

非对称气电混合式机器人末端执行器及其静态力控特性研究

张国龙^{1,2,3}, 杨桂林^{2*}, 张 杰², 刘立涛^{2,3}, 邓益民³

(1. 宁波大学科学技术学院 机械工程与自动化学院, 浙江 宁波 315300; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 浙江 宁波 315201; 3. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对现有气动式机器人力控末端执行器存在力控精度低和响应慢等缺点, 提出一种非对称气电混合式力控末端执行器, 采用变参数 PID 控制器对非对称气缸的气动力与永磁直线同步电机的电磁力进行协调控制, 实现机器人连续接触式作业中接触力的实时补偿与精确控制。通过对气动系统、永磁电机和控制器等进行建模与仿真分析, 研究其控制特性与力-位移特性。仿真结果表明, 相比气动式力控系统, 气电混合式力控系统可有效消除摩擦力与跟随误差等引起的滞环和爬行现象, 控制特性最大误差由 9.2 N(2 倍最大静摩擦力+动静摩擦力差值)减小至 1 N, 其力-位移特性最大误差由 9.6 N(2 倍动摩擦力+气动力波动)也减小至 1 N, 提高了力控精度, 可提升机器人连续接触式作业质量。

关键词: 气电混合; 力控末端执行器; 气动力; 电磁力; 协调控制; 控制特性; 力-位移特性; 机器人

中图分类号: TP24; TP27

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 06-0027-07

随着制造业的智能化发展, 机器人不但用于喷涂、焊接和上下料等非连续接触式作业, 而且还日益应用于抛光、打磨、去毛刺、倒角和装配等连续接触式作业^[1]。为保障作业质量, 不仅要实现刀具相对于工件精确的运动轨迹和速度控制, 而且还要实现其接触面法线方向的作用力控制, 即力-位混合控制。机器人力控制的方法主要分为直接力控制和间接力控制, 其中, 直接力控制是通过机械臂驱动关节的力矩控制实现, 而间接力控制是通过附加力控末端执行器予以实现(图 1)。两种方法各有优缺点: 前者需建立准确的机器人动力学模型, 并开发实时、鲁棒的力控制算法, 通常适用于新一代轻量化机器人的力控制; 而后者通过附加的力控末端执行器实现了力-位混合控制的自然解耦, 虽系统成本略微增加, 但力控制的动态特性和通用性显著提高, 通常适用于高速重载机器人, 具有广阔的应用前景。



图 1 间接力控制

韩国全北国立大学的 Ryuh 等^[2]提出了利用气缸进行轴向柔顺控制的单自由度柔顺操作器, 由于可直接驱动工具头进行旋转运动, 因此减小了工具头动力部件的质量, 提高了响应速度和承载能力。德国 Fraunhofer Institute for Production Technology (IPT) 的 Brecher 等^[3]提出了一种环形轨道运动型轴向柔性末端操作器, 主要由环形轨道电机、主轴电机、减速轮系和轴向柔性补偿部件等

收稿日期: 2019-09-27.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划“智能机器人”重点专项(2018YFB1308900); 宁波市自然科学基金(2019A610114); 浙江省教育厅科研项目(Y202043544)。

第一作者: 张国龙(1988—), 男, 江西上饶人, 博士研究生/讲师, 主要研究方向: 机器人、智能制造装备. E-mail: guolongzhang@aliyun.com

*通信作者: 杨桂林(1965—), 男, 博士/研究员, 主要研究方向: 精密运动系统、先进机器人及智能制造装备. E-mail: glyang@nimte.ac.cn

