

叶片磨抛机器人力/位混合控制的设计与实现*

王品章, 田 威, 曾致贤, 张 霖, 李 波

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 为提高航空类发动机叶片的自动化磨抛精度,减小复杂曲面叶片加工轨迹控制误差,采用基于六维力传感器的机器人力/位混合控制策略,实现机器人磨抛轨迹的在线修正。搭建以 Staubli 机器人和 ATI 六维力传感器为核心部件的叶片磨抛验证平台,通过 C++ 开发上位机,采集磨抛过程中六维力传感器信息并进行 Kalman 滤波。通过示教确定机器人运动轨迹,对机器人运动轨迹与力传感器信息进行采集分析,确定基于力/位混合控制可以实现机器人运动轨迹的在线修正,为复杂曲面的叶片磨抛轨迹控制提供一种解决方案。

关键词: 六维力传感器; 叶片磨抛; Kalman 滤波; 力/位混合控制; 轨迹修正

Design and Implementation of Force / Position Hybrid Control for Blade Grinding and Polishing Robot

WANG Pinzhang, TIAN Wei, ZENG Zhixian, ZHANG Lin, LI Bo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to improve the grinding and polishing precision of aero-engine blades and reduce the trajectory deviation of complex curved blades, the hybrid force/position control strategy was adopted to realize on-line correction of grinding and polishing trajectory. A blade grinding and polishing verification platform was built which based on Staubli robot and ATI six-axis force/torque sensor. The upper computer was developed by C++ to collect the information of force sensor and preform Kalman filter. Through the trajectory teaching, the robot trajectory and force/torque information were collected and analyzed. It is turn out that the trajectory of the robot can be corrected online based on the force/position hybrid control, which provides a solution for the trajectory control of blade grinding and polishing on complex curved surfaces.

Keywords: Six-axis force/torque sensor; Blade grinding and polishing; Kalman filter; Hybrid force/position control; Trajectory correction

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.083

近年来随着我国航空事业的飞速发展,高精度复杂零件的加工对我国的航空制造业的发展提出了较高的要求。航空发动机作为飞机的“心脏”,受世界各国高度重视。而我国的航空发动机目前主要依赖进口,其生产制造水平与国外先进水平相比存在明显差距,严重制约着我国大飞机制造行业的发展。

叶片作为航空发动机的核心零部件,有着高精度、多类别、小批量的生产特点,且每台航空发动机中将近 3000 片叶片的机械加工量占发动机总机械加工量的 30%~50%^[1]。叶片加工型面多是不规则的自由曲面,导

致叶片的自动化磨抛难度增大。叶片磨抛的关键是其前后缘部分的磨抛,前后缘即为叶片的进气口和出气口,且发动机运行过程中的最大弯曲应力就作用在叶片的前后缘,从而导致其极易损坏。为满足叶片前后缘的使用要求,通常其表面粗糙度不大于 $0.4\mu\text{m}$,表面轮廓度误差不大于 0.08mm ^[2]。针对叶片刚性差、加工精度要求高的特点,对其进行自适应磨抛控制方法的研究显得尤为迫切^[3]。

国外的 Mason 和 Raibert 等提出的力/位混合控制方法通过选择矩阵将加工任务分解为力控制和位置控制。Hamelin 等^[4]将滑模控制引入水下磨削机器人,系统轨迹跟踪精度得到提高。Jinno 等^[5]提出一种将力信

* 基金项目: 国家自然科学基金(5187051641)。

号转换为机器人位姿信息的力矩控制方法,提高了机器人轨迹控制精度。在应用方面,芬兰的 ORAS 公司和日本的 MOTOMAN 公司将机器人自动磨抛应用于水暖管件的磨抛加工,希腊的 ZENON 公司通过机器人磨抛系统实现了叶片缺损部位的修复。国内的李正义通过采集力、力矩和机器人位姿信息实现了机器人力/位混合控制。谭福生等^[6]提出 PI 和基于规则的控制策略,并通过实际力与期望力的差值实现机器人位姿和速度的修正。国内的机器人磨削系统应用目前处于初步阶段,廊坊智通机器人有限公司自主研发了集交互系统、三维测量和多磨抛工位为一体的机器人叶片磨抛系统,用于叶片等复杂型面工件磨抛加工。

综上所述,随着机器人控制技术的不断发展与完善,力/位混合控制在叶片等复杂曲面工件的磨抛加工中拥有良好的应用前景。本文基于力/位混合控制方法对机器人轨迹的在线修正进行试验验证,为机器人的叶片磨抛提供一种加工方案。

1 磨抛系统组成

机器人叶片磨抛系统(图 1)主要由工业机器人、控制柜、控制系统、叶片、六维力传感器、砂带机和变频器组成。其中工业机器人采用 Staubli Rx90 机器人,将机器人控制柜与上位机控制系统建立连接,通过控制系统发送信号直接控制机器人。ATI GAMMA IP60 六维力传感器安装在机器人法兰盘末端,通过上位机采集磨抛力信息,并对力信息进行滤波、重力补偿等处理。根据不同磨抛性能需求,设置 3 台磨抛砂带机,分别对叶片进行粗磨、半精磨和精磨加工,通过变频器控制砂带机转速,并集成于控制系统。

