

抛光工业机器人主动恒力装置设计研究^①

禹鑫焱^② 邢 双 欧林林^③

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310000)

摘 要 研究了工业机器人抛光中的恒力控制,针对传统的机器人恒力控制中既要对机器人进行力控制又要对机器人进行位置控制,导致工业机器人整体控制复杂,响应较慢,精度较低的问题,采用机器人力和位置分离的方式,设计了独立于机器人本体的主动恒力控制装置来解决机器人作业的力控制,使机器人力控制作业中不用考虑机器人的运动控制,从而达到解耦的效果。实验验证结果表明,设计的主动恒力装置提高了工业机器人力控制精度,具有良好的恒力控制性能。

关键词 抛光, 打磨, 工业机器人, 力控制, 恒力装置位置控制

0 引 言

随着机械工业的快速发展,制造业对抛光工艺的质量要求越来越高。虽然采用工业机器人进行抛光可使产品质量得到显著提高,但是国内工业机器人高精度抛光技术还有待提高。在工业机器人抛光过程中,工具末端恒力控制是影响产品表面质量的最重要因素。在机器人恒力控制上,文献[1]提出了力/位置混合控制,这种运动控制会出现鲁棒性问题,而且整体的运算复杂度较高,机器人运动时稳定性差。文献[2]和[3]分别提出了机器人阻抗控制和刚度控制。这两种控制不需要控制模式的切换,但是在未知的环境中对力的跟踪能力表现较差。文献[4]和[5]提出了显力控制,将力控制作为外环控制,位置控制作为内环控制。该控制结构简单,但是力的跟踪能力一般。文献[6]提出了机器人被动柔顺控制,该控制通过弹簧、橡胶和阻尼等装置来实现,它依靠“物理”层面的柔顺性,只能在一定层面

上起到缓冲作用,但无法保证控制效果。除了以上控制方法外,还有自适应控制^[7,8]、鲁棒控制^[9]、神经网络控制^[10,11]和模糊控制^[12]等。但是以上控制方法都是通过机器人本体的运动来改变机器人末端的受力,这就导致机器人的控制极为复杂,而且末端受力无法保持在一个恒定值,响应速度慢,控制精度低。

为了克服以上机器人控制的弊端,本文设计了独立于机器人本体的主动恒力装置,将机器人恒力控制分为力控制和位置控制,恒力装置负责力控制,机器人负责位置控制,在研究机器人恒力控制时不考虑机器人的运动控制,不用对机器人进行受力建模,充分达到解耦的效果。本文提出了一种基于机器人控制解耦的可用于机器人末端的恒力控制装置。本研究首先根据恒力装置的工作要求对其机械结构和气路进行设计,然后对其进行硬件设计和软件设计,再对相关参数进行标定,最后通过实验验证其不同恒力输出的稳定性,以及不同运动情况对恒力输出的影响。

① 863 计划(2014AA041601),浙江省公益项目(2016C31064),宁波市重点工业项目(2014B10017),国家自然科学基金(61273116)和浙江省自然科学基金(LY15F030015)资助项目。

② 男,1979 年生,博士,讲师;研究方向:工业机器人轨迹规划,工业机器人运动控制等;E-mail: yuxinyinet@163.com

③ 通讯作者,E-mail: linlinou@zjut.edu.cn

(收稿日期:2016-12-26)

1 恒力装置设计

本文先对主动恒力装置的工作要求进行分析,再根据工作要求分别对恒力装置的机械结构和气路进行设计。

1.1 恒力装置的工作要求

主动恒力装置是安装在机器人末端来进行工作的,它有上下两个接触面,一个是外界作用于恒力装置,另一个是连接机器人末端,而这里恒力的定义是外界垂直作用于恒力装置接触面上的力恒定。恒力装置设计有以下两个主要的工作要求:

(1)由于机器人末端会随着机器人的运动而处于任意姿态,因此安装在机器人末端的恒力装置的姿态将随之改变,而恒力装置只考虑外界垂直作用于装置接触面上的力,从而该力会随着自身的重力和运动时的摩擦力不停地变化,需要根据自身的姿态来补偿重力和摩擦力的影响。

