

往复式摩擦磨损试验机及其计算机控制系统设计^{*}

刘永平, 龚俊, 辛舟, 侯运丰

(兰州理工大学数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室 兰州 730050)

摘要: 针对不同固体材料在不同条件下的摩擦磨损实验要求, 开发设计了一种往复式摩擦磨损试验机, 通过测量实验中产生的摩擦力、摩擦系数和磨损量的变化来研究材料的摩擦磨损性能。为提高测试系统的精确性和实时性, 将计算机辅助测试系统应用到摩擦学试验当中, 通过数据采集系统和测试软件系统完成摩擦磨损数据的实时动态测试, 从根本上改变了传统摩擦磨损试验机的缺点。通过对聚四氟乙烯材料的摩擦磨损性能进行实验, 证明该试验机性能稳定, 测试系统准确可靠。

关键词: 摩擦磨损; 试验机; 往复式; 计算机控制系统

中图分类号: TH117 TH873 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design of reciprocating friction and wear testing machine and its computer control system

Liu Yongping Gong Jun Xin Zhou Hou Yunfeng

(Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application The Ministry of Education
Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the friction and wear experiment requirements for different solid materials under different conditions a new reciprocating friction and wear tester is proposed. The tribological properties of materials can be researched through measuring friction force, friction coefficient and wear value in experiment. In order to improve the accuracy and real-time performance of the test system, computer aided test technology is applied in tribological test. The dynamic friction and wear experiment data can be obtained in real-time by the data acquisition system and software test system, which fundamentally changes the shortcomings of traditional friction and wear testers. The experiment results of PTFE tribological properties prove that the proposed tester has stable performance and the test system is accurate and reliable.

Key words: friction and wear; testing machine; reciprocating; computer control system

1 引 言

机械设备中零部件的摩擦磨损性能是由材料(摩擦副及润滑剂)、工作状态(载荷、速度)、接触方式(点、线或面接触)和环境条件(温度)等因素决定的。往复式摩擦试验机是用于摩擦材料行业产品质量控制、新材料配方开发研制的主要设备^[1-7]。目前,国内外常用的摩擦试验机主要有四球机、Falex、Tinkon、FGZ等几种,主要是用

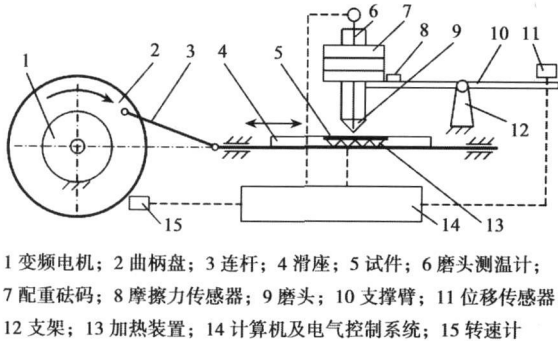
来测定润滑油脂的承载能力。由于这些试验机在检测性能和自动化程度方面存在许多不足,有些试验机只能实现单参数(固定转速、温度)控制,且大量数据处理和运算结果需由人工完成,已经不适应时代发展的要求^[1,8]。

本文设计的往复式摩擦磨损试验机及计算机控制系统,主要用于不同固体材料在不同条件下的往复式摩擦磨损实验,通过测量实验中产生的摩擦力、摩擦系数和试件的磨损量及其相互关系,来研究固体材料的摩擦磨损性能,可为研究零部件的摩擦磨损性能提供客观真实的

评定参数。

2 往复式摩擦磨损试验机的工作原理

往复式摩擦磨损试验机是通过曲柄滑块机构将旋转运动变为往复运动^[9-10]。通过该试验机, 主要可获得试验中产生的摩擦力、摩擦系数和试件的磨损量, 其工作原理如图 1 所示。



1 变频电机; 2 曲柄盘; 3 连杆; 4 滑座; 5 试件; 6 磨头测温计;
7 配重砝码; 8 摩擦力传感器; 9 磨头; 10 支撑臂; 11 位移传感器;
12 支架; 13 加热装置; 14 计算机及电气控制系统; 15 转速计

