

doi: 10.7690/bgzdh.2021.09.010

# 基于 MEMS 的柔性薄膜式动态压力测量带研制

卢翔宇, 王 勇

(中国空气动力研究与发展中心气动噪声控制重点实验室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对脉动压力测量中测压点布置困难的问题, 对柔性薄膜式动态压力测量带进行研制。根据气动测量的需求, 将微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)微型动态压力传感器封装在柔性印刷电路板(flexible printed circuit, FPC)柔性衬底基片上, 采用 Protel99SE 软件完成印制电路板(printed circuit board, PCB)设计。利用标准翼型在风洞开展研究, 通过不同的试验条件, 对比柔性薄膜式动态压力测量带和传统嵌入式压力传感器两种方法的测量结果, 验证了柔性薄膜式动态压力测量带的性能。

**关键词:** 脉动压力; MEMS; 柔性薄膜; 压力测量; 风洞试验

**中图分类号:** V211.74 **文献标志码:** A

## Development of Flexible Thin-film Dynamic Pressure Measuring Tape Based on MEMS

Lu Xiangyu, Wang Yong

(Key Laboratory of Aerodynamic Noise Control, China Aerodynamics Research &amp; Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of pressure measurement point arrangement in pulsating pressure measurement, a flexible thin-film dynamic pressure measuring tape was developed. According to the requirement of aerodynamic performance measurement, micro-electro-mechanical system (MEMS) micro dynamic pressure sensors are packaged on flexible printed circuit (FPC) flexible substrate, and the printed circuit board (PCB) is designed by Protel99SE software. The standard airfoil is used to carry out the research in the wind tunnel. Through different test conditions, the measurement results of the flexible thin-film dynamic pressure measuring tape and the traditional embedded pressure sensor are compared, and the performances of the flexible thin-film dynamic pressure measuring tape are verified.

**Keywords:** pulsating pressure; MEMS; flexible thin-film; pressure measurement; wind tunnel test

### 0 引言

湍流边界层、分离流和激波振荡等复杂流动现象都会在飞行器表面诱导出随机的动态压力, 称作脉动压力。脉动压力的强度和频率显著影响飞行器结构的动态载荷特性。局部脉动压力的频率如果与结构固有频率耦合, 将引起结构件振动, 导致结构疲劳甚至破坏。周期性变化的压力过程, 只用频率、幅值和相位等参数即可确定其特性, 而脉动压力大多是复杂的随机过程。人们对湍流、分离流、激波边界层干扰等复杂的非定常流动现象的理论认识不足, 尤其是湍流问题研究仍是世界性的难题; 因此, 非定常脉动压力的理论分析和计算难度很大。目前, 风洞试验仍是脉动压力测量与研究的主要手段<sup>[1]</sup>。

### 1 脉动压力测量介绍

在风洞中进行脉动压力测量主要采用电测法<sup>[2]</sup>。非定常脉动压力在动态压力传感器上产生电信号,

经信号调理器放大、滤波后进入数据采集器记录, 并供数据处理和分析使用<sup>[3]</sup>。然而受结构的限制布置, 试验模型的某些部位布置测压点十分困难, 导致测试结果的空间分辨率不高。另外, 动态压力传感器的安装形式对测试结果也会造成明显的影响。如图 1 所示, 动态压力传感器通常采用表面安装、嵌入安装和管路系统安装 3 种方式: 表面安装是指传感器安装在机翼(或机身)表面, 与表面齐平, 优点是脉动压力直接作用在感受器上, 缺点是对传感器的安装要求很高, 同时由于传感器自身的尺寸大小还限制了模型表面测点的布置位置和间距; 嵌入安装是指传感器安装在模型内部, 通过管路与模型表面孔口相连, 解决了模型表面测点布置间距的问题, 传感器安装也很方便, 但是待测压力经过管路传递到传感器上会出现管腔效应<sup>[4-5]</sup>, 随着待测压力频率的增高, 传感器的输出波形会有严重的畸变; 管路系统安装与嵌入安装形式类似, 只是测压点通

