

DOI: 10.3901/JME.2022.14.035

# 机器人铣削加工误差视觉跟踪测量与补偿研究\*

邸红采<sup>1</sup> 彭芳瑜<sup>1,2</sup> 唐小卫<sup>1</sup> 闫蓉<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074;

2. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

**摘要:** 机器人铣削加工是大型复杂构件的重要加工手段,然而由于机器人本体结构特点及零部件制造、安装等误差,使其在大行程运动过程中轨迹绝对精度较低,严重制约机器人铣削加工的应用工况。现有机器人精度的传感测量控制方法主要集中在基于视觉的定位误差预测和激光跟踪仪的轨迹误差测量等,前者难以考虑铣削轨迹误差,后者操作复杂且设备极其昂贵。为此,提出一种利用双目视觉系统跟踪测量的机器人铣削加工刀具端位置误差计算和加工误差补偿方法,实现机器人铣削加工误差的高效准确预测和补偿。其中通过训练粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)优化的BP神经网络建立了位姿相关的机器人加工刀具TCP位置误差预测模型,基于弦截法建立了位置误差迭代模型,制定了轨迹误差的综合补偿策略。试验结果表明机器人铣削加工最大切深误差从1.354 mm降低到0.244 mm,为机器人铣削加工工况扩展提供了理论和技术基础。

**关键词:** 机器人铣削; 视觉跟踪测量; 加工误差; 综合补偿; BP神经网络

**中图分类号:** TH16

## Research on Vision Tracking Measurement and Compensation of Robot Milling Error

DI Hongcai<sup>1</sup> PENG Fangyu<sup>1,2</sup> TANG Xiaowei<sup>1</sup> YAN Rong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

2. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract:** Robot milling is an important method of large complex curved surface processing, however, because of the industrial robot structure and components manufacturing, installation error, the absolute accuracy of its trajectory is low in the process of large stroke movement, significantly restrict the application conditions range of milling. The current sensing and control methods of robot precision mainly focus on the prediction of positioning error based on vision and the measurement of trajectory error based on laser tracker, the former is difficult to account for milling track errors, while the latter is operation complex and extremely expensive. Thus, a method of tool end position error calculation and machining error compensation in robotic milling is proposed, and the precision prediction and compensation of robot milling errors are realized. By training the BP neural network optimized by particle swarm optimization (PSO), the position error prediction model of robot machining tool TCP is established, the position error iteration model is established based on the truncation method, and the comprehensive compensation strategy of trajectory error is formulated. The experimental results show that the maximum cutting error of robotic milling is reduced from 1.354 mm to 0.244 mm, which provides a theoretical and technical basis for the extension of robotic milling conditions.

**Key words:** robot milling; vision tracking measurement; machining error; comprehensive compensation; BP neural network

## 0 前言

航空航天领域的大型复杂零部件具有多品种小

批量的生产特点,目前以传统机床与人工打磨为主的加工方式难以满足制造柔性化程度高,周期短等需求<sup>[1]</sup>。工业机器人由于其工作空间大,可集成视觉、力觉等传感形成智能化柔性加工,成为多品种小批量复杂零件加工的重要手段<sup>[2-4]</sup>。然而机器人由于本体结构、参数标定、安装及加工受力等影响,

\* 国家自然科学基金资助项目(51625502, 51805189, U20A20294)。  
20210607 收到初稿, 20211215 收到修改稿

致使其铣削轨迹中末端绝对位置精度较低<sup>[5-7]</sup>, 达到毫米级<sup>[8]</sup>, 使得机器人铣削加工只能用于精度要求不高的特征和工序, 制约了其大范围应用。在毫米级的误差中, 受力所产生的刚度变形误差仅为 0.1 mm 量级<sup>[9-10]</sup>, 因此机器人加工中轨迹绝对误差主要产生于本体结构和参数标定等因素, 这部分误差来源复杂且具有累计效应, 难以从理论上进行精确建模, 因此通常采用直接测量手段进行研究。

近年来, 针对机器人加工的精度控制问题, 国内外学者在基于传感设备的误差测量与补偿方面进行了诸多研究, 体现出了较好的测量精度与补偿效果。2014 年, 李睿等<sup>[11]</sup>利用红外相机组合式的在线测量系统, 对大型球面复杂孔系制造过程中机器人末端轨迹进行测量, 通过误差反馈补偿提高了机器人实时定位精度。2017 年, GHARAATY 等<sup>[12]</sup>采用 6D 双目视觉测量系统, 实时跟踪 Fanuc M20 - iA 机器人末端位姿误差, 进行在线校准, 使得机器人位置、姿态精度均得到有效提高。2017 年, 史晓佳等<sup>[13]</sup>实现对 KUKA 工业机器人在线闭环补偿, 使用激光跟踪仪测量机器人位姿误差, 通过机器人传感器接口进行位姿误差的实时反馈, 补偿后机器人绝对定位误差由 0.628 mm 降至 0.087 mm。2019 年, WANG 等<sup>[14]</sup>针对大型薄壁零件高速加工中的工件变形问题, 搭建了铣削变形误差补偿系统, 通过激光位移传感器实时测量工件位置误差, 实现了误差迭代计算与在线补偿。

