

铣削加工用混联机器人参数 曲线插补方法*

黎广喜¹, 刘海涛¹, 徐青山², 肖聚亮¹, 秦旭达¹

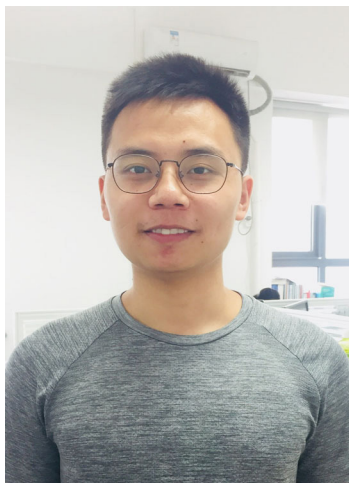
(1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350;

2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

[摘要] 传统加工装备难以满足高速、高精度、高柔性加工需求, 研发高性能加工装备势在必行。以实现航空制造领域高速高精度加工为研究目的, 提出一种基于混联机器人平台的加工方法。介绍一种新型五轴混联加工机器人 (TriMule), 并建立其运动学逆解模型。为提高加工精度, 阐述了参数曲线插补原理及其在混联机器人加工装备上的应用。最后结合螺旋铣孔加工工艺, 在混联机器人加工平台上进行钛合金铣孔试验。仿真和试验结果表明, 采用参数曲线插补方法, 能有效限制进给率波动, 改善混联机器人加工精度。总结全文, 指出混联机器人具备高刚度、高速度、高精度及高柔性等特点, 在航空制造领域具有广阔的应用前景。

关键词: 混联机器人; 铣削加工; 参数曲线插补; B样条; 螺旋铣

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.043



黎广喜

博士研究生, 主要研究方向为铣削加工用混联机器人轨迹规划。

制造业是国民经济的支柱产业, 航空制造业则是一个国家制造业水

* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB1301800)。

平的综合体现。近年来, 我国着重发展航空制造业, 航空领域核心技术不断取得突破, 涌现出一大批高性能航空产品, 如国产大型客机 C919 等。在航空制造业中, 广泛使用新材料和新结构来提高产品性能, 这些航空产品的制造与装配在很大程度上依赖于先进的制造手段^[1]。随着高性能航空产品外形结构日益复杂化, 其对零件加工精度要求越来越高, 未来航空制造业将面临大尺寸零件加工、复杂曲面加工、钛合金及复合材料加工和绿色制造等技术难题, 因此研制高刚度、高精度、高效率及高柔性的五轴数控加工装备, 开发高度自动化的加工系统已经成为航空制造业发展的迫切需求^[2]。

工业机器人最早应用于汽车制造领域, 随着机器人制造及控制技术的快速发展, 机器人在航空制造领域

的应用范围越来越广, 如机器人自动制孔、机器人焊接及装配等^[3]。虽然关节型机器人在加工制造领域应用日趋成熟, 但由于其负载能力低、刚度低、定位精度差, 不能满足航空制造业的高精度制造需求, 因此面向航空制造业的机器人装备亟待突破^[4]。为满足大尺度航空零部件的制造加工, 避免使用占地面积过大的大型机床, 具备较高的刚度和精度的混联机器人得到了航空制造企业的广泛关注^[5]。瑞典、西班牙等国家先后开发出以 Tricept、Exechon 混联机器人为核心制造单元的大型构件现场加工装备, 已成功应用于航空航天制造领域^[6-7]。这类装备以可实现一平二转 (1T2R) 运动的位置型并联机构为核心功能模块, 通过串接多自由度转头和 / 或配以 X-Y 长行程导轨, 可搭建形式多样的制造单元与系统, 满足航

空制造领域大尺度零件加工需求。

为保证机器人平稳运行,改善加工质量,避免加工设备频繁加减速及防止机械本体发生共振,必须考虑混联机器人各关节的驱动能力,生成一条适合机器人加工的平滑运动轨迹。混联机器人能否平稳运行,很大程度上取决于插补算法的选择,常用的插补算法包括直线圆弧插补和参数曲线插补两种。直线圆弧插补通常根据弦高差等要求,用大量微小直线段或圆弧段通过逼近的方式来近似代替待加工曲线,从而实现复杂轮廓加工^[8]。但是,当进行高速高精度加工时,会导致以下问题:(1)增大CAD/CAM系统和CNC系统之间的数据传输负荷,降低控制系统稳定性;(2)各微小线段在连接点处非高阶连续,容易引起共振,降低加工质量;(3)频繁加减速,难以达到给定的工艺进给率,降低加工效率。

由于直线圆弧插补技术存在上述问题,越来越多的学者开始研究参数曲线插补方法^[9-10]。该方法可以有效限制加工过程中的进给率波动,保证混联机器人平稳运行,对于改善加工质量有重要意义,常用的参数曲线包括非均匀有理B样条曲线、B样条曲线及Bezier曲线等。

参数曲线插补方法已成功应用于五轴数控机床,但结合混联机器人的研究尚不多见。本文以航空制造领域装配孔加工为背景,以TriMule混联机器人为加工平台^[11],应用于基于双B样条的参数曲线插补方法,并通过钛合金板螺旋铣孔试验进行验证。

混联机器人加工平台

1 混联机器人

如图1所示, TriMule机器人由A/C双摆头和三自由度1T2R并联机构串接而成,其中,1T2R并联机构由两组固定轴座、转动支架、动平台、2-R_PS&R_P平面机构以及一条U_PS

