

# 相控阵超声检测技术在机械制造缺陷检测中的应用

陈 辰

(中国船级社质量认证有限公司江西分公司, 江西 南昌 330038)

**摘 要** 针对传统机械制造缺陷的检测方法包括微波检测和电磁检测等, 这些方法存在检测成本高、检测类别较为局限和检测准确率较低的问题。本文提出了基于相控阵超声检测技术的机械制造缺陷检测设计方案, 旨在可以直观展示缺陷特征。首先, 详细设计了相控阵超声缺陷检测设计方案。其次, 提出了基于最小二乘—TSVM 算法的缺陷检测方法。研究表明, 在频率范围和电压输出幅值不变的情况下, 进行多次测量同一探伤仪的值, 测量结果相差不大, 方差较小, 可以忽略不计, 证明了此检测系统的稳定性和精度高, 符合预期效果要求。

**关键词** 机械制造缺陷检测; 相控阵超声检测技术; 最小二乘—TSVM 算法; 相位谱线性度; 阻抗匹配

中图分类号: TH16; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.003

## 0 引言

随着科技的迅速发展, 现代机械制造行业面临的竞争愈发激烈, 对产品的质量控制和缺陷检测的要求也日益提高。缺陷定位的准确性及成像质量, 减少了检测过程中的盲区。相控阵超声检测技术作为近年来无损检测领域的一项重要创新, 以其灵活的声束控制能力和高分辨率的成像效果, 彰显出极大的应用潜力。相较于传统的二维平面区域检测, 相控阵超声技术能够实现三维成像及缺陷的定量评估<sup>[1]</sup>。因此, 利用相控阵超声技术获取三维缺陷形态信息, 不仅能直观展示缺陷特征, 也能够帮助工程师及相关人员做出更加精准的质量控制决策, 进而满足现代制造业不断变化和复杂的质量检测需求。

## 1 相控阵超声缺陷检测设计方案

### 1.1 相控阵超声检测原理

相控阵超声检测的导纳  $Y$  可以用电导  $G$  以及电纳  $B$  表达, 实部是电导  $G$ , 虚部是电纳  $B$ , 所以导纳  $Y$  能用复式表达, 如式 (1) 所示<sup>[2-3]</sup>。

$$Y = G + jB \quad (1)$$

相控阵超声检测的电导和电纳之间的关系需要由近似关系来表达, 所以根据超声探伤仪的电导和电纳之间的关系绘制了曲线, 并且发现这个曲线图形近似形成一个圆, 呈现在双维坐标轴上时, 横轴表示为电导的值, 纵轴为电纳的值, 由电导和电纳的公式推导出方程式为<sup>[4]</sup>:

$$\left(G - \frac{1}{2R_1} - \frac{1}{R_0}\right)^2 + (B - \omega_s C_0)^2 = \left(\frac{1}{2R_1}\right)^2 \quad (2)$$

式 (2) 的形式与圆方程相互匹配, 称为导纳圆方程。考虑到相控阵超声检测性能稳定性对本课题研究的重要意义, 默认中心工作角频率  $\omega_s$  约等于需要研究的角频率  $\omega$ <sup>[5]</sup>。

虚线圆部分为超声波导纳动态矢量图, 实线圆部分为超声波在谐振频率周围的导纳圆图。设导纳圆的半径为  $r$ 、圆心坐标为  $(a, b)$ , 结合导纳圆公式, 得出  $R_1, R_0, C_0$  的计算公式:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{1}{2r} \\ R_0 = \frac{1}{a - \frac{1}{2R_1}} \\ C_0 = \frac{b}{\omega_s} \end{cases} \quad (3)$$

电感  $L_1$  必须从相控阵超声检测的半功率点出发, 由导纳圆示意图可以看出,  $C, D$  点分别对应电纳的最大值和最小值, 因此  $C, D$  两点即为相控阵超声检测的半功率点, 且对应横坐标的电导值均为  $a$ <sup>[6]</sup>。

$$\frac{1}{R_0} + \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} = \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{R_0} \quad (4)$$

结合  $\omega_1, \omega_2$ , 简化即可得到参数  $L_1$  的计算公式如式 (5) 所示。

$$L_1 = \frac{R_1}{\omega_1 - \omega_2} \quad (5)$$

点  $E$ 、 $F$  为任意直线与导纳圆的交点, 当直线与横轴平行时  $F$  点对应的频率为超声波的串联谐振频率  $\omega_s$ , 在串联谐振角频率  $\omega_s$  处得到参数  $C_1$  的计算公式如式 (6) 所示。

$$C_1 = \frac{1}{\omega_s^2 L_1} \quad (6)$$

## 1.2 相控阵超声检测特性

模拟超声波传递函数  $H(\omega) = U(\omega)/V(\omega)$  典型频谱中,  $U$  是正常粒子速度的探伤仪,  $V$  是探伤仪的终端, 具有复杂的输入电压的传感器特性。  $\omega = 2\pi f$  是角频率,  $f$  为频率,  $H = |H| \exp(i\theta)$ , 其中  $|H|$  为幅度,  $\theta$  为谱相位,  $\theta = \theta(\bar{x})$ , 这是描述探伤仪所有物理参数的函数, 其中  $\bar{x} = x_1, x_2, \dots, x_j$ , 这是包含所有探伤仪参数的矢量<sup>[7]</sup>。

