



## 面向六关节机器人的位置域控制

崔旭东 邓少丰 王平江

### Position domain control technology for six-joint robots

CUI Xu-dong, DENG Shao-feng, WANG Ping-jiang

引用本文:

崔旭东, 邓少丰, 王平江. 面向六关节机器人的位置域控制[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 244–253. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.07.002

CUI Xu-dong, DENG Shao-feng, WANG Ping-jiang. Position domain control technology for six-joint robots[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 244–253. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.07.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.07.002>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 具有状态约束与输入饱和的全向移动机器人自适应跟踪控制

Adaptive tracking control for omnidirectional mobile robots with full-state constraints and input saturation

工程科学学报. 2019, 41(9): 1176 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.09.009>

#### 多机器人编队控制研究进展

Research development of multi-robot formation control

工程科学学报. 2018, 40(8): 893 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.08.001>

#### 机器人负载的动力学参数辨识

Identification methods for robot payload dynamical parameters

工程科学学报. 2017, 39(12): 1907 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.12.018>

#### 集总干扰下六旋翼飞行器的轨迹跟踪控制

Trajectory tracking control for an unmanned hexrotor with lumped disturbance

工程科学学报. 2018, 40(5): 622 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.05.013>

#### 基于BP神经网络的机器人波动摩擦力矩修正方法

Wave friction correction method for a robot based on BP neural network

工程科学学报. 2019, 41(8): 1085 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.08.014>

#### 螺旋桨清洗机器人超灵巧机械臂设计

Ultra-smart manipulator design for propeller-cleaning robots

工程科学学报. 2017, 39(6): 924 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.06.016>

# 面向六关节机器人的位置域控制

崔旭东<sup>1)</sup>, 邓少丰<sup>2)</sup>, 王平江<sup>2)</sup>✉

1) 鞍山师范学院计算中心, 鞍山 114007 2) 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074

✉通信作者, E-mail: [pj\\_wang@hust.edu.cn](mailto:pj_wang@hust.edu.cn)

**摘要** 多轴联动下的串联多关节工业机器人在空间轨迹运动时, 在时间上保证各关节轴单独具有良好的跟踪性能, 而由于机械电气的迟滞效应, 并不能完全保证理想的轮廓轨迹, 这说明各个伺服轴的运动在几何空间中的同步非常重要。针对运动指令与实际位置之间的迟滞所带来的机器人末端轮廓精度不高的问题, 本文结合工业机器人现有的运动学和动力学以及传统的 PID 控制理论, 研究了六关节机器人位置域控制算法。将机器人空间轮廓轨迹的控制, 通过采用主-从运动关系实时建立的方法, 将时域中的各个伺服关节的同步控制方法, 变换到位置域的各个伺服关节的主-从跟随的控制方法, 在实现位置域的同步控制的同时, 引入基于位置域的 PD 控制, 减少了主-从跟随控制的跟随误差, 从而整体提高机器人末端的轮廓运动精度。该方法在 Linux CNC(Computerized Numerical Control) 数控系统上, 以某公司 HSR-JR605 机器人为对象进行了实验, 证明采用位置域控制方法对六关节机器人空间运动轨迹精度的提高有积极作用。

**关键词** 轮廓跟踪; 六关节机器人; 位置域控制; PID 控制; LinuxCNC

**分类号** TP242.2

## Position domain control technology for six-joint robots

CUI Xu-dong<sup>1)</sup>, DENG Shao-feng<sup>2)</sup>, WANG Ping-jiang<sup>2)</sup>✉

1) Computing Center, Anshan Normal University, Anshan 114007, China

2) School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

✉ Corresponding author, E-mail: [pj\\_wang@hust.edu.cn](mailto:pj_wang@hust.edu.cn)

**ABSTRACT** In the context of the rapid development of intelligent manufacturing, high-precision motion control of industrial robots has attracted increasing research attention. High-speed and high-precision motion control is a development trend associated with the current industrial robots. Industrial transformation and upgradation can be accelerated only *via* the independent research and development of robot core technologies, including robot high-precision control systems, ensuring the transition of the manufacturing industry in China toward intelligent and digital development. Currently, the contour tracking error associated with majority of the multiaxes CNC machine tools and multijoint industrial robots is a common problem. A good tracking performance can be achieved in time with respect to each joint axis when the space trajectory of the serial multijoint industrial robot changes under multiaxes linkage. The ideal contour trajectory cannot be fully ensured because of the mechanical and electrical hysteresis effects. Therefore, the synchronization of the motion of each servo axis in the geometric space is very important. In this paper, the existing kinematics and dynamics of industrial robots were combined with the traditional PID control theory for studying position domain control algorithm of the six-joint robot to resolve the problem of low accuracy associated with the robot end profile, which can be attributed to the lag between the motion instruction and the actual position. The algorithm uses the method of real-time establishment of the master-slave motion relation for controlling the spatial contour trajectory of the robot. It further transforms the synchronization control method of each

收稿日期: 2020-08-07

基金项目: 国家科技重大(04)专项“核工业专用零部件制造装备换脑工程”资助项目(2017ZX04011006-005); 国家科技重大(04)专项“高档数控系统关键共性技术创新能力平台(二期)”资助项目(2015ZX04005007)

servo joint in the time domain into the master-slave follow control method of each servo joint in the position domain. While realizing synchronization control in the position domain, PD control based on position domain was introduced to reduce the following error of the master-slave following control, improving the overall accuracy of the contour motion of the robot end. The method proposed in this paper has been tested on the Linux CNC numerical control system with a company's HSR-JR605 robot, indicating that the position of the domain control method employed positively affects the accuracy of six articulated robot space trajectory.

**KEY WORDS** contour tracking; six-joint robot; position domain control; PID control; LinuxCNC

制造业是国民经济的主要支柱,也是今后我国经济“创新驱动、转型升级”的主战场<sup>[1]</sup>。在此背景下,工业机器人领域成为各国提高制造业综合实力,使制造业实现数字化、网络化、智能化的必争之地<sup>[2-5]</sup>。PID控制是工业控制领域中最经典也是最常用的算法,因其原理简单、容易实现,并且具有较强的鲁棒性,而被广泛应用于各种工业装备的实时控制<sup>[6]</sup>。PID控制技术已经在理论上被证明对于工业机器人的高耦合、非线性系统是有效的,且PID主要应用于已解耦的关节臂单轴的时间域伺服控制层面。虽然解耦控制可以为具有串、并联性质的多轴机器人系统简单轨迹提供好的跟踪性能,但是实践证明,对于高精度轮廓跟踪,由于末端的运动是所有关节同步运动的结果,分别确保每个关节在时间域的良好跟踪性能,并不能保证理想的轮廓跟踪误差,相关运动关节的不良同步误差,往往导致轮廓跟踪的轨迹精度恶化<sup>[7-11]</sup>。