支链组成。在此R、P、U、S分别表示转动副、移动副、虎克铰和球面副,P表示主动移动副。在该机构中,R_PS支链一端通过R副与转动支架连接,另一端通过S副与动平台连接;R_P支链一端通过R副与转动支架连接,另一端与动平台固接;转动支架通过R副与一组支撑轴座连接;U_PS支链一端通过U副与另一组支撑轴座连接,另一端通过S副与动平台连接。

TriMule机器人采用模块化设计,其支撑轴座可灵活地安装到不同机架上。该机器人具备5个自由度,理论上能实现任意复杂曲面的加工,因此可搭建形式多样的制造单元系统,满足不同的作业需求,如图2所示。

2 运动学分析

建立TriMule机器人运动学模型是刀具位姿(位置和姿态)实时监测和轨迹规划的基础。图3为

TriMule机器人坐标系简图,其中 B_1 表示U_PS支链连架虎克铰中心, A_1 表示U_PS支链与动平台相连接球铰中心; B_2 表示R_PS支链与转动支架连接R副轴线和转动支架与固定轴座连接R副轴线的交点,类似可定义 B_3 和 B ; A_2 和 A_3 分别表示两条R_PS支链与动平台连接S副的中点, A 为R_P支链与 A_i ($i=1, 2, 3$)张成平面的交点,且R_P支链的轴线与该平面正交, P 为A/C摆头两转轴轴线的交点,位于 \overline{BA} 延长线上, C 为刀尖点。

建立TriMule机器人位置逆解模型是应用参数曲线插补方法的必要条件,即已知机器人末端执行器的位置 x_c, y_c, z_c 和姿态角 α, β ,求解各驱动关节长度 q_1, q_2, q_3 及转头转角 θ_4, θ_5 。将逆解算法植入数控系统中,可实时控制TriMule机器人,实现加工作业。如图3所示,在工件坐标系 $\{O\}$ 中,刀具单位方向矢量 w 由两个

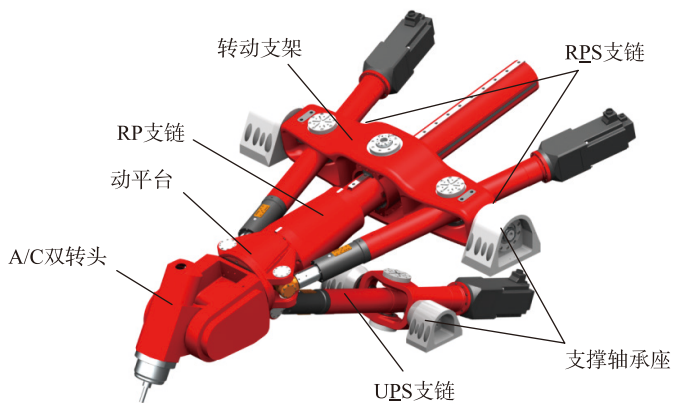


图1 TriMule混联机器人三维模型
Fig.1 3D model of TriMule hybrid robot

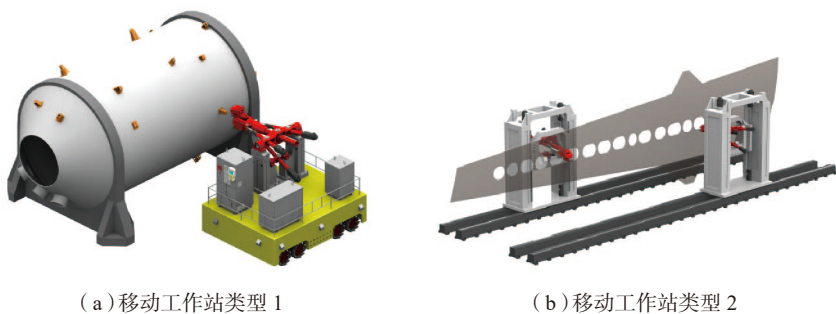


图2 TriMule混联机器人移动工作站
Fig.2 Mobile workstation of TriMule hybrid robot

姿态角 α, β 定义, 即:

$$w = \text{Rot}(y, \beta) \text{Rot}(x, \alpha) z \quad (1)$$

式中, $z = [0, 0, 1]^T$, 变换矩阵 $\text{Rot}(y, \beta)$ 表示绕 y 轴旋转 β 角, 可类似定义其他变换矩阵。坐标系 $\{C\}$ 相对于坐标系 $\{B\}$ 的姿态矩阵可表示成:

$$R = R_P R_C \quad (2)$$

式中, R_P 表示坐标系 $\{P\}$ 相对坐标系 $\{B\}$ 的变换矩阵, R_C 表示坐标系 $\{C\}$ 相对于坐标系 $\{P\}$ 的变换矩阵, 且

$$R_P = \text{Rot}(s_1, \psi) \text{Rot}(s_2, \theta) \quad (3)$$

$$R_C = \text{Rot}(s_4, \theta_4) \text{Rot}(s_5, \theta_5) \quad (4)$$

式(3)、(4)中的变量均在图3中有明确定义。在机床坐标系 $\{B\}$ 中, 分别针对 TriMule 机器人并联模块和 A/C 转头进行分析, 可建立各驱动关节值与刀具位姿之间的关系如下:

$$r_C = d_v v - d_w w + b_i + q_i s_{3,i} - a_i, i=1, 2, 3 \quad (5)$$

式中, (r_C, w) 表示刀尖点数据, 可通过 CAD/CAM 软件及对刀操作获取, d_v 和 d_w 分别表示点 P 在坐标系 $\{C\}$ 中关于 v 轴和 w 轴的绝对坐标值。单位矢量 v 定义如下:

$$v = w \times \frac{w \times n}{|w \times n|}, n = \frac{r_C}{|r_C|} \quad (6)$$

