

文章编号 :1005 - 0523 (2002) 01 - 0009 - 05

SS3 电力机车牵引电机主极裂纹检测仪研制

杨树军¹, 张 馨², 宋京伟¹

(1. 华东交通大学 机械工程学院 江西南昌 330013 2. 铁道部 株洲电机厂 湖南 株洲 412001)

摘要: 论述了 SS3 电力机车牵引电机主极裂纹检测仪的基本检测原理, 通过样机在现场使用证明, 该检测仪完全能够满足牵引电机主极裂纹检测的需要。
关 键 词: 牵引电机; 无损检测; 涡流检测
中图分类号: TH878 文献标识码: A

0 引 言

SS3 电力机车牵引电机主极断路故障是牵引电机主极接头处在热应力、振动冲击、电磁力以及加工缺陷等因素共同作用下, 经过列车长时间运行形成疲劳损伤裂纹, 最后打火烧断的一种严重故障。

该类故障属惯性故障, 通常在机车爬坡等大动力牵引运行中发生, 严重影响着铁路电力机车的行车安全, 给铁路部门带来很大的经济损失。

牵引电机主极断路故障是主极接头疲劳损伤所致。根据疲劳理论, 疲劳损伤是在加工缺陷等原因形成的疲劳源基础上逐渐发展起来的, 有其固有的周期性, 如果在中修修程中能通过无损检测方法检测电机主极接头是否存在裂纹, 对有裂纹的主极接头进行处理或更换, 就可以有效防止主极接头断路事故的发生。

1 检测方法的选择

SS3 电力机车所配牵引电机为 ZQ800 - 1 型牵引电机, 图 1 为 SS3 型电力机车牵引电机的主极, 裂纹常出现在图中的 ABCD 扇形区, 一般从 A 点开始, 斜向弧形边 CD 处发展。电极的尺寸宽为 25 mm, 发

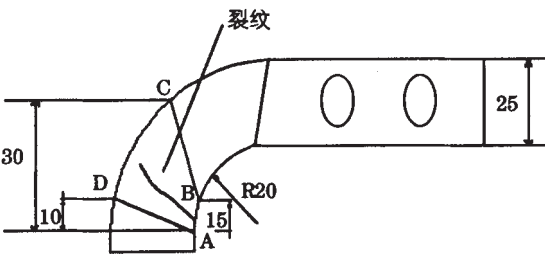


图 1 牵引电机主极接头

生裂纹的区域长度约为 30 mm, 其厚度为 5 mm。主极的表面包裹了聚酰亚胺 (俗称黄金薄膜)、云母带、玻璃丝带等多层绝缘材料, 表面凸凹不平, 加上电机内部空间很小, 使得通用的无损探伤方法无法进行, 必须对检测原理和方法进行分析研究, 以达到主极接头裂纹检测的目的。通过对各种无损检测方法的分析对比, 本文选择了涡流检测法, 该方法适合无接触检测, 不受包裹层影响, 探头可根据被检测对象设计, 比较适合对牵引电机主极接头裂纹检测。

涡流检测原理如图 2 所示, 将一扁平线圈置于金属导体附近, 当线圈 L_1 中通过正弦交变电流 I_1 时, 线圈的周围空间产生了正弦交变磁场 H_1 , 置于此磁场中的金属导体产生涡流 I_2 , 而此涡流也将产生交变的磁场 H_2 , H_2 的方向与 H_1 的方向相反, 由于磁场 H_2 的反作用使通过线圈的等效阻抗发生变

