

通信装置机械零部件表面微小裂纹无损检测研究

汤震¹, 虞骅²

(1. 国网镇江供电公司, 江苏 镇江 212000; 2. 国网连云港供电公司, 江苏 南京 222000)

摘要:为提高机械材料零件质量,提出一种通信装置零部件表面微小裂纹无损检测方法。通过激光超声在物质表面产生热特征区,由局部位置向周围扩散热量形成热应力,在零件内部传递并反射,明确超声检测时零件动态响应。在零件内部传递并反射的光束投射在棱镜上,当机械零部件表面存在有声扰动,则会受脉冲波影响,导致光束倾斜,通过接收器放大信号并输出,对照零件动态响应定义,实现零部件无损检测。仿真实验证明,所提方法可将零部件扫描结果绘制成图像,可视化效果好,且检测精度高,适合各种机械零部件的无损检测。

关键词:通信装置;机械零部件;表面微小裂纹;无损检测;动态响应

中图分类号: TP274⁺.5; TP21

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0106-04

Research on non-destructive testing of micro cracks on the surface of mechanical parts of communication device

TANG Zhen¹, YU Hua²

(1. State Grid Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212000, China;

2. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Nanjing 222000, China)

Abstract: In order to improve the quality of mechanical material parts, a non-destructive testing method for micro cracks on the surface of communication device parts is proposed. The laser ultrasonic generates a thermal characteristic area on the surface of the material, diffuses heat from the local position to the surrounding to form a thermal stress, which is transmitted and reflected inside the part, so as to clarify the dynamic response of the part during ultrasonic testing. The beam transmitted and reflected inside the part is projected on the prism. When there is acoustic disturbance on the surface of the mechanical part, it is affected by the pulse wave, causing the beam to tilt. The receiver amplifies the signal and outputs it. According to the definition of the dynamic response of the part, the non-destructive testing of the part is realized. Simulation experiments show that the proposed method can draw the scanning results of parts into images, which has good visualization effect and high detection accuracy, and is suitable for nondestructive testing of various mechanical parts.

Keywords: communication device; mechanical parts; micro cracks on the surface; non destructive testing; dynamic response

0 引言

机械零部件^[1]表面纹理的检测,对通信装置的生产具有重要意义,零部件高质量生产,可以帮助加工企业提高信誉度、提升盈利能力,强化产品在使用过程中的安全性能,确保社会的健康发展。同时还需要工作人员在不降低零部件加工速度的基础上,通过人机交互界面实时监测零件质量,让客户在使用产品中增加满意度,增强品牌影响力。零部件质量越好就越能使生产企业在加工市场占据一席之地,但是,越是精致、加工工序多的零件,越容易产生微小裂纹,影响品牌名誉度。在生产过程中,产品表面裂纹产生原因主要有:一个是因工业技术发展,对机械零部件表面形态的要求逐渐提高,在生产零部件时必须增加相应加工程序,以满足用户对产品质量的要求,如果复杂加工工序中出现指令错误,就会导致最终生产出来的零部件质量出现问题;另一个是制作零部件的材料本身具有

问题,如因存放方式、环境等原因出现氧化和腐蚀^[2]等,就会导致大量零部件出现瑕疵;同时,工作中的加工机器,机器与材料之间的震动也会影响零部件的加工和抛光处理,造成细小划痕。机械零部件的损伤大多是肉眼不能直接观察到的,因此无法通过人工方式检测零部件上的裂纹是否影响通信设备使用。

目前国内外均在进行通信设备机械零部件裂纹的检测,在上世纪德国科学家 Kaiser 发现材料形变声反射现象的不可逆性,这又被称为“Kaiser 效应”,这一现象使得现代声发射技术快速发展。德国 QASS 公司针对零件无损检测开发了新一代声发射裂纹检测仪器,可对零件进行无损检测,但其对于零件的外观有一定要求,只针对于轴类零件。我国近年来的研究也具有一定成果,如杨阳等^[3]为提升零件表面裂纹的检测效率,研发了基于激光红外检测信号的表面裂纹定量重构方法,基于频域叠加法和数据库策略实现了激光激励下表面温度快速数值模拟,研究裂纹尺寸与温度分布间的关系,该方法具有一定有效性,但是其检测精