图 1 往复式摩擦磨损试验机工作原理

Fig 1 Working principle of the RFW TM

变频电机经曲柄滑块机构驱动托架往复运动, 试件安装在托架上并随托架一起运动, 试件固定在活动基座上。工作载荷由砝码的重力产生, 弹性支撑臂在摩擦力的作用下水平摆动, 在小幅度情况下, 位移与摩擦力成正比。支撑臂的另一端与位移传感器靠近, 其垂直方向的位移量反映出试件磨损量的变化。工作时, 托架导轨中必须加注润滑油。为使试验机的往复运动平稳、轻快, 并具有较长的使用寿命, 采用了精密直线导轨。

该往复式摩擦磨损试验机可通过调节偏心盘的偏心量, 实现滑块(试件)往复行程在一定范围内可调; 可通过变频器的频率调节, 可实现摩擦速度的任意调节, 方便模拟实际工况的使用速度; 本往复式摩擦试验机可通过加热、检测及温度控制器实现各种材料在不同温度下的摩擦性能实验, 实现设计范围内的温度任意设定和恒温自动控制。通过实验, 可建立磨损量与温度之间的函数关系, 为设计和寿命预测提供实验数据; 另外, 还可进行不同材料摩擦副在不同润滑状态(单位时间内所加润滑剂的量)下的摩擦磨损性能实验。

该往复式摩擦磨损试验机是利用在弹性臂上贴应变片的方法测试摩擦力, 即通过弹性臂的变形而使贴在上面的应变片伸长或缩短, 将应变片电阻的变化转化为电压的变化, 然后将电压变化的峰值经标定后转化为摩擦力的数值。

2.1 摩擦系数测试原理

如图 2 所示, 作用在试件上的载荷(正压力) N 由配

重砝码产生, 作用在摩擦副间的摩擦力为 f , 若两个试件间的摩擦系数为 μ , 则有 $\mu = f/N$ 。故只要预先确定加载砝码的重力, 再测出应力传感器受力大小, 即可计算出摩擦系数 μ 。

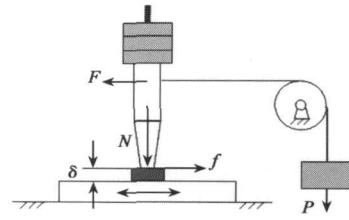


图 2 磨头受力示意

Fig 2 Schematic diagram of the force of the friction head

磨头的支撑臂设计成一段板弹簧结构, 垂直方向较厚, 不会产生位移变形, 而水平方向是薄壁, 在外力作用下会发生变形产生弹力 F , 弹力的大小通过贴装在薄壁侧面的应变片测量。当曲柄连杆机构带动试件作往复运动时, 磨头和试件之间产生摩擦力, 其大小和方向都是周期性地变化的, 为了使应变片能稳定地受到单向拉应力, 增加了与摩擦力平行的预加载拉力 P , 由加载砝码经滑轮实现, 因此有 $F = f + P$ 。

在线性范围内, 弹力 F 满足 $F = K_f D_f$ 其中, D_f 为下位机向上位计算机传送的摩擦力读数, K_f 为摩擦力与摩擦力读数之比(系数), 所以有 $f = K_f D_f - P$ 。当无摩擦试件时, $P = K_f D_0$, D_0 为下位机向上位计算机传送的无摩擦力时的读数, 这样即可利用已知重量的加载砝码来标定系数 K_f 。于是, 摩擦力可通过如式(1)计算:

$$f = K_f (D_f - D_0) \quad (1)$$

式中: K_f 为摩擦力与摩擦力读数之间的系数 (N 单位读数)。

实际上, 试件作往复运动时, 当摩擦行程的中点通过磨头中心时速度最大, 在试件行程的两端为加速或减速运动状态, 故测得的摩擦力读数是一个交变值。为克服测量过程的不确定性, 可通过下位机进行高速数据采集并进行预处理, 剔除奇异读数, 然后求取采样周期之内的最大值作为要传送的读数, 有利于长时间摩擦磨损试验时的监测和数据记录。

