

利用 L_{CR} 波监测长轨温度应力方法的研究

彭小丹, 丁杰雄

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

【摘要】针对铁路养护中对长轨(CWR)纵向温度应力监测的难题,基于声弹性原理,介绍了一种利用 L_{CR} 波来实现其自动化检测的超声波无损检测(NDT)系统,并对该系统的超声波探头和声时测量单元的结构及工作原理进行阐述。系统采用软件方式校正和消除温度对实际测量声速的影响,提高了超声检测应力的测量精度,从而达到了铁路监测要求。

关键词 长轨; 温度应力; 声弹性; 无损检测; L_{CR} 波

中图分类号 U215

文献标识码 A

Study of Monitoring Thermal Stresses in Continuously Welded Rails with L_{CR} Wave

PENG Xiao-dan, DING Jie-xiong

(School of Mechatronics Engineering, Univ. of Electron. Sic. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract An automatic NDT system for longitudinal thermal stresses in continuously welded rails with L_{CR} wave, which is based on acoustoelastic theory, is described in this paper. The working principles of ultrasonic probehead and the L_{CR} wave flight-time measured unit in the system are also introduced. In order to achieve the demands of railway, the linearity and the influence of temperature to system program is considered.

Key words continuously welded rails; thermal stresses; acoustoelastic theory; ultrasonic testing; L_{CR} wave

目前我国营运的铁路线普遍采用长轨,又称无缝钢轨(Continuously Welded Rails, CWR),其特点是每段钢轨间不留轨缝,采用焊接方式联结。由于铁路线路固定区内的钢轨紧固件约束并限制其热胀冷缩,所以在此区间的钢轨内部必然存在相应的纵向温度应力。根据简单的温度应力计算关系式可得出,钢轨内纵向应力变化值约为 $2 \sim 2.5 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ 。由此可见,若温度变化值为 60°C 时,其纵向应力可高达 150 MPa 。巨大的压(或拉)应力可能造成胀轨跑道(或细轨断裂)。因此及时掌握钢轨实际的温度应力,对铁路运行安全意义重大。

国内测试无缝钢轨温度应力主要采用标定法^[1],它的思路来自于应变法。由于它受传统的长度概念影响,以及操作中人工判断的局限,导致其实际应用效率和准确性比较差。从工业生产检测技术的角度来看,低成本、高效率、高可靠性及容易实现便携式的无损检测方法更有运用价值,显然超声波检测仪器在这方面具有竞争力。基于声弹性原理,本文采用了一种利用超声实现对长轨应力进行无损检测的方法。

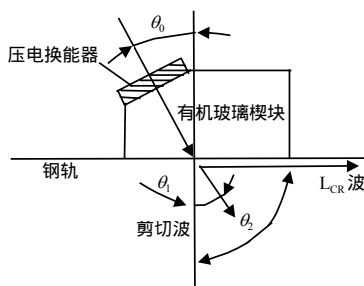


图1 L_{CR} 波探头中的有机玻璃楔块与楔块耦合

目前,我国营运的铁路线普遍采用长轨,又称无缝钢轨(Continuously Welded Rails, CWR),其特点是每段钢轨间不留轨缝,采用焊接方式联结。由于铁路线路固定区内的钢轨紧固件约束并限制其热胀冷缩,所以在此区间的钢轨内部必然存在相应的纵向温度应力。根据简单的温度应力计算关系式可得出,钢轨内纵向应力变化值约为 $2 \sim 2.5 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ 。由此可见,若温度变化值为 60°C 时,其纵向应力可高达 150 MPa 。巨大的压(或拉)应力可能造成胀轨跑道(或细轨断裂)。因此及时掌握钢轨实际的温度应力,对铁路运行安全意义重大。

1 利用 L_{CR} 波检测应力的原理

1.1 L_{CR} 波的产生

L_{CR} 波(Critically Refracted Longitudinal Wave)即极限折射纵波^[2-3]。根据Snell定理^[4],在纵波探头与被测物间插入一个有机玻璃(Plaxiglas)楔块(PMMA)构成一定角度。如图1所示,纵波进入被测物后发生折射,产生的剪切波折射角度为 θ_1 ;纵波折射角度为 θ_2 。声束入射角 θ_0 和折射

