

超声在机测厚接触力控制方法研究

刘海波, 应扬威, 廉盟, 周连杰, 王永青

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对接触式超声在机自动测厚中可靠接触难题, 提出了超声探头与被测工件之间接触力控制方法, 制定了基于接触力实时反馈的闭环控制策略, 建立法向接触力计算模型, 设计了接触力调控量向机床位移移校正量转化的阻抗模型与接触力滑模变结构控制器, 在 Simulink 环境下对控制模型进行了数值仿真, 验证了算法有效性, 可实现超声在机测厚中恒定接触力精确跟踪控制; 在所研制的测量系统中进行了测量实验, 结果表明超声在机扫描测厚接触力控制误差在 4N 以内, 实现了超声在机自动扫描测量过程中的接触状态保持, 保证超声传感器输出信号稳定, 测厚误差明显减小。

关键词: 超声; 在机测厚; 接触力控制; 薄壁件

Research on Contact Force Control Method of Ultrasonic On-machine Thickness Measurement

Liu Haibo, Ying Yangwei, Lian Meng, Zhou Lianjie, Wang Yongqing

(Ministerial Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In view of the reliable contact problem of contact ultrasonic on-machine thickness measurement automatically, the contact force control method between the ultrasonic probe and the measured workpiece is proposed. The closed loop control strategy based on the real-time feedback of contact force is formulated. The calculation model of the normal contact force is set up. Impedance model for converting the contact force to the displacement correction of the machine and the contact force sliding mode variable structure controller are designed. The numerical simulation of the control model is carried out in the Simulink environment, the effectiveness of the proposed algorithm is verified. The accurate tracking control of the constant contact force in the ultrasonic thickness measurement can be realized. The measurement experiments have been carried out in the developed measuring system. The results show that the control error of the ultrasonic measuring thickness is within 4N, and the contact state in the automatic scanning measurement process is maintained. Output signal of the ultrasonic sensor is stable and the thickness error of the measurement is reduced obviously.

Keywords: ultrasonic; on-machine thickness measurement; contact force control; thin-walled parts

0 引言

超声在机测厚是航空航天领域大型薄壁件厚度测量的可行方案。将超声传感器集成至数控加工装备, 通过控制超声传感器测量运动, 完成零件厚度在机测量, 并将厚度数据在机反馈至加工过程, 以满足零件加工剩余壁厚的控制要求^[1-2]。

接触式超声脉冲测厚主要采用脉冲反射原理, 接触状态直接影响探头—工件间的耦合状态, 不可靠接触状态会引起回波信号多分量耦合, 导致测量结果不可信。因此, 要求传感器与被测表面间保持可靠接触(即保持一定的接触

压力)。然而, 在实际测量中, 被测面形复杂且未知, 导致超声在机扫描测厚过程中传感器与工件之间的接触力难以保持稳定。接触力过大, 会造成被测工件划伤甚至引起薄壁件变形; 反之, 耦合效果不佳, 影响超声回波信号质量。因此, 实施接触力有效控制, 是保证超声在机测厚精度与稳定性的核心难题。

国内外学者和机构针对力/位控制问题进行了大量研究。Hogan 最早提出了阻抗控制的思想, 阐述了阻抗控制的概念, 并且将阻抗控制策略应用到机器人动力学模型分析中^[3]。文献 [4] 提出了自适应控制策略, 该方法对控制系统的位置与环境刚度进行在机预测, 通过调节阻抗参数, 实现对接触力的精确控制。文献 [5] 提出了两种力跟踪策略, 控制模型中引入了较多的参数增加了系统参数的调试难度, 而且控制算法中部分参数初始值的选择缺乏合理依据, 因而在类似的机械手控制模型中难以保证其运动稳定性。Riener 等在机器人主动训练模式的研究中, 设计了阻抗控制器, 并通过实验验证了其有效性^[6]。文献 [7] 中提出了一种结合滑模控制的线性化阻抗控制方案, 该方法将机械手的非线性动力学线性化到需要的目标阻抗, 实现

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-05-10。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB046604)。

作者简介: 刘海波(1983-), 男, 山东济宁人, 硕士生导师, 副教授, 主要从事测量—加工一体化加工技术、精密测量技术方向的研究。

王永青(1969-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士生导师, 教授, 主要从事复杂曲面精密测量和加工、精密装备驱动分析与控制、高速高精度加工及多参数检测方向的研究。

