

引文格式: 刘海涛, 原昊, 山显雷, 等. 一种基于光栅传感器反馈的混联机器人动态精度控制策略[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 40-45.  
LIU Haitao, YUAN Hao, SHAN Xianlei, et al. A grating sensor feedback-based dynamic accuracy control strategy of hybrid robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 40-45.

# 一种基于光栅传感器反馈的混联机器人动态精度控制策略\*

刘海涛, 原昊, 山显雷, 韩家乐, 肖聚亮

(天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350)

**[摘要]** 为了有效抑制因减速器和丝杠-螺母副等传动误差及弹性变形等因素引起的跟随误差, 提高混联机器人的末端动态精度, 利用安装在摆角头减速器输出侧和并联机构从动关节上的高精度光栅传感器, 研究混联机器人的动态精度控制策略。在PID+前馈体系架构下, 采用Lyapunov稳定性理论, 设计出基于光栅传感器和伺服电机编码器位置反馈的控制律, 据此构建出混联机器人的动态精度补偿器。以天津大学自主研发的TriMule-200混联机器人为研究对象, 开展了试验验证。结果表明, 相比于半闭环位置控制, 所设计的动态精度补偿器能够大幅提高混联机器人的末端动态精度, 动态误差的最大降幅达到82.88%, 由此验证了所提出基于光栅传感器反馈的动态精度控制策略的有效性。

**关键词:** 混联机器人; 动态精度; PID+前馈控制; 光栅传感器反馈; 补偿器设计

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.040



刘海涛

教授, 博士, 研究方向为机构学与机器人、并混联构型装备。

由一平动两转动位置型并联机构+摆角头构成的混联机器人是工

业机器人的重要门类之一。此类机器人兼具数控机床和关节型机器人的技术优势, 具有高速、高精度、高动态特性, 还具有高灵活性和高柔性等优点, 特别适合大型构件的现场加工<sup>[1-2]</sup>。目前, 瑞典、西班牙、中国等相继研制出以Tricept、Exechon、TriMule混联机器人为核心单元的加工装备<sup>[3-5]</sup>, 已在航天航空、轨道交通等领域得到成功应用, 成为解决大型构件高精度、高柔性、低成本制造难题的核心工艺装备。

尽管混联机器人在运动灵活性、生产适应性、功能集成能力等方面较数控机床有明显的优势, 但相比于数控机床的结构, 混联机器人的零部件结构刚度不足, 导致其末端静动态刚度裕度低, 且静动态特性随位形变化显

著<sup>[6-7]</sup>。由于混联机器人的上述特点, 导致驱动关节运动、末端切削载荷等激励引起的末端动态误差更加显著, 将该类装备用于金切加工时的加工精度较数控机床尚有较大差距。因此, 利用混联机器人实现高质高效金切加工, 亟须提升其末端动态精度。

工业机器人普遍采用单关节分散控制策略, 通过控制各驱动关节的运动使机器人末端精确地跟踪预定运动轨迹。因此, 提高驱动关节的动态精度是改善工业机器人末端动态精度的有效途径。国内外学者从减小系统的相位滞后, 提高系统的控制带宽等方面研究了驱动关节动态误差的抑制方法, 相关研究方法包括设计零相位误差跟踪控制器(ZPETC), 减小系统中时滞环节引起

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0709004); 国家自然科学基金项目(51805361、52175025)。

的相位滞后<sup>[8]</sup>；利用极点消除法、陷波滤波器法等抑制传动系统弹性引起的低阶模态<sup>[9]</sup>，提高系统带宽；引入自适应滑模控制、半主动阻尼控制等先进控制算法提高系统带宽<sup>[10-11]</sup>。此外，针对工业机器人的静动态特性随位形变化的特点，为了改善其工作空间全域内的动态精度，国内外学者从动力学补偿控制、控制器参数整定等方面开展了研究，相关研究方法包括：基于机器人准确的动力学模型，引入计算力矩控制、动力学补偿控制等方法<sup>[12]</sup>，提高机器人末端的动态精度；在“PID+前馈”控制架构下，研究基于迭代学习、模糊规则、单位脉冲响应等方法的控制器参数整定方法<sup>[13-14]</sup>，实现控制器参数的自适应整定，提高机器人工作空间全域内的控制品质。