近年来,针对工业机器人轮廓跟踪中各关节的运动同步问题已经进行了大量研究。为了进一步提高轮廓运动精度,外国学者Koren提出了一种交叉耦合控制(Cross-coupled control, CCC)方法<sup>[7]</sup>。实际上,CCC方法是针对单个轴的PID控制和针对多个轴的耦合误差反馈控制的一种组合。CCC的主要思想是实现两个运动轴的位置同步。实验表明,通过选择合适的耦合增益,CCC可以通过同步性能的改善来提高轮廓跟踪精度。然而由于机器人系统中确定耦合增益的复杂性<sup>[12]</sup>,以及每个运动关节仍然需要单独控制,且必然存在一定的跟踪误差等原因,CCC方法也同样具有局限性。

针对上述问题,加拿大学者结合PID控制和CCC控制的优势,提出一个新的控制方法:位置域控制技术<sup>[13-17]</sup>。与传统时域PID控制中轨迹规划被设计为时间t的函数不同,位置域控制方法是在位置域中构建运动轨迹,称之为位置域PID控制。

本文主要解决的问题为:在将位置域PID控制技术应用于多自由度、非线性、串联的关节机器人的轮廓运动中,如何在机器人轨迹代码执行中,实时将时间域表达的轮廓轨迹函数,转变为位

置域表达的轮廓轨迹函数,并采用基于动力学的位置域PID控制方法来提高机器人末端的轮廓运动精度。

相比于直角坐标系下的常用的三轴铣床控制系统,由于机器人运动控制的复杂性,尤其是运动学正逆解的多解性,在实时控制环节构建主从运动的以主动轴位置为自变量的从动轴位置函数,是极其复杂的,因此位置域的控制方式,在关节型机器人的应用尚未深入开展。

## 1 机器人的位置域PID控制模型

对于多自由度机器人系统,时间域下的PID控制器标准形式可表示为:

$$\tau(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \dot{e}(t) \quad (1)$$

式中,  $e(t)$ 是系统的位置误差矢量,  $\dot{e}(t)$ 是系统的速度误差矢量,  $\tau(t)$ 是系统的控制转矩矢量,  $t$ 表示时间,  $K_p$ 、 $K_i$ 和  $K_d$ 分别为比例增益、积分增益和微分增益的对角矩阵。在高速插补控制中,由于插补控制周期很短(1 ms),稳态误差比较小,一般令积分项的系数为零,将PID控制简化为PD控制,可以在不增加计算量的基础上,获得同样的控制精度。因此,对于公式(1)所描述的从运动轴在时间域中PID控制模型下,可以表示为式(2)的位置域的PD控制:

$$\tau_s(q_m) = K_{ps0} e_s(q_m) + K_{ds0} e_s'(q_m) \quad (2)$$

式中,下标  $m$  表示主运动 master 轴所在关节轴的序号,  $s$  表示从运动 slave 轴所在的关节轴的序号(下文同样适用)。式(2)中,  $e_s(q_m)$  表示以主动轴位置  $q_m$  为自变量,计算从动轴的期望位置  $q_{sd}(q_m)$  与实际位置  $q_s(q_m)$  之差的矢量;  $e_s'(q_m)$  表示从运动轴的相对速度(相对于主运动轴位置)之差的矢量;  $K_{ps0}$  和  $K_{ds0}$  则分别为具有恒定值的从动轴的比例增益和微分增益对角矩阵。

注意:在任意时刻,对于六关节机器人的关节轴,只有一个主运动轴,可以有五个从运动轴;亦即公式(2)对应于五个从关节轴的位置域PD控制方程。但是,不同的机器人的运动轨迹,主运动、

从运动关节轴所对应的序号是动态变化的, 既使是同一段机器人运动轨迹描述的指令代码中, 主运动轴、从运动轴的关系, 也有可能随时间或者位姿的变化而发生变化; 而且在任意时刻, 所有从动轴的位置, 都要实时表达为主动轴位置的函数。这就是为什么位置域控制算法在多关节机器人控制中, 难以实际应用的症结所在。

如图 1 所示为位置域 PD 控制原理框图<sup>[18]</sup>, 首先根据理论轮廓运用逆运动学分析, 获得时间域中某段轮廓轨迹中各个关节轴的期望位置, 并分析在该段轨迹运动中, 哪个关节轴的运动位置增量最大, 则将哪个关节轴指定为主运动关节轴, 其他的关节轴为从运动关节轴。然后通过轨迹规划方法, 获得在位置域中表示的从运动轴的、以主动轴位置  $q_1$  为自变量的从动轴期望位置  $q_{sd}(q_1)$  和期望位置相对导数  $q'_{sd}(q_1)$  (此处假设与关节轴 1 相对应的运动为主运动), 最后通过位置域 PD 控制, 实现从运动相对于主运动位置的实时跟随控制, 以提高整个机器人末端件空间运动轨迹的精度。

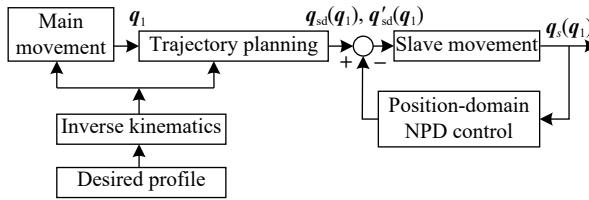


图 1 位置域 PD 控制原理框图

Fig.1 Schematic of PD control in the position domain

综上所述, 位置域 PD 控制, 从控制规律上可看作是一种通用的空间同步的位置和速度控制, 其中从运动根据轨迹轮廓要求, 相对于主运动的位置、速度, 在位置和速度上进行跟随控制, 使得主运动和从运动之间综合的运动轨迹尽可能地精确。

另外, 从实现上来说, 位置域 PD 控制其实是以时间域控制和位置域控制的混合控制的形式进行的<sup>[19-20]</sup>。主运动在时域中受到公式(1)所示控制律的控制, 同时从运动则在位置域中受到公式(2)所示控制律的控制。应当注意的是, 主运动在时间域的控制过程中必须满足单调递增或递减的条件, 以便形成从时间域到位置域的映射是一对一的, 才能使得主动轴因时间域控制所产生的位置误差, 折算到从动轴的位置误差为减少的。

更进一步地, 采用非线性函数替换公式(2)中的误差信号  $e_s(q_m)$ 、 $e'_s(q_m)$ , 形成一种基于多自由度机器人的位置域非线性 PD 控制律。该控制律用以下形式表示:

$$\tau_s(q_m) = K_{ps0}\psi(e_s(q_m), \alpha_p, \delta_p) + K_{ds0}\psi(e'_s(q_m), \alpha_d, \delta_d) \quad (3)$$

