

Development of Cutting Force Intelligent Sensing Tool Bar for Deep Hole Machining

Jing Ma Zhicong Zhang Guowei Lan Hongjun Zhou Xianyu Pan

School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang, 150080, China

Abstract

Deep hole parts are widely used in the fields of aerospace, military industry and energy equipment as the key parts. However, it is difficult to monitor the cutting state and machining quality of the tool in the closed environment. Based on this reason, this paper proposes a cutting force sensing intelligent tool bar for deep hole machining, and verifies its performance through experiments. The developed cutting force monitoring system has good compatibility, high precision and good dynamic characteristics. The experimental results show that the measurement error of the designed cutting force monitoring system in boring process is less than 10%, which can meet the application requirements of accurately measuring dynamic cutting force under machining conditions.

Keywords

cutting force; status monitoring; intelligent cutter bar

面向深孔加工的切削力智能感知刀杆研制

马晶 张志聪 兰国威 周洪君 潘贤宇

哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150080

摘要

深孔类零件作为关键零部件在航空航天、军工、能源装备领域中的应用日益广泛,但刀具在密闭环境中切削状态难以监测,加工质量难以监测,基于这个原因论文提出面向深孔加工的切削力感知智能刀杆,并通过试验对其性能进行了验证。所研制的切削力监测系统兼容性好、精度高、动态特性好,实验结果表明所设计的镗削过程切削力监测系统的测量误差在10%以内,可以满足加工条件下准确测量动态切削力的应用需求。

关键词

切削力; 状态监测; 智能刀杆

1 引言

金属切削过程中,切削状态的实时监测在控制切削过程、调整切削参数、检测刀具磨损等方面发挥着重要的作用。通过切削力对切削状态进行监测是最直接、最有效的方式之一,目前切削力监测多集中在车削和铣削中,镗削力方面的研究较少。主要的切削力测量刀具包括:应变式切削力测量刀具、压电式切削力测量刀具、电容式切削力测量刀具和基于声表面波原理的切削力测量刀具。但这些刀具大多都是在实验开发阶段,没有实际应用,一些商用化推出的测力刀柄、压电式测力仪等价格昂贵,一般生产企业很难承受。因此提出一种

种适用于企业生产、价格经济、操作简单的切削力智能感知刀具需求强烈。

2 技术路线

2.1 应变式感知单元结构设计及优化

进行感知单元结构设计,着重对弹性体结构进行设计(如图1所示),减小传感器传递误差,简化后续电路设计等问题,设计完成后对感知单元进行受力分析,并分析数据,多次进行模拟实验优化感知单元结构,最终得出最优结构。

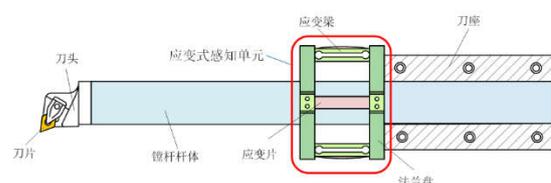


图 1 应变式感知单元结构设计

【基金项目】黑龙江省 2020 年大学生创新训练计划项目 (202010214082)。

【作者简介】马晶 (1989-), 女, 中国黑龙江哈尔滨人, 讲师, 从事切削机理及仿真、仿生刀具设计与制备技术等研究。

2.2 惠斯通电桥分析

传感器的工作过程是基于电阻应变效应来实现传感器的测量^[1,2]。金属箔式应变片相对于其他应变片具有可以制成多种形状复杂和尺寸准确的敏感栅,并且具有允许通过电流大、柔性好、耐疲劳寿命高、承受大变形能力强、横向效应小以及蠕变特性好等优点,所以论文选用的传感器采用金属箔式应变片作为敏感元件。应变片一般由引线、基底以及敏感栅构成,康铜箔敏感栅夹在两张基底中间,敏感栅由较粗的铜引线与测量电路相连接。应变片的主要性能是由金属敏感栅决定的,这是因为应变片是基于金属的应变效应工作的,即在外力作用下敏感栅金属丝发生的机械变形会导致敏感栅阻值产生相应变化。一段长度为 L , 横截面面积为 A 的金属丝, 其电阻 R 为:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

若金属丝在外力作用下长度变化 ΔL , 横截面积变化 ΔA , 电阻率的变化为 $\Delta \rho$, 则电阻的相对变化量为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (2)$$