(2)恒力装置可以设定任意的目标力,正常未受到力时处于最大行程状态;当外界作用于接触面且接触力大于当前设定的目标力时,恒力装置将向里缩进,直到接触力小于或等于目标力;反之恒力装置将保持最大行程状态。当外力作用于恒力装置使其保持在非最大行程状态时,作用力减少到小于目标力,则恒力装置将向外伸长,直到作用力大于目标力或者装置达到最大行程。

1.2 机械结构设计

根据恒力装置的工作要求,为使设计的恒力装置能更有效地工作于机器人末端,对恒力装置的结构进行了详细的设计。

主动恒力装置的工作方式是活塞式运动,本设计中采用气动控制方式,以气缸驱动整个装置正常工作,其具体结构如图 1 和图 2 所示。主要部件包含气缸、花键导杆、加速度传感器、磁性开关、二位五通电磁阀、压电比例调压阀等。

装置分为上下两个法兰,一端连接机器人法兰末端,一端连接打磨等工具,两法兰之间通过橡胶防尘管进行密封处理;内部的动力原件为一双向气缸,通过浮动接头连接两个法兰端盖,由外部气路控制

气缸的伸缩;为了保证整个系统的伸缩性和刚性,选用滚珠花键导轨进行导向;磁性接近开关则安装在气缸的一侧用于检测气缸的伸缩位置;压电阀、电磁阀与加速度传感器等等则集成在其内部(虚线处)以对设定力进行控制。