2.2 磨损量测试原理

磨损量的测量是根据杠杆原理, 由支撑臂将磨损端的位移传递到便于测量的另一端, 再由电涡流位移传感器测得。如图 2 所示, δ 为试件经过一段时间摩擦后的磨损量, 设 X 为支撑臂测量端的测量面和位移传感器测头间的位移量(参见图 1)。位移传感器的线性工作范围为 2 mm , 初始值设为 1 mm 左右。当磨损量 δ 在小于 1 mm 的微小范围内变化时, 认为 δ 与位移变化量 ΔX 成线性关系, 即有:

$$\delta = K \cdot \Delta X = K (X - X_0)$$

式中： X_0 为磨损开始时的位移量。将非电量位移 X 转换为计算机可读取的数值 D_x 是由下位机及数据采集单元完成的。于是可得到磨损量的计算式 (2)：

$$\delta = K_x (D_x - D_{x0}) \quad (2)$$

式中： K_x 为磨损量与磨损读数之间的系数 (μ_m 单位读数)。在系统结构稳定、位移传感器安装位置确定的情况下， K_x 可认为是常数，这是可用已知厚度的块规代替磨损量 δ 进行测量，利用式 (2) 反求出系数 K_x ，然后通过上位计算机的参数输入界面输入并保存。

理论上，该摩擦磨损试验机可实现 μ_m 级的磨损量测量，但测臂在工作过程中会有上下波动，尤其在振动不稳定时或突然抖动时。由于磨头向上振动时，位移检测的距离变大，出现假数据；而磨头向下被试件挡死，所以位移检测到的最小距离应是真实距离。可以通过软件剔除虚假数据，记录每一时间段的最小距离的变化趋势即为实际的磨损量变化曲线。另外，支撑臂的左右两段原则上是相等的，但若不等，也可以由软件作参数标定修正。

磨损量测试部分的实物照片如图 3 所示。

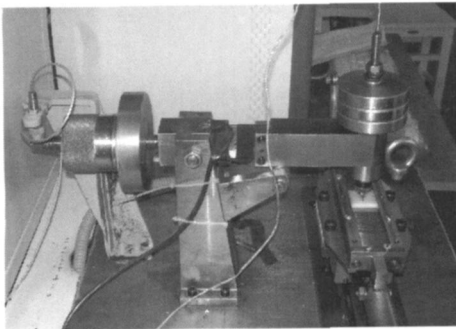


图 3 磨损量测试部分实物照片
Fig 3 Picture of wear value test

3 往复摩擦试验机控制系统设计

3.1 硬件控制系统

往复摩擦磨损试验机的硬件控制系统主要包括上位监控计算机、下位测量控制器及数据采集部分、辅助控制部分等，其基本构成如图 4 所示。测量控制部分的功能是将非电量物理参数 (位移、应变、转速、温度等) 变为电参量，进行放大、处理、变换，变为标准电压或电流信号及脉冲信号，并形成可与上位机交换数据的数字信号，实现摩擦力、磨损量等数据的实时动态采集；还可与上位机通信，实现数据的远传和远控^[11-15]。上位计算机作为主控制器实现数据传输通讯的管理和数据的提取控制，并完成数据计算、分析、动态数值及曲线显示功能。数据采集系统组成如图 5 所示。

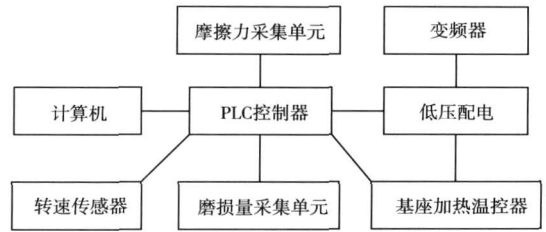


图 4 往复摩擦试验机控制系统硬件构成
Fig. 4 Hardware of the control system in RFWTM

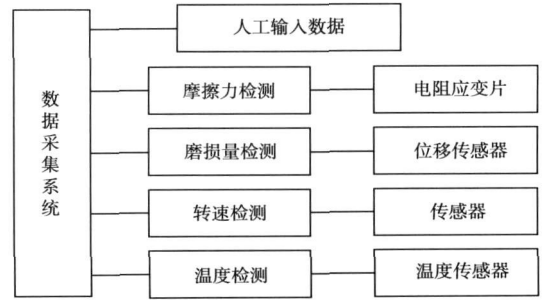


图 5 往复摩擦试验机数据采集系统组成
Fig. 5 Data acquisition system of the RFWTM

3.2 软件系统设计

软件系统包括上位机监控软件和下位机测控软件。利用 Windows 的图形界面功能和开放环境，以 Visual Basic 为开发工具，采用面向对象的设计思路，实现模块化的系统软件结构。测控软件由 PLC 承担，它以反复扫描方式工作，并通过 I/O 中断、定时中断、通信口中断来处理采样和控制事件；监控软件主要实现监控界面中摩擦速度、行程、摩擦系数等相关参量的自动数值计算和显示，以及通过数值和图表的形式实现数据的动态显示、存储、打印，并具有自动生成实验数据报表功能。