期望力控制的柔顺性, 避免致动器饱和, 在机械手与环境的交互过程中修改期望的轨迹, 在存在干扰和参数不确定的情况下, 也可以顺应外力变化, 达到理想的去毛刺效果。王学林等在农业产品抓取机构的控制方案中, 提出了机械手末端抓取力的跟踪的阻抗控制算法, 建立了果蔬抓取执行器的等效阻抗—导纳模型, 按照不同果蔬的刚度属性调节抓取控制系统系统的阻抗参数, 实现了农业机器人的柔性抓取作业^[8]。李杰等针对机械手接触力控制问题, 提出了接触力的自适应跟踪策略, 根据机械实时力反馈误差对控制位置进行在线修正, 实现了机械手接触力对期望力的跟踪控制, 该方法对补偿误差、外部干扰和环境未知的工作条件下具有一定的鲁棒性^[9]。李成群等提出了砂带恒磨削力补偿机械并对其进行动力学分析^[10]。郭语等提出了双边遥操作系统控制结构, 其跟随端采用基于构建滑模面的阻抗控制策略来实现远程位置跟踪, 该方法具有一定的鲁棒性^[11]。金英莲等在机器人接触作业问题的研究中, 设计了基于阻抗控制策略的自适应阻抗控制器, 利用模态假设的方法对机械臂的运动学方程进行解耦分析, 对控制系统的稳定性进行判定, 达到了机械臂在不规则表面的稳定接触的控制目标^[12]。上述基于力/位模型或阻抗策略的研究方法主要侧重于力学模型的分析或末端执行器的驱动力矩控制算法研究, 未对末端执行器在连续扫描作业下的情况进行充分探讨, 缺少对影响末端执行器不同空间姿态下的法向接触力和摩擦力进行深入研究, 不能够适用于测量过程中连续测量下的快速响应, 并且阻抗控制的力跟踪精度同样也依赖于对环境的精确了解, 还需要阻抗控制策略下增加对系统参数的精确辨识。

虑及测量系统运动特性与外部干扰因素影响, 本文提出一种超声在机测厚接触力控制方法, 对解决超声在机接触式扫描测厚稳定性问题具有积极意义。

1 超声在机测厚接触控制策略

超声在机测厚的测量运动控制系统如图 1 所示。具体控制过程为: 测量装置在机床驱动下沿预设路径匀速运动(控制速度 F), 三维力传感器实时感测接触力, 并计算超声探头与工件表面间的法向接触力, 上位机测控系统根据法向接触力控制机床趋模运动, 动态调整法向接触力, 实现在机扫描测量下超声传感器与被测工件间的稳定接触。

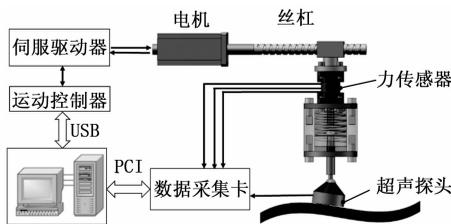


图 1 超声在机测厚控制系统

在测量过程中, 机床以位置偏差为输入, 驱动测量装置产生力输出, 表现出阻抗特性。因此, 制定阻抗控制器外环和位置控制内环串联组成的被测面几何特征自适应超

声在机测厚接触状态控制策略, 如图 2 示。阻抗控制以目标阻抗代替实际动力学模型, 将探头与接触表面之间的法向力偏差 e_f 作为目标阻抗的输入, 阻抗控制环输出的位置校正量 x_f , 结合输入指令位置 x_i , 生成参考指令 x_r 作为内部位置环的输入, 结合位置环控制器, 生成伺服系统的输入指令 u , 使运动轴位移 x 精确跟踪校正后的参考指令位置, 实现扫描测量过程中的接触状态保持, 超声传感器输出稳定的测量信号 y 。