其中,  $K_{ps0}$  和  $K_{ds0}$  是系统的初始非线性 PD 控制增益矩阵, 是恒定值的从动轴的比例增益和微分增益对角矩阵;  $\psi$  是三元非线性函数; 而  $\alpha_p$ ,  $\delta_p$ ,  $\alpha_d$ ,  $\delta_d$  则是定义非线性函数的附加参数。

三元非线性函数  $\psi$  的一般表达式定义如下<sup>[21]</sup>:

$$\psi(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\alpha \text{sign}(x), |x| > \delta \\ \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, |x| \leq \delta \end{cases} \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,  $\alpha$  为非线性函数中的幂指数部分, 而  $\delta$  则为线性与非线性分界的阈值。在阈值范围内, 函数表现为线性; 当超过该阈值时, 函数表现为非线性; 此时非线性函数的数学属性由参数  $\alpha$  决定。在位置域 PD 控制中, 参考位置  $q_m$  是类似时域中时间  $t$  的自变量。  $e_s(q_m)$  和  $e'_s(q_m)$  是自变量  $q_m$  的函数。

将公式(4)代入公式(3)中, 该控制律也可以采用式(5)表示:

$$\begin{aligned} \tau_s(q_m) = & K_{ps}(e_s(q_m), \alpha_p, \delta_p)e_s(q_m) + \\ & K_{ds}(e'_s(q_m), \alpha_d, \delta_d)e'_s(q_m) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 该控制律的增益系数定义如下:

$$K_{ps}(e_s(q_m), \alpha_p, \delta_p) = \begin{cases} K_{ps0}|e_s(q_m)|^{\alpha_p-1}, |e_s(q_m)| > \delta_p \\ K_{ps0}\delta_p^{\alpha_p-1}, |e_s(q_m)| \leq \delta_p \end{cases} \quad (6)$$

以及

$$K_{ds}(e'_s(q_m), \alpha_d, \delta_d) = \begin{cases} K_{ds0}|e'_s(q_m)|^{\alpha_d-1}, |e'_s(q_m)| > \delta_d \\ K_{ds0}\delta_d^{\alpha_d-1}, |e'_s(q_m)| \leq \delta_d \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $K_{ps}$  和  $K_{ds}$  表示位置域非线性 PD 控制的与系统误差  $e_s(q_m)$  和  $e'_s(q_m)$  有关的增益矩阵。

公式(5)至公式(7)表明, 位置域非线性 PD 控制器可视为变增益的控制器, 其增益为系统误差的函数。

## 2 基于 LinuxCNC 系统的位置域控制系统设计

LinuxCNC 系统具有以下优点:

(1) 开源: LinuxCNC 系统的源码完全公开, 用户可以方便地获得其源码并进行有针对性的开发;

(2) 实时性: LinuxCNC 系统具有实时性, 支持 EtherCAT 现场总线及 1 ms 的插补周期, 可以满足机器人运动控制对实时性的要求;

(3) 可扩展性: LinuxCNC 系统的硬件抽象层提供了内核模块接口, 用户可以根据自身需要灵活设计内核实时运行的 HAL 组件, 以实现特定的实时插补控制功能, 如位置域控制功能。

因此,本文采用 LinuxCNC 数控系统作为多关节机器人位置域 PD 控制算法实现的软件平台.

## 2.1 位置域控制软件系统总体方案

经过上述分析,本文所提出的位置域 PD 控制

算法可以在 LinuxCNC 中的硬件抽象层中,以 HAL 组件的方式予以实现,由此设计出如图 2 所示的基于 LinuxCNC 系统的位置域 PD 控制系统总体方案<sup>[22-25]</sup>.

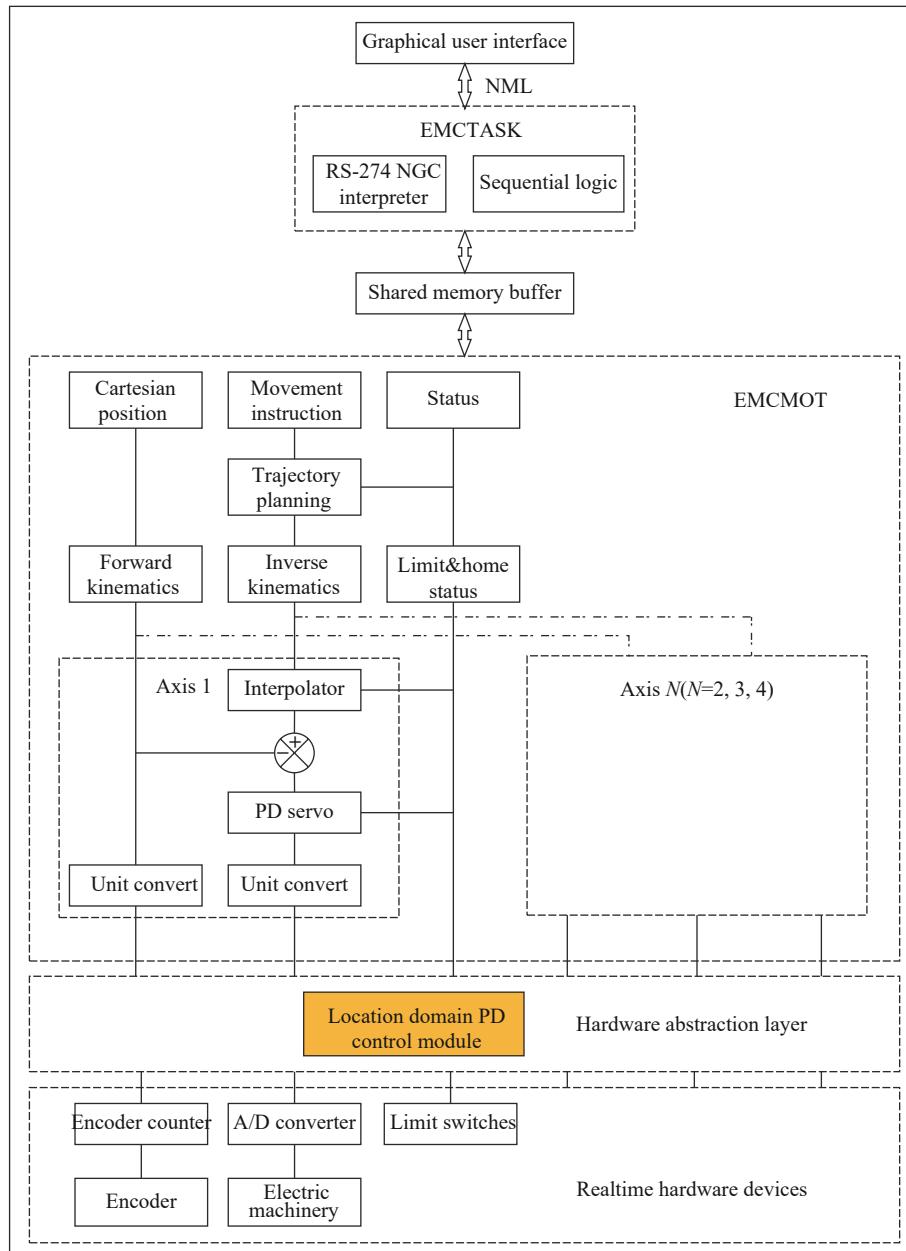


图 2 基于 LinuxCNC 系统的位置域 PD 控制系统总体方案

Fig.2 Overall scheme of the PD control system based on the LinuxCNC system in position domain

