

无线应变传感器测试大纲

编制：肖志达

校对：刘盛文

审核：周学凡

批准：袁 晰

中南大学

二零二三年四月十日

1 目的及范围

1.1 目的

为验证研制的无线应变传感器是否满足项目指标，制定本文件对无线应变传感器进行系统性测试。

1.2 范围

本文件适用于无线应变传感器试验和验证。

2 引用标准及文件

下列文件中的条款通过本文件的引用而成为本部分的条款。

GB/T 21389-2008 《游标、带表和数显卡尺》。

FZ/T 90076-95 《管子、板材、圆钢的弯曲半径》。

GB/T 3389-2008 《压电陶瓷材料性能测试方法-性能参数的测试》。

JB/T 7482-2008 压电式压力传感器。

GB/T 13992-2010 金属粘贴式电阻应变计。

GB/T 16611-2017 《无线数据收发传输信机通用规范》

3 技术要求

3.1 柔性压电复合材料尺寸精度

柔性压电复合材料尺寸 $\leq 11 \times 11 \text{ mm}^2$ 。

3.2 柔性压电复合材料厚度精度

柔性压电复合材料厚度 $\leq 280 \text{ }\mu\text{m}$ 。

3.3 柔性压电复合材料弯曲半径精度

柔性压电复合材料弯曲半径 $\leq 3.0 \text{ cm}$ 。

3.4 无线应变传感器测试范围精度

无线应变传感器测试范围：0~2000 $\mu\epsilon$ 。

3.5 无线应变传感器测试误差精度

无线应变传感器测试误差 $\leq \pm 1\%$ （+10~ +40℃）。

3.6 减速器内外无线数据传输速率精度

减速器内外无线数据传输速率：10 kbps。

3.7 减速器内外无线数据传输误比特率精度

减速器内外无线数据传输误比特率< 1%。

3.8 指标要求

无线应变传感器对重要技术指标的测量范围和测量精度需满足项目任务书和产品图样的要求，详细数据见表1。

表1 无线应变传感器详细技术指标要求

| 序号 | 参数 | 合同指标 | 测试说明 |
|----|---------------------|--|-----------|
| 1 | 柔性压电复合材料 尺寸 | $\leq 11 \times 11 \text{ mm}^2$ | 委托第三方机构测试 |
| 2 | 柔性压电复合材料 厚度 | $\leq 280 \text{ }\mu\text{m}$ | |
| 3 | 柔性压电复合材料 弯曲半径 | $\leq 3.0 \text{ cm}$ | |
| 4 | 无线应变传感器 测试范围 | $0 \sim 2000 \text{ }\mu\epsilon$ | |
| 5 | 无线应变传感器 测试误差 | $\leq \pm 1\%$ ($+10 \sim +40^\circ\text{C}$) | |
| 6 | 减速器内外无线数据 传输速率 | 10 kbps | |
| 7 | 减速器内外无线数据 传输误比特率 | < 1% | |

4 主要测试设备

本课题中指标验证所用设备及设备使用有效期汇总如表2所示。

表2 主要仪器设备名称和型号

| 序号 | 名称 | 型号 | 检定有效期 |
|----|---------|-------------|---------|
| 1 | 电子数显卡尺 | 0-150 mm | 在检定有效期内 |
| 2 | 低频标准振动台 | XR-200 | 在检定有效期内 |
| 3 | 温度传感器 | 铂电阻 PT100 | 在检定有效期内 |
| 4 | 动态信号分析仪 | 3050-A-060 | 在检定有效期内 |
| 5 | 示波器 | TDS 2022C | 在检定有效期内 |
| 6 | 示波器 | MDO34 | 在检定有效期内 |
| 7 | 直流电源 | 鼎阳 SPD3303X | 在检定有效期内 |

| 序号 | 名称 | 型号 | 检定有效期 |
|----|---------|--------------|---------|
| 8 | 信号发生器 | 鼎阳SDG2122X | 在检定有效期内 |
| 9 | 功放模块 | BUF634高频功放模块 | 在检定有效期内 |
| 10 | 万能工具显微镜 | JX13CS | 在检定有效期内 |

5 无线应变传感器参数指标验证

无线应变传感器在组装前后，须委托第三方机构对柔性压电复合材料尺寸、厚度、弯曲半径、无线应变传感器测试范围、测试误差、减速器内外无线数据传输速率、减速器内外无线数据传输误比特率分别进行验证并出具检验报告。技术参数应满足产品图样及项目任务书的要求。