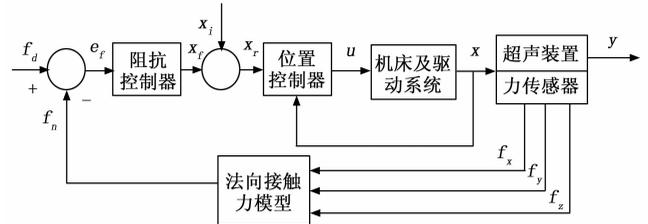


图 2 基于力传感器的力跟踪阻抗控制

2 测量接触控制器设计

2.1 测量接触力

在曲面工件的超声在机连续测厚中, 探头与工件表面之间的接触力大小与方向会随工件局部形貌发生改变。因此, 需要根据力传感器输出的三维力信号, 实时计算获得超声探头与工件表面间的法向接触力。根据扫描方向与局部形貌不同, 法向接触力可分为 2 种情况进行计算, 即爬升阶段与下降阶段, 如图 3 所示。

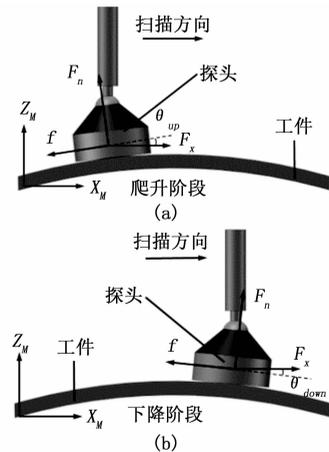


图 3 受力分析

在爬升阶段的法向接触力计算模型为,

$$f_{n_{up}} = \frac{f_z}{\cos\theta_{up} - \mu_u \sin\theta_{up}} \quad (1)$$

$$\theta_{up} = \arctg\left(\frac{\rho_f - \mu_u}{\rho_f \mu_u + 1}\right) \quad (2)$$

在下降阶段的法向接触力计算模型为,

$$f_{n_{down}} = \frac{f_z}{\cos\theta_{down} + \mu_d \sin\theta_{down}} \quad (3)$$

$$\theta_{down} = \arctg\left(\frac{\mu_d - \rho_f}{\rho_f \mu_d + 1}\right) \quad (4)$$

式中, $p_f = \frac{f_x}{f_z}$, f_z 为力传感器 Z_M 轴方向测量值, f_x 为力传感器 X_M 轴方向测量值, μ_u 与 μ_d 分别为探头与工件表面之间在爬升与下降阶段的动摩擦系数, $f_{n_{up}}$ 为爬升阶段的法向接触力, $f_{n_{down}}$ 为下降阶段的法向接触力。

2.2 基于阻抗控制的力一位转化

超声在机测厚系统的阻抗控制是通过建立机床位移校正量和法向接触力之间的关系, 将力/位控制系统等效为“弹簧—质量—阻尼”物理控制模型, 通过调节惯性、阻尼、刚度参数, 实现超声探头与工件之间的法向接触力向位移校正量的转化。机床单轴方向阻抗控制器模型为:

$$m_d \ddot{x}_f + b_d \dot{x}_f + k_d x_f = e_f \quad (5)$$

式中, x_f 为位置校正量, m_d 为目标惯量, k_d 为目标刚度, b_d 为目标阻尼, e_f 为理想法向接触力与实际测量法向接触力差值。

阻抗控制参数 m_d , b_d 和 k_d 可根据最小二乘法进行辨识。将超声测量装置运动系统作为一个辨识环节, 其传递函数为:

$$G(s) = \frac{F(s)}{X(s)} = \frac{1}{m_d s^2 + b_d s + k_d} \quad (6)$$

通过双线性变换:

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (7)$$

式中, z 为 Z 变换运算算子, T 为采样周期。将式 (7) 代入式 (6), 推导得到最小二乘形式的差分方程为:

$$f(n) + 2f(n-1) + f(n-2) = b_0 x_f(n) + b_1 x_f(n-1) + b_2 x_f(n-2) \quad (8)$$

式中, $f(n) = f_d(n) - f_n(n)$, $x_f(n)$ 为系统输出, 利用递推最小二乘法计算得到式 (9) 中各项系统值, 并通过系数 b_0 , b_1 , b_2 的表达式计算得到阻抗参数辨识模型为,

$$\begin{cases} m_d = [T^2 \times (b_0 - b_1 + b_2)]/16 \\ b_d = [T \times (b_0 - b_2)]/4 \\ k_d = b_0/4 + b_1/4 + b_2/4 \end{cases} \quad (10)$$