收稿日期 2001 - 08 - 03
作者简介 杨树军 (1970 -), 男, 甘肃天水人, 华东交通大学讲师。

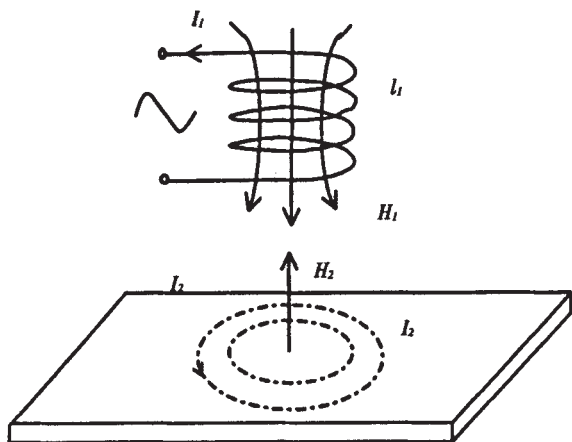


图2 涡流检测原理示意图

化，这种线圈阻抗的变化完整地而且唯一地反映了待测体的涡流效应。线圈阻抗的变化与金属导体的电导率、磁导率、几何形状、线圈的几何参数、激励电流频率以及线圈到金属导体的距离等参数有关。假设被测体是匀质的，如果使涡流传感器与被测体距离不变，当裂纹出现时，将引起金属的电导率、磁导率的变化，从而通过测量传感器参数的变化达到检测的目的。

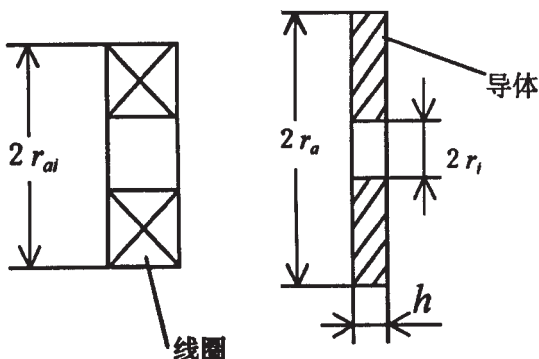


图3 电涡流简化模型

为了分析线圈阻抗的变化，可以把导体上形成的电涡流等效为一个短路环，其模型如图3所示。在图3中，

$$r_i = 0.525 r_{ai} \tag{1}$$

$$r_a = 1.39 r_{ai} \sqrt{\frac{\rho}{\nu f}} \tag{2}$$

$$h = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\nu f}} \tag{3}$$

式中， r_i —短路环等效内半径；
 r_a —短路环等效外半径；
 r_{ai} —传感器线圈外半径；
 h —电涡流贯穿深度 (cm)；
 ρ —导体电阻率 (Ωcm)；
 f —电流频率；
 ν —相对导磁率；

据此可以画出涡流检传感器工作时的等效电路图,见图4。传感器工作时的复阻抗为

$$Z = (R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) + j(\omega L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) \tag{4}$$

电感为

$$L = L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \tag{5}$$

品质因素为

$$Q = \frac{\omega L_1}{R_1} \cdot \frac{1 - \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}}{1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} \tag{6}$$

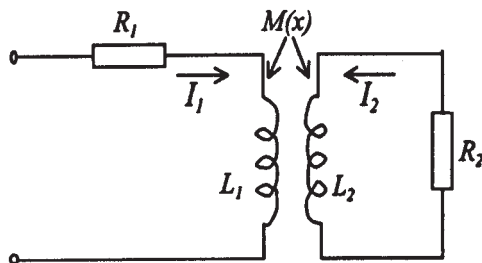


图4 涡流传感器工作等效电路

在进行主极裂纹检测时，线圈几何参数固定，要对裂纹进行检测，必须保持线圈和主极之间的互感系数保持不变，也就是要设法保持线圈和探头间的相对位置固定。

常规的单探头涡流检测方法应用到牵引电机主极接头裂纹检测中,需解决以下问题。

1) 提离效应 常规的涡流检测的前提之一是必须保证传感器与被测体之间的距离不变，因为在检测过程中，如果涡流传感器与试件之间的距离越小时，二者间的互感系数就越大，由式(4)、(5)、(6)可知，线圈的复阻抗增加，电感减小，品质因素下降，所以信号也会显著增加。牵引电机主极接头表面的绝缘包裹层凹凸不平，现行的涡流探伤方法无法保证传感器与主极接头之间的距离。

2) 边缘效应 涡流探伤的另一前提条件是被测体匀质，适合对面积较大的匀质金属被测体探伤，牵引电机主极接头宽仅 25 mm，常发生裂纹区域长度仅 30 mm，对边缘进行检测时不可避免地会发生边缘效应。

3) 集肤效应 涡流的集肤效应导致传感器对

试件内部的裂纹灵敏度很低, 要对试件进行准确的检测, 必须保证试件厚度小于涡流的贯穿深度. 由于常规的涡流检测使用的频率较高, 一般为几十至几百千赫兹, 涡流的探测深度很难达到 5 mm.

