

基于应变传感器的切削力测试装置实验研究

陈 炳

(浙江工业大学 生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了提高应变式切削力测试装置的动态性能,建立了测试装置的动力学方程,利用有限元软件分析了敏感元件的应变分布规律,并进行了装置的结构设计;开发了包含740B02压电式应变传感器、DH5863电荷放大器和PXI-6254数据采集卡的实验装置,通过测量敏感元件的应变,实现了切削力的动态测试。切削实验结果表明,该测试装置结构简单、动态特性较好,适用于较低转速下的切削力实时测量。

关键词: 测力仪;切削力测试;有限元分析;应变传感器

中图分类号: TH823; TG506; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1439-04

Experimental study of cutting force testing based on dynamic strain sensor

CHEN Bing

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the dynamic performance of the cutting force testing device based on strain gauge, the kinetic equation of the test device was established, and the strain distribution of the sensitive components was analyzed using the finite element software. The structural design of the apparatus was carried out. Experimental device which contains the 740B02 type sensor, DH5863 charge amplifier and PXI-6254 data acquisition card was developed to achieve the dynamic measurement of the cutting force by measuring the strain of the sensitive element. The cutting test results show that the test apparatus has simple structure and its dynamic characteristics are suitable for real time measurement of the cutting force.

Key words: dynamometer; cutting force testing; finite element analysis; strain sensor

0 引 言

切削力是描述切削过程的重要参数,对于机床设计、切削参数选择以及加工过程的在线监测与控制等都具有重要意义。切削力测试仪种类主要有:电感式、电容式、电阻应变式以及压电测力仪等。其中,电感式及电容式测力仪由于安装困难,应用较少。压电式测力仪固有频率较高、响应快,但结构较为复杂,且比较昂贵。传统的应变式测力仪由于惯性大,系统固有频率较低,通常只能用于静态力的测量。

弹性敏感元件是测力仪的核心部件,对测试仪的动态性能有重要影响,针对不同形式的敏感元件,近年来国内外学者开展了大量研究工作。Korkut^[1]开发

了基于八角环弹性元件的静态切削力测试系统。张铁等人^[2]设计了双弹性环结构的车削力测试仪。王娟等人^[3]分析了车削力测试仪弹性元件的动力学特性。Karabay^[4]设计了基于环状弹性元件的测力仪,并针对钻削、车削、磨削等工况给出了应变片的布置方法。Suleyman等人^[5-6]分析了由4个环形敏感元件构成的切削力测试系统的固有频率。Qin等人^[7]开发了基于双弹性半环槽敏感元件的轴向力传感器。

为了满足动态测量的要求,本研究开发基于压电式应变传感器的切削力测试实验装置;为有效提高切削力测试系统的固有频率,本研究通过有限元软件分析敏感元件的应变分布及固有频率,进行装置的结构设计,并通过切削试验验证测试装置的动态性能。

1 测试装置的动态特性

测试装置的动态特性是指系统对于随时间快速变化的输入量表现出的响应特性,是评价系统性能优劣的重要指标之一。动态特性好的测力仪,可以快速准确地再现被测切削力随时间变化的规律,实现动态测量。考虑测力仪安装在刚性底座上的情况,本研究将测力仪简化为一个2阶测试系统,如图1所示。

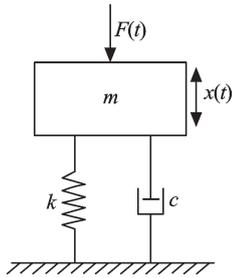


图1 测试装置的动力学模型

该系统包含集中质量为 m ,刚度为 k 的弹簧,及阻尼系数为 c 的阻尼器的动力学模型。将切削力 $F(t)$ 作为系统的输入,质量块的位移 $x(t)$ 视为系统的输出,可建立系统动力学微分方程:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

令 $s = j\omega$,对方程两边作拉普拉斯变换,可得:

$$Ms^2Y(s) + CsY(s) + KY(s) = X(s) \quad (2)$$

则系统的传递函数 $H(s)$ 可以表示为:

$$H(s) = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} = \frac{\frac{1}{K}}{\frac{M}{K}s^2 + \frac{C}{K}s + 1} \quad (3)$$

令系统固有频率 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$,阻尼比 $\xi = c/2\sqrt{km}$,则有:

$$H(s) = \frac{S\omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中: S —系统静态灵敏度, $S=1/k$,通常取常数。