将机床单轴方向阻抗控制器模型应用于实时力采集系统时, 需要将该模型的微分形式离散化。采用差分替代微分形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = x_f(k) - 2x_f(k-1) + x_f(k-2) \\ \dot{x}_f(t) = x_f(k) - x_f(k-1) \\ x_f(t) = x_f(k) \\ e_f(t) = e_f(k) \end{cases} \quad (11)$$

将式 (5) 中微分项采用式 (11) 替代, 可得阻抗控制器差分方程为,

$$x_f(k) = \frac{2(m_d + b_d)x_f(k-1) - m_d x_f(k-2) - e(k)}{m_d + b_d + k_d} \quad (12)$$

2.3 滑模变结构位置控制

考虑到摩擦与外力干扰等因素, 机械驱动系统在建模过程中不可避免存在误差。传统的控制技术的高速进给运动中难以保证跟踪精度, 导致超声在机测厚中的传感器位

置自适应调整的不精确。滑模控制器属于一类非线性控制策略, 对驱动动力学系统中的不确定性和时变性具有较强的鲁棒性。因此, 将滑模控制用于机械驱动系统位置控制中, 保证超声探头与工件之间接触力精确跟踪控制。以普通机床进给驱动机构为例, 滚珠丝杠驱动系统采用电流方式控制, 如图 4 所示。驱动系统控制微分方程可表示为:

$$J_e \ddot{x}(t) + B_e \dot{x}(t) = u(t) - d(t) \quad (13)$$

$$\text{其中: } J_e = \frac{J}{K_a K_r r_g}, B_e = \frac{B}{K_a K_r r_g}, d(t) = \frac{T_d(t)}{K_a K_r}, T_d(s)$$

是摩擦引起的转矩扰动。

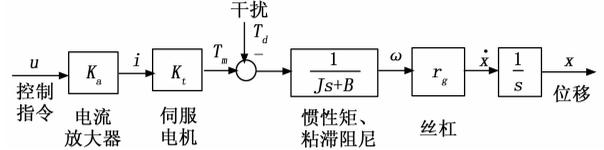


图 4 进给驱动动力学简化模型

滑模控制器的设计主要分为两个基本步骤: 滑动面选择; 建立 Lyapunov 函数。为了精确跟踪高速机床的参考指令位置和速度, 选择滑模控制器为:

$$S = \lambda(x_r - x) + \dot{x}_r - \dot{x} \quad (14)$$

其中: λ 为驱动器理想带宽, x_r , x 为参考位置与实际位置, \dot{x}_r 与 \dot{x} 分别为参考速度与实际速度。系统控制指令 u 必须使位置和速度误差逐步收敛到滑动面 ($S \rightarrow 0$), 即 $x \rightarrow x_r$, $\dot{x} \rightarrow \dot{x}_r$ 。

假设滚珠丝杠的转动惯量 J_e 和粘性阻尼 B_e 变化缓慢, 无需在线参数识别。测量过程的摩擦力外部干扰认为保持在上限 d^+ 与下限 d^- 之间。外部干扰使用观测器进行跟踪:

$$\hat{d} = \rho \kappa S \rightarrow \hat{d}(k) = \hat{d}(k-1) + \rho \kappa S \cdot T \quad (15)$$

其中, T 为控制周期, k 为离散时间域计数, ρ 为参数增益, κ 用于积分控制限制, 使干扰估计保持在预设界限 $[d^-, d^+]$ 以内。

Lyapunov 函数用于获得非线性进给驱动系统的稳定控制律。为保证非线性系统的渐近稳定性, Lyapunov 函数导数必须为负, 保证稳定系统中能量和预测误差不断减小。基于滑模系统的状态运动能量与扰动预测误差, Lyapunov 函数设计为:

$$V(t) = \frac{1}{2} [J_e S^2 + \frac{(d - \hat{d})^2}{\rho}] \quad (16)$$

$$\dot{V}(t) = J_e S \dot{S} - \frac{(d - \hat{d})}{\rho} \dot{\hat{d}} \quad (17)$$

将式 (13-15) 代入, 可得:

$$\dot{V}(t) = J_e S [\lambda(\dot{x}_r - \dot{x}) + \ddot{x}_r] + SB \dot{x} - Su + Sd - S\kappa(d - \hat{d}) \quad (18)$$