由图 2 所示整个控制系统的控制流程如下:

(1) 用户首先向图形用户界面输入轨迹运动命令(或轨迹运动的文件),将运动指令通过 NML 通信机制传输至任务执行模块(EMCTASK);

(2) EMCTASK 主控模块周期性地调用 RS-274NGC 解释器,对类似于 G 代码的机器人轨迹运动代码进行解析,并将转换后的操作命令进行后续处理;

(3) 将处理后的 NML 轨迹控制命令发送到用户态与内核态的共享内存,由此传输至运行于内核实时环境中的运动控制器(EMCMOT);

(4) EMCMOT 主控程序是实时线程,周期性执行笛卡尔坐标系下的运动插补程序及运动学逆解,并将各个关节伺服电机的运动指令,通过 EtherCAT 总线,发往各个伺服驱动器. 主控程序从共享

内存中读取由任务控制器发送的运动轨迹命令, 并进行机器人的运动速度规划(小线段拟合、速度规划等)、运动学正逆变换(关键点: 同时确定主运动轴、从运动轴所对应的关节轴以及构造以主运动关节轴位置为自变量的其他各个从动关节轴位置的函数等), 并实现时域/位置域的混合插补计算、动力学前馈等运动控制功能;

(5) 将位置域 PD 控制算法模块, 以 HAL 组件的方式加入到硬件抽象层(HAL). HAL 通过定义的引脚(HAL pin)获取运动控制器中的各种实时数据, 该数据经过 HAL 中各种功能组件的运算后, 写入到实时 EtherCAT 总线的硬件驱动程序;

(6) EtherCAT 总线将各个关节轴的运动控制指令(含位置增量、力矩前馈)发送到对应的伺服驱动器, 实现对机器人各个关节轴的运动控制; 同时 EtherCAT 总线将各个轴的实际位置反馈回位置域 PD 控制算法模块, 以便计算各个从动关节轴的、以主动轴位置为自变量的位置、相对速度误差以及力矩前馈值, 为下一个控制周期准备好位置域 PD 控制相关的数据.

## 2.2 位置域控制算法

如图 3 所示, 本文设计的位置域 PD 控制算法分解为以下四个功能模块.

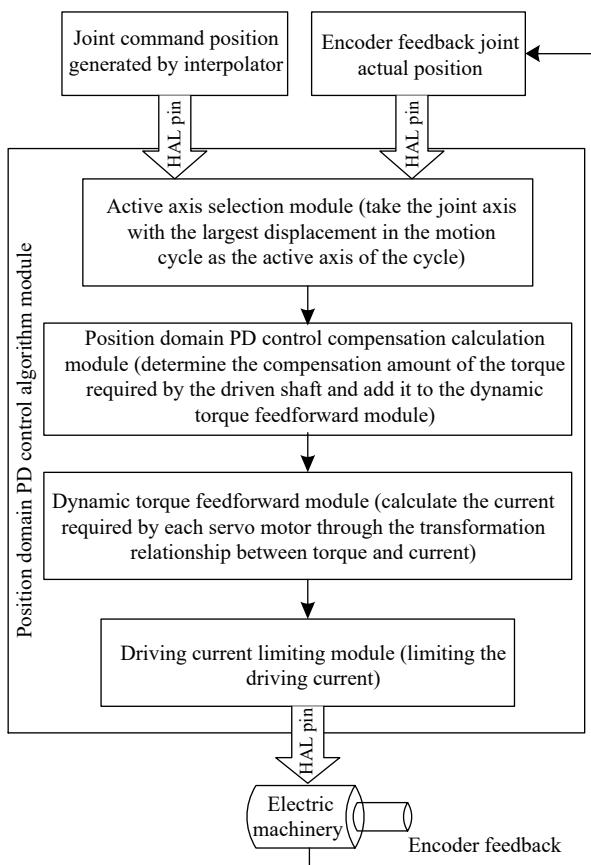


图 3 位置域 PD 控制算法模块结构图

Fig.3 Module structure of the PD control algorithm in position domain

### (1) 主动轴选择模块.

位置域控制算法的关键是, 在某段轨迹上实时确定各个关节轴之间的主、从运动关系, 即确定主动关节轴与从动关节轴的索引号. 本文采用将运动控制周期内位移增量最大的关节轴, 作为该周期的主运动轴, 其他关节轴作为从运动轴.

### (2) 位置域 PD 控制补偿量计算模块.

对于主动轴选择模块确定的从动轴, 本模块将各个从动轴的实际位置与理论位置的差值, 从时间域转化到位置域上, 并将根据公式(5)分别求得各个从运动关节轴所需力矩的补偿量.

### (3) 动力学力矩前馈模块.

通过力矩与电流间的转化关系, 根据各个关节所需的力矩补偿量, 求出各伺服电机所需的电流补偿, 采用电流/力矩前馈的方法, 将其补偿电流叠加到伺服控制器的电流环上, 以改善伺服电机的动力学特性, 提高整个机器人运动轨迹的准确性.

### (4) 驱动电流限流调整模块.

该模块主要对各个关节轴的驱动电流进行限流, 防止由于驱动伺服电机运动的电流过大而造成的机器人抖动等性能变差以及安全问题.

## 2.3 位置域控制程序的实现

位置域 PD 控制算法模块是通过 HAL 组件实现的. 由于该组件中所包含的动力学力矩前馈模块与驱动电流限流模块不是本文关注的重点, 且动力学力矩前馈模块涉及惯性矩阵、摩擦阻尼矩阵、重力/戈氏力矩阵等基于旋量理论的动力学建模和摩擦力模型建立等, 较为冗长, 这里不再赘述.