上述研究普遍在半闭环控制架构下开展，即利用伺服电机编码器的反馈信息构造位置控制闭环。然而，伺服电机编码器只能反馈其转子的转角和速度信息，导致半闭环控制无法调控传动误差、传动系统弹性等因素引起的跟随误差，故即便在采用复合控制结构及变增益控制器参数整定等手段后，混联机器人的动态精度较普通数控机床仍有相当差距。因此，根据混联机器人的拓扑结构特点，直接检测其运动输出构件的位置信息，进而实施动态精度控制策略，提高混联机器人的末端动态精度尚

待深入研究。

为了提高混联机器人的末端动态精度，本文研究了基于光栅反馈的动态精度控制策略。

## 1 TriMule 混联机器人

图1所示为TriMule混联机器人。该机器人由一1T2R（T为移动，R为转动）3自由度空间并联机构和3自由度摆角头串联而成。1T2R并联机构由一平面并联机构与一空间UPS主动支链组成，前者包括动平台、两条RPS主动支链、一条从动约束RP支链以及集成转动支架，后者一端通过S副与动平台连接，另一端通过U副与机架连接。摆角头由RRR串联运动链组成，各转动副的轴线相交于一点且相邻轴线相互垂直。在此，R、P、U、S分别表示转动副、移动副、虎克铰和球副；P表示主动移动副，其采用交流伺服电机+滚珠丝杠导轨副驱动；R表示主动转动副，摆角头的第一和第三转动副采用交流伺服电机+摆线行星减速器驱动，第二转动副采用交流伺服电机+齿形带+摆线行星减速器驱动。为了便于实现混联机器人末端动态精度的调控，在摆角头各驱动轴减速器的输出侧和并联机构RP支链从动关节、集成转动支架上安装了高精度光栅传感器，各传感器的安装位置如图1(a)的CAD模型所示。

为了便于描述，将UPS支链记

为支链1，将转动支架与RPS支链构成的R（RPS）运动链分别记为支链2和3，将转动支架、RP支链和摆角头构成的R（RP）RRR运动链记为支链4。将U副（S副）在机械结构上等效为由轴线两两正交且交汇于一点的两个（3个）R副。令 $A_{0,i}$ 为支链1中U副的中心， $A_{0,i}$ （ $i=2\sim4$ ）为支链 $i$ 中移动副轴线与转动支架轴线的交点， $A_{j,i}$ 为支链 $i$ 中构件 $j$ （ $j=1\sim6$ ）上的点， $P$ 为摆角头转动副轴线的交点，以这些点为原点，建立参考坐标系和构件的连体坐标系。其中，整机参考坐标系 $\{\kappa\}$ 以 $A_{0,4}$ 为原点， $x$ 轴与转动支架的轴线重合， $z$ 轴与由点 $A_{0,i}$ （ $i=1\sim4$ ）构成的平面垂直；连体坐标系 $\{\kappa_{j,i}\}$ 以 $A_{j,i}$ 为原点， $x_{j,i}$ 轴与第 $j+1$ 个关节轴线重合。TriMule混联机器人的机构简图如图1(b)所示，在此，仅示出了参考坐标系 $\{\kappa\}$ 。

## 2 动态精度补偿器设计

根据前期研究可知<sup>[3]</sup>，由于减速器、丝杠-螺母副等传动系统的刚度比其他部件的刚度低得多，由传动系统弹性引起的振动、弹性变形等成为影响混联机器人末端动态精度的主要动态误差源。根据图1(b)所示的机构简图可知，TriMule混联机器人末端刚体的运动可等效为R（RP）RRR串联运动链的合成运动，光栅传感器即安装在该运动链的各关节

