

文章编号: 1001-4888(2017)04-0495-11

## 基于阻抗法的预应力波纹管密实性试验研究\*

蒋田勇, 彭中, 罗舟滔, 郑俊博

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:** 针对预应力波纹管中压浆不密实的问题, 提出了一种基于压电阻抗法的预应力波纹管密实性检测研究方法。运用压电阻抗法的结构健康监测原理, 定义了预应力波纹管灌浆密实性指标的均方根偏差 RMSD(Root Mean Square Deviation), 通过测试粘贴在波纹管底顶板的压电陶瓷传感器 PZT(Piezoelectric Ceramic Transducer) 和嵌入到波纹管内部智能骨料 SA(Smart Aggregate) 的电阻抗值, 与灌浆 100% 工况相比研究了灌浆 0%、灌浆 50% 以及灌浆 90% 等工况下的电阻抗实部与虚部的频谱曲线变化规律。结论是密实性指标 RMSD 随预应力波纹管密实性增加而减小。上述研究成果验证了阻抗法对波纹管密实性检测的有效性。

**关键词:** 压电陶瓷; 机电阻抗法; 波纹管; 密实性指标

**中图分类号:** U448.22      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-150

### 0 引言

波纹管是预应力体系中的一种重要组成部分, 它不仅能保护预应力钢筋以避免腐蚀, 同时还能使预应力钢筋与混凝土结合成一个整体, 因此波纹管的灌浆质量直接或间接影响着桥梁的耐久性。为了保证预应力混凝土结构的耐久性, 必须保证预应力孔道完全填充。但在灌浆的实际过程中, 由于导管堵塞和不适当的灌浆方式, 在管道中可能会产生空洞。目前中国大约有 40%~60% 的连续梁或者连续刚构桥预应力管道存在着灌浆缺陷问题。由于预应力管道的隐秘性, 所以必须采取有效的方法检查出预应力孔道压浆质量缺陷, 确保预应力混凝土结构的安全性和可靠性。

国内外很多学者也对此开展了一些研究, 并且提出了不少的无损检测方法。目前, 预应力管道压浆质量的监测方法主要包括冲击回波法、超声波法以及地质雷达法。在冲击回波法方面, Tinkey 等<sup>[1]</sup> 以 U 型梁的预应力管道作为试验对象, 在管道中设置不同程度的空洞缺陷, 利用冲击回波扫描仪对预应力管道灌浆缺陷进行了检测。Muldoon 等<sup>[2]</sup> 利用冲击回波法、冲击回波谱振幅叠加成像法(SIBIE)以及超声波图像三种方法对一标准梁段的塑料波纹管进行了检测。Wang 等<sup>[3]</sup> 在预应力管道中设置了五种不同的灌浆状态, 分别为空置、灌浆 1/4、灌浆 1/2、灌浆 3/4、灌浆饱满, 利用超声波法检测波纹管灌浆质量。Krause 等<sup>[4]</sup> 利用超声阵列系统和三维重建计算方法对桥面板的横向管道进行了检查, Schickert 等<sup>[5]</sup> 提出了一种合成孔径超声聚焦成像方法(SAFT), 这些方法在管道检测方面都取得了较为理想的效果。Ayala-Cabrera 等<sup>[6]</sup> 基于地质雷达法提出一种自动管道定位系统。

压电陶瓷 PZT(Piezoelectric Ceramic Transducer) 作为一种智能材料, 具有正、逆压电效应, 在结构监测过程中能够制成传感器和驱动器, 使电能和机械能在一定条件下可以相互转化, 从而使其在结构监

\* 收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208061); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(15ZDXK12)

通讯作者: 蒋田勇(1978—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向为智能结构监测和复合材料应用。Email: tianyong\_jiang@fox-mail.com

测领域具有独特的优势。赵晓燕等<sup>[7]</sup>将 PZT 片粘贴在钢筋混凝土框剪模型的表面,对试验中可能出现的损伤进行监测。刘智等<sup>[8]</sup>对基于波动法的结构损伤识别特征参量进行了试验研究。阎石等<sup>[9]</sup>将 PZT 分别作为传感器和驱动器粘贴在悬臂梁的表面,利用压电传感器响应信号对激励进行反算得出控制信号,进而实现压电驱动器对结构振动响应的控制。卢翔等<sup>[10]</sup>研究了压电阻抗法对焊接铝板结构的焊缝检测,试验证明压电阻抗信号对焊缝损伤具有较高的灵敏度,同时通过结合神经网络还能准确地对焊缝损伤进行定位。张兢等<sup>[11]</sup>将压电陶瓷片粘贴在铝梁结构表面,运用压电阻抗技术对螺栓松动进行损伤检测,试验表明螺栓松动损伤对高频激励比较敏感。高峰等<sup>[12]</sup>也以铝梁为研究对象,人工模拟不同裂缝深度对压电导率的影响。压电陶瓷 PZT 粘贴在结构表面或者埋入结构内部时,PZT 的电阻抗与主体结构的机械阻抗相耦合,其电阻抗信号中包含了结构机械阻抗的相关信息,即结构的损伤状况,通过测量 PZT 电阻抗信号的变化,就可以诊断结构的损伤情况<sup>[13]</sup>。本文针对预应力波纹管中压浆不密实的问题,提出一种基于压电阻抗法的波纹管密实性检测方法,并进行了相应的试验研究。

## 1 压电阻抗法的基本理论

在压电阻抗法研究中,压电陶瓷与被检测结构之间相互作用的模型可分为两类:一维阻抗模型和二维阻抗模型。其中,一维阻抗模型又可以分为不考虑粘结层的一维阻抗模型和考虑粘结层的一维阻抗模型。本文采用不考虑粘结层的一维阻抗模型。

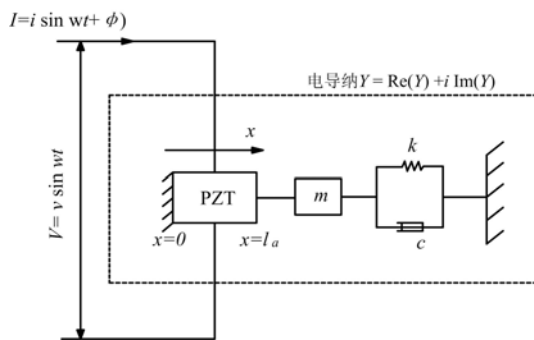


图 1 压电陶瓷 PZT 与结构机电耦合作用的一维模型

Fig. 1 One-dimension model of electromechanical coupling for PZT and construction