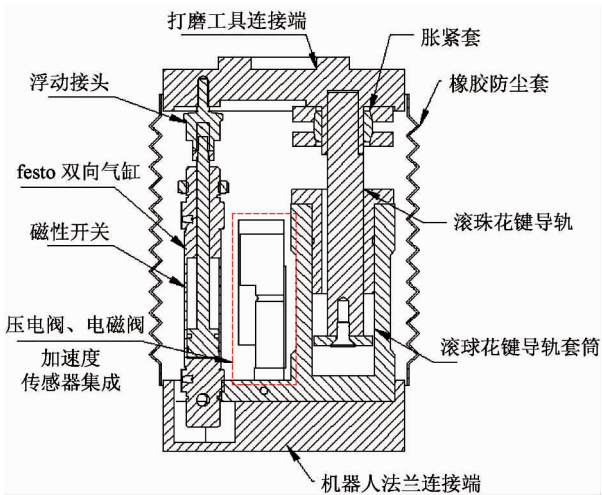


图 1 恒力装置的剖面图

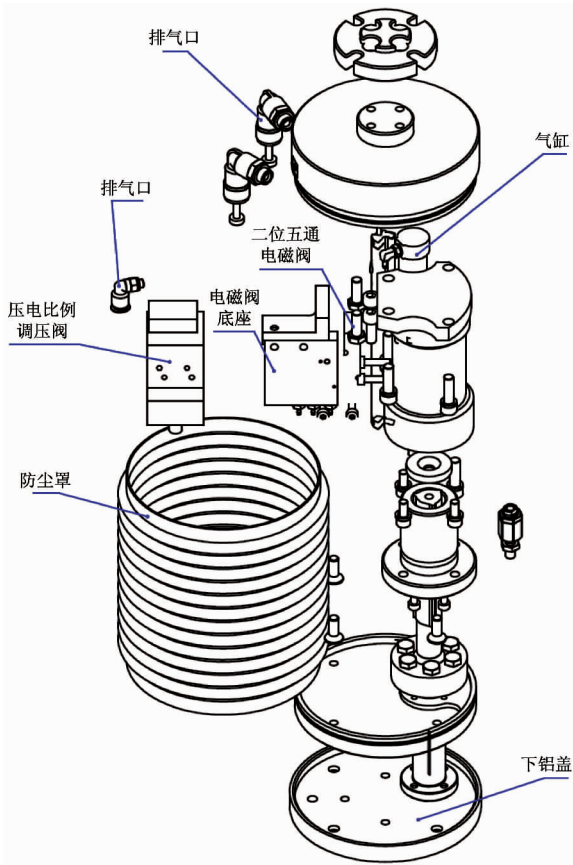


图 2 恒力装置的结构原理图

1.3 气路设计

由于主动恒力装置是采用气动进行控制,因此需要对其气路进行详细设计。根据图 2 的恒力装置结构原理图,气体由外部气泵经进气口进入内部,通过气管连接气路进入电磁阀底座内部气路;然后气体经安装在电磁阀底座上的压电比例调压阀流回电磁阀底座内部气路,进入安装在电磁阀底座上二位五通电磁阀的进气口;接着气体从二位五通电磁阀出气口流回电磁阀底座内部气路;然后气体流出气路接头,通过气管接入气缸一端的气管接头,使气缸中气体保持一定的压强值;排气通过二位五通电磁阀的排气孔实现,将气体排放到防尘罩内。气缸的运动引起机构的联动,带动花键轴轴向运动,进而带动下铝盖,下铝盖上安装有工具(或工件),从而保证抛磨的作业面压力的恒定。防尘罩能随机构的联动而伸缩,防尘罩内气体通过排气口排到大气中,使内部气压和大气压保持一致。

2 控制系统设计

根据恒力装置的工作过程和要求可知该装置的主要影响因素是姿态、行程和受力。系统中采用倾角传感器来测量装置的姿态,采用位置行程传感器来测量装置的行程,利用气缸压力和其它干扰参数来控制受力。恒力装置的主动动力是通过压电比例阀控制气缸来实现,并在其工作过程中需要对其进气压进行设定,并且由于外力的作用,气缸会来回往返运动,从而对其运动方向进行判定。

图 3 为主动恒力装置的控制系统原理图。整个恒力装置反馈的信息有位置、倾角和压力,设定信息有气缸进气方向和气缸进气压力。恒力装置通过传感器采集压力信息、倾角信息和位置信息,然后经 A/D 转换为数字信号发送给控制器,控制器将处理后的数据经 D/A 转换,用于压力设定和方向设定,作用于气缸。

除了以上控制参数,还有其它参数会对整个控制系统的控制精度产生影响,如自身的重力,运动时候出现的摩擦力,橡胶的阻力以及负载的重力等,因此在设计控制系统时也要进行考虑。

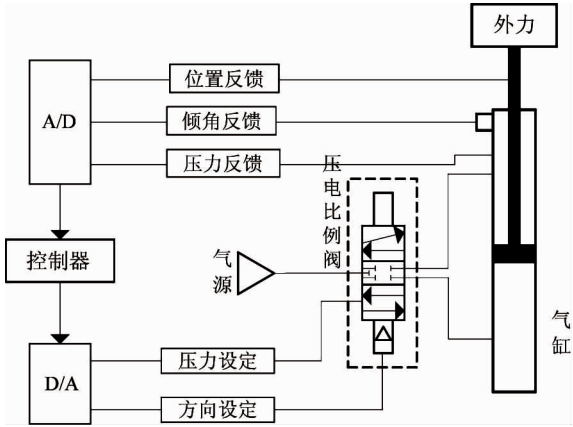


图 3 控制系统原理图

下面根据主动恒力装置的控制原理,分别开展其控制系统的硬件和软件设计。

2.1 硬件设计

主动恒力装置选用贝加莱控制器,气缸作为被控对象,加速度传感器用于采集倾角信息,接近开关用于采集气缸位置信息,压电比例阀用于采集并设定气缸的压力信息,电磁阀用于设定气缸运动方向。

根据主动恒力装置的控制要求,所设计的硬件系统的逻辑示意图如图 4 所示。控制系统首先通过加速度传感器,接近开关和压电阀采集数据,将模拟信号转换为数字信号发给贝加莱可编程逻辑控制器(PLC);然后贝加莱 PLC 将接收的数据进行处理,并根据相应的控制算法进行计算,转换为所需的目标数据,并将数字信号转换为模拟信号发送给压电阀;电磁阀通过数字信号即可控制;最后通过压电阀和电磁阀控制气缸的运动,从而实现对整个恒力装置控制系统的运动控制。

