

引文格式: 李论, 王正佳, 赵吉宾, 等. 整体叶盘研磨抛光机器人接触力阻抗控制方法研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(9): 60-68.
LI Lun, WANG Zhengjia, ZHAO Jibin, et al. Research on contact force impedance control method of blisk grinding and polishing robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(9): 60-68.

整体叶盘研磨抛光机器人接触力阻抗控制方法研究*

李 论^{1,2}, 王正佳^{1,2,3}, 赵吉宾^{1,2}, 朱 光^{1,2}, 张洪瑶^{1,2,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016;

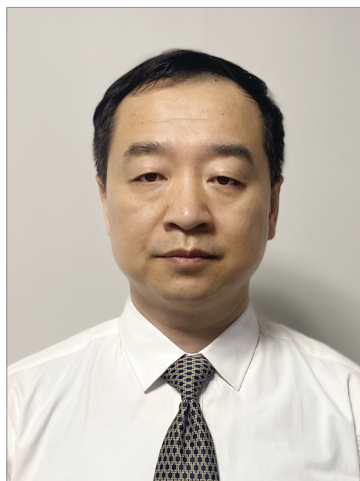
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 针对整体叶盘机器人自动化研磨抛光接触力控制的技术难点,对磨抛过程磨抛工具与叶片之间接触力进行分析,将负载静态标定与传感器零点在线补偿相结合,提出了基于零点漂移的机器人磨抛加工负载标定与补偿算法,并将其与基于位置的阻抗控制结合应用于整体叶盘的自动化磨抛加工。负载标定与补偿试验表明,加工过程中采用基本的标定与补偿算法的接触力和力矩的平均误差值从 -0.12853N 和 $0.0055\text{N}\cdot\text{m}$ 增加至 -1.9826N 和 $-0.1680\text{N}\cdot\text{m}$,而采用基于零点漂移的标定与补偿算法可将接触力和力矩的平均误差降低至 -0.1532N 和 $0.0083\text{N}\cdot\text{m}$,证明了该算法能够有效降低传感器零点漂移对接触力实现计算的影响。同时,力控试验表明,该算法与基于位置的阻抗控制结合能够有效实现对期望接触力的跟踪控制,从而明显提高整体叶盘磨抛加工的表面质量。

关键词: 整体叶盘; 研磨抛光; 零点漂移; 负载标定; 柔顺控制; 阻抗控制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.09.060



李 论

研究员,博士,研究方向为机器人制造与工艺数字化。

* 基金项目: 国家自然科学基金-辽宁省联合基金(U1908230)。

航空发动机是飞机的关键设备,而整体叶盘作为其关键部件已广泛应用于各种飞机^[1]。目前国内外整体叶盘的精密加工大多采用数控精密铣削技术^[2],但易产生波峰波谷残留,影响发动机质量和性能^[3]。为提高整体叶盘表面的加工质量,必须对整体叶盘进行研磨抛光。由于整体叶盘的操作空间小、曲面复杂等特点,其自动化磨抛困难,目前仍采用手工磨抛,但其缺点明显^[4]。机器人磨抛具有加工柔性大、表面加工质量高等优势,但如何控制机器人与整体叶盘间接接触的柔顺是目前研究的一大难题。

获取机器人与整体叶盘间的接触力是对其进行柔顺控制的前提。

蔡明君^[5]分析了力传感器零点与负载重力对获取接触力的影响,提出了通过测量特殊位置抵消负载重力的方法。Vougioukas^[6]提出采用最小二乘法求解负载重力与力传感器零点。张立建等^[7]在以上研究的基础上增加了机器人安装偏角,通过获取任意姿态下数据进行标定与补偿。黄玲涛^[8]和张昱东^[9]等将文献[7]的重力补偿算法应用于机器人柔顺放置试验。刘运毅等^[10]提出基于极大似然估计的在线标定算法。周建斌^[11]考虑到力传感器零点漂移,提出了基于基准点的零点补偿。

针对磨抛过程中的柔顺控制,国内外学者提出了多种控制理论。王品章等^[12]使用力/位混合控制策略

对叶片进行磨抛。Zhang 等^[13]提出通过模糊 PID 控制与力/位置混合控制结合解决扰动问题。He 等^[14]提出基于神经网络的自适应阻抗控制,构造了状态反馈和输出反馈。Peng 等^[15]提出了径向基函数增量学习算法的扁平化神经网络与导纳控制结合,实现无力传感器机器人与环境交互。

本研究采用将负载静态标定与传感器零点在线补偿相结合的方式,提出基于零点漂移的负载标定与补偿算法,以降低零点漂移对接触力测量的影响,为机器人研磨抛光柔顺控制提供准确的接触力信息。静态下采集机器人不同位姿下力传感器的数据,计算机器人底座安装偏角、负载质心位置与重力、力传感器零点;利用机器人不与外界发生接触的阶段更新力传感器零点。最后与基于位置的阻抗控制相结合,实现对整体叶盘的研磨抛光。

1 研磨抛光接触力分析

整体叶盘磨抛过程中的受力分析及磨抛轨迹如图 1 所示。在磨抛过程中,整体叶盘表面受到的力包括垂直于磨抛工具砂带表面以及整体叶盘叶片表面的法向正压力 F_n 、沿工具 TCP (Tool central point) 轨迹切线方向的滑动摩擦力 F_f 、沿砂带转动方向的切削力 F_t 。对多种影响磨抛质量因素的分析表明,法向正压力的恒定能够减小工具磨损,维持接

