

文章编号 1004-924X(2018)03-0640-07

基于气缸的主动恒力输出装置设计

梁世盛^{1*}, 魏晓阳², 祁佩¹, 黄顺舟³, 王力¹

(1. 上海航天设备制造总厂, 上海 200240; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240;
3. 上海航天工艺与装备工程技术研究中心, 上海 200245)

摘要:针对精密装配、搬运、工件表面修刮或磨削、抛光和擦洗等行业对设备主动柔顺能力的迫切需求,设计了一种基于气缸的主动恒力输出装置。对照设计目标,对所用的器件(包括比例压力调节器、气缸、导轨和压力传感器等)进行针对性选型,并设计针对压力传感器微弱信号的调理电路,增强其信号的准确性和抗干扰能力,同时设计数据采集处理板对整体系统进行控制,完成对力输出的闭环控制,并通过 RS485 通讯接收上位机命令和上传采集数据。最后通过大量动静压力的测试实验表明该设备在整个量程内,其输出力误差在 ± 3 N 以内,响应时间在 300 ms 以内,输出力不小于 200 N,性能满足设计目标。该设备的研制成功为主动力控制系统的设计研究开辟了新的思路。

关键词:力感知;力控制;比例压力调节器;RS485;数据采集

中图分类号:TP23 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182603.0640

Design of active constant output device based on cylinder

LIANG Shi-sheng^{1*}, WEI Xiao-yang², QI Pei¹, HUANG Shun-zhou³, WANG Li¹

(1. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Satellite Engineering Institute, Shanghai 200240, China;
3. Shanghai Aerospace Process and Equipment Engineering Technology Research Center,
Shanghai 200245, China)

* Corresponding author, E-mail: lsschina@163.com

Abstract: According to the urgent needs of active flexibility of equipment in a wide variety of industry sectors, such as precise assembly, removing, shaving, grinding, polishing and scrubbing on the surface of workpiece, an active constant pressure output device based on a cylinder was designed. According to design goals, it made a specific choice of the devices (including proportional pressure regulator, cylinder, guide rail, pressure sensor, etc.) which were used. And a weak signal conditioning circuit was designed for the pressure sensor, which can enhance the accuracy and anti-interference ability of the signal. And also, a data acquisition and processing board was designed to control the whole system and realized closed loop control of force output. And it received command of the host computer and uploaded the collected data through the RS485 communication. Finally, through a large number of dynamic and static pressure tests, it was shown that the output force error of the equipment is within ± 3 N, the response time is less than 300 ms, the output force is greater

收稿日期:2017-06-26;修订日期:2017-08-18.

基金项目:上海航天工艺与装备工程技术中心资助项目(17DZ2281000)

than 200 N, and the performance meets the design goals. The development of this device opens up a new way for the design and research of active force control system.

Key words: press sensing; press control; proportional pressure regulator; RS485; data acquisition

1 引言

机器人的控制基本可以分为位置控制和力控制两种,目前几乎所有的工业机器人都是使用位置控制方式,机器人力控制却寥寥无几。而在智能工业时代,许多场合要求机器人具有接触力的感知和控制能力^[1],例如智能机器的精密装配、搬运、工件表面修刮、磨削、抛光和擦洗等操作过程^[2-3]。

接触力感知和控制被称为柔顺控制,智能机器能够对外部环境顺从的这种能力被称为柔顺性(compliance)。柔顺性被分为被动和主动柔顺两种。智能机器借助某些辅助的柔顺装置,使其在与外部环境接触时能够对外部作用力产生自然顺从,被称作被动柔顺性;智能机器利用力的反馈信息采用一定的控制策略去主动控制作用力,被称为主动柔顺性^[2]。被动柔顺装置响应迅速,但针对性强,只能适用某些特定场合,柔顺范围局限,自身不具有对机器人的控制能力。为了克服被动柔顺的这些缺点,主动柔顺控制应运而生,成为当下智能装备研究的一个主要方向^[3-5]。