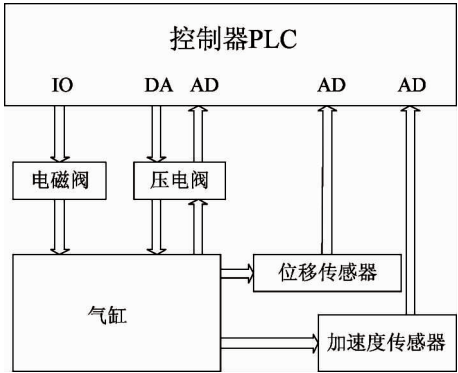


图 4 硬件逻辑示意图

2.2 软件设计

系统软件分为上位机和下位机两部分。下位机主要负责数据的采集,处理和分析,根据控制算法向系统下达控制指令,同时将采集的数据发送给上位机。上位机主要负责接收数据,存储数据,绘制图形,向下位机发送更新参数的指令。

2.2.1 下位机设计

下位机采用 ST 语言在贝加莱 Automation Studio 开发环境下编写,采用模块化结构和实时多任务操作系统。下位机程序逻辑示意图如图 5 所示,下位机程序分为数据模块,控制模块和通信模块;数据模块主要负责气缸压力、气缸的位置和装置的倾角等数据采集、数据转换和数据反馈;控制模块主要负责数据处理和数据更新,该模块是整个恒力装置的核心部分,在本设计系统中采用 PID 控制方法实现对装置的主动恒力控制;通信模块主要负责数据收发和数据设置,采用 TCP/IP 的网络通信协议,建立通信的服务端。数据模块主要负责将当前的数据发送给控制模块和通信模块,控制模块将处理后的数据发送给数据模块,通信模块将接收到的数据发送给数据模块。控制模块和通信模块独立运行,互不干扰。

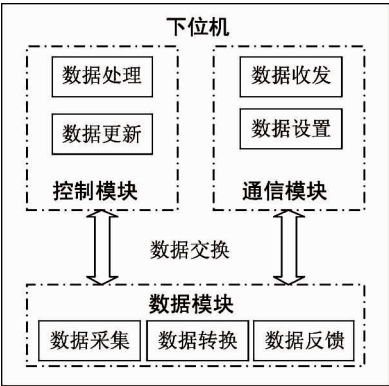


图 5 下位机程序逻辑示意图

2.2.2 上位机设计

上位机为基于 TCP/IP 通信协议的客户端,主要接收来自 PLC 服务器中发送的数据以及用户设定的相关参数,具体的通信数据与下位机中的通信模块中的数据相同,通信数据如表 1 所示。图 6 为上位机逻辑示意图,上位机程序分为数据区,显示区

和操作区。数据区负责接收服务器中发送的数据并进行处理;显示区负责显示力变化波形,位置变化波形和倾角变化波形;操作区分为开始、简单、设置和错误四个功能,开始用于连接服务器,简单用于设置力值和负载值,设置用于修改除力和负载之外其它参数;错误用于显示接收到的错误信息。显示区从数据区获取数据并绘制成实时波形,操作区从数据区获取当前参数值并将用户设定的参数值发送给数据区。

表 1 上下位机通信数据

数据段	数据名	解释
0	模式	工作模式:正常工作 设置模式:修改参数
1	实际力	当前受到的力
2	倾角	装置相对于水平的角度
3	位置	装置的运动位置
4	换向阀状态	换向阀正向还是反向
5	负载	装置上额外附加重量
6	目标力	用户设定的压力
7	摩擦力	装置自身的摩擦力
8	重力	装置自身的重力
9	错误信息	硬件软件错误的报警反馈

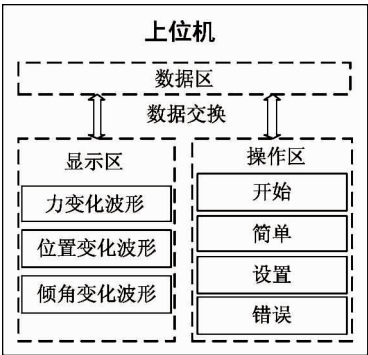


图 6 上位机逻辑示意图

上位机软件设计中采用队列的方式进行波形显示,将队列的长度固定,每次接收一个数据就进行入队,同时将队列中的第一个数据进行出队,这样既能保证队列长度又能更新整个队列的数据,然后将队列的数据发送给图形控件,重绘即可更新对应的波形,图 7 为上位机软件界面。