组成, 轴向柔性补偿部件通过气缸活塞杆驱动抛光头进行往复运动, 从而实现轴向柔顺补偿. 浙江工业大学的禹鑫焱、苏州大学的王振华等先后提出了一种利用气缸进行轴向柔顺控制的主动恒力法兰^[4-5]. 美国德克萨斯州立大学的 Erlbacher 等^[6-7]提出了一种气动式力控末端执行器, 以重力信号和压力信号作为反馈信号, 并结合所测姿态和接触力信息, 利用气缸实现轴向恒力控制. 美国德州 PushCorp、奥地利 FerRobotics、ATI 和 RAD 等公司对气动式主动恒力控制末端操作器进行了商品化, 形成了系列产品^[8]. 然而, 上述力控末端执行器均为气动式, 采用被动或开环控制, 存在力控制精度不高和响应慢等缺点, 难以满足复杂曲面抛光、打磨和重型零部件装配等作业需求. 针对上述缺点, 本团队也曾设计了一种利用气囊和音圈电机并联共同输出力的力控末端执行器, 但由于气囊刚度过大, 而音圈电机电力质量比小, 存在输出力小、力-位移特性差等缺陷^[9].

本文针对气动式力控末端执行器控制精度低、滞环大、易爬行和响应慢等缺点, 提出一种新型非对称气电混合式力控末端执行器, 采用变参数 PID 控制器对非对称气缸的气动力与大推力永磁直线同步电机的电磁力进行协调控制, 实现机器人连续接触式作业中接触力的实时补偿, 使其兼具气动系统力质量比大、抗冲击特性好和电机驱动控制精度高、响应快等特点, 且避免了气囊-音圈电机式力控末端执行器的缺陷.

1 系统设计

1.1 机械系统

本文提出的气电混合式机器人末端执行器通过将气缸与永磁直线同步电机并联, 共同向外输出力 F_{out} 与位移 S_{out} ($F_{out} = F_G + F_E$, $S_{out} = S_G = S_E$), 其工作原理如图 2 所示. 该力控末端执行器主要包括气动组件、永磁直线同步电机、滚珠花键、比例阀、力传感器、驱控一体装置和上下法兰等构成(图 3). 其中, 气动组件采用普通气缸在比例阀的控制下输出一定的气动力; 永磁直线同步电机输出电磁力以实现高频与高精度力控补偿; 滚珠花键用于低摩擦导向; 力传感器实现输出力的检测与闭环控制; 上下法兰分别与刀具和机械臂相连接.

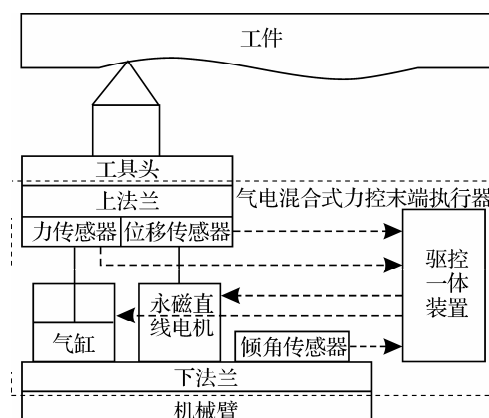


图2 气电混合式力控末端执行器原理框图

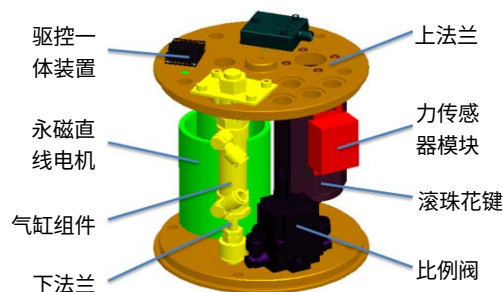


图3 气电混合式力控末端执行器机械结构

1.2 控制系统

该气电混合式力控末端执行器的控制系统包括气动系统和电控系统两大部分, 用于实现输出力的精确与快速控制. 气动系统主要包括(1)单出杆非对称气缸; (2)比例阀; (3)电磁换向阀; (4)气源; (5)过滤器; (6)减压阀, 具体如图 4 所示. 其中, 比例阀采用比例压力阀, 以实现气缸压力和气动力的比例调节. 电控系统主要包括驱动器和控制器, 采用驱控一体化设计, 以降低功耗与发热, 提高系统集成度、可靠性与性价比, 且实现运动控制计算与伺服驱动环路计算完全同步, 其系统架构为 ARM+DSP/FPGA/IPM+CAN, 具体架构如图 5 所示. 该驱控一体装置包括电源模块、控制器、驱动模块、通讯模块和接口模块等部件. 其中, 电源模块的主要作用是给控制器、驱动模块和传感器等提供电源; 控制器 ARM 主要实现与上位机和传感器信号的读取、通信、处理、逻辑判断、气动力与电磁力的匹配协调控制及状态监测等; 驱动模块主要由 DSP、FPGA、IPM 等构成, 负责电机参数的检测、功率放大、电流环、位置环和速度环的控制, 实现电机的精确、快速、稳定运行; 通讯模块采用