本文在参考文献[6-11]的基础上,提出了一种基于气缸的主动柔顺装置。该装置主要利用比例压力调节器、气缸、压力传感器、导轨等器件,并利用数据采集控制板进行高速采集控制,设计实现主动恒力输出,提高机器人对任务的适应性和工作过程的柔顺性。

2 系统原理

根据多种实际工况,柔顺行程达到 40 mm,装置响应时间在 350 ms 以内,输出力在 0~200 N,输出误差在±3 N 可以满足大多数应用要求。所以本文以上述指标为目标进行设计。

主动柔顺装置原理示意图如图 1 所示,导轨一端与固定端连接,另外一端与气缸活塞杆连接;压力传感器固定于导轨一端和活塞杆之间;气体经过

伺服阀并通过气管 1 和气管 2 分别对气缸进行充气,分别实现设备运动末端的负和正方向的运动。

其工作原理如下:上位机发送压力命令至控制板,控制板对压力传感器进行采集,并在控制板内对两个压力值进行比较,然后发送命令至比例压力调节器,使其输出对应的压力值并控制设备力输出方向,控制板循环高速的对压力传感器进行采集和气压输入的控制,实现对输出力的闭环高速采集和控制。

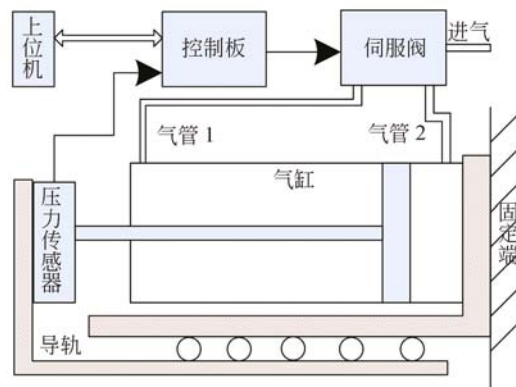


图 1 装置原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device

3 系统硬件设计

主动柔顺装置主要应用于智能机器的精密装配、搬运、工件表面修刮、磨削、抛光和擦洗等操作,因此需要保证该设备的输出压力精度和其响应速度能够满足相应工作的要求。

本文针对打磨抛光等高响应、高精度的加工任务要求,通过器件的择优选型,信号采集调理电路的针对性设计等方法使得该设备的响应速度、输出力精度达到任务要求。

3.1 电气设计

气缸、气压伺服阀、压力传感器与换向阀等的性能参数优劣关系到整个系统的精度和响应性能。

气缸和电动缸都可作为执行元件。但在考虑到气缸的操作简单、基本可实现免维护,特别擅长于做往复直线运动;而电动缸是由伺服电机组成,

主要用于旋转和摆动工况,做直线运动时需通过齿形或丝杆等机械装置进行传动转化,因此结构复杂,体积较大,不利于安装,并且增加了控制复杂性。所以设计中选择气缸作为执行元件。

设备通过气缸活塞的正负方向运动实现压力的正负输出,气缸的顺滑度、摩擦力等参数为其关键。该设计中采样 SMC 公司的 MQMLB25H-45D 型,该气缸具有低摩擦、高速、低驱动力、耐横向力、体积紧凑等优点。其使用压力范围为 0.01~0.7 MPa,运动速度达 5~3 000 mm/s,最大输出压力为 288.6 N(IN)和 343.6 N(OUT),大于设计要求(200 N),气缸行程为 45 mm(大于设计要求的 40 mm)。

比例压力调节器作为气压输出大小的控制部件,直接关系到设备的输出压力,其输出气压的控制精度、响应时间等为重要参数。在该设计中选用了 SMC 公司的 ITV1050-311L3-X154 型伺服阀。该调节器是通过外部输入 DC 0~10 V 的模拟信号对输出压力进行无级控制,具有低直线性误差($< \pm 1\%$, FS),低重复性误差($< \pm 0.5\%$),低迟滞($< 0.5\%$, FS)等特性,设定压力在 0.005~0.9 MPa,响应时间为 0.1 s,满足该设计要求。