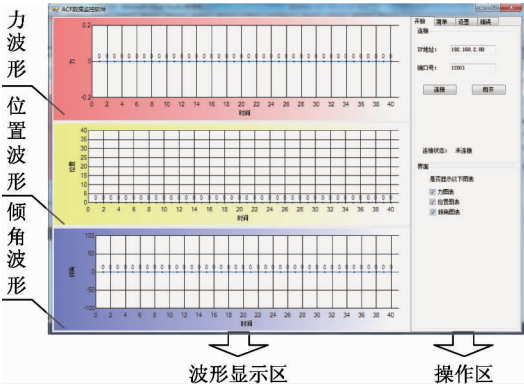


图 7 上位机软件界面

3 恒力装置参数设计和确定

为了更好地对主动恒力装置进行精确的恒力控制,需要对恒力装置的一些参数进行标定,标定的参数主要包括气缸的压力、倾角、位置、重力、摩擦力等。

3.1 气缸压力

压电阀从气缸中反馈得到的气缸的压强的数字量,需要将其转化为实际的压力值,数据处理公式为

$$V_{act} = X_{out} \times V_{max}/K_v \tag{1}$$

其中 V_{act} 为实际输出的电压值,单位为 V; X_{out} 为压电阀反馈的数据经 AD 转化后的数字量; V_{max} 为电压的最大值,单位为 V,值为 10; K_v 为压力转换系数,值为 32767。

再将电压值转换为压强值,单位转换公式为 $1V = 0.8bar$, $1bar = 10N/cm^2$,那么压强为

$$P = V_{act} \times K_p \tag{2}$$

其中 P 为压强,单位为 N/cm^2 ; V_{act} 为压电阀实际输出的电压值,单位为 V; K_p 为压强系数,值为 8。

获取气缸内部的接触面积为

$$S = \pi r^2 \tag{3}$$

其中 S 为气缸内部的接触面积,单位为 cm^2 , r 为气缸半径,值为 0.8,单位为 cm。

由 $F = PS$ 可得到

$$F = X_{out} \times V_{max} \times K_p \times \pi \times r^2 / K_v \tag{4}$$

其中 F 为气缸的压力,单位为 N。

3.2 倾角

倾角的数据处理公式为

$$angle = \arcsin\left(\frac{X_{out} - O}{S}\right) \tag{5}$$

其中 $angle$ 为计算的角度, X_{out} 为加速度传感器反馈的数据经 AD 转换后的数字量, O 为参考偏移量, S 为敏感程度。

3.3 位置

位置的数据处理公式为

$$position = L_{max} \times X_{out} / K_{pos} \tag{6}$$

其中 $position$ 为气缸的位置, L_{max} 为气缸的总行程, X_{out} 为接近开关反馈的数据经 AD 转换后的数字量, K_{pos} 为位置系数,值为 32767。

3.4 摩擦力

由于重力和摩擦力无法直接测量,因此通过两种不同运动状态测量气缸的力来间接获取。具体过程如下:

(1)忽略和去除其它影响因素,去除恒力装置的外壳橡胶,使恒力装置处于最小行程中,逐渐增加气缸压力,当恒力装置由静止到向上运动时,记录当前气缸的力 F_{up} ,那么此时重力 G ,摩擦力 f 和气缸压力的关系为

$$G + f = F_{up} \tag{7}$$

(2)使恒力装置处于最大行程中,逐渐减少气缸的压力,当恒力装置由静止到向下运动时,记录当前气缸的力 F_{down} ,那么此时重力 G ,摩擦力 f 和气缸力的关系为

$$G - f = F_{down} \tag{8}$$

由公式和可得

$$\begin{cases} G = \frac{(F_{up} + F_{down})}{2} \\ f = \frac{(F_{up} - F_{down})}{2} \end{cases} \tag{9}$$

4 实验及结果分析

主动恒力装置实物图如图 8 所示。为了验证主动恒力装置的有效性,建立了主动恒力装置的实验平台,如图 9 所示,采用的工业机器人为 UR5,恒力装置位于机械臂末端,通过 12 针电缆线连接控制柜,上位机通过网口与控制柜相连,实时监控恒力装置中的数据。在上位机中设定目标力和负载,让主

