

冷轧钢板电涡流测厚温度影响的研究

王 超

(广东省惠州市城市燃气发展有限公司 惠州 516001)

摘 要 电涡流技术是在线测量钢板厚度的有效方法, 针对测量原理和方法分析了传感器品质因数受线圈温度影响和被测钢板表面温度变化的影响, 提出了克服温度影响的方法, 以提高了测量精度。

关键词 冷轧钢板 电涡流测厚 温度影响修正 线圈品质因数 α β γ 滤波

前言

建立在电涡流效应原理上的测量技术, 可以实现非接触测量, 具有结构简单, 频率响应带宽, 灵敏度高, 线性范围大, 体积小等优点。在冷轧钢板生产过程中, 广泛采用高频反射式涡流传感器对钢板厚度作非接触测量。由于电涡流传感器品质因数不仅受线圈温度影响而且受被测钢板表面温度变化影响, 因此必须对温度影响因素进行分析并正确处理。

1 测量原理与方法

1.1 基本原理

当传感器线圈通以交流电流 I_1 时, 根据电磁场理论, 在线圈周围就会产生一个交变磁场 H_1 , 若被测导体置于该磁场内, 导体内便产生涡流 I_2 ; 该电流也将产生一个新的磁场 H_2 , 且 H_2 与 H_1 方向相反, 力图削弱原磁场 H_1 , 从而导致线圈的电感量、阻抗和品质因数发生变化。图 1 为电涡流传感器工作时的等效电路图。被测体中形成电涡流等效为一个短路环中的电流, 这样, 线圈与被测体便等效为相互耦合的两个线圈。

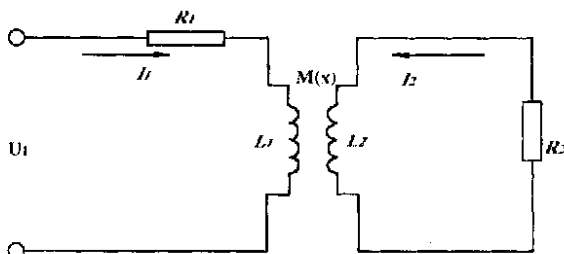


图 1 电涡流传感器工作等效电路

设 R_1 为传感器线圈的电阻, L_1 为电感; R_2 为

短路环电阻, L_2 为短路环电感; M 为线圈和短路环之间的互感。由等效电路基尔霍夫定律, 两个回路的电压方程为:

$$R_2 I_2 + j\omega L_1 - j\omega M I_2 = U_1 \quad (1)$$

$$-j\omega M I_1 + R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 = 0 \quad (2)$$

联立以上方程, 解出传感器工作时的复阻抗为:

$$Z = \frac{U_1}{I_1} = \left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3)$$

品质因数为:

$$Q = \frac{\omega L_1 \left[1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot \frac{L_1}{L_2} \right]}{1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot \frac{R_2}{R_1}} \quad (4)$$

互感系数 M 随线圈与导体之间的距离的增大而减小, 而复阻抗和品质因数也随之发生相应的变化, 从而可测出线圈与被测体之间的距离。

1.2 测量方法

为了克服在测量过程中钢板的不规则上下振动及板面不够平整的影响, 在钢板上下两侧对称放置了两个特性相近的传感器 S_1, S_2 , 如图 2 所示。 D 为两传感器的间距, d 为钢板厚度, X_1 和 X_2 为两传感器的测量值。从图 2 可知:

$$d = D - (X_1 + X_2) \quad (5)$$

两个传感器的信号经图 3 所示的变频调幅电路转换成相应的直流电压, 再经 A/D 转换一起送入计算机。测量电路的核心是振荡器, 传感器线圈是振荡器的一个电感元件, 振荡器的作用是将位移变化引起的振荡回路的 Q 值变化转换成高频载波信号的幅值变化。