压力传感器是作为压力信息反馈部件,在该设计中需要对力进行压力和张力的测量,且需要温漂小、体积小等要求。因此采用 Interfaceforce 公司的型号 SML-100 产品,该传感器具有专有的温度补偿,输出温漂小于 $0.008\%/F^{\circ}$,误差在 0.05% 内,可以测量张力和压力,测量范围达 450 N,具有过载保护,工作温度在 $-55^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$,非常适合狭小空间使用。

3.2 硬件电路设计

硬件电路主要负责整个系统的通讯、数据采集和控制,在整体系统中起至关重要的作用。其原理如图 2 所示,上位机通过 RS485 通讯方式向单片机下发命令,单片机开始控制换向阀和对压力进行采集并数据处理,而后单片机根据设定值和压力采集值相应调整压力比例阀的输出,这样即形成一个闭环控制。该部分的设计难点有以下几点:工业环境下的电路整体抗干扰能力、信号调理和处理等。

工业环境中存在各种噪声源,微电子电路面

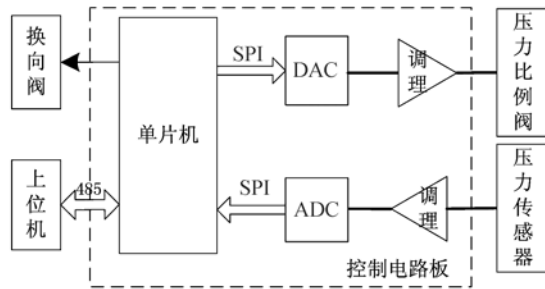


图 2 硬件电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hardware circuit

对于这些噪声显得非常脆弱,极易受其干扰而使得整体系统崩溃。该设备中环境对整体电路的干扰主要体现在通讯信号的干扰和电路电源的干扰。通讯方式比较常见的有 RS232、RS485 和 CAN 3 种方式,其特性如表 1 所示。

表 1 CAN/RS485/RS232 通讯方式比较

Tab. 1 Comparison of CAN/RS485/RS232 communication modes

特性\名称	CAN	RS485	RS232
单点成本	高	低	低
网络特性	多主网络	单主网络	/
数据传输率/MHz	1	10	0.12
通讯距离/m	10k	1 500	30
节点数量	110	128	1
软件易用性	复杂	容易	容易
抗干扰能力	强	强	弱

在结合该设备的实际应用,通过表 1 的对比,选择 RS485 通讯方式。RS485 成本低廉,软件使用方便,采用平衡发送和差分接收,具有抑制共模干扰的能力,并且中心收发器具有高灵敏度,能检测低至 200 mV 的电压,在长距离传输后信号能得以恢复^[11-12]。

采集系统供电电源是电路的重要部分,其干扰主要来自传导方式。在工业环境中,电路电源干扰源多数是电机驱动器或其他大功率设备。该设计中是通过开关电源给电路供直流电源,实验中发现干扰主要通过地线进入开关电源并影响电路正常工作,通过断开开关电源的地线来切断传导干扰,大大提高电路运行的稳定性。

由于设计中选用的是电阻电桥应变式压力传感器,其输出为毫伏级电压,所以对信号进行调理,调理电路如图3所示。电桥使用电阻 A11~A14 调整电桥零位平衡,两端信号输送至仪放 AD623 中进行初级放大,使用电阻 A15 调节放大倍数,将信号放大至伏级后输送至后面的一阶低通滤波器。

