

平行梁式称重传感器的有限元分析

赵思宏, 田春艳, 范惠林

(空军第二航空学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 称重传感器弹性元件的结构直接影响传感器的测量精度, 根据平行梁式称重传感器的结构和特点建立了力学模型, 用 AutoCAD 二次开发自动生成有限元网格, 针对线段相交三种情况处理, 使得被打破的“网格”成为结构离散图, 由此生成有限元模型, 通过在其它尺寸不变的情况下分别改变各个结构尺寸, 从而找出弹性元件各结构尺寸对输出应变的影响规律, 最后利用 ViziCAD 对模型进行了有限元应力应变分析并将样品输出灵敏度的计算值与实测值进行比较, 二者结果较为吻合, 利用有限元辅助分析设计, 可以提高生产精度及效率。

关键词: 传感器; 弹性元件; 有限元; ViziCAD

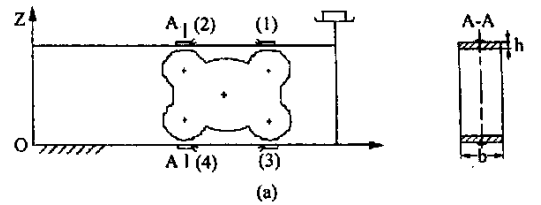
中图分类号: TP212 文献标识码: A

1 引言

双孔平行梁式称重传感器为典型的高精度小量程称重传感器, 该结构具有很强的抗偏向和抗横向偏载能力, 具有很小的四角误差^[1]。其结构和接线如图 1 所示。

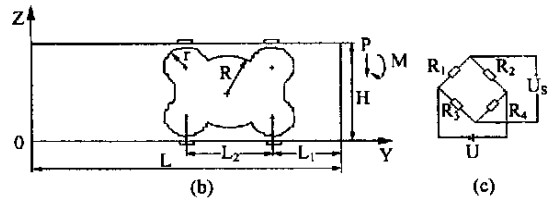
有限单元法 FEM (Finite Element Method, 简称为有限元法), 是结构设计理论基础—力学和现代计算技术相结合的产物。有限元软件是有限元法及其应用的集中体现, 并且已经成为 CAD/CAM 系统的重要组成部分, 它广泛应用于有关学科领域, 成为结构和非结构体系分析的有力工具。

称重传感器的关键部分——弹性元件是连接被测量与应变片的纽带, 其结构将直接影响整个传感器的测量精度。然而弹性元件的设计工作一直以来都是凭经验, 在生产过程中要反复摸索, 不仅成本高而且效率低。利用有限元辅助分析设计, 可以提高生产自动化程度, 提高生产率、降低成本的目的^[6-7]。



(a) 结构原理

(a) Structure and the principle



(b) 受力简化

(c) 电桥电路

b) Simplification of the force

(c) Circuit diagram

图 1 平行梁式传感器的弹性元件

Fig. 1 Elastomer of a parallel girder load sensor.

2 弹性元件有限元模型的建立

为了分析计算, 将实际所用双孔平行梁式称重传感器复杂的结构简化为如图 2 所示的力学模型。

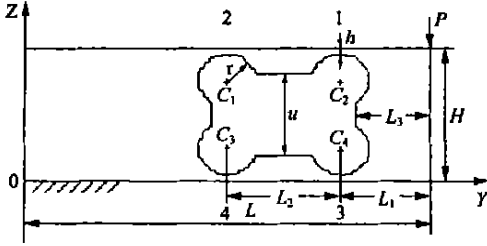


图 2 平行梁式传感器弹性元件的力学模型

Fig. 2 Mechanical model of the parallel girder load sensor elastomer.

经计算得知, 当弹性体的结构尺寸确定后, 弹性体内部结构形状对输出影响很小, 力学模型可以满足灵敏度的设计要求, 可对弹性体进行结构分析。

针对弹性元件的力学模型, 采用 AutoCAD 二次开发过程中直接生成网格的简单有效的剖分方法。但是在 AutoCAD 中绘制的线段所获得的信息, 无法自动形成有限元计算所需的线段, 不能构成有限元结构计算的拓扑信息^[4]。因此, 为了获取有限元所需要的线段就必须把相连接的线段截断, 成为独立的线段, 即打破网格。通过分析平面内两线段相对位置, 总结出线段相交的三种连接方式, 如图 3 所示, 其中, 点 P 为直线 AB 与 CD 的交点。

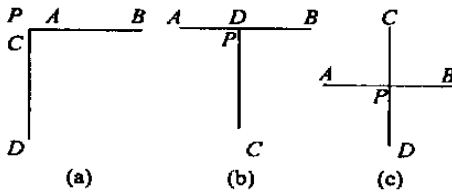


图 3 线段相交的三种连接方式

Fig. 3 Three ways of line intersecting.