且 q_i 表示各支链杆长; 矢量 n 表示刀尖点在坐标系 $\{B\}$ 中的位置矢量;

a_i 和 b_i 分别表示点 A_i 和点 B_i 在坐标系 $\{B\}$ 中的位置矢量, 即

$$\begin{aligned} a_i &= R_P a_{i0} \\ a_{i0} &= [-a_i \cos \gamma_i \quad a_i \sin \gamma_i \quad l_4]^T \\ b_i &= [-b_i \cos \gamma_i \quad b_i \sin \gamma_i \quad 0]^T \end{aligned} \quad (7)$$

$$\gamma_i = \begin{cases} -\pi/2, & i=1 \\ 0, & i=2 \\ \pi, & i=3 \end{cases}$$

为求出各支链杆长, 针对并联模块建立如下关系:

$$r_P = b_i + q_i s_{3,i} - a_i, i=1, 2, 3 \quad (8)$$

$$r_P = (q_4 + e) s_3 \quad (9)$$

式(8)中, r_P 表示点 P 的位置矢量, 式(9)中, q_4 和 s_3 分别表示 RP 支链的杆长及单位矢量, 且 $e = \|AP\|$ 为常量。对式(8)两端取模, 可求出 q_4 、 s_3 和第 i 条支链的杆长及单位方向矢量:

$$q_i = \|r_P + a_i - b_i\|, i=1, 2, 3 \quad (10)$$

$$s_{i,3} = (r_P + a_i - b_i) / q_i, i=1, 2, 3 \quad (11)$$

结合式(4)和式(5)可求出 A/C 转头转角 θ_4, θ_5 , 至此, 建立了 TriMule 机器人位置逆解模型, 为后续参数曲线插补奠定基础。

参数曲线插补算法

实现混联机器人高速高精度加工, 避免驱动装置频繁加减速及防止机械装置共振, 关键在于生成一条机器人能够执行的平滑运动轨迹^[12]。给定待加工零件的三维模型, 选择合

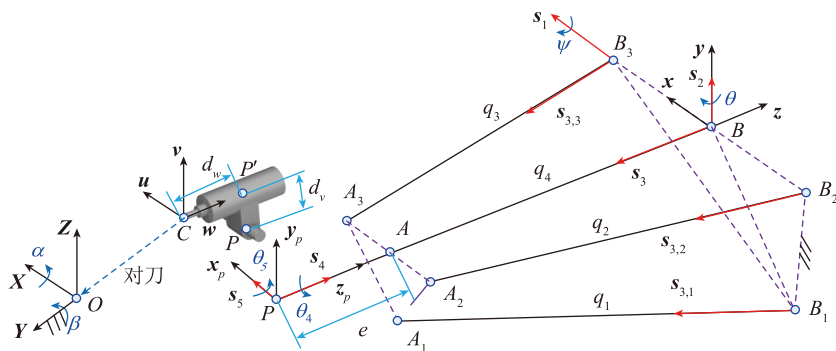
适的加工策略(端铣或侧铣), 考虑刀具干涉条件及加工误差限制, 可规划出一条合适的加工路径。当无法对加工面进行精确加工时, 可采取优化算法对加工路径进行优化, 如非可展直纹面的五轴侧铣加工^[13]。因此, 针对铣削加工用混联机器人的轨迹规划可从加工路径优化方法、进给率规划策略^[14]和插补方法3方面进行研究。本文主要考虑插补算法的影响, 参数曲线插补方法最初由 Bedi^[15]提出, 如今在 Siemens 840D 等先进控制系统中已实现。然而, 前人的研究主要集中于五轴数控机床等, 研究参数曲线插补方法在铣削加工用混联机器人上的应用是本文的主要创新点。

1 加工路径参数化

加工路径的参数化是实现参数曲线插补方法的首要步骤, 以五轴数控加工为例, 通常要采用两条甚至更多的参数曲线描述加工路径。本文采用双 B 样条曲线描述加工路径^[16], 其原理如图4所示。给定刀位数据 $p_i (i=1, 2, \dots, m)$ 及拟合误差阈值, 加工路径 Γ 可通过两条 B 样条曲线表示, $r(u)$ 描述刀尖点 C 的运动路径, $q(u)$ 描述刀轴上除刀尖点以外任一点 Q 的运动路径, 即:

$$\Gamma \rightarrow \begin{cases} r(u) = \sum_{i=0}^n d_{i,1} N_{i,k}(u) \\ q(u) = \sum_{i=0}^n d_{i,2} N_{i,k}(u) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $N_{i,k}(u) (i=0, 1, \dots, n)$ 为 B 样条基函数, $d_{i,1}$ 和 $d_{i,2}$ 分别表示 $r(u)$ 和