2 滤波器的设计

卡尔曼滤波主要包括两个量:预测量与观测量^[7-9]。预测量是上一时刻的预测量加上系统控制量和系统预

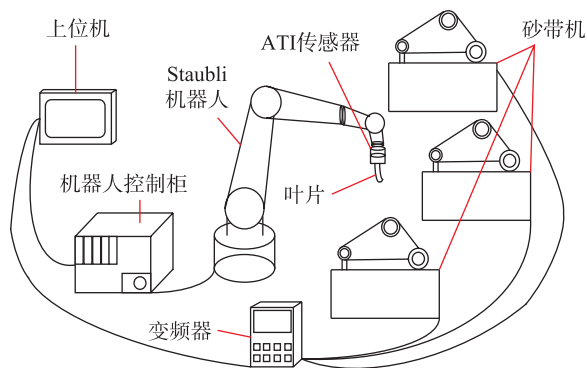


图1 机器人叶片磨抛系统
Fig.1 Blade grinding and polishing robot system

测噪声;观测量是采用传感器直接在本时刻采集的信号加上传感器和系统本身的噪声。

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \tag{1}$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \tag{2}$$

式中, x_k 代表 k 时刻下的系统磨抛力的状态值; F_k 代表作用于 k 时刻下的磨抛力状态变换模型; B_k 是作用于系统输入量 u_k 的控制模型; 观测模型 H_k 将真实状态空间映射为观测空间; z_k 是通过传感器测得的当前时刻下磨抛力; w_k 和 v_k 分别为预测量和观测量的噪声,且均服从于高斯分配(Gaussian Distribution),其方差分别为 Q_k 和 R_k 。

本试验中没有加入输入量作为控制信号,因此预测过程的两个主要公式为:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} \tag{3}$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \tag{4}$$

式中, $\hat{x}_{k|k-1}$ 是上一时刻对现在时刻的预测状态估计; $\hat{x}_{k-1|k-1}$ 是上一时刻的最优预测值估计; $P_{k|k-1}$ 代表误差估计协方差矩阵; $P_{k-1|k-1}$ 是上一时刻的误差估计协方差矩阵。

Kalman 滤波的更新过程可通过式(5)表示:

$$\begin{cases} \tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \\ S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \\ K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \\ \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \\ P_{k|k} = (E - K_k H_k) P_{k|k-1} \end{cases} \tag{5}$$

\tilde{y}_k 、 S_k 、 K_k 、 $\hat{x}_{k|k}$ 和 $P_{k|k}$ 分别表示磨抛力测量更新、磨抛力测量协方差更新、卡尔曼增益、力信息更新状态估计和更新的协方差矩阵估计。

Kalman 滤波迭代过程主要分为力信息的迭代、协方差和卡尔曼增益的迭代,其中卡尔曼增益作为两者的桥梁是力信息迭代中的重要一环。而整体的更新过程又可以分为预测更新和测量更新,其更新流程如图 2 所示。

3 机器人系统控制方案

在实际的叶片磨抛过程中,由于空间定位误差、机器人控制精度和叶片表面的加工误差等因素,实际轨迹与理想轨迹存在偏差,导致叶片磨抛精度降低。为提高磨抛精度,采用基于力/位混合控制的机器人轨迹在线修正方案^[10]。

