

轮胎内部缺陷微波无损检测方法

王晓明, 陈军芳

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:介绍微波无损检测技术和轮胎内部缺陷检测技术的发展状况, 简述微波反射法无损检测的原理, 采用近似的方法(用三角形和矩形组合模拟圆形)建立轮胎内部典型缺陷的微波反射法检测模型, 并给出通过该模型进行内部缺陷检测的具体方法, 在此模型基础上构建了完整的轮胎内部缺陷微波无损检测系统。

关键词:无损检测; 微波; 轮胎; 反射法

中图分类号: TQ330.1⁺92 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2004)07-0428-04

1 微波无损检测和轮胎内部缺陷检测技术发展

微波是波长介于红外线与无线电波之间的电磁辐射波。人们利用微波波长短、频带宽、方向性好、穿透非金属材料能力强、与物质作用后携带信息量大的特点开发了微波无损检测技术。

微波无损检测技术的开发始于20世纪60年代, 虽然在开发之初并未引起无损检测领域的足够重视, 但目前其作为一种检测物体内部缺陷的方法已逐渐获得广泛认可。

目前采用得较多的无损检测方法有超声波法、涡流法和热成像法, 其中超声波法因清晰度高而成为应用最广的检测方法。然而, 超声波在检测对声波衰减大的复合材料内部缺陷方面无能为力, 而微波无需接触和使用耦合剂就可很好地检测这些材料。近几年, 一些专门研究机构倾注大量精力进行此方面的研究也大大推动了微波无损检测技术的发展^[1,2]。

微波无损检测技术的发展依赖于传感器技术和微波测量技术的发展。现在它已越来越多地应用于质量控制、内部缺陷检测和湿度测量。微波无损检测具有实时、快速、准确和重复性好的特点, 容易应用于生产线, 实现对产品的在线质量监控。微波穿透非金属材料的能力强, 分辨率高, 但穿透电的良导体的能力比较弱, 因此主要用于检测非金属材料^[3~5]。金属检测方面则主要用于金

属厚度的非接触测量和表面裂缝检测^[6]。

轮胎无损检测技术在最近几十年也取得了较大的进展。20世纪60年代, 发达国家已开始采用X射线检测轮胎, 70年代初, 美国和前西德相继研制并生产出相应的X光检测仪器和关键部件。1999年, 在美国纳什维尔举办的国际轮胎橡胶工业博览会上, 世界各大公司展出的最新轮胎检测设备绝大多数仍采用X射线方式。X射线方式是一种传统的方式, 在许多领域都有应用, 但其存在需要屏蔽、价格昂贵和使用寿命短等问题。人们一直在寻找新的方法, 微波检测法在轮胎检测方面的诱人前景国外已有消息报道^[7~9], 但相关技术文献较少, 国内还未见有关的研究报道。微波在轮胎这种复杂复合材料检测方法和检测技术方面的发展, 必将促进微波探伤技术的实用化和向更多新的应用领域开拓。

微波无损检测方法主要有穿透法、反射法、散射法、驻波干涉法和全息法^[6]。

本工作根据微波反射法无损检测的原理, 建立了轮胎内部典型缺陷的检测模型, 并在此基础上构建了完整的微波无损检测系统。

2 微波反射法无损检测的基本原理

反射检测法是通过测量微波经被检物体反射后反射因数和相移的变化来判断被检物体内部是否有缺陷并对缺陷进行辨识的方法。

如果被检物体内部没有缺陷, 那么微波被反射后, 其反射因数和相移是一定值。如果被检物

基金项目:国家重大技术装备研制项目(ZZ01-20-04-02-02)

作者简介:王晓明(1948-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学教授, 工学博士, 主要从事测控技术和无损检测方面的研究。

体内部有缺陷,反射因数和相移会发生变化,根据这一变化就可得知被检物体内部缺陷所在的位置及缺陷的形态和尺寸。

当微波垂直从介质 1 入射到介质 2 时,一次反射因数 R_{12} 和透射因数 T_{12} 分别为^[10]:

$$R_{12} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (1)$$

$$T_{12} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2)$$

式中, η_1 和 η_2 分别为介质 1 和 2 的特征阻抗。

当被测物体为一块厚度为 d 的无缺陷介质板时,反射因数 R 为^[10]

