

有限元法在称重传感器设计中的应用

宁波柯力电气制造有限公司 詹铭坚 姚玉明

【摘要】 本文阐述了有限元法在称重传感器灵敏度设计计算、滞后误差分析及灵敏度温度补偿中的应用，并以称重传感器设计实例展现了有限元法的高效性和便捷性，希望对国内称重传感器设计技术水平的提高有所帮助。

【关键字】 有限元法；称重传感器；灵敏度；滞后；补偿

引言

有限元法的基本思想：将求解域分割成通过节点互连的有限个单元，给每一单元假定一合适近似解，通过推导该域满足的条件（平衡方程，物理方程，几何方程，边界条件等）获得该问题的解。

随着计算机技术的发展，基于软件的有限元计算越来越简便，其应用已经渗透到设计行业的各个领域。通过有限元的应用我们可以减少繁琐的力学计算，缩短设计周期，降低研发成本，能为产品设计与性能评估提供可靠的理论依据。

1 有限元计算的基本过程

计算机技术的发展和广泛应用，给有限元法的发展带来了革命性的变化，有限元法在研发中显示出其无与伦比的优越性，成为了企业在日益激烈的市场竞争中制胜的重要工具。在层出不穷的有限元软件中，目前通用的分析软件有：ANSYS、I-DEAS、ABAQUS、NASTRAN 等。有限元分析工作通常包含三个阶段：

1.1 前处理阶段

- 1) 建立求解域的物理模型并简化；
- 2) 将求解域离散成通过节点互连的有限个单元，获得单元刚度矩阵，并组装成整体结构刚度矩阵；
- 3) 将非节点载荷往节点移置组成载荷矩阵；
- 4) 得到整体刚度方程。

1.2 求解阶段

将边界条件代入整体刚度方程，通过高斯消元等办法得到问题的解。

1.3 后处理阶段

用图形显示或列表输出评价分析结果。

2 传感器设计的有限元法

在日益激烈的市场竞争中，有限元导入设计应用缩短了样机的试制过程，增加了产品的可靠性。可在产品设计阶段发现潜在的风险，并基于可视化的三维模型实现结构优化，有效的降低开发试制经费，缩短产品的开发周期。

2.1 灵敏度设计的有限元法

灵敏度的传统算法为：

$$S=K\varepsilon \tag{1}$$

式中：S——输出灵敏度；
 ε ——贴片区微应变值；
 K——应变计灵敏系数。

以两端支撑中间压力为 N 的轴销式称重传感器为例叙述其计算过程，该称重传感器的贴片区横截面如图 1 示。

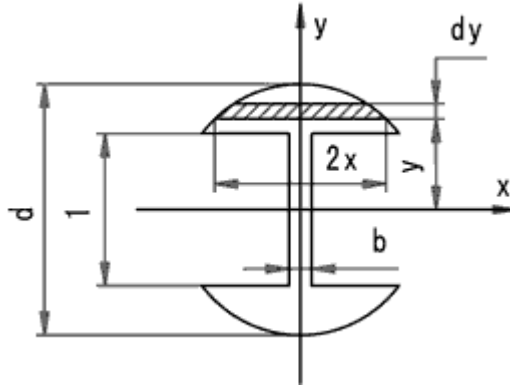


图 1

$$\text{应变区剪力值: } Q=N/2 \tag{2}$$

$$\text{应变区剪应力计算式: } \tau = \frac{QS_x}{I_x b} \tag{3}$$

$$S_x = \int_A y_1 dA = \int_y^{l/2} y_1 b dy_1 + \int_y^{d/2} y_1 \cdot 2x \cdot dy_1 \tag{4}$$

$$I_x = I_{x1} + 2I_{x2} \tag{5}$$

$$I_{x1} = \int_A y^2 dA = \int_{-l/2}^{l/2} y^2 * b * dy \tag{6}$$

$$I_{x2} = \int_A y^2 dA = \int_{l/2}^{d/2} y^2 * 2x dy \tag{7}$$

$$\tau = E \varepsilon \tag{8}$$

将已知量代入以上算式可解得灵敏度 S 值，对于规则结构通过经典材料力学算法加以修正可得称重传感器灵敏度，而对于不规则结构，经典材料力学则无能为力，因此我们引入了有限元算法。