该往复摩擦磨损试验机的人机界面主要包括初始界面、摩擦试验界面、历史数据查询界面等。其中，摩擦试验界面如图 6 所示，上部是数值列表，可滚动查看最新

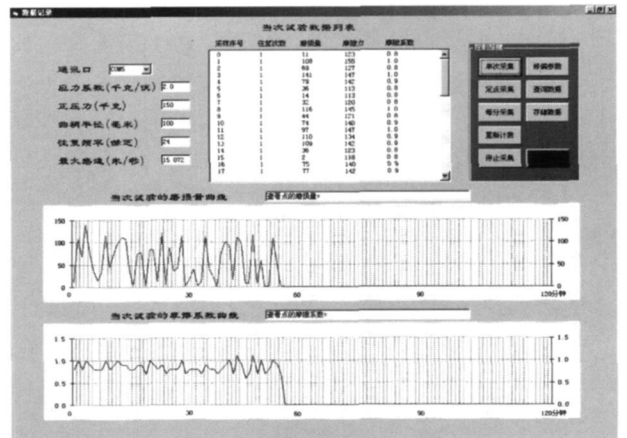


图 6 控制系统摩擦试验界面

Fig 6 Friction test interface of the control system

采集的记录, 新数据在顶部。下部是摩擦试验记录的 2 组曲线, 最多可同时显示 120 个数据点, 试验超过 2 h 时曲线将向左平移, 仅显示最新的数据。若选择曲线上的一个点, 然后用鼠标双击该点, 就可在上方的文本框内看到准确的读数。

4 实验分析

聚四氟乙烯是石油化工业往复式压缩机支撑环和活塞环制作中使用较多的高分子耐磨材料之一, 具有良好的耐磨性能和较小的摩擦系数^[10]。下面利用上述试验机对聚四氟乙烯的摩擦磨损性能进行实验分析。

本实验所用的聚四氟乙烯采用模压法制成, 试样规格为 15 mm × 10 mm × 5 mm, 对磨件为 45# 钢板, 摩擦副接触表面粗糙度约为 1.6 μm。实验过程中, 载荷大小为 15 N 和 20 N, 工作频率为 10 Hz 和 15 Hz, 对磨时间为 360 min, 润滑油型号为 KW-16 (C 级)。

4.1 实验过程

根据上述实验条件, 在不同载荷和速度下聚四氟乙烯的摩擦磨损数据和性能曲线如下。表 1 为正压力为 15 N 时, 工作频率分别为 10 Hz 和 15 Hz 情况下的实验数据, 表 2 为正压力为 20 N 时, 工作频率分别为 10 Hz 和 15 Hz 情况下的实验数据; 相应的磨损量-时间关系曲线如图 7、图 8 所示。

表 1 不同频率下的实验数据 (正压力为 15 N)

Table 1 Experiment data under different frequencies (the positive pressure is 15 N)

时间 /min	频率 10 Hz			频率 15 Hz		
	磨损量 /μm	摩擦力 /N	摩擦系数	磨损量 /μm	摩擦力 /N	摩擦系数
360	92	4.48	0.299	34	4.08	0.272
359	91	4.48	0.299	30	4.16	0.277
358	89	4.32	0.288	30	4.16	0.277
357	90	4.32	0.288	22	4.24	0.283
356	92	4.48	0.299	20	4.27	0.285
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	2	4.76	0.317	4	5.28	0.352
4	6	4.60	0.307	6	5.52	0.368
3	2	4.16	0.277	6	5.28	0.352
2	2	4.08	0.272	2	5.28	0.352
1	0	4.24	0.283	0	4.80	0.320