$$R = \frac{R_{12} + R_{12} e^{-j2kd}}{1 + R_{12}^2 e^{-j2kd}} \quad (3)$$

式中, j 为虚数单位符号; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为微波在介质 2 中的波长。因为 $R_{12}^2 \ll 1$, 所以

$$R \approx R_{12} + R_{12} e^{-j2kd} \quad (4)$$

当微波在介电常数为 ϵ 的介质中传播距离为 d 时,相移 ϕ 为

$$\phi = kd \quad (5)$$

当被检物体内部存在缺陷时, R 和 ϕ 就会发生变化。根据 R 和 ϕ 有否变化即可确定被检物体内部是否有缺陷。

3 轮胎内部缺陷的微波无损检测模型

轮胎内部最典型的缺陷是气泡。要检测出气泡的尺寸和位置,必须先建立气泡的检测模型。在表面张力的作用下,气泡的二维形状大体上呈圆形。直接建立圆形的检测模型比较复杂,可以考虑采用近似的方法——将圆形视为若干矩形和三角形的组合——然后分别建立矩形和三角形缺陷的检测模型。

当缺陷为矩形时,微波检测模型如图 1 所示。

设矩形缺陷的宽度为 d_1 , 通过计算可得反射因数 R_1 为

$$R_1 = \sqrt{\frac{4r^2 \sin^2 \frac{2\pi d_1}{\lambda}}{(1-r^2)^2 + 4r^2 \sin^2 \frac{2\pi d_1}{\lambda}}} \quad (6)$$

式中, $r = \frac{\eta_2 - 1}{\eta_2 + 1} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1}$, 其中 ϵ_r 为轮胎的相对介

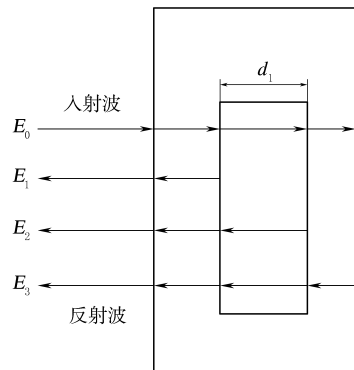


图 1 矩形缺陷检测模型

电常数。

检测中所采用的微波频率为 3 GHz, 这时的 $\epsilon_r \approx 2.0$, 测取 R_1 就可得到 d_1 , R_1 和 d_1 的关系曲线如图 2 所示。

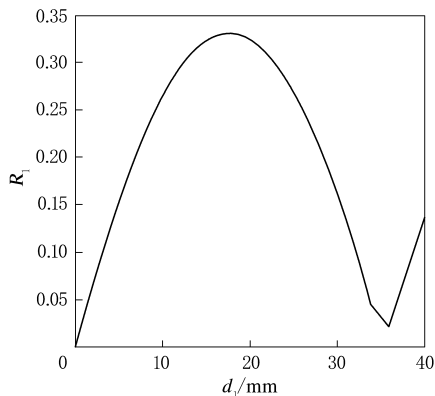


图 2 R_1 - d_1 的关系

气泡的直径通常为毫米级。在此范围内反射因数 R_1 与缺陷宽度 d_1 呈单调关系, 通过测定 R_1 就可确定缺陷的大小。

当缺陷为三角形时, 微波在介质内部由不同的点反射回去, 因此要检测多次反射波的相移。因为微波在橡胶中的衰减较大, 经过两次反射之后已很微弱, 所以在此计算两次反射就已足够。三角形缺陷的检测模型如图 3 所示。

设 $E_0 = A_0$, 则第一次反射波 E_1 为

$$E_1 = T_{12} R_{21} T_{21} e^{-j\phi_1} A_0$$

式中,

$$\phi_1 = \frac{2\pi d_2}{\lambda} (1 + \frac{1}{\cos 2\theta}) = 20 \sqrt{2} \pi d_2 (1 + \frac{1}{\cos 2\theta}) \quad (7)$$