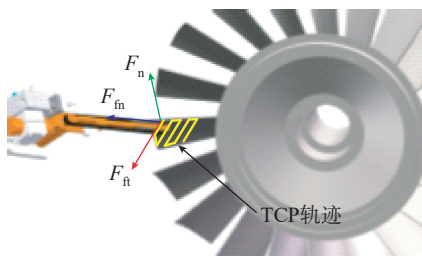


图 1 整体叶盘磨抛受力分析
Fig.1 Analysis of grinding and polishing force of blisk

触稳定^[16]。

2 负载标定与补偿算法

在机器人磨抛柔顺力控制中,作为反馈信号,工具与整体叶盘间接触力采用六维力传感器实时监测。六维力传感器的数据由 4 部分组成,包括(1)力传感器的零点 F_0 ; (2)外部负载的重力 G_s ; (3)外部负载的惯性力 G_i ; (4)外部接触力 F_c 。

$$F = F_0 + G_s + G_i + F_c \quad (1)$$

由于机器人在磨抛过程中处于低速运动状态,并且工具重力一般较小,故惯性力可以忽略。由于复杂曲面表面曲率不断变化,需要不断调整机器人末端姿态使工具 TCP 的 Z 向与表面法向重合,导致负载重力在六维力传感器坐标系中的方向不断变化,影响对外部接触力的测量,故需要对负载重力进行标定补偿。

2.1 负载标定与补偿的模型分析

本研究涉及的相关坐标系定义示意如图 2 所示,其中大地坐标系 $\{D\}$ 的 Z 轴方向垂直于地面向上,大地坐标系可绕 Z 轴任意旋转定义。

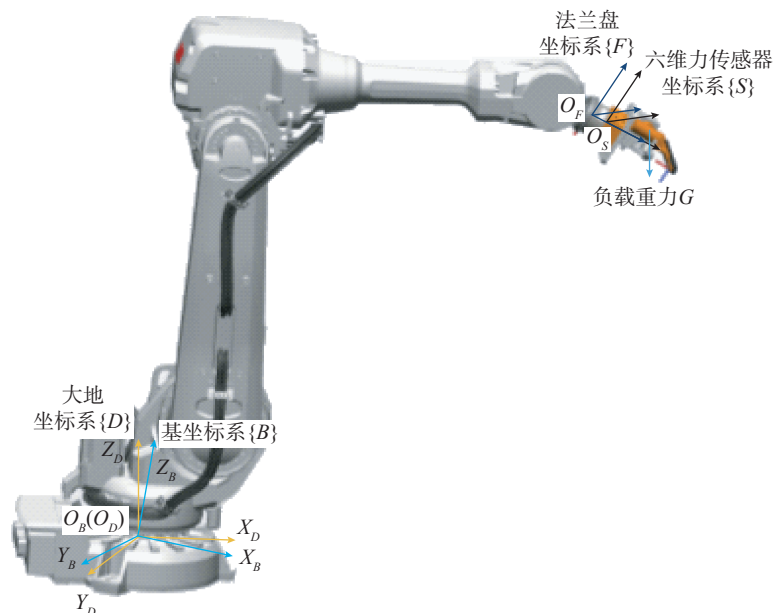


图 2 坐标系定义示意图
Fig.2 Schematic diagram for definition of coordinates

对负载标定与补偿的模型进行分析,得出目标变量与已知变量。

2.1.1 负载标定与补偿的目标变量

(1) 机器人底座安装偏角 φ 和 θ 。大地坐标系 $\{D\}$ 绕 y 轴旋转角度 θ ,再绕 x 轴旋转 φ 后与机器人的基坐标系 $\{B\}$ 重合,得到机器人基坐标系与大地坐标系之间的转换矩阵 ${}^B_D R$ 。

$${}^B_D R = \text{Rot}(y, \theta) \text{Rot}(x, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\varphi & \sin\theta\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 在传感器坐标系 $\{S\}$ 下末端负载质心位置 $P_{GIS} = [l_x \ l_y \ l_z]^T$ 与重力 $G_D = [0 \ 0 \ -G]^T$ 。

(3) 六维力传感器零点 $S_0 = [F_{x_0} \ F_{y_0} \ F_{z_0} \ M_{x_0} \ M_{y_0} \ M_{z_0}]^T$ 。

2.1.2 负载标定与补偿的已知变量

(1) 工件坐标系 $\{W\}$ 与工具坐标系 $\{T\}$ 之间的转换矩阵 ${}^T_W T$, 包括工具末端相对工件坐标系的姿态四元数 $q_c = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$ 与位置三坐标 $P_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$, 将四元数和位

置三坐标转换为旋转矩阵 ${}^T_w R_C$ 和转换矩阵 ${}^T_w T$ 。

$${}^T_w R_C = \begin{bmatrix} 1-2q_3^2-2q_4^2 & 2q_2q_3+2q_1q_4 & 2q_2q_4-2q_1q_3 \\ 2q_2q_3-2q_1q_4 & 1-2q_2^2-2q_4^2 & 2q_3q_4+2q_1q_2 \\ 2q_2q_4+2q_1q_3 & 2q_3q_4-2q_1q_2 & 1-2q_1^2-2q_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^T_w T = \begin{bmatrix} R_c & P_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) 六维力传感器实时读数 $S=[F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$ 。