进行灵敏度分析时，有限元法首先应建立弹性元件的三维实体模型，经软件前处理程序离散后可得结构平衡方程：

$$[K][A]=[F] \tag{9}$$

式中： K ——弹性体刚度矩阵，表征发生单位位移所需施加于结构的力值大小

A ——结构位移矩阵，收集了所有节点的位移量

F ——载荷矩阵

在前处理阶段，软件读取单元中节点的刚度值及载荷值组装成整体刚度矩阵 K 及载荷矩阵 F ，通过平衡方程 (9)、材料本构关系 (8) 及式 (1) 解得灵敏度值 S 。用 I-DEAS 软件解得的轴销传感器弹性元件的应力分布如图 2。

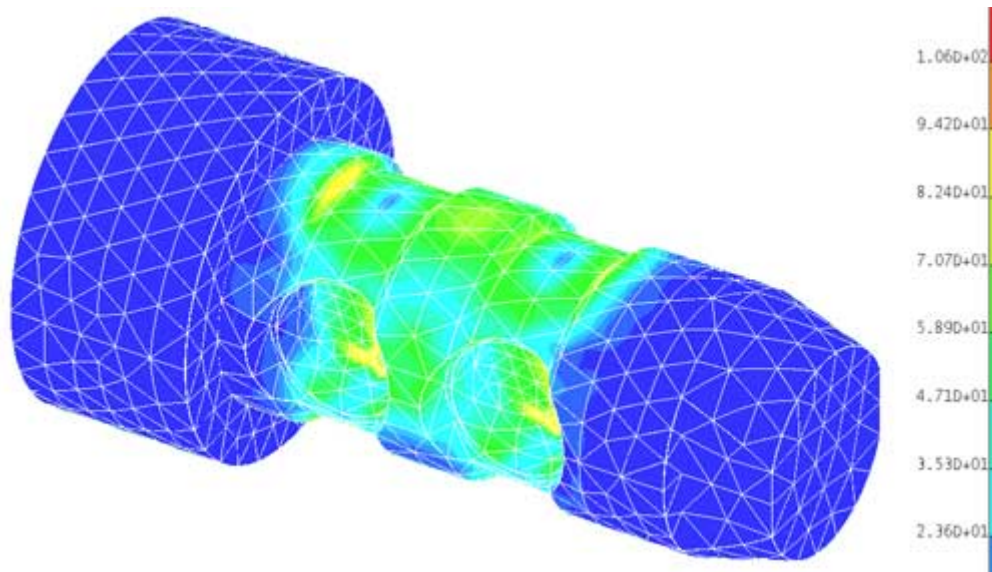


图 2

由上可知，为解得贴片区的应力应变值经典材料力学需进行多次微积分过程，而有限元法则将繁琐的计算交由计算机完成，经后处理可将传感器弹性元件的应力应变值用图片或表格形式直观地表示出来。因此有限元法为当今高效率的设计奠定了便捷的基础。

采用有限元法我们亦可研究不同贴片孔距离、不同贴片孔大小对灵敏度输出的影响，作为贴片孔设计的理论依据，在此不再列举。

2.2 滞后分析的有限元法

称重传感器的滞后是指从零点以单调递增的方式加载与从额定载荷以单调递减的方式卸载时，在相同的载荷值条件下，称重传感器的输出存在差值。滞后通常用该差值与称重传感器满量程输出的百分比表示。

引起称重传感器滞后的原因通常是多方面的，包括弹性元件结构的局部塑性，贴片胶水的迟滞效应，弹性元件与关联部件的摩擦都将是产生滞后的重要因素。

双剪切梁称重传感器与底座间，在加载与卸载时产生相对“滑移”，这将引起称重传感器的滞后。

图 3 为双剪切梁称重传感器三维简化模型，考虑到钢球与压头间、钢球与弹性元件间的相对摩擦对滞后输出的影响微小，故有限元分析模型略去压头及钢球部分，将载荷施加于弹性元件与钢球接触区域上。弹性元件与底座之间、螺栓与弹性元件之间分别定义接触，考察滑动摩擦对输出的影响，为切合称重传感器实际给螺栓施加拧紧力，拧紧力大小由式（10）算得。

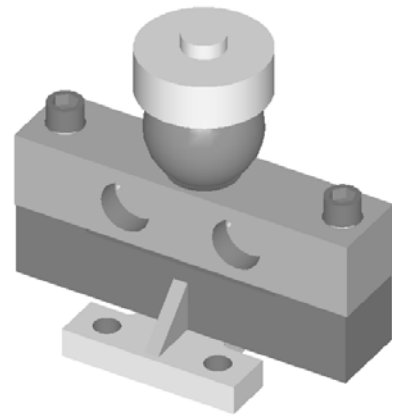


图 3

$$T=0.2QD$$

(10)