### 1.1 不考虑粘结层的一维阻抗模型

粘贴在结构表面的 PZT 片在交变电场作用下,PZT 与主体结构之间的相互作用可以用图 1 所示简单的一维阻抗模型来描述。PZT 与主体结构相互作用系统被模拟成一个 SMD (Spring Mass Damping) 系统,即弹簧质量阻尼系统。PZT 片被看作为一狭长的杆件,只能在纵向产生膨胀或收缩;PZT 片的一端被固定,另一端与简化为单自由度的主体结构相连<sup>[14]</sup>,如图 1 所示。该模型为不考虑粘结层的一维理想简单阻抗模型,由平衡方程、波动方程以及压电方程可以得出该系统中压电陶瓷的电导纳为:

$$Y = i\omega \frac{\omega_a l_a}{h_a} \left[ \bar{\epsilon}_{33}^{\sigma} - \frac{Z_s}{Z_s + Z_a} d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E \right] \quad (1)$$

式中, $i$  是虚数的单位; $\omega$  是交变电场的角频率; $\omega_a$ 、 $l_a$ 、 $h_a$  分别表示压电陶瓷的长、宽、高; $\bar{\epsilon}_{33}^{\sigma}$  表示压电陶瓷在应力为常数时的复介电常数; $\bar{\epsilon}_{33}^{\sigma} = \epsilon_{33}^{\sigma} (1 - \delta i)$ ,  $\delta$  是介电损耗角; $d_{31}$  为压电常数; $Z_s$  和  $Z_a$  分别表示主体结构和压电陶瓷 PZT 片的机械阻抗; $\bar{Y}_{11}^E$  表示 PZT 在电场常数的复杨氏模量, $\bar{Y}_{11}^E = Y_{11}^E (1 + \eta i)$ 。

### 1.2 阻抗与导纳的关系

在利用阻抗分析仪对结构上的压电陶瓷传感器施加交流电压时,可以通过电桥平衡得出压电陶瓷传感器的电阻抗,即输入电压和输出电流之比:

$$Z = \frac{V}{I} = R + jX \quad (2)$$

$$\tan \theta = \frac{X}{R} \quad (3)$$

PZT 的电阻抗是由实部和虚部组成的复数,式中  $R$  为等效电阻,表示电阻抗的实部; $X$  为等效电抗,表示电阻抗的虚部; $\theta$  为电阻抗的相位值。

电阻抗和电导纳之间互为倒数,因此电导纳的表达式为:

$$Y = Z^{-1} = \frac{I}{V} = G + jB \quad (4)$$

式中,  $G$  为等效电导, 表示电导纳的实部,  $G=R/(R^2+X^2)$ ;  $B$  为等效电纳, 表示电导纳的虚部,  $B=-X/(R^2+X^2)$ 。

### 1.3 智能压电材料基本性能

压电陶瓷一般分为压缩型和剪切型, 压缩型的主要性能参数如表 1 所示。压电陶瓷由于正负极在同一个面上, 使其适合粘贴在被测物体的表面, 如图 2 所示。智能压电材料质地较脆, 在土木工程应用过程中应当采取保护措施, 经过保护后的压电传感器称之为智能骨料 SA(Smart Aggregate), 其主要由 PZT 片、保护层、屏蔽导线、屏蔽导线接头以及环氧树脂组成, 如图 3 所示。

表 1 压电陶瓷的主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of piezoelectric ceramics

性能参数	参数值	性能参数	参数值
压电常数(pC/N)	275	居里温度(°C)	200
密度(kg/m³)	7.5	介电损耗	2
介电常数(F/m)	3200	机械品质因数	70
泊松比	0.36	机电耦合系数	0.68

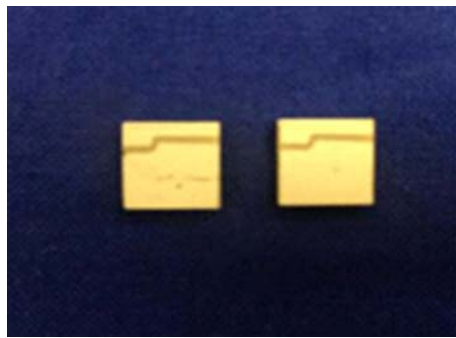


图 2 压电陶瓷

Fig. 2 Piezoelectric ceramics

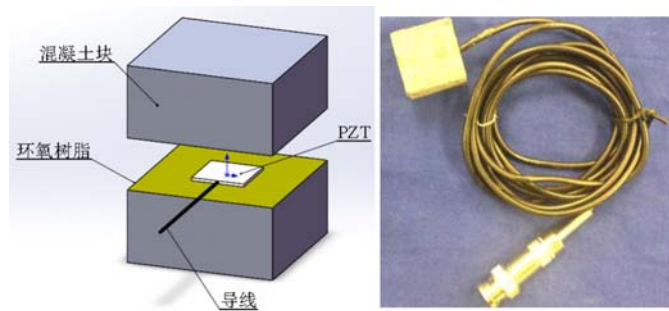


图 3 智能骨料 SA 组成

Fig. 3 Compositions of smart aggregate

## 2 压电阻抗法检测波纹管密实性试验

### 2.1 预应力波纹管密实性检测试件

预应力波纹管密实性检测试件由波纹管、预应力筋、混凝土、灌浆水泥、智能骨料 SA 以及 PZT 片等组成, 其基本尺寸为 254mm×254mm×254mm, 如图 4 所示。波纹管的外径为 70mm, 内径为 60mm, 其材料为塑料。模型中还设计了一根 PVC 管作为灌注孔。在浇筑混凝土之前, 将 1 个嵌入式智能骨料 SA 用环氧树脂胶固定在预应力筋上, 将 2 个压电陶瓷 PZT 片分别粘贴在波纹管的上下表面, 其中 PZT1 粘贴在波纹管外壁的底部位置, 而 PZT2 粘贴在波纹管外壁的顶部位置。