CAN 总线, 主要负责驱动一体化装置与传感器和上位机之间的相互通讯; 接口模块主要包括隔离、保护和模数转换等电路, 实现 DI/DO/AD/DA 的输入和输出。

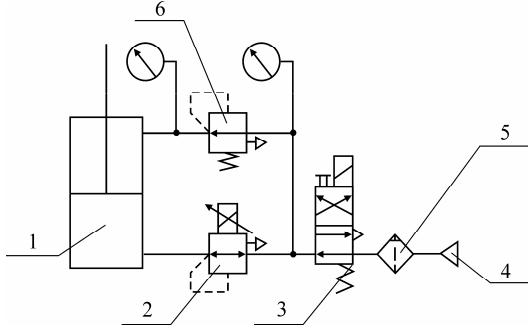


图4 气动系统原理图

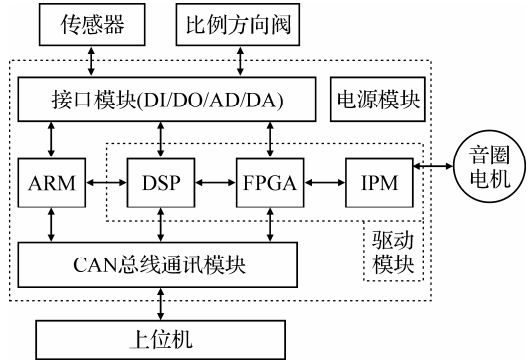


图5 驱控一体化系统架构

2 系统建模与控制

2.1 系统建模

2.1.1 气动系统建模

气动系统采用比例阀控制非对称气缸, 以实现气动出力控制, 有杆腔 b 通过减压阀设置恒定压力 P_b , 使气缸产生拉力并缩回; 无杆腔 a 通过比例减压阀实时调节压力大小 P_a , 控制气缸的推力并产生伸出运动。为便于分析与研究, 作如下假设: (1)介质为理想气体; (2)气体动能和势能忽略不计; (3)气体流动状态为等熵绝热过程; (4)忽略气缸内外泄漏^[10-11]。

由能量守恒定律可得气缸无杆腔 a 的压力微分方程为:

$$\frac{dP_a}{dt} = R \frac{C_p}{C_v} T_s \frac{Q_a}{V_a} - \frac{C_p}{C_v} \frac{P_a}{V_a} \frac{dV_a}{dt}, \quad (1)$$

式中: T_s 为气源温度; C_p 为气体等压比热; C_v 为气体等容比热; R 为气体常数; V_a 为无杆腔容积; Q_a 为流

入或流出无杆腔 a 的质量流量; t 为时间。

设 L 为气缸的工作行程, 则无杆腔容积为:

$$V_a = A_a \left(\frac{L}{2} + x \right), \quad (2)$$

式中: A_a 为无杆腔面积; x 为气缸活塞杆相对其中点的位移。

将式(2)代入式(1), 可得:

$$\frac{dP_a}{dt} = R \frac{C_p}{C_v} T_s \frac{Q_a}{V_a} - \frac{C_p}{C_v} \frac{P_a A_a}{V_a} \frac{dx}{dt}. \quad (3)$$

由牛顿第二定律可得气缸活塞及永磁直线同步电机转子等可动部件的力平衡方程为:

$$P_a A_a - P_b A_b + F_e - F_L - F_f = M \frac{d^2 x}{dt^2} + B_p \frac{dx}{dt} + Kx, \quad (4)$$