式中：T——拧紧螺栓的扭矩；

Q——螺栓拧紧力；

D——通常取为螺纹外径。

为减少软件计算时间，提高开发效率，提取 1/4 模型作为研究对象，在对称面上作相应处理，可等同整体结构分析效果，简化后的有限元模型如图 4。

考察分别在 500N.m 及 1000N.m 的螺栓拧进扭矩条件下，采用软件的时间载荷步功能定义力值从 0t-40t-0t 的加载卸载过程，贴片区输出应力值的滞后特性，经计算，图 5 为两不同螺栓拧紧力条件下称重传感器滞后特性的拟合曲线。

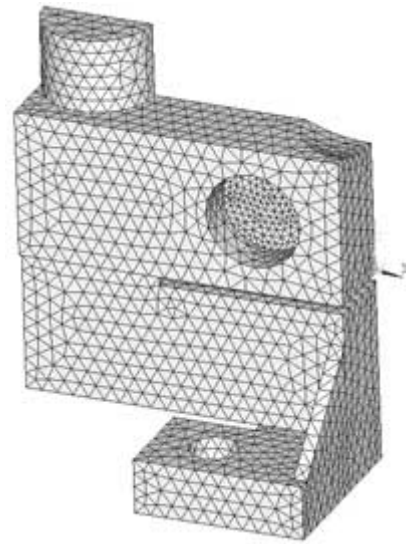


图 4

由以上分析可知，预紧力较大时称重传感器与底座的相对滑动较小，输出滞后值亦较小，该结果与试验值相吻合，但是预紧不能超过螺杆的标称扭矩值的 110%，防止冲击断裂失效。用以上方法亦可考察底座与弹性元件间不同接触面积大小对称重传感器滞后输出的影响，不同的贴片孔距离对称重传感器滞后输出的影响，不同贴片孔大小对称重传感器滞后输出的影响，由于篇幅关系，本文不作列举阐述。

2.3 灵敏度温度补偿的有限元法

绝大部分金属材料的弹性模量会随着温度而变化，通常弹性模量随温度的相对变化 $\Delta E/E\Delta t$ 是负值，不同材料此值差别也较大，即使同一种材料，由于机械加工及热处理的不同，该值也不完全相同。称重传感器弹性元件的弹性模量随温度而变化的特性会影响称重传感器精度，因此对于高精度称重传感器而言，研究弹性元件材料的弹模随温度输出变化特性，作为消除其对温度影响的依据是非常有必要的。

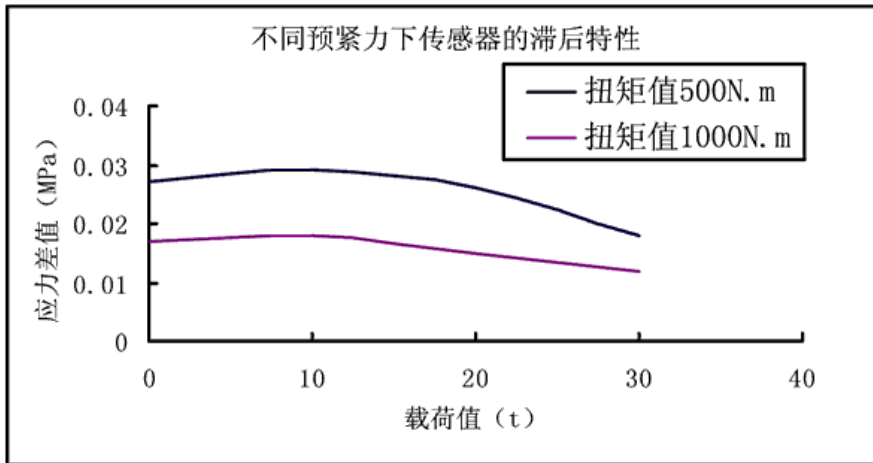


图 5

当环境温度升高，弹性模量降低，灵敏度变大时，使电桥的供桥电压随之成比例减小，则灵敏度保持不变，这就是灵敏度温度补偿原理。实现这一原理的方法为：在电桥的供桥回路中串接一个随温度而变化的灵敏度温度补偿电阻 R_{mt} ，当温度升高时电阻 R_{mt} 增大，虽然总供桥电压不变，但由于电阻 R_{mt} 的分压作用，从而引起灵敏度 S 的减小，这对因为弹性模量 E 变小造成灵敏度 S 增大起到了补偿作用。灵敏度补偿电路如图 6。