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802114)

作者简介: 卢翔宇(1980—), 男, 四川人, 硕士, 高级工程师, 从事低速风洞测量与控制研究。E-mail: Luxiangyu919@163.com。

过更长的导管与放置在模型外或风洞试验段外的传感器相连，是安装难度最小的一种方法，但管路系统的管腔效应更加严重。

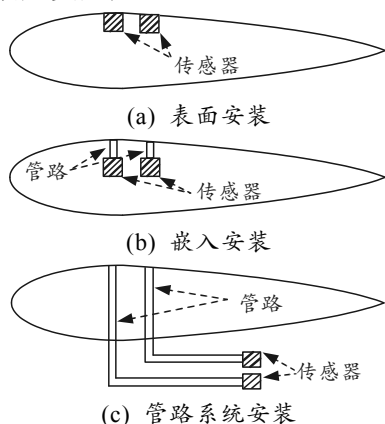


图 1 传统脉动压力测量时传感器的安装方式

近年来，随着微机电系统 (MEMS) 技术的快速发展，许多测试领域不再局限于采用传统传感器对物理量进行测量，而是采用 MEMS 技术将多个传感器芯片按需要集成在一起，配合适当的封装，形成专用的物理量感应和转换器件。利用 MEMS 技术形成的测试器件具有尺寸小、集成度高、多样性好、便于安装等优势，在航空、航天、汽车、军事等众多领域中均有着十分广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。如图 2 所示，波音公司研制了基于 MEMS 技术的压力带用于飞行载荷测试该压力带采用模块化的设计，将整个压力带分为若干段，每段有一个包含 6 个压力传感器的智能模块。该压力带首先用在 Boeing 757-300 飞机上，对起落架性能进行测试，之后又用于测量飞机机翼表面的空气动力分布。利用 MEMS 技术研制的压力带，可在提高 5 倍安装效率的同时有效地提高测量精度。后续波音公司在 Boeing 737-BBJ、767-400 和 F-18E 飞机上进行了充分的飞行试验，均取得了满意的效果。近年来，国内利用 MEMS 技术在压力测量领域展开了研究，如西北工业大学研制了基于压力传感器阵列的翼面压力分布直接测量系统<sup>[8]</sup>。该系统利用微型压力传感器构成柔性衬底基阵列，可以对模型表面的压力分布进行测量；但是，这些设备的测量频率有限，只能感受到随时间变化较慢的压力信号，不适用于脉动压力测量。

表 1 BCPC-1000 压力敏感芯片主要技术指标

尺寸 ( $L \times W \times H$ )/mm	封装形式	量程/PSI	测压类型	桥阻形式	桥阻 阻值/k $\Omega$	测量 精度/%FS	满量程输出 电压/mV	供电 电压/VDC	供电 电流/mA
1.0×1.0×0.4	SMT	5	绝压型	全桥	4	0.1	55	5~10	1.25

压力敏感芯片的具体结构如图 4，主要包括敏

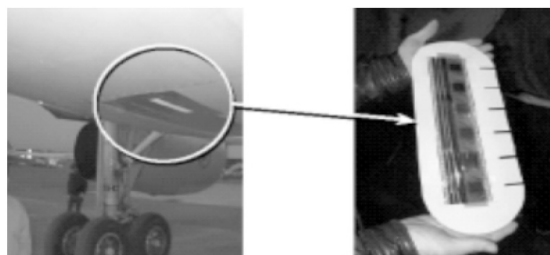


图 2 波音公司的压力传感器智能模块

笔者根据脉动压力信号的特点，针对现有测试手段的不足，研制了一套柔性薄膜式动态压力测量设备，将 MEMS 微型动态压力传感器封装在柔性印刷电路板 (FPC) 柔性衬底基片上，形成一个多测点动态压力感应仪器，通过粘贴方式安装在模型表面进行测量，准确获取被测物表面的脉动压力变化，具有物理尺寸小、频响范围宽、使用方便等特点。