度不高;又如王景林等^[4]提出了基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法,可从不同模式特征对裂纹特征进行综合评价。并且得出利用 ACFM 检测技术进行裂纹检测时,只有当探头扫描方法与裂纹走向一致时检测才达到最佳效果的结论。基于此,本文提出一种基于激光超声检测的通信装置机械零部件表面微小裂纹无损检测方法,运用激光超声产生的高频激光声波向机械零部件传递,收集反射回来的信号,从而判断零部件是否存在裂纹,并明确裂纹产生的具体数据,提出解决措施,确保通过检测的机械零部件不影响通信装置的正常使用,提高通信可靠性。

1 激光超声检测的高斯光源热膨胀扩散分析

激光超声检测是利用高能激光脉冲^[4]和材料表面产生的瞬时热作用^[5],在固体表面生成热特性区,运用这一小层热从零部件局部位置向周围扩散,形成热应力。激光超声可呈现各种形态声波,如产生纵波、横波和声表面波等,更加有效地呈现出零件表面情况。

一般而言,单位面积功率小于 1.07 MW 的激光脉冲照射到物体表面时,零部件局部接收部分激光能量产生温度上升的现象。然而接收的能量不足以让零部件粒子熔化或者升华^[6]。温度升高导致局部零部件体积急剧膨胀,出现在弹性范围内的热应力,该机制称为热弹机制^[7]。在热弹机制下,零部件中仅产生弹性范围内的应力波,不会因为激光照射而产生额外的破坏,符合无损检测的具体要求。功率低虽然不会给零部件带来损伤,但是在某些条件下传递到零部件上的激光能量较小,导致采集到的超声信号比较弱。

当激光脉冲的能量大于 1.07 MW 时,零部件局部受热温度上升,引发粒子熔化和升华的现象称为热蚀效应^[8]。热蚀效应是激光脉冲与零件表面强作用的一种体现,在该机制下激光产生的超声波往往具有很高的能量和信噪比,对于损伤的检测很有帮助。

运用激光超声波检测时,需要映射物体满足高斯函数分布^[9-10]。因此超声波在零部件表面透射过程中也满足对称要数,可适用于不同厚度的零部件。激光超声波产生的光束在透射零部件较厚位置时,会出现能量损耗,在厚度 a 处光的强度表示为

$$I(a) = I(0)e^{-\alpha a} \quad (1)$$

式中, e 表示自然常数, r 表示零件长度。

激光超声波照射到机械零部件表面,摄取到能量后,物体部分温度升高发生膨胀现象,从而产生热流运动。通过坐标系推算出,激光超声波高斯光源热膨胀扩散表达式为

$$k \nabla^2 A(x, y, t) = \rho A(x, y, t) + A_0 \beta \nabla U(x, y, t) \quad (2)$$

零部件表面在 t 时间激光射入下的温度场函数为 $A(x, y, t)$, 零部件密度表述为 ρ , 激光照射起始温度表述为 A_0 , 热膨胀扩散系数表述为 k , 热弹耦合系数表述为 β , 位移表述为 U 。

对于激光超声检测而言,主要是通过高频激光超声波

向零部件内部传递,并且产生反射,能够检测物质瑕疵部位的损伤程度。

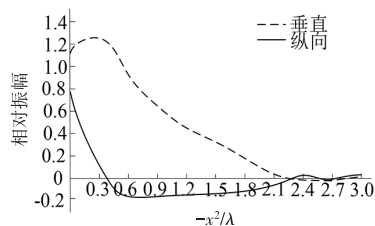


图1 声表面波位移分量

2 微小裂纹无损检测实现

激光超声脉冲波照射到零部件表面相应部位时,部分射入的激光能量会被零部件周围层吸取,并在最短时间内转变成热能。激光持续发出能量导致零部件温度升高,产生热膨胀,激发出热应力,反映出零部件的表面裂纹。本文以此为依据,开展通信装置机械零部件的表面微小裂纹无损检测研究。