2.2 传感器负载标定与补偿算法

(1) 负载重力、传感器三维力零点、机器人安装偏角的静态计算。

在静态标定的情况下,机器人末端的加速度为0,传感器的数据由负载重力与传感器零点组成。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} = {}^S_B R \begin{bmatrix} -G\sin\theta\cos\varphi \\ G\sin\varphi \\ -G\cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, ${}^S_B R = {}^S_F R \cdot {}^T_F R^{-1} \cdot {}^T_w R_C \cdot {}^w_B R$ 为基坐标系 $\{B\}$ 与传感器坐标系 $\{S\}$ 的旋转矩阵。基本算法与文献[7]基本一致。结合式(5)依次采集 N 组数据可得到

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ \vdots \\ F_{xN} \\ F_{yN} \\ F_{zN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^S_B R_1 & I \\ \vdots & \vdots \\ {}^S_B R_N & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F = RX$$

式中, $X_1 = -G\sin\theta\cos\varphi$, $X_2 = G\sin\varphi$, $X_3 = -G\cos\theta\cos\varphi$, 采用最小二乘法求得状态向量 X , 进一步求得底座安装偏角 φ 、 θ 、重力 G 与三维力零点。

$$\varphi = \arctan(X_2 / \sqrt{X_1^2 + X_3^2}) \quad (7)$$

$$\theta = \arctan(X_1 / X_3) \quad (8)$$

$$G = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2} \quad (9)$$

由式(2)得出大地坐标系与基坐标系之间的转换矩阵。

(2) 负载质心位置、传感器三维力矩零点的静态计算。

在无接触的情况下,力传感器三维力矩由力矩零点与负载重力产生的力矩组成,结合式(5)得

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{gx} \\ M_{gy} \\ M_{gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g_z & -g_y \\ -g_z & 0 & g_x \\ g_y & -g_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F_z - F_{z0} & -F_y + F_{y0} \\ -F_z + F_{z0} & 0 & F_x - F_{x0} \\ F_y - F_{y0} & -F_x + F_{x0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

即

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F_z & -F_y & 1 & 0 & 0 \\ -F_z & 0 & F_x & 0 & 1 & 0 \\ F_y & -F_x & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \\ k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $k_x = M_{x0} - F_{z0}l_y + F_{y0}l_z$, $k_y = M_{y0} + F_{z0}l_x - F_{x0}l_z$, $k_z = M_{z0} - F_{y0}l_x + F_{x0}l_y$ 。根据式(11)由3组及以上不同姿态下力与力矩的数据求出质心的位置 P_{GIS} 及中间变量 k_x 、 k_y 、 k_z 。结合传感器力零点,求得传感器力矩零点。

(3) 传感器零点的动态更新。

受到温度变化的影响,力传感器零点会出现“漂移”现象,传统的标定与补偿算法需重新标定,效率低

下。本研究利用机器人转换工位、机器人空闲等待等不与周围产生接触的非加工阶段,采集力传感器与机器人姿态数据,重新标定传感器零点。

重新标定传感器零点的过程中,机器人运动速度可能变化较大,产生较大惯性力,故无法忽视惯性力的影响。根据质心位置求得质心加速度 $a_{iB}=[a_{xB} \ a_{yB} \ a_{zB}]^T$ 。由牛顿第二定律得惯性力 $F_{iB} = -m \cdot a_{iB}$ 。通过坐标变换求得传感器坐标系下惯性力

$$F_{is} = \begin{bmatrix} F_{isx} \\ F_{isy} \\ F_{isz} \end{bmatrix} = {}^S_B R \begin{bmatrix} F_{iBx} \\ F_{iBy} \\ F_{iBz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

结合式(1)、(5)和(12),得出传感器三维力零点的变化量为

$$\begin{bmatrix} \Delta F_{x0} \\ \Delta F_{y0} \\ \Delta F_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} - {}^S_B R \begin{bmatrix} -\sin\theta\cos\varphi \\ \sin\varphi \\ -\cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} G - \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{isx} \\ F_{isy} \\ F_{isz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

结合式(11),得出传感器三维力矩零点的变化量,

$$\begin{bmatrix} \Delta M_{x0} \\ \Delta M_{y0} \\ \Delta M_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & F_z - F_{z0} & -F_y + F_{y0} \\ -F_z + F_{z0} & 0 & F_x - F_{x0} \\ F_y - F_{y0} & -F_x + F_{x0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

对转换工位过程中的传感器零点的变化量取平均值,得到更新的传感器力与力矩零点。

2.3 在线计算接触力

由前文求得的机器人安装偏角、负载重力、负载质心位置与更新的传感器零点,求得末端所受接触力在传感器坐标系下力与力矩分量,

$$\begin{cases} F_{ex} = F_x - g_x - F_{x0} - F_{isx} \\ F_{ey} = F_y - g_y - F_{y0} - F_{isy} \\ F_{ez} = F_z - g_z - F_{z0} - F_{isz} \\ M_{ex} = M_x - M_{gx} - M_{x0} \\ M_{ey} = M_y - M_{gy} - M_{y0} \\ M_{ez} = M_z - M_{gz} - M_{z0} \end{cases} \quad (15)$$