式中: F_L 为可动部件所受任意外负载力; F_f 为摩擦力; F_e 为永磁直线同步电机的电磁力; B_p 为粘性阻尼系数; K 为负载弹簧刚度; M 为可动部件质量; A_b 为有杆腔面积。

摩擦力分为静摩擦力 $F_{fj}(v=0)$ 以及动摩擦力 $F_{fv}(v \neq 0)$, 其方向与运动方向相反, 大小分别如下:

$$F_{fj} \leq k_j N, \quad (5)$$

$$F_{fv} = k_v N, \quad (6)$$

式中: N 为接触处法向载荷; k_j 为静摩擦系数; k_v 为动摩擦系数。

控制腔压力-流量方程为:

$$Q_a = f(A(u), P_s, P) = f(k_1 u + k_2 u^2, P_s, P_a), \quad (7)$$

式中: P_s 为供给压力; $A(u)$ 为比例阀控制阀口的开口面积, 一般为 u 的二次函数, u 为控制信号; 系数 k_1 和 k_2 通过实验确定。

与外界负载接触力 F_o 为:

$$F_o = Kx. \quad (8)$$

由上述可知, 该气动力控系统为非线性系统, 为便于定性分析, 分别对式(3)、(4)、(7)进行局部线性化与拉氏变换处理, 得:

$$P_a = \frac{RC_p T_s}{C_v V_a s} Q_a - \frac{C_p P_a A_a}{C_v V_a} x, \quad (9)$$

$$P_a A_a + F_e - F_L - F_f = Ms^2 x + B_p s x + Kx, \quad (10)$$

$$Q_a = k_q u - k_p P_a, \quad (11)$$

式中: k_q 为流量增益; k_p 为流量-压力系数。

为减小零部件加工变形, 保证产品质量, 一般被抛光打磨件的刚度较大, 因此负载弹簧刚度 K

很大, 而位移 x 很小, 所以由位移 x 引起的容腔压力变换可忽略不计, 而简化后的气动力控制系统的传递函数框图如图 6 所示。

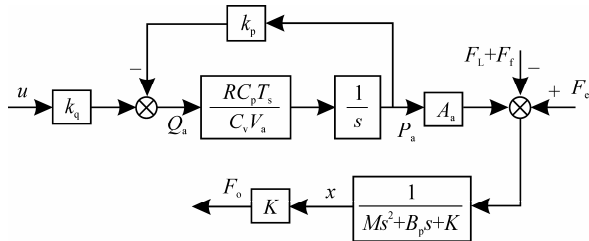


图6 气动力控系统简化框图

2.1.2 永磁直线同步电机建模

直线电机采用永磁直线同步电机, 其典型伺服控制系统如图 7 所示^[12]。

为便于分析与研究, 作如下假设:

(1)不考虑铁芯饱和, 忽略动子铁芯的涡流和磁滞;

(2)动子与定子间的气隙是均匀的, 磁场在气隙中为正弦分布;

(3)不考虑阻尼力的存在;

(4)不考虑温度和频率变换对电机的影响。

永磁同步直线电机交轴电压方程为:

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + K_e v, \quad (12)$$

式中: K_e 为反电动势常数; u_q 为交轴电压; R_s 为电阻; i_q 为电流; L_q 为电感; v 为速度。

电磁力方程为:

$$F_e = K_f i_q, \quad (13)$$

式中: K_f 为电磁推力系数。

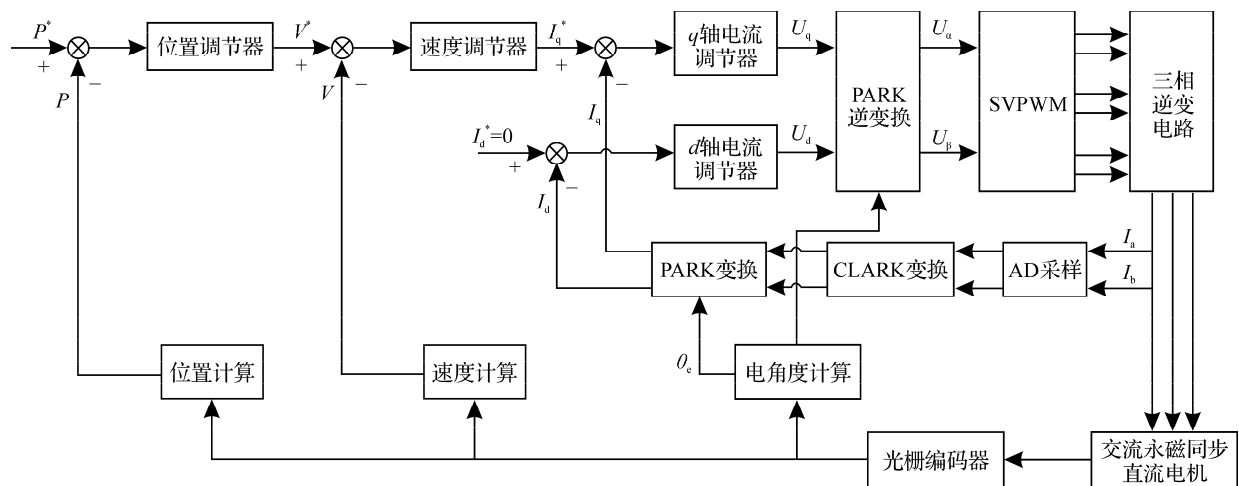


图7 典型交流永磁直线同步电机伺服控制系统

永磁直线同步电机的伺服控制系统框图如图 8 所示。

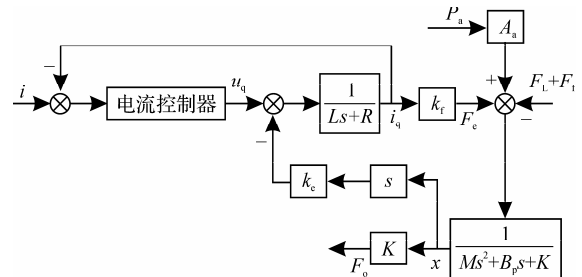


图8 永磁直线同步电机伺服控制系统方框图

2.2 控制策略

力控末端执行器的气动系统与永磁直线同步电机并联共同推动负载, 输入量为气动系统控制信号 u 和电流 i , 输出量为接触力 F_0 。为提高接触力控制精度, 且由于永磁直线同步电机伺服系统带宽高, 因此引入接触力反馈与永磁直线同步电机构成闭环控制, 而气动力控系统采用开环控制, 以降低系统控制难度, 且提高稳定性与可靠性。为消除环境和冲击引起的噪声, 在反馈回路设置滤波器和限幅环节, 以提高系统控制精度与稳定性; 为防止电机过载, 在正向回路的永磁直线同步电机前设置有限幅环节, 保障系统可靠性与寿命。由图 9 可知, 该气电混合式末端执行器的气动力-电磁力协调控制系统采用力反馈单环结构, 其力控制器采用工程实践中广泛应用的 PID 控制算法, 具有易实现、鲁棒性好和可靠性高等优点。为有效利用气动系统出力大、散热条件好等优点, 气动力与电磁力按一定比例共同向外输出, 以防止电机长