## 2 柔性薄膜式动态压力测量带的设计

### 2.1 总体结构设计

如图 3 所示，柔性薄膜式动态压力测量带主要由敏感芯片、衬底基片、电路导线、连接器等部分组成。敏感芯片用于感受压力信号，并将压力信号转换为电信号；电路导线用于将敏感芯片的信号引出；连接器用于信号与外界设备的电气连接；而衬底基片作为载体提供整体结构支撑。

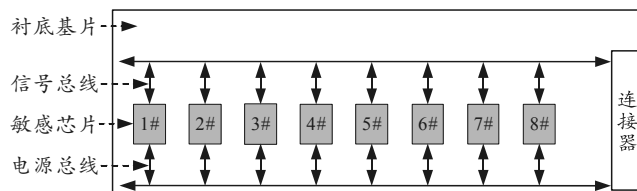


图 3 柔性薄膜式动态压力测量带的总体结构

### 2.2 芯片选型及工作原理分析

为了使柔性薄膜动态压力测量带的整体厚度足够薄 (小于 1.5 mm)，要求单个压力敏感芯片必须具有较小的尺寸，同时具备结构简单、线性度好、温度影响小、便于封装等特点，选择 BCPC-1000 压力芯片。该芯片是硅半导体压阻式芯片，采用经过优化的硅微结构晶圆以及先进的 MEMS 加工技术，具有小尺寸、高可靠性、低功耗、高灵敏度等特点，其主要技术指标如表 1 所示。

感膜、基板、压敏电阻和引出电极。利用倒装焊工

艺将敏感单元的引出电极和基片焊接在一起，将敏感芯片的信号引出。采用这种工艺，省去了金丝键合工艺，提高了芯片的可靠性，还能使芯片的使用频率范围更宽。

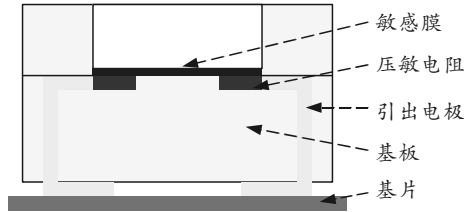


图 4 敏感压力芯片结构

压力敏感芯片的检测原理如图 5 所示。在硅腔上加工了压敏电阻和引出电极。当外部压力作用在硅腔时，压敏电阻的阻值发生变化。4 个压敏电阻组成惠斯通电桥，电阻阻值的变化引起电桥输出电压的变化<sup>[9-10]</sup>。

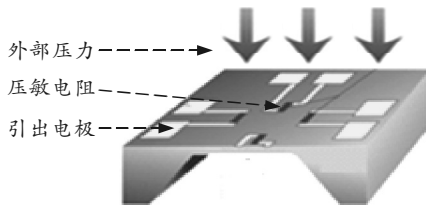


图 5 敏感压力芯片检测原理

### 2.3 基于 FPC 技术的柔性薄膜制作

印制电路板 (PCB) 是重要的电子部件，既是电子元器件的支撑体，又是电子元器件电气连接的载体<sup>[11]</sup>。电子设备采用 PCB 方式后，避免了人工接线的差错，可实现电子元器件快速插装或贴装，保证了电子设备的质量，便于使用和维修。PCB 按材质硬度分为 FPC 和刚性印制电路板 (rigid printed circuit, RPC) 2 种：FPC 是以聚酰亚胺或聚酯薄膜为基材制成的一种具有高度可靠性，绝佳的可绕性印刷电路板，具有配线密度高、重量轻、厚度薄、弯折性好的特点；RPC 是一种硬质材料制作的电路板，一般用于电脑主板、手机主板等设备的制作。考虑到测压模型表面的非平直性特点，以 FPC 为基础制作柔性薄膜是很好的选择。

柔性薄膜式动态压力测量带的制作如图 6 所示，设计思路如下：

- 1) 采用双面板、镀金工艺制作；
- 2) 使用保护膜使整个压力带上层形成一个平滑的表面；
- 3) 考虑到电磁屏蔽的效果，在保护膜上面敷设金属屏蔽层，在电路中设计了连接点；