式中 $Sd - S\kappa(d - \hat{d}) = S\hat{d} + S(d - \hat{d})(1 - \kappa)$, 根据方程 (17) 可得 $S(d - \hat{d})(1 - \kappa) \leq 0$, 则采用下列准则可保证渐近稳定 $\dot{V}(t) < 0$ 。

$$J_e S [\lambda(\dot{x}_r - \dot{x}) + \ddot{x}_r] + SB \dot{x} - Su + S\hat{d} = -K_s S^2 \quad (19)$$

其中: $K_s > 0$ 为反馈增益, 控制律 u 可表达为:

$$u(k) = J_e [\lambda(\dot{x}_r(k) - \dot{x}(k)) + \ddot{x}_r(k)] +$$

$$B\dot{x}(k) + \hat{d}(k) + K_s S(k) \quad (20)$$

其中：根据数控系统命令获得参考位置 $x_r(k)$ ，速度 $\dot{x}_r(k)$ ，加速度 $\ddot{x}_r(k)$ 。实际位置 $x(k)$ 可以通过光栅尺测量获得，求导获得实际速度 $\dot{x}(k)$ 。整体滑模变结构位置控制器方案如图 5 所示。

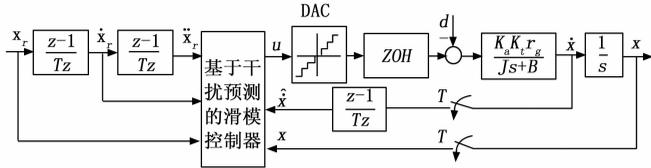


图 5 滑模跟踪位置控制方案

3 仿真分析

对超声测量系统模型以及接触力控制算法进行仿真实验。建立一个典型的 S 型被测曲面，长度与高度分别为 250 mm 和 50 mm；超声探头与铝合金材质表面的摩擦系数设定为 0.2；采用截面线扫描方式，每条截面线的测量均在 X_M-O-Z_M 平面。图 6 为虚拟被测表面的截面线，与相应的预设测量轨迹。

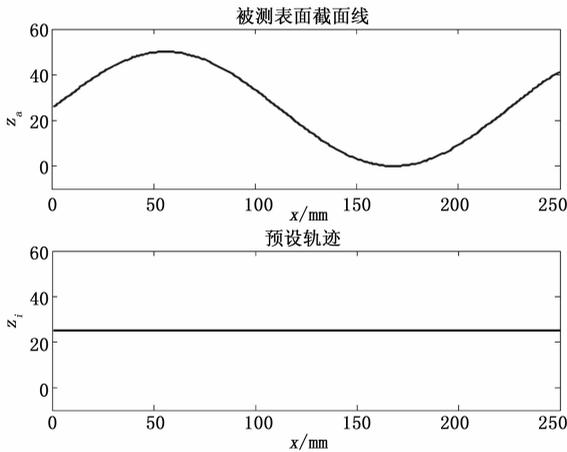


图 6 被测表面截面线与预设测量轨迹

在仿真实验中，扫描速度设置为 25 mm/s，设定法向力控制目标 $f_d = 50$ N，在 10 s 内进行数值仿真。控制器参数在仿真实验过程中调整，最终确定如下：

基于阻抗与滑模变结构控制的超声在机扫描仿真实验结果如图 7 所示。从仿真结果中可以看出，扫描测量时，机床随动轴可以根据被测面形自适应调整，控制测量装置与被测曲面工件之间保持法向接触力在 45~55 N 之间。

图 8 给出了运用阻抗结合 PID 控制算法与所提出的改进型滑模变结构控制算法对整个被测模型表面测量中的控制误差曲线。两种算法控制下的法向接触力形成了对比：提出的新型控制算法具有更稳定的控制效果，误差在 5 N 以内。

4 超声在机测厚接触控制综合实验

超声在机扫描测量以卧式铣削机床作为测量平台，现场实验装置与测量工件如图 9 所示。机床 X_M 轴行程为 1 100 mm， Y_M 轴行程为 650 mm， Z_M 轴行程为 600 mm。实

表 1 控制器参数

进给驱动	
放大器 K_a [A/V]	6.4898
电机 K_t [N·m/A]	0.4769
转动惯量 J [kg·m ²]	7.8715×10^{-3}
阻尼 B [(kg·m ²)/sec]	19.8×10^{-3}
丝杠 r_g [mm/rad]	1.5915
滑模控制器	
滑模面带宽 λ [rad/sec]	200
反馈增益 K_s [V/(mm/sec)]	0.3
干扰增益 ρ [V/mm]	30
阻抗控制器	
惯量参数 m_d [kg]	0.5
阻尼参数 b_d [N·s/m]	500
刚度参数 k_d [N/m]	2000

