

文章编号 :1007 - 6492(2001)02 - 0062 - 03

# 一种检测金属电导率的新方法

王新掌,雷银照

(郑州工业大学电气信息工程学院,河南 郑州 450002)

**摘要:**针对目前国内外金属电导率检测仪器必须由标准试块标定,且检测对象限制在所给标准试块的电导率范围内的状况,从理论上提出了一种检测金属电导率的新方法,即根据已知的散射场阻抗值,采用数值计算法反推出金属的电导率,以克服现有金属电导率检测仪器必须采用标准试块标定的局限性,扩大了被检测材料的范围,研制出实验性的电导率检测仪器.使用该仪器进行的实验表明,该检测方法可行,检测仪器可靠.

**关键词:**电导率;非铁磁性金属;无损检测

中图分类号:TM 154 文献标识码:A

## 0 引言

电导率是表征金属材料导电能力强弱的一个重要物理量.检测金属电导率是区分材料的一种重要方法,可用于分选材质,间接确定试件的硬度和强度,确定金属试件的热处理状态<sup>[1,2]</sup>.因此,金属电导率检测在现代工业生产中有着较为广泛的应用.

当前国内外金属电导率检测仪器必须有标准试块标定,否则精度难以保证;另外,该类仪器的检测对象只能限制在所给标准试块的电导率范围内,超出所给标准试块范围外的金属便难以测量.基于以上现状,我们研制了实验性的电导率检测仪器,克服了现有金属电导率检测仪器的局限性,扩大了检测对象的范围.

## 1 金属电导率检测的基本原理及其特点

当通有正弦交变电流的线圈放置在金属试件上方时,由法拉第电磁感应定律可知,线圈中的正弦交变电流产生的磁场在金属试件浅表层中会产生旋涡状电流,即涡流,如图1所示.同时金属试件浅表层中的涡流又产生一个磁场并反作用于线圈.金属试件浅表层涡流大小与金属试件电导率有关,当通以同样正弦交变电流的同一线圈位于不同电导率金属试件上方,并保持提离和磁导率

不变时,不同电导率的金属试件浅表层中产生的涡流大小不一样;反过来,不同金属浅表层中的涡流对通电线圈中的正弦交变电流的影响也不一样,导致线圈阻抗不同.线圈阻抗的这种变化可以用LCR测量仪器测量出来.因此,我们可以利用通电线圈阻抗的变化来检测金属材料的电导率.

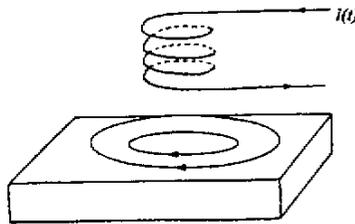


图1 平板导体上方的线圈

Fig.1 Coil above the plane conductor

涡流法用于检测金属电导率具有不接触、不损伤金属试件、检测效率高、能检测粗糙表面或有涂层的金属等优点<sup>[3,4]</sup>,但是,它受提离影响较大,受周围环境影响也较大.

## 2 数学模型

根据金属电导率检测的实际情况,建立如图2所示的求解模型.建立圆柱坐标系  $O - \rho\phi z$ ,图中1为半无限大导体,它是被检测金属,在半无限大导体表面上方  $H$  处放置一圆柱线圈,线圈的轴线与半无限大导体表面垂直,线圈的内外半径分

收稿日期 2001 - 02 - 10,修订日期 2001 - 03 - 30

基金项目 河南省科技攻关项目(971901600)

作者简介:王新掌(1969 - )男,河南省焦作市人,郑州工业大学硕士研究生.

别为  $R_1$  和  $R_2$ , 高为  $D$ , 线圈中通以正弦交变电流, 电流密度为  $\vec{J}_c$ , 其方向与  $z$  轴的正向成右手螺旋关系。

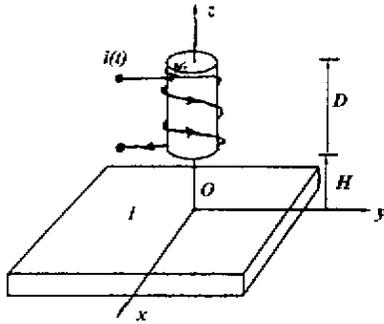


图 2 导体上方的圆柱线圈

Fig.2 The cylindrical coil above the conductor

在以上假定下, 利用电磁场理论可导出线圈散射场阻抗的函数关系式<sup>[5]</sup>

$$Z^s = F(R_1, R_2, D, N, H, \gamma),$$

其中  $N$  为线圈的匝数,  $\gamma$  为导体的电导率。

### 3 测试仪器的组成

根据前面叙述的理论, 我们研制了实验性的电导率检测仪器, 它由 PC, LCR 测量仪和探头组成。其中探头由线圈组成, 它的作用是采集电信号。LCR 测量仪主要由电桥构成, 探头是电桥的一个组成部分, 依据电桥平衡原理, 从探头采集到的信号中提取出所需要的散射场阻抗。PC 中存有计算电导率的程序, 将 LCR 测量仪测得的数据传入该程序中, 并启动计算电导率的程序使之运行, 最后给出计算结果, 系统的结构框图如图 3 所示。



