

# 水泥杆中钢筋的电磁特性及其对周向定位的影响

宋平<sup>1</sup>, 马军<sup>2</sup>, 陈厚桂<sup>1</sup>, 徐东辉<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院创新实验室, 武汉 430072; 2. 济宁鲁科检测器材有限公司, 济宁 272071)

**摘要:** 钢筋是水泥杆的骨架, 其健康状况直接影响水泥杆的强度。分析了电磁探伤的原理, 设计出用于测试水泥杆中钢筋分布的标样和试验系统。标样由 PVC 管、端盖和钢筋构成, 试验系统由传感器单元、信号采集器和分析软件组成。通过试验, 对钢筋周向分布变化的电磁信号进行了采集, 数据分析了钢筋的电磁特性及对周向定位的影响。研究表明, 采用电磁法在适当精度内对钢筋定位的影响较小, 可用于水泥杆的质量检测。

**关键词:** 电磁探伤; 水泥杆; 钢筋定位

中图分类号: TM75; TM93; TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)04-0039-03

## The Electromagnetic Characteristics of Steel Bars in Cement Pole and Their Effects on Circumferential Positioning

SONG Ping<sup>1</sup>, MA Jun<sup>2</sup>, CHEN Hou-Gui<sup>1</sup>, XU Dong-Hui<sup>1</sup>

(1. Innovation Lab, School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Jining Luke Testing Device Co Ltd, Jining 272071, China)

**Abstract:** Steel bars are key parts in cement pole, and their health status shall have effect on the safety of cement pole in use. The principle of electromagnetic testing was analyzed, and the testing sample and experiment system were designed according to the research purpose. The sample is composed of end cover, PVC pipe and steel bars, and the experiment system was designed by three parts, the sensor unit, the signal processing and the computer system which are used to measure the electromagnetic characteristics of circumferential distributions of cement pole. At last, the experimental scheme is designed to collect the electromagnetic characteristics and study in their effect on the steel bars circumferential positioning. The data showed that it had little effect on steel bars positioning under appropriate accuracy and it was a useful method for the quality evaluation of cement pole.

**Keywords:** Electromagnetic testing; Cement pole; Steel bars positioning

水泥杆是输电线路重要的承重构件, 主要用于低压线路, 其功能为支撑导线进行长距离输送电能。随着技术发展, 水泥杆被逐渐运用于 110~500 kV 高压架空线路<sup>[1]</sup>, 其质量问题直接影响电力系统正常的输供电。水泥杆中钢筋周向分布不均匀是水泥杆质量问题的一种类型, 影响水泥杆的强度, 因此需要对水泥杆中的钢筋周向分布均匀度进行检测研究。

对铁质构件中的缺陷进行检测时, 电磁法是应

用最普遍的方法之一, 其本质是利用缺陷影响磁场的特征量进行检测, 以反演出缺陷的几何参数。根据测量原理的不同, 电磁法可以分为涡流法、磁粉法和磁性法等。对于水泥杆而言, 磁性方法是较有效的检测方法。笔者针对水泥杆钢筋的周向分布缺陷, 构造出试验模型和试验方案, 研究水泥杆钢筋周向布置的电磁特征, 分析其对钢筋定位的影响。

## 1 试验装置构建

### 1.1 检测原理

电磁检测法的检测原理是: 通过励磁系统对铁

收稿日期: 2010-09-08

作者简介: 宋平(1988—), 女, 本科生。

磁性材料励磁,然后测量铁磁性材料的缺陷所导致的磁场变化,据此间接推断缺陷的性质、位置和数量等<sup>[2]</sup>。传统的磁性检测方法有主磁通法、漏磁通法和回路磁通法,传感器主要用感应线圈、霍尔元件和磁通门等。感应线圈检测法的最大缺点是传感器输出信号和检测速度有关,测速不均匀时传感器输出信号存在畸变;磁通门器件的测磁灵敏度和定向性很高,并可以静态测量磁场强度,但是要求外加交流励磁,运算繁琐。霍尔元件则可有效避免上述问题,使输出信号不随测速产生误差,且体积小,对小间隙的试验具有很大优势<sup>[3]</sup>。

回路磁通法的原理如图 1 所示。励磁回路由衔铁、磁钢、空气隙和钢筋组成。衔铁的作用是导通磁路;磁钢的作用是为励磁回路提供充足的磁化能量,使钢筋被磁化;钢筋作为导磁体,产生磁场,形成闭合回路。