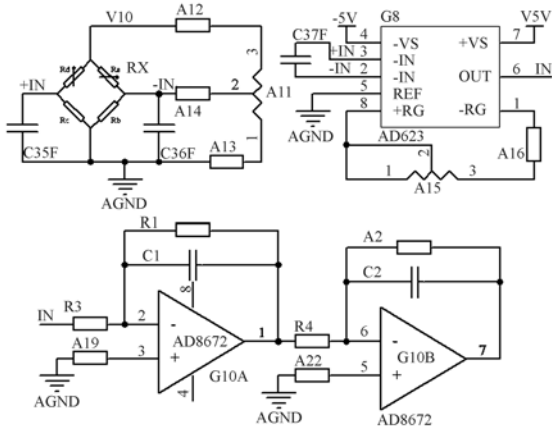


图3 压力传感器调理电路

Fig. 3 Pressure sensor conditioning circuit

根据系统整体性能估算,压力传感器信号的变化频率在毫秒级,而其他干扰信号基本处于高频(Mhz 以上),所以信号滤波需要采用低通滤波器。另外 ADC 采样信号伏值范围有限定,初级放大后信号基本不符合 ADC 最优采样要求,所以需通过两级一阶低通滤波器(一阶比二阶低通更易调节截止频率和放大参数、更加稳定)进行二次调整,该滤波器使用运放 AD8672 进行搭建。其截止频率 f_0 如公式(1)所示,每级放大倍数 A_f 如公式(2)所示:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1}, \quad (1)$$

$$A_f = \frac{R_1}{R_3}. \quad (2)$$

4 系统软件设计

设计中软件程序主要分为两个部分,一是单片机程序,负责命令的接收、数据采集处理和控制,另外是上位机程序,负责面向用户,设定压力、方向等参数的下发和实时数据的观察。

单片机上电后程序开始运行,初始化后等待串口中断,接收上位机命令后 flag0 和 flag1 置

零,在接收通讯码 0x55 后接收设定力 F_s ,然后进入缓冲步骤。该步骤主要针对方向改变引起的撞击现象,进入后先把输出力清零,然后改变方向,再输出较小力使运动末端缓慢运行到限位后进入压力调整步骤;压力调整步骤中首先采集实际压力 F_r 并向上发送信息,然后和设定压力 F_s 进行比较,对输出力进行调整,如果设定力 F_s 大于 F_r ,将输出力减小,否则将输出力变大。其流程如图4所示。

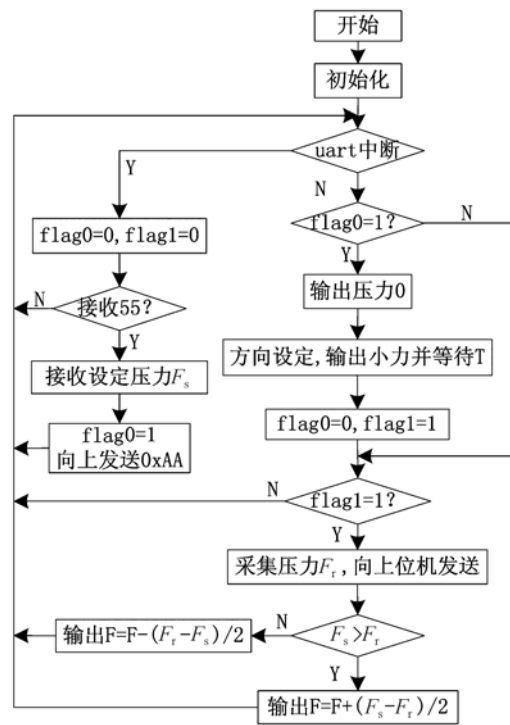


图4 系统程序图

Fig. 4 System program diagram

上位机软件基于 Labview 软件编写。用户在设定串口参数后点击“ACTIVE”按钮后开始运行,然后判断设定压力 F_s 是否改变,如果改变就向下发送 0x55 和设定压力 F_s 并等待接收上传的 0xAA,接收成功面板上的“通讯正常”灯亮绿灯,如果 F_s 值没有改变或接收 0xAA 失败,就循环接收显示上传的压力信息。

该设计中压力的算法控制是采用简单的比较算法,即 PID 算法中的 P 控制,将采集的压力与设定压力进行比较,然后调整输出量。由于该系统的信号采集和处理的高速性,P 控制已经可以满足设计的要求,所以并没有对控制算法进行深入研究。

5 测试结果

为了对该设备的各项性能进行测试,设计了相对应测试平台,如图 5 所示。将设备安装在运动导轨上,气缸活塞顶出至运动曲面;在活塞杆外部安装压力传感器(LH-Z05A-50KG,上海力恒)来测量实际压力,并设置以 50 ms 为间隔采集一个数据,通过串口传至电脑中进行记录;通过设备在运动导轨上的上下移动,实现设备顶部紧贴曲面做顺应运动,并能测得实时压力。性能试验主要包括压力输出测量和响应时间测试。

