

# 非铁磁性金属薄层厚度的涡流测量法

李长青

摘要:

从金属薄层的单边来进行厚度测量在很多的工业应用中很需要,这对金属薄层厚度的均匀性的监测或对两边测量不容易实施的情况下(例如大面积的薄金属板),尤其重要.对于单层金属厚度测量的仪器现在还没有成型的商用产品,或是说成型的商用产品非常少.本文作者应用涡流技术探讨和研究这一个问题,并用实验室的现有设备设计实验,进行测量,得到和理论相吻合的结果.本文也给出相应设计方向及改进方法的讨论.

关键词:

单边厚度的测量,金属薄层,涡流

## Thickness Measurements for Non-Magnetic Metals

by Using Eddy Currents

Changqing Lee

### Abstract

Thickness measurements from only one-side of a thin plate of non-magnetic metal are often needed in industrial applications where it is hard to access to both sides of samples. For these measurements, few commercial products are available in the market. The authors explored and investigated this problem. Experiments were done in the lab with a differential eddy current system. Thickness measurements for Al and SST304 were completed; for the Al foil, the thickness varies from 25um to 250um; for the SST304 foil, the thickness ranges from 25um to 500um. Experimental results agree well with theoretical calculations. Possible problems and methods for improvement are also discussed and presented in this paper.

### Key word

Thickness measurements from one-side, metallic foils, eddy current

对于镀层厚度测量的问题, 涡流技术是一种成熟的技术. 涡流技术可以用来测量金属表面的非金属层(如表面漆)的厚度, 也可以用来测量镀在铁磁性金属物质表面的非铁磁性金属镀层的厚度(例如钛镀在铁磁性不锈钢 SST4340 的表面上). 这两种测量应用了相似的原理[1]. 对于金属表面的非金属层(如表面漆)厚度的测量, 涡流的提离效应被应用到测量中; 对于镀在铁磁性金属物质表面的非铁磁性金属镀层的厚度, 一种非常相似的技术, 磁感应技术(magnetic induction)被应用. 对应这两种技术, 市场上已经有很多的商用产品. 但是对于单层金属厚度测量的仪器现在还没有成型的商用产品, 或是说成型的商用产品非常少. 这是因为, 对于一般的厚度测量, 超声波法是一种很好的方法. 对于金属和非金属, 超声波法都有很好的测量范围, 从 1mm 到 200mm, 测量精度也非常好. 所以, 超声波法在单边厚度测量上, 是一种广泛应用的技术. 但是, 这种方法也有它的缺陷. 首先, 超声波法通常是一种接触式的测量方法, 测量过程中需要耦合剂, 另外, 由于超声波法有它的工作限制范围, 它很难用来测量厚度小于 1mm 的金属薄层. 有时, 测量厚度小于 1mm 的金属薄层在工业生产中有实际价值. 所以这里, 本文作者详细的讨论了应用涡流法进行非铁磁性金属厚度的测量. Dodd 和 Deeds[2]的论文中(也可以参看[3]), 单层镀层的问题也已经解决. (在一定的应用频率下, 通常是小于 10MHz 的正弦波). 在后续论文中[4], 甚至于 n 层镀层的问题也有相应的理论解. 虽然理论问题已经解决, 但是在实际应用中, 很难从应用的理论解得到相应的物理测量. 实验中, 很多的问题不好处理, 包括涡流探头的选择, 后续电路的设计及根据测量数据推算金属薄层的厚度. 另外, 不同金属有不同的导电率, 这影响了厚度的测量, 也更加复杂了这个问题.

本文对铝的薄层和非铁磁性不锈钢 SST304 进行了测量, 实验结果与理论吻合. 铝的薄层的厚度变化是从 25um 到 250 um. 不锈钢 SST304 的厚度变化是从 25um 到 500 um. 同时理论仿真也显示了很好的应用前景.

## 理论

下面的实验结构被应用在本文中. 一个通电圆形空心线圈被放置在一片金属薄层上, 图 1 所示为装置的横截面图.