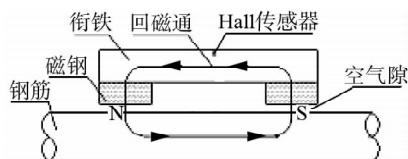


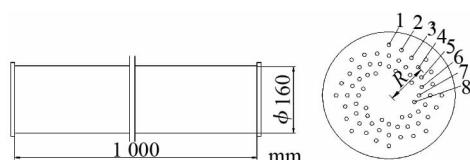
图 1 检测回路磁通的原理图

正常情况下,钢筋材料连续、均匀,被磁化后磁感应线大部分约束在材料中(忽略衔铁外的漏磁通),磁通平行于材料表面。当钢筋出现断裂、分布不均匀和直径变化等现象时,不同钢筋产生的磁信号不同。通过霍尔元件可以测得回路的磁通。操作时将检测装置沿试样水平滑动一周采集信号,通过分析传感器输出的电信号的变化即可确定钢筋分布的情况。

## 1.2 标样设计

水泥电杆通常由水泥和钢筋组成。由于混凝土的磁特性与空气类似,因此采用 PVC 管作为试验设备的骨架,两头固定设计有不同孔的端盖,钢筋通过上下端盖的孔固定在试样上,试验时改变钢筋的位置和数量即可以模拟水泥杆中的钢筋分布。PVC 管具有加工性能良好、制造成本低和绝缘等良好特点。图 2 是试样的结构图。

图 2(b)中标号 1~8 对应八组钢筋位置。从第 1~第 8 组位置的圆周半径  $R$  为 70, 65, 60, 55, 50, 45, 40 和 35 mm。在均匀套管中,激励的磁通将均匀流过套管壁,磁通不会发生畸变<sup>[4]</sup>。试验时转动检测传感器,使其沿着 PVC 管表面作圆周运动,采集不同位置的电磁场信息。

(a) 侧视图 (b) 俯视图  
图 2 试样的结构图

## 1.3 试验系统设计

图 3 是试验系统的结构框图<sup>[5]</sup>。该检测系统工作原理为:磁化器轴向磁化钢筋,使其处于磁化状态,产生磁回路;磁场测量器件测量磁场,将磁通信号转化为电压信号。输出的电压信号和光电编码器采集的位置信号经处理后通过 PC 机接口进入计算机,分析软件对获得的信息进行分析。此外,电信号也可以通过图表记录仪或者其他显示设备显示出来。输出信号的变化与回路磁通的变化一致,从而能够反映出钢筋断裂、钢筋过细以及钢筋深度不足等多种问题。

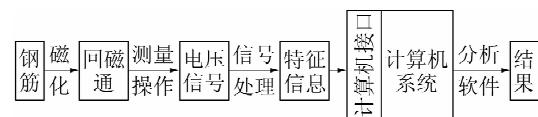


图 3 试验系统结构框图

试验系统由传感器单元、信号采集器、光电编码器和分析软件组成。检测传感器单元主要由霍尔元件、聚磁片和强磁组成。只要检测出霍尔元件两端的输出电压,便可获得钢筋的信号。为了提高传感器的分辨率,可采用聚磁片、减小距离、增加线圈匝数和励磁电流、减小传感器列间隙、减小磁化时间等,环境对测量结果的影响可忽略<sup>[6]</sup>。试验使用聚磁片,既可以减小装置规模也可降低成本。强磁的主要功能是提供足够的磁能量来磁化钢筋,以产生充足的磁场信号用于检测。图 4 是试验系统的照片。



图 4 试验系统照片

## 2 钢筋的电磁特性分析

将图 1 所示的模型按照线性化假设后,其等效的磁路模型如图 5 所示。图 5 中,  $F_m$  为磁路的磁动势,  $R_{bar}$  为钢筋的磁阻,  $R_a$  为磁钢与钢筋表面间空气间隙的等效磁阻,  $R_m$  为磁钢内阻,  $R_L$  为衔铁的磁阻,  $F_m$  为磁钢的磁动势,  $R_{ml}$  为磁钢上下面间的漏