在上述误差测量研究中, 通常采用激光跟踪仪等设备, 此类光学仪器成本高、操作复杂且难以与机器人进行加工系统集成。此外, 搭建的视觉测量平台, 多对机器人定位误差进行测量与补偿, 未考虑轨迹误差。对于大型复杂结构件的铣削加工而言, 轨迹误差是影响加工质量的重要因素, 且机器人加工过程中位姿变化范围大, 对变姿态加工轨迹误差提出了测量和补偿要求。本文通过配置编码标志点, 实现了一种基于双目视觉系统跟踪测量的机器人加工系统刀具端位置误差计算方法, 提出了误差预测模型与数值迭代算法相结合的综合补偿策略, 显著提高大型复杂构件铣削加工的轨迹精度, 提高加工质量, 拓展了机器人铣削加工应用范围。

## 1 刀具 TCP 位置误差双目视觉测量

理论上刀具 TCP 的位置和刀轴矢量的误差均会对切削深度误差产生影响, 然而课题组前期的研究中已证明相对于位置误差的影响量级, 刀轴矢量

的误差影响可以忽略<sup>[9]</sup>。本节通过双目视觉方法实现对机器人铣削加工轨迹中刀具端位置误差的测量, 在测量方案中, 使用 PowerVision1500D 双目视觉仪器, 其内置动态跟踪系统, 能够对编码标志点进行跟踪识别, 编码标志点如图 1 所示。PowerVision1500D 空间示值误差为 0.071 5 mm, 空间重复误差为 0.072 1 mm。



图 1 编码标志点示意图

在机器人铣削加工平台中, 编码标志点的具体配置方式如图 2 所示, 机器人基坐标系{B}建立于机器人底部, 与世界坐标系重合, 刀具坐标系{T}建立在刀具 TCP 上, 随机器人移动变换位姿。

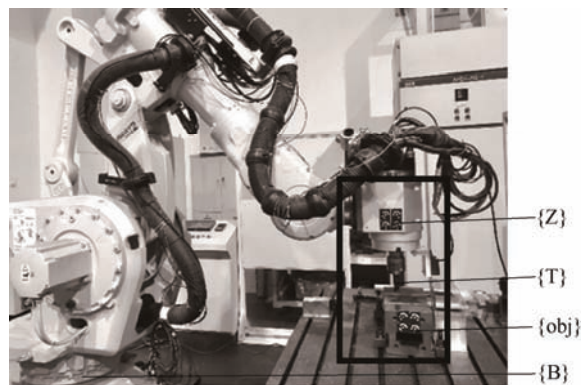


图 2 编码标志点配置方式

将一组编码标志点配置在固定工件的夹具上(作为基准使用), 用以构建工件坐标系{obj}, 另一组配置在机器人主轴上, 构建主轴坐标系{Z}。双目视觉仪器放置于机器人工作台外, 如图 3 所示, 通过跟踪图 2 中的 8 个编码标志点, 获得主轴坐标系{Z}相对工件坐标系{obj}的位姿转换矩阵 ${}^{obj}_Z T$ 。

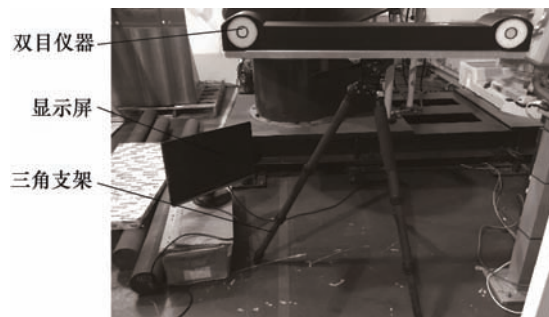


图 3 PowerVision1500D 双目视觉仪器

由于机器人刀具-主轴部件刚度很大,可以近似为刚体,将两者视为刚性连接。刀具坐标系{T}与主轴坐标系{Z}之间的固定位姿关系可提前标定得到。在此基础上,根据双目视觉系统跟踪测量得到的位姿转换矩阵,可实现刀具坐标系{T}与工件坐标系{obj}位姿关系的实时计算,表达式如式(1)所示

$${}_{\text{T}}^{\text{obj}}\mathbf{T} = {}_{\text{Z}}^{\text{obj}}\mathbf{T} {}_{\text{T}}^{\text{Z}}\mathbf{T} \quad (1)$$

式中,  ${}_{\text{T}}^{\text{obj}}\mathbf{T}$  表示刀具坐标系{T}相对于工件坐标系{obj}的位姿关系,  ${}_{\text{T}}^{\text{obj}}\mathbf{T}$  表示机器人主轴坐标系{Z}相对于工件坐标系{obj}的位姿关系,  ${}_{\text{T}}^{\text{Z}}\mathbf{T}$  表示刀具坐标系{T}相对于主轴坐标系{Z}的位姿关系。