2 透射式涡流检测原理

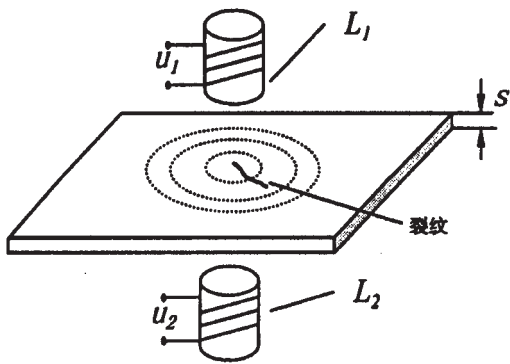


图 5 透射式涡流检测的原理

所谓透射式涡流检测实际上是低频透射涡流测厚原理在检测中的应用. 透射式涡流测厚采用两个线圈等距布置在被检测试件的两侧, 一个为发射线圈 L_1 , 一个为接收线圈 L_2 , 如图 5 所示. L_1 的磁场贯穿被测薄板, 到达线圈 L_2 , 在 L_2 的两端会感生出一交变电势 u_2 , 它的大小与 u_1 的幅度、频率以及 L_1 、 L_2 的匝数、结构和两者的相对位置有关. 如果这些参数都固定, 那么此时感生电势 u_2 是高度的函数.

如果在两线圈 L_1 和 L_2 之间的金属薄板厚度变化, L_1 产生的磁力线通过薄板产生的涡流也不一样, 使到达 L_2 的磁力线变化, 从而引起 u_2 的变化.

当一等厚金属薄板在裂纹时, 会产生下面两方面的影响: ①裂纹造成试件的局部厚度变薄, 电涡流产生的损耗减小, 由此导致到达接收线圈的磁力线增加. 裂纹越深, 试件裂纹处的局部厚度越小, 到达接收探头的磁力线越多; 当发生穿透性裂纹时, 裂纹处的局部厚度为零, 到达接收探头的磁力线最多. 因此金属薄板的裂纹在一定程度上用其厚度变化来间接反映; ②试件上涡流的流向发生变化. 试件无裂纹时, 涡流是规则的闭合曲线, 当试件存在裂纹时, 裂纹处的涡流由于金属导体的不连续而发生畸变, 不再是规则的闭合曲线. 由于涡流产生的磁场会部分抵消发射探头产生的磁场, 所以涡流的流向发生变化必然导致其磁场发生变化, 进而影响

发射探头的磁场分布, 使到达接收探头的磁力线的分布也发生变化.

2.1 提离效应的克服

透射式涡流检测法的发射, 接收探头固定在一绝缘框架上, 分别位于检测试件的上下两侧, 不管检测试件位置在框架中间如何变化, 两线圈间的距离始终不变, 从而可以有效克服提离效应.

2.2 边缘效应的消除

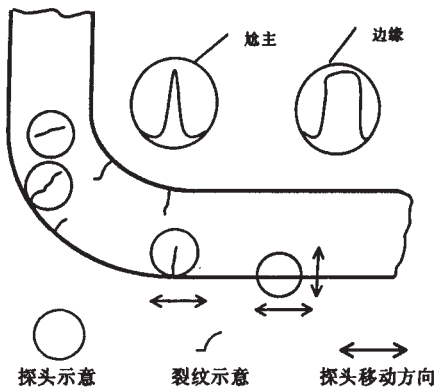


图 6 牵引电机主极裂纹检测示意图

通过对牵引电机主极故障机理、接头加工方法的分析, 故障现场的观察, 主极接头裂纹通常为横纹, 即裂纹通常垂直于接头边缘(见图 6). 采用透射式涡流检测法时, 如果裂纹发生在接头中间, 通过设计探头线圈时选择适当的直径可以消除边缘效应; 如果裂纹发生在接头边缘, 可通过接收线圈的感应电势的幅值以及幅值的变化率两种方法来识别: 当传感器沿接头边缘移动时, 如果存在裂纹, 由于裂纹只使接头的局部变薄, 此时接收线圈的感应电势幅值变化较快, 而且幅值较小; 当传感器线圈或部分线圈移动到接头边缘以外时, 两线圈之间只有部分或没有主极接头, 因此接收线圈两端的感应电势幅值较大, 变化较慢, 不像遇到裂纹时的快速变化.