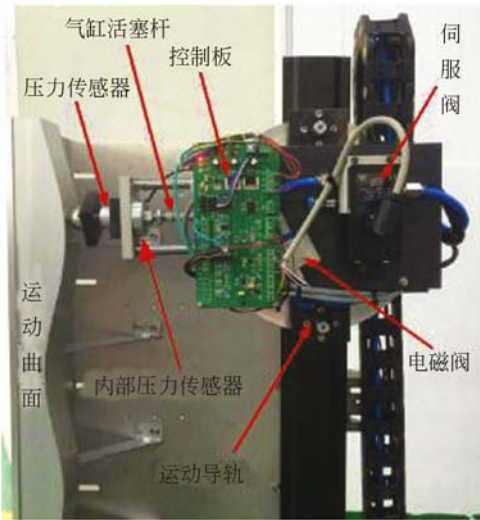


图 5 实验台
Fig. 5 Experiment platform

5.1 压力输出测试

在静态测试中运动导轨不移动(气缸伸缩量不变),通过设置不同压力值并测量实际压力值。其测试结果如图 6 所示,分为加压和减压两种方式

进行测试,通过设定压力从 0 N 至 200 N(间隔 10 N)递增,其测试曲线为原点线;压力从 200 N 至 0 N(间隔 10 N)递减曲线为正方形线。三角实线为两者差值,另外两条分别为增压和减压误差曲线。

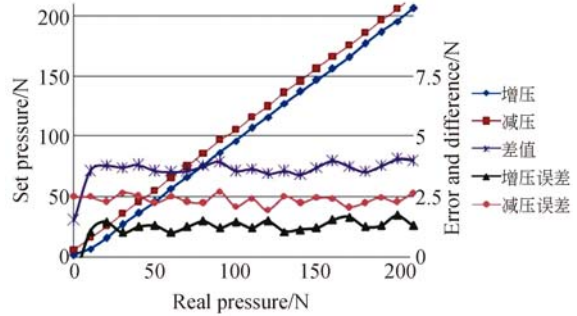
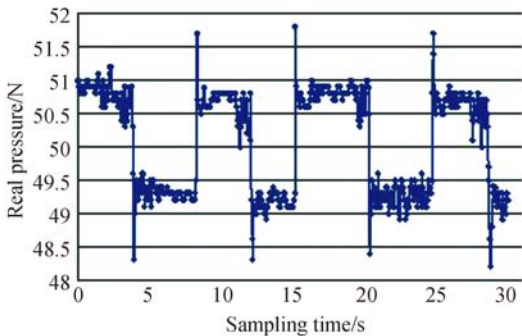


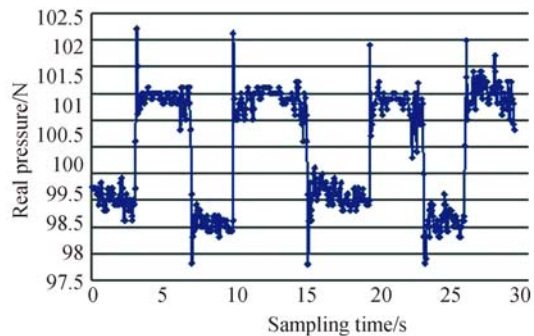
图 6 静态压力测试图
Fig. 6 Test diagram of static pressure

图 6 中加压和减压曲线基本成直线,说明设定压力和实际压力成线性关系,但两曲线并不重合,增压和减压曲线均偏离设定压力值并分布在设定压力两侧,差值曲线大约为 4 N 左右,增压误差大约为 1.5 N,减压误差大约为 2.5 N。经多次静态,测得结果大致相同。