4) 敏感压力芯片采用表面贴装技术 (surface mount technology, SMT) 焊接在 FPC 衬底基片上，芯片中心处设计 0.3 mm×1.5 mm 测压孔，加胶密封；

5) 保护膜与安装好敏感压力芯片的 FPC 衬底基片使用粘接胶紧密贴合在一起；

6) 采用排线插座金手指电路加工模式，将电源和信号线路与外部仪器相连。

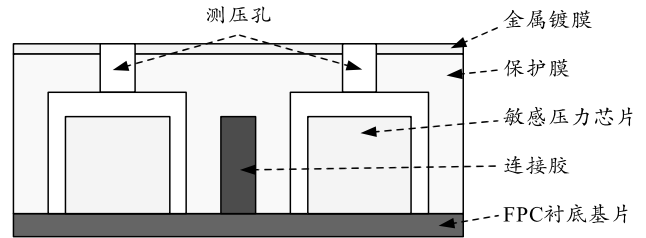


图 6 柔性薄膜式动态压力测量带的制作

电路原理图和印制电路板设计采用 Protel99SE 软件完成。柔性薄膜式动态压力测量带 PCB 电路见图 7。

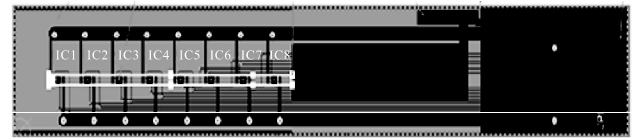


图 7 柔性薄膜压力带 PCB 电路

图 8 为柔性薄膜式动态压力测量带的实物图，其物理尺寸 (长×宽×厚) 分别为 160 mm×20 mm×1.5 mm，每条压力带封装了 8 个敏感压力芯片。



图 8 柔性薄膜式动态压力测量带实物

### 2.4 设备标定

使用 1 kHz (不确定度 ±0.3 Hz)、114 dB (有效压力值 10 Pa, 不确定度 ±0.2 Pa) 的正弦压力信号发生器对柔性薄膜式动态压力测量带进行动态特性校准，以考核其动态幅值和频率响应。测试结果表明：柔性薄膜压力带能够准确测量出 1 kHz 的频率成分，测试结果为：峰值频率 1 000.4 Hz，峰值幅值 10.1 Pa，如图 9 所示。50 和 100 Hz 处为幅值较小电源的工频及其谐波成分。

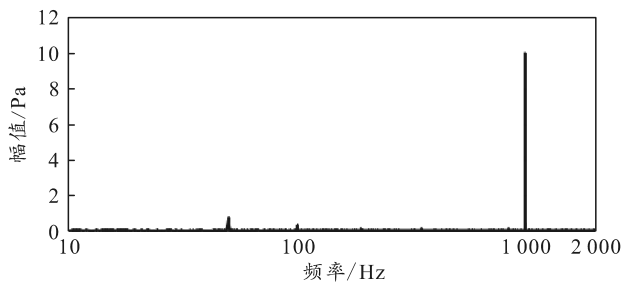


图9 柔性薄膜式动态压力测量带的动态标定结果

### 3 风洞试验验证

为验证柔性薄膜式动态压力带的应用情况，利用标准翼型在风洞开展研究，通过不同的试验条件，对比柔性薄膜式动态压力带和传统嵌入式安装传感器 2 种脉动压力测量的结果。

#### 3.1 0.55 m×0.4 m 风洞

0.55 m×0.4 m 风洞是一座单回流式低速风洞，具有开口、闭口 2 个试验段，其中开口试验段长 1.5 m、宽 0.55 m、高 0.4 m，主要用于声学试验。开口试验段空风洞最大风速 100 m/s，最小风速 8 m/s，模型区轴向静压梯度 $\leq 0.005$ ；背景噪声范围 75~80 dBA（风速 80 m/s，气流轴线中心外 2 m 处测量）；开口试验段外是一个内部尺寸为宽 5.5 m、长 3.7 m、高 4 m 的消声室，其截止频率为 100 Hz。