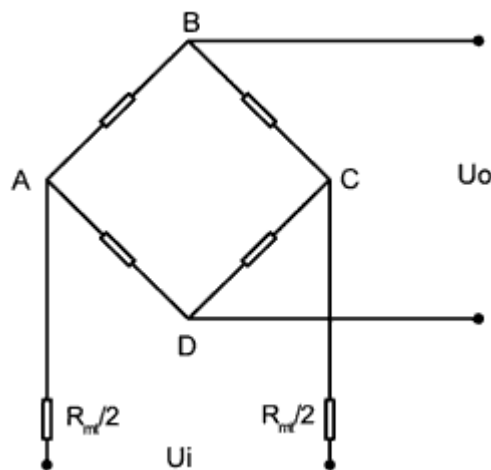


图 6

以轴销称重传感器为例，将弹性元件的三维模型结构离散后，在外载不变条件下，以有限元软件的时间步长功能定义虚拟环境温度从 -30°C ~ 60°C 缓慢变化，得到贴片区应力输出值如图 7。

通过材料的本构关系及式 (1) 可分别求得不同温度下的灵敏度 S ，最终由式 (11) 得到补偿电阻值 R_{mt} 。

$$R_{mt} = \frac{(S_2 - S_1)R_{AC}}{[1 + a_M(t_2 - t_1)]S_1 - S_2} \quad (11)$$

式中： R_{mt} ——补偿电阻值；

S_1 —— t_1 温度时的灵敏度；

S_2 —— t_2 温度时的灵敏度；

R_{AC} ——惠斯通电桥 AC 间电阻；

a_M ——电阻材料的电阻温度系数。

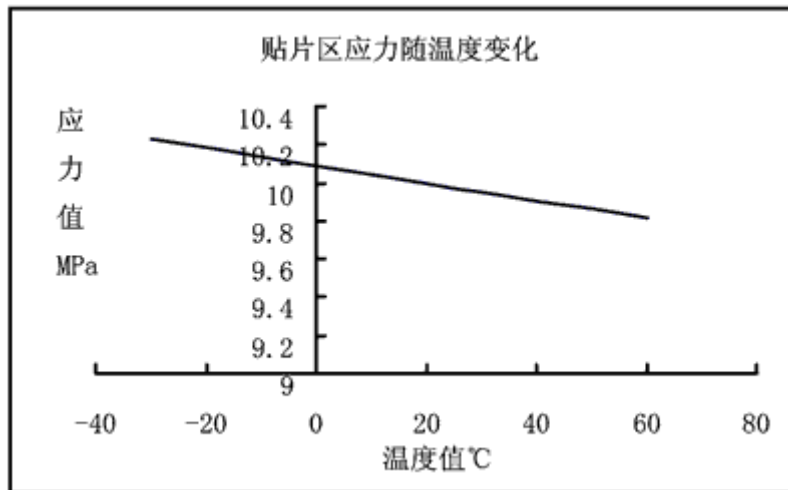


图 7

结束语

有限元法的发展和应用，给称重传感器开发带来了全新的设计方法，不断地更新开发人员的设计理念，为其能够迅速地开发出不断适应市场需求的产品带来了极大的便利。随着科学技术的不断发展，市场竞争日益激烈，设计人员需要更好的适应企业发展的有限元软件的应用。今后，有限元法在称重传感器设计中的应用将有以下趋势：

1. 由单一的零件模拟向整机模拟方向发展；
2. 由单一的应力分析向温度、电磁等多场综合模拟方向发展；
3. 由线性分析向非线性分析发展；
4. 在有限元分析功能不断完善的基础上，向优化设计及可靠性分析等综合功能评估方向发展。

参考文献

1. 曹立平主编. 中国衡器实用技术手册[M]. 中国计量出版社. 2005
2. 王勖成编著. 有限单元法[M]. 清华大学出版社. 2003
3. 郑卜伟等. NHS 传感器弹性体有限元分析[C]. 全国衡器工业信息中心. 2008

作者简介

詹铭坚，男，福建漳州人，宁波柯力电气制造有限公司 CAE 工程师。