注：委托中国赛宝实验室计量检测中心作为第三方检测机构，负责检验、验证、现场监督并出具检测报告。

5.1 柔性压电复合材料尺寸指标验证

(1) 试验条件

现场测试环境条件满足以下要求：

温度：15℃~35℃；

相对湿度：25%~75%；

气压：86 kPa~106 kPa。

(2) 试验方法

采用电子数显卡尺直接测量柔性压电复合材料的长度 L_x 、宽度 L_y 。每组重复测量三次。

(3) 评定标准

如果 $L_x \leq 11 \text{ mm}$ ， $L_y \leq 11 \text{ mm}$ ，则判定柔性压电复合材料尺寸 $\leq 11 \times 11 \text{ mm}^2$ 。

5.2 柔性压电复合材料厚度指标验证

(1) 试验条件

现场测试环境条件满足以下要求：

温度：15℃~35℃；

相对湿度：25%~75%；

气压：86 kPa~106 kPa。

（2）试验方法

参考GB/T 21389-2008《游标、带表和数显卡尺》规定的方法，测量柔性压电复合材料厚度 L_z 。

（3）评定标准

采用电子数显卡尺直接测量柔性压电复合材料厚度 L_z 。重复测量三次。

5.3 柔性压电复合材料弯曲半径指标验证

（1）试验条件

现场测试环境条件满足以下要求：

温度：15℃~35℃；

相对湿度：25%~75%；

气压：86 kPa~106 kPa。

柔性压电复合材料粘贴在PVC基板中心位置上，再将PVC板装载在测试装置上，通过低频台调节测试频率分别为1 Hz。

（2）试验方法

参考FZ/T 90076-95《管子、板材、圆钢的弯曲半径》，编制柔性压电复合材料弯曲半径的测试方法。柔性压电复合材料弯曲半径测试装置及装载方法如图2所示。

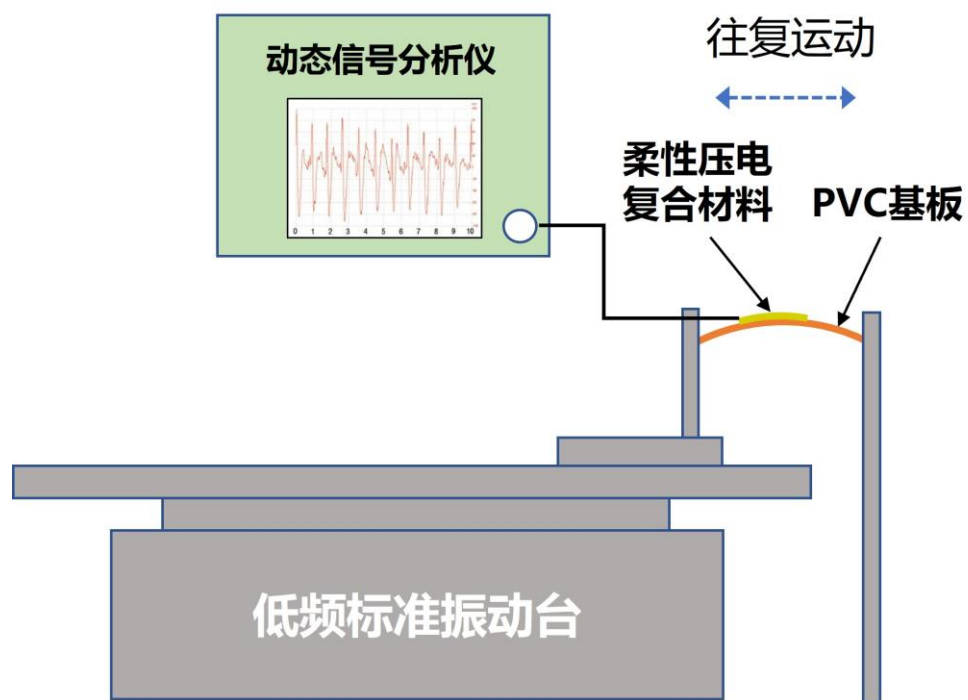


图2 柔性压电复合材料弯曲半径测试装置图

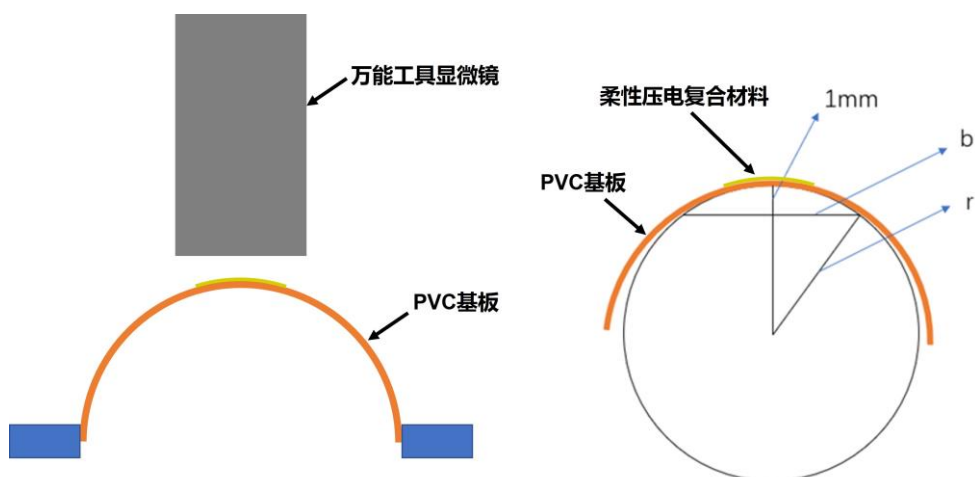


图3 柔性压电复合材料弯曲半径测量示意图及计算原理图

采用使用万能工具显微镜，测量PVC基板的水平弦长b，如图3所示，然后通过公式 $r=0.5+b^2/8$ 计算柔性压电复合材料弯曲半径r。