机器人加工系统刀具 TCP 在工件坐标系{obj}与刀具坐标系{T}下的齐次坐标分别表示为  ${}^{\text{obj}}\mathbf{T}_{\text{T}}$  与  $\mathbf{P}_{\text{T}}$ 。因此,刀具 TCP 在工件坐标系{obj}下的实际坐标  ${}^{\text{obj}}\mathbf{P}_{\text{T}}$  可通过式(2)进行计算

$${}^{\text{obj}}\mathbf{P}_{\text{T}} = {}^{\text{obj}}\mathbf{T}_{\text{T}} \mathbf{P}_{\text{T}} \quad (2)$$

由此实现机器人铣削过程中刀具 TCP 在工件坐标系{obj}下实际位置的跟踪测量。

ABB 工业机器人具有自身编程语言,即 RAPID 语言,机器人铣削加工的刀路程序均用该语言实现,工业机器人铣削加工是机器人根据 RAPID 代码指令控制刀具 TCP 的移动。RAPID 指令中刀具 TCP 的运动路径是相对编程坐标系原点的位移,选择基坐标系{B}作为编程坐标系,即机器人控制器中刀具 TCP 的理论位置是在基坐标系{B}下描述的,故需要将刀具 TCP 在工件坐标系{obj}下的实际位置转换到基坐标系{B}姿态下,进而能够与机器人控制器中的刀具 TCP 理论位置进行对比,实现刀具 TCP 运动轨迹中位置误差的计算。

刀具 TCP 在工件坐标系{obj}下的位置表示为  ${}^{\text{obj}}\mathbf{P}_{\text{T}} = (x_{\text{T}}, y_{\text{T}}, z_{\text{T}})_{\text{T}}$ 。为便于描述其在基坐标系姿态下的位置,在此建立一个新坐标系{obj-B},与工件坐标系{obj}处于同一位置,并与基坐标系{B}具有相同的方向,如图 4 所示。

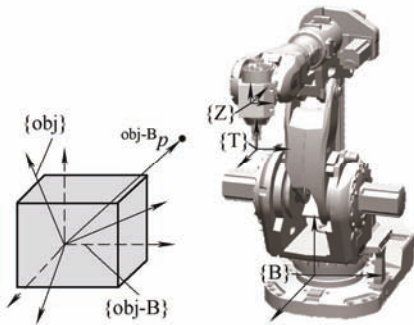


图 4 坐标系建立示意图

在坐标系{obj-B}中刀具 TCP 位置  ${}^{\text{obj-B}}\mathbf{P}$  按下式进行计算

$${}^{\text{obj-B}}\mathbf{P} = {}_{\text{T}}^{\text{B}}\mathbf{R} {}_{\text{obj}}^{\text{T}}\mathbf{R} {}^{\text{obj}}\mathbf{P}_{\text{T}} \quad (3)$$

式中,  ${}_{\text{T}}^{\text{B}}\mathbf{R}$  表示刀具坐标系{T}相对于基坐标系{B}的旋转矩阵,  ${}_{\text{obj}}^{\text{T}}\mathbf{R}$  表示工件坐标系{obj}相对于刀具坐标系{T}的旋转矩阵,通过下式进行计算

$${}_{\text{obj}}^{\text{T}}\mathbf{R} = \left( {}_{\text{T}}^{\text{Z}}\mathbf{P} \right)_{\text{obj}}^{-1\text{Z}} \mathbf{R} \quad (4)$$

式中,  ${}_{\text{obj}}^{\text{Z}}\mathbf{R}$  表示工件坐标系{obj}相对于主轴坐标系{Z}的旋转矩阵。

将机器人 RAPID 代码指令中的加工路径起点,即进刀点,设置为参考点,如图 5 所示。

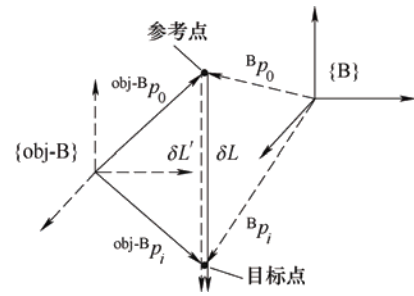


图 5 机器人位置误差测量方案

分别记录参考点  $p_0$  在坐标系{B}与坐标系{obj-B}下的位置向量  ${}^{\text{B}}\mathbf{p}_0$  与  ${}^{\text{obj-B}}\mathbf{p}_0$ 。在铣削加工过程中,通过双目视觉系统测量与计算当前刀具 TCP 位置,即目标点,在坐标系{obj-B}下的实际位置  ${}^{\text{obj-B}}\mathbf{p}_i$ ,并根据机器人位姿数据得到目标点在基坐标系{B}下的理论位置  ${}^{\text{B}}\mathbf{p}_i$ ,进而计算出目标点相对于参考点的实际位移  $\delta\mathbf{L}'$  与理论位移  $\delta\mathbf{L}$ ,如下式

$$\begin{cases} \delta\mathbf{L}' = {}^{\text{obj-B}}\mathbf{p}_i - {}^{\text{obj-B}}\mathbf{p}_0 \\ \delta\mathbf{L} = {}^{\text{B}}\mathbf{p}_i - {}^{\text{B}}\mathbf{p}_0 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)中的实际位移  $\delta\mathbf{L}'$  与理论位移  $\delta\mathbf{L}$ ,机器人加工系统刀具 TCP 位置误差  $\mathbf{e}$  通过下式进行计算。

$$\mathbf{e} = \delta\mathbf{L} - \delta\mathbf{L}' \quad (6)$$

## 2 刀具 TCP 位置误差预测模型建立

机器人在加工空间中位姿连续,通过视觉测量手段难以获得加工空间中铣削轨迹任意一点的位置误差,为了提前规划机器人铣削加工误差补偿策略,需对铣削轨迹上各目标点的位置误差进行预测。神经网络模型通过学习样本的训练,可以拟合复杂非线性关系之间的内在规律<sup>[15]</sup>,在此通过 BP 神经网络