动态测试是在设定压力不变情况下,运动导轨以 50 mm/s 的速度上下移动,设备顶端顺应运动曲面进行移动时测得的实际力大小,该测试中设定出力分别为 50 N,100 N,150 N 和 200 N,得到 4 个压力曲线如图 7 所示。可以看出进行曲面的上坡(活塞杆缩回)和下坡(活塞杆伸出)运动时,实际压力围绕设定压力存在一定偏差,曲线并不呈现一条直线,并在上下坡的交汇点会出现冲击现象,压力瞬间跳变。从图中可以看出,输出力的误差基本在 ± 2 N 内,满足设计的要求。



(a) 设置压力 50 N
(a) Set pressure 50 N



(b) 设置压力 100 N
(b) Set pressure 100 N

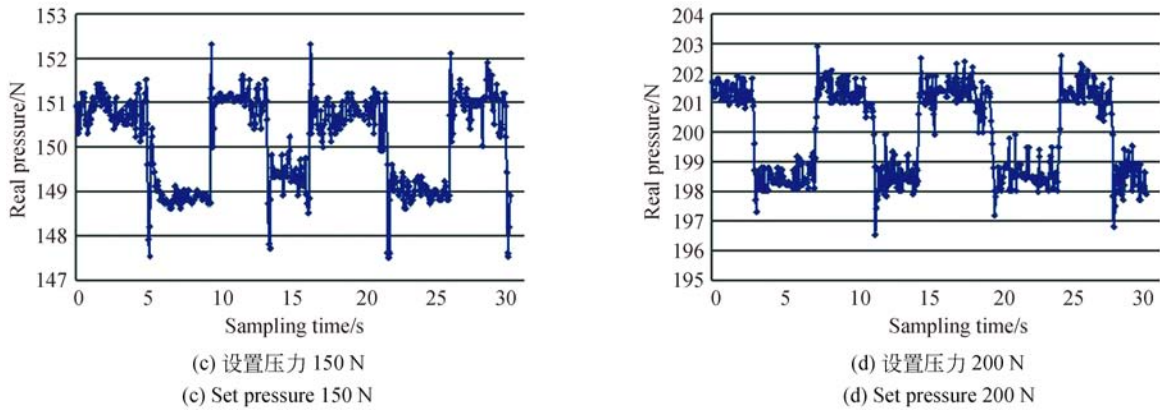


图 7 动态压力测试图

Fig. 7 Test diagram of dynamic pressure

假设活塞杆伸出时方向为正,所受整体摩擦力(主要为气缸和导轨)为 f_{m1} ,方向为负,活塞杆缩回运动所受摩擦力为 f_{m2} ,方向为正,设定压力为 F_s ,实际压力为 F 。所以可以得到加压时的关系式为公式(3),减压时为公式(4),上坡运动关系式为公式(3),下坡运动关系式为公式(4):

$$F = F_s - f_{m1}, \quad (3)$$

$$F = F_s + f_{m2}. \quad (4)$$

可以得出摩擦力 f_{m1} 大概为 1~1.5 N,摩擦力 f_{m2} 大概为 1.5~2.5 N。所以可确定,系统摩擦力(气缸和导轨)是测试结果偏离设定值的主要因素。但该因素对输出力的影响在承受范围内,可以满足要求。

5.2 响应时间测试

设备的响应时间是指设备在运行过程中,碰到突变点时输出力从突变开始至回到正常值所需的时间,响应时间越快,说明设备性能越好。外部压力传感器的采集时间为 50 ms,通过串口传送至电脑中进行记录。由于不同设定力的响应时间差别不大,所以在这只展示了设定力为 50 N 的情况,为方便观察,将压力跳变点进行了放大显示,结果如 8 图所示。由于记录时间间隔为 50 ms,所以图中两个点之间的时间即为 50 ms,可以看出得出输出力从跳变开始至恢复至正常值之间最多经过了 6 个点(即为 300 ms),说明该设备的响