注: $\{B\}$ 为机床坐标系; $\{P\}$ 为动平台连体坐标系; $\{C\}$ 为刀具连体坐标系; $\{O\}$ 为工件坐标系。

图3 TriMule混联机器人坐标系简图

Fig.3 Coordinate system diagram of TriMule hybrid robot

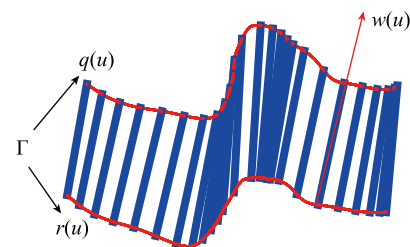


图4 双B样条参数化加工路径

Fig.4 Parametric machining path of double B-spline

$q(u)$ 的控制顶点, $r(u)$ 和 $q(u)$ 可采用 B 样条曲线插值或拟合的方法得到。记两点间的距离 $L=\|CQ\|$, 采用上述双 B 样条描述加工路径时, 会出现 $\|r(u)-q(u)\| \neq L$ 的情形, 为此本文作如下改进。

令 $\zeta_i=(\alpha_i, \beta_i)$, 式中 α_i 和 β_i 为描述刀位点数据 p_i 刀轴方向矢量的姿态角, 然后通过 B 样条拟合或插值可得到:

$$\Psi(u)=\sum_{i=0}^n \Psi_i N_{i,k}(u)=[\alpha(u), \beta(u)]^T \quad (13)$$

进而可通过下式描述点 Q 的运动路径:

$$q(u)=r(u)+L \cdot \text{Rot}(y, \beta(u)) \text{Rot}(x, \alpha(u))z \quad (14)$$

将式(14)代入式(12)即可实现加工路径参数化。

2 参数曲线插补原理

参数曲线插补就是基于进给率信息及伺服控制系统插补周期 T_s , 求解得到曲线参数序列 $\{u_0, u_1, \dots, u_n\}$, 代入参数路径 Γ 得到离散刀位点数据序列 $\{r(u_0), r(u_1), \dots, r(u_n)\}$ 和刀轴方向矢量序列 $\{w(u_0), w(u_1), \dots, w(u_n)\}$ 的过程^[17]。由于参数曲线弧长与参数之间不存在明确的解析关系, 参数曲线插补的核心在于求解插补点参数, 综合比较各种方法的求解效率和求解精度, 二阶 Taylor 展开法能获得较为理想的结果^[18]。

给定恒定刀具进给率 V , 将 $u(t)$ 在参数 $t=t_i$ 处进行二阶 Taylor 展开, 略去高阶项后可得到:

$$u_{i+1}=u_i+\frac{V}{\|\dot{r}(u_i)\|}T_s-\frac{1}{2}\frac{\ddot{r}(u_i) \cdot \dot{r}(u_i)}{\|\dot{r}(u_i)\|^4}V^2T_s^2 \quad (15)$$

式中, $\dot{r}(u_i)$ 和 $\ddot{r}(u_i)$ 分别为刀尖点位置曲线 $r(u)$ 关于曲线参数 u 在 $u=u_i$ 处的一阶导数和二阶导数。由于曲线示 $r(u)$ 和 $q(u)$ 在同一插补周期内曲线参数值相同, 故得到 u_{i+1} 后, 将其代入 $w(u)$ 表达式便可得到当前插补

周期内刀轴方向矢量 $w(u_{i+1})$ 。数控系统调用机器人位置逆解算法, 由插补点数据 $r(u_{i+1})$ 和 $w(u_{i+1})$ 计算出各关节坐标 $q_1(u_{i+1})$ 、 $q_2(u_{i+1})$ 、 $q_3(u_{i+1})$ 、 $\theta_4(u_{i+1})$ 和 $\theta_5(u_{i+1})$ 所对应的脉冲增量, 进而驱动各关节运动完成加工作业。

试验验证

1 加工流程

TriMule 机器人数控系统是基于 PMAC 多轴运动控制卡搭建的, 采用 PID 控制, 其中上位机中的人机交互界面由 LabVIEW 软件编写而成。将参数曲线插补方法应用于 TriMule 机器人, 流程如图 5 所示, 可分为离线预处理和在线实时处理两大模块。具体步骤如下:

(1) 在 CAD 软件中进行三维建模, 得到待加工零件模型, 并通过 CAM 软件规划加工路径, 得到通用的 APT 加工代码。

(2) 通过混联机器人特有的后置处理器得到机器人能够执行的代码, 即 NC 程序。TriMule 机器人能

识别由代码段 $\{X, Y, Z, A, B\}$ 构成的 NC 代码, 代码段中 X, Y, Z 表示刀尖点坐标, 角度 A, B 用来定义刀轴方向矢量的姿态角。

(3) 给定 NC 程序, 采用 B 样条插值或拟合的方法, 可得到参数路径曲线 Γ 。

(4) 调用参数曲线插补模块, 结合 S 曲线加减速策略, 通过自主开发的开放式数控系统驱动混联机器人各关节运动, 严格控制各轴跟随误差, 完成三维零件的加工。

在线实时处理模块主要涉及参数曲线插补在机器人控制器中的实现, 具体步骤如下: (1) 通过接口将 NC 程序上传给上位机软件, 在上位机软件中可完成加工路径参数化及插补点参数实时求解。(2) 给定刀位点及进给率信息, 上位机软件通过 PCOM32 动态链接库实时发送 PVT 命令给 PMAC 控制卡, 注意 PVT 命令可给定任意插补周期内刀尖点的位置和速度。(3) PMAC 控制卡调用运动学逆解算法, 得到各驱动关节脉冲数, 通过