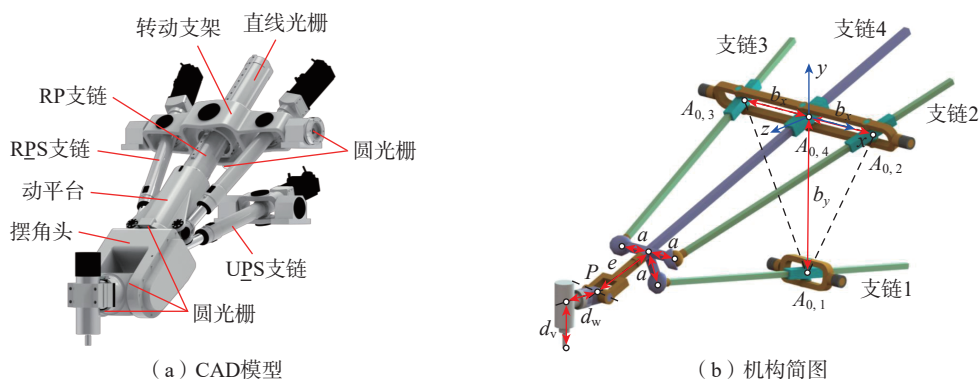


图1 TriMule 混联机器人  
Fig.1 TriMule hybrid robot

上,其测量的位置信息中包含了各传动系统的传动误差和动态误差。在完成光栅传感器标定的情况下,将其测量得到的位置和速度等信息视为对应关节的真实输出,据此,采用D-H法或指数积法<sup>[15]</sup>即可准确计算混联机器人末端的真实位姿。因此,利用光栅传感器的测量信息实施误差补偿或反馈控制,能够改善混联机器人的末端动态精度。

为了提高TriMule混联机器人中R(RP)RRR串联运动链各关节的动态精度,利用光栅传感器的测量信息设计位置反馈补偿器。为了便于描述,令 $\theta_{j,4}$ ( $j=1\sim 6$ )表示R(RP)RRR串联运动链中第 $j$ 个单自由度关节绕/沿其轴线的名义转角/位移; $\theta_{r,j,4}$ 表示对应光栅传感器的测量值; $\delta_{j,4}$ 表示测量值与名义值之间的偏差(即跟随误差)。建立如下误差动力学方程

$$\dot{\delta}_{j,4}(t) = \dot{\theta}_{j,4}(t) - \dot{\theta}_{r,j,4}(t) \quad (1)$$

为了设计出稳定的位置反馈补偿器,定义Lyapunov函数为

$$V_{\delta,j,4} = \frac{1}{2} \delta_{j,4}^2(t) \quad (2)$$

当 $\delta_{j,4}(t) \neq 0$ 时,式(2)满足 $V_{\delta,j,4} > 0$ 。对于

$$\dot{V}_{\delta,j,4} = \delta_{j,4}(t) \dot{\delta}_{j,4}(t) \quad (3)$$

当 $\delta_{j,4}(t) \neq 0$ 时,存在多种形式的误差动力学方程,使得 $\dot{V}_{\delta,j,4} < 0$ 。在此,为了使误差指数收敛,令

$$\dot{\delta}_{j,4}(t) = -k_{pp,j,4} \delta_{j,4}(t) \quad (4)$$

式中, $k_{pp,j,4}$ 表示比例增益,且 $k_{pp,j,4} > 0$ 。

将式(4)代入式(1),得到基于光栅传感器位置反馈的控制律

$$\dot{\theta}_{r,j,4}(t) = \dot{\theta}_{j,4}(t) + k_{pp,j,4} \delta_{j,4}(t) \quad (5)$$

根据式(5)的表达形式可以看出,该控制律即为比例反馈+速度前馈控制律,能够保证R(RP)RRR串联运动链中关节的跟随误差 $\delta_{j,4}(t)$ 指数收敛。根据积分控制能够减小稳态误差的特性,在式(5)的基础上增加积分环节,进一步改善其稳态跟踪性能,此时,将式(5)改写为比例

积分反馈+速度前馈控制律

$$\dot{\theta}_{r,j,4}(t) = \dot{\theta}_{j,4}(t) + k_{pp,j,4} \delta_{j,4}(t) + k_{pi,j,4} \int \delta_{j,4}(t) dt \quad (6)$$