公式推导如下：

见图3所示，可根据勾股定理得到：

$$r^2 = (r - 1)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

简化后得到：

$$r = 0.5 + \frac{b^2}{8}$$

上述公式表明，当 $b \leq \sqrt{236} \approx 15.36 \text{ mm}$ 时， $r \leq 3.0 \text{ cm}$

试验流程如下：

- 1) 将柔性压电复合材料粘贴至PVC基板中心位置；
- 2) 按图2连接测试系统装置，柔性压电复合材料与动态信号分析仪相连；
- 3) 在测试装置上装载PVC基板，一端固定、另一端与低频标准振动台连接；
- 4) 低频标准振动台水平移动，使PVC基板弯曲，并带动柔性压电复合材料弯曲，使用动态信号分析仪读取并记录柔性压电复合材料弯曲时的初始输出电压值，取弯曲三次的输出电压平均值记为 V_0 ；
- 5) 用万能工具显微镜测量PVC基板弯曲顶点下方1 mm的弦长，记录为 b ；
- 6) 对柔性压电复合材料重复弯折50次后，使用动态信号分析仪读取并记录传感器样品的输出电压值，取弯曲三次的输出电压平均值 V_1 ；对柔性压电复合材料重复弯折100次后再读取弯曲三次的输出电压平均值 V_2 。

(3) 评定标准

如果柔性压电复合材料每次的弯曲半径 $b \leq 15.36 \text{ mm}$ ，且满足弯曲100次后的输出电压下降率 $|V_0 - V_2|/V_0 \times 100\% \leq 5\%$ ，则判定柔性压电复合材料的弯曲半径 $\leq 3.0 \text{ cm}$ 。

5.4 无线应变传感器测试范围指标验证

(1) 试验条件

现场测试环境条件满足以下要求：

温度：15℃~35℃；

相对湿度：25%~75%；

气压：86 kPa~106 kPa；

(2) 试验方法

由于无线应变传感器的测试范围主要受到柔性压电复合材料和信号调理模块的影响，因此，对无线应变传感器中的柔性压电材料和压电信号调理模块输出的信号进行测试，无线应变传感器测试范围指标测试装置示意图如图4所示，将无线应变传感器中的柔