#### 3.2 试验模型及支撑装置

试验模型为 NACA0012 翼型，弦长 150 mm，展长 400 mm。翼型在风洞中竖直安装，上下两端各安装一块尺寸为 550 mm×550 mm 的端板，端板直接固定在风洞喷口上，端板内表面与风洞喷口内表面平齐，翼型前缘距风洞喷口距离为 200 mm。翼型正前方安装直径不同直径的圆柱体用来产生不同频率的气流扰动。

#### 3.3 测量设备及安装

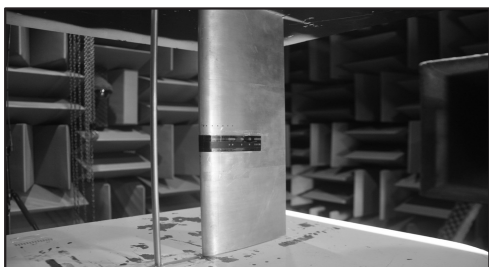


图10 柔性薄膜式动态压力带和动态传感器安装

1) 如图 10 所示，将柔性薄膜式动态压力带沿来流方向粘贴在试验模型表面。

2) 为了对比柔性薄膜式动态压力带的测量结

果，在模型表面沿来流方向设计了测压孔，采用内径为 1 mm、长度为 250 mm 的铜管与 ENDEVCO 8201-5 型动态压力传感器相连，该传感器的压力测量范围为 5 PSI；测压孔位置与柔性薄膜式动态压力带中第 6 测点位置在垂直于来流方向的位置上是一致的。

3) 数据采集设备安装在风洞流场外部，柔性薄膜式动态压力带和动态压力传感器的输出信号与数据采集设备相连。采集设备的采样率为 10 kHz，采集时间为 5 s，低通滤波截止频率为 2 kHz；为了有效提高采集信号的信噪比和动态范围，通道采用 AC 耦合方式，剔除信号的直流分量。

#### 3.4 试验方法

根据斯特劳哈尔数相似，圆柱体的涡脱落频率  $f$  为：

$$f = (S_t \cdot V) / L \quad (1)$$

其中： $S_t$  为斯特劳哈尔数； $V$  为来流风速； $L$  为圆柱体直径。通过改变来流风速  $V$  和圆柱体直径  $L$ ，可以产生不同频率  $f$  的脱落涡<sup>[12]</sup>，采用电测法对涡脱落压力信号进行采集、处理，然后利用傅里叶变换计算出的峰值频率信号。

### 4 试验结果及分析

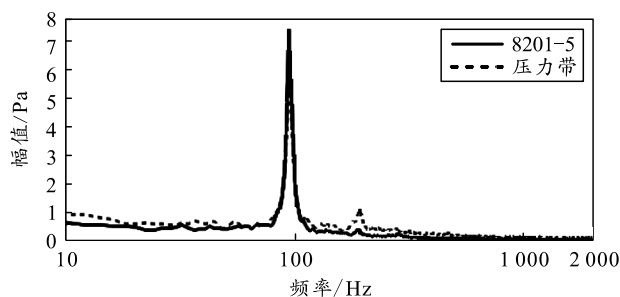
2 种测量方法的对比试验：

1) 直径 30 mm 圆柱体的测量结果。

图 11 和表 2 分别列出了直径  $L=30$  mm 圆柱体在不同风速下 8201-5 传感器和柔性薄膜式动态压力带同时测量的频谱图和具体数据。由图 11 和表 2 可知：在较低的频率下，2 种测量方式获得的峰值信号的频率和幅值基本一致，无明显差别。

表 2  $L=30$  mm 圆柱体的频率和幅值测量值

风速/ (m/s)	8201-5 频率/Hz	8201-5 幅值/Pa	压力带 频率/Hz	压力带 幅值/Pa
15	94	7.67	94	6.35
20	122	9.27	122	9.12
30	180	10.76	180	11.38
40	244	14.64	244	15.66