2.3 集肤效应的克服

由于透射式涡流检测采用对称双探头, 其激励频率可以比较低. 所以可以通过选择适当的频率来达到克服集肤效应的目的.

牵引电机主极的材料为紫铜, 其电导率 $\rho = 8.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 相对磁导率 $\mu_r = 1$. 根据式 (3) 可知, 当 $f = 1 \text{ K}$ 时, 涡流贯穿深度为

$$h = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} = 50 \sqrt{\frac{8.8}{1000}} = 4.69 \text{ mm} \quad (7)$$

因而,只要激励频率小于 1 kHz,就可以用于检测 0.5 mm 以上的裂纹,从而达到克服集肤效应的目的.

3 传感器参数的选择

线圈参数的选择主要包括线圈激励频率的选择和线圈匝数的选择.

3.1 激励频率的选择

如果要使涡流穿透主极,涡流贯穿深度必须达到 5 mm 左右,并且计算出当激励频率为 1 kHz 时,涡流贯穿深度深度为 4.69 mm,基本上可以达到检测的要求.但是,上面公式计算是建立在下面假设基础上的:①探头和主极表面间不存在间隙.②主极接头的面积足够大,所有的磁力线必须透过主极才能到达接收探头.事实上,上面两个假设是理想情况,对于牵引电机主极,在其他情况都相同的情况下,用不同频率的激励信号实验,其实验结果如图 7 所示.

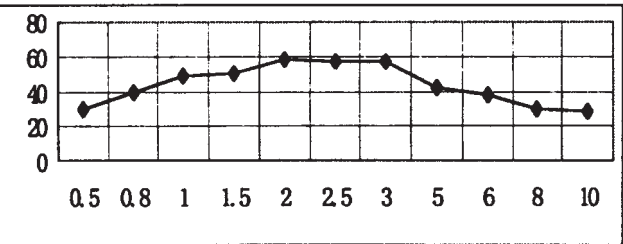


图 7 不同频率下接收线圈的输出

由图 7 可以看出,频率在 0.5 ~ 1.5 kHz 时,输出较小;当频率在 1.5 ~ 3 kHz 时输出最大;当频率大于 3 kHz 时,输出下降较快.上述现象,可以通过两个因素加以解释:当频率较低时 (0.5 ~ 1.5 kHz),涡流的密度较小,磁力线分散,虽然贯穿性较好,但磁力线分散所以输出并不高;当频率较高时 (5 ~ 10 kHz),涡流密度很大,但贯穿性很弱,所以输出较小;当频率在 1.5 ~ 3 kHz 时,涡流的密度较大,贯穿性也较好,其输出较大.

综合上面的分析,我们选择的涡流激励频率为 2.5 kHz.

3.2 线圈匝数的选择

式 (6) 是涡流传感器线圈电感量的经验公式.由式 (6) 可知,线圈的电感和线圈的匝数的平方成正比,而线圈的电阻和匝数成正比,所以,线圈的匝

数越多,线圈的品质因素越高,传感器的灵敏度也越高.

$$L = \frac{N^2 D}{0.0369 + 0.14 d + 0.124 t} 10^{-10} \tag{6}$$

式中 L ——电感量, H
 N ——匝数
 $d = b / D$
 $t = h / D$
 D ——线圈的平均直径, mm
 b ——线圈的宽度, mm
 h ——线圈的径向厚度, mm

在确定匝数时,除了考虑检测的灵敏度外,还要考虑在传感器的厚度一定的情况下,保证传感器的直径达到规定的要求.本文设计的线圈的匝数为 800 匝.

4 牵引电机主极裂纹检测仪组成

本文运用透射式涡流探伤法成功开发了牵引电机主极裂纹检测仪样机.该机采用独特的等距双传感器结构,既利用了涡流检测法不受非金属包裹层影响的优点,又很好地避免了涡流检测法的“提离效应”、“边缘效应”、“趋肤效应”.能发现主极接头处的穿透性裂纹、深度 1mm 以上的裂纹等各种早期裂纹.可以在电力机车中修以上修程中使用该仪器对牵引电机进行检测,发现早期裂纹,避免主极断路事故发生.