动恒力装置随着 UR5 的运动而运动,同时外力作用于恒力装置法兰。

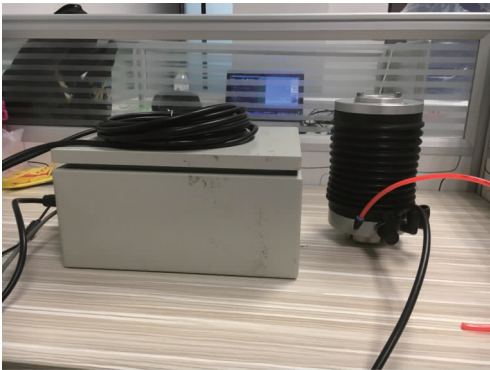


图 8 主动恒力装置



图 9 实验平台

4.1 重力和摩擦力的间接测量

若忽略干扰因素,去除恒力装置的外壳橡胶,则当恒力装置处于最小行程并且由静止到向上运动时,气缸输出的力 F_{up} 是 12.58N。当恒力装置处于最大行程并且由静止到向下运动时,气缸输出的力 F_{down} 是 8.9N,因此由式(9)可得重力 G 是 10.74N,摩擦力 f 是 1.84N。

4.2 气缸压力测试

为了对气缸压力进行标定,去除其他干扰因素,通过贝加莱控制器对气缸压力进行测试。在控制器中设定不同的压力值,根据传感器反馈得到实际的压力值,将两个值进行比较。从表 2 可以看出,设定压力值与实际压力值基本接近,误差不超过 1%,精确度较高。

表 2 气缸压力

设定压力	数字量	实际压力	误差
5N	815	5.02N	0.4%
10N	1630	9.93N	0.7%
16N	2608	16.07N	0.44%
21N	3423	21.05N	0.24%
27N	4401	27.05N	0.19%
34N	5542	34.04N	0.12%
44N	7172	44.12N	0.27%
52N	8476	52.09N	0.17%
65N	10595	65.19N	0.29%

4.3 恒力控制时控制器的输入与输出

在实验中,设定目标力为 20N,负载为 0kg,使恒力装置随着 UR5 的运动不停改变其姿态,同时将外力作用于恒力装置的上法兰,使其往返运动,记录贝加莱 PLC 的输入和输出。图 10 为恒力装置在上述情况下贝加莱 PLC 输入的反馈力和输出的设定力。由于恒力装置姿态不断的变化以及外力的作用,整个上下运动的控制过程中贝加莱控制器会对每一个状态的输出设定进行补偿,以保证整体输出力保持恒力,因此 PLC 输出的设定力呈上下波动状态,而 PLC 输入的反馈力则基本保持稳定;图中 PLC 输出的设定力较小的时刻都出现在恒力装置向里运动或倾角较小情况,输出设定力较大的时刻都出现在恒力装置向外运动或倾角较大的情况。图 11 为上述对应过程的贝加莱 PLC 与输入的反馈力对应的输入模拟信号,以及输出的设定力对应的输出数字信号。