络模型模拟机器人位姿与其铣削轨迹中刀具 TCP 位置误差之间的映射关系。

设置 BP 神经网络模型的输入层包含 9 个神经元, 分别为机器人关节角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_5$ 、 $\theta_6$ , 目标点相对参考点的三向理论位移  $x$ 、 $y$ 、 $z$ , 即模型输入参数为九维向量。输出层包含三个神经元, 为目标点的三向位置误差  $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_z$ , 模型输出参数为三维向量。并设置隐含层数为 2 个, 模型结构建立如图 6 所示。

在确定了双隐含层结构后, 根据经验公式初步计算隐含层神经元数目

$$c = \sqrt{m+n} + a = 4.5 \sim 13.5 \quad (7)$$

式中,  $m$  为输入层神经元个数,  $n$  为输出层神经元个数,  $a$  为自然整数 1~10。

根据计算结果, 初步选取隐含层神经元个数为 5、7、9、11、13、15, 然后使用交叉验证法<sup>[16]</sup>对不同隐含层神经元个数的网络模型进行适用性与稳定性测试, 以构建模型结构的最优参数。

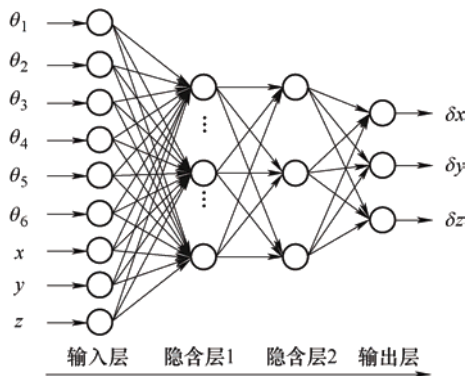


图 6 BP 神经网络模型结构

搭建机器人铣削加工双目视觉测量平台, 如图 7 所示, 进行模型训练样本的采集。其中, 通过交换机实现双目视觉仪器、机器人与上位机的同时通讯, PC 上位机软件负责刀具 TCP 位置误差算法的运算。最终获得了 714 组样本数据。



图 7 机器人铣削加工双目视觉测量平台

对于 6 种不同隐含层神经元数目的网络模型, 将交叉验证过程中模型预测误差的平均值 AE、均方误差 MSE、最大误差、超过阈值误差的比例以及超过阈值误差的平均值作为依据, 评价模型的优劣。已知 ABB IRB6660 机器人的重复定位精度为 0.07~0.11 mm, 故设置模型预测误差的阈值为 0.11 mm。认为当预测误差超过 0.11 mm 时, 基于神经网络模型来制定补偿策略, 工件加工精度将受到影响。交叉验证结果如表 1 所示。

表 1 交叉验证结果

隐含层 神经元 数目	平均值 AE/mm	均方误差 MSE/mm	最大误差/mm	超阈值误差比例 (%)	平均超 阈值误差/mm
5	0.074 7	0.099 4	-0.463	30.3	0.21
7	0.051 6	0.069 2	0.360	11.9	0.197
9	0.042 0	0.058 2	0.333	6.9	0.202
11	0.035 4	0.050 3	0.331	4.7	0.199
13	0.029 7	0.043 2	0.255	3.9	0.181
15	0.030 2	0.046 5	-0.363	5	0.208

结果显示, 随着网络隐含层神经元数目的增多, 各项指标均呈现出先减小后增加的趋势, 表明网络模型的预测精度先增强后减弱, 这种变化趋势与隐含层神经元个数密切相关。根据表 1 结果, 选择两个隐含层的神经元数目为 13。

在确定了 BP 神经网络模型具体结构后, 通过 PSO 对预测模型的初始权、阈值进行优化, 理论上能够避免 BP 神经网络训练中易陷入局部最小值的缺点。其中, 将误差预测模型各神经元之间所有权、阈值的数量(共 354 个)作为粒子搜索空间的位置矢量维数、将模型预测结果的均方误差 MSE 作为粒子的适应度函数, 最终完成基于 PSO 优化的机器人铣削运动中刀具 TCP 位置误差预测模型的建立。

在机器人测量空间中随机选取一条运动轨迹, 提取 8 个测试点, 通过双目视觉测量方法采集测试点处刀具 TCP 位置误差, 对 PSO 优化的刀具 TCP 位置误差预测模型的输出精度进行测试。通过计算, 模型预测误差如图 8 所示。对于此 8 个测试点, 模型的各项平均预测误差如表 2 所示。