3.1 磨抛过程受力分析

为了实现磨抛的力位混合控制,需要对叶片的磨抛过程进行受力分析,如图 3 所示。磨抛过程中叶片所受

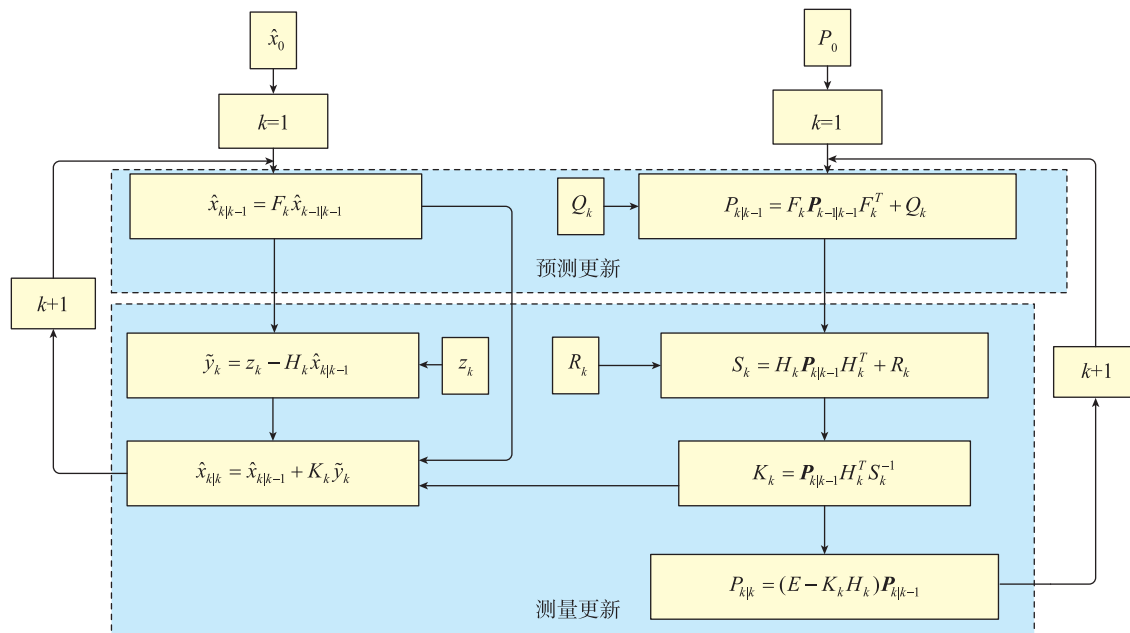


图2 卡尔曼滤波流程图

Fig.2 Flow chart of Kalman filter

的磨抛总力为 F , 将其分解为与砂带轴向相同的轴向力 F_a 、与接触面相垂直的法向力 F_n 以及沿砂带接触面垂直向下的切向力 F_f 。其中轴向力 F_a 通常较小且对磨抛深度影响不大, 切向力 F_f 为叶片与砂带之间摩擦产生的力, 其大小主要与所选的砂带种类、叶片材料等因素相关; 法向力 F_n 一般作为衡量磨抛量大小的主要作用力, 且 F_n 一般为 F_f 的 1.5~3 倍。

传感器的运动曲线与叶片表面轮廓相同, Z 轴始终与曲线相切。假设某一磨抛点的力传感器与接触点之间的距离为 L , 且力传感器坐标系 Z 轴与工具坐标系 Z 轴始终保持同向, 将磨抛点受力状态投影到力传感器的 xy 平面中, 磨抛法向力 F_n 与此状态下的力传感器坐标系 X 轴之间夹角为 θ , 且已知叶片磨抛起始点传感器坐

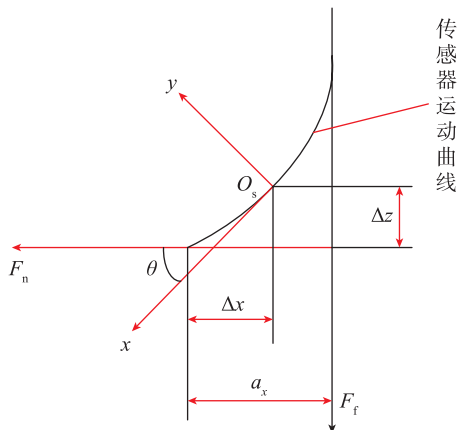


图3 磨抛受力分析

Fig.3 Force analysis of grinding and polishing

标系原点到磨抛接触点的距离为 a_x , 由于法向力 F_n 比较小, 因此将其忽略, 对传感器进行受力分析得到:

$$\begin{cases} F_x = F_n \cos \theta + F_f \sin \theta \\ F_y = F_n \sin \theta - F_f \cos \theta \\ F_z = 0 \\ T_x = F_n \sin \theta \cdot l - F_f \cos \theta \cdot l \\ T_y = -F_n \cos \theta \cdot l - F_f \sin \theta \cdot l \\ T_z = -F_n (a_x - \Delta x) - F_f \cdot \Delta z \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)中 F_x 和 F_y 进行联立求解:

$$F_n = F_x \cos \theta + F_y \sin \theta \quad (7)$$

得到法向力与力传感器采集的力信息之间的关系。而式(7)中的 θ 可以通过分析力传感器采集的力矩信息得到, 假设法向力与切向力之间的关系为:

$$F_n = \lambda F_f \quad (8)$$

则 T_x 和 T_y 变为:

$$\begin{cases} T_x = \frac{F_n l}{\lambda} \cdot (\lambda \sin \theta - \cos \theta) \\ T_y = \frac{F_n l}{\lambda} \cdot (\lambda \cos \theta + \sin \theta) \end{cases} \quad (9)$$

结合三角函数和差公式进行化简得:

$$\begin{cases} T_x = \frac{-F_n l \cos(\theta + \varphi)}{\sin \varphi} \\ T_y = \frac{-F_n l \sin(\theta + \varphi)}{\sin \varphi} \end{cases} \quad (10)$$

联立 T_x 和 T_y 得:

$$\theta = \arctan\left(\frac{T_y}{T_x}\right) - \varphi \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)中即可通过分析六维力传感器采集的力信息得到实际磨抛力信息,并以此为基础进行力位混合控制。

3.2 力/位混合控制

机器人的力/位混合控制主要分为位置控制环和力控制环^[11],通过离线编程确定机器人期望轨迹和期望磨抛力,经过约束矩阵 S 、 $I-S$ 实现力和位置的同时控制。