对于半径为 r 的圆, $A = \pi r^2$, $\frac{\Delta A}{A} = \frac{2\Delta r}{r}$, 根据材料力学的相关知识, 金属丝在弹性范围内 $\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$, $\frac{\Delta r}{r} = -\lambda \varepsilon$,

$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \lambda \sigma = \lambda E \varepsilon$, 代入式(2)可得:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \lambda E) \varepsilon \quad (3)$$

式中, ε 是金属丝的纵向应变, 通常用微应变度量该数值; μ 是金属丝材料的泊松比, 其大小通常介于 0.3~0.5 之间; λ 是金属丝材料的压阻系数; σ 是应变片金属丝的应力值; E 是金属材料的弹性模量。由于 ε 、 μ 、 λ 、 σ 、 ω 都是常数, 所以可以引入常数 K_0 , 设 $K_0 = 1 + 2\mu + \lambda E$ 。因此式(3)可表示为:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon \quad (4)$$

由式(4)可知, 应变片电阻的相对变化量仅与常数 K_0 和应变片电阻丝的纵向应变 ε 有关。当纵向应变 ε 一定时, 常数 K_0 越大, 应变片电阻的相对变化量越大, 应变片越灵敏; 应变片电阻的相对变化量与电阻丝的纵向应变 ε 是成正比关系的, 即:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (5)$$

式中, K 称为电阻应变片的灵敏度系数。

在实际测量中为了提高该传感器的灵敏度及线性度, 应变片的连接方式为电桥电路, 将受力性质相同的两只应变

片接到电桥的对边, 邻边的两只应变片受力性质不同, 即 $R_1 = R_4 = R + \Delta R$, $R_2 = R_3 = R - \Delta R$, 如图2所示。当刀尖受力时, 敏感栅受到外力作用产生应变, 敏感栅的电阻发生变化, 惠斯通电桥失去原有平衡输出电压, 传感器输出电压与刀尖受力具有对应关系, 通过合理布置敏感栅可有效测出切削力大小^[3,4]。

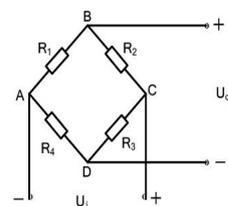


图2 惠斯通电桥电路

电压源电压为 U_i , 电桥电路输出为:

$$U_o = U_{AB} - U_{AD} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E - \frac{R_3}{R_3 + R_4} E = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i \quad (6)$$

将 $R_1 = R_4 = R + \Delta R$, $R_2 = R_3 = R - \Delta R$ 代入式(6)可以得到:

$$U_o = U_i \frac{(R + \Delta R)^2 - (R - \Delta R)^2}{2R \cdot 2R} = U_i \frac{\Delta R}{R} \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)得:

$$U_o = U_i \cdot K \varepsilon \quad (8)$$

式(8)表明由应变片搭建的电桥电路输出电压 U_o 与输入电压 U_i 、应变片的灵敏度系数 K 和应变 ε 有关。当 U_i 和 K 都是常数时, 电桥电路的输出电压与应变 ε 成正比, 从而实现了测量力的目的。

3 实验验证

为了验证所设计监测系统的信号监测性能, 设计并开展了切削力监测系统性能实验研究, 基于自制减振证杆搭建实验平台, 选用 Kistler 9139AA 台式测力仪作为参考测力仪, 将其固定在工作台上, 所采集到的力信号作为参考力。实验现场如图3所示。



图3 实验现场

本次实验分别通过静力加载和冲击加载来验证该系统 F_x 和 F_z 方向切削力信号监测功能的可行性, 在进行静力加载实验时, 将 20kg 的砝码加载到刀头处, 等待平稳后得到两个系

统采集到的数据。然后将监测系统旋转 90° 后进行同样的操作，分别得到刀杆在 F_x 和 F_z 方向受到的力。经过处理后得到四个传感器采集到的力信号与 Kistler 测力仪采集的信号对比如图 4 所示。加载平稳时测力仪得到的力约为 196N， F_x 方向监测系统最大值为 214N，最大误差为 9.18%， F_z 方向监测系统最大值为 212N，最大误差为 8.16%。从图 4 中可以看出相对于 Kistler 测力仪得到的数据而言，监测系统所采集到的数据变化存在波动，主要表现在刚加载时监测系统收到一定的冲击力导致测量结果增大^[5]，随后逐渐减小并趋于稳定，稳定后测量误差减小，但这个过程需要一定的恢复时间。