得到系统的动态灵敏度为:

$$A(\omega) = S \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (5)$$

由式(5)可知:系统固有频率 ω_0 越高,则系统的工作频率 ω 范围越宽,系统响应达到稳态的时间越短,则测试装置的测试误差越小,其动态性能越好。测力仪的阻尼比 $[\xi]$ 一般小于0.05。由式(5)可得,当底座刚度较好,且被测切削力变化频率在系统固有频率20%以下时,测试装置的测试误差可小于5%。

2 敏感元件的结构设计

2.1 有限元模型的建立

本研究通过有限元分析,兼顾测力仪的灵敏度与

固有频率,选取了合理的结构参数,设计了敏感元件。该模型上部为外径120 mm、厚度12 mm的安装工件用的法兰盘。为提高装夹刚度,本研究取连接机床工作台的法兰盘厚度为30 mm,并且在其侧面加工出夹持平面。薄壁圆筒内径为85 mm,壁厚为1.5 mm,高度为45 mm,材料为40 Cr,弹性模量 E 为210 GPa,泊松比为0.33,密度为7 800 kg/m³。

敏感元件的三维结构示意图如图2所示。

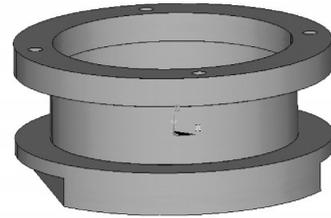


图2 敏感元件结构示意图

本研究将三维实体模型以IGES通用格式导入HyperMesh网格划分软件,采用Solid45单元对薄壁圆筒进行网格划分。该单元具有二次迭代的特性,适用于划分不规则网格的模型。本研究对有应力集中的过渡圆角及安装孔附近的网格进行局部细化处理,所建立的敏感元件的有限元模型如图3所示。该模型包含7 142个网格节点、24 697个单元。

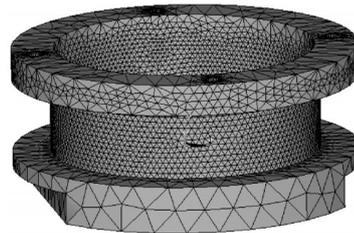


图3 有限元网格划分结果

2.2 应变分布规律分析

应变式测力仪工作时,通过应变片测量弹性元件在切削力作用下发生的机械变形,从而可获得被测切削力信息。为了得到铣削力与薄壁圆筒应变的对应关系,为传感器的布置提供依据,本研究不断改变作用力的大小和位置,并对薄壁圆筒进行了应力分析。

在上端面靠近圆环边缘处同时施加 X 、 Y 、 Z 方向的200 N集中力时的应变云图如图4所示。其中,最大应力约为2.9 MPa,出现在薄壁圆筒两安装平面对称面上,此时的最大变形量为1.56 μm 。按照应力分析结果,在薄壁圆筒应变显著位置加工出宽度为6 mm的纵向平面,粘贴应变传感器。

2.3 有限元模态分析

本研究运用ANSYS软件对敏感元件进行了模态分析,对薄壁圆筒下安装法兰的侧面施加约束,与实际测试中的约束条件相一致。

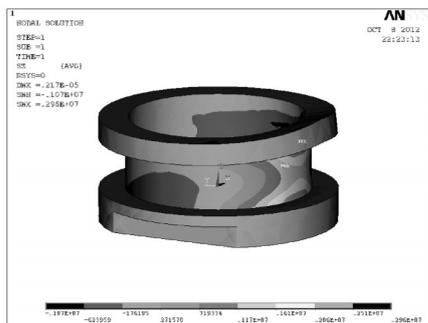


图4 敏感元件应变云图

本研究采用分块兰索斯法计算敏感元件的固有频率及振型,敏感元件的有限元模态分析结果如表1所示。

表1 敏感元件的有限元模态分析结果

模态阶数	计算值/Hz	振型
1	2 921.6	左右摆动
2	2 930.8	上端面弯曲振动
3	3 161.4	2阶弯曲
4	3 217.7	扭转振动

表1分析结果显示,敏感元件的1阶固有频率较高,达2 921.6 Hz,可以满足切削力测试的要求。

薄壁圆筒前4阶振型如图5所示。1阶振型表现为薄壁圆筒的左右摆动,如图5(a)所示;2阶振型为上法兰盘的弯曲振动,如图5(b)所示;3阶振型表现为弯曲振动,如图5(c)所示;4阶振型表现为薄壁圆筒上部的扭转振动,如图5(d)所示。振型图显示,测力仪底座刚度较大,变形量小。