表 2 误差预测模型平均预测误差

方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
平均预测误差/mm	0.026	0.014	0.027

结果可见, 模型预测误差比模型输出值小几个数量级。因此, 建立的机器人铣削运动中刀具 TCP 位置误差预测模型满足预测精度需求。

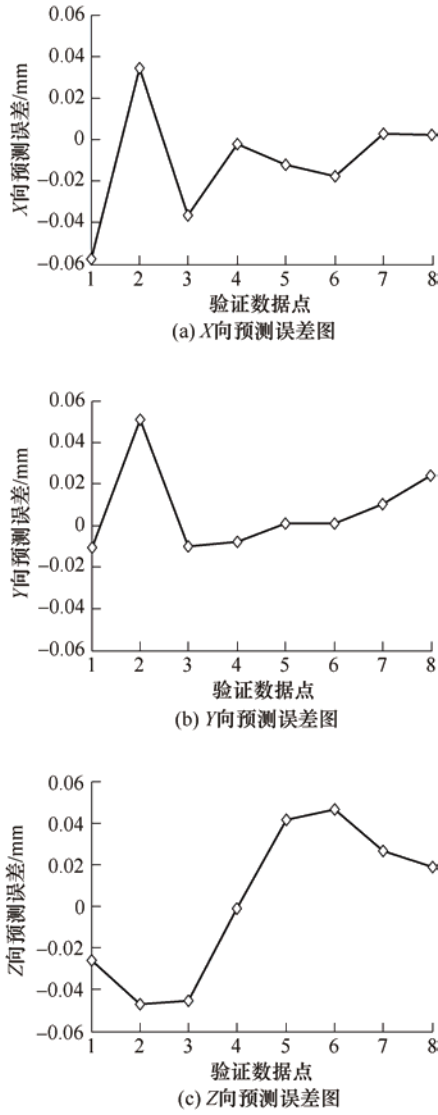


图 8 PSO 优化的位置误差预测模型预测结果

### 3 机器人铣削加工综合误差补偿方法

#### 3.1 基于弦截法的加工误差迭代补偿模型

在铣削加工中，由于多类误差源影响，使得机器人加工系统刀具 TCP 在铣削过程中实际位置产生偏移  $e(a)$ ，进而导致工件的加工误差，为此需要以加工误差控制为目标进行刀具 TCP 位置误差补偿。大型构件由于干涉区较少，通常可采用三轴加工，因此本文仅对机器人三轴加工误差补偿进行研究。三轴加工中刀具轴向误差是影响工件切削深度的主要因素，需要不断对程序中设置的轴向切削深度  $a$  进行调整，直到实际轴向切深  $a - e(a)$  满足加工所期望的切深  $a_p$ ，即

$$a - e(a) = a_p \quad (8)$$

根据式(8)，构造关于变量  $a$  (设置切深值)的非

线性方程，如下所示

$$f(a) = a - e(a) - a_p = 0 \quad (9)$$

可知方程式(9)的解  $a$ ，即为满足加工要求时需要设置的轴向切削深度。

弦截法在迭代数值求根过程中，具有较高阶的收敛速度。基于弦截法，轴向切深  $a$  调整的迭代公式为

$$a_{i+1} = a_i - f(a_i) \frac{a_i - a_{i-1}}{f(a_i) - f(a_{i-1})} \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)得到轴向切深  $a$  的迭代函数为

$$a_{i+1} = a_i - \left( a_i - e(a_i) - a_p \right) \times \frac{a_i - a_{i-1}}{a_i - a_{i-1} - e(a_i) + e(a_{i-1})} \quad (11)$$

在迭代前，需要先给出迭代初值  $a_0$ 、 $a_1$  的值。

可知

$$\begin{cases} a_0 = a_p \\ a_1 = a_p + e(a_0) \end{cases} \quad (12)$$

故轴向切削深度迭代模型最终可以表示为

$$\begin{cases} a_1 = a_p + e(a_0) \\ a_{i+1} = a_i - \left( a_i - e(a_i) - a_p \right) \times \frac{a_i - a_{i-1}}{a_i - a_{i-1} - e(a_i) + e(a_{i-1})} \quad i = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (13)$$

已知，轴向补偿量的迭代公式为

$$\delta_i = a_{i+1} - a_p \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)得到轴向补偿量的迭代函数为

$$\begin{cases} \delta_0 = e(a_0) \\ \delta_i = \frac{(a_p - a_{i-1})e(a_i) + (a_i - a_p)e(a_{i-1})}{a_i - a_{i-1} - e(a_i) + e(a_{i-1})} \quad i = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (15)$$

式(15)即为误差迭代补偿模型，其中偏移量  $e(a_i)$ ， $i = 0, 1, 2, \dots$  表示轴向切削深度设置为  $a_i$  时，机器人加工系统刀具 TCP 在切深方向的位置误差。