本文所设计的位置域 PD 控制算法模块, 首先定义了机器人各关节的期望角位移、期望角速度、期望角加速度、实际角位移、实际角速度等引脚; 然后通过 HAL 引脚之间的连接, 将 LinuxCNC 系统中的各类数据传递到对应的引脚中; 随后进行位置域 PD 控制补偿量计算; 最终将计算得到的力矩补偿值以伺服电机的力矩前馈的方式传递给各关节对应的伺服电机驱动器, 实现对六关节机器人的位置域控制.

按照 HAL 编程语法, 位置域 PD 控制算法模块的 comp 文件(如 pdc605.comp)编写完成后, 可以通过 halcompile 命令对该文件进行编译, 编译步骤如下:

- (1) 首先将 pdc605.comp 放置在 src 文件夹下;
- (2) 然后在 src/scripts 目录下配置 HAL 程序的编译环境 source ./rip-environment;
- (3) 在 Linux 的终端上输入 halcompilepdc605.comp,

则 src 文件夹中会生成一个 pdc605.c 文件;

(4) 随后在 Linux 的终端上输入 halcompile -install pdc605, 则 rlib 文件夹中会生成一个 pdc605.so 内核实时运行的动态库文件;

(5) 最后在 configs 文件夹中的 puma605.hal 文件里添加 loadrt pdc605(加载 HAL 组件 pdc605)以及 addf pdc605.0.pdc servo-thread(添加函数 pdc 到 1 ms 实时线程);

(6) 利用 HAL 的 net 命令和 setp 命令进行相关引脚的连接和设置.

编译过程的终端命令窗口如图 4 所示.

```

Terminal - cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master/src
File Edit View Terminal Tabs Help
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master$ cd scripts
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master/scripts$ source ./rip-environment
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master/scripts$ sudo /etc/init.d/ethercat start
[sudo] password for cnc:
Starting EtherCAT master 1.5.2 done
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master/scripts$ cd -
/home/cnc/Documents/linuxcnc-master
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master$ cd src
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master/src$ halcompile --install dynamic605.comp
Compiling realtime dynamic605.c
Linking dynamic605.so
cp dynamic605.so /home/cnc/Documents/linuxcnc-master/rlib/
cnc@cnc: ~/Documents/linuxcnc-master/src$ linuxcnc
LINUXCNC - 2.8.0-pre1

```

图 4 终端命令窗口

Fig.4 Terminal command window

### 3 实验与分析

本文所研究的对象, 允许有一定的稳态误差, 所以实际使用时, PID 参数中的 I 参数为 0, 亦即实际为 PD 调节. PD 参数的整定, 采用的是 4 : 1 的衰减曲线法. 对于本文所作的研究中, PD 控制周期为 1 ms, 也就是在 PD 参数整定的时候, 采样观察的周期为 1 ms. 各个关节轴在位置域控制中, 经过整定后的 PID 参数如表 1 所示.

表 1 PID 参数表

Table 1 PID parameters

The shaft no.	Parameter P	Parameter I	Parameter D
J1	0.31	0	6.2
J2	0.38	0	5.7
J3	0.45	0	4.95
J4	0.53	0	3.71
J5	0.78	0	3.12
J6	0.93	0	1.86

每个关节轴的惯量以及电气、机械传动的属性不一样, 所以各个轴的 PD 参数不一样.

### 3.1 圆形轨迹控制实验及轨迹精度分析

为验证本文所提出的位置域 PD 控制系统在改善机器人末端轮廓轨迹精度的有效性, 以某公司 HSR-JR605 工业机器人为实验对象, 进行平面圆形轨迹跟踪实验. 本实验设计的平面圆形轮廓的理论轨迹如下: 在机器人基坐标系下圆心为  $O(450, 0, 250)$ , 半径  $R$  为 100, 轨迹运行起点为  $A(450, -100, 250)$ , 单位为 mm, 运动方向为顺时针方向, 进给速率  $F$  分别为 30000 和 15000, 单位为  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 下同.

为验证位置域 PD 控制算法的有效性, 在运行相同轨迹的情况下, 分别进行两组实验以形成对照: 第一组实验为未加入位置域 PD 控制算法模块, 在原有的时域控制下进行轨迹实时采集; 第二组为加入位置域 PD 控制算法模块后进行轨迹跟踪与实时采集.

使用 HAL 示波器实时采集轨迹运行过程中机器人各关节轴的相关数据, HAL 示波器设置 8 个采样通道, 分别为关节 1、2、3、5 的理论位置与实际位置(关节 4、6 在轨迹运行过程中未发生运动, 相关数据均设为 0), 采样周期为 6 ms, 采样数量为 2000 个. 数据采集完成后, 根据运动学正变换, 可得到在机器人笛卡尔坐标系下机器人末端的运动轨迹, 并对两组实验的末端轨迹进行对比.

设定进给速率为  $30000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 普通时域控制下末端的三维运动轨迹及其三个方向投影与加入位置域 PD 控制算法模块后的情况对比如图 5 所示.

注意: 图 5 至图 8 中, 黑色线条为理论轨迹, 红色为时域控制下的轨迹, 蓝色为位置域控制下的轨迹. 本文所有的位置域控制采用的是非线性的位置域控制方式.

设定进给速率为 15000, 时域控制下末端的三维运动轨迹及其三个方向投影与加入位置域 PD 控制算法模块后的情况对比如图 6 所示.

通过图 5、图 6 可以明显地看出, 位置域 PD 控制下的平面圆形轨迹具有更好的轮廓跟踪精度, 证明了本文所提出的位置域 PD 控制系统, 能够有效提高六关节机器人末端的轮廓轨迹精度.

### 3.2 矩形轨迹控制实验及轨迹精度分析

如图 7、图 8 所示, 为不同运动速度下平面矩形轨迹运动精度检验的实验. 本实验设计的平面矩形理论轨迹如下: 在机器人基坐标系下, 轨迹运行起点为  $A(350, -100, 250)$ , 分别经过  $B(550, -100, 250)$ ,  $C(550, 100, 250)$ ,  $D(350, 100, 250)$  三个点后回