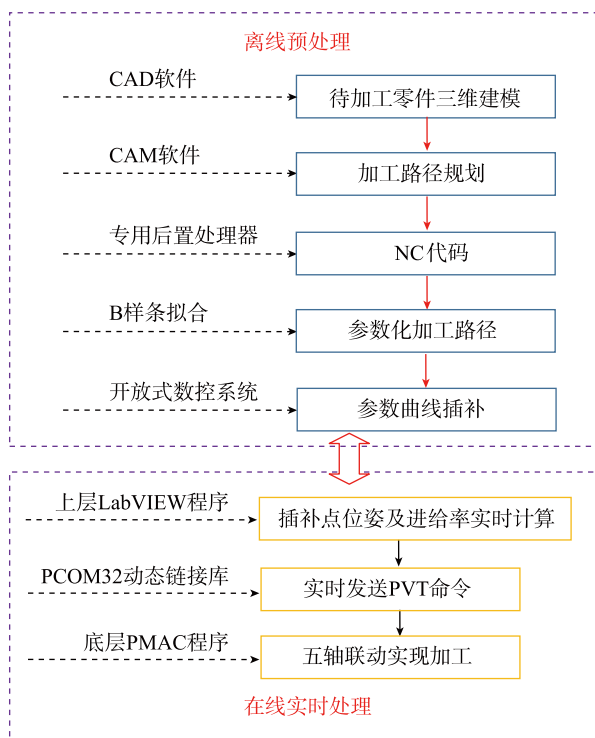


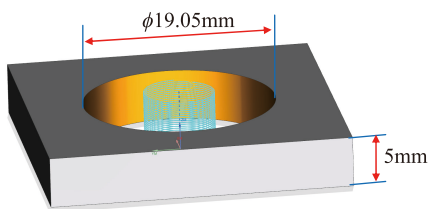
图5 加工流程图
Fig.5 Flow chart of milling operation

五轴联动实现参数曲线插补。

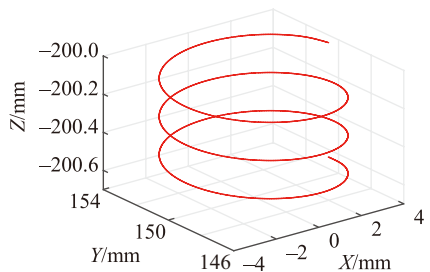
2 螺旋铣孔试验

装配孔是大型航空产品实现装配的基本元素之一,直接影响到航空产品的性能,随着新材料和新结构的大量使用,基于复合材料及钛合金的螺旋铣孔工艺在航空制造领域得到广泛应用^[19]。本文以 TriMule 机器人加工平台,采用参数曲线插补方法及螺旋铣孔工艺在钛合金板材上进行铣孔试验。试验所采用的钛合金板材为宝泰股份有限公司生产的钛合金(Ti-6Al-4V),牌号为 TC4;试验所采用的刀具为自行研制的叠层构件螺旋铣孔专用大直径刀具,刀具主要结构参数:直径 12mm,刃数为 4,螺旋角 38°,前角 8°,后角 15°。试验内容为在钛合金板上加工多个孔径为 19.05mm 的通孔,钛合金板材尺寸为 120mm×250mm×5mm,优化生成的钛合金螺旋铣孔工艺参数:主轴转速 2000mm/min,切向每齿进给 0.04 mm,螺距 0.20 mm。

图 6(a)为通过 UG 软件生成的螺旋铣孔加工路径,图 6(b)为仿真分析所用路径,参数化该路径可得



(a) UG 软件生成的螺旋铣孔路径



(b) 仿真所用加工路径

图6 螺旋铣孔加工路径

Fig.6 Machining path for helical milling holes

到参数路径曲线 $\Gamma(u)$,如图 7 所示,图 7 中红圈表示 B 样条控制顶点,蓝线为 B 样条曲线 $r(u)$,在该试验中刀轴方向矢量保持不变。与传统直线圆弧插补相比,参数曲线插补的优势在于能有效减少进给率波动幅度,进而改善加工质量。通常,实际进给率可按下式定义^[20]:

$$V_r = ds/dt = \|r'(u)\| \cdot (d\tilde{u}/ds_d) \cdot V \quad (16)$$

式中, s 表示实际曲线弧长, V_r 表示实际进给率, V 代表指令进给率。当 $\|r'(u)\| \cdot (d\tilde{u}/ds_d) \neq 1$ 时,进给率出现波动,其中进给率波动幅度 η 定义如下:

$$\eta = \frac{|V_r - V|}{V} \times 100\% \quad (17)$$

在 PMAC 运动控制卡中将伺服插补周期设为 $T_s=3ms$,通过 MATLAB 软件仿真得到的进给率波动曲线如图 8 所示,波动幅值为 0.005%。

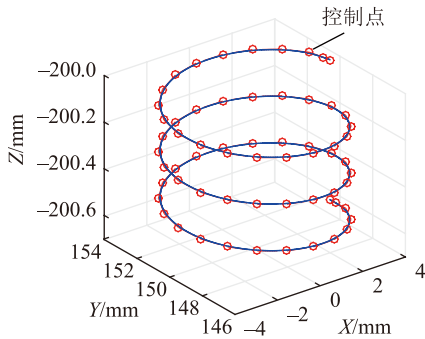


图7 B样条曲线插值结果

Fig.7 Results of B-spline interpolation

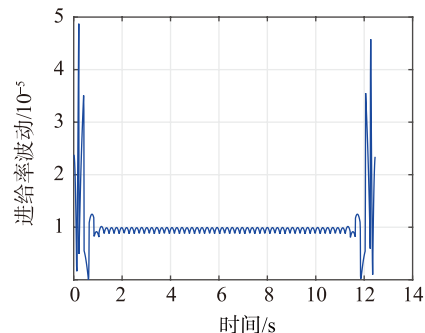


图8 参数曲线插补进给率波动仿真

Fig.8 Simulation of feedrate fluctuation of parametric interpolation

本试验所用 TriMule 混联机器人螺旋铣孔试验平台如图 9 所示,该平台包含数控系统、机器人本体、振动监测系统等。本文对圆弧直线插补对比试验不作介绍,仅给出对比结果。通过 PMAC 运动控制卡进行实时数据采集,可得到混联机器人实际与理论关节位置、速度、加速度曲线如图 10~12 所示,相对于传统直线圆弧插补,各轴速度及加速度波动幅值均有明显降低。进而可知,采用参数曲线插补方法能有效减少各驱动关节跟随误差,限制各速度及加速度波动,避免机械结构共振。此外,加工过程中的实际进给率直接影响零件最终加工质量,本文结合各驱动关节实际速度和 TriMule 机器人 Jacobian 矩阵,通过如下公式计算实际进给率:

$$V_r = \|J\dot{q}\| \quad (18)$$

式中, J 表示 TriMule 机器人 Jacobian 矩阵, \dot{q} 表示各驱动关节速度。图 13 表示实际进给率曲线,其中进给率波动幅值为 0.012%,与直线圆弧插补 0.022% 相比,限制效果明显。图 14 为钛合金板螺旋铣孔试验加工结果,在钛合金板材上共加工 18 个通孔。采用三坐标测量机对其中 5 个加工孔孔径进行测量,测量数据见表 1,各孔孔径误差变化趋势如图 15 所示,试验结果表明孔的加工精度能达到 H8。为进一步提高加