表 2 不同频率下的实验数据 (正压力为 20 N)

Table 2 Experiment data under different frequencies (the positive pressure is 20 N)

时间 /min	频率 10 Hz			频率 15 Hz		
	磨损量 /μm	摩擦力 /N	摩擦系数	磨损量 /μm	摩擦力 /N	摩擦系数
360	84	6.16	0.308	136	6.72	0.336
359	86	5.84	0.292	136	6.08	0.304
358	84	6.96	0.348	136	4.48	0.224
357	84	6.96	0.348	136	3.52	0.176
356	86	6.48	0.324	136	4.72	0.236
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	4	6.40	0.320	8	2.08	0.104
4	2	6.48	0.324	4	2.16	0.108
3	2	6.56	0.328	8	2.00	0.100
2	2	6.40	0.320	4	2.00	0.100
1	0	6.64	0.332	0	1.92	0.096

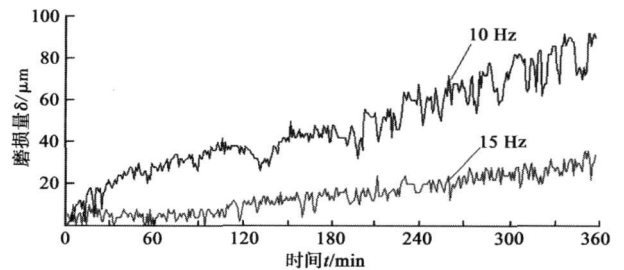


图 7 不同频率下的磨损量-时间关系曲线 (正压力为 15 N)
Fig. 7 Curves of wear value vs. time under different frequencies (the positive pressure is 15 N)

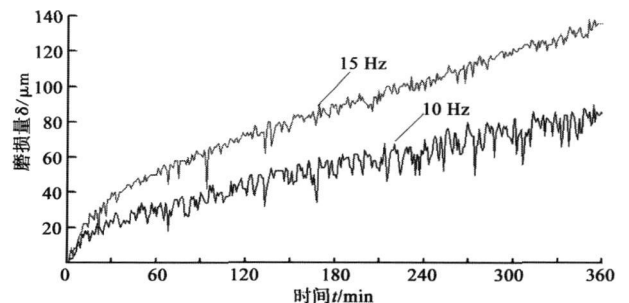


图 8 不同频率下的磨损量-时间关系曲线 (正压力为 20 N)
Fig. 8 Curves of wear value vs. time under different frequencies (the positive pressure is 20 N)

4.2 实验数据分析

从表 1、表 2 中的实验数据可以看出, 当压力为 15 N 时, 摩擦系数随对磨频率的升高而减小, 当压力为 20 N

时,摩擦副对磨频率对摩擦系数的影响较小;从图 7、图 8 磨损曲线看出,当压力为 15 N 时,聚四氟乙烯的磨损率随频率的升高而降低,当压力为 20 N 时,磨损率随频率的升高而增加。说明在低负荷下试样的磨损率变化不大,在高负荷下试样的磨损率明显增加。

5 结 论

本文设计的往复式摩擦磨损试验机及计算机控制系统,可用于不同固体材料在不同条件下的往复式摩擦磨损实验,能模拟往复式(如压缩机等)工况进行摩擦副元件的磨损性能测试。该试验机可在一定范围内实现往复行程、载荷、速度、温度、润滑的单因素或多因素控制,并可同时定性和定量显示运动中的摩擦力、磨损量、摩擦系数大小。通过在该试验机上进行的一些实验,证明试验机性能稳定,测试系统准确可靠,可有效地对运动副(试件)不同材质和工艺的摩擦磨损性能进行评定,以获得可靠的实验数据。