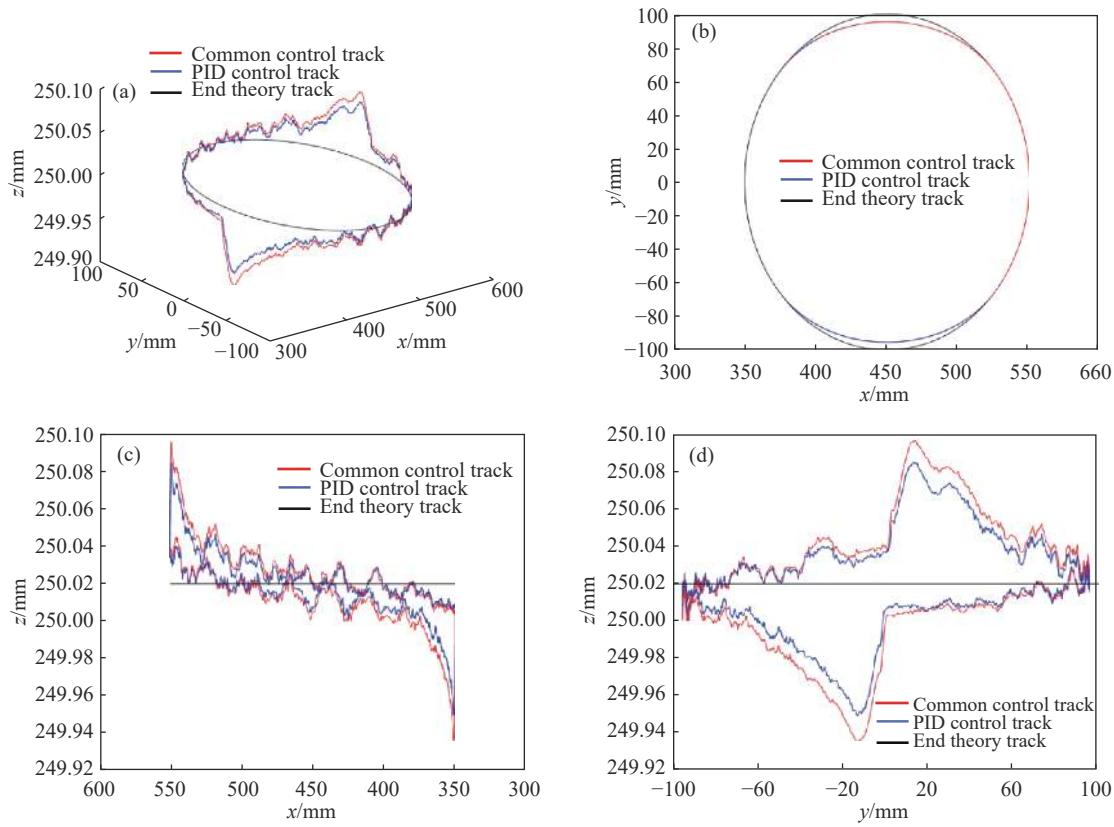


图 5 进给速率为  $30000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时不同控制下末端的平面圆形跟踪轨迹对比图. (a) 三维图; (b)  $x$ - $y$  平面投影; (c)  $x$ - $z$  平面投影; (d)  $y$ - $z$  平面投影

Fig.5 Comparison of the planar circular tracking trajectories at the ends under different controls when the feed rate is  $30000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ : (a) three-dimensional figure; (b)  $x$ - $y$  plane projection; (c)  $x$ - $z$  plane projection; (d)  $y$ - $z$  plane projection

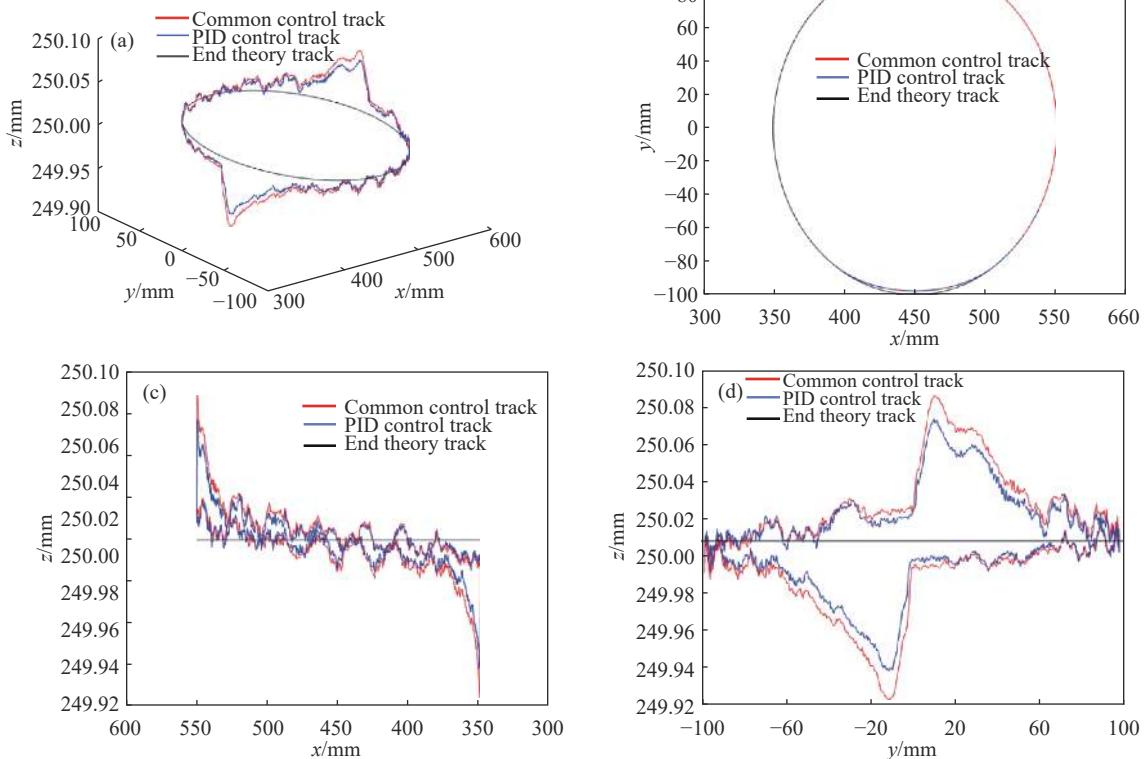


图 6 进给速率为  $15000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时不同控制下末端的平面圆形跟踪轨迹对比图. (a) 三维图; (b)  $x$ - $y$  平面投影; (c)  $x$ - $z$  平面投影; (d)  $y$ - $z$  平面投影

Fig.6 Comparison of the planar circular tracking trajectories at ends under different controls when the feed rate is  $15000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ : (a) three-dimensional figure; (b)  $x$ - $y$  plane projection; (c)  $x$ - $z$  plane projection; (d)  $y$ - $z$  plane projection