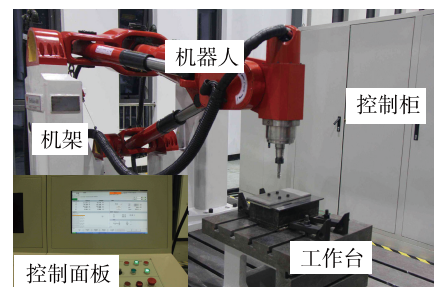


图9 TriMule混联机器人加工平台

Fig.9 Experiment platform of TriMule hybrid robot

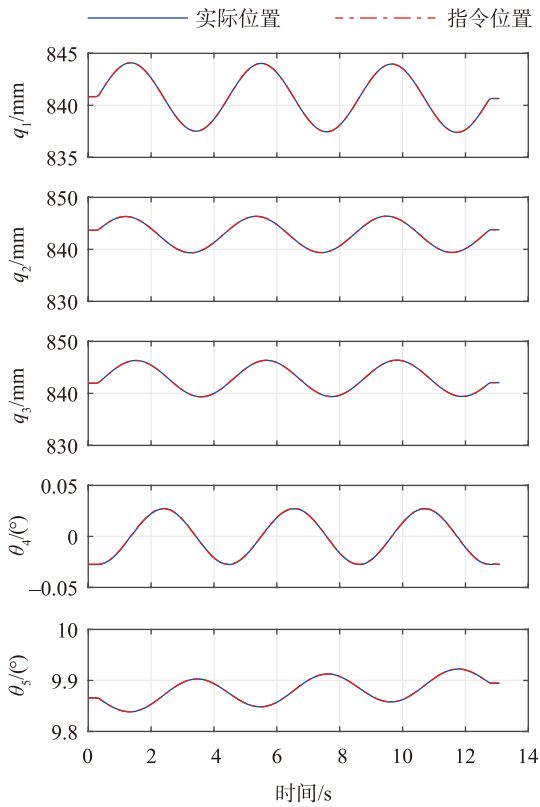


图10 驱动关节指令位置与实际位置对比曲线

Fig.10 Comparison of the command and actual position of actuated joints

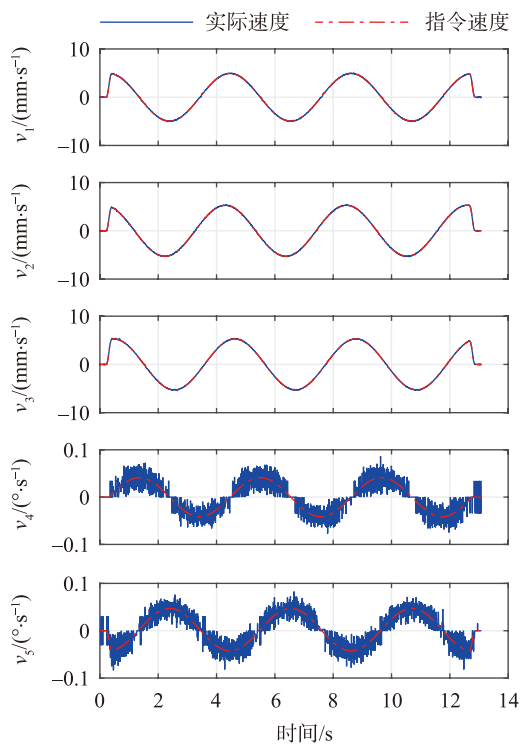


图11 驱动关节指令速度与实际速度对比曲线

Fig.11 Comparison of the command and actual velocity of actuated joints

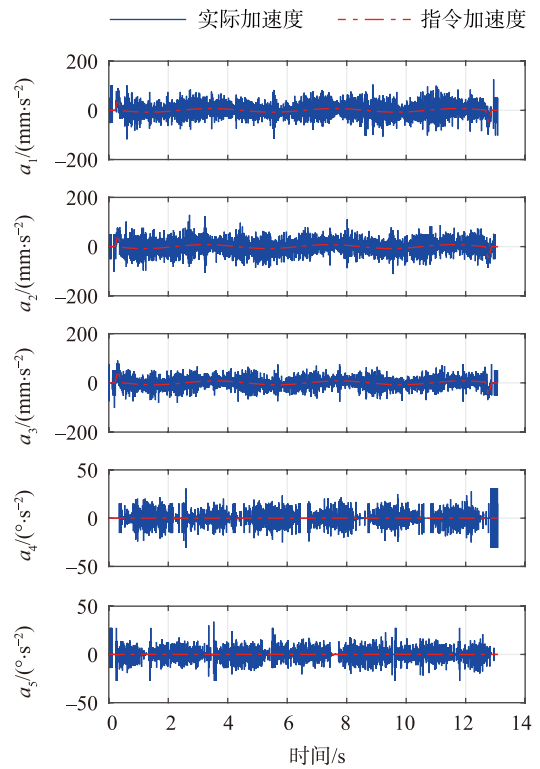


图12 驱动关节指令加速度与实际加速度对比曲线

Fig.12 Comparison of the command and actual acceleration of actuated joints

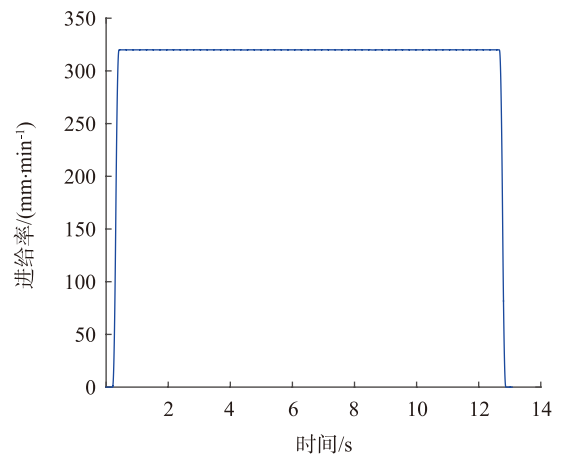


图13 实际进给率曲线

Fig.13 Actual feedrate curve of the process of helical milling holes

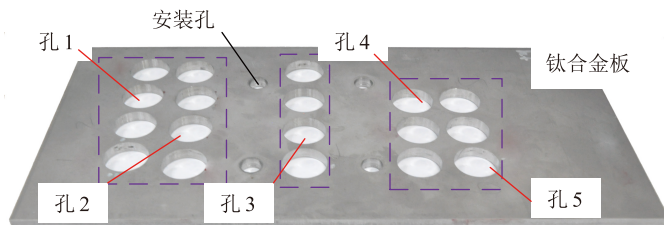


图14 螺旋铣孔试验结果

Fig.14 Experiment results of the helical milling holes

表1 混联机器人螺旋铣孔孔径误差 mm

孔深	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	孔 5
1	0.024	0.025	0.007	0.010	0.019
2	0.027	0.027	0.019	0.016	0.016
3	0.029	0.026	0.018	0.009	0.021
4	0.026	0.024	0.014	0.010	0.021
5	0.027	0.022	0.005	0.008	0.020

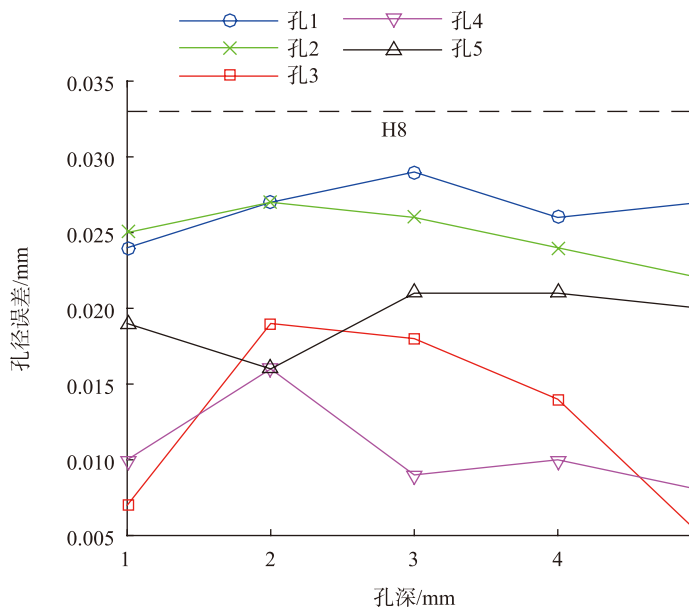


图15 孔径误差随孔深变化曲线

Fig.15 Variations of the aperture errors versus different hole depths

工精度,在航空制造领域取得广泛应用,可采用成熟的商用控制系统,应用更先进的控制策略。

结论

本文以一种新型铣削加工用混联机器人作为对象,应用参数曲线插补方法,并开展钛合金螺旋铣孔试验,结论如下:

(1) TriMule 混联机器人运动学简单且具有模块化程度高、可重构能力强等优点,可针对不同应用需求搭建出不同形式的制造单元和制造系

统,适用于航空制造领域。

(2) 采用参数曲线插补策略,可将实际进给率波动幅度控制在0.012%以内,保证机器人的平稳运行。钛合金螺旋铣孔试验结果表明,孔的加工精度能够达到H8精度等级,验证了参数曲线插补方法能有效应用于混联机器人。

(3) 加工过程中,因受到加减速策略及伺服控制系统动态特性的影响,机器人各驱动关节的实际速度、加速度均出现小幅波动,后续工作将着重研究混联机器人伺服控制策略,

进一步改善加工质量。

参考文献

[1] 郭恩明. 我国航空制造技术的现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2002, 45(1): 27-29.