式中, $k_{pi,j,4}$ 表示积分增益,且 $k_{pi,j,4} > 0$ 。

在式(5)和(6)中,视为经过光栅传感器位置反馈调节后R(RP)RRR串联运动链中各关节的速度指令,为了得到对应于各伺服电机的控制指令,进行如下运动学变换

$$\dot{\theta}_m(t) = J \dot{\theta}_{r,4}(t) \quad (7)$$

式中,

$$J = J_r J_a,$$

$$J_r = \text{diag}(r_1 \cdots r_6),$$

$$J_a = \begin{bmatrix} W_{a,P}^T T_{a,4} & & \\ & I_{3 \times 3} & \\ & & \end{bmatrix};$$

$$W_{a,P} = \begin{bmatrix} \hat{\xi}_{wa,3,1} & \hat{\xi}_{wa,3,2} & \hat{\xi}_{wa,3,3} \end{bmatrix},$$

$$T_{a,4} = \begin{bmatrix} \hat{\xi}_{ta,1,4} & \hat{\xi}_{ta,2,4} & \hat{\xi}_{ta,3,4} \end{bmatrix};$$

$$\dot{\theta}_{r,4} = (\dot{\theta}_{r,1,4} \quad \dot{\theta}_{r,2,4} \quad \dot{\theta}_{r,3,4} \quad \dot{\theta}_{r,4,4} \quad \dot{\theta}_{r,5,4} \quad \dot{\theta}_{r,6,4})^T,$$

$$\dot{\theta}_m = (\dot{\theta}_{m,3,1} \quad \dot{\theta}_{m,3,2} \quad \dot{\theta}_{m,3,3} \quad \dot{\theta}_{m,4,4} \quad \dot{\theta}_{m,5,4} \quad \dot{\theta}_{m,6,4})^T$$

其中, $\hat{\xi}_{wa,3,i}$ ( $i=1,2,3$ )表示主动支链 $i$ 关于点 $P$ 的单位驱动力旋量; $\hat{\xi}_{ta,j,4}$ ( $j=1,2,3$ )表示支链4中第 $j$ 个关节关于点 $P$ 的单位许动微小位移旋量,相关建模基础详见文献[16]; $\dot{\theta}_{m,3,i}$ ( $i=1,2,3$ )和 $\dot{\theta}_{m,j,4}$ ( $j=4,5,6$ )分别表示经过光栅传感器反馈调节后并联机构中支链 $i$ 和摆角头关节 $j$ 伺服电机的速度指令; $r_i=2\pi/p$ ( $i=1,2,3$ ), $p$ 表示并联机构中滚珠丝杠的导程; $r_j$ ( $j=4,5,6$ )表示摆角头各驱动轴传动系统的传动比。

目前,工业机器人普遍采用串级半闭环控制架构,即位置环-速度环-电流环三级控制架构,其中,位置环和速度环采用伺服电机编码器的反馈信息构造。将半闭环控制中位置环的伺服电机编码器位置反馈控制替换为上述光栅传感器位置反馈控制,即可实现混联机器人的全闭环反馈控制。然而,由于混联机器人中并联机构动平台的运动由各主动支链的运动耦合而成,现有商用数控系统的运动控制模块无法支持这类

多轴耦合运动系统的全闭环反馈补偿器设计。因此,为了避免复杂的数控系统底层模块开发,在混联机器人现有半闭环控制的基础上,研究引入光栅传感器反馈控制的方法。

考虑到式(7)中的 $\dot{\theta}_{m,3,i}$ ( $i=1,2,3$ )和 $\dot{\theta}_{m,j,4}$ ( $j=4,5,6$ )可视为经过光栅传感器反馈调节后各伺服电机的速度指令,对其作积分运算,运算后的结果可视为经过光栅传感器反馈调节后各伺服电机的位置指令。据此,可将由光栅传感器位置反馈控制律构成的补偿器与由电机编码器位置反馈控制律构成的补偿器串联。不失一般性,以半闭环位置控制为比例反馈+速度前馈控制为例说明,此时,得到如下基于光栅传感器和伺服电机编码器位置反馈的控制律

$$\omega_{m,0}(t) = \dot{\theta}_{d,m}(t) + k_{pp,m} \left( \int J \dot{\theta}_{r,4}(t) dt - \theta_{r,m}(t) \right) \quad (8)$$