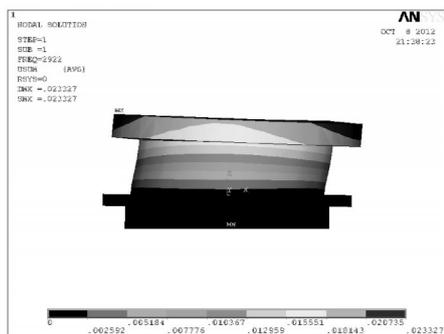
3 切削力测试实验装置设计

本研究选用740B02传感器,将其粘贴在薄壁圆筒上,以测量敏感元件的表面应力变化过程。740B02动态应变传感器灵敏度为50 mV/ $\mu\epsilon$,分辨率达0.6 n ϵ ,具有较高的精度和快速响应能力。传感器重量仅为0.5 g,具有0.5 Hz~100 kHz的超宽频率响应范围,对系统的动态特性影响较小,因此系统的固有频率主要由敏感元件决定。

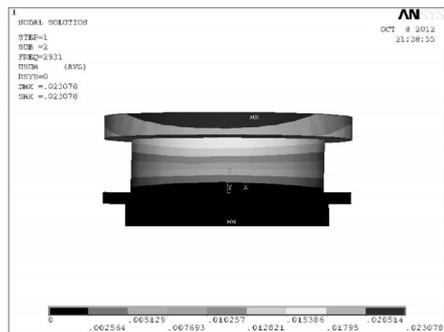
基于740B02压电式动态应变传感器,本研究开发了包含DH5863电荷放大器、PXI-6254数据采集卡以及计算机的切削力测试实验装置,通过使用DH5863电荷放大器完成测试信号的前端调理工作。切削力信号经电荷放大器和采集速率为1.25 Mb/s的美国NI公司PXI-6254数据采集卡,再通过传输速率100 Mb/s的以太网线传输至安装有测试软件的计算机,最后进行测试数据的记录与分析。

4 切削试验验证

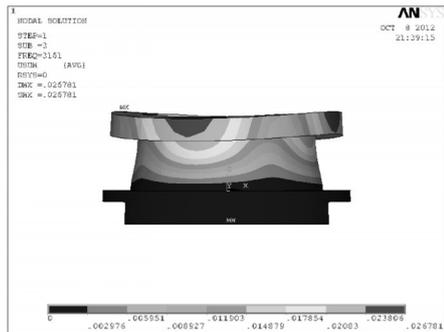
为验证切削力测试装置的性能,本研究构建了由



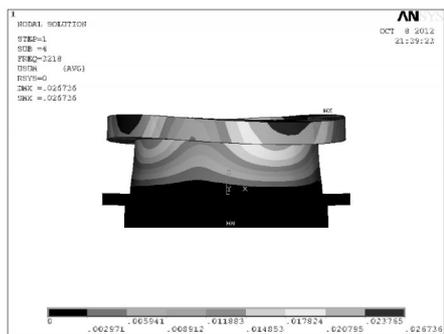
(a) 1阶振型



(b) 2阶振型



(c) 3阶振型



(d) 4阶振型

图5 薄壁圆筒前4阶振型图

加工中心、刀具、待加工工件和测试装置等组成的切削试验平台,并对三方向铣削力数据进行采集与分析,如图6所示。

本研究采用V50-C1四轴立式加工中心,使用硬质合金两刃球头铣刀,以硬度为36 HRC的45#钢作为实验对象,进行干式铣削试验,铣削方式为顺铣。工件尺寸为100 mm×80 mm×40 mm。实验前工件各表

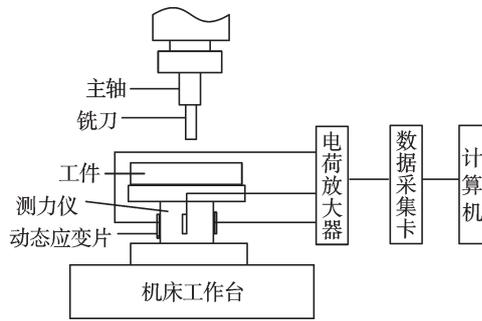


图6 切削试验平台组成示意图

面均经过磨削加工,以减小由于工件表面粗糙度过大导致的测试误差。测力仪安装底座通过螺栓固定在机床工作台上,待加工工件通过螺栓固定在测力仪上端面。切削测试现场如图7所示。