通过坐标变换求得工具坐标系下的外部实际接触力与力矩。

3 机器人磨抛柔顺力控制策略

为了解决机器人定位精度低、整体叶盘实际表面与理论表面有所差距等问题,本研究通过控制法向正压力方向的位置,实现工件表面的高精度磨抛加工。法向正压力方向的位置由离线轨迹位置与柔顺力控制策略输出位置组成,其他方向的位置依靠离线轨迹控制。

实现机器人磨抛柔顺力控制的策略为基于位置的阻抗控制策略。基于位置的阻抗控制将工具与整体叶盘接触动态特性看作质量-弹簧-阻尼系统,建立机器人轨迹位置与磨抛正压力之间的关系:

$$M(\ddot{X}-\ddot{X}_r)+B(\dot{X}-\dot{X}_r)+K(X-X_r)=F_r-F \quad (16)$$

式中, M 、 B 、 K 分别表示机器人的期望惯性、阻尼和刚度; X 、 X_r 分别表示机器人实际位置和离线轨迹规划位置; F_r 、 F 分别表示期望接触力和实际接触力。将式(16)转化为标准二阶系统为

$$M\Delta\ddot{X}+B\Delta\dot{X}+K\Delta X=KU \quad (17)$$

式中, $\Delta X=X-X_r$, $U=\Delta F/K$, $\Delta F=F_r-F$ 。对式(17)进行拉氏变换,得到基于位置的阻抗控制器传递函数:

$$\Phi(s) = \frac{\Delta X(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

式中, ω_n 为期望固有频率, $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$; ζ 为期望阻尼比, $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{KM}}$ 。

为防止过度超调及系统不稳定,阻抗控制器的期望阻尼比应远大于

1^[17],故基于位置的阻抗控制器为过阻尼的二阶离散系统。对式(18)进行 z 变换得控制器的脉冲传递函数为

$$\Phi(z) = K_i \frac{z}{z^2 - (e^{aT} + e^{bT})z + e^{(a+b)T}} \quad (19)$$

式中, $a = -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ 、 $b = -\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ 表示特征方程的两个根, $K_i = \frac{\omega_n(e^{aT} - e^{bT})}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}}$ 表示阻抗控制器系数; T 表示采样周期。根据式(19)可以求得时域下控制器递推公式为

$$\Delta X(k) = K_i \Delta F(k-1)/K + (e^{aT} + e^{bT}) \times \Delta X(k-1) - e^{(a+b)T} \Delta X(k-2) \quad (20)$$

控制系统的结构如图3所示。

根据整体叶盘曲面材质的特性和加工去除量的要求,选定研磨抛光期望接触力 F_r ,通过六维力传感器获取力与力矩数据,经负载标定与补偿消除机器人安装偏角、负载重力和传感器零点的干扰后,得到磨抛接触的法向正压力 F ,再与期望接触力

F_r 比较,输入至阻抗控制器,根据式(20)得到机器人轨迹法向正压力方向的修正量 ΔX ,通过零阶保持器累加到机器人离线轨迹规划路径的法向正压力方向 X_r ,由机器人位置伺服系统到达指定位置对整体叶盘进行研磨抛光,从而实现机器人柔顺力控制。

4 试验与结果分析

4.1 整体叶盘机器人研磨抛光系统

整体叶盘机器人磨抛系统如图4所示,试验平台如图5所示。其中包含了工控机、机器人(IRB 4600-60/2.05)、六维力传感器(ATI DELTA系列SI-330-30)、砂带机、整体叶盘与转台。工控机中装有机器人磨抛控制系统软件,软件界面如图6所示。机器人、六维力传感器与工控机之间通过以太网进行传输,机器人采用TCP/IP通信协议;六维力传感器采用UDP通信协议。为了避免工具与整体叶盘发生刚性接触,在砂带与砂