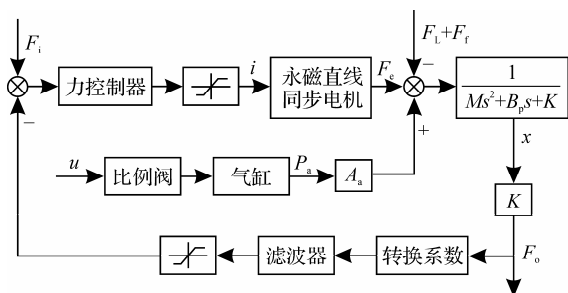


图9 气电混合式末端执行器气动力-电磁力协调控制系统方框图

时间工作于大电流下而发热严重甚至烧毁的情况。

在机器人连续接触式作业过程中, 根据工具头相对工件的运动与接触状态, 可分为进给、碰撞、贴合和退回等阶段。在进给和退回阶段, 力控末端执行器工作于速度控制模式, 使运动平稳且防止碰撞时冲击过大; 在贴合阶段, 力控末端执行器工作于力控制模式, 保证接触力精确平稳; 当工作于速度控制模式, 通过速度反馈及其控制器实现闭环控制; 当工作于力控制模式, 通过接触力反馈及其控制器实现闭环控制。由于不同作业工况下的负载弹簧刚度 K 不尽相同, 且一般不是常数, 因此需采用变参数PID控制, 以提高控制精度与频响。为测得负载弹簧刚度 K , 工作时需预先使末端执行器工作于位置模式对环境加载, 以获取接触刚度 K - x 曲线。

3 仿真分析

为提高上述力控末端执行器非线性系统仿真精度, 采用多学科领域复杂系统建模与仿真平台 LMS Imagine.Lab AMESim 分别对其气动系统、永磁直线同步电机系统和环境工件等进行建模与数值仿真, 研究动静态特性(图10)^[13]。

3.1 控制特性

基于上述仿真模型, 分别在气动力控模式和气电混合力控模式下对末端执行器的输入端施加一定周期(如 $t=30\text{ s}$)和幅值(0~90 N)的三角波 F_i 信号, 测得其输出接触力 F_o 信号, 并以输入指令 F_i 为横坐标、接触力 F_o 为纵坐标画于同一坐标系中(图11~12)。对比可知, 由于摩擦力和跟随误差等因素的存在, 气动力控系统存在明显的滞环(约为最大静摩擦力的2倍(8 N)), 且伴随有接触力跳跃(约为动静摩擦力差值(1.2 N)), 即爬行现象, 最大误差可达 9.2 N; 由于永磁直线同步电机的高频高精度实时力补偿, 气电混合力控系统几乎消除了滞环与爬行现象, 仅存在机械结构高频振动(幅值约为 $\pm 0.5\text{ N}$), 最大误差约为 1 N, 有效地提高了接触力的控制精度。