电力机车牵引电机主极裂纹检测仪主要由信号发生器、涡流传感器、信号变送器、数据采集卡、便携工控机等部分组成,原理图如图 8.

信号发生器可产生 0.5 ~ 5 kHz 正弦波信号,经功率放大器放大

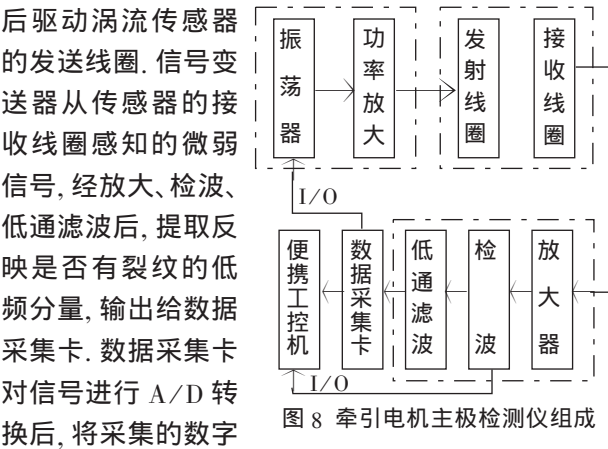


图 8 牵引电机主极检测仪组成

信号送到便携工控机上进行处理、显示、裂纹识别、结果保存等。

检测程序的主要功能模块主要包括采集显示、离线分析、系统维护等功能模块。采集显示模块可根据设置的激励频率控制信号发生器产生正弦信号；根据设置的放大增益倍数控制变送器的放大倍数；通过数据采集卡实时采集变送器信号，并实时显示；根据设置的报警值报警，并对数据进行在线存盘。离线分析模块可对采集显示模块保存的数据做进一步的分析，如计算特征值，图形放大，按游标读数等。

5 结束语

通过样机在生产现场的长时间试用，曾成功地检测出多个有裂纹的主极接头，通过剥开主极接头外包绝缘包裹层验证，确认该检测仪判断正确、有效。

参考文献：

[1] 任吉林, 等. 电磁检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
[2] Kate Gregory. Visual C + + 5 开发使用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998, 5.

Development of the Crack Tester for Joints in the Drawing Motor of SS3 Electric Locomotive

YANG Shu-jun¹ ,ZHANG Xin² SONG Jing-wei¹

(1. School of Mechanical Eng., East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013 china)

Abstract: In this paper, the basic detect principle of the crack tester for joints in the drawing motor of the SS3 electric locomotive is discussed. The use of the tester proves that it is fit for the crack detection of joints in the drawing motor.

Key words: drawing motor; NDT; Eddy test

【简讯 2】

《华东交通大学学报》1999 年的影响因子及其在全国科学期刊中的位置

《华东交通大学学报》1999 年的影响因子的指标值为 0.077, 在全国各类科技期刊中的位置是: 在 2804 种科技刊物中名列第 1624 位; 在交通类学科的 125 种科技期刊中名列第 22 位; 在铁路运输类 36 种专业期刊中名列第 6 位; 在当年铁道部直属的 10 所高等院校的学报中名列第 4 位, 而在 8 所工科院校的学报中名列第 3 位; 在当年全国 420 余所高等学报中名列第 229 位, 而在近 200 所工科院校的学报中名列第 93 位. 该资料见于 2001 年 1 月由中国科技信息研究所出版的《中国科技期刊引证报告

(扩刊版)》. 由于统计工作一般需要滞后 1~2 年, 因此该资料还是新的. 一种刊物某年的影响因子是指该刊前两年发表的论文被当年相当数量的刊物(称为统计用期刊或来源期刊, 也包括该刊在内)所引用的次数与该期刊在此两年内所发表的论文总数之比. 一般来说, 此值越大, 表明该刊的影响力和学术作用也越大. 因此, 它是国际上通用的期刊评价指标. 而且由于它是一个相对的统计量, 所以可公平地评价和处理大刊和小刊由于发文章量不同所带来的偏差. (学报编辑部)