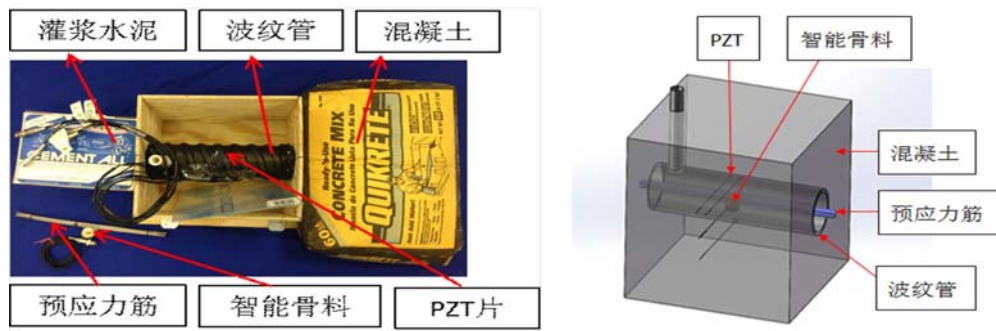


图 4 预应力波纹管密实性检测试件组成

Fig. 4 Compositions of monitoring specimen of compactness of prestressing duct in concrete

## 2.2 灌浆过程以及检测方法

为了使试验效果更加明显,预应力波纹管进行不同程度的灌浆来模拟波纹管中的不密实性程度。预应力波纹管灌浆过程分为灌浆 0%、灌浆 50%、灌浆 90% 以及灌浆 100% 等四种状况,它们依次分别为工况一、工况二、工况三、工况四,如图 5 所示。

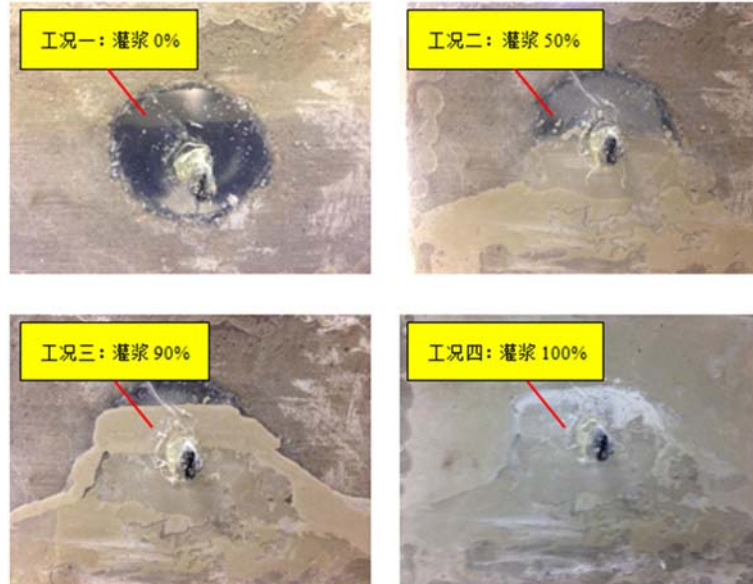


图 5 预应力波纹管灌浆程度

Fig. 5 Grouting quality of prestressing duct

预应力波纹管密实性的检测试验方法如下:首先,将 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪与电脑相连,组成压电陶瓷机电耦合阻抗法的监测系统,如图 6 所示。利用监测系统对不同灌浆工况下粘贴式压电陶瓷 PZT 传感器和智能骨料 SA 的电阻抗信息进行采集。然后,对采集的电阻抗信息进行数据分析。选择波纹管灌浆饱满时压电传感器的阻抗值测量结果为参考值,比较在不同灌浆时各传感器的电阻抗值测量结果,并且将之处理成以频率为横坐标,电导纳值为纵坐标的阻抗频谱曲线。通过分析电阻抗曲线的变化规律,就能对波纹管的灌浆质量进行初步的定性判断。

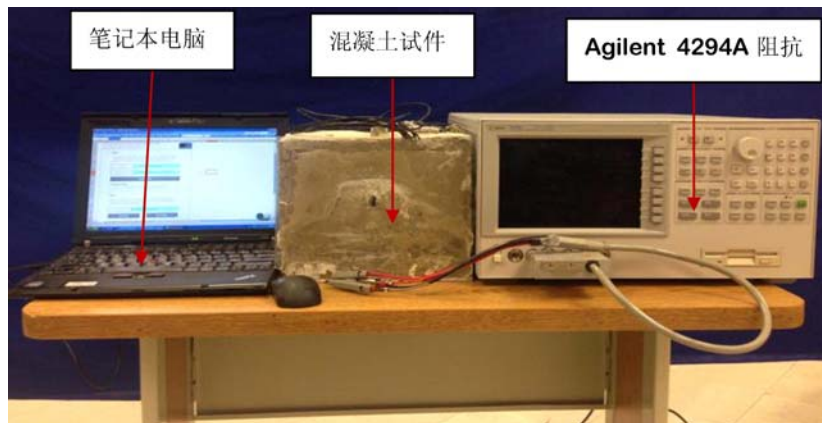


图 6 压电阻抗监测试验系统

Fig. 6 Test monitoring system of electro-mechanical impedance method

## 3 试验结果及其分析

### 3.1 密实性指标及分析方法

在用阻抗法对波纹管进行密实度检测时,用指标 RMSD 对灌浆质量进行判定。RMSD(Root Mean Square Deviation),即均方根偏差值,是一个反映电阻抗值变化程度的物理量。RMSD 密实性指标能够

对波纹管的灌浆密实性情况进行识别。以试验得到的不同工况下 PZT 电阻抗值作为出发点,分别以阻抗实部和虚部建立密实性指数:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [Y_k(\text{Re}) - Y_k^0(\text{Re})]^2}{\sum_{k=1}^n [Y_k^0(\text{Re})]^2}} \quad (5)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [Y_k(\text{Im}) - Y_k^0(\text{Im})]^2}{\sum_{k=1}^n [Y_k^0(\text{Im})]^2}} \quad (6)$$