其中 d_2 为缺陷与边界的距离。由式(7)可得到 ϕ_1 , d_2 和 θ 的关系, 如图 4 所示。

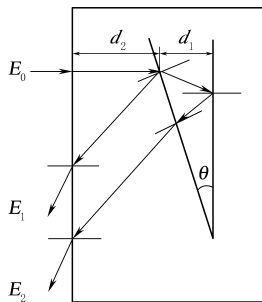


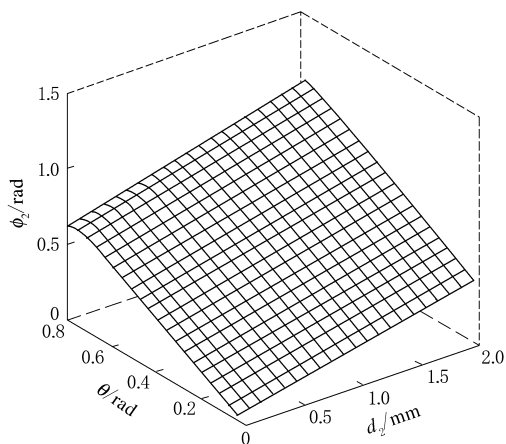
图3 三角形缺陷检测模型

已知第一次反射波的相移后,就可确定 d_2 与 θ 的关系。

第二次反射波 E_2 为

$$\phi_2 = 20\sqrt{2}\pi \left\{ d_2 + \frac{d_1 + d_2 \frac{2\sin\theta \cos[\arcsin(\sqrt{2}\sin\theta) - \theta]}{\cos[\arcsin(\sqrt{2}\sin\theta) - 2\theta]}}{\cos\left\{\arcsin\left\{\frac{\sqrt{2}}{2}\sin[\arcsin(\sqrt{2}\sin\theta) - 2\theta]\right\} + \theta\right\}} \right\} \quad (8)$$

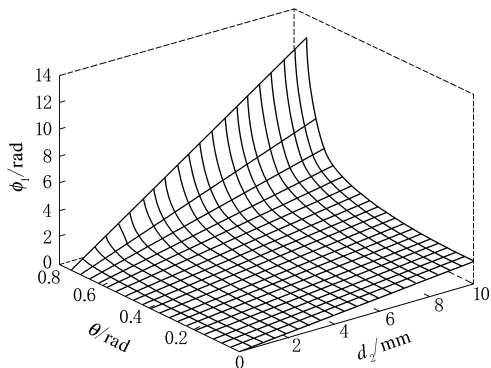
由式(8)可见, ϕ_2 是 d_1 、 d_2 和 θ 的函数。因为 d_1 已确定,所以 ϕ_2 是 d_2 和 θ 的函数,其关系如图5所示。

图5 ϕ_2 与 d_2 和 θ 的关系

通过测定 ϕ_1 和 ϕ_2 ,并由图4和5所示的曲面关系确定 d_1 、 d_2 和 θ ,就可确定三角形缺陷的位置和大小。得到表征缺陷形态的参数后,经数据处理和图像恢复就可得到被测物体内部缺陷的三维图像。

4 轮胎内部缺陷微波检测系统

完整的轮胎内部缺陷检测系统需具有能够产生一定功率微波的稳定微波源,能够有效地检测反射波的反射因数和相位变化,并以较直观的方

图4 ϕ_1 、 d_2 和 θ 的关系

$$E_2 = T_{12} R_{21}^3 T_{21} e^{-j\phi_2} A_0$$

其中

式显示所检测到的轮胎内部缺陷。其系统结构如图6所示。

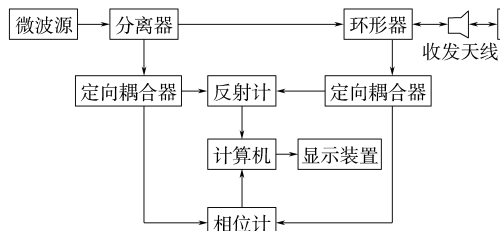


图6 轮胎内部缺陷微波检测系统结构

分离器将微波源发出的定功率定频微波分离为两部分,一部分送至定向耦合器,一部分送至环形器。送至定向耦合器的微波再分离为两部分,分别送至反射计和相位计作为参考信号。在环形器中,入射波和由轮胎反射回来的反射波分开,入射波被从天线发射出去对轮胎进行扫描;携带轮胎内部信息的反射波由天线接收后,经环形器与入射波分开,反射波被送至定向耦合器分离成两部分分别送至反射计和相位计,与参考信号进行比较。在反射计中可以计算出反射因数,在相位计中可以计算出相移。将这两个参数送至计算机,通过将检测参数与检测模型或标准无缺陷轮胎检测参数进行对照即可辨识轮胎内部的缺陷,再经过图像处理并在显示装置上显示,就可直观地看到缺陷在轮胎中的位置、形状和大小。