机器人当前位姿信息与期望轨迹进行对比,形成位置控制环;力传感器反馈的磨抛力信息与期望力进行对比,形成力控制环。两个控制环将反馈信息转换成机器人轨迹调整量发送给机器人,实现基于力/位混合控制的机器人磨抛轨迹的在线修正,其控制原理流程如图4所示。

3.3 融合速度伺服的力/位混合控制

本方案中采用的是史陶比尔 TX 系列机器人,其控制系统的运行周期为 4ms,提供的 Alter 开发包可以在机器人原始轨迹上做出一定范围的轨迹调整。由于发动机叶片的加工特点使其在磨抛过程中对机器人轨迹的控制精度提出较高要求,因此控制系统需要在短时间内对力信息进行处理,并转换成机器人点位信息,实现轨迹的在线修正。为了能够提高机器人的反应速度,在原有的力/位混合控制模型中加入速度伺服^[12],形成以力控制环、位置控制环和速度控制环为核心的系统控制方案。

力传感器采集的六维力信息经过旋转矩阵 R 进行坐标转换,通过力控制环得到适合的位姿调整量;上位机将机器人当前位姿信息和速度 x 、 y 、 z 、 r_x 、 r_y 、 r_z 、 v 反馈给控制系统,通过位置控制环与机器人期望位姿信息对比,得到机器人轨迹调整量;速度控制环通过对比期望速度和实际速度、期望力和实际磨抛力,确定速度的调整量。通过上位机将调整信息发送给机器人,并过逆运动学计算转换成每个轴的旋转角度,完成机器人磨抛

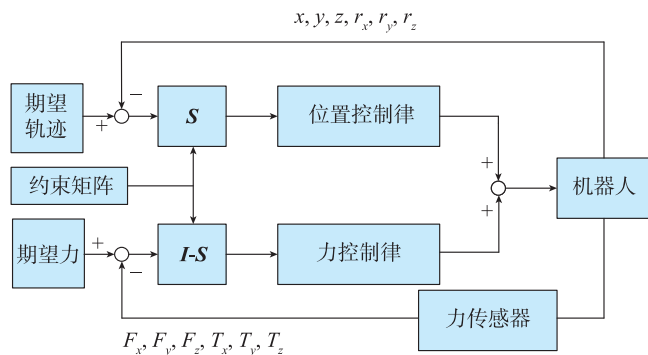


图4 力/位混合控制原理流程图

Fig.4 Flow chart of force / position hybrid control principle

轨迹的在线修正。

3.4 速度控制模型

速度控制模型主要分为3个阶段的速度变化,其示意图如图5所示。以期望力 F_d 为中心,并设置阈值 δ ,当实际受力与期望力的差值在区间 $[0 \pm \delta]$ 内时,机器人按照期望速度 V_d 进行运动。当差值大于 δ 时,机器人实际运动速度 V_e 遵循以下变化:

$$\begin{cases} V_e = \frac{k_1 F_e}{F_d} V_d & F_e < F_{stop} \\ V_e = 0 & F_e \geq F_{stop} \end{cases} \quad (12)$$

式中, k_1 为正调整系数,调整机器人运动最大速度不超过 100%; F_{stop} 为急停点,当实际力与期望力之间的差值大于 F_{stop} 时,认为加工轨迹或力传感器出错,机器人急停。

同理,当差值小于 $-\delta$ 时, V_e 遵循以下变化:

$$\begin{cases} V_e = \frac{k_2 F_d}{F_e} V_d & F_e > 0 \\ V_e = V_d & F_e = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, k_2 为负调整系数,实际磨抛力 F_e 是经过零点标定与重力补偿后的值。当 F_e 的值为 0 时,认定叶片没有接触砂带,此过程中机器人始终按照期望速度 V_d 进行运动。

4 试验结果与讨论

4.1 Kalman滤波验证

为验证 Kalman 滤波对 ATI 六维力传感器的滤波效果,搭建试验平台,如图6所示,并分别采集受力状态下和静止状态下的力传感器数据进行对比。机器人保持某一规定姿态不变,分别通过上位机采集两组数据,一组是静止状态下力传感器数据,另一组是模拟机器人磨抛加工过程中的受力状态下力传感器数据。在 Matlab

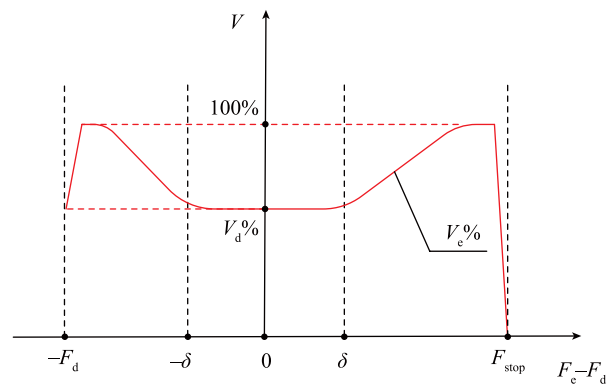


图5 速度控制变化过程示意图

Fig.5 Schematic diagram of speed control change process

中按照图2中卡尔曼滤波的流程编写滤波程序,各选取100组受力状态较明显的 F_x 、 F_z 、 T_x 和静止状态下的 F_y 、 T_x 、 T_y 进行滤波对比。