传感器安装完毕后,通过静态标定,获得传感器的特性曲线 $x = f(u)$ 并存入计算机以进行换算。

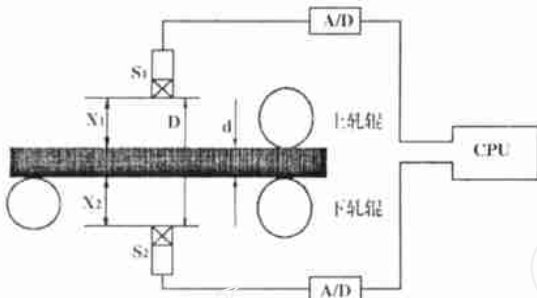


图 2 冷轧钢板电涡流测厚示意图

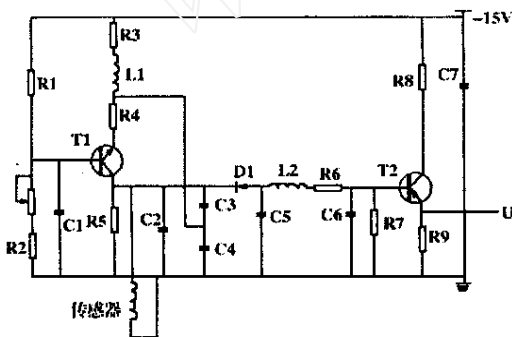


图 3 变频调幅式测量变换电路

2 线圈 Q 值的温度稳定性与设计

电涡流传感器线圈的电学特性——温漂,主要反映在线圈电阻和电感两个参数上。线圈电感为:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} W^2 d_0 \varnothing \quad (6)$$

式中 W — 线圈匝数

d_0 — 线圈平均直径

\varnothing — 由线圈几何因素决定的参数

可见 L_1 与温度没有直接关系。此外在传感器设计选材时,对热膨胀,结构稳定性都有特殊考虑,因此 L_1 随温度变化极小,实测也证明此变化可忽略。

线圈的交流电阻 R_{AC} 与趋肤深度 δ 有关^[2]。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_0(1 + \alpha t)}{\rho_f \mu_r \mu_0}} \quad (7)$$

$$R_{AC} = \frac{1}{\delta} \left[\frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \rho_0 (1 + \alpha t)} + \frac{\rho_0}{4} (1 + \alpha t) + \frac{3}{32\alpha} \sqrt{\frac{\rho_0^3 (1 + \alpha t)^3}{\pi f \mu_r \mu_0}} \right] \quad (8)$$

式中 ρ_0 — 温度 t_0 时的电阻率

α — 给定温度范围内的电阻温度系数

a — 线圈导线半径

f — 线圈激励频率

可见, R_{AC} 随温度 t 的增加而增加,使线圈 Q 值变坏,造成传感器输出降低。

采用多辨线绕制线圈可以很好地抑制线圈品质因数的温漂^[3]。即用相互绝缘的金属细线编织成一束来代替单股实心导线。这样绕制的线圈实际上是由 n 个单股线圈并联而成, n 为导线股数。则线圈的交流电阻 R_{AC} 减少为单股的 $1/n$, 而电感量几乎不变。这样温度变化即使会引起 R_{AC} 的变化,但线圈 Q 值受温度影响也将会降低到很低的程度。根据以上分析的计算结果可得出如图 4 所示的曲线图。

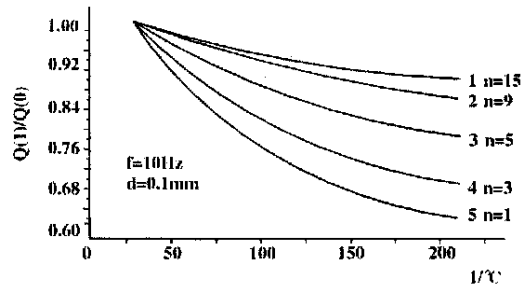


图 4 不同设计工艺传感器线圈 Q 值温度特性

当激励频率给定时,线圈的交流电阻在线圈导线取某一最佳线径时为最小值^[3]。根据以上分析,可获得提高传感器稳定性设计的重要参数。

3 钢板表面温度变化对线圈 Q 值的影响及修正

在钢板冷轧的过程中,由于钢板变形导致钢板表面温度的提高,此温升范围在几十到上百摄氏度,这对厚度测量影响极大。由于温升将导致 R_2 增大,从而引起传感器 Q 值的变化。根据(4)式,

$$\frac{dQ}{dR_2} = [R_2 \omega L_2 (2 - R_2 \omega M^2) + \omega^3 L_2 (M^2 - L_2) (2R_1 R_2 + \omega M^2)] [R_1 R_2^2 + R_1 \omega^2 L_2^2 + \omega M^2 R_2]^2 \quad (9)$$

在高频反射式传感器中激励频率一般达几百 kHz 以上,使得 $2 < R_2 \omega M^2$ 。又根据电磁耦合原理

$$M^2 < L_1 L_2, \text{ 所以 } \frac{dQ}{dR_2} < 0 \quad (10)$$

可见 R_2 增大, Q 值会降低,这必然引起传感器输出电压信号 u 减小。加之该温度影响信号与厚度信号迭加在一起,因此必须进行分离和修正。

从图 2 可知,轧机的导引辊和下轧辊的位置是固定的,因此钢板的下平面位置也保持不变。这样在无温升时可测出一固定值 u_0 作为基准值。当温度升高后,得到信号 u , 则温度分量 u_t 与它们的关系是:

$$u_t = u_0 - u \quad (11)$$

由于钢板上下层温度差极小, 可认为其上下层温度分量 $U_{\theta 01}$ 、 $U_{\theta 02}$ 信号相等。利用此温度分量即可对前面标定的电压——距离曲线作补偿和修正:

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1(u + u_{\theta 01}) \\ X_2 &= f_2(u + u_{\theta 02}) \end{aligned} \quad (12)$$

从而消除了钢板变形温升导致的影响。

在实际测量中, 由于钢板的振动和温升是随机无序的, 测得的 u 值也是变化的(包含随机噪声)。我们可以采用 α — β — γ 滤波的方法求出 u 的最优估计值^[4]。

由上一时刻对本时刻的一步预测估值方程为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{n+1/n} = \hat{X}_n + \hat{X}_{nT} + \hat{X}_{n2}(T^2/2) \\ \hat{X}_{n+1/n} = \hat{X}_n + \hat{X}_{nT} \\ \hat{X}_{n+1/n} = \hat{X}_n \end{cases} \quad (13)$$

本时刻的滤波估值方程为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{n+1} = \hat{X}_{n+1/n} + \alpha(X_{n+1}^* - \hat{X}_{n+1/n}) \\ \hat{X}_{n+1} = \hat{X}_{n+1/n} + \frac{\beta}{T}(X_{n+1}^* - \hat{X}_{n+1/n}) \\ \hat{X}_{n+1} = \hat{X}_{n+1/n} + \frac{2\gamma}{T^2}(X_{n+1}^* - \hat{X}_{n+1/n}) \end{cases} \quad (14)$$

其中, X_{n+1}^* 为本时刻的测量值, $\hat{X}_{n+1/n}$ 为上时刻

对本时刻的位置一步预测值, \hat{X}_{n+1} 为本时刻的滤波估值, T 为采样间隔, α β γ 为滤波器结构参数。 α 取 0.271, β 取 0.0285, γ 取 0.0005, 求出的 \hat{X}_{n+1} 作为 u 用于式(11)作温度影响修正。

4 结束语

采用高频反射式电涡流技术对钢板测厚有许多优点。通过分析温度对测量的影响, 合理设计传感器并利用微机技术处理数据可以使测量精度大大提高。

参考文献

- 1 陶旺斌等 电磁检测 航空工业出版社, 1995
- 2 HUGO L. LBBY, INTRODUCTION TO ELECTRONIC NDE TEST METHOD, JOHN WILEY & SONS, INC. 1971
- 3 谭祖根等 电涡流检测技术 原子能出版社, 1986
- 4 王宏禹著 随机数字信号处理 科学出版社, 1986

欢迎订阅 2003 年度《理化检验—物理分册》杂志

《理化检验—物理分册》系中国机械工程学会理化检验分会会刊, 近年来被评为国家机械行业以及上海市优秀科技期刊, 在行业中颇具影响。

《理化检验—物理分册》主要报道材料的金相检验、物理测试和力学性能试验等专业领域的新技术、新方法、新经验以及相应的研究和应用的成果, 即金相样品的制备及光学显微镜分析技术; 定量金相和图像分析技术; 热加工(铸、锻、焊及热处理)质量分析技术; 断口分析技术; 电子显微分析技术; X 射线衍射分析技术; 离子束分析技术; 废品分析及失效分析技术; 新材料(陶瓷、高分子、复合材料和功能材料等)的测试技术; 相分析与研究; 材料力学性能测试; 材料工艺性能测试; 材料强度的变化规律和内外因素的关系; 物理测试的数据统计处理方法和误差

分析及计算机的应用; 物理性能测试领域的新设备、新技术以及新的研究动向; 质量控制及寿命评估; 安全评估及风险评估; 材料的成分、组织、性能的关系; 机械产品的可靠性分析及材料强度研究的新成果等, 可供工矿企业、大专院校及科研单位中从事理化检测人员及材料研究人员参阅。

《理化检验—物理分册》为国内外公开发行人, 月刊, 大 16 开 48 页, 彩色胶印, 每册 6.00 元, 全年 72 元, 由全国各地邮政局(所)征订, 邮发代号: 4-183。欢迎广大读者于 10 月 20 日前到当地邮政局(所)订阅 2003 年《理化检验—物理分册》。漏订者请与本刊发行处联系。

地址: 上海市邯郸路 99 号

邮编: 200437 电话: (021)65556775 × 311