式中,  $n$  为测量频段内频率点的个数;  $k$  为频段内第  $k$  个频率点;  $Y(\text{Re})$  为 PZT 电阻抗实部值;  $Y(\text{Im})$  为 PZT 电阻抗虚部值;  $Y_k$  表示灌浆不密实状态;  $Y_k^0$  表示灌浆饱满状态。该密实性指标表明,当完全密实时,该指标值为 0;随着不密实程度的增加,该指标值也逐渐增加,但是即使完全不密实,该指标值也不会大于 1。将预应力波纹管灌浆饱满时的阻抗信息作为基准,将其他工况下的阻抗信息与这个基准作定量比较,最后得出波纹管密实度的判定结果。

### 3.2 压电阻抗曲线分析

基于压电阻抗法的健康监测技术与测量时频率范围的选择密切相关,试验中为了保证测量结果的准确性和有效性,分别选取合适的频率范围对各压电传感器进行阻抗测量。

#### (1) 波纹管智能骨料 SA 电阻频谱曲线图

图 7 至图 9 分别为波纹管智能骨料 SA 在灌浆 0%、灌浆 50%、灌浆 90% 与灌浆 100% 的电阻抗实部与虚部的频谱曲线对比,其中测试的频率范围为 60kHz~90kHz 之间。对比结果发现,波纹管智能骨料 SA 电阻抗虚部频谱曲线比实部频谱曲线的峰值变化更大,即对于波纹管密实性的检测,智能骨料 SA 电阻抗虚部的变化更加明显。智能骨料 SA 在波纹管灌浆率从 0% 增加到 100% 的过程中,阻抗虚部曲线的峰值呈现出向下漂移的趋势,即阻抗虚部峰值的绝对值随密实性增加而增加。

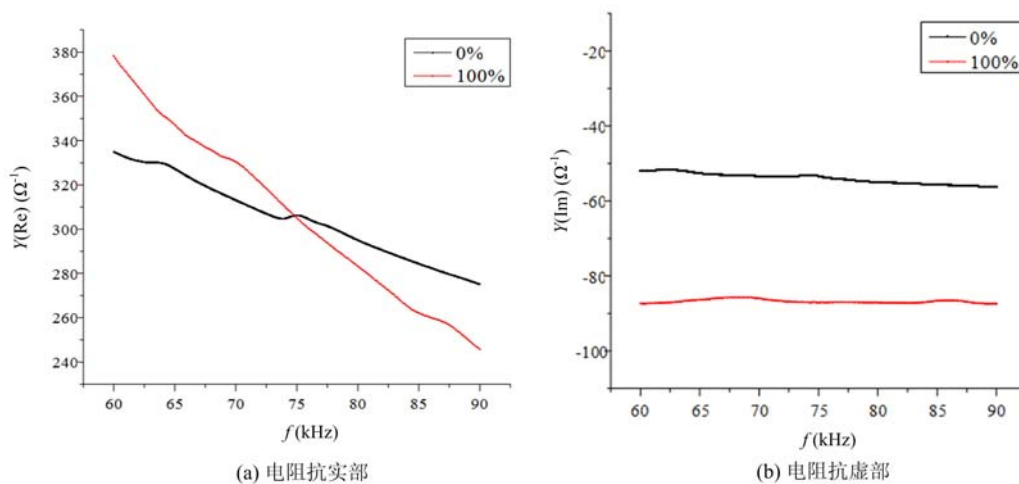


图 7 灌浆 0% 与灌浆 100% 智能骨料 SA 电阻抗实部和虚部的频谱曲线对比 ( $f=60\text{kHz}\sim 90\text{kHz}$ )

Fig. 7 Comparison of SA impedance's real and imaginary parts with 0% grouting and 100% grouting ( $f=60\text{kHz}\sim 90\text{kHz}$ )

#### (2) 波纹管底部 PZT1 电阻抗频谱曲线图

图 10 至图 12 分别为波纹管底部 PZT1 压电陶瓷片在灌浆 0%、灌浆 50%、灌浆 90% 与灌浆 100% 的电阻抗实部与虚部的频谱曲线对比,其中测试的频率范围为 120kHz~150kHz 之间。对比结果发现,波纹管底部压电陶瓷片 PZT1 电阻抗虚部频谱曲线比实部频谱曲线的峰值变化更大,即对于波纹管密实性的检测,电陶瓷片 PZT1 电阻抗虚部的变化更加明显。压电陶瓷片 PZT1 随着灌浆程度的增加,

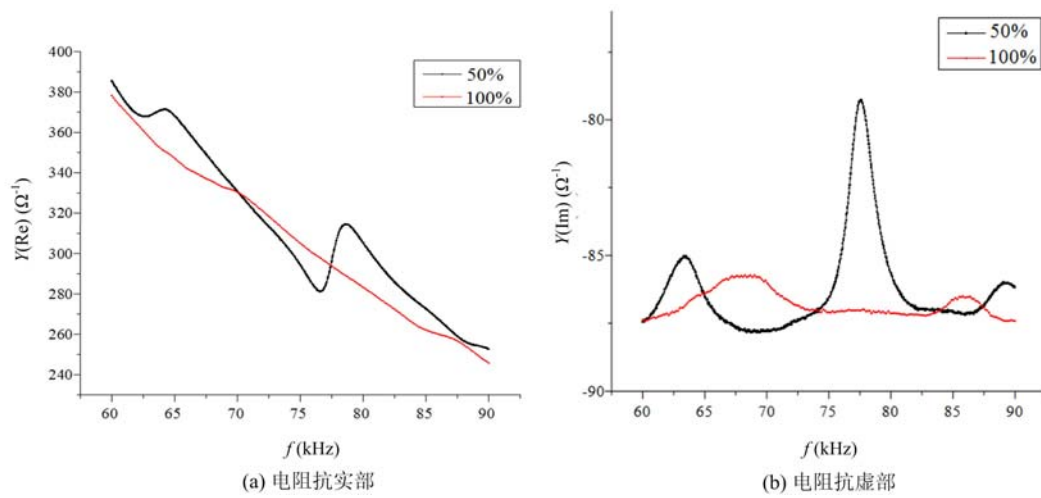


图 8 灌浆 50%与灌浆 100% 智能骨料 SA 电阻抗实部和虚部的频谱曲线对比 ( $f=60\text{kHz}\sim 90\text{kHz}$ )