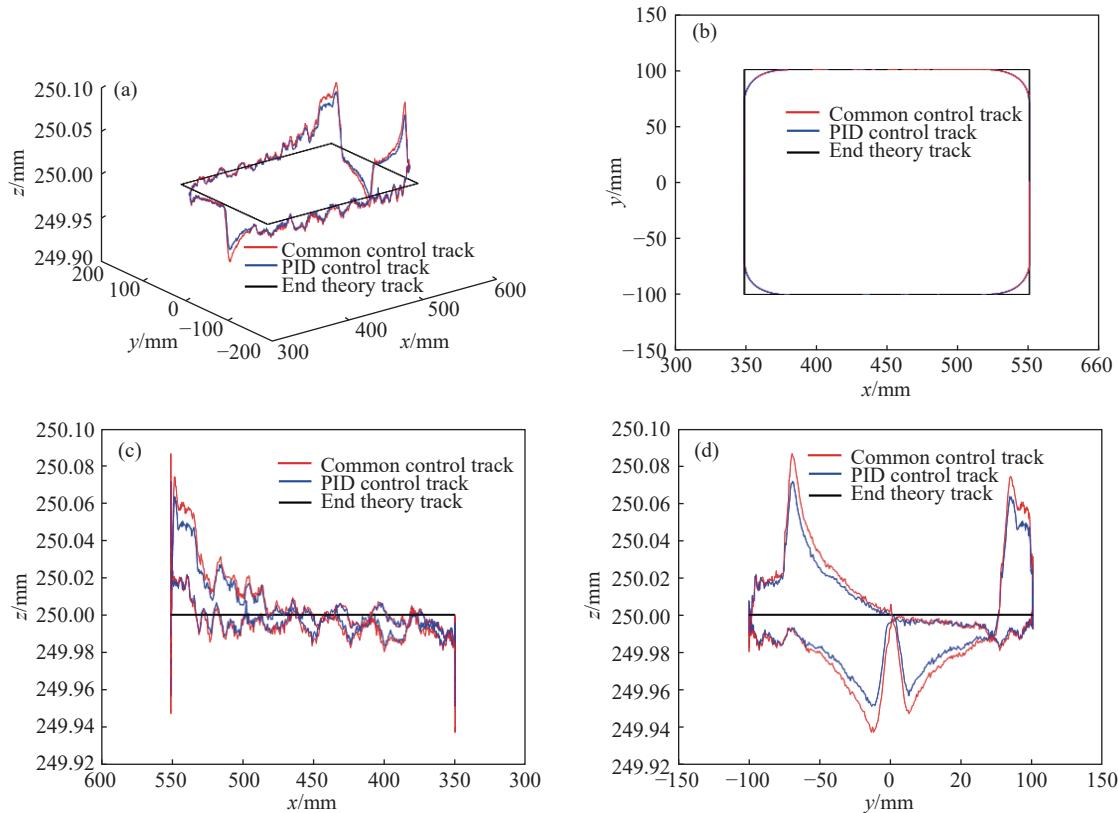


图7 进给速率为  $15000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时不同控制下末端的平面矩形跟踪轨迹对比图. (a) 三维图; (b)  $x-y$  平面投影; (c)  $x-z$  平面投影; (d)  $y-z$  平面投影

Fig.7 Comparison of the planar rectangular tracking tracks at ends under a feed rate of  $15000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ : (a) three-dimensional figure; (b)  $x-y$  plane projection; (c)  $x-z$  plane projection; (d)  $y-z$  plane projection

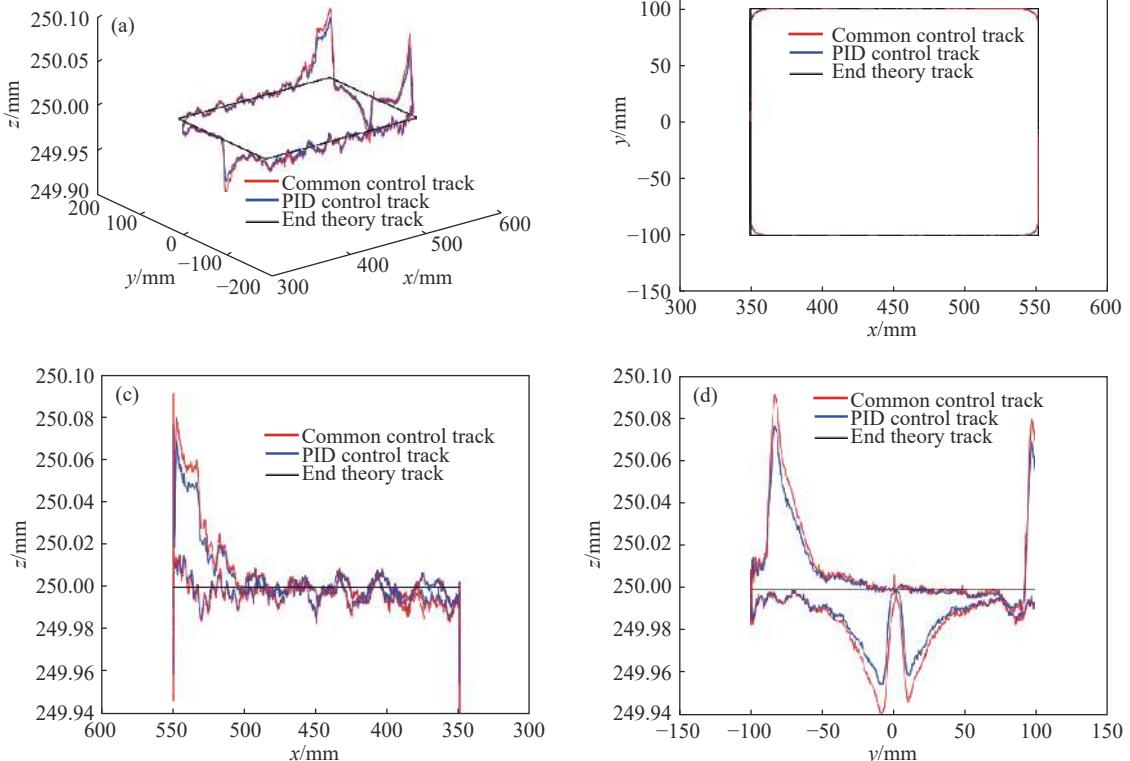


图8 进给速率为  $10000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时不同控制下末端的平面矩形跟踪轨迹对比图. (a) 三维图; (b)  $x-y$  平面投影; (c)  $x-z$  平面投影; (d)  $y-z$  平面投影

Fig.8 Comparison of the planar rectangular tracking tracks at ends under a feed rate of  $10000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ : (a) three-dimensional figure; (b)  $x-y$  plane projection; (c)  $x-z$  plane projection; (d)  $y-z$  plane projection

到  $A$ , 单位为 mm; 运动方向为逆时针方向, 进给速率  $F$  分别为 15000 和 10000.

设定进给速率为 15000, 时域控制下末端的三维运动轨迹及其三个方向投影与加入位置域 PD 控制算法模块后的情况对比如图 7 所示.

设定进给速率为 10000, 时域控制下末端的三维运动轨迹及其三个方向投影与加入位置域 PD 控制算法模块后的情况对比如图 8 所示.

