

面向冲床冲击力测量的单分量重载传感器

姚裕¹ 吴洪涛² 张海天¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:为了测量冲击载荷达150 t, 冲击频率为10 Hz的冲床冲击载荷, 降低产品的废品率, 本文设计、制造和评估了一种新颖的单分量重载传感器, 冲床安装空间限制了该传感器的结构尺寸为 $\Phi 166\text{ mm} \times 45\text{ mm}$, 该传感器为4个支撑梁和1个应变梁组成的整体式结构, 可保证传感器同时具有高刚度和高灵敏度。用一台300 t万能液压机进行静态标定, 标定结果表明传感器的绝对误差达到2%。最后, 现场实验进一步鉴定传感器的性能。

关键词:重载传感器; 冲击力; 静态标定; 冲床

中图分类号: V211.752

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)01-0061-04

Single-Piece Heavy-Load Sensor for Impact Force Measurement of Punch

Yao Yu¹, Wu Hongtao², Zhang Haitian¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To reduce the rejection rate of products, a novel single-piece heavy-load force sensor with a full-scale load of 150 t and a working frequency of 10 Hz is designed, manufactured and evaluated for the dynamic impact force measurement of the punch. The confined space of the punch holder limits the size of the fabricated sensor at $\Phi 166\text{ mm} \times 45\text{ mm}$. The sensor is characterized by an integrated fixture with four bearing carriers and one strain beam, which can ensure both strong stiffness and high sensitivity for the sensor simultaneously. A universal hydraulic machine with full-scale 300 t is employed to accomplish static calibration. The results show that linear calibration slopes for the sensor is within 2%. Site test is then performed for further verifying sensor performance.

Key words: heavy-load sensor; impact force; static calibration; punch

在工程实际中,许多领域会遇到要求测量某个冲击力,这种冲击力属于动态力,为了提高试验的可信度,必须准确测量出冲击力的大小和载荷谱。在生物机械研究领域,Quoc等^[1]依据人在奔跑过程中与地面产生的冲击载荷建立数学模型,以设计鞋底材料特性。Gardner等^[2]应用冲击传感器研究老年人摔倒时的骨折问题;Betty^[3]和Emmanuel^[4]等应用压力传感器研究雪崩产生的冲击力;Andreas等^[5]应用电容位移传感器研究了磨床高频切

削力的间接测量;Li等^[6-7]为了解决大载荷测量,研究了重载六分量压电传感器,并建立样机。一些学者^[8-9]应用传感器等对泥石流撞击时的冲击力进行过试验研究,并分析了泥石流冲击力的组成。

在工艺系统刚度一定的条件下,为了减少某大载荷冲床的零件废品率,准确地测量其正常工作时的冲击载荷,以研究零件的误差复映规律。本文提出一种新颖的整体式单分量重载传感器,该传感器必须在不改变冲床原有结构的基础上嵌入冲头组

基金项目:江苏省数字化制造重点实验室基金(HGDML-0905)资助项目;南京航空航天大学青年科技创新基金(56V1029)资助项目。

收稿日期:2011-01-20; **修订日期:**2011-07-13

通讯作者:姚裕,男,副教授,1971年生, E-mail: yy503@126.com。

件中实现直接测量,为保证传感器与冲头组件安装,其最大外型尺寸为 $\Phi 166\text{ mm} \times 45\text{ mm}$,同时满足冲击频率为 10 Hz ,冲击力可达 150 t 的冲击载荷的动态测量。

1 测量原理

弹性敏感元件在传感器技术中占有极其重要的地位,在传感器工作过程中,一般由弹性敏感元件将各种形式的非电物理量转换为应变,然后配合转换元件将其转换为电量,故弹性元件的优劣直接影响传感器的性能及精度。目前,市场上弹性敏感元件结构形式很多,但其均存在线性、灵敏度、固有频率间的相互矛盾、相互制约问题。无限地提高某一指标会使传感器的其他性能指标严重恶化。另外,固有频率指标还受客观条件,如材料性能、结构形式等限制。因此,完成大载荷测量的解决方案如下。

本文的传感器由两个不同刚度的敏感元件并联(见图1),图中1为传感器的浮动框,2为低刚度敏感元件,3为高刚度敏感元件,4为固定框。其中高刚度的敏感元件3大大地提高了传感器的承载能力和刚度,保证了传感器的测量范围及响应频率。同时低刚度的敏感元件2相应部位贴片实现信号测量,提高了传感器的灵敏度。这种并联结构的传感器将大载荷测量的主要矛盾转移,改善了现行应变式传感器的敏感单元刚度低,难以获得大应变变形比的弊端,可有效地解决应变式传感器刚度与灵敏度的矛盾。该传感器具有结构简单、精度高、刚度大、固有频率高、灵敏度高优点,从而真正地同时实现传感器的高刚度、高频响和高灵敏度。