角 θ_1 、 θ_2 之间的关系为:

$$\sin \theta_0 / C_0 = \sin \theta_1 / C_1 = \sin \theta_2 / C_2 \quad (1)$$

式中 C_0 为入射纵波的传播速度; C_1 、 C_2 分别是被测物中剪切波和纵波的传播速度。理论上, 当式(1)中 θ_2 为 90° 时对应的纵波就被称为 L_{CR} 波。一般情况下, 纵波在有机玻璃中的传播速度约为 $2\,730\text{ m/s}$, 在钢材中约为 $5\,900\text{ m/s}$ 。图1中产生的极限折射纵波的入射角 θ_0 约为 27.56° 。

1.2 L_{CR} 波与应力的关系

L_{CR} 波中包括表面下纵波^[5](Subsurface Longitudinal Wave, SSLW)和纵向表面爬行波(Longitudinal Surface Creeping Wave, LSCW)。LSCW沿被测物表面传播在短距离(约几厘米)迅速衰减, 所以对于 L_{CR} 波应力检测的实现是利用SSLW。它是在被测物表面下以近似于纵波速度长距离传播的体波。 L_{CR} 波应力测量是基于声弹性原理^[6], 当各向同性固体材料承受单轴向应力时, 与应力方向一致传播的纵波对应力变化的灵敏度大于同条件下的其他波形。根据Hughes和Kelly的二阶关系式^[7], 以及Murnaghan的三阶理论^[4], L_{CR} 波速与单纵向应力的关系为:

$$\rho_0 C_t^2 = \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)]\sigma / E \quad (2)$$

式中 ρ_0 是未受应力时的材料密度; μ 、 λ 是Lame常数; l 、 m 是三阶弹性系数; E 是材料弹性模量; ν 是泊松比; C_t 是受应力后的被测声速。对于速度的改变量和应力的关系, 由式(2)得:

$$(C_t / C_0)(dC_t / d\sigma) = [2 + (\mu + 2m) + \nu\mu(1 + 2l/\lambda) / \lambda + 2\mu] (1/E) \quad (3)$$

设 L_{CR} 波声速变量常数 $K = [2 + (\mu + 2m) + \nu\mu(1 + 2l/\lambda) / \lambda + 2\mu]$, 则式(3)简化为:

$$(C_t / C_0^2)(dC_t / d\sigma) = K(1/E) \quad (4)$$

式中 C_0 是被测物未受应力时的 L_{CR} 波声速。在式(4)中, 由于波速受应力影响变化量很小, 速度变化可视为一阶无穷小, 即:

$$C_t / C_0^2 \approx 1 / C_0 \quad (5)$$

所以有

$$d\sigma = [E / KC_0] dC_t \quad (6)$$

式中 $d\sigma$ 是应力改变量(MPa); dC_t 是声速改变量(m/s)。

2 利用 L_{CR} 波的长轨温度应力检测系统

2.1 超声波探头

本系统采用双探头, 均由压电换能器和有机玻璃楔块相结合构成, 如图1所示, 分别发射和接收 L_{CR} 波。

对于 L_{CR} 波来说, 换能器中心频率越高, 其声波可到达表面下的深度越小, 通过综合考虑测量系统精度及钢轨表面情况等因素来选择该系统换能器的中心频率。由于钢轨与车轮接触, 使轨头上表面和P内侧表面产生塑性变形, 为避免由此对声波传播的影响, 一般选择轨头外侧面来测量。探头结构如图2所示, 探头均固定在支撑板上, 从结构设计上保证了两个探头与钢轨相接触的面在同一水平面上。考虑到声波信号的衰减及便携要求, L 的尺寸选取在 $300 \sim 400\text{ mm}$ 。在实际钢轨应力测试工作中, 系统是通过测量探头之间的声波传播时间变化来反映应力变化的。对于一定的传播距离 L , 只需测量到声时变化 dt , 相对于整个传播时间, 声时变化可视为一阶无穷小, 即:

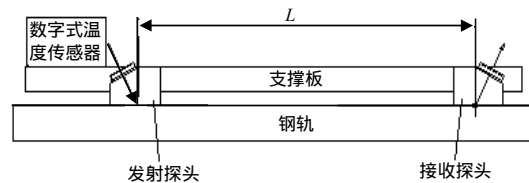


图2 探头结构示意图

在实际钢轨应力测试工作中, 系统是通过测量探头之间的声波传播时间变化来反映应力变化的。对于一定的传播距离 L , 只需测量到声时变化 dt , 相对于整个传播时间, 声时变化可视为一阶无穷小, 即:

$$C_t / C_0^2 = t_i / t_0^2 \approx 1 / t_0 \quad (7)$$

则式(6)变形为:

$$d\sigma = [E / Kt_0] dt \quad (8)$$

式中 t_0 为钢轨锁定温度(初始应力 σ_0)下 L_{CR} 波在定距离下传播的时间; t_i 为钢轨受温度应力时 L_{CR} 波在定距离下传播的时间; $d\sigma$ 是应力改变量(MPa); dt 是声时改变量(s)。所以, 测量时刻 t 的钢轨绝对温度应力为:

$$\sigma_t = \sigma_0 + d\sigma \quad (9)$$

L 为定值,即探头相对位置不变,但固定探头的支撑板会随温度变化而发生热胀冷缩。系统计算时, L 的改变量通过软件设计来补偿。支撑板的线性膨胀系数 k 已知,补偿距离 $\pm\Delta L = kL\Delta t$,从而补偿由探头结构引起的声速误差。温度变化量 Δt 由安装于支撑板上并与之直接接触的数字式温度传感器测量的在线温度和室温之间的差值获得。温度传感器可以与CPU数据接口直接用一根数据总线连接,实现支撑板表面的实时温度测量。

2.2 循环平均声速测量单元

在如图2所示 L 距离下,系统单次测量 L_{CR} 波的传播时间约 10^{-5} s量级,1.5 MPa的钢轨温度应力改变量对应的声时改变量约为1 ns,显然单次测量是难于获得如此微小的改变量的。根据国内外相关经验^[4,8],本测量单元可采用脉冲循环计数平均法,如图3所示。提高声时测量精度的原理就是在回路中重复多次超声波的发射和接收,由累积的时间求出单次回路中超声波传播的时间。测量开始时,由CPU发出初始触发脉冲,启动尖脉冲发生器,从而使超声波激励器激励换能器产生声脉冲。声脉冲信号沿钢轨纵向方向传播,由接受探头的换能器将其转化为电信号,经过放大电路后,通过由CPU时间控制的消隐电路,启动触发器。该触发器一面再次触动尖脉冲发生器,一面向CPU发送计时脉冲。这样每一次接收探头收到声脉冲信号后,发射探头便受激励发射下一个新的声脉冲,同时计数器完成一次计数。

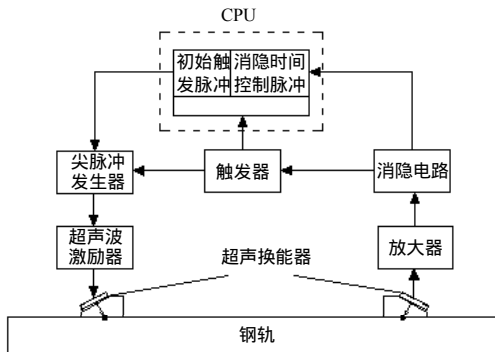


图3 循环平均声速测量原理图

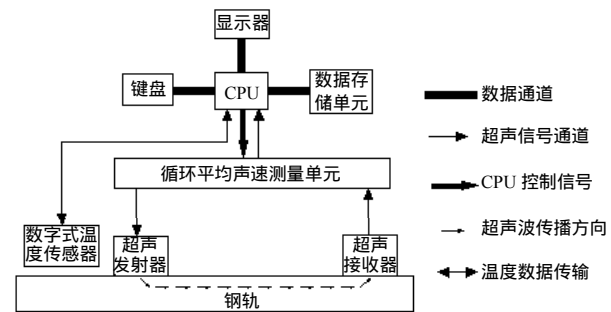


图4 L_{CR} 系统整体结构原理图

2.3 L_{CR} 波长轨温度应力测试系统总体结构

整个测试系统结构如图4所示,主要由超声波探头、声速测量单元、实时温度测量数字式传感器、CPU、外部数据存储单元和外围输入、输出等部分组成,各部分的工作状态由CPU指令控制。测量中所需要的钢轨声学参数和锁定温度下声速值需要在测量前设置。应先将被测钢轨处于自由应力状态下的声学参数 K 值和锁定时的声时值 t_0 ,以及初始应力值 σ_0 存入CPU存储器。在测量开始时,循环平均声速测量单元接受CPU指令,并与探头及计数器共同完成声速测量工作。同时系统通过温度传感器获取超声探头工作温度和钢轨表面温度,并根据实际需要校正和补偿温度引起的声时误差,然后利用式(9)得到钢轨的绝对应力值。现场多个点的测量值存于外部数据存储单元,通过计算机数据接口,将采集点的数据录入到铁路线路管理系统,从而实现钢轨工况监测信息化管理。

3 结论

利用 L_{CR} 波测量长轨应力,其特点主要有:(1)沿钢轨纵向传播的 L_{CR} 波对钢轨纵向温度应力有较高的灵敏度,故声信号分辨率高,利于接收和分析;(2)该方法虽不是直接测得钢轨中的绝对应力值,但却容易得到当前钢轨应力的变化值。综合以上两点,在已知钢轨声学参数和安装时产生的残余应力的前提下,利用 L_{CR} 波测量由温度引起的纵向应力是可行的方法。

参考文献

- [1] 刘兴汉. 钢轨温度和温度应力[J]. 西铁科技, 2002, 3: 31-33.