Fig. 8 Comparison of SA impedance's real and imaginary parts with 50% grouting and 100% grouting ( $f=60\text{kHz}\sim 90\text{kHz}$ )

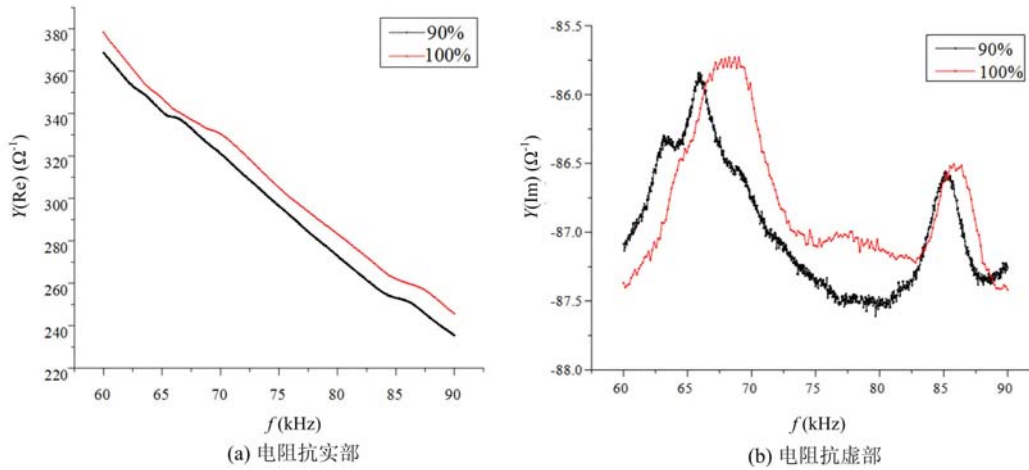


图 9 灌浆 90%与灌浆 100% 智能骨料 SA 电阻抗实部和虚部的频谱曲线对比 ( $f=60\text{kHz}\sim 90\text{kHz}$ )

Fig. 9 Comparison of SA impedance's real and imaginary parts with 90% grouting and 100% grouting ( $f=60\text{kHz}\sim 90\text{kHz}$ )

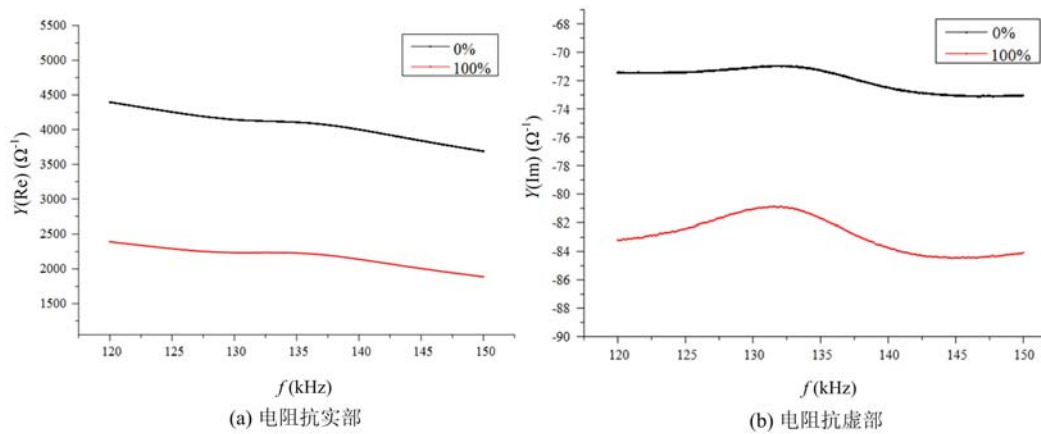


图 10 灌浆 0%与灌浆 100% PZT1 电阻抗实部和虚部频谱曲线的对比 ( $f=120\text{kHz}\sim 150\text{kHz}$ )

Fig. 10 Comparison of PZT1 impedance's real and imaginary parts with 0% grouting and 100% grouting ( $f=120\text{kHz}\sim 150\text{kHz}$ )

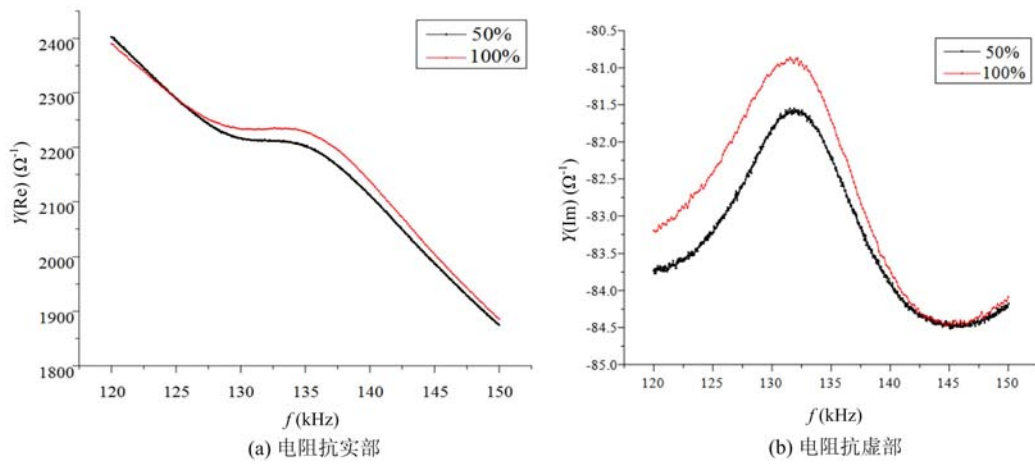


图 11 灌浆 50%与灌浆 100% PZT1 电阻抗实部和虚部频谱曲线的对比 ( $f=120\text{kHz}\sim 150\text{kHz}$ )

Fig. 11 Comparison of PZT1 impedance's real and imaginary parts with 50% grouting and 100% grouting ( $f=120\text{kHz}\sim 150\text{kHz}$ )