#### 3.2 综合误差补偿方法

将误差值补偿至机器人铣削轨迹时，机器人姿态和末端绝对位置也发生了变化，此时会产生新的误差。误差补偿量和机器人加工系统刀具 TCP 位置

误差之间存在耦合作用, 为了对耦合作用下的位置误差进行完全补偿, 需要反复迭代调整补偿量, 直到满足加工精度的需求。

在迭代调整过程中, 刀具 TCP 位置误差, 即偏移量  $e(a_i)$ , 随机器人位姿变化而变化, 通过刀具 TCP 位置误差预测模型对其进行预测, 进而完成补偿量迭代过程的计算任务。

故基于机器人加工系统刀具 TCP 位置误差预测模型与误差迭代算法, 研究了一种综合误差补偿方法, 其流程如图 9 所示。

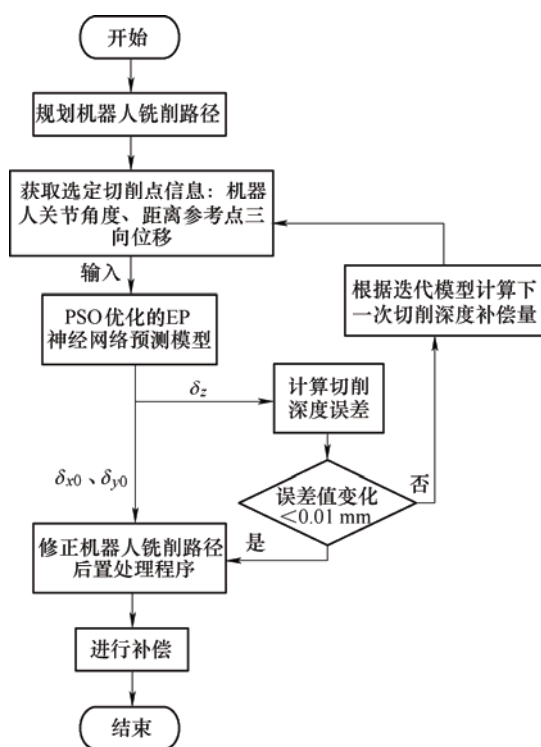


图 9 综合位置误差补偿方法流程

(1) 结合工件几何特征, 在加工前规划机器人铣削路径, 在路径中分段选取多个目标点, 并提取各目标点处机器人关节角与相对参考点的位置信息, 为刀具 TCP 位置误差预测模型提供输入数据。

(2) 通过刀具 TCP 位置误差预测模型预测目标点刀具 TCP 在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的位置误差  $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_z$ , 将初次  $X$ 、 $Y$  向误差预测值  $\delta_{x0}$ 、 $\delta_{y0}$  作为最终补偿值叠加至铣削路径目标点信息中。

(3) 根据期望切深  $a_p$  与预测值  $Z$  向位置误差  $\delta_z$  计算轴向切深迭代模型的初值  $a_0$ 、 $a_1$ 。

(4) 根据迭代值  $\delta_i, i=1, 2, \dots$ , 计算各铣削目标点相对参考点的位置数据与机器人关节角数据, 其中各关节角通过机器人逆运动学计算得到。通过误

差预测模型预测各目标点刀具端  $Z$  向位置误差  $\delta_{zi}$ , 结合迭代补偿量  $\delta_i$  计算出当前切深误差  $e_{ai}$ , 如式(15)所示。

$$e_{ai} = \delta_i - \delta_{zi} \quad (15)$$

(5) 判断当前切深误差  $e_{ai}$  是否满足需求, 在此设置判定条件为误差值变化是否小于 0.01 mm, 认为当相邻两次迭代计算后切深误差变化小于 0.01 mm 时, 再进行迭代计算调整切削深度补偿量对铣削精度的影响不大。若满足条件则保存结果, 将最终获得的补偿值叠加至机器人铣削路径目标点信息中, 生成带补偿的加工路径。若不满足条件, 则继续步骤(6)。

(6) 通过式(5)~(8)轴向补偿量迭代函数计算下一次迭代值  $\delta$ 。

(7) 转到步骤(4)。

综合位置误差补偿过程如图 10 所示。最终实际切削面和理论切削面达到一致,  $\delta_{n-1}$  即为最终获得的补偿值。

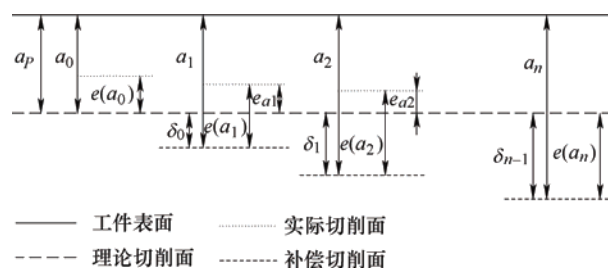


图 10 综合位置误差补偿过程示意图

## 4 机器人铣削加工综合离线补偿试验

在第 3.2 小节所述综合误差补偿方法中, 最终补偿值计算完成后, 被叠加至机器人铣削路径目标点信息中, 即针对机器人加工系统刀具 TCP 位置进行补偿, 通过离线编程将补偿值以 TCP 变换值的方式传输给机器人控制器, 其内部自动完成运动学逆解, 求解出机器人各关节角的叠加量, 并对相应编码器的脉冲数进行叠加, 使得机器人各关节达到期望转角, 完成补偿路径的修正。