根据磨抛过程中的受力分析,要实现机器人轨迹的力位混合控制主要是针对磨抛法向力 F_n 做调整,在保证力信息的敏感性的基础上对其进行Kalman滤波,选取力信息的预测协方差和观测协方差。根据Kalman滤波的预测和更新流程,要实现对力和力矩信息进行滤波,需设定其力信息的初始状态和预测协方差的初始值,由于Kalman滤波器自身的预测效果,其初始状态值不需要与实际力信息相同,而预测协方差是代表预测的力信息与实际状态误差,因此其不能为0,设置好初始状态后对力和力矩信息进行Kalman滤波并得滤波效果,如图7所示。

从图7(a)、(c)和(f)中可以看出,经过Kalman滤波后力和力矩信息的变化存在一定的滞后,且其峰值也有一定幅度的降低;分析图7(b)、(d)和(e),Kalman滤波能够消除力传感器自身的信号波动,且力状态的初始值无论设置为多少,经过Kalman滤波都可以很快达到稳定值。

Kalman滤波器的滤波效果主要由其预测误差 $w_k \sim N(0, Q_k)$ 和测量误差 $V_k \sim N(0, R_k)$ 决定,根据滤波的流程,卡尔曼增益的大小主要由两者的差值决定,而卡尔曼增益决定了当前状态下力信息与上一刻力信息、实际测量值之间的关系。而为了实现力位混合控制,滤波器需在保证对力信息变化的敏感性基础上消除力传感器信号的波动。

4.2 机器人轨迹在线修正

为了实现机器人轨迹在线修正还需要对力传感器和力信息进行重力补偿、负载重心和力传感器零点标定等工作,为了明显看到机器人轨迹修正效果,设定机器

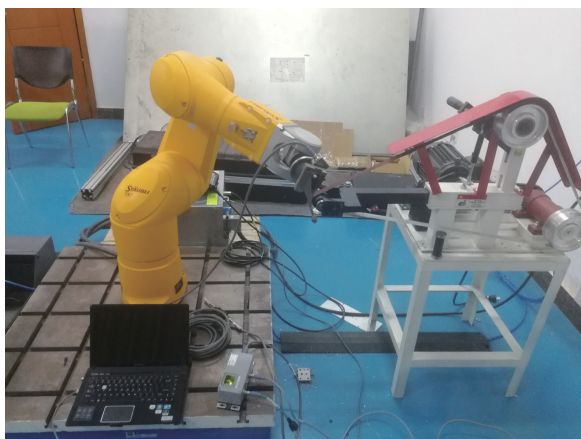


图6 试验平台

Fig.6 Experimental platform

人沿 y 轴单方向运动,为防止机器人短时间内位姿变换过大而导致的机器人超速停止现象,根据机器人各方向最大移动速度分别为机器人 x, y, z, r_x, r_y, r_z 设置最大瞬间调整量。

力位混合控制中力控制率的确定需要结合磨抛力建模、磨抛工艺的轨迹最大瞬间调整量。其最大调整量通过Staubli Robotics Suite (SRS)仿真得出,机器人最大加速度条件下各坐标瞬间调整值不超过2mm或 2° ,即机器人轨迹的瞬间修正量不超过 $\pm 1\text{mm}$ 或 $\pm 1^\circ$,但其调整量可以持续叠加。为防止机器人对力、力矩信息波动过于敏感,分别在方向上设置轨迹修正的最小力矩,并通过上位机采集机器人运动过程中机器人的点位信息与力传感器的力信息,截取机器人运动过程中的100组数据形成折线图(图8)。

从图8(a)和(c)各方向的受力状态与机器人坐标变化可以看出机器人的轨迹波动规律整体与受力状态变化相同。图8(b)中机器人在沿 y 轴进行移动的同时,在 F_y 发生波动的时候机器人能够在原运动方向上做出一定的调整。

图8(d)和(f)中 r_x, r_z 在力的突变较大处轨迹修正量出现持续峰值,这是为防止出现超调量而设置的最大调节量。从图8(e)中可以看出,当 T_y 值大于一定的变化量后, r_y 做出相应修正,当力矩变化小于最小调整值时 r_y 不变。

5 结论

综上所述可以得出以下结论:

(1) Kalman滤波的预测误差 $w_k \sim N(0, Q_k)$ 影响滤波器对力信息的敏感性,当 Q_k 越大滤波效果越不明显, Q_k 越小滤波器对力信息的变化越不敏感,从而无法实现达到力位混合控制的要求;而实际测量误差 $V_k \sim N(0, R_k)$ 越大滤波器的滤波效果越偏向于预测值,越小越偏向于测量值。

(2) Staubli机器人轨迹的瞬间修正量不可大于 $\pm 1\text{mm}$ 或 $\pm 1^\circ$,但坐标 x, y, z, r_x, r_y, r_z 的最大调整量可以叠加,并且原始轨迹的偏移量可以随时间持续叠加。