收发天线与轮胎的相对位置关系如图7所示。

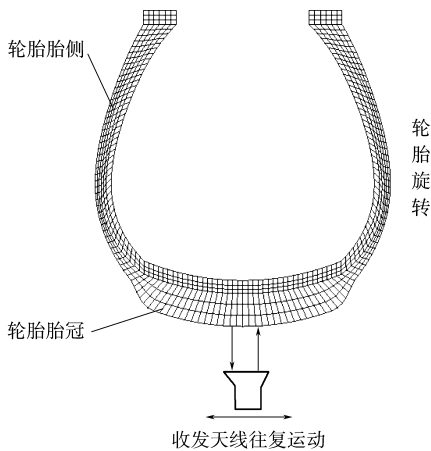


图 7 收发天线与轮胎的位置关系

轮胎送入检测装置被夹装后,天线进入靠近轮胎胎冠的指定位置并发出稳定的定频微波,轮胎开始单方向匀速旋转,同时天线从轮胎的一侧到另一侧做往复直线匀速运动,从而完成对整条轮胎的检测。

5 结语

本工作提出用微波反射法进行轮胎内部缺陷检测。通过理论推导建立了用矩形和三角形模拟圆形缺陷的检测模型,并给出了反射法检测缺陷的方法。在此检测模型基础上构建了完整的轮胎内部缺陷检测系统。

微波反射法检测为无损检测,其检测信号中包含有足够和准确的辨识信息。该检测系统在轮胎 1~2 转内即可完成全部检测,因此该方法和检测系统适用于轮胎生产线上的连续快速在线检测。

该方法也可推广应用于其它复合材料产品的检测装置。

参考文献:

- [1] Ida N. Microwave Nondestructive Testing[M]. Amsterdam: Kluwer Publishing Company, 1992.
- [2] Weedon W H, Chew W C, Mayes P E. A step-frequency radar imaging system for microwave nondestructive evaluation[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2000, 14(5): 665.
- [3] Ghodgaonkar D K. Microwave nondestructive testing of Malaysian timber for grading applications[A]. World Conference on Timber Engineering [C]. Whistler Resort, Canada: 2000. Section 7. 5. 1.
- [4] Ghodgaonkar D K, Ali N A. Microwave nondestructive testing of composite materials using free-space microwave measurement techniques[A]. Proceedings of the 15th WCNDT[C/CD]. Roma: 2000.
- [5] Hughes D, Zoughi R. Near-field microwave and embedded modulated scattering technique (MST) for dielectric characterization of materials[A]. AIP(American Institute of Physics) Conference Proceedings [C]. New York: AIP Publishing Center, 2003. 443-448.
- [6] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册: 电磁卷[M]. 美国无损检测手册译审委员会译. 上海: 上海世界图书出版公司, 1999. 806-834.
- [7] Zoughi R. Microwave and millimeter wave nondestructive testing[J]. Material Evaluation, 1995, 53(6): 461-462.
- [8] Lavelle T M. Microwave in nondestructive testing[J]. Materials Evaluation, 1997, 25(11): 254-258.
- [9] Zoughi R. International advances in nondestructive testing: Vol. 15 [M]. Hardback: Gordon and Breach, 1990. 255-288.
- [10] 吕善伟. 微波工程基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995. 7-10, 31-36.

收稿日期: 2004-02-13

台湾 Samson 机械公司

中图分类号: TQ330. 4+6 文献标识码: D

英国《国际轮胎技术》2004 年 1 期 61 页报道:

Samson 机械公司成立于 1975 年, 是台湾岛内最有经验的轮胎机械制造商之一, 也是当地少数几个通过 ISO 9001 认证的轮胎机械制造商之一。该公司专攻轮胎成型和一些上下游设备, 如供料机、帘布筒贴合机、胶囊成型硫化机、轮胎修边机以及帘布接头机等。其产品主要用于高档轮

胎生产厂, 如轿车子午线轮胎、轻型载重子午线轮胎以及飞机轮胎生产厂。

Samson 还与合作伙伴共同开发了全钢载重子午线轮胎成型机——三鼓一次法成型机。

Samson 的研发部有 10 名技术人员, 总共有 51 名雇员, 已获得 10 多项专利。

Samson 为其生产的成型鼓提供 20 年保用期。该公司声称, 与台湾岛内竞争对手的产品相比, 它生产的成型鼓精度高、使用寿命长。

(涂学忠摘译)