系统的设计指标要求。

5.3 图像采集系统功能验证

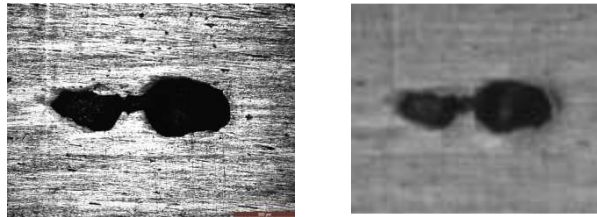
为了验证图像采集系统的功能,本文将该系统采集的试样表面缺陷特征与显微镜采集的图像进行对比分析,图像对比如图 11 所示(其中,左侧为图像采集系统采集的图像,右侧为显微镜拍摄的图像),缺陷面积数值如表 4 所示。



(a) 缺陷一的图像



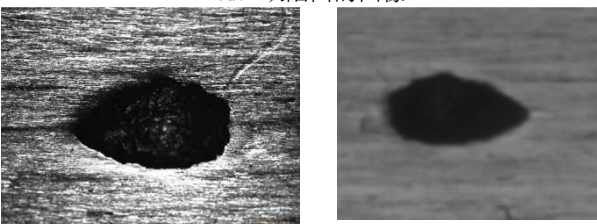
(b) 缺陷二的图像



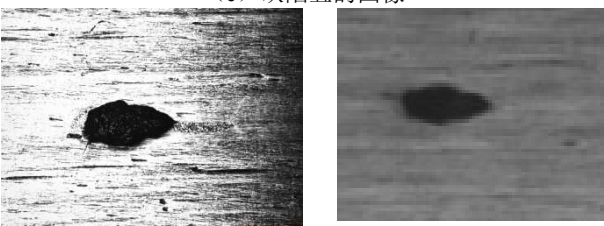
(c) 缺陷三的图像



(d) 缺陷四的图像



(e) 缺陷五的图像



(f) 缺陷六的图像



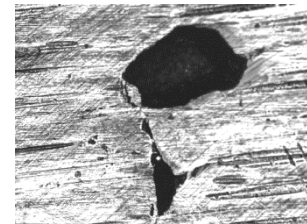
(g) 缺陷七的图像



(h) 缺陷八的图像



(i) 缺陷九的图像



(j) 缺陷十的图像

图 11 缺陷图像对比图

表 4 单个点蚀计算面积数据分析

图片 编号	实际面积 /(mm ²)	计算面积 /(mm ²)	检测误差 /(%)	平均误差 /(%)
1	0.51	0.50	2.9	2.58
2	0.19	0.19	0	
3	0.44	0.43	2.3	
4	0.19	0.19	0	
5	0.69	0.71	2.9	
6	0.18	0.18	0	
7	1.06	1.09	2.8	
8	1.23	1.29	4.9	
9	0.24	0.23	4.2	
10	0.52	0.49	5.8	

由表 4 可以看出,以上 10 组试验的平均误差为

2.58%，满足图像检测系统的精度要求。

6 结论

本文结合接触疲劳试验的要求，设计了接触疲劳试验机的机械系统、侧控系统及图像采集系统，并通过试验验证了各系统的功能和关键指标。试验结果表明：1) 试验机机械系统可满足接触疲劳试验的要求；2) 试验转速相对误差小于 0.5%、试验载荷调控误差小于 1%；3) 图像检测系统的平均误差为 2.58%；4) 机械系统、侧控系统及图像检测系统的关键指标满足试验机的设计要求。