式中, $\dot{\theta}_{d,m} = (\dot{\theta}_{d,m,3,1} \quad \dot{\theta}_{d,m,3,2} \quad \dot{\theta}_{d,m,3,3} \quad \dot{\theta}_{d,m,4,4} \quad \dot{\theta}_{d,m,5,4} \quad \dot{\theta}_{d,m,6,4})^T$ ;  $\theta_{r,m} = (\theta_{r,m,3,1} \quad \theta_{r,m,3,2} \quad \theta_{r,m,3,3} \quad \theta_{r,m,4,4} \quad \theta_{r,m,5,4} \quad \theta_{r,m,6,4})^T$ ;  $\omega_{m,0} = (\omega_{m,0,3,1} \quad \omega_{m,0,3,2} \quad \omega_{m,0,3,3} \quad \omega_{m,0,4,4} \quad \omega_{m,0,5,4} \quad \omega_{m,0,6,4})^T$ ;  $k_{pp,m} = \text{diag}(k_{pp,m,3,1} \quad k_{pp,m,3,2} \quad k_{pp,m,3,3} \quad k_{pp,m,4,4} \quad k_{pp,m,5,4} \quad k_{pp,m,6,4})$ 其中, $\dot{\theta}_{d,m,3,i}/\theta_{r,m,3,i}/\omega_{r,m,3,i}/k_{pp,m,3,i}$ ( $i=1,2,3$ )和 $\dot{\theta}_{d,m,j,4}/\theta_{r,m,j,4}/\omega_{m,0,j,4}/k_{pp,m,j,4}$ ( $j=4,5,6$ )分别表示并联机构中支链 $i$ 和摆角头关节 $j$ 伺服电机的名义速度/伺服电机编码器的测量角度/位置环输出或速度环输入/半闭环位置控制的比例增益;伺服电机的名义速度可在给定混联机器人末端刚体速度旋量时,利用速度逆解模型求解得到。

根据式(8)中的控制律,设计出混联机器人基于光栅传感器和伺服电机编码器反馈的动态精度补偿器,其控制结构如图2所示,其中,位置逆解模型是指根据给定的末端刚体的位姿计算R(RP)RRR串联运动链中各关节转角或位移的数学模型。该动态精度补偿器由光栅传感器位置反馈控制和伺服电机编码器位置

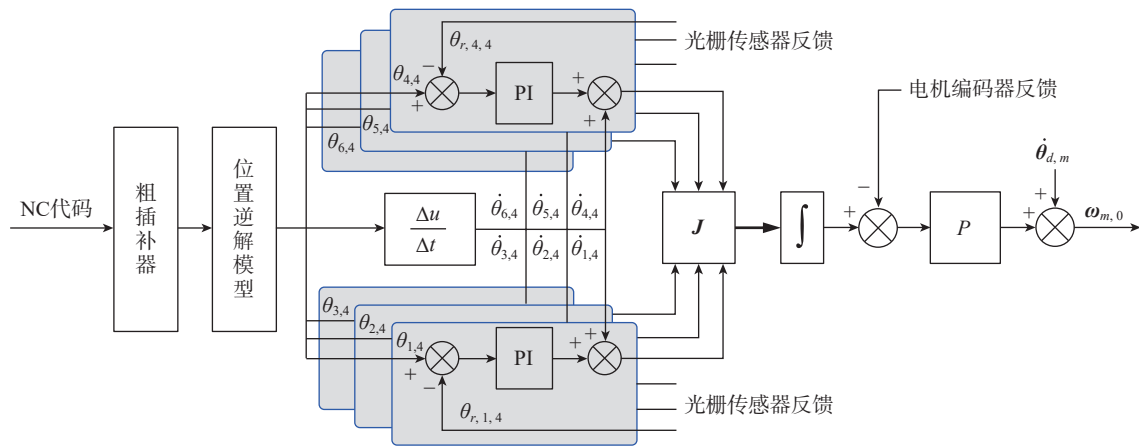


图2 混联机器人动态精度补偿器的控制框图

Fig.2 Control block diagram of dynamic accuracy compensator for hybrid robot

反馈控制串联而成,由于两者分别采用比例积分反馈+速度前馈和比例反馈+速度前馈控制律,均能保证各自的误差指数收敛,因此,能够保证该补偿器的稳定性。

### 3 试验验证

本文以天津大学自主研制的TriMule-200混联机器人作为研究对象开展试验验证,试验平台如图3所示。TriMule-200混联机器人试验平台以CK3M可编程多轴控制器(欧姆龙公司)为主控单元,伺服电机驱动器工作于速度模式,位置环补偿器的控制算法在CK3M中实现。其中,伺服电机编码器的位置反馈控制采用CK3M中集成的位置控制模块,在精插补周期中实现;光栅传感器位置反馈控制利用CK3M的自定义算法功能自行编程,在粗插补周期中实现。圆光栅传感器采用雷尼绍公司的RESM20USA075,精度为 $\pm 0.38''$ ;直线光栅传感器采用雷尼绍公司的RTL20-S,精度为 $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$ 。TriMule-200混联机器人本体的尺度参数如表1所示,基于光栅传感器和伺服电机编码器反馈的动态精度补偿器的参数如表2所示。