3.2 力-位移特性

基于上述仿真模型, 分别在气动力控模式和

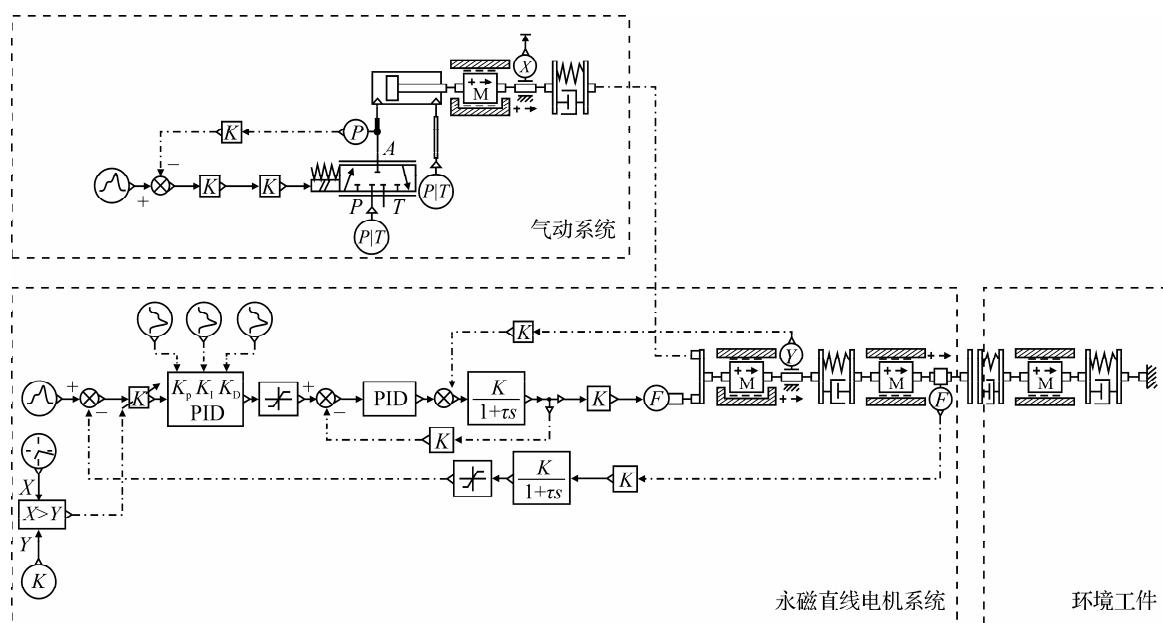


图10 气电混合式末端执行器力控制系统仿真模型

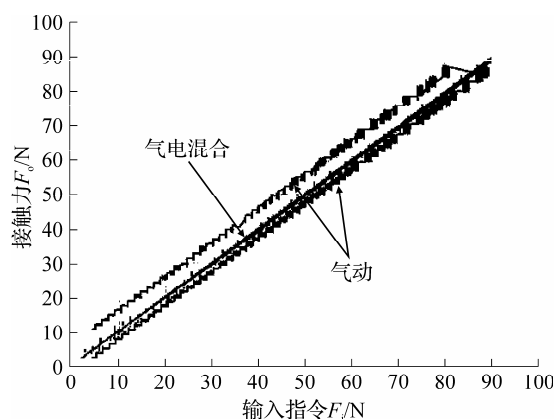


图 11 控制特性曲线

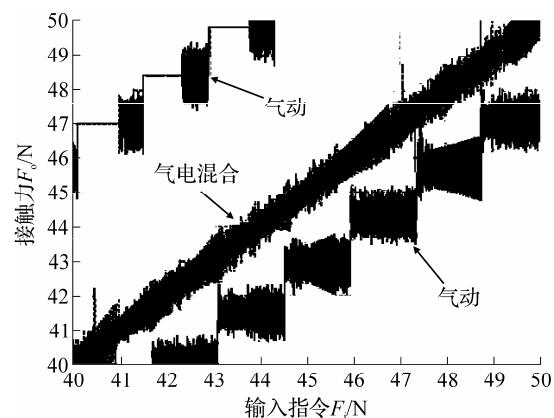


图 12 控制特性曲线局部放大

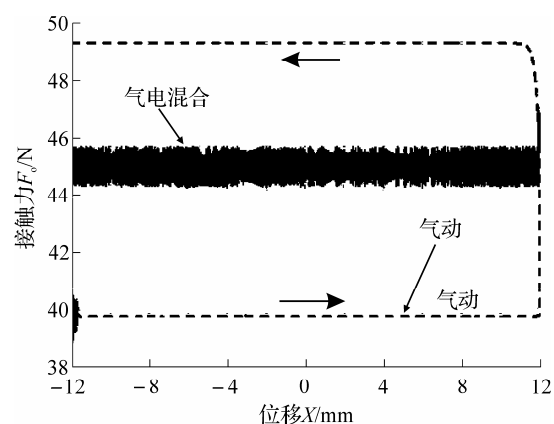


图 13 力—位移关系曲线

气电混合力控模式下对末端执行器的环境工件端施加一定周期(如 $t=30\text{ s}$)和幅值($-12\sim 12\text{ mm}$)的三角波 X 信号,测得其输出接触力 F_c 信号,并以输入指令 X 为横坐标、接触力 F_c 为纵坐标将其画于同一坐标系中(图 13)。对比可知,由于比例阀压力-流量特性的影响,在三角波信号增大与减小过程中,力控末端执行器在不同速度方向所需的流量

不同,因此加载与卸载过程中比例阀的输出压力不同,引起接触力差值(约 3.6 N),且存在摩擦力引起的滞环(约为动摩擦力的 2 倍(6 N)),最大误差可达 9.6 N ,气动力控系统存在明显的滞环。由于永磁直线同步电机的高频高精度实时力补偿,气电混合力控系统几乎消除了滞环,仅存在机械结构高频振动(幅值约为 $\pm 0.5\text{ N}$),最大误差约为 1 N ,有效提高了接触力-位移的精度。