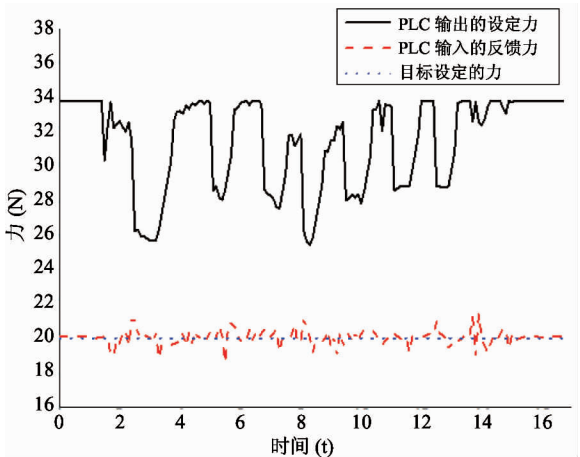


图 10 PLC 对力的输入和输出

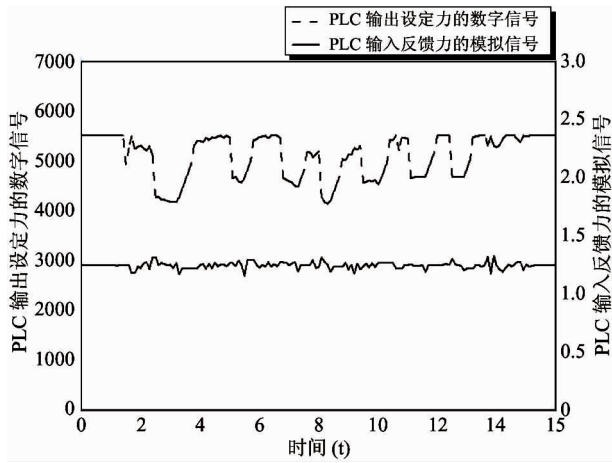


图 11 PLC 输入反馈力的数字信号和输出设定力的模拟信号

4.4 恒力装置测试

图 12 是倾角在恒定为 90° , 负载为 0.7kg , 目标力为 30N 的条件下, 外力作用于恒力装置的上法兰, 使恒力装置来回运动的实验测试数据。由图 12 可看出, 恒力装置的有效行程为 35mm , 恒力装置在来回运动过程中, 输出的力保持在 30N 上下, 误差范围为 $\pm 1\text{N}$ 。

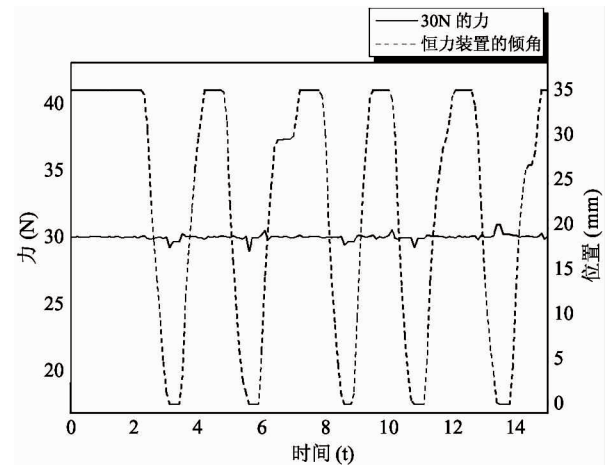


图 12 位置与力的关系图

图 13 是目标力在 30N , 负载为 0.7kg , 位置为 35mm , 无外力作用的条件下, 使恒力装置随着 UR5 的运动进行旋转的实验测试数据。装置的倾角范围为 $\pm 90^\circ$, 恒力装置的倾角在任意变化的过程中, 输出 30N 基本恒定, 误差范围为 $\pm 1\text{N}$, 由此可以得出该装置在任意倾角变化下都能够恒力输出。

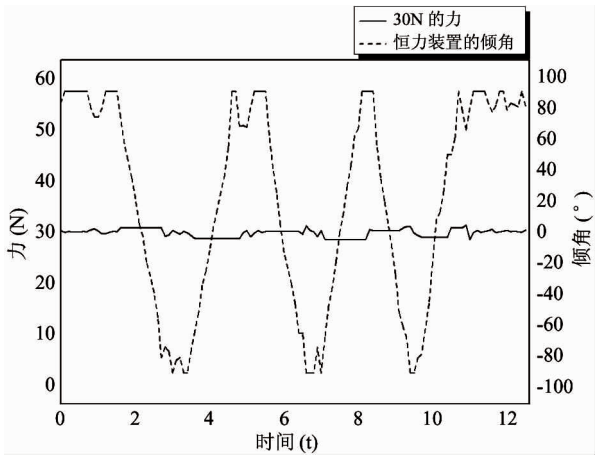


图 13 倾角和力的关系图

图 14 是负载为 0kg , 外力作用于恒力装置, 倾角和位置任意变化的条件下, 使恒力装置在不同的目标力下进行力输出的实验测试数据。由图可以看出恒力装置在目标力为 10N , 20N 和 30N 的情况下, 输出力基本保持恒定, 误差范围为 $\pm 1\text{N}$, 由此可以得出该装置在任意条件下, 力输出恒定。