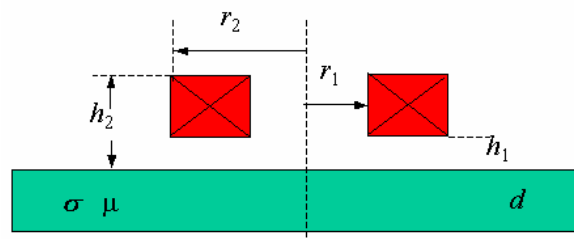


图 1 通电圆形空心线圈被放置在一个金属薄板上

空心线圈的内径用 $r_1$ 代表, 外径用 $r_2$ 代表. 线圈的底部和顶部到金属薄板上的距离分别为 $h_1$ 和 $h_2$ . 线圈的高度是 $L = h_2 - h_1$ . 线圈的匝数用 $n$ 来表示. 假设金属薄层的导电率为 $\sigma$ , 金属薄层的厚度为 $d$ ; 因为我们讨论的是非铁磁性金属, 所以对我们的研究, 磁导率 $\mu = \mu_0$ . 那么, 应用Dodd和Deeds [2]的理论, 经过简化和推导, 我们可以容易的得到下面的结果. 图 1 中的通电线圈的感抗为,

$$Z = Kj\omega \cdot \int_0^{\infty} \frac{I^2(\alpha, r_1, r_2)}{\alpha^5} \left( 2(h_2 - h_1) + \frac{1}{\alpha} \left[ 2e^{-\alpha(h_2 - h_1)} - 2 + A(\alpha)\phi(\alpha) \right] \right) d\alpha \quad (1)$$

$\omega$  代表角频率, ( $\omega = 2\pi f$ ),

$$K = \frac{\pi\mu_0 n^2}{(h_2 - h_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \quad (2)$$

$\mu_0$  是真空的磁导率.

$$\phi(\alpha) = \frac{(\mu\alpha + \mu_0\alpha_p)(\mu_0\alpha_p - \mu\alpha) + (\mu\alpha - \mu_0\alpha_p)(\mu_0\alpha_p + \mu\alpha)e^{2d\alpha_p}}{(\mu\alpha - \mu_0\alpha_p)(\mu_0\alpha_p - \mu\alpha) + (\mu\alpha + \mu_0\alpha_p)(\mu_0\alpha_p + \mu\alpha)e^{2d\alpha_p}} \quad (3)$$

$$I(\alpha, r_1, r_2) = \int_{\alpha r_1}^{\alpha r_2} x J_1(x) dx \quad (4)$$

$$\alpha_p = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu\sigma} \quad (5)$$

$$A(\alpha) = (e^{-\alpha h_1} - e^{-\alpha h_2})^2 \quad (6)$$

以上的结果都是从[2][3]的结果简单的推导得出的, 但这些结果也可以从麦克斯韦方程组直接推导得出.

公式 1 中,  $Z$  代表线圈的感抗,  $\alpha$  是在解偏微方程时出现的分离常数, 公式 4 中,  $J_1(x)$  是一阶第一类 Bessel 函数. 以上的每个物理参量都有一定物理意义,  $K$  是和线圈参数 ( $h_1, h_2, r_1, r_2, n$ ) 有关的参量;  $I(\alpha, r_1, r_2)$  也和线圈参数有关;  $A(\alpha)$  和线圈的高度和到金属薄层的距离有关;  $\alpha_p$  和  $\phi(\alpha)$  与系统应用的频率, 金属薄层的参数 ( $\omega, \sigma, d$ ) 有关.

## 实验装置

实验设计在图 2 中加以说明, 也可以请参看[5]. 一个 Tabor-8024 信号发生器被用作信号源. 图 2 的两个电阻 ( $R_1$  和  $R_2$ ) 都是  $100\Omega$ . 差分放大器是作者根据实际情况用运放设计的. 差分放大器放大的信号被送到一个内置在 PC 机内的 14 位 A/D 卡, CompuScope 14100.