为了量化探伤仪相位谱的线性度, 在中心频率  $f_0$  的 -3 dB 频率范围内, 对频谱相位拟合一条回归线, 如式 (7) 所示。

$$\theta_i = \beta_0 + f\beta_1, f \in [f_{\min}, f_{\max}] \quad (7)$$

式 (7) 中,  $\theta_i$  是理想线性相位,  $\beta_0$  和  $\beta_1$  为回归线系数,  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$  分别为 -3 dB 频率范围的上下限。  $\beta_0$  和  $\beta_1$  的系数由 MATLAB 仿真线性回归得到。这类方法是为了探索参数矢量空间  $x$ , 并且使理想线性相位  $\theta_i$  和超声波相位之间的差值趋于最小化, 即探伤仪相位趋于理想化<sup>[8]</sup>。

## 2 基于最小二乘—TSVM 算法的缺陷检测方法研究

### 2.1 最小二乘法

经过对各种待测参数的分析研究, 本文最终选用基于最小二乘法的曲线与离散数据的拟合, 对系统各方面参数进行相应的回归分析, 再次进行数据后处理。

最小二乘法优化方法是通过将误差的平方和降到最低点, 以此点为中心, 无限逼近周围的数据, 以达到最优匹配数据目的, 从而将预测值与真实数据之间的误差尽可能地降到最小。针对  $t$  个无法直接测取的未知变量  $X_1, X_2, \dots, X_t$ , 只能尽量获得与其近似的预测量  $x_1, x_2, \dots, x_t$ 。对此, 可对与该  $t$  个未知变量有直接函数联系的可测取量  $C$  进行  $m$  次测量, 获得  $m$  个测取量  $C_1, C_2, \dots, C_m$ , 并假设测取量与未知量之间满足如式 (8) 所示的函数关系:

$$\begin{cases} C_1 = f_1(X_1, X_2, \dots, X_t) \\ C_2 = f_2(X_1, X_2, \dots, X_t) \\ \dots \\ C_m = f_m(X_1, X_2, \dots, X_t) \end{cases} \quad (8)$$

观察式 (8) 可以看出, 若有  $m=t$ , 则该方程组可

通过计算直接获得未知量的  $t$  个预测值。在实际的应用过程中,  $m$  过小会增加测量误差带来的不良影响, 为了减小这种测量误差的影响, 应将测量次数  $m$  适当增大以作补偿。

### 2.2 双平面支持向量机算法

在传统的支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 中, 训练 SVM 分类机制需要标记大量的样本, 而样本的正确标记一般很难被实现。TSVM (Twin Support Vector Machine) 是一种不依赖于拓展性思想的经验推理, 它基于结构风险最小化原理, 利用非线性映射将一个输入空间转化为一个基于内部积分函数的高维空间, 进而寻找该空间的输入和输出之间的非线性关系。径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 在处理复杂分类问题中降维明确, 可以将 RBF 作为 TSVM 分类算法中的核函数。TSVM 机制进行正确且有效的学习尤为重要, 其具体的学习过程可以概括如下:

1. 训练数据集。指定训练因子  $C$  和正则化因子  $C^*$ , 利用训练数据中的约束条件 (正负标签) 进行归纳式学习, 获取到的是第一个 (原始的) 样本分类器。

2. 确定测试数据集中样本的类属。TSVM 用原始的样本分类器对无标签样本进行二次分类, 对无标签数据再次进行一定比例的判决划分, 判决值重新分为两部分, 占比重较大的样本部分标记为正标签, 其余样本标记为负标签。

3. 执行样本分类依据。用重新标记的训练集对 TSVM 分类器中的数据进行第三次训练, 不同训练样本中的标签符号按照一对一的标准进行互换, 即正样本标签换为负样本标签, 使得问题 2 的运算维度获得最大下降。训练样本标签的变换经过重复步骤的执行, 直到所有的标签均经过一次互换为止。

4. 循序增加正则化因子  $C^* \text{tap}$  的值, 在未标记样本中重新执行步骤 3, 当满足  $C^* \text{tap} \geq C$  时, TSVM 即完成学习分类并终止学习。

### 2.3 基于最小二乘—TSVM 的缺陷检测算法

由最小二乘—TSVM 拟合折线图可得,  $f_1(x)$  是不敏感上界,  $f_2(x)$  是不敏感下界, 表示可容许误差,  $f(x)$  是回归函数。径向基核函数 RBF 用于 TSVM 分类器, 因为 RBF 核函数可以分析更高维的数据, 而带有 RBF 核函数的 TSVM 化只有两个参数,  $C$  和  $\sigma$  确定。用最小二乘法优化 TSVM 参数的过程可以概括如下。