(a)  $v=15$  m/s

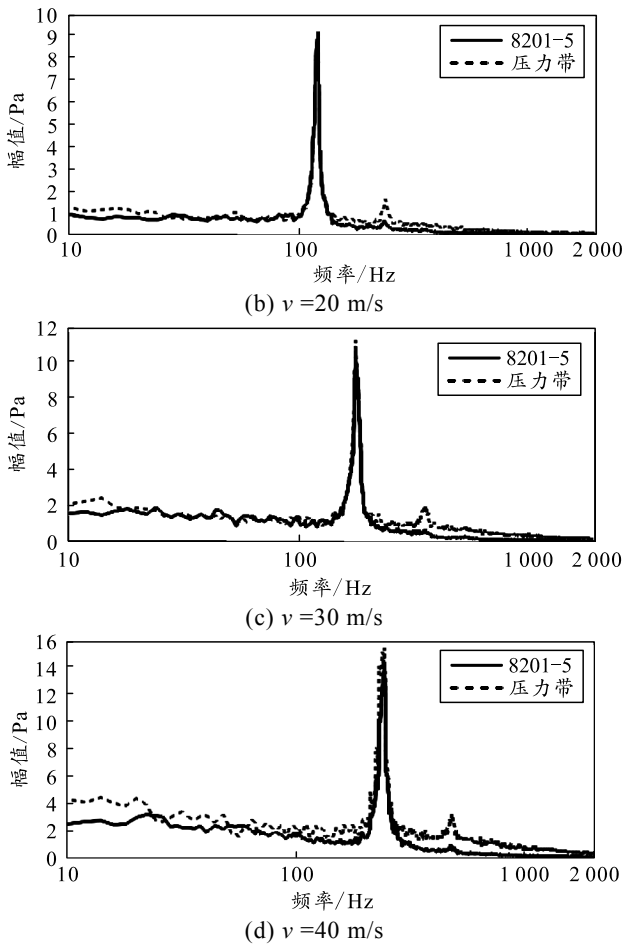


图 11  $L=30\text{ mm}$  圆柱体在不同风速下的频谱图

2) 直径 15 mm 圆柱体的测量结果。

图 12 和表 3 分别列出了直径  $L=15\text{ mm}$  圆柱体在不同风速下 8201-5 传感器和柔性薄膜式动态压力带同时测量的频谱图和具体数值。由图 12 和表 3 可知：在较低的频率下，2 种测量方式获得的峰值信号的频率和幅值基本一致。随着风速的增加，8201-5 传感器出现了管腔效应，其峰值成分的幅值产生了衰减，明显小于低频成分，可以看出 8201-5 传感器测量结果的信噪比很低。从柔性薄膜式动态压力带的测量结果可以看出：峰值成分的幅值均大于其他频率成分的幅值，说明柔性薄膜式动态压力带测量结果的信噪比较好。