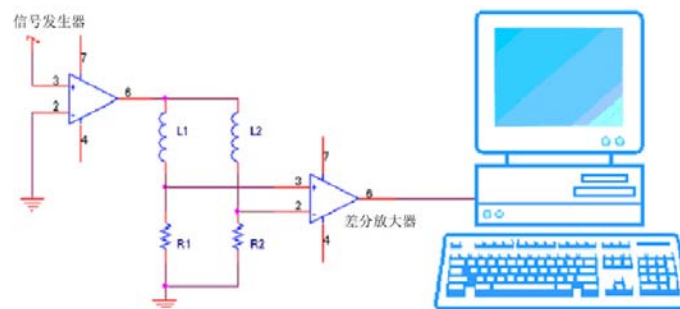


图 2 差分系统的实验设计

图 2 中所示的驱动器(Driver)的内阻极低, 小于  $1\Omega$ , 可以驱动整个系统. 虽然, 可以使用其他的激励信号 (例如方波信号或冲击信号), 但是这里, 正弦信号用来激励整个系统. 这可以简化理论的计算, 也可以简化实际应用.

通常情况下, 线圈探头的设计和选择对于系统十分的重要. 每个系统都要有自己相应的探头. 但是实验情况限制了这个过程, 我们使用了实验室现有的最适合这个应用的探头. 这两个探头线圈是手工绕制的, 所以稍微有一些不同. 探头的参数如下,

表 1, 线圈的参数

线圈	A	B
匝数, $n$	280	282
内径, $r_1$ (mm)	2.75	2.75
外径, $r_2$ (mm)	5.75	5.72
高度, $h_2-h_1$ (mm)	2.02	2.03
电阻, $R_c$ ( $\Omega$ )	10.02	10.17

这两个线圈都是空心线圈. 线圈 A 被放置在铝的薄层上; 线圈 B, 作为参考线圈, 被放置在空气中.

## 实验结果

在设计这个系统后, 我们用金属铝的薄层和非铁磁性不锈钢 SST304 的薄层来检验这个系统和理论推导. 对于金属厚度的实验测量, 被测金属的导电率应该作为先决条件知道; 金属铝的导电率是 37MS/m, 不锈钢 SST304 的导电率是 1.45MS/m. 实验中, 提离距离始终保持在 0.5mm. 下图是我们使用 A/D 采集软件进行厚度的测量的屏幕显示.

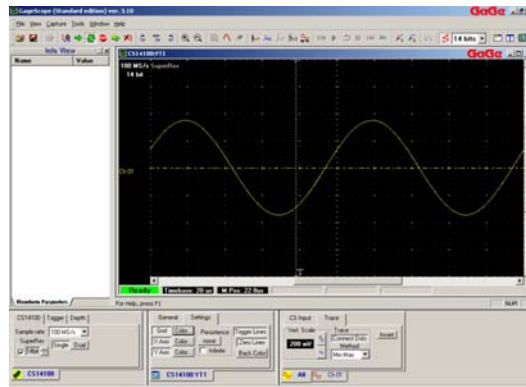


图 3 A/D 采集软件

A/D 采集卡得到的数据存储于 PC 机内, 经过分析处理后, 得到了下面的结果.