试验过程中,选择一个与水平面平行的圆轨迹作为验证轨迹,圆心坐标为 $(0, -107, 700) \text{ mm}$ ,半径为

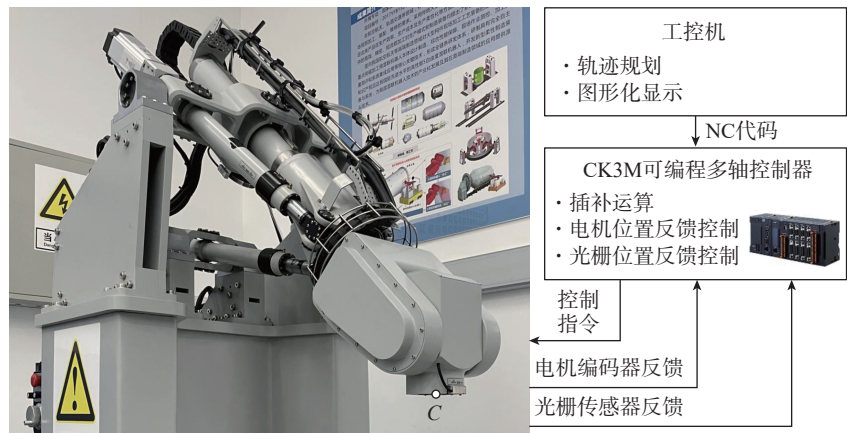


图3 TriMule-200混联机器人试验平台

Fig.3 Experimental set-up of TriMule-200 hybrid robot

表1 TriMule-200混联机器人的尺度参数

Table 1 Scale parameters of TriMule-200 hybrid robot mm

$a$	$b_x$	$b_y$	$e$	$d_w$	$d_v$
75	167	294.1	283.5	93.8	130

表2 TriMule-200混联机器人的动态精度补偿器参数

Table 2 Compensator parameters of TriMule-200 hybrid robot

精度补偿	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$
$k_{pp, m, j, 4}$	$0.9 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$
$k_{p, j, 4}$	$1 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
$k_{pi, j, 4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$0.6 \times 10^{-3}$

100 mm,摆角头第三转动轴的轴线垂直于水平面且指向下方,进给速度为1200 mm/min,并联机构和摆角头驱动关节的速度和加速度曲线如图4所示。由于机器人上未安装末端

执行器,在此仅示出了摆角头第一、二关节的相关曲线。以摆角头第二关节上末端参考点C的位置误差和第三关节轴线的姿态误差为指标评价混联机器人的控制品质,试验结果

如图5所示。值得指出的是,混联机器人末端的动态误差根据光栅传感器的反馈信息经由正向运动学模型计算得到,该正向运动学模型即为6自由度串联机器人的正向运动学模型,采用D-H法或指数积法<sup>[15]</sup>即可得到,在此不再赘述。

图5为TriMule-200混联机器人跟踪上述圆轨迹时末端沿 $x/y/z$ 轴的动态误差及其幅值,并将施加本

文提出动态精度控制策略(图中简称“双位置反馈控制”)时的结果与仅施加半闭环反馈控制时的结果进行对比。根据试验结果可以看出,与半闭环反馈控制相比,施加本文提出的动态精度控制策略后,能够显著减小跟随周期性运动轨迹时由于惯性力引起的呈现周期规律的误差。当进给速度为1200 mm/min时,混联机器人末端动态位置(姿态)误差的