1. 初始化训练样本  $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, l\}$ 。

2. 根据非平行的分类超平面, 设定接下来计算中所涉及的每项参数的估计值。

3. 利用迭代公式  $f(x) = \frac{1}{2}K(x, A^T)(\omega_1 + \omega_2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)$ , 预测下一时刻的参数值, 其中核矩阵  $A$  的维数由数据的特征映射空间决定。

$$A = (X_1(i), \dots, X_k(i), \dots, X_{K'}(i))$$

$$= \begin{pmatrix} x_{11}(i) & x_{12}(i) & \dots & x_{1K'}(i) \\ x_{21}(i) & x_{22}(i) & \dots & x_{2K'}(i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1}(i) & x_{p2}(i) & \dots & x_{pK'}(i) \end{pmatrix} \quad (9)$$

式 (9) 中,  $X_k(i)$  为一个特征空间的参数测量值,  $X_{k'}(i)$  为特征空间  $X_k(i)$  对应时刻的参数预测值。

4. 利用  $e(t) = y(t) - \bar{y}(t)$ , 计算预测误差, 其中  $y(t)$

表示  $t$  时刻的真实值,  $\bar{y}(t)$  是该时刻的预测值。如果  $e(t)$  大于设定的误差值  $\varepsilon$ , 那么转到步骤 3, 反之, 进行下一步。

5. 计算  $\phi_{n+1}^{-1}(x)$ , 跳转到步骤 3 重新进行数据迭代。

### 3 实验结果分析

为了验证检测系统的精度, 在维持输入电压信号幅度和频率范围不变的情况下, 进行多次重复测量, 并对每次测量的电导电纳值进行了误差统计, 记录在表格中。通过观察对比几个实验数据, 证实检测系统误差较小、精确度高。令输出电压信号幅值为 5 V, 频率范围控制在 35.00 ~ 40.00 kHz 之间, 缺陷测量结果, 如表 1 所示。

表 1 频率在 35.00 ~ 40.00 kHz 时多次重复测量的结果

测量次数	$f_s/\text{kHz}$	$R_0/\text{k}\Omega$	$R_1/\text{k}\Omega$	$C_0/\text{nF}$	$C_1/\text{pF}$	$L_1/\text{mH}$
1	39.15	9.93	1.28	1.60	101.45	162.90
2	39.20	10.04	1.21	1.58	102.74	160.45
3	39.20	10.71	1.25	1.50	103.64	159.46
4	39.15	10.70	1.24	1.59	103.64	158.74
5	39.17	10.03	1.28	1.60	101.72	162.90
6	39.20	10.71	1.25	1.48	102.56	160.47

以多次重复测量后的平均数据结果作为后续测量的参考, 计算出每次测量所对应的相对误差, 进行每次测量时, 探伤仪都处于正常且稳定的工作状态, 在频率范围和电压输出幅值不变的情况下, 进行多次测量同一探伤仪的值, 测量结果相差不大, 方差较小, 可以忽略不计, 在电压输出幅值保持不变的情况下, 改变频率点后, 测量的参数结果的误差也处在合理范围内, 证明了此检测系统的稳定性和精确度高, 符合预期效果要求。

### 4 结论

本文提出了基于相控阵超声检测技术的机械制造缺陷检测设计方案, 以及基于最小二乘—TSVM 算法的缺陷检测方法。结果表明, 在频率范围和电压输出幅值不变的情况下, 对同一探伤仪的值进行多次测量, 测量结果方差较小, 可以忽略不计, 证明该检测系统具有较高的稳定性和精度, 符合相关要求。

### 参考文献:

- [1] 刘鹏鹏, 姜旭耀, 周静, 等. 相控阵超声检测在薄壁奥氏体不锈钢管道检测中的应用研究[J]. 盐科学与化工, 2025, 54(06):47-51.
- [2] 陈斌. H 型钢焊缝超声相控阵检测仿真研究[J]. 工业锅炉, 2025(03):17-22.
- [3] 周振兴, 赵勋, 刘小波, 等. 相控阵超声检测技术在锅筒制造过程中的应用[J]. 特种设备安全技术, 2025(03):4-6.
- [4] 刘金亮, 刘金玉. 石油平台 TKY 管节点焊缝相控阵与常规超声检测技术对比研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(10):68-70.
- [5] 吴建新, 张健, 张迪. 铸钢与碳钢对接焊缝的相控阵超声检测[J]. 船舶职业教育, 2025, 13(03):64-67.
- [6] 郝维康, 孟磊, 靳红星, 等. 相控阵超声技术在埋弧焊 X 形坡口检测中的应用[J]. 无损检测, 2025, 47(05):35-41.
- [7] 潘碧琳, 杨兴宽, 黄永巍, 等. 车轮浅表层缺陷试块的全聚焦相控阵超声检测分析[J]. 高速铁路新材料, 2025, 04(02):75-80.
- [8] 黄增文, 张国林. 巴氏合金/钢复合层的滑动轴承超声相控阵成像检测[J]. 无损探伤, 2025, 49(03):37-40.