图 3 仪器的结构框图

Fig.3 Structural frame chart of the apparatus

PC 中的软件设计遵循了模块化设计思想。软件模块主要有获得数据模块、传送数据模块、数据处理模块。人机对话采用直观、易懂、易操作的用户图形界面。数据模块和传送数据模块软件开发采用 Microsoft 公司的 Visual Basic 6.0 语言, 操作方法与 Windows 应用程序一致, 为数值模拟。编写的已知电导率求散射场阻抗的计算程序和已知散射场阻抗求电导率的计算程序简单明了, 容易理解。

### 4 数值模拟

线圈参数为  $R_1 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $R_2 = 7.11 \times$

$10^{-3} \text{ m}$ ,  $D = 8.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $N = 60$  匝。其中  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $D$ ,  $N$  分别为线圈的内半径、外半径、线圈的长度、线圈的匝数。正弦电源的频率为 100 kHz, 高度  $H = 10^{-3} \text{ m}$ , 数值模拟的计算结果见表 1 (表中  $j = \sqrt{-1}$ )。

表 1 电导率的计算值

Table 1 The calculated conductivity value

金属	金属的电导率 ( $10^7 \text{ S/m}$ )	$Z(j\omega)$ 的计算值	电导率的计算值 ( $10^7 \text{ S/m}$ )
银	6.17	$0.19706 - j5.05986$	6.16998
铜	5.80	$0.20293 - j5.05338$	5.79998
铝	3.82	$0.24713 - j5.00397$	3.81999

由表 1 可以看出, 金属电导率值与用所编程序计算出的电导率值吻合良好。这说明所编计算金属电导率的程序是可靠的, 但是它仍然需要大量的实践来验证, 并且还需要进一步提高程序的运行速度。

### 5 验证实例

将 3 个不同的试块分别用 Förster 公司生产的电导率仪和我们自制的实验性电导率仪进行测量, 测量结果见表 2。表中“对比值”为 Förster 公司的电导率仪测量结果; “测量值”为我们自制的实验性电导率仪测量结果。由表 2 可见, 对比值与测量值吻合良好, 实验性电导率仪是可靠的。

表 2 电导率的对比值和测量值的比较

Table 2 Comparison of the contrastive and measured conductivity value

检测对象	对比值/ ( $10^7 \text{ S/m}$ )	测量值/ ( $10^7 \text{ S/m}$ )	相对误差/%
试块 1	1.44	1.46	1.4
试块 2	2.40	2.41	0.4
试块 3	2.50	2.47	1.2

### 6 结论

以上所述的金属电导率检测仪器只是实验性的仪器, 它的检测速度比较慢, 成本比较高, 不便于携带到现场检测, 但它开辟了金属电导率检测仪器的研制新方向。与以往电导率检测仪器采用的标定法不同, 它扩大了检测对象的范围, 无须标准试块; 另外, 利用此仪器还可以检测非铁磁性导体表面的涂层厚度。因此, 这种仪器能够一机多用, 可以检测导体电导率、导体表面涂层厚度, 还可以进行材质分选、区分金属的硬度等。

### 参考文献:

[1] 任吉林. 电磁无损检测[M]. 北京: 航空工业出版社,

- 1989.
- [2] METCALFE G R. The use of eddy current flaw detectors with meter display for measuring the conductivity of aluminum alloy structures[J]. British Journal of NDT, 1988 (5):164 - 169.
- [3] 任吉林. 涡流检测技术近 20 年的进展[J]. 无损检测, 1998, 2(5):121 - 128.
- [4] ROPER F. A high - frequency eddy current method for the thickness measurement of thin metallic foils using ferrite - core transmission systems[J]. NDT & E International, 2000, 33(3):163 - 172.
- [5] 雷银照. 时谐电磁场解析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

## A New Method for Testing Metallic Conductivity

WANG Xin - zhang, LEI Yin - zhao

(College of Electrical & Information Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** :Now apparatus used for testing metallic conductivity abroad and home must be demarcated by reference material tested. Moreover, the object tested by the apparatus is confined to the range of metal given reference material tested. In order to overcome these limitations and enlarge the range of material tested, a new method that according to the known impedance value of scattered field, metallic conductivity is calculated conversely by numerical method is put forward theoretically in the paper. On the basis of this method, a apparatus testing metallic conductivity is developed experimentally. The experiment done by use of the developed apparatus proves that the testing method in the paper is feasible and the corresponding experimental apparatus testing metallic conductivity is reliable.

**Key words** :conductivity ; non - ferrous magnetic metal ; non - destructive testing

(上接 58 页)

参考文献 :

- [1] 胡运权. 运筹学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [2] 王永现. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

## Improvement of Hungary Solution for the Maximum Assigned Problem

YANG Guang - yu<sup>1</sup>, ZHANG Lei - shun<sup>2</sup>

(1. Information Department, Tianjin Finance & Economy Institute, Tianjin 300040, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** :Based on Hungary solution for the minimum assigned problem, this paper puts forward an solution for the maximum problem which is different from the traditional solution. This solution can solve problem by original coefficient matrix directly. Instead of replacing the original coefficient matrix with new coefficient matrix from beginning, but some principles in the course of solution are different from the minimum problem. Because the number of procedure and the order of solution are always corresponding with that of the minimum problem, we can make use of the program of the same segment with coefficient to solve the maximum and minimum problem. This solution is short - cut and audio - visual, and provides the convenient approach for realizing the solution by computer.

**Key words** :assigned problem ; Hungary solution ; improvement