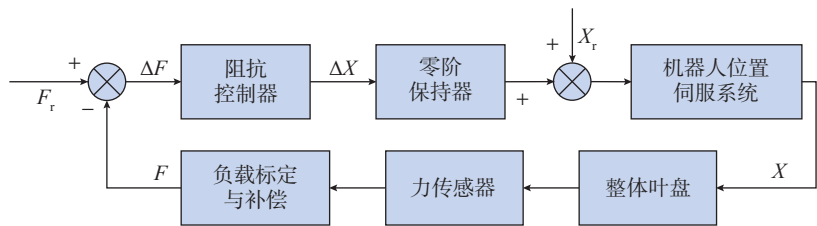


图3 研磨抛光柔顺力控制
Fig.3 Grinding and polishing compliance control

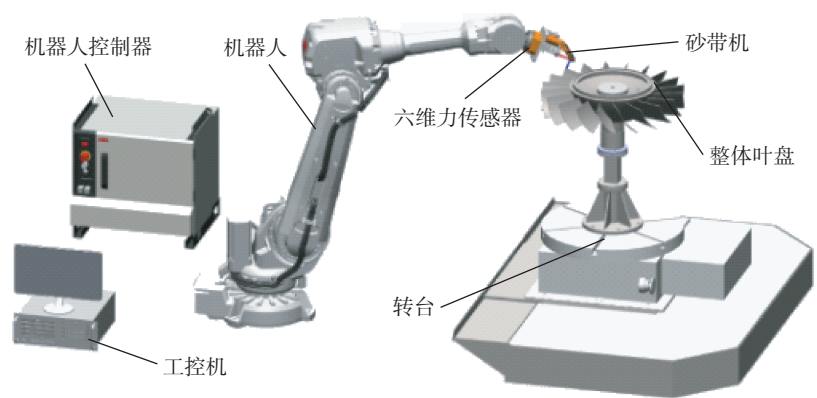


图4 整体叶盘机器人研磨抛光系统
Fig.4 Robot grinding and polishing system of blisk

带机之间放置橡胶垫片。

4.2 负载标定与补偿试验

为验证所提的负载标定与补偿算法,采用砂带机及其连接件作为负载分别进行了静态、动态和零点漂移

的补偿试验。

4.2.1 静态试验

静态试验下选择了机器人6个不同位姿采集数据,位姿如表1所示。在6个位姿下分别采集20组

数据作为各自姿态下的六维力信息。根据前文的标定与补偿算法,求得各个目标变量,如表2所示。本研究为验证表2中结果的准确性,使用前文的接触力计算方法验证表1机器人各姿态的接触力与力矩,如图7所示,三维力误差平均值为 $2.5641 \times 10^{-6} \text{N}$,标准差为0.1561N;三维力矩误差平均值为 $2.56 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m}$,标准差为0.0161N·m。

4.2.2 动态试验

为验证零点漂移对磨抛接触力获取的影响,试验分别采集2个时间段中机器人在8个不同姿态下来回运动的数据,分别使用无零点更新与零点更新两种方法对接触力进行计算,机器人位姿如表3所示。

静态标定后立即采集数据计算得到的接触力与力矩如图8所示,接触力和力矩误差的平均值分别为 -0.12853N 和 $0.0055 \text{N} \cdot \text{m}$,进一步证明了静态标定方法对传感器零点、机器人安装偏角、负载重力与质心位置等标定结果的正确性。无零点更新时接触力与力矩如图9所示,接触力和力矩误差的平均值分别为 -1.9826N 和 $-0.1680 \text{N} \cdot \text{m}$,从中得



图5 试验平台
Fig.5 Experimental platform



图6 研磨抛光控制系统软件界面
Fig.6 Software interface of grinding and polishing control system

表1 静态试验机器人位姿表

Table 1 Robot's pose parameters of static experimental

x/mm	y/mm	z/mm	q_1	q_2	q_3	q_4
0	-1270.00	1569.94	0.500	0.500	0.500	-0.500
-135.0	-1135.01	1569.96	0.500	-0.500	-0.500	0.500
-95.46	-1135.0	1374.5	0.27061	-0.65328	-0.65329	0.27058
0.01	-1135.00	1434.96	0	-0.70711	-0.70711	0
95.46	-1135.00	1474.55	0.2706	0.65328	0.65328	0.2706
135.00	-1135.00	1570.00	0.500	0.500	0.500	0.500

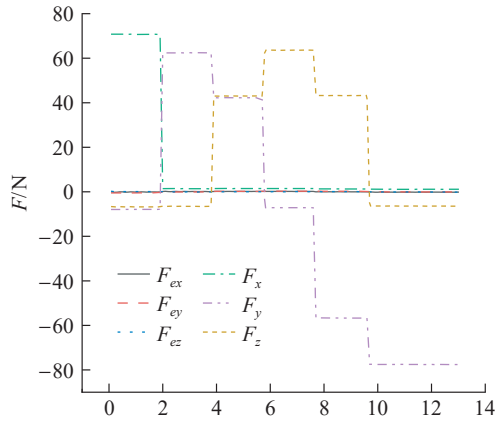
表2 静态标定目标结果

Table 2 Static calibration target results

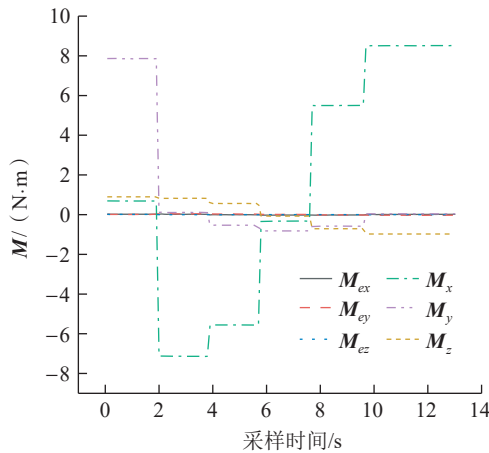
变量	数值
$\phi / (^\circ)$	0.38717
$\theta / (^\circ)$	-0.072838
l_x / mm	12.868
l_y / mm	-13.790
l_z / mm	111.874
F_{x0} / N	0.822687
F_{y0} / N	-7.50664
F_{z0} / N	-6.40837
$M_{x0} / (\text{N} \cdot \text{m})$	0.670826
$M_{y0} / (\text{N} \cdot \text{m})$	0.017602
$M_{z0} / (\text{N} \cdot \text{m})$	-0.08231
G/N	69.9968

出随着周围环境温度的变化,传感器的零点发生了漂移,由静态标定方法得出的传感器零点不再适用于当前时刻接触力的计算。零点更新后接

触力与力矩如图 10 所示,误差的平均值分别为 -0.1532N 和 $0.0083\text{N}\cdot\text{m}$, 零点更新后新的零点值如表 4 所示。零点更新后的误差平均值与静态标