应用此综合误差补偿方案进行航空铝 7075 工件的铣削加工试验, 观察工件在刀具轴向切削深度的补偿效果。试验现场如图 11 所示, 机器人末端电主轴上装有激光位移传感器, 随机器人运动测量工件表面数据, 并夹持直径 16 mm、4 齿的平底刀进行顺铣。



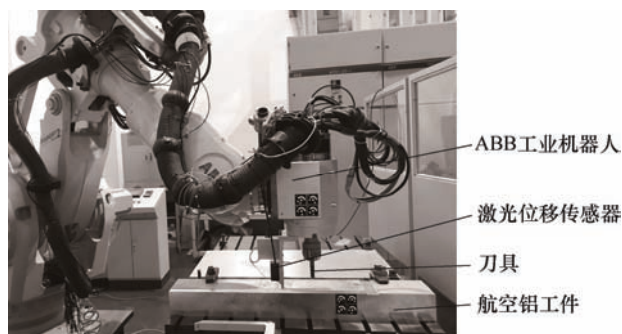


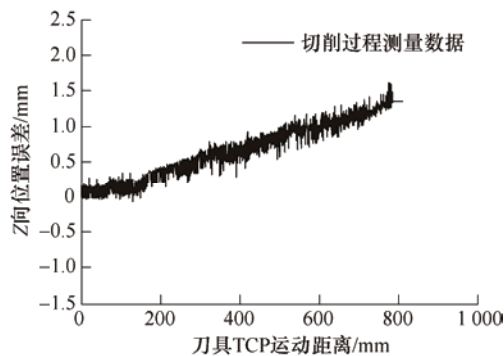
图 11 综合位置误差补偿试验现场图

试验过程分别在未补偿与使用补偿方案两种情况下进行，铣削方向设置为基坐标系  $X$  向即工件长度方向，两种方式下机器人铣削参数设置相同，如表 3 所示。

表 3 铣削参数设置

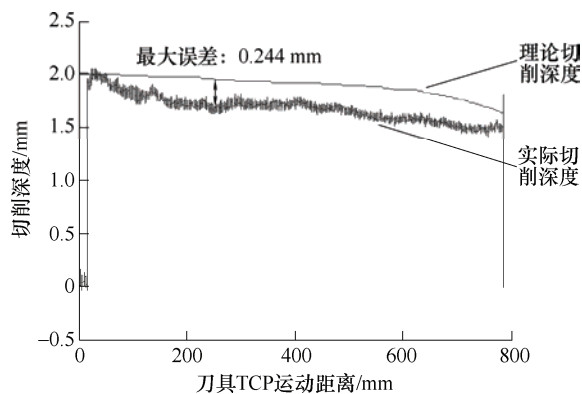
转速/ (r/min)	进给速度/ (mm/s)	切削宽度/mm	切削切深/mm
3 000	5	10	2

在未补偿试验中，令机器人执行原始刀路程序，通过双目视觉系统动态跟踪测量机器人铣削轨迹中刀具 TCP 位置误差，其中  $Z$  向位置误差测量结果如图 12 所示。

图 12 未补偿铣削中刀具 TCP 的  $Z$  向位置误差

测量结果显示，刀具 TCP 的  $Z$  向最大位置误差出现在工件尾端，达到 1.354 mm，已知设定切削深度为 2 mm，此误差对工件的铣削精度产生了极大的影响。

接下来进行机器人铣削轨迹误差补偿试验，根据综合误差补偿方案修正机器人铣削轨迹，令机器人执行带补偿的刀路程序。并使用激光位移传感器测量其距离工件未切削表面与已切削表面的位移，计算得到补偿后的工件切深误差，结果如图 13 所示（图中理论切削深度受工件表面倾斜度的影响与设置切深 2 mm 存在一定的偏差）。

图 13 补偿后的刀具 TCP 的  $Z$  向位置误差

经过补偿后，被加工件切削深度误差最大为 0.244 mm，最小为 0.018 mm，平均误差为 0.193 2 mm。机器人铣削轨迹中最大位置误差由原来的 1.354 mm 降低到 0.244 mm，补偿效果明显。

观察铣削后的工件表面，如图 14、15 所示，未补偿工件切削表面在工件尾部切深逐渐变浅，相应的切深误差逐渐增大；经补偿后的工件切削表面切深相对均匀，误差减少。可见，综合误差补偿方案的应用显著提高了机器人大行程铣削加工精度。