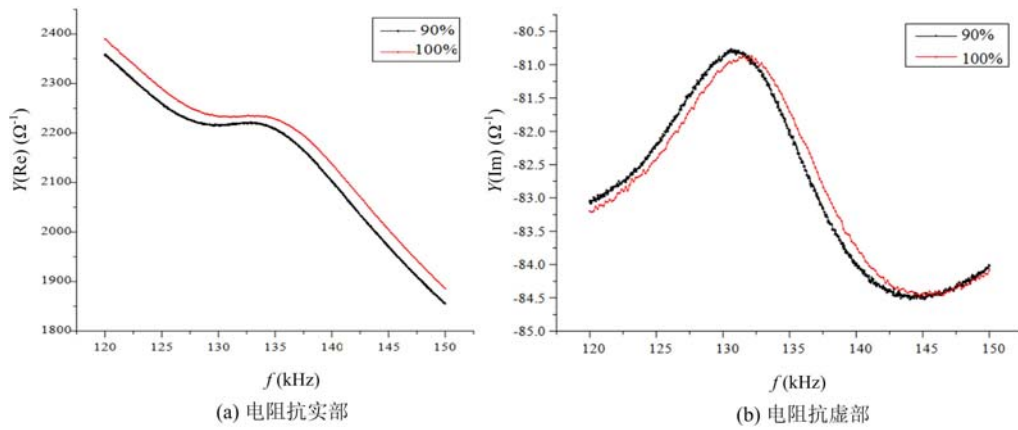


图 12 灌浆 90%与灌浆 100% PZT1 电阻抗实部和虚部频谱曲线的对比 ( $f=120\text{kHz}\sim 150\text{kHz}$ )

Fig. 12 Comparison of PZT1 impedance's real and imaginary parts with 90% grouting and 100% grouting ( $f=120\text{kHz}\sim 150\text{kHz}$ )

压电传感器电阻抗曲线的峰值在增加的同时波形有向左偏移的趋势。

(3) 波纹管顶部 PZT2 电阻抗频谱曲线图

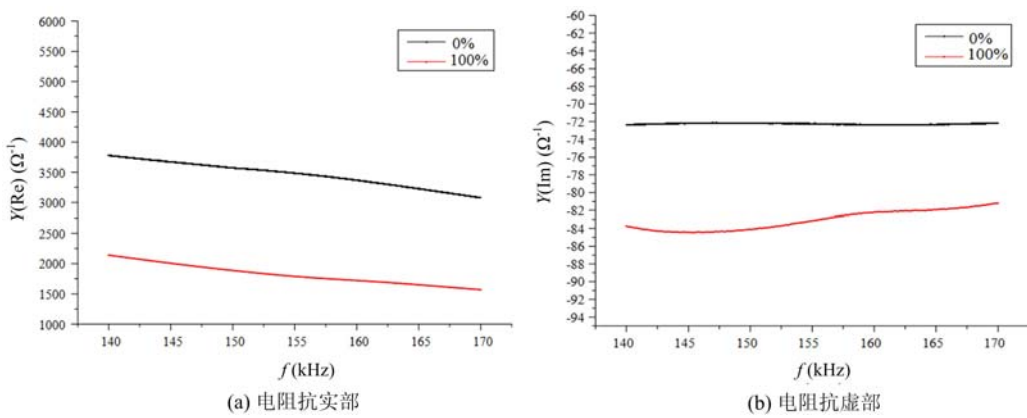


图 13 灌浆 0%与灌浆 100% PZT2 电阻抗实部和虚部频谱曲线的对比 ( $f=140\text{kHz}\sim 170\text{kHz}$ )

Fig. 13 Comparison of PZT2 impedance's real and imaginary parts with 0% grouting and 100% grouting ( $f=140\text{kHz}\sim 170\text{kHz}$ )

图 13 至图 15 分别为波纹管顶部压电陶瓷片 PZT2 在灌浆 0%、灌浆 50%、灌浆 90%与灌浆 100%

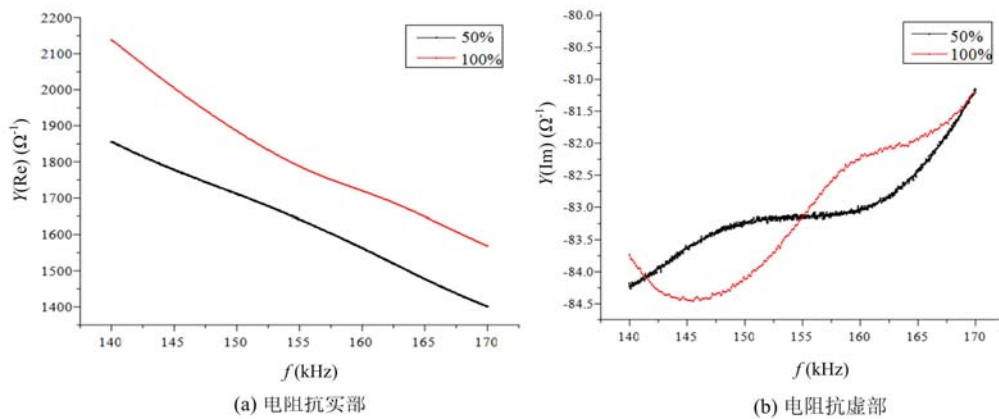


图 14 灌浆 50%与灌浆 100% PZT2 电阻抗实部和虚部频谱曲线的对比( $f=140\text{kHz}\sim 170\text{kHz}$ )

Fig. 14 Comparison of PZT2 impedance's real and imaginary parts with 50% grouting and 100% grouting( $f=140\text{kHz}\sim 170\text{kHz}$ )