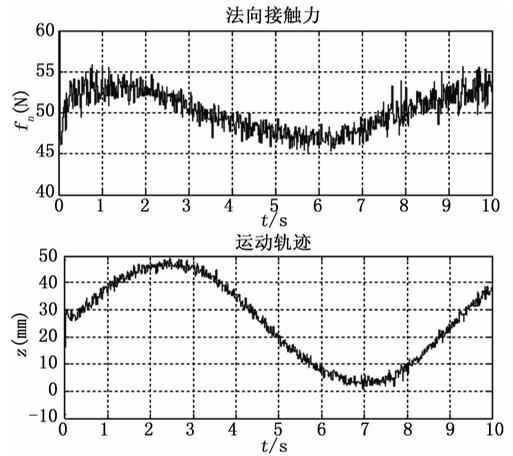


图 7 超声在机扫描控制仿真结果

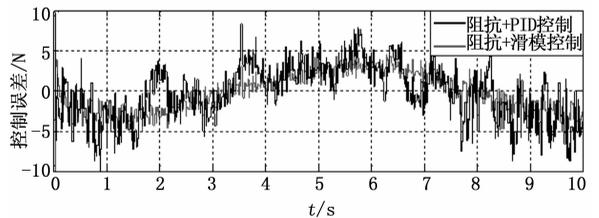


图 8 控制误差对比

验所用工件为 1 200 mm×800 mm 铝合金圆弧件，表面曲率半径为 4 000 mm。超声在机扫描运动控制系统上位机为研华 IPC-610L 工控机，力信号测量采用 KISTLER 三维力传感器， X_M 、 Y_M 方向测量范围均为 0~500 N， Z_M 方向测量范围为 0~3 000 N，测量精度为 1 N。采用 16 位 PCI-1716 采集卡对力数据进行采样。测厚系统的执行装置可直接安装在机床主轴上，以完成零件厚度的在机扫描测量。采样获得的超声信号和力信号，通过 PCI 总线传送至上位机，进行接触状态控制，同时计算超声回波声时差，得到最终的厚度测量结果。

采用最小二乘法闭环辨识出的阻抗系统的主要参数为 $m_d = 0.456$ kg， $b_d = 480.8$ N·s/m， $k_d = 2 390$ N/m。在机

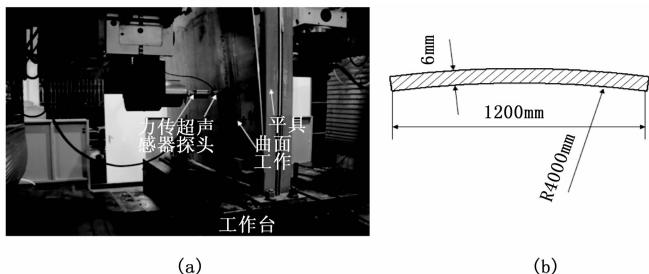


图 9 实验现场图

测量实验中, 测厚装置沿数控程序设定的轨迹沿 X_M 轴方向连续扫描, 扫描过程装置越过工件隆起区域, 初始接触力为 0 N, 扫描行程为 450 mm, 扫描进给速率为 25 mm/s, 力数据采样频率为 50 Hz, 在恒力控制作用前后, 分别对工件表面进行扫描测量, 并采集两种模式下的力反馈信号, 计算法向力, 实验结果如图 10 所示。蓝色曲线代表测量扫描中未进行恒力控制的法向力输出, 红色曲线为恒力下控制的法向力输出。由图 10 中可看出, 采用的恒力控制算法可使装置快速地跟踪期望的设定力, 系统上升时间为 0.48 s, 与设定法向力 50 N 相比, 法向力误差控制在 4 N 以内。

