

用磁感应法测量金属丝杨氏模量的方法

严一民*

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】根据霍尔器件能构成均匀的腔体磁场，提出了一种用磁感应法测量金属丝杨氏模量的方法。通过导磁铁微移动影响腔体磁路变化确定了霍尔电压与位移函数的关系，计算出了 K 值。最后将其与拉伸法测量金属丝杨氏模量的两种测量方法结果值进行了比较：在霍尔器件静态输入-输出特性下，所测杨氏模量有较大改善。

关键词 磁感应；霍尔器件；位移；杨氏模量

中图分类号 TN382；TM933.12

Method to Measure wire Young's Modulus by Magnetic Induction Method

Yan Yimin

(College of Physics Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The uniform cavity magnetic field can be formed by Hall device. This paper presents a method to measure the wire Young's modulus by means of a magnetic induction approach is presented. Guide magnet small displacement influence is passed to change on distribution of cavity magnetic field. The relationship between Hall voltage and displacement function is determined. K value is calculated. Finally, a comparison between the measurement result values by the methods of magnetic induction and stretch is also made. The measured of Young's modulus has improved greatly under the input-output characteristic in Hall device.

Key words magnetic induction; Hall device; displacement; Young's modulus

拉伸法(或光杠杆法)测量金属丝的杨氏模量是一种重要的测量手段。在测量中，由于涉及的手工测量工具较多(如望远镜标尺、米尺、游标卡尺、千分尺)，以及在实验过程中操作人员误差(视觉和习惯)影响，则造成测量数值不准确，使测量结果误差偏大。根据磁感应原理，采用霍尔器件设计的杨氏模量实验仪器能很好地解决上述不利因素，而且结构简单。对于非接触物理量检测，霍尔传感器有很大优点，其磁灵敏度高、响应时间快、测量精度高，尤其适合对微小位移测量。本文用实例进行分析，并研究了传感器线性输出特性与位移变化的关系。

1 实验原理

根据虎克定律，在弹性限度内，物体的胁强和胁变成正比，其杨氏模量为

$$Y = \frac{F}{S} \frac{L}{\Delta L} \quad (1)$$

2002年7月8日收稿

* 男 41岁 大学 助理工程师

式中 F 为沿长度方向施加的力; S 为金属丝横截面积; ΔL 为金属丝原长, 除 ΔL 须用实验方法测量外, 其他参数可以直接测量。只要测出微小位移 L , 就能得到杨氏模量值。把被测金属丝挂在钢梁处, 在其下端用螺栓与磁铁板固定连接, 磁铁下方是一个磁场均匀的腔体模块, 放入霍尔传感器。当磁铁板上增加或减少砝码时, 在压力作用下, 被测物金属丝伸长(或缩短)产生微小位移。根据磁感应原理, 磁铁板上下移动使腔体磁场磁路发生变化, 霍尔器件输出电压信号, 实验原理如图1所示。

霍尔片的结构如图2所示, 图中, d 是霍尔片厚度, l 是长度, w 是宽度, 其电流密度为^[1]

$$\mathbf{J}_n = qn\mathbf{m}_n\mathbf{E} - \mathbf{m}_{Hn}\mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

式中 q 为电子电荷量; \mathbf{m}_n 和 \mathbf{m}_{Hn} 分别是电子漂移迁移率和霍尔迁移率; \mathbf{E} 为电场强度; n 为电子浓度。 \mathbf{J}_n 在 x, y 两个分量为