性压电纤维复合材料一端和压电信号调理模块用502粘贴在振动台上，测试无线应变传感器的测试范围。

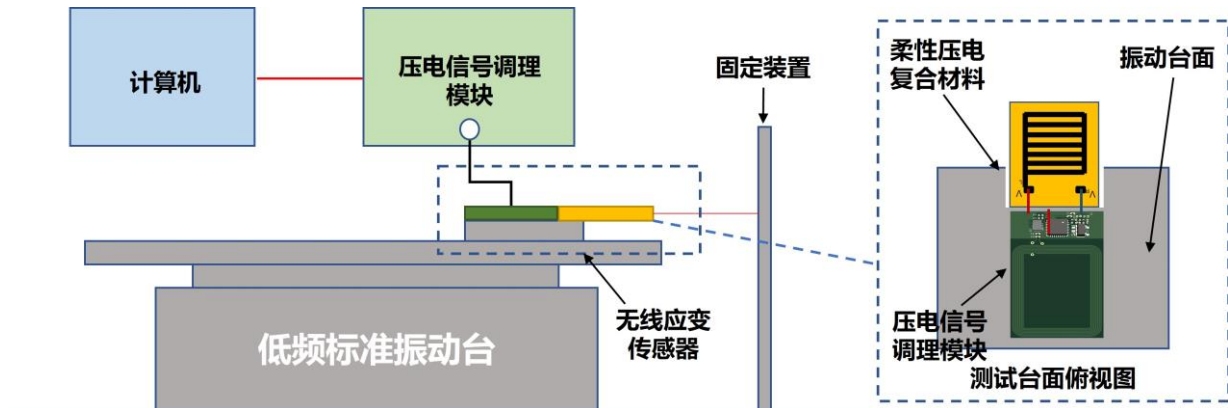


图4 无线应变传感器测试范围指标测试装置示意图

1) 将无线应变传感器中的柔性压电复合材料一端固定，另一端固定在低频台面上，通过低频振动台产生水平振动，使器件产生不同程度的应变，通过振动台系统自带的光栅尺测量振动台的水平位移量峰值，即为器件的总变形量。将总变形量除以器件的有效长度，获得器件的标准应变变量 P_0 。分别调节标准应变量为 $10\mu\epsilon$ 、 $20\mu\epsilon$ 、 $50\mu\epsilon$ 、 $100\mu\epsilon$ 、 $200\mu\epsilon$ 、 $400\mu\epsilon$ 、 $600\mu\epsilon$ 、 $800\mu\epsilon$ 、 $1000\mu\epsilon$ 、 $1200\mu\epsilon$ 、 $1500\mu\epsilon$ 、 $2000\mu\epsilon$ 、 $2500\mu\epsilon$ 、 $3000\mu\epsilon$ 。

2) 通过无线应变传感器自带的压电信号调理模块读取以上应变量下传感器的输出电压峰值 V ，并在计算机上显示，每组重复测量三次。

3) 对输出电压值 V 以及对应应变值 P_0 进行线性拟合，得到拟合线性度 R^2 。

(3) 评定标准

如果线性度 $R^2 \geq 90\%$ ，且对应的最大应变值 $P_0 \geq 2000\mu\epsilon$ ，则无线应变传感器可满足测试范围 $0 \sim 2000\mu\epsilon$ 这一指标。

5.5 无线应变传感器测试误差指标验证

(1) 试验条件

现场测试环境条件满足以下要求：

温度： $10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ ；

相对湿度： $25\% \sim 75\%$ ；

气压：86 kPa~106 kPa。

（2）试验方法

由于无线应变传感器的测试误差主要受到柔性压电复合材料和信号调理模块的影响，因此，对无线应变传感器中的柔性压电材料及压电信号调理模块输出的信号进行误差测试。本指标的测试装置和测试范围指标采用同一套装置，示意图如图4所示，将无线应变传感器中的柔性压电纤维复合材料一端和压电信号调理模块用502粘贴在振动台上，测试无线应变传感器的测试误差。

1）将无线应变传感器中的柔性压电复合材料一端固定，另一端固定在低频台面上，通过标准低频振动台产生水平振动，使器件产生不同程度的应变，通过振动台系统自带的光栅尺测量振动台的水平位移量峰值，即为器件的总变形量。将总变形量除以器件的有效长度，获得器件的标准应变变量 P_0 。

2）按图4连接测试系统，柔性压电复合材料连接压电信号调理模块，通过压电信号调理模块将柔性压电复合材料的输出电压转换为数字信号，通过Labview编程的程序，在计算机上显示并读取应变数据 P_1 。通过标准低频振动台使器件产生应变，分别调节标准应变量为 $2000\ \mu\epsilon$ ，通过无线应变传感器自带的压电信号调理模块读取计算机上的应变 P_1 值，每组重复测量三次。