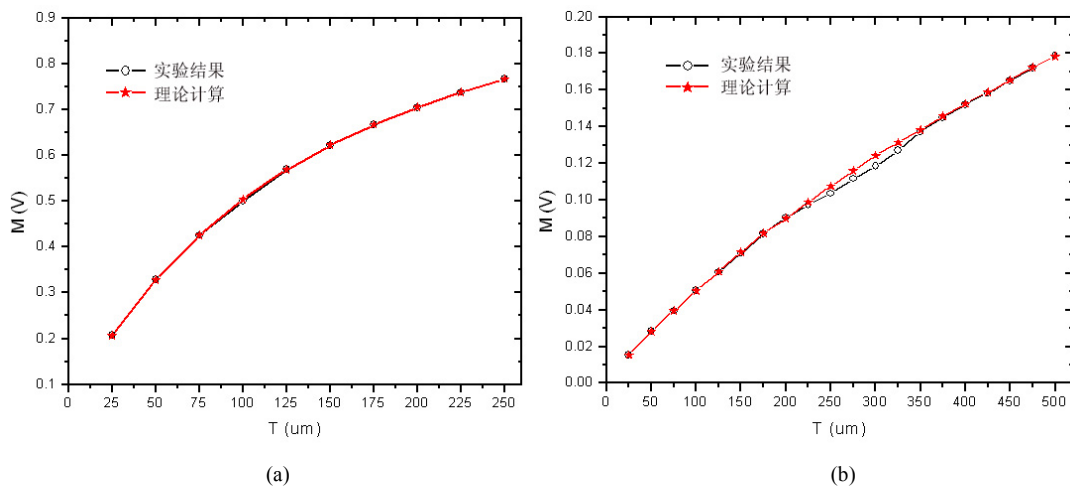


图4 在10KHz 频率下的测量结果. 横坐标代表厚度; 纵坐标代表测量结果的幅值. (a) 铝的薄层的实验结果和理论计算的比较, 厚度变化从 25um 到 250um. (b) 不锈钢 SST304 的薄层的实验结果和理论计算的比较, 厚度变化从 25um 到 500um.

从图 4(a)中, 我们可以看出理论计算和实验结果很吻合. A/D 卡采集的数据被存在计算机中, 正弦信号的响应信号也是有初始相位的正弦信号. 它的幅值显示在图 4(a)中. 相位信息经过分析后, 也可以被存在计算机中, 用来分析计算结果.

图 4(a)结果说明响应信号的幅值和铝的薄层的厚度不成线性关系. 这可以用趋肤效应来解释. 更多的涡流集中在金属薄层的表面, 所以这部分对线圈的阻抗影响也最大. 随着金属层的厚度的增加, 增加的部分中涡流的密度减小, 对线圈的阻抗影响也随之减小. 这反映在测量结果上就是响应信号的幅值变化也较小. 如果想解决这个问题, 必须让涡流能穿透相对厚一些的金属层. 根据渗透深度的公式,  $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$ , 这里,  $\delta$  是渗透深度(单位: m),  $f$  是应用的

正弦频率(单位: Hz),  $\mu$  磁导率(单位: H/m),  $\sigma$  是金属导电率, (单位: S). 从渗透深度的公式来看, 如果要增加涡流的穿透能力, 更低的频率应该在实验中使用.

我们也对 SST304 进行了测量(不锈钢 SST304 的导电率较低, 是 1.45MS/m), 测量结果和理论计算显示在图 4(b)中. 在图 4(b)中, 理论计算和实验数据总体上吻合的很好, 只是在局部(250um 到 325um)出现了测量误差. 在 10KHz 频率下, 趋肤厚度对铝来说是 800um. 而同样的 10KHz 下, SST304 的趋肤厚度是 4125um. 所以这两个不同的测量给出了不同关系. 10KHz 下, 对于铝的测量, 响应信号的幅度和测量的厚度是非线性关系, 这在以后的理论仿真中可以看的更清楚. 对于 SST304 的测量, 响应信号的幅度和测量的厚度接近线性关系.

图 4 中显示的定标曲线, 可以存储在计算机中, 作为测量数据, 用来推算金属薄层的厚度. 在有了很好的定标曲线后, 待测金属的厚度就可以推导出来.

## 理论仿真和相关讨论

既然理论计算和实验结果吻合的很好, 于是我们就用理论计算仿真来预测了一些实验室现在不能进行的实验. (由于线圈探头的限制) 通过仿真计算, 我们也可以对这个问题有更深入的理解. 我们用数学计算软件包 MATHCAD 对这个系统进行理论仿真. (公式 1 在 MATHCAD 中计算出来) MATHCAD 中的计算结果拷贝到画图软件 ORIGIN 中. 这个仿真使用了两个 100Ω 的电阻. 对这个仿真, 我们使用了较大的线圈, 空心线圈的内径用  $r_1=4\text{mm}$ , 外径用  $r_2=8\text{mm}$ . 线圈的底部和顶部到金属薄板上的距离分别为  $h_1=0.5\text{mm}$  和  $h_2=4.5\text{mm}$ , 线圈的高度是  $L=4\text{mm}$ . 线圈的匝数  $n=500$ . 仿真结果如图 5.