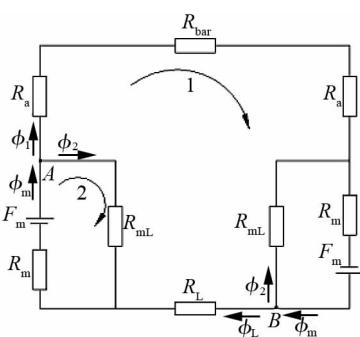


图 5 等效磁路模型

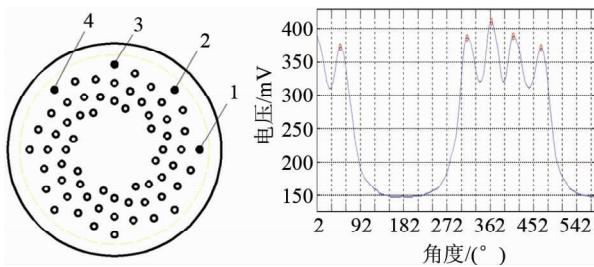
磁磁阻。

将磁阻集合成等效磁阻后,回磁通  $\Phi_L$  与磁路的等效磁阻  $R_e$  形成如下对应关系:

$$F_m = R_e \Phi_L \quad (1)$$

由于不同的钢筋位置对磁路的磁阻产生显著的影响,进而影响磁路的回磁通,测量回磁通就可以推断钢筋在水泥杆周向的位置。

根据霍尔元件的定向检测特性,试验装置输出信号为电压波形,可以反映钢筋的电磁特性。不同的输出波形对应不同的钢筋分布状态。为了分析钢筋周向分布的电磁特性及其对钢筋定位的影响,需要对钢筋不同分布状态下的电磁信号进行检测和分析。为了保证电磁信号的强度和精度,试验设计对直径  $\phi 8$  mm 钢筋位于最外圈的情况进行检测。考虑到 1~8 根钢筋不同分布情况,共得到 28 组数据。图 6(a)显示其中一种情况:四根钢筋置于标样最外层,并使其连续分布,此时检测输出的电压波形如图 6(b)。



(a) 钢筋所处位置

(b) 产生的电磁信号

图 6 典型的检测信号与标样对比图

波形图中所显示的四个峰值对应图 6(a)所示的 4 处钢筋,峰值对应的横坐标即为钢筋的测量位置。检测信号说明,用回磁通法可以探知水泥杆中钢筋的位置。

### 3 钢筋周向分布对定位的影响

为了探究钢筋周向分布对钢筋定位的影响,需

要判断钢筋的实际位置和测量位置是否一致。如图 6(b)所示,取角度为横轴,输出电压值为纵轴,建立坐标系,以第一根钢筋对应位置为原点,测得传感器运动一周采集的信号。通过波形图峰值确定测量的钢筋位置,与参考位置进行比较。在 28 组比较数据中选取 9 组具有代表性的数据汇总如表 1 所示。

表 1 标准位置与实测结果对比表 (°)

组数	标准位置	测量位置	组数	标准位置	测量位置
第 1 组	0	0	第 7 组	0	0
	45	45		45	45
第 2 组	0	0	第 8 组	90	87
	90	91		135	134
第 3 组	0	0	第 9 组	0	0
	135	134		90	89
第 4 组	0	0	第 5 组	180	182
	180	182		270	271
第 5 组	0	0	第 9 组	0	0
	45	46		45	46
	135	136		90	91
第 6 组	0	0	第 6 组	180	183
	45	44		225	224
	180	185		270	268

表 1 的数据中,通过检测获得的数据与标准试样的数据基本吻合。水泥杆周向分布的电磁特性对钢筋定位的影响在可接受的范围内,精度要求不高时可忽略。电磁信号误差是影响测量位置的因素之一,个别组信号信噪比较低,可能是由于传感器推动不均匀或打滑现象造成的。

### 4 讨论

水泥杆有足够的强度才能保证输电线路正常运行,水泥杆中钢筋周向分布是否均匀是影响电杆承重力的重要因素之一,必须对其进行检测。判断钢筋周向分布状态首先要确定检测信号和钢筋位置的对应关系,即探讨水泥杆中钢筋周向分布对钢筋定位的影响。

通过分析可知,水泥杆中钢筋周向分布对钢筋定位的影响在可接受的范围内。此方案可用于实际水泥杆的质量检测,钢筋信号以波形方式显示,提供了更多的判定手段,以帮助测试人员对测试对象的真实情况进行分析,对于复杂情况可以提供充分的判

(下转第 60 页)

