

压电材料在土木结构损伤检测中的应用

郭琳 张伟 魏建军

土木工程结构一般使用年限长, 并且一旦建造很难替换。但任何土木结构的性能都会随时间劣化, 这主要是由于材料本身老化、过度使用、超载、环境侵蚀、缺乏维护和检测手段难以满足要求等原因。有效的土木工程结构健康检测系统能够实时地诊断缺陷(裂纹、锈蚀等)的位置和程度, 使结构能得到及时的修复和加固, 以确保结构的完整性和安全性。目前, 有很多的结构健康检测方法应用到各种土木工程结构或它们的构件中。如经典的静态应变(或位移)测试和振动识别方法, 非破坏性检测方法: 声发射技术、声/超声法、阻抗法、红外热像法、脉冲雷达法和 X 射线等。但多数方法都是定性的, 难以进行实时的检测。

近年来, 压电阻抗技术在结构健康诊断中应用得越来越多。1995 年 Sun 等人将压电阻抗技术成功用于组装衍架的结构健康诊断, 被认为是压电阻抗技术在结构健康诊断领域应用的开始。压电阻抗技术的优点是对结构中出现的小损伤反应灵敏, 有利于检测出结构初期故障, 而且压电阻抗技术中常使用的压电材料 PZT (锆钛酸铅压电陶瓷) 有体积小, 结构简单和工作可靠等优点, 另外, PZT 只对其附近局部范围内的变化敏感, 有助于分离出结构整体的质量加载、结构刚度和边界条件变化与 PZT 附近结构损伤对测量结果的影响, 所以这种技术适用于跟踪检测那些对结构完整性要求严格或是对结构寿命影响很大且损伤不容易检测的薄弱环节。

作为一种压电器件, PZT 具有压电效应, 其基本原理是: 当它产生机械形变时, 有产生电势的能力, 对它施加电压时, 有改变其尺寸的能力。对 PZT 施加力, 会导致其两个表面出现极性相反的电荷, 且电荷量与所施加的力成正比, 这就是正压电效应; 对 PZT 两表面施加电压, 会导致其产生机械变形, 这就是逆压电效应。压电方程可表示为

$$D_i = d_{iu}\sigma_u + \varepsilon_j^0 E_j,$$

$$\varepsilon_\lambda = c_{\lambda u}^E \sigma_u + d_{j\lambda} E_j.$$

式中, D_i 为产生的电位移 ($i = 1, 2, 3$), ε_λ 为产生的应变 ($\lambda = 1, 2, 3 \dots, 6$), σ_u 为所受的应力 ($u = 1, 2, 3 \dots, 6$), E_j 为所加电场强度 ($j = 1, 2, 3$), ε_j^0 为应力 σ

为零(或常数)时的介电常数, $c_{\lambda u}^E$ 为电场强度 E 为零(或常数)时的弹性柔顺系数, d_{iu} ($d_{j\lambda}$) 为压电应变常数。式中的下标 1、2、3 分别与坐标轴的 x 、 y 、 z 对应, 如图 1 所示。

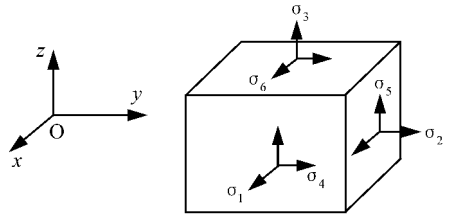


图 1 PZT 坐标和应力示意图

由 PZT 的压电方程可知, 在结构损伤检测中, 利用它的正压电效应可以将其制成传感器, 它可以检测结构的振动信号并以电荷形式输出; 利用它的逆压电效应可以将其制成驱动器, 使结构产生振动, 以便传感器检测振动信号。

阻抗法是压电材料机电耦合效应在结构诊断方面的典型应用。其基本原理是: 结构损伤引起机械阻抗变化, 但结构的机械阻抗难以通过直接测试得到。阻抗法利用压电材料的机电耦合效应, 当给与结构粘结的压电片施加交流电场时, 压电片和结构本体产生机械振动。这种机械振动通过逆压电效应在压电片内产生电响应, 表现为压电片阻抗的变化。通过与结构在无缺陷时压电片的交流阻抗谱比较, 可以诊断结构内部的损伤情况。

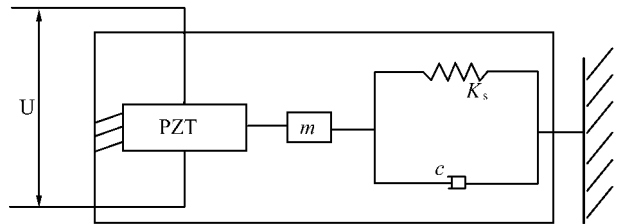


图 2 阻抗法原理图

阻抗法原理如图 2 所示, PZT 视为一端固定, 另一端与外部结构连接。 m 、 K_s 和 c 分别为质量、弹性系数和阻尼系数。PZT 的导纳(阻抗的倒数)与系统机械阻抗的关系如下:

$$Y(\omega) = i\omega\alpha\varepsilon_{33}^T(1 - i\delta) - \frac{Z_g(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^T Y_{xx}^E,$$