通过传感器发出激光超声波,检测有问题的机械零部件表面位置。但每个零部件所呈现的状态和摆放方式不一样,那么在检测时获取激光超声信号也会有所不同。如果机械零部件整体完好、不存在裂纹情况下,零部件就为显著的线性特征。此时无损的零部件动态响应 σ_1 描述为

$$\sigma_1 = B_1 E \sin 2\pi f_1 t + B_2 E \sin 2\pi f_2 t \quad (3)$$

式中, f_1 和 f_2 为激光超声波入射频率; B_1 和 B_2 表示射入的激光超声波幅值; E 表示为杨氏模量, t 表示为激光超声波入射时间。

当机械零部件中存在瑕疵、含有微小裂纹时,受瑕疵影响,零部件会呈现出一定的非线性特征。此时零部件动态响应 σ_2 描述为

$$\sigma_2 = B_1 E \sin 2\pi f_1 t + B_2 E \sin 2\pi f_2 t + E \alpha_1 \left(\frac{B_1^2 + B_2^2}{2} - \frac{B_1^2}{2} \cos 2\pi \times 2f_1 t - \frac{B_2^2}{2} \cos 2\pi \times 2f_2 t \right) + E \alpha_1 B_1 B_2 [\cos 2\pi (f_1 + f_2) t - \cos 2\pi (f_2 - f_1)] \quad (4)$$

式中,零部件非线性系数为 α_1 。

根据公式(3)和(4)可知,激光超声入射波通过激励,线性无损特征动态响应为激光入射振幅的线性迭代;非线性裂纹特征动态响应,有入射振幅,还包含高阶调制波和混合迭代波。新的振幅频率组成有非线性裂纹调制波或者是混合迭代波,就表明待测零部件存在裂纹。

在激光超声检测时,一束检测光源射入零部件表面一点需要穿过透镜 L_1 ; 经过表面反射,光束聚焦在透镜 L_2 上,形成光斑阴影,映射到直角棱镜边位置处,同时会发现射出两束激光源。首先将两光束通过聚焦分开反射到超声信号器的光敏面上。要使反射的两束光变成相等的,就需要调整棱镜的摆放位置。如果机械零部件表面层有超声干扰,那么受影响的表面会因激光脉冲波导致部分倾斜。经过测量,在射入零部件表面的光斑小于需要检测的

激光最短声波时,干扰信号会引起表面发生略小偏移,导致反射光束产生误差,偏离的反射光束会吸收超声信号。偏转光束经过透镜 L_2 ,投射到直角棱镜边位置,光束中心就等于棱镜边上出现细小的偏差数值 h 。同时直角棱镜产生的两束光源在超声信号器光敏面上的光通量也变为相等的。利用接收器的差分、放大作用,把超声干扰信号经过扩张输出,则发出激光超声无损检测信号。

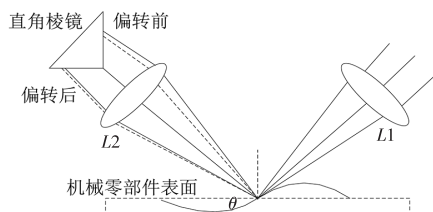


图2 无损检测激光超声波反射原理图

考虑到探测激光光束的强度服从高斯分布,即有

$$I_0 = I \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) \quad (5)$$

光通量为

$$\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) dx dy = I_0 \pi R^2 \quad (6)$$

式中,棱镜光束半径为 R , x 和 y 表示激光点坐标。

激光超声波射入机械零部件表面裂纹时,产生相对干扰,反射的光束会出现偏移。此时光束中心会形成微小偏差 h ,即得出射入和反射光束的光通量变化为

$$\Delta\varphi_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^h I \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) dx dy = \frac{I_0 \pi R^2}{2} \operatorname{erf} \frac{h}{R} \quad (7)$$

$$\Delta\varphi_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_h^0 I \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) dx dy = \frac{I_0 \pi R^2}{2} \operatorname{erf} \frac{h}{R} \quad (8)$$

激光照射时,两束光汇聚在接收器,通过差分和放大处理,即

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 2\pi I R h \quad (9)$$

获取传感输出信号为

$$i = \eta 2\pi I R h \quad (10)$$

式中,光电转换频率表达为 η 。

如果声表面波传递,引发零部件表面位移为

$$U(x, t) = u_0 \cos(\omega t - kx) \quad (11)$$

式中,声表面波振幅表示为 u_0 ,角频率为 ω ,波数为 k 。

由于超声波对零部件表面裂纹影响小,所以激光射入表面偏角 θ 的计算公式为

$$\theta = \frac{\partial U}{\partial x} = k u_0 \sin(\omega t - kx) = \frac{k}{\omega} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (12)$$