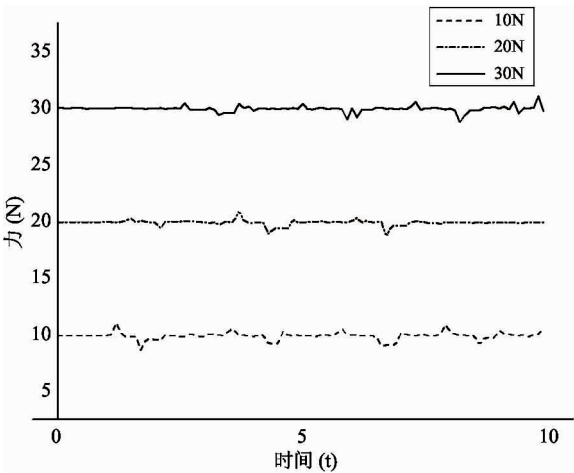


图 14 不同目标力对比图

5 结 论

本文给出了一种工业机器人主动恒力控制装置。将机器人恒力控制进行分解, 机器人只负责运动控制, 恒力装置负责力控制。根据主动恒力装置的工作要求, 对主动恒力装置的机械结构和气路进行了设计, 并设计了基于实时控制恒力装置的控制系统和上位机操作软件, 给出了恒力控制系统中参

数确定的方法。通过恒力装置的不同位置、不同倾角和不同设定力的实验,验证了所设计的主动恒力装置力输出比较稳定、精度高,对外界干扰具有较快的响应性能。从而解决了传统的机器人恒力控制中,既要对机器人进行力控制又要对机器人进行位置控制的问题,实现了机器人恒力控制的力控和位置控制的解耦,在保证机器人恒力控制的前提下又能保证恒力控制的精度和响应速度。

参考文献

- [1] 覃海强. 机械臂力/位置混合控制方法研究:[硕士学位论文]. 重庆:重庆大学自动化学院, 2013. 22-34
- [2] 张立勋, 杨勇, 张今瑜等. 手臂康复机器人阻抗控制实验研究. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(1): 69-72
- [3] 隋春平, 赵明扬. 3 自由度并联柔索驱动变刚度操作臂的刚度控制. 机械工程学报, 2006, 42(6): 205-210
- [4] Volpe R, Khosla P. An experimental evaluation and comparison of explicit force control strategies for robotic manipulators. In: Proceedings of the American Control Conference, Chicago, USA, 1992. 758-765
- [5] Volpe R, Khosla P. A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, 38(11): 1634-1650
- [6] 王坤东, 颜国正, 鄢波. 基于被动柔顺性的机器人位置/力控制. 中国机械工程, 2006, 17(7): 661-665
- [7] 杜爱国. 宏-微机器人管道遥控焊接的自适应力控制研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2011. 10-22
- [8] 孙桂涛, 邵俊鹏, 董翔等. 基于环境参数自适应估计的液压机器人力控制. 华中科技大学学报, 2015, 43(4): 26-31
- [9] 樊晓平, 徐建闽. 受限柔性机器人臂的鲁棒变结构混合位置/力控制. 自动化学报, 2000, 26(2): 176-183
- [10] 魏立新, 李二超, 王洪瑞. 基于混合优化神经网络的机器人力/位置控制. 电机与控制学报, 2006, 10(2): 151-153
- [11] 李二超, 李战明, 李炜. 基于神经网络的机器人关节转矩力控制研究. 电气自动化, 2011, 33(1): 23-17
- [12] 李正义, 唐小琦, 熊烁等. 沿任意倾斜面的机器人力/位置控制方法研究. 中国机械工程, 2012, 23(3): 304-309

Design and research of active constant force device for industrial polishing robots

Yu Xinyi, Xing Shuang, Ou Linlin

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000)

Abstract

The constant force control of industrial polishing robots was studied. Aiming at the problem that traditional constant force controlling must consider robots' force control as well as position control, thus leading to the control complexity, slow response and low control accuracy of the industrial robots, an independent constant force control device was designed to control robots force by using the way of separating force from position. In this way, the motion control of the robots is not necessary to be considered in the robot control, so the decoupling is achieved. The software of the constant force control device was also designed and the calibration method for relevant parameters was proposed. The effectiveness of the designed device was verified by experiment. The experimental result shows that the design of the active constant force device improves the force control precision of industrial robots, and it brings the device a good performance in constant force control.

Key words: polishing, grinding, industrial robots, force control, constant force device position control