(3) 采用本文中所提出的方法可以实现基于力位混合控制的叶片磨抛机器人轨迹在线修正,但是机器人的轨迹修正相比于力信息的变化存在一定滞后,因此为了达到较好的轨迹修正效果需要在机器人最大加速度状态下提高控制系统的信息处理速度。

(4) 在实际磨抛过程中为了保证叶片的磨抛精度,轨迹的最大瞬间调整量需通过建模和工艺决定,并消除轨迹的最大调整量限制,保证轨迹修正的可叠加性。

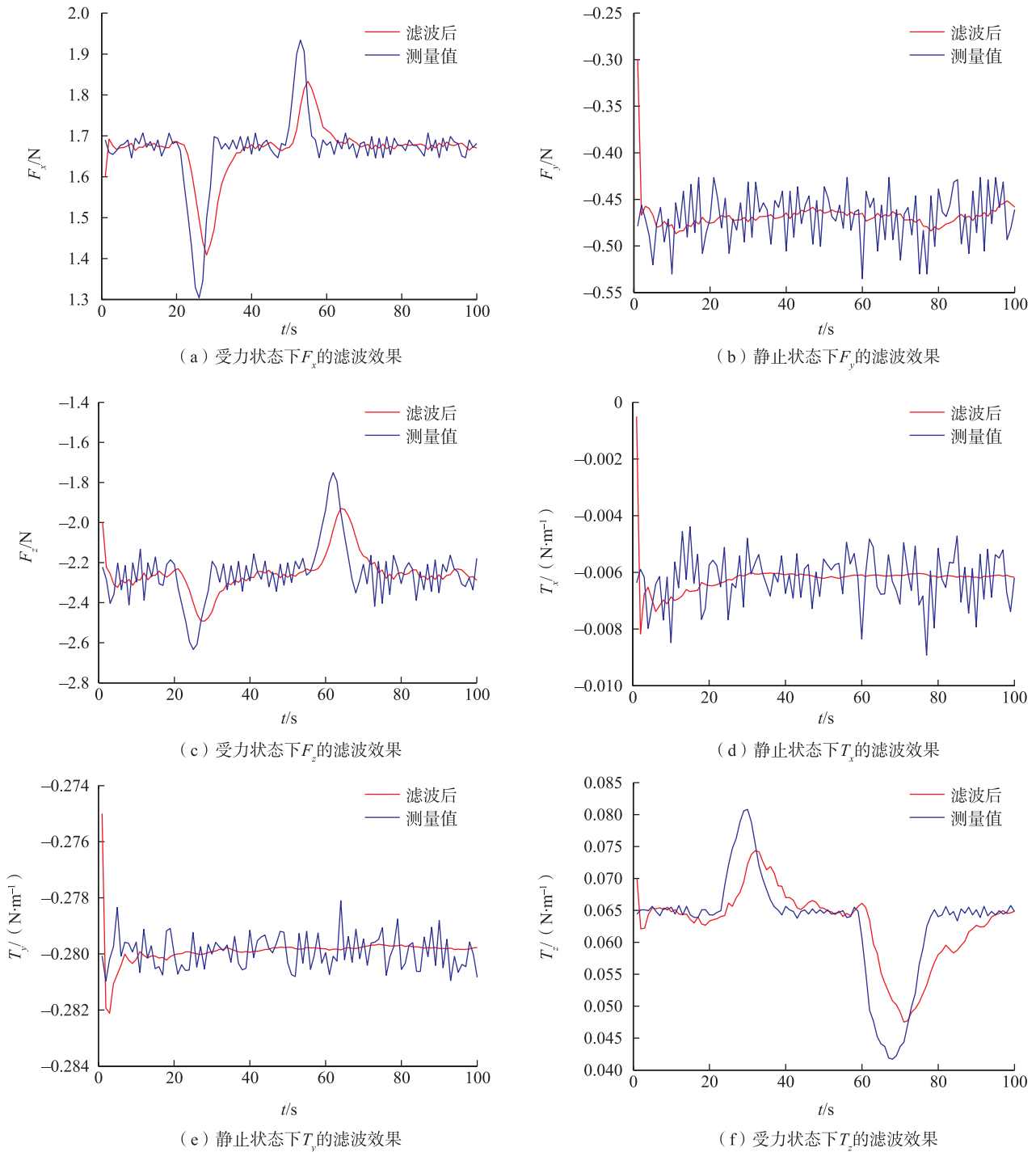


图7 Kalman滤波验证
Fig.7 Kalman filter verification

参考文献

[1] 吴青海. 叶片砂带磨削系统的建立及叶片磨削研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
WU Qinghai. Establishment of belt grinding for blade and research on blade grinding[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.

[2] 张军锋, 史耀耀, 蔺小军, 等. 航空发动机叶片前后缘自由式砂带抛光技术 [J]. 航空学报, 2017, 38(3): 247-255.

ZHANG Junfeng, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Freestyle belt polishing technology for leading and trailing edges of aero-engine blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 247-255.