依照直角棱镜的分光理论,由图2得知,光束的变化为

$$h = 2F_2 \theta \quad (13)$$

其中,透镜 L_2 的焦距为 F_2 。将式(12)代入式(13)得出

$$h = 2F_2 \frac{k}{\omega} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (14)$$

由式(10)和(14)得出

$$i = 4\eta\pi I R F_2 \frac{k}{\omega} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (15)$$

因为声表面波有一定的带宽,在零部件表面中,具有不同角频率 ω_a 和波数 k_a ,同时有不同振幅 u_{ao} 。因此输出信号表示为

$$i = 4\eta\pi I R \sum_a F_2 \frac{k_a}{\omega_a} \frac{\partial U_a}{\partial t} = \frac{4\eta\varphi}{\pi R} \sum_a F_2 \frac{k_a}{\omega_a} \frac{\partial U_a}{\partial t} \quad (16)$$

3 实验分析

为了验证所提方法是否能够实现微小裂纹检测工作,进行实验测试。

3.1 实验准备

本节采用基于PXI总线搭建虚拟仪器架构,将声表面波激发单元、接收单元及数据处理与图像显示单元集成为一个虚拟仪器平台中。声表面波激发单元所用的激光发生器选用IPG-20激光器,其主要参数如表1所示。

表1 激光器技术参数表

参数	参数设置
平均输出功率	20 W
波长	1 064 nm
重复频率	20 kHz
光斑直径	3 mm
能量稳定性	±2%

利用该激光器输出的脉冲激光频率可高达20 kHz,可满足其零件无损检测的要求。声表面波激发单元除激光发生器之外,还具有光路调节系统,主要由扩束镜和扫描振镜组成。扩束镜可用来对输出激光的光斑直径进行调节,扫描振镜可用来调节激光束的方向。使用者在操作时可通过扫描振镜的控制卡向设备发送指令,控制光学扫描头电机完成激光光束输出方向的调整。本次研究选用的扫描振镜为ST3080高速扫描振镜,最大扫描角度为±20°,偏转误差为±0.1°。

利用激光发射器射入一束频率为20 Hz的脉冲激光,聚焦照射到机械零部件表面,使超声波在固体零部件介质中传播,完成微小裂纹检测。选取200枚通信装置中的六角螺母作为实验样本,其中100枚表面存在裂纹,其螺母厚度为22.3 mm,内径为9.2 mm,外径为5.6 mm,以此为基础开展实验。

3.2 表面微小裂纹定位测试

采用激光超声时域信号检测,如图3所示,此图为激光超声波入射时所获得的时域波形。图中 $R1$ 代表照射零部件表面传递的短光束,反射振幅达到预定位置的时间是45 μs; $R2$ 描述为照射在零部件表面传递的长光束,反射时间为260 μs;图内表面裂纹反射的激光超声横波信号为 S ,振幅时间为50 μs。

利用时域信号对零部件进行无损扫描检测,设定探测范围(-50°,30°)。因为振幅横波信号起伏度小,单独运用激光超声波检测零部件表面裂纹获得的时域波形,对瑕

疵部位的鉴别和确定位置是难以达到理想效果的。需要将取得的激光超声振幅信号画出 B-scan 图像,激光照射角度为垂直角度入射,图 4 为所绘图像。

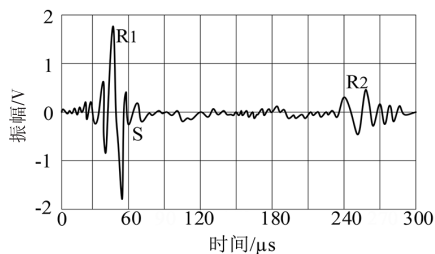


图 3 时域信号

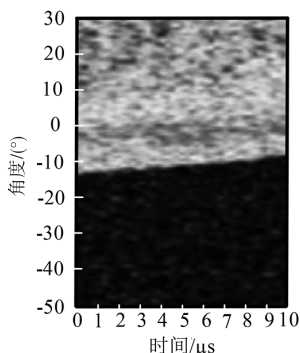


图 4 激光扫描裂纹图像

采样时间设定为 $10 \mu\text{s}$,图 4 中图像内不同颜色代表声波强度。照射声波在经过零部件表面的螺纹产生散射,反射声波强度降低,说明螺纹对检测形成干扰。通过图像得知在激光超声射入零部件时,表面裂纹两端位置产生强烈的反射信号,能够增强激光超声信号接收力。图中可以看出,在接近 0° 位置附近信号强度有显著的增加,与零部件存在裂纹的位置极为接近,可实现检测。