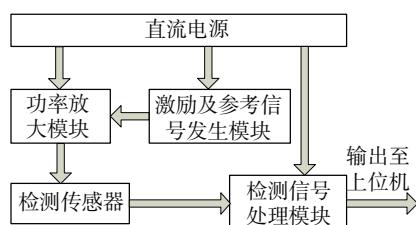


图 2 系统结构简化图

信号和相敏检测电路的参考信号,产生的信号频率在10 Hz~10 MHz连续可调,正交信号的相位误差在0.2°以内。功率放大模块为检测探头提供激励电流,同时避免产生自激。检测探头使用线圈激励的方式在被检材料中产生电涡流。检测信号处理模块包含探头平衡电路、程控放大电路、锁定放大及相敏检测电路、调零电路、单片机及其外围电路。探头平衡电路将取出检测探头中的直流信号和静态时交流信号,这样可以充分利用放大电路的动态范围,充分放大从而提高信噪比。程控放大电路将毫伏范围内的检测探头输出信号放大到-10~10 V内,要求信号放大过程中没有相位误差及自激。锁定放大及相敏检测电路使用两路正交的参考信号将放大后的检测信号分解,得到阻抗分解信号,并消除非激励频率的干扰。调零电路将信号电平调整到采集卡的工作范围之内,充分利用采集卡的工作范围。单片机外围电路完成仪器的管理、控制、计算和图形显示。

### 3 抗干扰设计

#### 3.1 干扰来源分析

在涡流探伤中,飞机零部件的电导率、磁导率、探伤频率、缺陷类型的变化,以及提离效应都会引起阻抗的变化。

电子线路本身的干扰也是重要的干扰因素,可

(上接第41页)

定依据,得出正确的测试结果<sup>[7]</sup>,有较广的适用性。

#### 参考文献:

- [1] DL/T 5154—2002 架空输电线路杆塔结构设计技术规定[S].
- [2] 杨叔子,康宜华.钢丝绳断丝定量监测原理与技术[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [3] Wieschedel H R, Ramsey R P. Electromagnetic testing: a reliable method for the inspection of wire ropes in service[J]. NDT International, 1989, 22(3): 155—161.
- [4] 张涛,赵学桦.石油套管射孔检测传感器的研制[J].吉林大学学报(理学版),2006,44(5):790—793.
- [5] 左建勇,颜国正,丁国清,等.漏磁法测量导磁材料的厚度及缺陷[J].上海交通大学学报,2004,38(7):1048—1051.
- [6] 陈厚桂,武新军,康宜华.异型钢丝裂纹漏磁在线监测系统的研制[J].无损检测,2004,26(8):399—401.
- [7] 张全旭,郝东妮.钢筋检测的可视化时代[C].第十届全国建设工程无损检测技术学术会议论文集.贵阳:2008:150—153.

分为内部干扰和外部干扰。来自系统内部的干扰有:器件的物理噪声,如元件的热噪声、散粒噪声、晶体管内部的动态噪声、分布噪声等,这些噪声比较小,但在测量小信号和高频信号时,这些噪声会对被测信号造成很大的干扰。线路板上的走线、传输线以及电路之间也会产生干扰,如数字信号和模拟信号之间的干扰,走线和元件位置安放不当会造成相互间的静电感应、磁感应等。

#### 3.2 抗干扰措施

针对不同来源的干扰和不同的干扰性质,该仪器采用了相应的抗干扰措施。

为消除第一种干扰因素,在传感器的设计,以及电路设计中采取了一些相应的措施。如设计了传感器平衡电路,以利于消除电导率、磁导率、温度变化和探头抖动所引起的干扰。另外在电路设计中实现了对阻抗二维信号的提取,由于电导率等干扰因素引起阻抗的变化方向与缺陷引起阻抗的变化方向各不相同,可以采用相位分离法将需要检测的因素与干扰因素分离,达到检测的目的。

对于来自系统内部的干扰,采用了性能优良的芯片。在每一个元件的电源输入端与地之间都接一去耦电容以滤去干扰。另外,在制作电路板时,尽量使每个滤波电容及电感靠近各自所要的滤波的器件。使电源线、地线与数据线传递的方向一致,用地线把数字区和模拟区隔离,数字地和模拟地要分离,最后接于电源地。

该仪器设计思路充分考虑了航空维修中涡流检测的特点,其独特的人体工程学设计,模块化设计以及抗干扰设计,使得其性能大大提升。配合相应的操作软件,仪器完全满足航空维修中涡流原位检测的需要。

(下转第74页)