最大值、均方根值分别由0.997 mm(0.064°)降低至0.196 mm(0.015°)、由0.584 mm(0.034°)降低至0.1 mm(0.007°),降幅分别达到80.34%(76.56%)、82.88%(79.41%)。研究表明,由于光栅传感器的位置反馈信息中包括了传动系统的传动误差、弹性等引起的跟随误差,利用该信息构造位置反馈闭环能够消除或抑制上述误差的影响,进而改善混联机器人的末端动态精度。通过开展物理样机试验,验证了本文所提出混联机器人基于光栅传感器反馈的动态精度控制策略的有效性。

#### 4 结论

(1) 针对提升混联机器人末端动态精度的需求,提出了基于光栅传感器反馈的动态精度控制策略,结合Lyapunov稳定性理论,设计出基于光栅传感器和伺服电机编码器反馈的动态精度补偿器,该补偿器充分利用了商用数控系统中集成的运动控制模块,便于工程应用。

(2) 以TriMule-200混联机器人为研究对象开展了试验验证,结果表明,施加本文提出的动态精度控制策略后,混联机器人末端的动态误差大幅度减小,与仅施加半闭环位置反馈控制的结果相比,动态误差的最大降幅达到82.88%,验证了本文所提出基于光栅传感器反馈动态精度控制策略的有效性。

#### 参考文献

[1] VERL A, VALENTE A, MELKOTE S, et al. Robots in machining[J]. CIRP Annals, 2019, 68(2): 799-822.  
 [2] 赖一楠, 叶鑫, 丁汉. 共融机器人重大研究计划研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(23): 1-11, 20.  
 LAI Yinan, YE Xin, DING Han. Research progress of major research plan on tri-Co robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(23): 1-11, 20.  
 [3] DONG C L, LIU H T, HUANG T, et al.

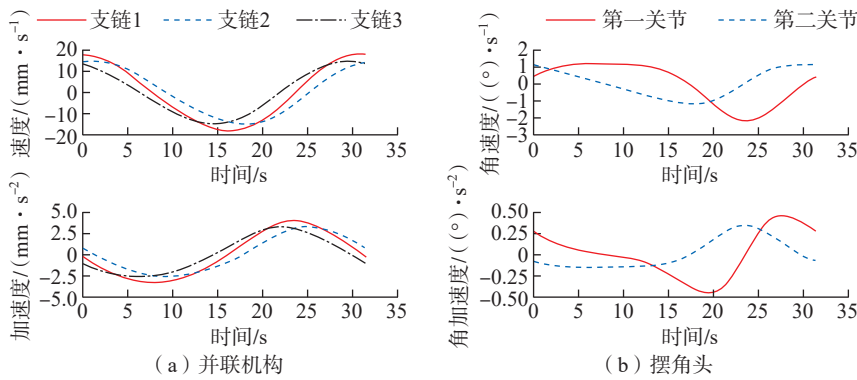


图4 混联机器人驱动关节的速度和加速度曲线  
 Fig.4 Velocity and acceleration of active joints of hybrid robot