参 考 文 献

- [1] 赵丽娟,朱会东,张佐. 基于计算机摩擦测试试验的发展综述[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(1): 122-126.
ZHAO L J, ZHU H D, ZHANG Z. Review on development of computer-based friction testing[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(1): 122-126.
- [2] 徐双满,曾昭翔,马俊林,等. 对缸套 活塞环材料在往复滑动中摩擦系数的试验研究[J]. 北方交通大学学报, 1998, 22(4): 102-104.
XU SH M, ZENG ZH X, MA J L et al. Research and test on the friction coefficient of cylinder piston ring material in reciprocating sliding[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1998, 22(4): 102-104.
- [3] BENABDALLAH S M, CHALIFOUX J P. Computer-aided friction tester[J]. Tribology International 1991, 24(6): 403-407.
- [4] YAMAGUCHIE S. The importance of progressive techniques in tribology research[J]. Tribology International 2003, 36(10): 727-732.
- [5] WANG Z G. Tribological approaches for green metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1-3): 223-227.
- [6] MADO K, MIURA A, KIDO Y. Influence of testing method on the contact pressure distribution and its effect on coefficient of friction in polymeric bearings[J]. Tribology International 2007, 40(2): 390-396.
- [7] TOMANIK E. Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes[J]. Tribology International 2008, 41(11): 1032-1038.
- [8] 施洪生,郭炎,高晓军,等. 缸套 活塞环摩擦学性能试验机的设计研究[J]. 润滑与密封, 2004(3): 76-79.
SHIH SH, GUO Y, GAO X J et al. Development of tribo-tester for tribological studies of piston ring/bore pair[J]. Lubrication Engineering 2004(3): 76-79.
- [9] 龚俊,付士军,郭精义,等. 聚四氟乙烯及其石墨和 MoS₂ 填充复合材料的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2006(12): 146-148.
GONG J, FU SH J, GUO J Y, et al. Study on the tribological properties of PTFE and graphite MoS₂ filled PTFE composites[J]. Lubrication Engineering 2006(12): 146-148.
- [10] 郭精义. 高分子复合材料摩擦磨损性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2006.
GUO J Y. Investigation on tribological behaviors of macromolecular composites[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2006.
- [11] 蒋建忠,赵永武. 摩擦磨损试验机计算机辅助测试系统的设计与实现[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2005, 4(2): 187-190.
JIANG J ZH, ZHAO Y W. Design and realization of computer-aided measurement system for a tribo-tester[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2005, 4(2): 187-190.
- [12] 杨忠,吴惠祥,戴俊,等. 一种航空旋转密封件摩擦系数高精度测试仪[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12): 1211-1214.
YANG ZH, WU H X, DAI J et al. A high precision frictionmeter for aero rotary hemetic parts[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2005, 26(12): 1211-1214.
- [13] 李建芳,杨士强,沈璟. 往复摩擦磨损试验机测试系统的设计[J]. 润滑与密封, 2008, 33(10): 85-87.
LI J F, YANG SH Q, SHEN J. Design of testing system for reciprocating tribometer[J]. Lubrication Engineering 2008, 33(10): 85-87.
- [14] 李芳,翁文兵,王恒山,等. 一种面向用户的计算机集成热工测控系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1445-1450.
LI F, WENG W B, WANG H SH, et al. Development of client-oriented computer integrated test and control system for thermal performance test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2007, 28(8): 1445-1450.
- [15] 李学军,蒋玲莉,褚福磊. 便携式位移 加速度振动信号测试系统软硬件设计与实现[J]. 电子测量与仪器

学报, 2008, 22(2): 56-61.

LIX J, JIANG L L, CHU F L. Design and implementation of the hardware and software of portable displacement-acceleration vibration signal measurement system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2008, 22(2): 56-61.

作者简介



刘永平, 1997年于甘肃工业大学获得学士学位, 2003年于兰州理工大学获得硕士学位, 2006年于兰州理工大学获得博士学位, 现为兰州理工大学副教授, 主要研究方向为精密测量与控制技术。

E-mail: camelin@163.com

Liu Yongping received B. Sc. from Gansu University of Technology in 1997, received M. Sc. in 2003 and Ph. D. in 2006

both from Lanzhou University of Technology. He is currently an associate professor in Lanzhou University of Technology and his main research interests are precision measurement and control technology.



龚俊, 1987年于甘肃工业大学获得学士学位, 1992年于甘肃工业大学获得硕士学位, 现为兰州理工大学教授, 主要研究方向为特种装备及自动化技术。

E-mail: gongj@lut.cn

Gong Jun received B. Sc. in 1987 and M. Sc. in 1992 both from Gansu University of Technology. He is currently a professor in Lanzhou University of Technology and his main research interests are special equipment and automation technology.