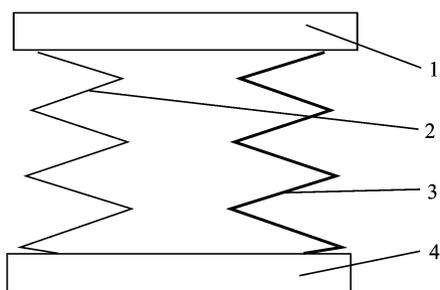


图1 传感器原理图

2 结构设计

传感器承受的外载为 P (见图2),该外载由周边4个竖梁与中间竖梁共同承受。为了使传感器的输出信号尽可能大,该传感器的应变元件采用4个横梁的S弯变形,横梁上任意一点 x 在 P_1 作用的弯

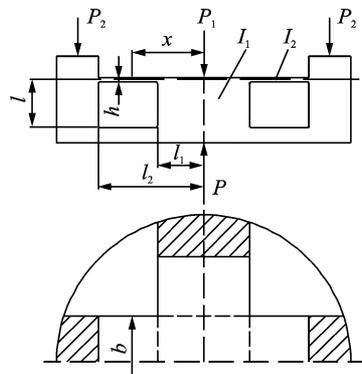


图2 受力分析图

矩为

$$M_x = P_1(2x - l_1 - l_2)/8 \quad (1)$$

由于传感器的周边4个竖梁、应变梁及中间竖梁在外力作用下协调一致变形,因此可建立如下的变形协调方程

$$\begin{cases} P_1 + 4P_2 = P \\ f_{11} + f_{12} = f_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{11} 为应变梁在 P_1 作用下的挠度; f_{12} 为中间竖梁在 P_1 作用下的挠度; f_2 为四周竖梁在 P_2 作用下的挠度。

应变梁的挠度计算如下

$$EI_2 \frac{df_{11}}{dx} = \int M(x)dx + C = \int \frac{P_1(2x - l_1 - l_2)}{8} dx + C \quad (3)$$

代入边界条件可得

$$f_{11} = \left(\frac{P_1 x^3}{24} - \frac{P_1(l_1 + l_2)x^2}{16} + Cx + D \right) / EI_2 \quad (4)$$

式中: C, D 为积分常数。其值如式(5)所示

$$C = P_1 l_1 l_2 / 8 \quad D = P_1 l_2^2 (l_2 - 3l_1) / 48 \quad (5)$$

另外

$$f_{12} = P_1 l / EA_1 \quad f_2 = P_2 l / EA_2 \quad (6)$$

将式(4~6)代入式(2),求解可得

$$P_1 = \frac{12A_1 l_2 P}{48A_2 l_2 + A_1 [12l_2 - A_2(l_1 - l_2)^3]} \quad (7)$$

则在外载作用下应变梁上任意一点 x 处的应变为

$$\epsilon = \frac{9A_1 I_2 l (2x - l_1 - l_2) P}{bh^2 E [48A_2 I_2 l + 12A_1 I_2 l - A_1 A_2 (l_1 - l_2)^3]} \quad (8)$$

依据理论分析、冲床工作载荷及某冲床的冲头组件安装空间的限制,最终确定传感器的设计量程为 150 t ,结构尺寸为 $\Phi 166\text{ mm} \times 45\text{ mm}$,其样机如

图3所示。

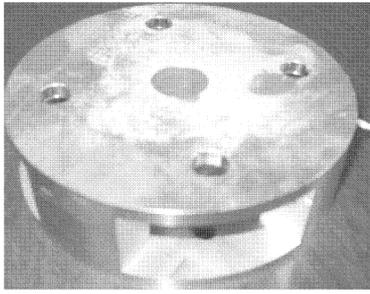


图3 传感器实物图



图4 300 t 液压式万能压力机

3 静态标定

由于传感器弹性元件和其他元件的加工误差、应变片本身的误差、应变片粘贴位置难以保证绝对理想等,这些因素都决定了天平的实际特性与理论计算之间存在一定的差距。因此传感器在完成设计、加工、应变片粘贴和测量线路的连接后,用于测力实验前,必须进行静态标定,以检查天平的设计和制造质量,鉴定传感器的性能,为传感器工作提供必要的技术参数。该传感器的静态标定在一台300 t 液压式万能压力机上进行,压力机的移动横梁具有自动定心装置,确保对传感器施加的载荷与传感器轴线一致。依据风洞天平静校精度和准度方法^[10],传感器在压力机工作台定位后施加台阶载荷,传感器的加载信号通过放大器后,由计算机控制采集板采集输出信号(见表1)。

表1 静态标定数据表

标定载荷/t	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
信号增量/ μV	735	1 475	2 226	2 984	3 830	4 555	5 298	6 089	6 755	7 398
绝对误差/ %	2.3	1.9	1.3	0.8	1.9	1.0	0.7	1.3	1.4	1.6