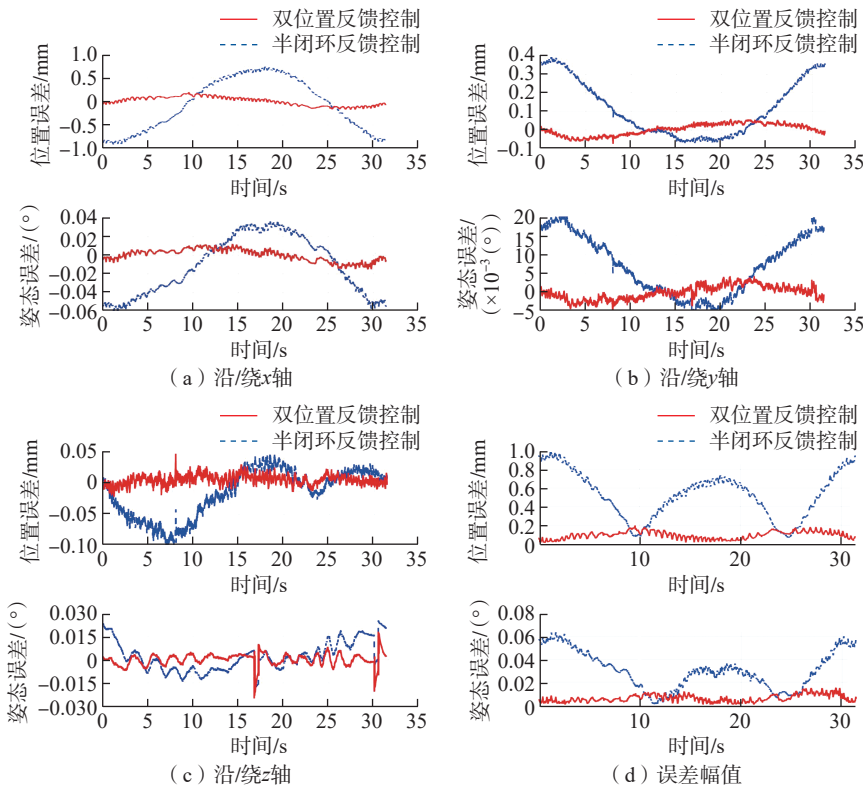


图5 混联机器人末端的动态误差曲线  
 Fig.5 Dynamic errors of hybrid robot

A screw theory-based semi-analytical approach for elastodynamics of the tricept robot[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11(3): 031005.

[4] URIARTE L, ZATARAIN M, AXINTE D, et al. Machine tools for large parts[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 731–750.

[5] BI Z M. Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1): 186–193.

[6] DONG C L. Stiffness modeling and analysis of a novel 5-DOF hybrid robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 125: 80–93.

[7] WU L. An approach to predict lower-order dynamic behaviors of a 5-DOF hybrid robot using a minimum set of generalized coordinates[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102024.

[8] LI X W, ZHANG J, ZHAO W H, et al. A zero phase error tracking based path precompensation method for high-speed

machining[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(2): 230–239.

[9] ERKORKMAZ K, KAMALZADEH A. High bandwidth control of ball screw drives[J]. *CIRP Annals*, 2006, 55(1): 393–398.

[10] OKWUDIRE C, ALTINTAS Y. Minimum tracking error control of flexible ball screw drives using a discrete-time sliding mode controller[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2009, 131(5): 051006.

[11] VERL A, FREY S. Improvement of feed drive dynamics by means of semi-active damping[J]. *CIRP Annals*, 2012, 61(1): 351–354.

[12] GUO K, PAN Y P, YU H Y. Composite learning robot control with friction compensation: A neural network-based approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(10): 7841–7851.

[13] MEZA J L, SANTIBANEZ V, SOTO R, et al. Fuzzy self-tuning PID semiglobal regulator

for robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(6): 2709–2717.

[14] VAN M, DO X P, MAVROVOUNIOTIS M. Self-tuning fuzzy PID-nonsingular fast terminal sliding mode control for robust fault tolerant control of robot manipulators[J]. *ISA Transactions*, 2020, 96: 60–68.

[15] LYNCH K M, PARK F C. *Modern robotics: Mechanics, planning, and control*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

[16] 董成林. 一种新型五自由度混联机器人的参数化建模与集成设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.

DONG Chenglin. Modeling and integrated design of A novel 5-DOF hybrid robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

通讯作者: 山显雷, 副研究员, 博士, 研究方向为机构学与机器人、工业机器人智能控制。

## A Grating Sensor Feedback-Based Dynamic Accuracy Control Strategy of Hybrid Robot

LIU Haitao, YUAN Hao, SHAN Xianlei, HAN Jiale, XIAO Juliang

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**[ABSTRACT]** Because of the transmission errors and the elastic deformations of reducer and lead screw-nut pair, active joints inevitably suffer from following errors that significantly degrade the dynamic contour accuracy of hybrid robots. An effective dynamic accuracy control strategy based on the grating sensors installed on the wrist and the passive limb was presented in this paper for improving the dynamic contour accuracy in these hybrid robots. After addressing the design principle of a PID + feedforward and Lyapunov stability based control law with the position feedbacks of the grating sensor and the servo motor encoder, a dynamic accuracy compensator was developed. Experimental results on a TriMule-200 hybrid robot show that the dynamic contour accuracy of the robot is significantly improved with the maximum reduced dynamic error of 82.88%, which verifies the effectiveness of the proposed dynamic accuracy control strategy.

**Keywords:** Hybrid robot; Dynamic accuracy; PID+feedforward control; Feedback of grating sensor; Compensator design

(责编 大漠)