[3] 张海洋. 叶片砂带磨削机器人轨迹规划与离线编程 [D]. 武

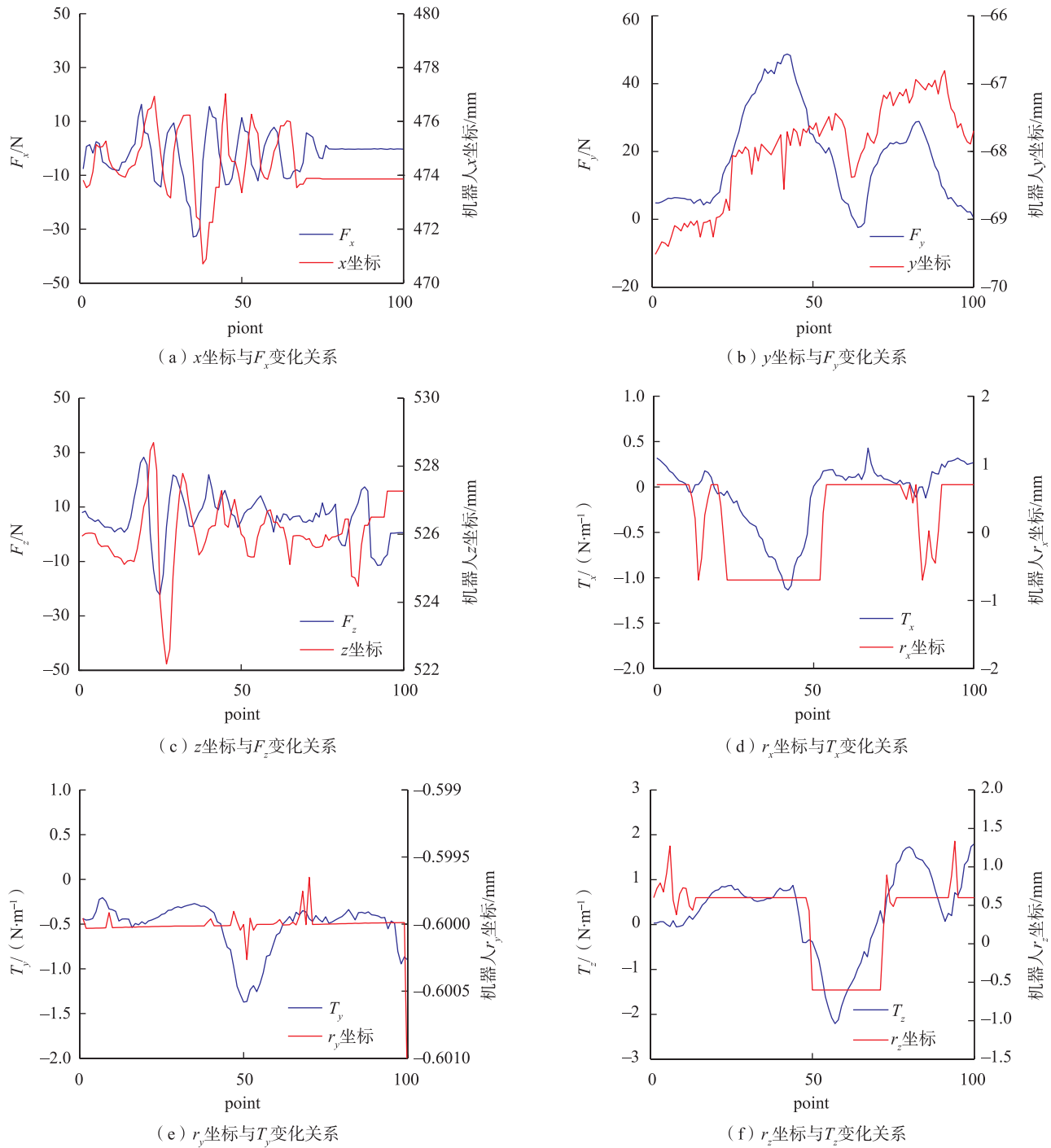


图8 基于力信息的轨迹在线修正
Fig.8 Online correction of trajectory based on force information

汉: 华中科技大学, 2014.

ZHANG Haiyang. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

[4] HAMELIN P, BEAUDRY J, RICHARD P, et al. Sliding-mode control of a direct-drive submersible grinding robot[C]//IEEE/ASME

International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), New York: IEEE, 2010.

[5] JINNO M, OZAKI F, YOSHIMI T, et al. Development of a force controlled robot for grinding, chamfering and polishing[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and (下转至第96页)

且影响程度由高到低依次为: 螺栓拧紧力矩 > 板间摩擦系数 > 螺栓材料弹性模量, 其中螺栓拧紧力矩的影响最为显著, 表明对高锁螺栓施加一次拧紧工艺, 待胶体固化后再施加适当的二次定力以保证螺栓拧紧力矩达到预期值, 是提高机翼盒段典型连接结构疲劳性能的一种有效手段。因此, 针对胶-螺混合型连接结构, 建议在按照现行装配工艺完成初步装配后, 再根据规定拧紧力矩要求施加二次定力, 以提高连接结构的疲劳性能。

参考文献

[1] 张成成, 姚卫星, 叶彬. 连接件疲劳寿命分析的等效 SSF 法 [J]. 航空学报, 2009, 30(2): 271-275.