4 结论

针对现有气动式力控末端执行器存在的力控精度低和响应慢的缺点,提出一种非对称气电混合式机器人末端执行器和气动力-电磁力协调控制算法,分别对其非对称气缸气动系统、大推力永磁直线同步电机和控制器等进行建模和仿真,研究其控制特性与力-位移特性。结果表明,相比气动力控系统,气电混合式力控系统在保持高的力-质量比和抗冲击特性好的基础上,通过高频高精度电磁力实时补偿,有效消除了摩擦力与跟随误差等引起的滞环和爬行现象,控制特性最大误差由 9.2 N (2 倍最大静摩擦力+动静摩擦力差值)减小至 1 N ,力-位移特性最大误差由 9.6 N (2 倍动摩擦力+气动力波动)也减小至 1 N ,提高了力控精度。气电混合式力控末端执行器通过刀具与工件间接触力的精确控制,可提升机器人连续接触式作业质量,在工业自动化领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张国龙, 张杰, 蒋亚南, 等. 机器人力控末端执行器综述[J]. 工程设计学报, 2018, 25(6):617-629.
- [2] Ryuh B, Park S M, Pennock G R. An automatic tool changer and integrated software for a robotic die polishing station[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41:415-432.
- [3] Brecher C, Tuecks R, Zunke R, et al. Development of a force controlled orbital polishing head for free form surface finishing[J]. Machine Tool, 2010, 4(2/3):269-277.
- [4] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J]. 机器人, 2017, 39(6):776-785.
- [5] 禹鑫磊, 邢双, 欧林林. 抛光工业机器人主动恒力装置设计研究[J]. 高技术通讯, 2017, 27(5):434-441.
- [6] The University of Texas System. Method for applying

- constant force with nonlinear feedback control and constant force device using same[P]. United States: US005448146, 1995-09-05.
- [7] Erlbacher E A. Force control basics[J]. Industrial Robot, 2000, 27(1):20-29.
- [8] Ferrobotics Compliant Robot Technology GmbH. Active handling apparatus and method for contact tasks[P]. United States: US20140005831A1, 2014-01-02.
- [9] 赵亚平, 杨桂林, 杨巍, 等. 气电混合式机器人力控末端执行器研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 12:103-106.
- [10] 陶国良, 王宣银, 路甬祥. 3 自由度气动比例/伺服机械手连续轨迹控制的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 65-69.
- [11] 陶国良. 电-气比例/伺服连续轨迹控制及其在多自由度机械手中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [12] 李荣. 交流永磁同步直线电机伺服控制技术研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [13] Xie H B, Zhang G L. Research on characteristics of the piloted follow-up load control valve in automobile crane luffing system[C]. IEEE Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2013:887-892.

The asymmetrical pneumoelectric robotic end-effector and its static force control characteristics

ZHANG Guolong^{1,2,3}, YANG Guilin^{2*}, ZHANG Jie², LIU Litao^{2,3}, DENG Yimin³

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, College of Science & Technology Ningbo University, Ningbo 315300, China; 2.Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology of Zhejiang Province, Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China; 3.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To address the problem of low precision and slow response of the existing pneumatic robotic end-effector with force control, a novel asymmetrical pneumoelectric end-effector is proposed. Pneumatic force of asymmetric cylinder and electromagnetic force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) are coordinated by variable parameter PID controller to achieve real-time compensation and precise control of the contact force in continuous contact operation of robot. Through modeling and simulation analysis of pneumatic system, PMLSM and controller, the control characteristics and force-displacement characteristics are both studied. The result shows that the pneumoelectric force control system can eliminate effectively the hysteresis and crawling phenomenon caused by friction and following errors compared to the pneumatic control system. The maximum error of the control characteristic is reduced from 9.2 N (double the maximum static friction + dynamic and static friction difference) to 1 N as well, and that of the force-displacement characteristic is also reduced from 9.6 N (double the dynamic friction + pneumatic force fluctuation) to 1 N. The quality of continuous contact operation can be improved by the pneumoelectric robotic end-effector with increased force control accuracy.

Key words: pneumoelectric; end-effector with force control; pneumatic force; electromagnetic force; coordinated control; control characteristic; force-displacement characteristic; robot

(责任编辑 章踐立)