3）分别在环境温度为 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C 下完成以上第1)、2)步的测试，得到四个不同温度下的应变 P_0 、 P_1 数据。

（3）评定标准

测试误差的计算公式为： $|P_0 - P_1| / \text{总测试应变范围} \times 100\%$ ，如果 $|P_0 - P_1| / \text{总测试应变范围} \times 100\% \leq 1\%$ ，则判定应变传感器测试误差 $\leq \pm 1\%$ （ $+10\sim +40^\circ\text{C}$ ）。

5.6 减速器内外无线数据传输速率指标验证

（1）试验条件

现场测试环境温度： $15\sim 35^\circ\text{C}$ 。碳钢金属管（内径10cm，外径12cm，长15cm），碳钢板（直径12cm，厚度3mm），碳钢板与碳钢金属管两端分别通过8个M5螺丝固定密封。数据发送端电路板位于碳钢金属管道内部（模拟减速器环境），数据接收端电路板位于碳钢金属管道外部，碳钢金属管道两端由碳钢金属板密封。两块超声压电陶瓷分别贴于碳钢金属板外侧与内侧对应位置。

测试装置：示波器、笔记本电脑。

（2）试验方法

如图6所示，将数据发送端电路放置于碳钢金属管道内部，数据接收端电路放置于碳钢金属管道外部，发送端电路连接的超声压电陶瓷贴于碳钢金属板内侧，接收端电路连接的超声压电陶瓷贴于碳钢金属板外侧对应位置。接收端电路的输出连接于示波器进行显示。

数据传输速率是指单位时间（1秒内）传输的比特数，以bps为单位。本项目数据调制方式采用2ASK调制，一个码元对应一个比特。一个比特在示波器上对应一段高电平或低电平，在示波器上测量一个比特对应的时间 t ，数据传输速率即为 $1/t(\text{bps})$ 。



图 6 减速器内外无线数据传输速率测试装置示意图

- 1) 按照图1安装、连接测试装置；
- 2) 通过笔记本电脑预先给发送端电路编程，使之发送连续的比特流。
- 3) 接收端电路输出显示在示波器上，使用示波器测量10个比特对应的时间 T ，重复5次取平均值 T_a 。
- 4) 根据一个比特对应的时间 $T_a/10$ ，计算出数据传输速率 $10/T_a$ （bps）。

（3）评定标准

如果一个比特对应时间（ $T_a/10$ ）小于 $100\mu\text{s}$ ，则判定减速器内外无线数据传输速率为10 kbps。

5.7 减速器内外无线数据传输误比特率指标验证

（1）试验条件

现场测试环境温度：15~35℃。碳钢金属管（内径10cm，外径12cm，长15cm），碳

钢板（直径12cm，厚度3mm），碳钢板与碳钢金属管两端分别通过8个M5螺丝固定密封。数据发送端电路板位于碳钢金属管道内部（模拟减速器环境），数据接收端电路板位于碳钢金属管道外部，碳钢金属管道两端由碳钢金属板密封。两块超声压电陶瓷分别贴于碳钢金属板外侧与内侧对应位置。

（2）试验方法

如图7所示，将数据发送端电路放置于碳钢金属管道内部，数据接收端电路放置于碳钢金属管道外部，发送端电路连接的超声压电陶瓷贴于碳钢金属板内侧，接收端电路连接的超声压电陶瓷贴于碳钢金属板外侧对应位置。接收端电路的输出连接于MSP430开发板转换成数字量，经过TTL转USB模块连接到笔记本USB端口。在笔记本电脑上通过串口调试助手软件XCOM V2.6显示实时传输的数据。



图 7 减速器内外无线数据传输误比特率测试装置示意图

- 1) 按照图7安装、连接测试装置；
- 2) 自定义标准数据，发送端发送255个字节分别是0x01、0x02、...、0x255，重复发送10次。
- 3) 接收端接收连续的数据，通过笔记本电脑上的XCOM V2.6软件显示，查找0x01、0x02、...、0x255是否完整接收到，统计错误的字节数。
- 4) 误比特率可以认为是错误的字节数与发送的总字节数之比。

（3）评定标准

总发送字节数为2550，如果接收到的错误字节数少于发送字节总数的1%，即少于等于25个，则判定减速器内外无线数据传输误比特率 $\leq 1\%$ 。