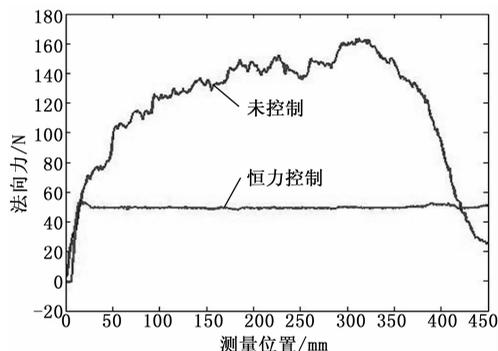


图 10 接触力控制曲线

沿扫描轨迹线上均匀选取了九个点, 分别在未作用法向恒力控制下与法向恒力控制下对标记点进行超声测厚。图 11 为恒力控制作用前后标记点的厚度测量结果以及对应的误差。

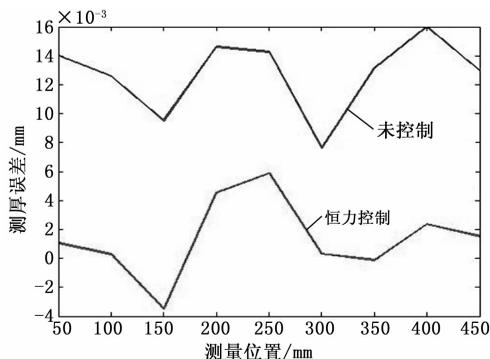


图 11 法向恒力控制作用前后测厚结果

厚度测量结果显示, 恒力控制下厚度测量结果的平均误差为 2 μm ; 未施加恒力控制下的测厚平均误差为 12 μm 。通过以上数据对比分析可知, 在恒力控制系统下, 超声测

厚误差小, 证明了恒力控制系统提高了超声在机测厚装置的接触稳定性。

5 结论

本文提出了一种基于阻抗控制器和位置控制器串联组成的超声在机测厚接触力控制方法。该方法中根据力传感器输出的三维力信号, 建立法向接触力计算模型; 将力/位控制系统等效为“弹簧—质量—阻尼”物理控制模型, 建立机床位移校正量和法向接触力之间的关系; 考虑到摩擦与外力干扰、机械驱动系统建模误差等因素, 设计了基于滑模变结构的位置控制器, 实现超声在机测厚中的传感器位置自适应调整的精确控制。仿真结果表明, 基于该恒力控制算法可以实现良好的曲面超声在机实时跟踪扫描性能, 并与传统方法相比具有较强的鲁棒性。实验结果表明, 曲面零件的超声在机测厚过程中, 超声测厚装置可以快速地调整到目标值, 并维持法向力恒定稳定状态, 保证超声在机测量精度。

参考文献:

- [1] Liu H B, Wang Y Q, Jia Z Y, et al. Integration strategy of on-machine measurement (OMM) and numerical control (NC) machining for the large thin-walled parts with surface correlative constraint [J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80 (9-12): 1721-1731.
- [2] 王世刚, 付宜利. 基于加工中心的在线检测技术的研究 [J]. *制造技术与机床*, 2007 (4): 123-125.
- [3] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part—I theory [J]. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1985, 107 (4): 481-9.
- [4] Seraji H, Colbaugh R. Force tracking in impedance control [J]. *Robotics Research*, 1997, 16 (1): 97-117.
- [5] Seraji H, Colbaugh R. Force Tracking in Impedance Control [J]. *Robotics Research*, 1993, 16 (1): 97-117.
- [6] Riener R, Lünenburger L, Jezernik S, et al. Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results. [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering*, 2005, 13 (3): 380-394.
- [7] Bae G W, Fernandez B, Everett L J. Robust impedance control of robot manipulators [A]. *ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition [C]*. American Society of Mechanical Engineers, 1991: 605-610.
- [8] 王学林, 肖永飞, 毕淑慧, 等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (1): 58-63.
- [9] 李杰, 韦庆. 基于阻抗控制的自适应力跟踪方法 [J]. *机器人*, 1999, 21 (1): 23-29.
- [10] 李成群, 负超, 张习加, 等. 机器人柔性磨削机床的恒磨削力补偿机构及其动力学分析 [J]. *机械科学与技术*, 2008, 27 (6): 701-705.
- [11] 郭语, 孙志峻. 基于扰动观测器的时延双边遥操作系统鲁棒阻抗控制 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48 (21): 15-21.
- [12] 金英连, 王斌斌, 方水光. 未知环境下柔性二连杆机械臂的自适应阻抗控制 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25 (17): 2351-2355.