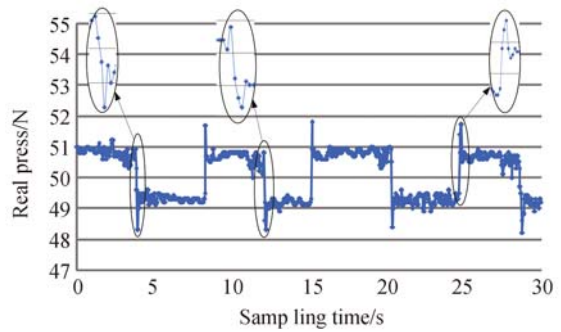


图 8 响应时间图

Fig. 8 Diagram of response time

应时间即小于 300 ms,满足设计的要求。

6 结 论

本文针对打磨、抛光等高响应主动柔顺力控设备的需求,结合现有的新型气压控制元件、传感器等,设计了一种基于气缸的力主动柔顺装置,并针对该设备设计了一套相对应的测试平台,通过大量的动静态实验对设备的性能进行测试,另外简单地分析了系统误差造成的原因。实验表明该设备的输出力误差在整个量程内都保持在 ± 3 N 内,响应速度在 300 ms 内,行程范围为 40 mm,输出力不小于 200 N,满足设定的目标。该设备的研制成功为新型主动柔顺装置设计研究开辟了新的思路。

参考文献:

[1] 王菲,柳洪义,罗忠. 形位不确定回转腔体内壁表面的打磨[J]. 光学精密工程,2013,21(6):1480.
WANG F, LIU H Y, LUO Z. Grinding control of

rotary shell's inner-surface with dynamics uncertainties[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1480(in Chinese)

[2] 魏媛媛. 基于模糊控制理论的机器人柔顺控制方法

- 的研究[D]. 华中科技大学, 2001.
- WEI YY. Research on robot compliant control method based on fuzzy control theory[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2001 (in Chinese)
- [3] 殷跃红, 朱剑英. 智能机器人力觉及力控制研究综述[J]. 航空学报, 1999, 20(1):2.
- YIN Y H, ZHU J Y. Force sensing & control for intelligent machine: an overview[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(1):2. (in Chinese)
- [4] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position / force control of manipulators [J]. *Trans. of ASME, Journal of DSMC*, 1981, 102:126-127.
- [5] WHITNEY D E. Resolved motion rate control of manipulators and human[J]. *Protheses IEEE Trans. on Man-Mach. system*, 1969, MMS-10(2):47-53.
- [6] WHITNEY D E. Historical perspective and state of the art in robot force control [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1987, 6(1) :3- 14.
- [7] WHITNEY D E. Force feedback control of manipulator fine motions[J]. *ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control*, 1977, 99(2): 91- 97.
- [8] SALIBURY J. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates[C]// *Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control*. USA: Albuquerque, 1980: 95- 100.
- [9] MASON M. Compliance and force control for computer controlled manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1981, 11(6): 418- 432.
- [10] 范敏, 刘凤, 王佩, 等. 大口径非球面光学研抛压力控制系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4):1019-1021.
- FAN M, LIU F, WANG P, et al.. Polishing pressure control system for large caliber aspherical optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1019-1021(in Chinese)
- [11] 姜同稳. CAN 总线特点与 RS-485 总线性能的比较分析[J]. 电子世界, 2014, 4: 271.
- JIANG T W. Comparison and analysis of the characteristics of CAN bus and the performance of RS-485 bus[J]. *Electronics World*, 2014, 4: 271 (in Chinese)
- [12] 穆斌, 罗珣. RS-485 总线网络应用中的安全与可靠性[J]. 光学精密工程, 2003, 11(4):194-196.
- MU B, LUO X. Safety and reliability during application of RS-485 bus network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4):194-196(in Chinese)

作者简介:



梁世盛(1985—),男,浙江苍南人,工程师,2012年毕业于电子科技大学测试计量技术及仪器专业,获硕士学位,主要从事电子测量与控制的研究。E-mail:lsschina@163.com

通讯作者:



魏晓阳(1988—),女,四川成都人,工程师,2013年毕业于电子科技大学测试计量技术及仪器专业,获硕士学位,主要从事卫星测试与控制的研究。E-mail:mime_sun@126.com