- [2] Basatskaya L V, Ermolov L N. Theoretical study of ultrasonic longitudinal subsurface waves in solid media[J]. Defektoskopiva, 1981, 7: 58-65.
- [3] Szelazek J. Monitoring of thermal stresses in continuously welded rails with ultrasonic technique[EB/OL]. <http://www.ndt.net/article/dresd07/szelazek/szelazek.Htm>, 1998-07-06.
- [4] 西拉德. 超声检测新技术[M]. 陈积懋, 译. 北京: 科学出版社, 1991.
- [5] Tanala E, Bourse G, Fremiot M, et al. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods[J]. NDT & E International, 1995, 28(2): 83-88.
- [6] 贺玲凤, 刘军. 21世纪固体力学丛书—声弹性技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] Hughes D S, Kelly J L. Second-order elastic deformation of solids[J]. Physical Review, 1953, 92: 5.
- [8] 刘镇清. 一种高精度超声波声速自动测量仪[J]. 应用声学, 1994, 01: 29-32.

编辑 孙晓丹

(上接第790页)

图5a是以上面的算法经过相位纠正后CCD面上的物光波(只显示实部);图5b是在没有引入相移角 θ 时,即直接从图4b重建出来的像,可以看出由于没有进行符号纠正,重建出来的像是错误的;图5c是从图5a重建像,可以看出经过相位纠正后重建出来的图像与原始图像一致。以上程序在CPU为PIII, 650 MHz的电脑上运行,耗时约10 s。

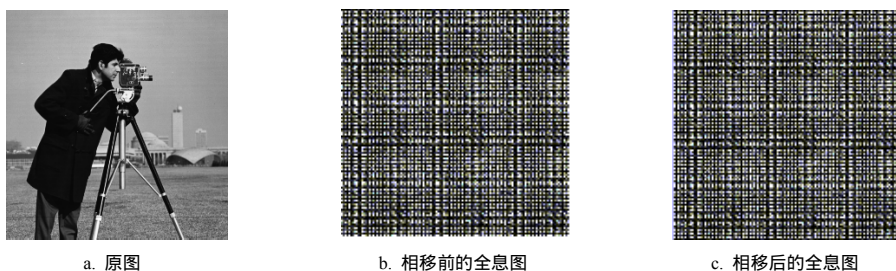


图4 原图和相移前后的两帧全息图

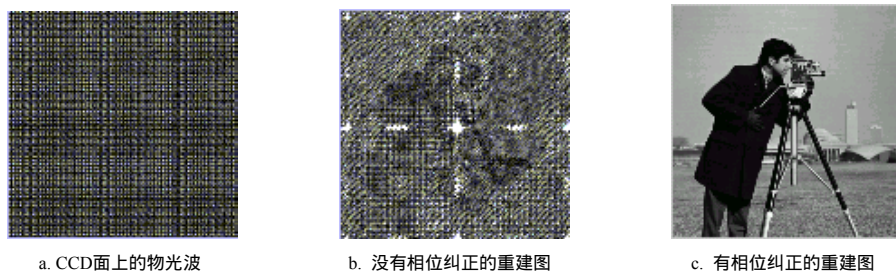


图5 CCD面上的物光波和重建图

4 结 论

本算法采用同轴光路记录,拍摄的四帧光强中,只有一帧是有相移的,而且有相移的这一帧只用于对相位符号的纠正,不参与大小的运算。因此,该算法既能保持同轴数字全息对CCD利用率高的优点,又能消除相移过程中相移误差对重建结果的影响。

参 考 文 献

- [1] Schnars U, Juptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. Meas. Sci. Technol., 2002, 13(9):85-101.
- [2] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Opt. Lett., 1997, 22: 1268-1270.
- [3] Paramod K, Rastogi. Holography interferometry[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994: 132-134.
- [4] Wang Ying-zong, Zhen Yan-kun, Zhang Hong-jun, et al. Study on digital holography with single phase-shift operation[J]. Chinese Optic Letters, 2004, 2(3): 141-143.

编辑 孙晓丹