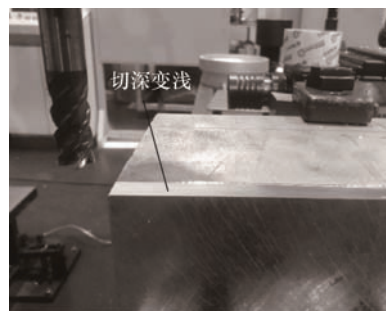


图 14 未补偿工件切削表面

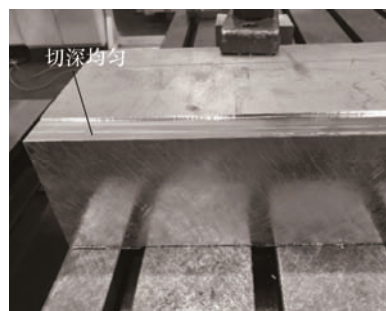


图 15 补偿后工件切削表面

## 5 结论

(1) 本文通过配置编码标志点，提出了一种基于双目视觉系统跟踪测量的机器人铣削加工中刀具 TCP 位置误差计算方法，此方法避免了对具体误差

源的分析与建模过程,实现了对机器人铣削加工过程中多类误差源造成的累积误差的直接测量。

(2) 通过训练 PSO 优化的 BP 神经网络模拟了机器人位姿与其铣削轨迹中刀具 TCP 位置误差之间的映射关系,建立了机器人铣削中刀具 TCP 位置误差预测模型,并采用交叉验证方法确定了模型最优结构参数,且验证了模型的预测精度满足需求。

(3) 基于弦截法建立了误差迭代模型,将其引入到机器人铣削加工刀具轴向位置误差补偿过程中,提出了一种误差预测模型与迭代算法相结合的综合补偿方法。应用此方法对机器人铣削中刀具 TCP 绝对轨迹进行修正进行了离线补偿试验,试验结果显示,补偿后工件最大切深误差从 1.354 mm 降低到 0.244 mm,显著提高了机器人铣削加工精度。

### 参 考 文 献

- [1] 田威,焦嘉琛,李波,等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 341-352.  
TIAN Wei, JIAO Jiachen, LI Bo, et al. High precision robot operation equipment and technology in aerospace manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 341-352.
- [2] SCHNEIDER U, DRUST M, ANSALONI M, et al. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 3-15.
- [3] MÖLLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Machining of large scaled CFRP-Parts with mobile CNC-based robotic system in aerospace industry[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 14: 17-29.
- [4] MÖLLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(2): 100-108.
- [5] 焦国太,冯永和,王锋,等. 多因素影响下的机器人综合位姿误差分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(4): 435-442.  
JIAO Guotai, FENG Yonghe, WANG Feng, et al. Analysis method of robot pose error under multi - factors[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(4): 435-442.
- [6] 李文龙,谢核,尹周平,等. 机器人加工几何误差建模研究: I 空间运动链与误差传递[J]. 机械工程学报, 2021, 57(7): 154-168.  
LI Wenlong, XIE He, YIN Zhouping, et al. The research of geometric error modeling of robotic machining: I spatial motion chain and error transmission[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(7): 154-168.
- [7] ZHAO Changxi, WEN Ke, YUE Yi, et al. Research on numerical control system of the mobile robotic equipment for unstructured machining[C]// 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA) Proceedings. Piscataway: IEEE, 2018: 208-212.
- [8] 文科,张加波,乐毅,等. 数控驱动的移动铣削机器人精度提升方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 72-80.  
WEN Ke, ZHANG Jiabo, YUE Yi, et al. Method for improving accuracy of NC-driven mobile milling robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(5): 72-80.
- [9] TANG Xiaowei, YAN Rong, PENG Fangyu, et al. Deformation error prediction and compensation for robot multi-axis milling[C]// Intelligent Robotics and Applications-11th International Conference, ICIRA 2018, Proceedings. Cham: Springer International Publishing, 2018: 309-318.
- [10] CHEN Chen, PENG Fangyu, YAN Rong, et al. Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 55: 29-40.
- [11] 李睿. 机器人柔性制造系统的在线测量与控制补偿技术[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
LI Rui. On-line measurement and control compensation technologies for robot flexible manufacturing system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [12] GHARAATY S, SHU T, XIE W, et al. Accuracy enhancement of industrial robots by on-line pose correction[C]//2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). Piscataway: IEEE, 2017: 214-220.
- [13] 史晓佳,张福民,曲兴华,等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 1-7.  
SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Position and attitude measurement and online errors compensation for KUKA industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 1-7.
- [14] WANG Xinzhi, LI Zhoulong, BI Qingzhen, et al. An accelerated convergence approach for real-time deformation compensation in large thin-walled parts



- machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 142: 98-106.
- [15] LI Luning, LIU Xiangfeng, YANG Fan, et al. A review of artificial neural network based chemometrics applied in laser-induced breakdown spectroscopy analysis[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 180: 106183.
- [16] 周炜. 飞机自动化装配工业机器人精度补偿方法与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHOU Wei. Compensation method of industrial robot accuracy and experimental research for aircraft automated assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- 
- 作者简介: 邸红采, 女, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机器人铣削加工误差测量和补偿。  
E-mail: 1437996264@qq.com
- 彭芳瑜, 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控加工技术、机器人加工和智能制造等。  
E-mail: pengfy@hust.edu.cn
- 唐小卫(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为机器人铣削加工动力学、误差测量和精度控制。  
E-mail: txwysxf@126.com
- 闫蓉, 女, 1973 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为多轴数控加工。  
E-mail: yanrong@hust.edu.cn