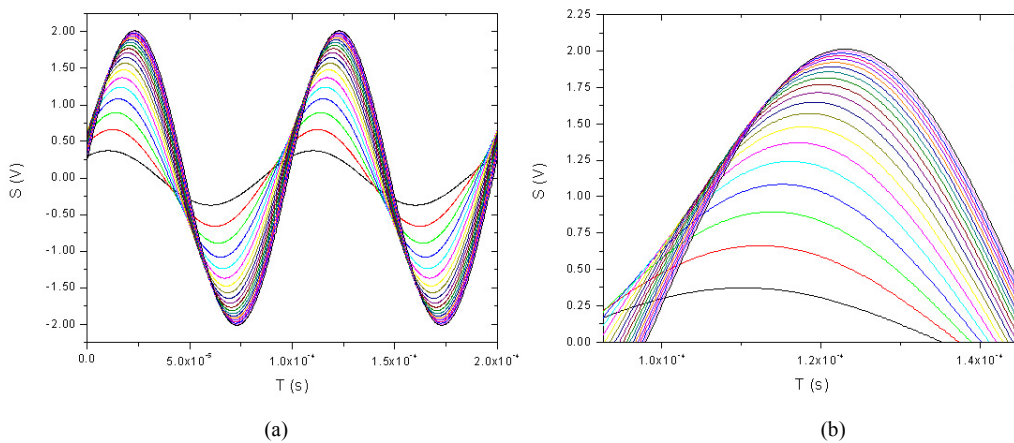


图 5 (a)铝薄层的仿真实验结果, 厚度变化从 25um 到 500um. 频率为 10KHz. 横坐标代表时间; 纵坐标代表测量的信号. (b) 图 5(a)的部分放大.

图 5(a)给出的信息很多, 不仅给出了响应信号的幅值变化, 也得到了信号的相位变化. 图 5(a)中的一部分被放大和显示在图 5(b)中, 这样一来, 我们可以看出明显的不同. 在图 5(b)的左下方, 先是 25 $\mu\text{m}$  的测量, 然后是 50 $\mu\text{m}$ , 75 $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$  和 125 $\mu\text{m}$  等等的测量. 响应的信号的幅值显示在图 6(a)中. 在图 6(a)中, 从 25 $\mu\text{m}$  到 250 $\mu\text{m}$ , 可以清楚的观测到不同. 但是, 随着厚度的增加, 越来越难以观测到不同. 这可以通过改变以下的方法来解决.

1. 实验中应用了 10KHz, 在这个频率下, 趋肤厚度对铝来说是 800 $\mu\text{m}$ . 如果更低的频率应用, 电磁波可以穿透的更深, 这意味着厚的金属层可以被测量. 例如, 应用 500Hz, 趋肤厚度对铝来说是 3660 $\mu\text{m}$ . 当然, 降低频率也会带来其他的变化. 例如, 如果采用低的频率, 需要大的线圈. 当然, 降低频率也会使后续的 A/D 卡或后续的电路变的简单.
2. 空心线圈被用于所有的仿真. 如果采用铁芯线圈, 磁场密度就会增加, 这可以增加信噪比, 于是厚的金属薄层就可以被测量.
3. 相位信息可以应用在这个厚度测量中, 如果加上相位信息, 好的灵敏度和分辨率可以得到, 我们也可以利用相位信息来减少提高距离变化带来的问题.

另一个重要的事情需要说明. 铝的导电率是 37MS/m, 比大部分其他的金属(除银, 铜和金等)的导电率要高很多, 所以铝是一种较难测量的金属. 例如, 10KHz 下, SST304 的趋肤厚度是 4125 $\mu\text{m}$ . 这说明涡流法更适合导电率低的金属.