通过图 7、图 8 可以明显地看出, 位置域 PD 控制下的平面矩形轨迹具有更好的轮廓轨迹精度, 亦证明了本文所提出的位置域 PD 控制系统, 能够有效提高六关节机器人末端的轮廓轨迹的精度.

## 4 结论

本文以时间域 PID 控制原理为依据, 基于机器人动力学模型推导出多自由度串联关节型机器人的位置域 PD 控制模型, 并设计了基于六关节机器人位置域 PD 的实时控制的整体方案; 紧接着展开了基于 LinuxCNC 系统的六关节机器人位置域控制系统的研究, 从位置域 PD 控制系统总体方案、位置域 PD 控制算法模块以及位置域 PD 控制程序设计三个方面, 将六关节机器人位置域 PD 控制算法在 LinuxCNC 控制系统中予以实现; 在所搭建的六关节机器人实验平台中, 通过相关实验的设计、数据采集及分析, 验证了本文所研究的位置域 PD 控制算法, 在提高六关节机器人末端轮廓轨迹运动精度方面的有效性.

位置域控制算法, 用在复杂的关节型机器人的实时控制中, 其难点不在于如何实时确定关节轴的主从关系, 而是在确定了主从关系后, 如何实时地构造以主动关节轴位置为自变量、各个从动关节轴位置为因变量的各自对应的函数. 本文针对的是已知轮廓轨迹的方式, 可以离线确定各个指令运动轨迹段中的主、从运动关系及从动轴的位置函数, 从而简化了实验. 如若真正地将位置域控制方式, 引入到多轴联动的复杂机械结构形式的机器人实时运动控制, 则在运动轨迹代码的解释、小线段轨迹拟合、速度规划阶段, 实时确定主、从关节轴及其关系, 尤其是如何实时构建从动轴的位置函数方面, 尚需做进一步深入研究.

## 参 考 文 献

- [1] Zhou J. Intelligent manufacturing is the main direction of “Made in China 2025”. *Enterprise Observer*, 2019(11): 54  
(周济. 智能制造是“中国制造2025”主攻方向. 企业观察家, 2019(11): 54)
- [2] Zhang H X. Research on the development status and trend of industrial robots at home and abroad. *Electron World*, 2013(12): 5  
(张红霞. 国内外工业机器人发展现状与趋势研究. 电子世界, 2013(12): 5)
- [3] Zhang Y. Review of the development history of foreign industrial robots. *Robot Ind*, 2015(3): 68  
(张宇. 国外工业机器人发展历史回顾. 机器人产业, 2015(3): 68)
- [4] Yu D Q. Current situation and trend of industrial robots at home and abroad. *Popular Utiliz Electr*, 2017(9): 20  
(余德泉. 国内外工业机器人发展现状与趋势. 大众用电, 2017(9): 20)
- [5] Ostergaard E H. Future road of industrial robots. *Office Informatization*, 2015(11): 15  
(艾斯本·奥斯特加. 工业机器人的未来之路. 办公自动化, 2015(11): 15)
- [6] Astrom K J, Hagglund T. The future of PID control. *Control Eng Practice*, 2001, 9(11): 1163
- [7] Wang S P, Xie L, Li L P, et al. Covert attack technology of EtherCAT based 7 degrees of freedom manipulator. *Chin J Eng*, 2020, 42(12): 1653  
(汪世鹏, 解伦, 李连鹏, 等. 基于EtherCAT总线的七自由度机械臂的隐蔽攻击技术. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1653)
- [8] Barton K L, Bristow D A, Alleyne A G. Design of a linear time-varying cross-coupled iterative learning controller//2008 American Control Conference (ACC). Seattle, 2008: 3914
- [9] Hu C X, Yao B, Wang Q F. Coordinated contouring controller design for an industrial biaxial linear motor driven gantry//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2009). Singapore, 2009: 1810
- [10] Ouyang P R, Dam T, Pano V. Cross-coupled PID control in position domain for contour tracking. *Robotica*, 2015, 33(6): 1351
- [11] Mu H R. Analysis and research on motion control of industrial robots. *Electron Technol Software Eng*, 2018(23): 115  
(牟海荣. 工业机器人运动控制分析与研究. 电子技术与软件工程, 2018(23): 115)
- [12] Yeh S S, Hsu P L. A new approach to bi-axial cross-coupled control//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications. Anchorage, 2000: 168
- [13] Ouyang P R, Dam T, Huang J, et al. Contour tracking control in position domain. *Mechatronics*, 2012, 22(7): 934
- [14] Ouyang P R, Kang H M, Yue W H, et al. Revisiting hybrid five-bar mechanism: Position domain control application//2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Hailar, 2014: 795
- [15] Ouyang P R, Pano V, Tang J, et al. Nonlinear PD-type control in position domain//2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hefei, 2016: 2407
- [16] Yue W H, Pano V, Ouyang P R, et al. Model-independent position domain sliding mode control for contour tracking of robotic

- manipulator. *Int J Syst Sci*, 2017, 48(1): 190
- [17] Ouyang P R, Pano V, Tang J, et al. Position domain nonlinear PD control for contour tracking of robotic manipulator. *Robot Comput-Integr Manuf*, 2018, 51: 14
- [18] Ouyang P R, Pano V, Acob J. Position domain contour control for multi-DOF robotic system. *Mechatronics*, 2013, 23(8): 1061
- [19] Koutsoukos X D, Antsaklis P J, Stiver J A, et al. Supervisory control of hybrid systems. *Proc IEEE*, 2000, 88(7): 1026
- [20] Ouyang P R. *Hybrid Intelligent Machine Systems: Design, Modeling and Control* [Dissertation]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2005
- [21] Gao Z Q, Huang Y, Han J Q. An alternative paradigm for control system design//*Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. Orlando, 2001: 4578
- [22] Shen R M. *Research on the Development of the Controlling System for Delta Robot Based on LinuxCNC* [Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018
- ( 沈荣敏. 基于LinuxCNC的Delta机器人控制系统研发[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2018)
- [23] Sun H H. *Research and Development of Industrial Robot The Control System Software Based on LinuxCNC* [Dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016  
( 孙会会. 基于LinuxCNC的工业机器人控制系统软件研究与开发[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016)
- [24] Zhang R H. *Design and Implementation of LinuxCNC-Based Multi-Axis Control System* [Dissertation]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2016  
( 张睿恒. 基于LinuxCNC的多轴控制系统设计与实现[学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016)
- [25] Gao M Y, Qin X S, Bai J, et al. Development of industrial robot control system based on ROS and LinuxCNC. *Mach Manuf*, 2015, 53(10): 21  
(高美原, 秦现生, 白晶, 等. 基于ROS和LinuxCNC的工业机器人控制系统开发. *机械制造*, 2015, 53(10): 21)