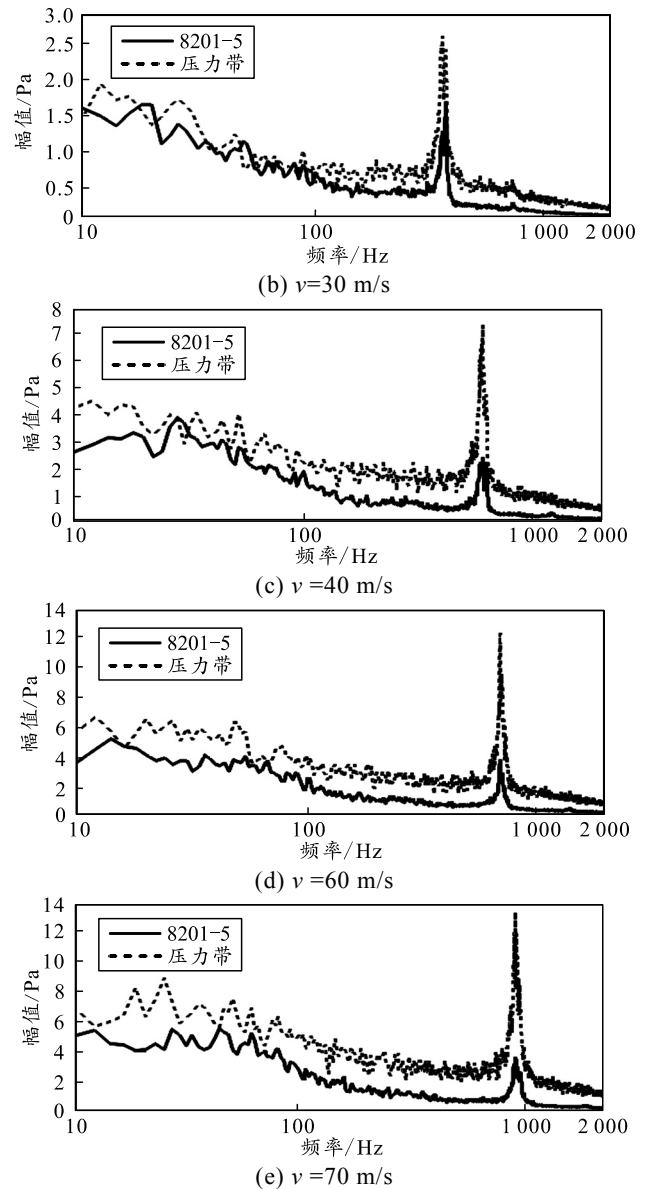


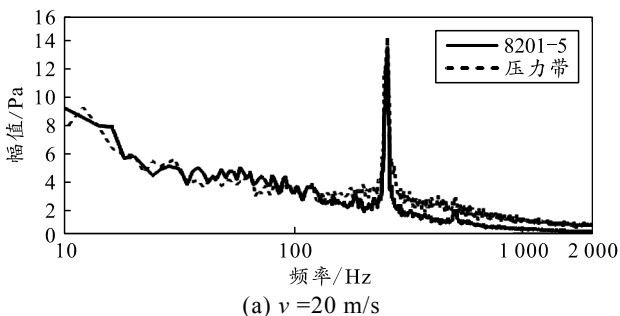
图 12  $L=15\text{ mm}$  圆柱体在不同风速下的频谱

表 3  $L=15\text{ mm}$  圆柱体的频率和幅值测量值

风速/ (m/s)	8201-5 频率/Hz	8201-5 幅值/Pa	压力带 频率/Hz	压力带 幅值/Pa
20	254	1.37	256	1.46
30	386	1.70	372	2.69
40	606	2.38	606	7.43
60	708	3.71	708	12.47
70	834	3.59	832	13.55

3) 直径 8 mm 圆柱体的测量结果。

图 13 和表 4 分别列出了直径  $L=8\text{ mm}$  圆柱体在不同风速下 8201-5 传感器和柔性薄膜式动态压力带同时测量的频谱图和具体数值。由图 13 和表 4 可知，2 种测量方式获得的峰值信号的频率基本一致。由于圆柱体的直径较小，脱落涡的能量较低，所以峰值成分的幅值较小。随着风速的增加，8201-5 传感器的管腔效应现象更加严重，3 个风速下峰值