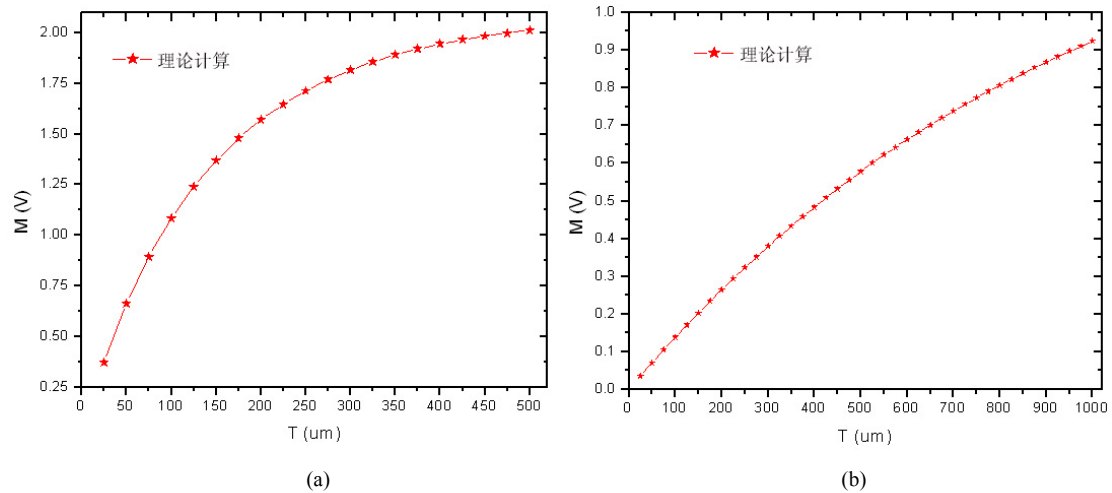


图 6. (a) 在 10KHz 下, 响应信号的幅值随铝的薄层的厚度变化. (b) 在 500Hz 下, 响应信号的幅值随铝薄层厚度变化的关系图. 横坐标代表厚度; 纵坐标代表测量结果的幅值.

为了说明降低频率的效果, 我们在 500Hz 的频率下, 对铝的薄层进行仿真计算, 响应信号的幅度和测量的厚度几乎是线性关系(如图 6(b)), 这充分说明降低频率的效果. 仿真时使用的空心线圈的内径是  $r_1=6\text{mm}$ , 外径是  $r_2=12\text{mm}$ . 线圈的底部和顶部到金属薄板上的距离分别为  $h_1=0.5\text{mm}$  和  $h_2=6.5\text{mm}$ , 线圈的高度  $L=6\text{mm}$ . 线圈的匝数  $n=1500$ .

## 结果讨论

以上的实验结果, 理论计算和相应的讨论证明应用涡流法测量金属薄层的厚度的可行性. 实验结果和理论计算的吻合很好说明我们很好的掌握了这个理论推导, 也说明我们的简化是合理和正确的.

比较 SST304 的测量和铝的测量结果, 说明这种方法适合导电率低的金属. 电磁理论和计算仿真都说明, 低频在这个应用上有很好的前景.

在 25 $\mu\text{m}$  的量级上, 涡流法可以有很高的灵敏度和高的分辨率. 通常情况下, 从 25 $\mu\text{m}$  到

1000um, 甚至到 2000um 是涡流法的测量范围. 在这个范围内, 对于单面测量, 常规的超声波法难以作到精确测量, 因为超声波法的正常测量范围是从 1mm 到 200mm.

实验中假设被测金属面是光滑的, 测量厚度时, 提离距离是固定的. 而实际应用中, 这些条件很难完全满足, 难免为测量带来误差. 但这个系统本身还有完善的余地. 例如, 我们可以用相位信息来减少提离距离变化带来的影响.

虽然涡流法测量金属层厚度有自身的局限性, (例如不能测量非金属, 很难测量厚度超过 2mm 的金属板) 但是这个厚度测量法对薄金属的均匀性的监测很重要. 当考虑单边测量时, 这个方法有自身的优势.

参考文献:

- [1] 李喜孟.无损检测, 2001 年 5 月: P80-81,
- [2] C.V.Dodd and W.E.Weeds . Analytical Solution to Eddy-Current Probe-Coil Problems. IEEE Transaction on Magnetics, 1968 年 5 月, p2829-2838.
- [3] 雷银照.时谐电磁场解析方法, 2000 年 9 月: P178-194.
- [4] C. C. Cheng, C. V. Dodd and W.E. Deeds . General Analysis of Probe Coils Near Stratified Conductors. International journal of nondestructive testing, 1971 年 3 期, P. 109-130.
- [5] Yaron Danon, Changqing Lee, Chris Mulligan and and Greg Vigilante . Characterizing Tantalum Sputtered Coating on Steel by Using Eddy Currents . IEEE Transaction on Magnetics, 2004 年 7 月, 40 卷第 4 期, P1826-1832.