GUO Enming. Present status and development trends of aeronautical manufacturing technology in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 45(1): 27-29.

[2] 宋智勇, 祝晓军. 飞机结构件数控加工机床发展方向及国产化[J]. 航空制造技术, 2013, 56(17): 40-43.

SONG Zhiyong, ZHU Xiaojun. Development direction and localization of NC machine tool for machining aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(17): 40-43.

[3] 毕树生, 宗光华, 梁杰, 等. 机器人技术与航空制造业[J]. 机器人技术与应用, 2009(3): 25-31.

BI Shusheng, ZONG Guanghua, LIANG Jie. Robotics and aviation manufacturing[J]. Robot Technology and Application, 2009(3): 25-31.

[4] 冯华山, 秦现生, 王润孝. 航空航天制造领域工业机器人发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(19): 32-37.

FENG Huashan, QIN Xiansheng, WANG Runxiao. Developing trend of industrial robot in aerospace manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(19): 32-37.

[5] URIARTE L, ZATARAIN M, AXINTE D, et al. Machine tools for large part[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 731-750.

[6] NEUMANN K E. Tricept application[C]// Proceedings-3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Zwickau, 2002.

[7] NEUMANN K E. The key to aerospace automation[C]// Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference and Exhibition. Detroit, 2006.

[8] YE H S S, HSU P L. The speed-controlled interpolator for machining parametric curves[J]. Comput-Aided Des, 1999, 31(5): 349-357.

- [9] CHENG M Y, TSAI M C, KUO J C. Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(7): 801–813.
- [10] LIU M, HUANG Y, YIN L, et al. Development and implementation of a NURBS interpolator with smooth feedrate scheduling for CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 87: 1–15.
- [11] DONG C, LIU H, YUE W, et al. Stiffness modeling and analysis of a novel 5-DOF hybrid robot[J]. Mechanism & Machine Theory, 2018, 125: 80–93.
- [12] LIU H, LAI X, WU W. Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning for robot manipulators with kinematic constraints[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2013, 29(2): 309–317.
- [13] CHU C H, HSIEH H T, LEE C H, et al. Spline-constrained tool-path planning in five-axis flank machining of ruled surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9–12): 2097–2104.
- [14] SUN Y, ZHAO Y, XU J, et al. The feedrate scheduling of parametric interpolator with geometry, process and drive constraints for multi-axis CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 85(5): 49–57.
- [15] BEDI S. Advanced interpolation techniques for NC machines[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1993, 115(3): 329.
- [16] LANGERON J M, DUC E, LARTIGUE C, et al. A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(12): 1219–1229.
- [17] 孙玉文. 复杂曲面高性能多轴精密加工技术与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- SUN Yuwen. High-performance multi-axis machining technology and method of complex surface[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [18] YANG D C H, KONG T. Parametric interpolator versus, linear interpolator for precision CNC machining[J]. Computer Aided Design, 1994, 26(3): 225–234.
- [19] 秦旭达, 陈仕茂, 刘伟成, 等. 螺旋铣孔技术在航空制造装配业中的发展应用 [J]. 航空制造技术, 2009, 52(6): 58–60.
- QIN Xuda, CHEN Shimao, LIU Weicheng, et al. Development and application of hole helical milling technology in aviation manufacturing assembly industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(6): 58–60.
- [20] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. Quintic spline interpolation with minimal feed fluctuation[J]. Transactions of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(2): 339–349.

通讯作者: 刘海涛, 博士、教授, 研究方向为制造装备与系统、机器人学, E-mail: liuht@tju.edu.cn.

Parameter Interpolation of Hybrid Robot for Milling Operation

LI Guangxi¹, LIU Haitao¹, XU Qingshan², XIAO Juliang¹, QIN Xuda¹

(1. Key Laboratory of Mechanisms Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] The traditional manufacturing equipment is hard to meet the demand of high-speed, high-precision and high-flexible machining, Research and development of high-performance processing equipment is imperative. In order to achieve the goal of high-speed and high-precision machining, a 5-axis hybrid robot for milling operation is proposed. A brief introduction of the robot and its kinematic analysis are presented. To improve the machining accuracy, the principle of parametric curve interpolation and its application in the hybrid robot are studied. Finally, taking the helical milling of holes as an example, the experiment of milling holes on titanium alloy is carried out. Simulation and experimental results show that the parametric curve interpolation method can effectively limit the feedrate fluctuation and improve the machining accuracy. In the end, it is pointed out that the hybrid robot has the characteristics of high-rigidity, high-speed, high-precision and high-flexibility, and it has broad application prospects in the aviation manufacturing industry.

Keywords: Hybrid robot; Machining operation; Parametric interpolator; B-spline; Helical milling

(责编 铃兰)