$$J_{nx} = qn\mathbf{m}_n E_x - \mathbf{m}_{Hn} J_{ny} B \quad (3)$$

$$J_{ny} = qn\mathbf{m}_n E_y + \mathbf{m}_{Hn} J_{nx} B \quad (4)$$

当输出极开路时 $J_{ny} = 0$

$$J_{nx} = qn\mathbf{m}_n E_x \quad (5)$$

$$E_y = -\frac{\mathbf{m}_{Hn}}{qn\mathbf{m}_n} J_{nx} B \quad (6)$$

即工作电流 I_c 和霍尔电压 V_H 为

$$I_c = J_{nx} wd \quad (7)$$

$$V_H = E_y w \quad (8a)$$

由式(6)、(7)消去 E_y 、 w 得出霍尔电压

$$V_H = -\frac{\mathbf{m}_n}{\mathbf{m}_{Hn}} \frac{I_c B}{qn} \quad (8b)$$

设

$$R_H = -\frac{\mathbf{m}_{Hn}}{\mathbf{m}_n} \frac{1}{qn}$$

则

$$V_H = R_H \frac{I_c B}{d} \quad (8c)$$

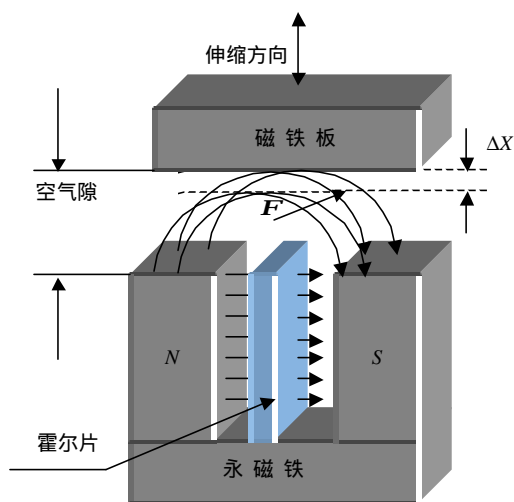


图1 磁铁板位移与磁场变化关系

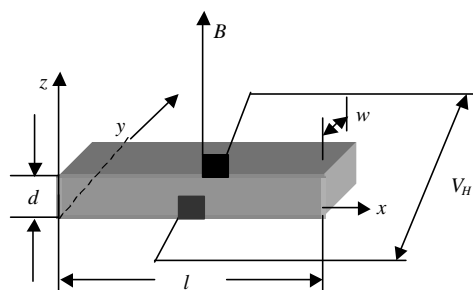


图2 霍尔片结构

2 霍尔传感器的工作状态

假定磁铁板与腔体永磁铁相对位置变化在 $X = 2 \text{ mm}$ 的范围内, 霍尔传感器的输出特性呈线性关系, 如图3所示。传感器在稳态信号作用下不随时间变化(或变化较为缓慢), 其输出-输入关系称为静态特性。传感器输出特性为线性和非线性两种, 而多数传感器输出-输入是非线性的, 在不考虑迟滞和蠕变效应下, 可用多项式表示^[2]

$$y(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + \dots + c_n x^n \quad (8)$$

式中 $y(x)$ 为输出量; x 为输入量; c_0 为零位输出; c_1 为传感器线性灵敏度; c_2, c_3, \dots, c_n 为待定常数, 略去高次项 $c_2=c_3=\dots=c_n=0$, 可得到一个近似的线性方程

$$y = c_0 + c_1 x \quad (9)$$

若 $c_0=0$, 则理想的输出特性方程为

$$y = c_1 x \quad (10)$$

式中 c_1 为常数, 由此推出在线性段上霍尔电压输出与位移变化为

$$V_H = K \Delta X \quad (11)$$

式中 K 为比例系数, 可用作图法算出 K 值, 如果将霍尔电压模拟信号变为数字信号, 经 A/D 转换器系统处理后, 再对 R 值修正可直接用数字毫伏表显示位移值。

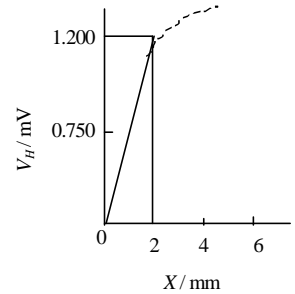


图3 霍尔电压与位移关系

3 实验数据

本文实验中设定砝码为一等, 精度 $\pm 4 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 每增加 1 kg 砝码, 以等距伸长 0.10 mm 为参考标准(在近似的线性直线内考虑 K 值为常数), 实验操作分两次完成, 所测得的数据如表1和表2所示。