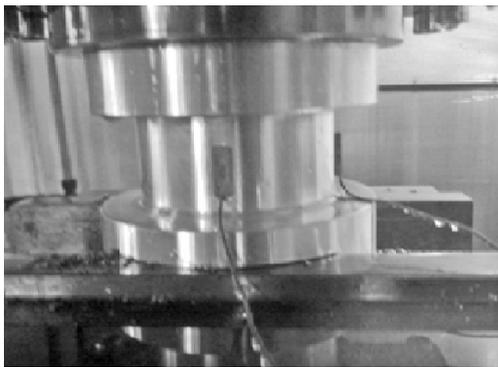


图7 切削试验现场

铣削参数为:主轴转速 2 000 r/min,进给速度 1 300 mm/min。轴向切深 0.15 mm 时的 X 、 Y 、 Z 方向切削力信号如图8所示。

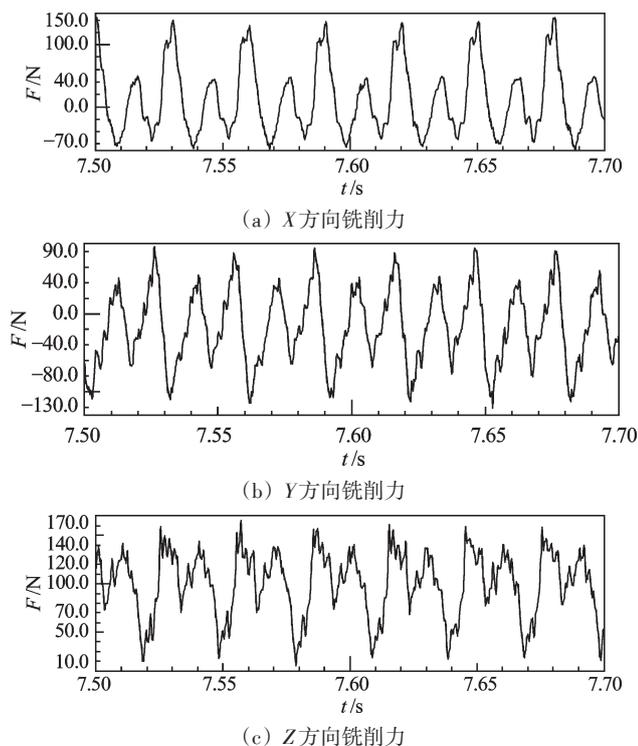


图8 切削力测试结果

由图8可见: X 方向切削力在 $-70\text{ N}\sim 150\text{ N}$ 区间内周期性变化, Y 方向切削力变化区间为 $-130\text{ N}\sim 90\text{ N}$, Z 方向切削力的变化区间为 $10\text{ N}\sim 170\text{ N}$;其中, X 、 Y 方向切削力峰峰值为 220 N , Z 方向切削力峰峰值为 160 N 。由切削力时间波形可见,切削力变化周期约为 0.03 s ,与刀具旋转周期一致。所测得的切削力值呈现周期性变化特征,符合切削力随着刀具旋转周期性变化的规律,且波动较为平稳,较好地反映了切削力变化的时间历程。

切削试验结果表明,该测力仪性能良好,有较好的动态响应特性,适合于主轴转速较低情况下的切削力实时测量。

5 结束语

本研究通过对敏感元件的大量有限元分析,合理选择了敏感元件的结构参数,进行了薄壁圆筒的结构设计,开发了基于动态应变传感器的切削力测试实验装置。

本研究通过45#钢切削试验,证明了开发的测力仪具有结构简单、工作可靠、机械阻抗大等优点,且动态响应特性良好,可以满足较低主轴转速条件下切削力动态测试的要求。

参考文献(References):

- [1] KORKUT I. A dynamometer design and its construction for milling operation[J]. *Materials and Design*, 2003, 24(8): 631-637.
- [2] 张 铁. 三向压电式车削测力仪的性能研究与结构设计[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院, 2007: 35-38.
- [3] 王 娟,徐宏海,白传栋. 基于ANSYS的三维动态切削测力仪模态分析[J]. 北京工商大学学报:自然科学版, 2008, 26(6): 18-20.
- [4] KARABAY S. Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(2): 496-506.
- [5] SULEYMAN Y, UNSACAR F. A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning[J]. *Measurement*, 2006, 39(1): 80-89.
- [6] SULEYMAN Y, UNSACAR F. Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(3): 1499-1511.
- [7] XING Qin, JUN Zhang, MIN Qian, et al. Design, calibration and error analysis of a piezoelectric thrust dynamometer for small thrust liquid pulsed rocket engines [J]. *Measurement*, 2011, 44(2): 338-344.

[编辑:张 翔]