上述说到螺纹对检测有影响,基于此,为了更加深入研究激光超声照射对机械零部件表面裂纹的散射作用,根据图 5 的激光超声扫描信号强度,绘制出图 8 的峰值角度关系图。

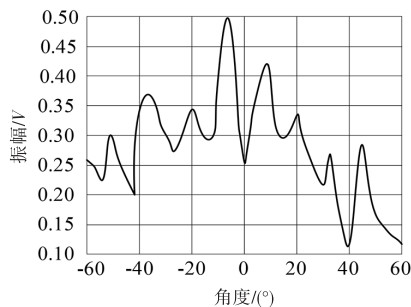


图 5 峰值角度关系图

通过观察图 5 中曲线波动,看出超声信号波在 -5° 到 8° 之间峰值密集,原因是零部件表面裂纹不光滑的两端形成散射导致的;峰值密集处最小值位于 0° 。通过分析可知裂纹测量和实际尺寸十分接近,检测误差较小。通过上述可证明激光超声检测技术能完成机械零部件表面微小裂纹的准确定位,具备非接触性和准确性的优势。

3.3 裂纹检测准确性对比测试

为充分证明所提方法的先进性,选取文献[6]方法和文献[7]方法作为对比方法,与所提方法一同对零件进行无损检测,对比其裂纹检测的准确性,其对比结果如图 6 所示。

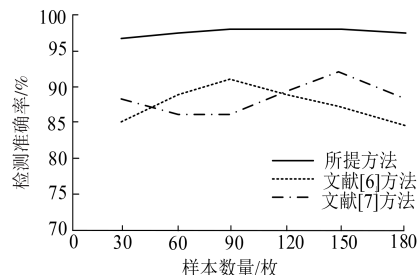


图 6 裂纹检测准确率对比

如上图 6 所示,虽然样本数量逐渐增加,但是所提方法的检测准确率均位于 95% 以上,检测准确率较高且稳定,而两种对比方法准确率均位于 93% 以下,且其稳定性较差,虽然检测样本数量的增多,其检测准确率出现较大波动,故所提方法使用性能更优。

4 结束语

在通信装置机械零部件加工的过程中,存在多而繁琐的步骤。加工程序中难免会对机械零部件表面产生一定的损伤,这时就需要针对表面有瑕疵裂纹的物质进行科学合理的无损检测,才能确保在通信装置组装时,机械零部件的质量,保障产品安全。通过利用激光超声无损检测方法,能够合理地检测零部件表面微小裂纹,且不影响通信装置的使用,有效降低人工操作失误和外界环境干扰对产品的影响。通过实验证明,激光超声无损检测方法能准确定位零部件表面裂纹和检查质量,且非接触和检测误差极小。

参考文献

- [1] 胡松涛,石文泽,卢超,等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 35-46.
- [2] 刘伯承,唐健,王荣彪,等. 基于交流通电的钢球微细裂纹电磁检测方法[J]. 轴承, 2021(8): 32-38.
- [3] 杨阳,邱金星,刘皓晨,等. 基于激光红外检测信号的表面裂纹定量重构[J]. 红外技术, 2020, 42(2): 152-157.
- [4] 王景林,任尚坤,张丹,等. 基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法研究[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 40-46.
- [5] 张文杰,张立萍,郑威强,等. 土壤养分分层检测装置的设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(12): 44-48, 259.
- [6] 王任玉,梁格,林哲钰,等. 基于 Mie 谐振原理的金属表面裂缝微波无损检测[J]. 大学物理, 2019, 38(9): 58-61.
- [7] 唐又红,左欧阳,武美萍. 激光超声裂纹深度定量检测研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1144-1152.
- [8] 侯佳,纪德香,王平. 基于红外热成像的埋地输油管道腐蚀无损检测[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(9): 73-76.
- [9] 吴英龙,宣海军,单晓明,等. 离心轮内部疲劳裂纹扩展及其无损定量表征[J]. 中国机械工程, 2021, 32(6): 658-665.
- [10] 张典,于永柱,管成,等. 故宫养心殿墙体木柱缺陷状况无损检测研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 127-139.

作者简介:汤震(1969—),男,本科,高级工程师,研究方向:电力通信规划与技术管理。