表1 测出加砝码数据

次数	砝码/kg	$\Delta X_i / \text{mm}$	V_H / mV
0	初始点	0	0.005
1	1.00	0.10	0.139
2	2.00	0.20	0.280
3	3.00	0.30	0.438
4	4.00	0.40	0.566
5	5.00	0.50	0.679
6	6.00	0.60	0.742
7	7.00	0.70	0.779
8	8.00	0.80	0.789
9	9.00	0.90	0.771
10	10.00	1.00	0.728

表2 测出减砝码数据

次数	砝码/kg	$\Delta X_i / \text{mm}$	V_H / mV
0	10.00	1.00	0.730
1	9.00	0.90	0.771
2	8.00	0.80	0.791
3	7.00	0.70	0.785
4	6.00	0.60	0.758
5	5.00	0.50	0.681
6	4.00	0.40	0.577
7	3.00	0.30	0.448
8	2.00	0.20	0.299
9	1.00	0.10	0.142
10	初始点	0	0.004

4 数据处理

实验使用的测量仪器精度为 $\pm 0.2\%$, 由于测量过程中产生的系统误差, 因此将表1、2中两次测出的霍尔电压取以下算术平均值

$$V_0 = (0.005 + 0.004) / 2 = 0.005$$

$$V_4 = (0.566 + 0.577) / 2 = 0.572$$

$$V_1 = (0.139 + 0.142) / 2 = 0.141$$

$$V_5 = (0.679 + 0.681) / 2 = 0.680$$

$$V_2 = (0.280 + 0.299)/2 = 0.290$$

$$V_6 = (0.742 + 0.785)/2 = 0.763$$

$$V_3 = (0.438 + 0.448)/2 = 0.443$$

$$V_7 = (0.779 + 0.785)/2 = 0.780$$

将以上所得平均值 $V_0 \sim V_7$ 和位移值 $X_1 \sim X_7$ 描点作出 $V_H \sim X$ 的关系曲线如图4所示, 根据直线方程斜率 $k = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ 算出 $V_0 \sim V_5$ 与微位移量 $X_i \sim X_{i-1}$ 的比例系数 K 的值, 在剔除非线性段上 $K_6 \sim K_{10}$ 的值, 使 K 值拟合的直线较好, 则

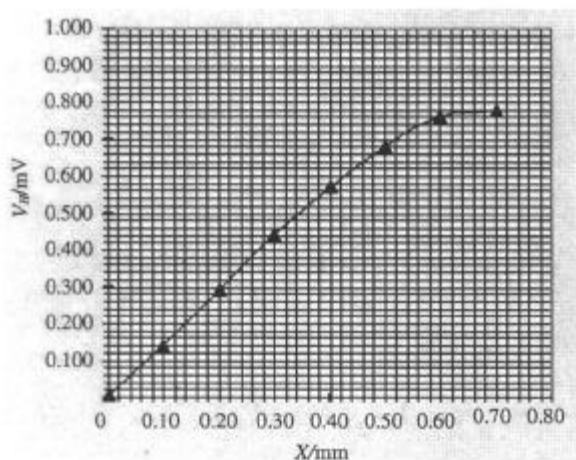


图4 电压位移参数及曲线

$$K_1 = (0.141 - 0.005)/(0.10 - 0.00) = 1.30$$

$$K_2 = (0.290 - 0.141)/(0.20 - 0.10) = 1.49$$

$$K_3 = (0.443 - 0.290)/(0.30 - 0.20) = 1.53$$

$$K_4 = (0.572 - 0.443)/(0.40 - 0.30) = 1.29$$

$$K_5 = (0.680 - 0.572)/(0.50 - 0.40) = 1.09$$

取平均值

$$K_{\text{均}} = (1.36 + 1.49 + 1.53 + 1.29 + 1.09)/5 =$$

$$1.35 \pm 0.002 \quad (12)$$

由逐差公式

$$\overline{\Delta x} = \sum_{i=1,2,\dots}^n \frac{2}{i} (x_{i-1} - x_{i-4}) \quad (13)$$

将霍尔电压的算术平均值代入式(13)得

$$\begin{aligned} \overline{V_H} &= \frac{1}{3} [(V_5 - V_2) + (V_4 - V_1) + (V_3 - V_0)] = \\ &= \frac{1}{3} [(0.680 - 0.290) + (0.572 - 0.141) + (0.443 - 0.005)] = 0.420 \end{aligned}$$