其中:

(a) 完全铰接: P 与两个线段端点 A 和 C 重合, 这种情况不影响结构离散, 不需要处理。

(b) 滚动铰接: P 与一个线段端点 D 重合, 线

段 AB 被点 P 划分为线段 AP 和 PB。将线段数加一, 节点数不变。

(c) 固定端: 点 P 不与线段端点重合, 线段 AB 和 CD 被 P 划分为四条线段 AP、PB、CP、PD。将线段数加二, 节点数加一。

针对上述三种情况分别处理, 最终将把 AutoCAD 绘制的网格“打破”, 成为有限元所需的结构离散图, 如图 4 所示。

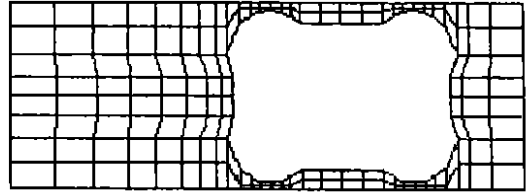


图 4 平行梁式传感器弹性元件的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the elastomer of a parallel girder load sensor.

3 有限元模型的计算

用有限元进行工程分析的过程包括三个阶段: 有限元模型的建立和数据输入(称为前置处理); 用分析软件进行工程计算; 分析结果的判读和确定(称为后置处理)。用 CAD 进行有限元分析, 其前、后置处理与 CAD 图形支撑环境和几何模型的类型密切相关。

采用成熟的 ViziCAD 程序对弹性元件进行应力计算, 将实测的样品尺寸代入有限元模型即可计算出弹性元件各个单元的应力值。因为研究的是传感器的平面应变状态, 所以可以直接将传感器在 AutoCAD 中自动形成二维网格图以 ViziCAD 所能识别的 DXF 文件形式输入到 ViziCAD 软件中^[3]。

由于电阻应变片粘贴在弹性元件的表面上, 所以只有弹性元件表面的应力状态才能真实反映弹性元件的工作情况, 因此在计算过程中, 应力的输出形式应为所计算单元的外表面中心点的应力状态。因为所研究的平行梁式传感器的受力情况可以看成是横力弯曲状态, 因此, 这一点的应力应该属于二向应力状态, 即应该包括两个主应力 S_{11} , S_{22} 。其中 S_{11} 为图 1 中 Y 方向的应力, S_{22} 为图 1 中 Z 方向的应力。

由于电阻应变片是粘贴在弹性元件的贴片区

上, 因此, 在计算过程中只需计算弹性元件贴片区的各个单元即可, 本文分别用 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 和 ϵ_4 代表如图 1 中所标示的四个贴片区的应变值, 用 ϵ 代表有限元模型总的输出应变值。为了验证有限元模型的正确性, 需要将计算机输出的应力值转化成应变值, 以便与实测应变值相比较, 来验证所建立的弹性元件有限元模型的正确性。

根据材料力学^[5] 计算公式:

$$\epsilon = \frac{1}{E} [S_{11} - \mu(S_{22} + S_{33})]$$

其中:

E 为材料的弹性模量; μ 为泊松比;

S_{11}, S_{22}, S_{33} 分别为相互垂直方向的主应力。

因为所研究的平行梁式传感器仅在 Z 轴方向受力, 且沿 X 轴方向上形状无变化, 故 $S_{33} = 0$, 所以得到公式(1):

$$\epsilon = \frac{1}{E} (S_{11} - \mu S_{22}), \quad (1)$$

其中, 传感器材料 LY12 的弹性模量 E 等于 $0.72 \times 10^4 Pa$ 。

又有灵敏度的计算公式:

$$S = K\epsilon, \quad (2)$$

其中:

K 为灵敏度系数;

ϵ 为四个贴片区输出应变绝对值的平均值。

在实际计算时, 还需将所得灵敏度 S 值乘以一个修正系数 a , 这是因为在实验过程中, 采用的箔式应变片的阻抗为 350Ω , 而传感器的输出仪表及线路等将有一定的损耗, 阻抗约为 414Ω , 所以传感器的输出灵敏度比设计灵敏度要小一些, 系数为: $a = 350/414 = 0.8454$ 。