为了验证监测系统收到冲击后的动态性能，在此采用冲击加载的方式进行对比，待两个系统稳定后在镗杆的刀头处施加一个冲击力，经过处理后的 F_x 和 F_z 方向传感器受到的力与 Kistler 测力仪得到的对比图像如图 5 所示。根据波形图可以看出给镗杆施加单次冲击后监测系统能够保持与 Kistler 测力仪保持很好地测量趋势，Kistler 测力仪测得 F_x 方向尖端点最大值为 269N，监测系统测得的最大值为 292N，最大误差为 8.55%； F_z 方向 Kistler 测力仪测得的最大值为 272N，监测系统测得的最大值为 296N，最大误差为 8.82%。冲击结束后监测系统仍存在漂移现象。

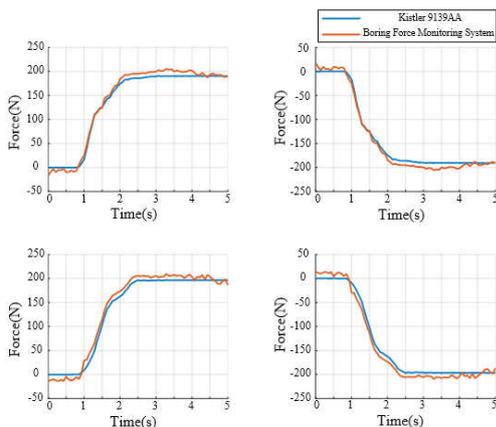


图 4 静力加载实验结果

从以上实验结果可以发现，监测系统和 Kistler 测力仪的各向力测量结果有一定的差异，但差距不超过 10%，变化趋势基本一致。两种传感器的预紧状态、安装精度等多种因素都会影响测量结果，从实验结果中可以看出，在完成一次加载监测系统的力并没有完全归零，造成这种现象除了传感器自身材料的原因外还包括传感器存在信号漂移的现象。造成传感器漂移的因素很多，在论文可能是因为监测系统的感知结构和装配问题所决定的，因此会产生更多的不确定性和识

别误差，漂移问题也难以完全避免^[6]。但本次实验中二者之间的测量结果相差不大，表明监测系统能够可靠采集到的镗杆所受切削力的信息，具有较好的应用性能。

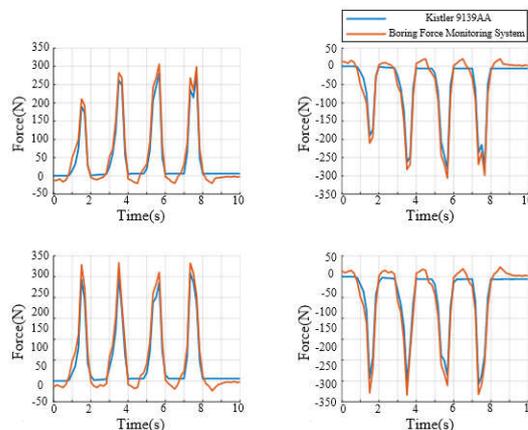


图 5 冲击加载实验结果

4 结语

论文针对目前镗削加工中切削力测量存在的问题，提出了一种镗削过程切削力监测系统，对该系统的安装位置和所用传感器的工作原理进行了介绍。然后对其功能进行了实验验证。根据实验结果可以看出所设计的监测系统测量的数据与 Kistler 测力仪采集到的数据基本吻合，能够实现主要切削力的测量，且误差控制在 10% 以内，初步表明该系统测量性能的可行性。

参考文献

- [1] PANZERA T H, SOUZA P R. Development of a three-component dynamometer to measure turning force[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(12): 913-922.
- [2] 赵友, 葛晓慧, 赵玉龙. 高精度动态切削力自感知智能刀具的研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 178-185.
- [3] REN Zongjin, ZHANG Jun, JIA Zhenyuan, et al. Design and Calibration of a Cutting Force Dynamometer[J]. Advanced Materials Research, 2014(13): 94-95.
- [4] 尚永艳. 刀柄式压电切削力仪研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] ALBRECHT A, PARK S S, ALTINTAS Y, et al. High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(9): 993-1008.
- [6] 李文德, 丁辉, 程凯. 基于声表面波原理的切削力测量智能刀具研究[J]. 机械制造与自动化, 2014(5): 46-50.