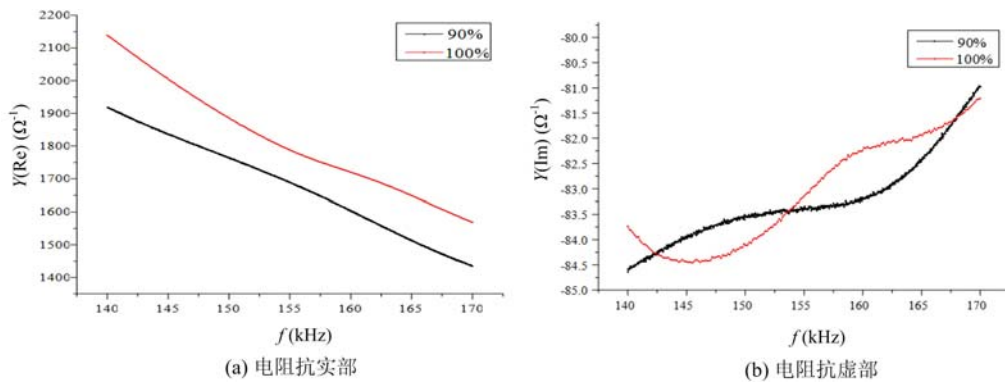


图 15 灌浆 90%与灌浆 100% PZT2 电阻抗实部和虚部频谱曲线的对比( $f=140\text{kHz}\sim 170\text{kHz}$ )

Fig. 15 Comparison of PZT2 impedance's real and imaginary parts with 90% grouting and 100% grouting( $f=140\text{kHz}\sim 170\text{kHz}$ )

的电阻抗实部与虚部的频谱曲线对比,其中测试的频率范围为 140kHz~170kHz 之间。对比结果发现,波纹管顶部压电陶瓷片 PZT2 电阻抗虚部频谱曲线比实部频谱曲线的峰值变化更大,即对于波纹管密实性的检测,电陶瓷片 PZT2 电阻抗虚部的变化更加明显。压电陶瓷片 PZT2 随着灌浆程度的增加,压电传感器电阻抗曲线的峰值也在增加。

### 3.3 密实性指标分析

根据式(5)和式(6),得出不同工况下的密实性指标值如表 2 所示。

表 2 密实性指数计算表

Tab. 2 Worksheet of compactness index

压电传感	密实性指标	工况一(0%)	工况二(50%)	工况三(90%)
SA	RMSD (Re)	6.52%	4.09%	2.91%
	RMSD (Im)	37.8%	2.43%	0.45%
PZT1	RMSD (Re)	86.9%	2.35%	0.86%
	RMSD (Im)	12.2%	1.66%	0.24%
PZT2	RMSD (Re)	90.1%	10.3%	7.67%
	RMSD (Im)	15.1%	2.74%	0.68%

图 16 描述的是波纹管在不同灌浆工况下,嵌入式压电传感器 SA 和表面粘贴 PZT 传感器的实部和虚部密实性指标。



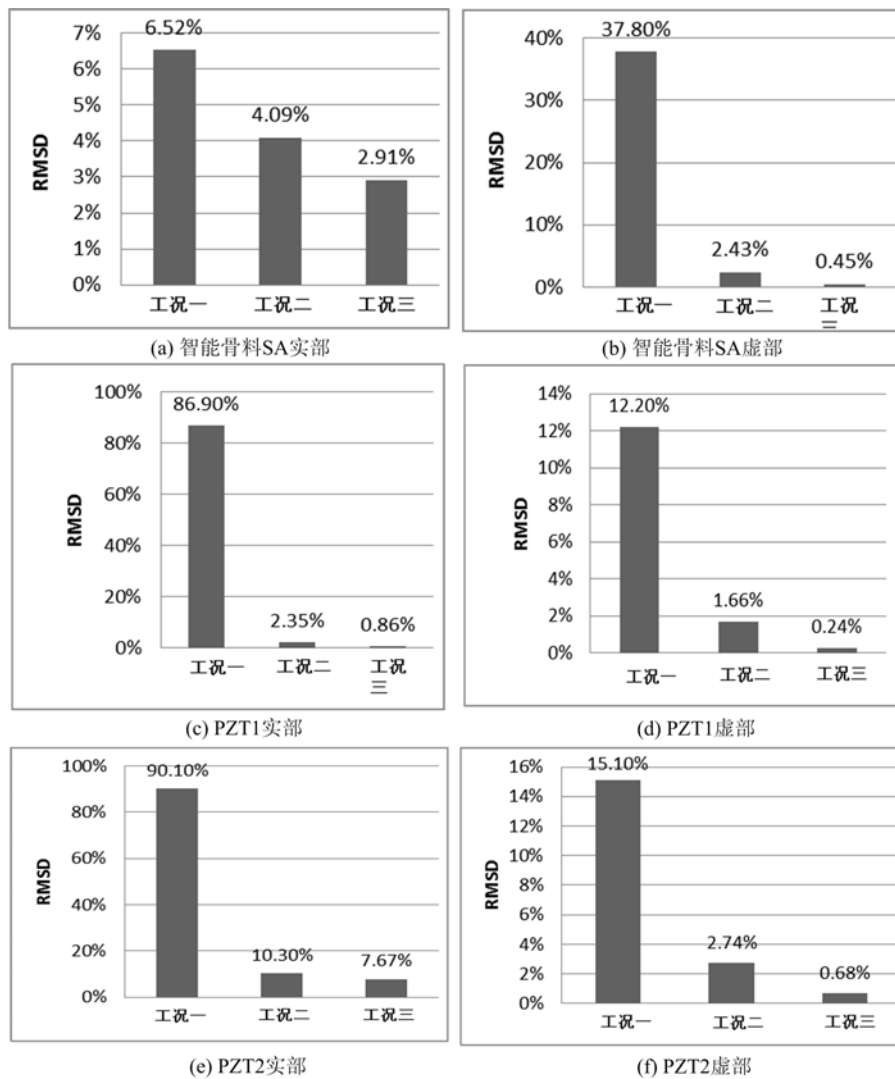


图 16 智能骨料 SA 和 PZT 的损伤指标变化图

Fig. 16 Compactness index of SA and PZT

从图 16 中可以看出,各压电传感器密实性指标的实部均呈现出较好的规律性,即均在工况二时产生较大的突变,说明压电传感器电阻抗虚部对波纹管密实度检测表现出较好的敏感性。

从总体上看,随着灌浆程度的不断增加,嵌入式压电传感器智能骨料 SA 和表面粘贴压电传感器 PZT 的损伤指标均呈现出减小的趋势。但是,根据压电传感器在混凝土试件内位置的不同,损伤指标又呈现出不同的变化规律。由于波纹管内混凝土是由下往上填充的,PZT1 位于波纹管的底部,PZT2 位于波纹管的顶部,PZT2 距密实性较差的部位较 PZT1 近,PZT2 密实性指标数值要比 PZT1 大,说明靠近密实性较差位置处的 PZT 损伤指标较大,距离较远的损伤指标较小。损伤指数的计算结果证明了压电阻抗法对波纹管进行密实度检测的有效性。