因此, 式(2)应改为:

$$S = Ka\epsilon, \quad (3)$$

用 ViziCAD 程序可以计算出应力应变值, 且进一步可求得灵敏度值。

4 传感器弹性元件的结构尺寸对输出应变值的影响

利用前面建立的力学模型, 以 20KG 为例, 弹性体材料为 LY12, 电阻应变片阻值为 350Ω , 输出灵敏度为 $2mv/v$, 通过在其它尺寸不变的情况下分别改变各个结构尺寸, 运用 ViziCAD 程序计算

出贴片区的不同应变值, 从而研究结构尺寸对输出应变值的影响。

计算结果表明: 弹性体的高度 H 、长度 L_1 、中心孔半径 R 和总长 L 对于应变输出值和灵敏度值几乎没有影响, 确切地说, 在一定范围内 H 、 L_1 、 R 、 L 对输出应变值和灵敏度影响非常小。而孔径 r 、弹性元件的厚度 b 和孔距 L_2 对输出应变值和灵敏度的影响曲线分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

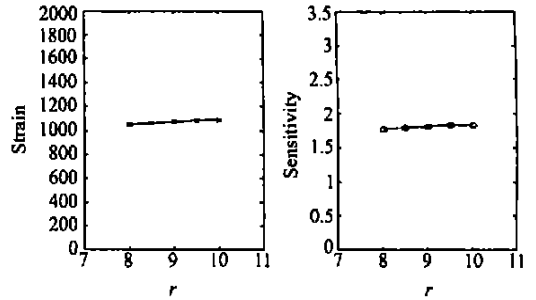


图 5 孔径 r 对输出应变值和灵敏度的影响

Fig. 5 Effects of aperture r on the strain and sensitivity.

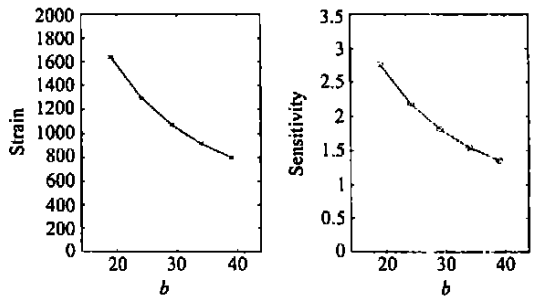


图 6 弹性体的厚度 b 对输出应变值和灵敏度的影响

Fig. 6 Effects of thickness b on the strain and sensitivity.

由图 5~ 图 7 分析可知, 在平行梁式称重传感器弹性元件的设计中四个孔的半径 r , 弹性体厚度 b , 孔距 L_2 及贴片区厚度 h 对输出应变值和灵敏度的影响很大。其中贴片区厚度 h 影响最大, 也就是说, 如果总体尺寸确定后, 应该优先考虑贴片区厚度 h , 然后确定孔距 L_2 , 厚度 b 和孔径 r , 其它尺寸影响不大。

5 结 论

为了验证建立的弹性元件有限元模型的正确性,根据由长春衡器工业公司采集到的八个平行梁式传感器样品的实测尺寸数据来定义有限元模型的各个尺寸,并采用成熟的 ViziCAD 程序进行应力应变计算,计算出理论灵敏度,再与样品的实测灵敏度相比。

8 个样品的实测尺寸(是指 4 个贴片区的厚度)及相应的实测灵敏度值,列于表 1 中,其它各主要尺寸有:

弹性体总长: $L = 125\text{mm}$;

贴片区孔距: $L_2 = 35\text{mm}$;

弹性体厚度: $b = 29\text{mm}$ 。

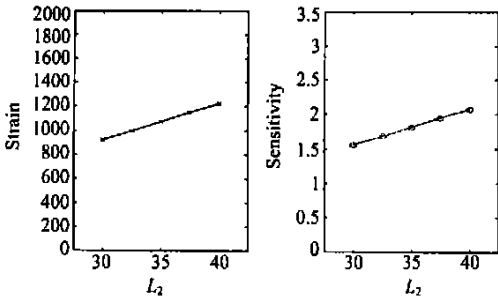


图 7 弹性体的孔距 L_2 对输出应变值和灵敏度的影响

Fig. 7 Effects of the aperture distance L_2 on the strain and sensitivity.