用米尺和螺旋测微仪测出金属丝长度 L 、直径 d 的数值, 并取平均值加上测量误差为

$$\overline{L} = 0.487 \pm 0.002$$

$$\overline{d} = (7.06 \pm 0.05) \times 10^{-4}$$

计算出的截面积为

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2$$

实验中被测物金属丝受5个砝码的拉力为

$$F = 5 \times 1.00 \times 9.80 = 4.90 + 0.004$$

把以上各相应的计算值代入下面公式得

$$Y = \frac{4KFL_{\text{均}}}{\pi d^2 \overline{V_H}} = \frac{4 \times 1.35 \times 0.487 \times 5 \times 1 \times 9.80}{3.14 \times 7.06^2 \times 10^{-8} \times 0.420 \times 10^{-3}} = \frac{128.860}{65.73 \times 10^{-11}} = 1.96 \times 10^{11}$$

相对误差总和为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Y}{Y} &= \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta F}{F} + 2 \frac{\Delta d}{d} \frac{\Delta V_H}{V_H} = \\ &= \frac{0.002}{1.35} + \frac{0.002}{0.487} + \frac{0.004}{1} + 2 \times \frac{0.005 \times 10^{-4}}{7.06 \times 10^{-4}} + \left(- \frac{0.001}{0.42} \right) = \\ &= 0.0015 + 0.0041 + 0.0040 + 0.0014 - 0.0024 = 0.86\% \end{aligned}$$

绝对误差为

$$\Delta Y = Y \frac{\Delta Y}{Y} = 1.96 \times 10^{11} \times 0.86\% = 1.69 \times 10^{11}$$

则磁感应法测金属丝的杨氏模量为

$$Y = (1.960 + 0.017) \times 10^{11}$$

5 模块输出特性

通过以上测量参数及图4可以看出在位移量0~0.50 mm霍尔电压线性较好,在0.60~1.00 mm开始呈非线性。因此,可根据实验要求选取线性参数特性好、灵敏度高的霍尔器件。为获得较小磁感应强度下的线性律特性,应采用高迁移率的N型InSb单晶片。InSb的电子迁移率 $m_n = 5.6 \sim 6.5 \text{ m}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, 而不宜用InSb多晶霍尔器件。传感器模块中的磁场梯度越均匀,则磁敏器件对位移测量的线性度就越好,即磁场梯度大、均匀,测量位移的灵敏度和精度越高。在表达式 $V_H = K \times \Delta X$ 中的比例系数K是通过实验得出的经验值,未考虑温度影响及霍尔器件的负效应影响。因此,只取相关实验数据,其他因素忽略。计算中应在线性段上取值,否则K值的误差会偏大,将影响Y值结果。本实验若增加测试组数,选用更高精密的仪表,还可以提高测量精度。

6 结束语

本文实验用磁感应法测金属丝的杨氏模量与拉伸法测杨氏模量相比较,其结果相吻合,误差低于2%~5%,达到了设计要求,具有较好的实用性。但在实验仪器、模块工艺结构上还需要进一步完善,器件的型号参数根据实验要求确定。本文提出的实验设计思路可为实验和实验仪器的更新和设计方面起到一定的指导作用。

参 考 文 献

- 1 黄得星. 磁敏感器件及其应用. 北京: 科学出版社, 1987
- 2 刘迎春. 传感器原理设计与应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1989

· 科研成果介绍 ·

一体化通信网研究系统

主研人员: 邱杰 周吉 孙纪敏 陈迪平 陈世康 王俊芳 邱键 张永忠 丘智亮 胡钢 温海波 李乐民

一体化通信网研究系统具备了多网互连互通能力,不同系统集成能力,综合通信能力,并在此基础上提供了密级数字电话,交互式多媒体会议电视,多媒体电子邮件等6种新业务。该系统研制过程解决了近20项关键技术,例如:具有远距离传输能力的机动天线ATM网络技术。

· 科 卞 ·