(a) 接触力



(b) 接触力矩

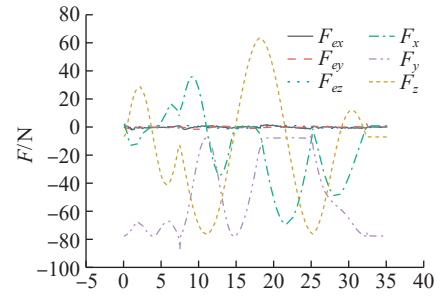
图 7 验证机器人各姿态接触力与力矩

Fig.7 Verification of robot's posture contact forces and torques

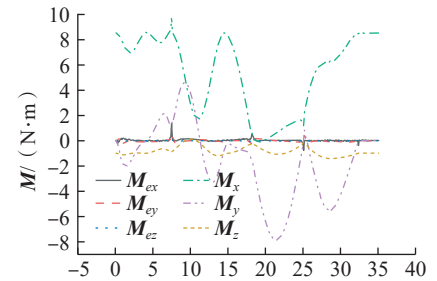
表 3 动态试验机器人位姿

Table 3 Robot's pose parameters of dynamic experimental

x/mm	y/mm	z/mm	q_1	q_2	q_3	q_4
0	-1270.01	1569.95	0.707091	0.707123	0.00007	0.000002
135.0	-1135.02	1569.95	0.499993	0.50001	0.499989	0.500008
12.04	-1135.02	1704.41	0.998006	0.00202	0.0445818	0.0446265
-135.00	-1135.00	1569.97	0.499983	0.500019	-0.500002	-0.499997
0.01	-1135.00	1434.95	0.00003	-0.70710	0.707118	0.00001
0.01	-1269.93	1574.64	0.508613	0.491273	-0.491233	0.508581
0.01	-1135.01	1704.96	0.707107	0.00001	-0.00001	0.707106
0	1270.01	1569.95	0.707091	0.707123	0.00001	0.000003



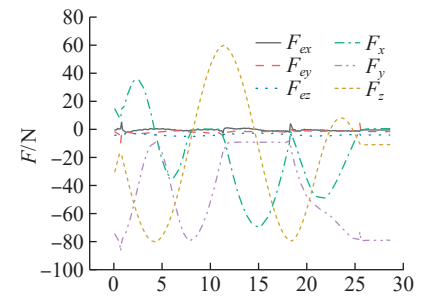
(a) 接触力



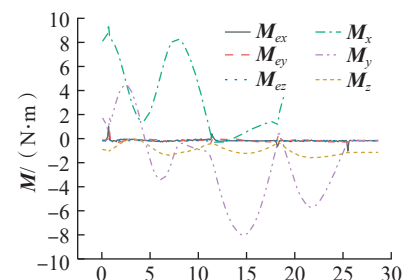
(b) 接触力矩

图 8 静态标定动态验证结果

Fig.8 Static calibration and dynamic verification results



(a) 接触力



(b) 接触力矩

图 9 零点漂移后静态标定验证结果

Fig.9 Static calibration verification results after zero drift

定后得到的误差平均值相近,证明了基于零点漂移的标定与补偿算法可以有效地解决力传感器零点漂移的影响。

4.3 力控试验

分别进行采用和未采用阻抗控制策略的磨抛试验。其中采用控制策略的试验中,对砂带机与整体叶盘间的正压力进行控制,采用10N的期望接触力。

整体叶盘磨抛前如图11所示,磨抛后分别测量的两种叶盘中8个点的粗糙度如图12所示,采用阻抗控制策略的接触力曲线如图13所示。从图12中得出使用阻抗控制算法进行研磨抛光消除了整体叶盘表面磨痕,使整体叶盘的表面光整度有所提高。从接触力曲线得出在0~4.8s内,机器人在自由空间内运动,此时采集数据对传感器零点进行更新;从4.9s开始进入磨抛状态,上位机计算砂带机与整体叶盘间的接触力,机器人逐渐运动至离线轨迹的第1个目标点;从7.6s开始期望接触力变为-10N,对机器人位置进行修正,在之后的0.8s内,接触力从0.816N迅速到达-12.972N,

在8.3s接触力稳定-10N附近,大部分(70.3%)的接触力波动范围为 (-10 ± 2) N,相比于部分混合力控制策略 $\pm 3 \sim 5$ N的波动范围^[10, 13, 18]有所降低,磨抛过程中接触力的方差为 1.943N^2 。磨抛过程中接触力波动主要受以下2个因素影响。

(1)砂带机由气动装置提供动力,同时砂带机在转动时会使砂带机本身产生振动,这是接触力波动的主要原因。

(2)磨抛工具的砂带磨粒在整体叶盘加工表面接触的过程中不断切换,也会带来振动。

5 结论

(1)本研究以整体叶盘为研究对象,分析了整体叶盘在磨抛过程中的受力,将负载静态标定与传感器零点在线补偿相结合,提出了基于零点漂移的负载标定与补偿算法。考虑了机器人底座安装偏角、负载重力、传感器零点和零点漂移对力传感器数据的影响,分别进行了负载标定与补偿的静态、动态和零点漂移试验。