成分的幅值基本没有变化。从柔性薄膜式动态压力带的测量结果可以看出，峰值成分的幅值变化较明显。

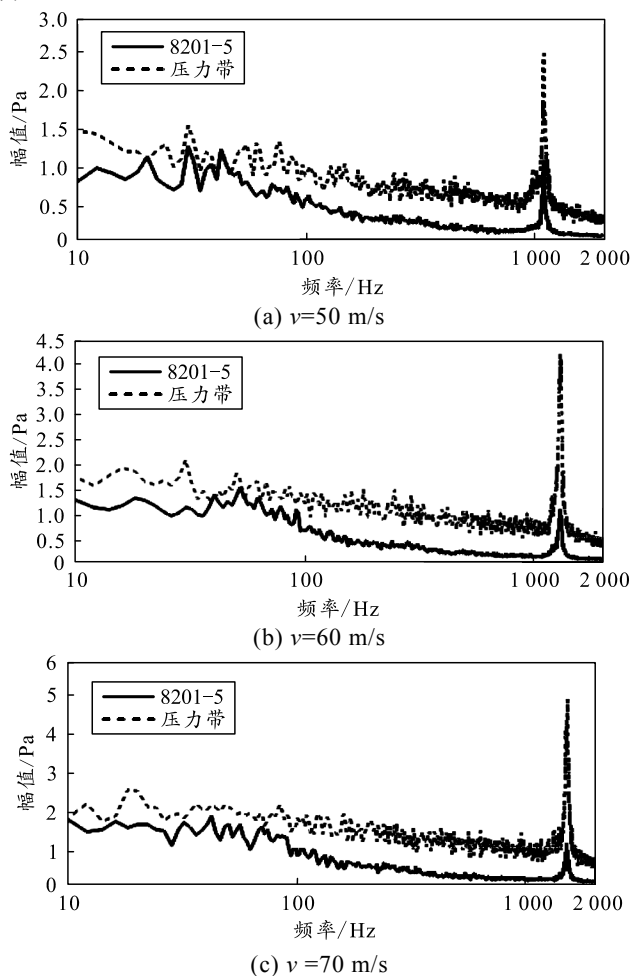


图 13  $L=8$  mm 圆柱体在不同风速下的频谱

表 4  $L=8$  mm 圆柱体的频率和幅值测量值

风速/ (m/s)	8201-5 频率/Hz	8201-5 幅值/Pa	压力带 频率/Hz	压力带 幅值/Pa
50	1 094	1.04	1 094	2.55
60	1 314	1.06	1 314	4.25
70	1 516	1.11	1 514	5.00

风洞试验结果表明，柔性薄膜式动态压力带能够准确测量较高频率的压力变化。

## 5 结束语

笔者研制了一种基于 MEMS 的柔性薄膜式动态压力测量带状仪器，对其工作原理和制作工艺进行分析。现场标定和风洞试验考核表明：该仪器能够准确地进行脉动压力测量，具有体积小、安装方便、频率范围宽等特点，具有一定的工程应用价值。

## 参考文献：

- [1] 李周复. 风洞特种试验技术[M]. 北京：航空工业出版社, 2010: 418-524.
- [2] 李岩, 马宇, 王延奎, 等. 风洞实验中的脉动压力测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009(增刊): 171-174.
- [3] 王勳年. 低速风洞试验[M]. 北京：国防工业出版社, 2002: 111-150.
- [4] 王维, 唐磊, 王棋. 压力测试管道管腔效应研究[J]. 计测技术, 2012, 32(增刊): 81-86.
- [5] POWERS S G, WEBB L D. Flight wing surface pressure and boundary layer data report from the f-111 smooth variable camber supercritical mission adaptive wing[R]. NASA TM-4789.
- [6] 孙杰. MEMS 技术的发展及其在航天领域的应用研究[J]. 航天标准化, 2010(3): 44-47.
- [7] 吴向东. MEMS 器件在航天领域的应用及发展[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(8): 542-547.
- [8] 常莹, 马炳和, 邓进军, 等. 基于微型压力传感器阵列的翼面压力分布直接测量系统[J]. 实验流体力学, 2008, 22(3): 89-93.
- [9] 王永洪, 张明义, 高强, 等. 微型硅压阻式压力传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(11): 106-108.
- [10] 易选强, 苑伟政, 马炳和, 等. 压阻式微型压力传感器敏感结构设计[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(6): 782-785.
- [11] 何繁. FPC 用铜箔的表面处理技术[J]. 原材料及标准, 2013(3): 40-49.
- [12] 蒋赞. 阻流比与长径比对低雷诺数圆柱绕流尾迹演化的影响研究[D]. 长沙：中南大学能源科学与工程学院, 2014.