表 1 样品尺寸实测值及相应灵敏度实测值

Table 1 Measured values of the sample dimension and measured values of the corresponding sensitivity

样品	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h_4 (mm)	$S_{\text{实测}}(\text{mv/v})$
1	1.940	1.937	1.927	1.875	1.870 93
2	1.916	1.893	1.945	1.916	1.892 44
3	1.988	1.910	1.916	1.890	1.902 59
4	1.902	1.907	1.951	1.918	1.916 05
5	1.895	1.895	1.798	1.792	2.000 00
6	1.913	1.895	1.903	1.866	1.937 00
7	1.960	1.931	1.957	1.934	1.896 00
8	1.926	1.912	1.911	1.929	1.890 00

将 8 个样品输出灵敏度的实测值和计算值进行对比,如表 2 所示。

表 2 样品输出灵敏度的计算值与实测值对比

Table 2 Comparison between calculated value and measured value of the sensitivity of the sample

序号	S_j (mv/v)	S_s (mv/v)	$S_j - S_s$ (mv/v)	ΔS (mv/v)
1	1.87129	1.87093	0.00036	0.000 19
2	1.90386	1.89244	0.01142	0.005 99
3	1.90317	1.90259	0.00058	0.000 31
4	1.91762	1.91605	0.00157	0.000 82
5	1.97139	2.00000	- 0.02861	- 0.014 51
6	1.93152	1.93700	- 0.00548	- 0.002 75
7	1.84907	1.89600	- 0.04693	- 0.025 38
8	1.89758	1.89000	0.00758	0.003 99

其中:

S_j 表示有限元模型的计算输出灵敏度;

S_s 表示实测的输出灵敏度;

ΔS 表示灵敏度计算值与实测值的相对误差

$$\text{其中 } \Delta S = \frac{(S_j - S_s)}{S_j}。$$

通过表 2 可以看出采用上述建立的有限元模型计算的理论灵敏度与实测结果吻合程度很好,最大相对误差为 1.451%,而大多数都在 1% 以

下,甚至在 0.6% 以下。

综上所述,采用本文建立的有限元模型计算的理论灵敏度与实测灵敏度相当接近,说明用本

文建立的有限元模型进行弹性体的有限元分析是切实可行的,而且有利于提高弹性元件生产精度和效率。

参考文献:

- [1] 乐静,高宗海. 平行梁式传感器抗偏载能力的研究[J]. 自动化仪表, 1996, 7: 16- 18.
- [2] 吴淑芳. 平面区域四边形网格自动生成技术[J]. 计算结构力学及其应用, 1996, 8: 28- 30.
- [3] 贾宇辉,谭久彬. 超磁致伸缩驱动器及有限元分析方法的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 161- 164.
- [4] 袁明道,肖明. 基于 AutoCAD 的有限元网格半自动剖分[J]. 工程设计 CAD 及自动化, 1998, 4: 26- 30.
- [5] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [6] 俞研,陶俐言. 基于 CAD/CAM 集成的特征系统研究[J]. 光学精密工程, 1999, 7(6): 10- 13.
- [7] Armstrong Cecil G. Modeling requirements for finite_element analysis[J]. *Computer- aided design*, 1994, 7(7): 19- 21.

Finite element analysis of the parallel girder load sensor

ZHAO Si_hong, TIAN Chun_yan, FAN Hui_lin

(The Second Aeronautical Institute of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: The elastomer of a parallel girder load sensor affects the measuring precision directly. According to the structure and feature of the elastomer of a parallel girder load sensor, the rational finite element model of the elastomer was built, and in the course of exploiting Auto CAD of the sensor, a method of the automatic generation of the finite element mesh was founded. Dealing with three instances of line intersecting, the relationship between the out_stain and the dimension of the structure was also founded. Finally, by means of ViziCAD, the stress and strain of the finite element were analyzed. Compared the calculated value with the measured one of the output sensitivity, it is proved that they are nearly identical. Therefore, the finite element method can improve the precision and efficiency of the manufacture.

Key words: sensors; elastomers; finite element; ViziCAD

作者简介: 赵思宏(1965-), 男, 吉林省长春市人, 研究生学历, 讲师, 某型飞机专家组成员;

田春艳(1975-), 女, 吉林省桦甸市人, 硕士;

范惠林(1962-), 男, 山东省潍坊市人, 研究生学历, 副教授, 空军某学院学术委员会委员。