(2)将基于零点漂移的负载标

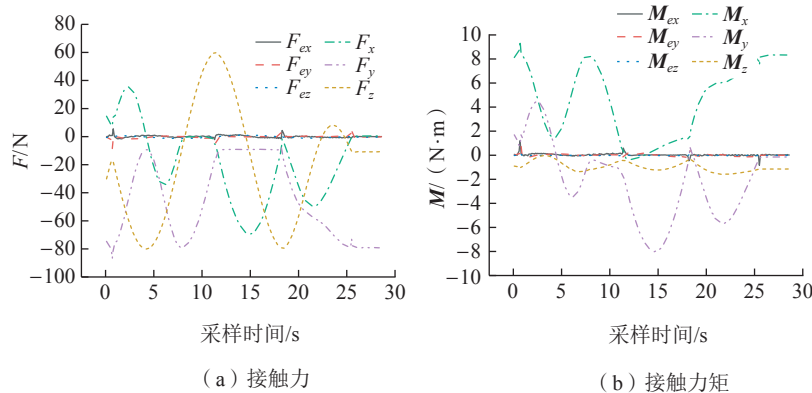


图10 零点更新后标定验证结果

Fig.10 Calibration verification results after zero point update

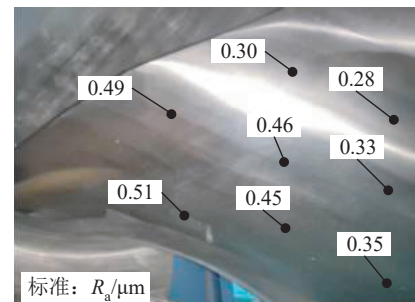
表4 零点更新结果
Table 4 Zero point update results

F_{x0}/N	F_{y0}/N	F_{z0}/N	$M_{x0}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_{y0}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_{z0}/(\text{N}\cdot\text{m})$
0.371792	-8.9621	-10.0461	0.473343	-0.15506	-0.23388

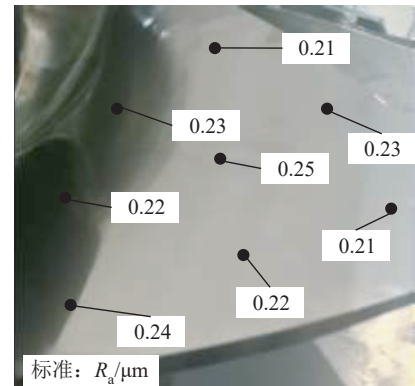


图11 整体叶盘磨抛前

Fig.11 Blisk before grinding and polishing



(a) 未使用恒力控制



(b) 使用恒力控制

图12 整体叶盘磨抛后

Fig.12 Blisk after grinding and polishing

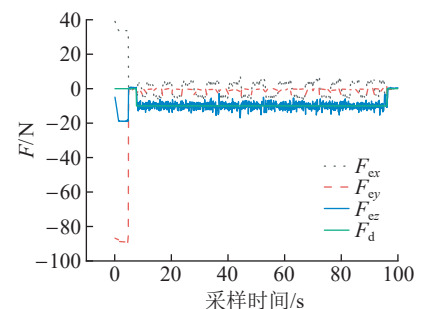


图13 整体叶盘磨抛接触力曲线

Fig.13 Contact force curve of grinding and polishing blisk

定与补偿算法与基于位置的阻抗控制策略结合,应用于整体叶盘的研磨抛光,进行了力控试验,并对试验数据进行了分析。

(3) 标定与补偿试验结果表明,随着时间的推移,基本标定与补偿算法的接触力和力矩平均误差从 -0.12853N 和 $0.0055\text{N}\cdot\text{m}$ 变为 -1.9826N 和 $-0.1680\text{N}\cdot\text{m}$, 基于零点漂移的负载标定与补偿算法将其降低至 -0.1532N 和 $0.0083\text{N}\cdot\text{m}$, 证明了该算法有效降低了传感器零点偏移对研磨抛光接触力的影响,对力矩的补偿进一步验证了补偿算法的正确性。

(4) 力控试验表明,基于零点漂移负载标定与补偿算法与基于位置的阻抗控制结合能够有效实现对期望接触力的跟踪,实际接触力的方差为 1.943N^2 ; 基于位置的阻抗控制算法能够降低实际接触力的波动,有效提高整体叶盘表面的光整度。