ZHANG Chengcheng, YAO Weixing, YE Bin. Equivalent stress severity factor approach for fatigue of multi-fastener plate[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 271-275.

[2] 何宇廷, 富贵华, 吴显吉, 等. 载荷偏心对连接件疲劳性能的影响分析 [J]. 应用力学学报, 2002, 19(2): 125-128.

HE Yuting, FU Guihua, WU Xianji, et al. Effect of eccentric load on fatigue behavior of riveted structure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(2): 125-128.

[3] 曹增强, 王武, 杨军. 干涉对复合材料机械连接强度的影响 [J]. 航空制造技术, 2012, 57(12): 62-64.

CAO Zengqiang, WANG Wu, YANG Jun, et al. Effect of interference-fit on failure of composites bolted joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 57(12): 62-64.

[4] 舒文军, 何宇廷, 刘仁宇, 等. 板间摩擦对航空连接件疲劳性能的影响 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 347-350.

SHU Wenjun, HE Yuting, LIU Renyu, et al. Friction effects between plates on fatigue performance of aircraft joints[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(3): 347-350.

[5] 魏冉, 刘龙权, 汪海. 复合材料-钛合金多钉连接结构疲劳试验研究 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(12): 1997-2002.

WEI Ran, LIU Longquan, WANG Hai. Experimental study of the fatigue performance in multi fastener composite-to-titanium single lap joints[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(12): 1997-2002.

[6] HARTSMITH L J. Bonded-bolted composite joints[J]. Journal of Aircraft, 2012, 22(11): 993-1000.

[7] HARTSMITH L J. Design methodology for bonded-bolted composite joints: Technical report AFWAL-TR-81-3154[R]. Wright-Patterson Air Forcebase, Ohio: Flight Dynamics Laboratory /Air Force Wright Aeronautical Laboratories/Air Force Systems Command, 1981.

[8] 孟毛毛, 赵美英, 弥晓亮, 等. 胶-螺混合连接结构强度分析及影响因素研究 [J]. 航空工程进展, 2013, 4(2): 186-192.

MENG Maomao, ZHAO Meiyang, MI Xiaoliang, et al. Analysis of the bonded-bolted hybrid composite joints' strength and influences[J]. Progress in Aeronautical Engineering, 2013, 4(2): 186-192.

[9] KISHI N, AHMED A, YABUKI N, et al. Non-linear finite element analysis of top- and seat-angle with double web-angle

connections[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2001, 12(2): 201-214.

[10] 刘兴科, 李亚智, 刘向东, 等. 金属和复合材料多钉连接钉载分配研究 [J]. 航空工程进展, 2011, 2(2): 193-196.

LIU Xingke, LI Yazhi, LIU Xiangdong, et al. Study on load distribution of multiple-bolted metal to composites joints[J]. Progress in Aeronautical Engineering, 2011, 2(2): 193-196.

通讯作者: 刘马宝, 博士, 教授, 研究方向为飞行器健康管理, E-mail: mliu@xjtu.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第89页)

Automation. New York, 1995.

[6] 谭福生, 葛景国. 力控制技术在机器人打磨中的应用及系统实现 [J]. 上海电气技术, 2008, 1(2): 35-48.

TAN Fusheng, GE Jingguo. Application and system realization of force control technology in robot grinding[J]. Shanghai Electric Technology, 2008, 1(2): 35-48.

[7] 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

LI Zhengyi. Research and application of robot force position control methods for robot environment interaction[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[8] LU X, LIU J T, YU K Y, et al. Pose measurement using quaternion and Kalman filter[J]. High Technology Letters. 2014, 2(4): 131-139.

[9] 罗家洪, 杨会成, 曹会彬, 等. 六维力传感器静态条件下的信号噪声处理 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 378-381.

LUO Jiahu, YANG Huicheng, CAO Huibin, et al. Signal noise processing of six-dimensional force sensor under static condition[J]. Computer Simulation, 2018, 35(1): 378-381.

[10] 柳洪义, 王磊, 王菲, 等. 基于智能预测的力/位混合控制方法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(12): 1365-1368.

LIU Hongyi, WANG Lei, WANG Fei, et al. Hybrid position/force control based on intelligent prediction[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(12): 1365-1368.

[11] YAO Y, HUANG Q J, PENG Y, et al. Hybrid position, posture, force and moment control with impedance characteristics for robot manipulators[C]//2011 IEEE International Conference Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2012.

[12] 张庆伟, 韩利利, 徐方, 等. 基于打磨机器人的力/位混合控制策略研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(7): 884-887.

ZHANG Qingwei, HAN Lili, XU Fang, et al. Research on hybrid position /force control for grinding robots[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012, 39(7): 884-887.

通讯作者: 田威, 博士, 教授, 研究方向为飞机智能装配技术与装备, E-mail: tw_nj@nuaa.edu.cn.

(责编 铃兰)