#### 4 结论

运用基于压电阻抗法的结构健康监测原理,针对预应力波纹管中压浆不密实的问题,将压电陶瓷片和智能骨料 SA 分别粘贴在波纹管的外表面和嵌入到波纹管内部预定位置,对波纹管的密实性进行检测。通过精密阻抗分析仪获取压电传感器在不同工况下的电阻抗值,通过分析压电陶瓷和智能骨料 SA 传感器测得的电阻抗数据以及密实性指数 RMSD,可以得出以下结论:

(1) 压电传感器电阻抗虚部频谱曲线比实部频谱曲线的峰值变化更大,即对于波纹管密实性的检测,电阻抗虚部的变化更加明显。

(2) 压电传感器电阻抗频谱曲线的变化规律与波纹管灌浆程度有着密切的关系。随着灌浆程度的增加,压电传感器电阻抗曲线的峰值也在增加。

(3) 随着灌浆程度的不断增加,嵌入式压电传感器和表面粘贴压电传感器的密实性指标均呈现出减小的趋势,当完全密实时,该密实性指标为 0;且距离密实性较差区域较近的 PZT 密实性指标较大,距离较远的密实性指标较小。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Yajai Tinkey, Larry D Olson. Impact-echo scanning for grout void detection in post-tensioned bridge ducts—findings from a research project and a case history[C]. Structures Congress, 2007:1—13.
- [ 2 ] Muldoon R, Chalker A, Forde M C, et al. Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact-echo, SIBIE and tomography[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(3):527—537.
- [ 3 ] Wang F, Zhang F. Experimental research on detection of duct grouting quality of prestressed corrugated pipe with ultrasonic[J]. Bridge and Tunnel Construction and Machinery, 2015, 2:73—77.
- [ 4 ] Krause M, Mielentz F, Milman B, et al. Ultrasonic imaging of concrete members using an array system[J]. NDT&E International, 2001, 34(6):403—408.
- [ 5 ] Schickert M, Krause M, Müller W. Ultrasonic imaging of concrete elements using reconstruction by synthetic aperture focusing technique[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 15(3):235—246.
- [ 6 ] David Ayala-Cabrera, Manuel Herrera, Joaquín Izquierdo, et al. Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75(4):679—686.
- [ 7 ] 赵晓燕. 基于压电陶瓷的结构健康监测和损伤识别诊断[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2008 (ZHAO Xiaoyan. Structural health monitoring and damage detection based on piezoelectric ceramic transducers[D]. Dalian University of Technology Doctoral Dissertation, 2008(in Chinese))
- [ 8 ] 刘智, 阎石, 孙威. 基于 PZT 传感器的混凝土裂缝损伤监测敏感因子的提取[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1):15—18 (LIU Zhi, YAN Shi, SUN Wei. Experimental research on damage-sensitive factor extraction in crack detection for PZT concrete structure[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(1): 15—18(in Chinese))
- [ 9 ] 阎石, 张皓, 宋钢兵, 等. 利用压电陶瓷作动器对柔性悬臂梁正位反馈控制实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(3):362—365 (YAN Shi, ZHANG Hao, SONG Gangbing, et al. Experimental study on positive position feedback control of a cantilevered flexible beam using PZT patches[J]. Journal of Shenyang Architectural University (Natural Science Edition), 2008, 24(3):362—365(in Chinese))
- [10] 卢翔, 朱楚为, 章建文, 等. 压电阻抗技术在焊缝裂纹监测中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(2): 205—209 (LU Xiang, ZHU Chuwei, ZHANG Jianwen, et al. Application of electro-mechanical impedance method in crack detecting of welding line[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(2):205—209(in Chinese))
- [11] 张兢, 徐霞, 张志文. 基于压电陶瓷的结构损伤检测技术[J]. 压电与声光, 2006, 28(3):350—352 (ZHANG Jing, XU Xia, ZHANG Zhiwen. Piezoceramic-based testing technology for structure damages [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(3):350—352(in Chinese))
- [12] 高峰, 王德俊, 沈亚, 等. 压电阻抗技术用于螺栓松紧健康诊断[J]. 中国机械工程, 2001, 9(12):1048—1049 (GAO Feng, WANG Dejun, SHEN Ya, et al. Research on piezoelectric impedance technology for bolt health monitoring[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 9(12):1048—1049(in Chinese))
- [13] 王丹生. 基于反共振频率和压电阻抗的结构损伤检测[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2006 (WANG Dansheng. Structural damage detection based on the anti-resonant frequency and piezoelectric impedance[D]. Huazhong University of Science and Technology Doctoral Dissertation, 2006(in Chinese))
- [14] Zhou S, Liang C, Rogers C A. Integration and design of piezoceramic elements in intelligent structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6(6):733—742.

## Experimental Study of Prestressed Bellows Compactness Based on Electro-Mechanical Impedance (EMI) Method

JIANG Tian-yong, PENG Zhong, LUO Zhou-tao, ZHENG Jun-bo

(College of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that is the slurry in prestressed bellows dense enough, a new method is proposed in this paper to detect the compactness of prestressed bellows, based on electro-mechanical impedance method. Adopting structure health monitoring principle of piezoelectric impedance method, the root mean square deviation (RMSD) is defined as index describing the compactness of slurry in prestressed bellows. The electro-mechanical impedance was measured by using piezoelectric ceramic transducers (PCT), which are mounted on bellows bottom, and smart aggregates (SA), which are embedded into the bellows. The variation of frequency spectrum curves of electrical resistance real part and imaginary part was studied under the condition of grouting in 0%, in 50% and in 90% respectively, and was compared with that of grouting in 100%. Conclusion is that the compactness index RMSD decreases with the increase of prestressed bellows density. Above results verify the validity of Electro-mechanical impedance method in bellows compactness detection.

**Keywords:** piezoelectric ceramic; electro-mechanical impedance method; bellows; compactness index