表1的绝对误差由信号增量与标定载荷通过数据线性拟合后计算得出,静态标定的数据结果表明,本文研究的单分量重载传感器的具有承载能力

强和灵敏度高,绝对测量误差达到2%。

4 动态实验

该传感器的设计目的是测量某大载荷冲床的冲击载荷,降低产品的废品率,将传感器安装于冲床的冲头组件内,保证传感器的安装轴线与冲击力作用线重合,同时保证冲头的冲击载荷通过传感器传递到床身,直接感受冲头的冲击载荷。该冲床冲头的工作频率约为10 Hz,应用专门的动态采集系统,其采集卡的采样频率为5 kHz,采样时间为1 s。以该冲床加工的某零件为研究对象,其生产合格产品时采集1 s的冲击力变化曲线(见图5),图6为在同样的加工条件下,调大冲头的行程,生产废品时采集1 s的冲击力变化曲线。

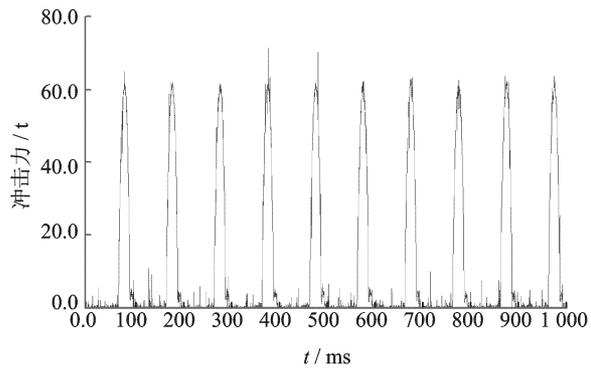


图5 生产合格产品的冲击力变化曲线

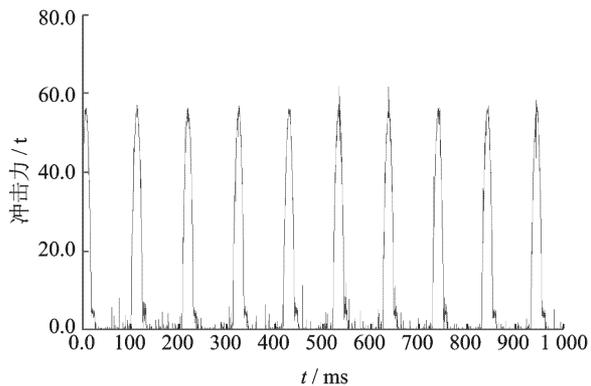


图6 生产废品的冲击力变化曲线

图5~6中,纵轴为冲击力(单位:t),横轴为时间(单位:ms)。由图5知,该冲床的冲击频率约为10 Hz,生产合格品时的最大冲击力约为65 t;由图6知,当增大冲头行程时,此时生产废品时的最大冲击力约为58 t。依据测量结果即可在线调整生产合格品时的冲头行程范围,降低产品的废品率。

5 结 论

本文为了测量某冲床的大载荷冲击载荷,减低产品的废品率,提出了一种单分量整体式重载传感器,分析了传感器的测量原理及结构形式,设计并制造出该传感器。通过静态标定及动态实验研究得出如下结论:

(1)单分量整体式传感器结构形式具有结构简单,易于制造;

(2)该重载传感器采用支撑梁与应变梁分别提高传感器的刚度与灵敏度的测力原理正确;

(3)静态标定结果表明,该传感器的测量精度满足设计和试验使用要求;

(4)动态试验结果表明,该传感器适用于进行大载荷动态测量,能够为生产合格零件提供在线调整数据。

参考文献:

[1] Quoc H L, Amina A, Silvano E, et al. Towards a footwear design tool: Influence of shoe midsole properties and ground stiffness on the impact force during running[J]. *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(2):310-317.

[2] Gardner T N, Simpson A H R W, Booth C, et al. Measurement of impact force, simulation of fall and hip fracture [J]. *Medical Engineering & Physics*, 1998, 20(1):57-65.

[3] Betty S, Mark S, Lambert R. Measurements and analysis of full-scale avalanche impact pressure at the

valléede la sionne test site[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 51(2/3):122-137.

- [4] Emmanuel T, Djebar B, Ali L, et al. Avalanche impact pressure on an instrumented structure[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(3):206-215.
- [5] Andreas A, Simon S P, Yusuf A, et al. High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(9):993-1008.
- [6] Li Y J, Zhang J, Jia Z Y, et al. A novel piezoelectric 6-component heavy force/moment sensor for huge heavy-load manipulator's gripper [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(5):1644-1651.
- [7] Li Y J, Sun B Y, Zhang J. A novel parallel piezoelectric six-axis heavy force/torque sensor [J]. *Measurement*, 2009, 42(5):730-736.
- [8] 胡凯衡, 韦方强, 洪勇, 等. 泥石流冲击力的野外测量 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1):2813-2819. Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, Hong Yong, et al. Field measurement of impact force of debris flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S1):2813-2819.
- [9] Wang G, Sassa K, Fukuoka H. Downslope volume enlargement of a debris slide-debris flow in the 1999 Hiroshima Japan, rainstorm [J]. *Engineering Geology*, 2003, 69(3/4):309-330.
- [10] 贺德馨. 风洞天平 [M]. 北京:国防工业出版社, 2001.