【参考文献】

- [1] 王军威, 李国禄, 王海斗, 等. 滚动接触疲劳试验机的研究现状[J]. 工程与实验, 2011, 51:1-5.
WANG Junwei, LI Guolu, WANG Haidou, et al. Research status on rolling contact fatigue testing machine[J]. Engineering and Test, 2011(51):1-5.
- [2] 于佳伟, 郑松林, 冯金芝, 陈铁. 某轿车前副车架服役载荷模拟试验加速方法研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22):112-120.
YU Jiawei, ZHENG Songlin, FENG Jinzhi, et al. Research on Accelerated Testing Method for the Service-simulation Fatigue Test of Automotive Front Subframe [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 112-120.
- [3] 葛蓉蓉, 薛彦涛, 牛向阳. 国产钢材 LYP225 的低周疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 12-19.
GeRongrong, Xue Yantao, Niu Xiangyang. Experimental-study on low-cycle fatigue behavior of Chinese LYP225[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 12-19.
- [4] 陈书赢, 王海斗, 徐滨士, 康嘉杰. 热喷涂层滚动接触疲劳寿命演变规律研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(08):23-33.
CHEN Shuying, WANG Haidou, XU Binshi, KANG Jiajie. Law of Rolling Contact Fatigue Life of Thermal Spray Coatings: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(08):23-33.
- [5] 华子恺, 张欢欢, 韦庆玥, 范永威, 潘绍斌. 人工髋关节股骨头专用型疲劳测试装置研制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(01): 160-164.
HUA Zikai, ZHANG Huanhuan, WEI Qingyue, et al. Development a Novel Fatigue Testing Apparatus for Artificial Hip Joint Femur Stem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(01):160-164.
- [6] 谭伟, 徐然, 米林, 等. 节能型重型变速器疲劳寿命试验系统的设计[J]. 机械传动, 2017, 41(05):182-187.
TAN Wei, XU Ran, MI Lin, et al. Design of Fatigue Life Test System of the Energy Efficient Heavy Transmission[J]. Mechanical Drive, 2017(51): 1-5.
- [7] 白继平, 阮健. 电液谐振疲劳试验新方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(02):161-168.
BAI Jiping, RUAN Jian. Novel Method of Electrohydraulic Resonant Fatigue Testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(02):161-168.
- [8] 李旭东, 张仕朝, 庞长涛. 材料滚动接触疲劳试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(3):5-7.
LI Xudong, ZHANG Shichao, PANG Changtao, et al. Research on Testing of Materials Rolling Contact Fatigue[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011(3): 5-7.
- [9] Sebastian Schneider, Ralf Herrmann, Steen Marx. Development of a resonant fatigue testing facility for large-scale beams in bending[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 113:171-183.
- [10] V. Manoja, K. Manohar Shenoyb, K. Gopinatha. Developmental studies on rolling contact fatigue test rig [J]. Wear, 2008(264):708-718.
- [11] 杨育林, 齐效文, 张瑞军. 超硬涂层材料滚动接触疲劳试验机的研制[J]. 润滑与密封, 2006, 182:43-51.
YANG Yulin, QI Xiaowen, ZHANG Ruijun, et al. Design and Development of a Rolling Contact Fatigue Test Machine for Superhard Coatings[J]. Lubrication Engineer, 2011(03): 5-7.
- [12] 王磊, 程爽, 庞长涛, 等. BFT-10000 五球疲劳实验机的研制[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(3): 42-46.
WANG Lei, CHENG Shuang, PANG Changtao, et al. Development of BFT-10000 Fatigue Tester[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(3): 42-46.
- [13] 游红. 基于双下位机的疲劳试验机控制系统设计[J]. 控制工程, 2014, 21(2):215-218.
YOU Hong. Control System Design of Hydraulic Fatigue Testing Machine Based on Double Lower Computers[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(2): 215-218.
- [14] 陶立辉, 谷玉海, 许宝杰, 等. 合金材料疲劳试验自动控制系统研制[J]. 仪表技术与传感器, 2016, 5: 54-72.
TAO Lihui, GU Yuhai, XU Baojie, et al. Development of Automation-control System to Test Fatigue Performance of Metallic Material[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016, 5:54-72.
- [15] 吕帅师, 林辉, 樊明迪. 电动加载系统多闭环复合控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(09):16-22.
LU Shuaishuai, LIN Hui, FAN Mingdi, et al. Electric loading system with multi closed-loop control[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(09):16-22.
- [16] Bodini I, Sansoni G, Lancini M, et al. Feasibility study of a vision system for on-line monitoring of rolling contact fatigue tests[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 778(1):012007.
- [17] 刘晓琳, 李卓. 飞机舵机电动加载系统多余力矩抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(06): 1366-1373.
LIU Xiaolin, LI Zhao. Method to restrain extra torque of aircraft rudder electric loading system[J]. Systems Engineering Electronics, 2019, 41(06):1366-1373.
- [18] 侯晓鹏, 张国梁, 王军峰, 等. 基于 SIMOTIOND435 的连续平压热压机驱动控制系统设计[J]. 林业科

学,2018,54(5):116-126.

Hou Xiaopeng, Zhang Guoliang, Wang Junfeng , et al. Driving Control System Design of Continuous Flat Press Based on SIMOTION D435[J]. Scientia silvae sinicae, 2018,54(5):116-126.

- [19] 孙学武,谭辉,杨安坤,等.基于 SIMOTION 的工业 CT 多轴同步控制方法 [J]. 控制工程 ,2016, 23(10):1591-1596.

SUN Xuewu, TAN Hui, YANG Ankun , et al.Multi-axis Synchronous Motion Control System Based on SIMOTION forIndustrial Computed Tomography[J]. Control Engineering of China,,2016, 23(10):1591-1596.

- [20] 王薇,吕其栋,张雪亮.2013. 深入浅出西门子运动控制器 :SIMOTION 实用手册 .北京：机械工业出版社,28-29,122-123.

Wang Wei, Lu Qingdong, ZhangXueliang. 2013.

Explanation for SIEMENS motion controller:

SIMOTION Handbook. Beijing :China MachinePress.