参考文献

- [1] 淮文博, 史耀耀, 蔺小军. 整体叶盘自适应柔性抛光效率优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1550-1557.
- HUAI Wenbo, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun. Optimization of adaptive flexible blisk polishing efficiency[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1550-1557.
- [2] WANG G. Manufacturing turbine blisks[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2000(3): 247-252.
- [3] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2045-2064.
- HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2045-2064.
- [4] 黎先才, 叶欢, 何志强. 航空发动机中小型整体叶盘自动化抛光技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(11): 143-146.
- LI Xiancai, YE Huan, HE Zhiqiang. Automatic polishing technology for small and medium sized blisk of aeroengine[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(11): 143-146.
- [5] 蔡明君. 基于力融合控制的遥操作机器人同构式手控器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- CAI Mingjun. Research on homogeneous hand controller based on force fusion control for telerobot[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [6] VOUGIOUKAS S. Bias estimation and gravity compensation for force-torque sensors[EB/OL]. (2001-12-30)[2001-05-30]. https://www.researchgate.net/profile/Stavros-Vougioukas/publication/253989945_Bias-Estimation_and_Gravity_Compensation_For_Force-Torque_Sensors/links/02e7e529d64238a5b0000000/Bias-Estimation-and-Gravity-Compensation-For-Force-Torque-Sensors.pdf.
- [7] 张立建, 胡瑞钦, 易旺民. 基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(3): 439-447.
- ZHANG Lijian, HU Ruiqin, YI Wangmin. Research on force sensing for the end-load of industrial robot based on a 6-axis force/torque sensor[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(3): 439-447.
- [8] 黄玲涛, 王彬, 倪水, 等. 基于力传感器重力补偿的机器人柔顺控制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 386-393.
- HUANG Lingtao, WANG Bin, NI Shui, et al. Robotic compliant control based on force sensor gravity compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 386-393.
- [9] 张昱东. 基于六维力传感器的机器人力控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- ZHANG Yudong. Research on robot control method based on six-dimensional force sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [10] 刘运毅, 黎相成, 黄约, 等. 基于极大似然估计的工业机器人腕部6维力传感器在线标定[J]. 机器人, 2019, 41(2): 216-221, 231.
- LIU Yunyi, LI Xiangcheng, HUANG Yue, et al. Online calibration for the 6-axis force sensor in the wrist of industrial robot based on maximum likelihood estimation[J]. Robot, 2019, 41(2): 216-221, 231.
- [11] 周建斌. 基于力反馈的抛光打磨工业机器人系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- ZHOU Jianbin. Research on the system of polishing for industrial robot through force-feedback[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [12] 王品章, 田威, 曾致贤, 等. 叶片磨抛机器人力/位混合控制的设计与实现[J]. 航空制造技术, 2019, 62(11): 83-89, 96.
- WANG Pinzhang, TIAN Wei, ZENG Zhixian, et al. Design and implementation of force/position hybrid control for blade grinding and polishing robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(11): 83-89, 96.
- [13] ZHANG H Y, LI L, ZHAO J B, et al. The hybrid force/position anti-disturbance control strategy for robot abrasive belt grinding of aviation blade base on fuzzy PID control[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(11-12): 3645-3656.
- [14] HE W, DONG Y T, SUN C Y. Adaptive neural impedance control of a robotic manipulator with input saturation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(3): 334-344.
- [15] PENG G, CHEN CLP, HE W, et al. Neural-learning-based force sensorless admittance control for robots with input deadzone[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 5184-5196.
- [16] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, 103(2): 126-133.
- [17] SONG P, YU Y Q, ZHANG X P. A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation[J]. Robotica, 2019, 37(5): 801-836.
- [18] ZHOU H B, MA S T, WANG G L, et al. A hybrid control strategy for grinding and polishing robot based on adaptive impedance control[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(3): 168781402110040.

Research on Contact Force Impedance Control Method of Blisk Grinding and Polishing Robot

LI Lun^{1,2}, WANG Zhengjia^{1,2,3}, ZHAO Jibin^{1,2}, ZHU Guang^{1,2}, ZHANG Hongyao^{1,2,3}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[ABSTRACT] In order to realize the automatic grinding and polishing technology of blisks, the contact force in the grinding and polishing process was analyzed, and a new load calibration and compensation algorithm based on zero drift was proposed by combining the static calibration of load with the online calibration of sensor zero point. It is applied to the grinding and polishing of blisks in combination with the position-based impedance control. The experimental results of load calibration and compensation show that with the passage of time, the average error of contact force calculated by traditional gravity calibration changes from -0.12853N and $0.0055\text{N} \cdot \text{m}$ to -1.9826N and $-0.1680\text{N} \cdot \text{m}$. However, it decreases to -0.1532N and $0.0083\text{N} \cdot \text{m}$ after the on-line calibration of sensor zero point. It is proved that the algorithm can effectively reduce the influence of sensor zero drift on contact force acquisition. Meanwhile, the force control experiment shows that the combination of the algorithm and the position-based impedance control can effectively track the desired contact force and improve the surface quality of blisk.

Keywords: Blisk; Grinding and polishing; Zero shift; Load calibration; Compliance control; Impedance control

(责编 古京)

(上接第 49 页)

Effect of Surface Structure on Grinding Performance of Internal Cooling Grinding Wheel

PENG Ruitao^{1,2}, GAO Shan¹, CHEN Meiliang¹, LIU Bo³

(1. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Engineering Research Center of Complex Track Processing Technology & Equipment, Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

3. AECC Hunan Aviation Powerplant Machinery Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] Aiming at the overheating and low machining efficiency problems in grinding superalloys, an internal cooling grinding wheel with a replaceable abrasive ring is proposed. To improve the flow characteristic and heat transfer performance of fluid in the grinding arc zone, surface structure of the ring and the internal flow channel outlet shape are designed based on the sunflower seed phyllotaxis configuration model. The flow field distribution model in grinding arc zone is established based on the computational fluid dynamics (CFD) method, finally the grinding tests of superalloy are carried out. Results indicate that abrasive cluster of phyllotaxis configuration leads to enhanced flow and cooling characteristics, compared with the circular flow channel, better cooling and lubrication effects are obtained by the rectangular flow channel, and the heat exchange efficiency is more remarkable as the grinding speed increases. Average grinding temperature and surface roughness of the workpiece are reduced by 24.12% and 18.50% respectively, and the machined surface morphology is smoother and more regular.

Keywords: Internal cooling; Phyllotaxy configuration; Flow channel outlet; Grinding temperature; Surface quality

(责编 古京)