

文章编号: 1001-1455(2003)03-0230-05

PVDF 在动态应变测量中的应用*

李 焰, 钟方平, 刘 乾, 刘 瑜, 秦学军, 谭红梅

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 研究了用 PVDF 压电薄膜进行动态应变测量的原理和方法, 在单向应变块上对两种 PVDF 应变片的应变电荷常数进行了标定, 并对一维应力杆中的应变波形进行了测量。实验给出了较好的测量精度。研究表明, PVDF 应变片在动态应变测量中具有很好的应用潜力。

关键词: 固体力学; PVDF 应变片; 动态应变测量; 电阻应变片

中图分类号: O348.3 国标学科代码: 130·1575 文献标志码: A

1 引言

动态应变的测量一直是许多工程和力学工作者所关心的问题。常用的应变传感器有金属电阻应变片和半导体应变片。前者的灵敏度系数较低, 后者的灵敏度系数有非线性和受温度影响大的缺点。因而, 开发研究新的应变测量技术是很有意义的。

自从 H. Kawai^[1]发现 PVDF 的压电特性, 以及 1971 年其热释电性也被发现以来, 国际上对 PVDF 进行了广泛的研究和应用。由于 PVDF 薄膜可以做得很薄(如 $9\mu\text{m}$), 用它制成的传感器响应很快(ns 量级), 灵敏度很高, 在 $0\sim 20\text{GPa}$ 范围内都有很好的信号输出, 因而 R. A. Graham 等^[2]认为 PVDF 冲击应力传感器的出现是对波剖面测量的一次革命。有关这方面的应用研究, 国际上已有二十多年。其中, F. Bauer 做了许多突出的工作^[3-4], 在美国已形成了 PVDF 应力传感器的标准^[5]。

国内这方面的工作开展较晚, 开展过一些应用研究工作^[6-8], 目前有多个单位和厂家可以提供质量较好的 PVDF 压电薄膜。利用这些薄膜, 多是手工制作不同的传感器进行各自的应用研究, 还没有形成标准化、商业化的 PVDF 应力传感器。

PVDF 还能够测量应变。这是利用了 PVDF 薄膜横向变形输出电荷的原理, 与 PVDF 冲击应力传感器利用了 PVDF 薄膜在厚度方向受压而输出电荷的原理不同。PVDF 的很多非冲击测量应用大都是基于这一原理, 如在振动控制^[9]、机器人传感器^[10]等方面的应用。由于应用的目的不同, 这些应用大都是利用了 PVDF 对应变的感知并输出信号的能力, 并不直接涉及对结构体应变的定量测量。石立华等^[11]介绍了一种国外的用于智能材料结构的应变测量技术, 以及一种信号的硬件解耦方法。利用 PVDF 压电薄膜直接进行结构体的动态应变参数的定量测量, 目前还没有相应的实验研究结果报道。

受文献[11]的启发, 本文中提出了一种简便可行的信号解耦方法, 并对 PVDF 的动态应变测量技术和方法进行了初步的实验研究。主要是利用两种国产 PVDF 薄膜, 自制了 PVDF 应变片, 进行了应变电荷常数的标定, 以及一维应力杆中应变波形的实际测量。

2 应变测量原理和方法

一般而言, PVDF 的输出与多个方向的应变(应力)分量有关, 即信号是耦合的, 需要进行解耦才能进行应变的定量测量。文献[11]给出的硬件解耦方法需要专门设计的电路, 在操作上也比较复杂。这里给出了一种简便的解耦方法, 只需普通的电荷放大器即可进行应变的定量测量。

* 收稿日期: 2002-08-05; 修回日期: 2002-10-26

作者简介: 李 焰(1969—), 男, 硕士, 副研究员。

设 PVDF 薄膜传感器的输出电荷与三个主方向的应变 S_x 、 S_y 、 S_z 有如下关系^[11]

$$Q = A(e_x S_x + e_y S_y + e_z S_z) \tag{1}$$

式中: Q 为电荷量, A 为传感器面积, e_x 、 e_y 、 e_z 为 PVDF 薄膜的应变电荷常数。

PVDF 薄膜传感器进行应变测量时(此时称之为 PVDF 应变片),是将两片完全相同的 PVDF 应变片(记为 PVDF1 和 PVDF2)按主方向 x 相互垂直粘贴于被测物体表面,如图 1 所示。这里选取 PVDF 薄膜的拉伸方向为主方向 x ,薄膜平面内垂直于 x 的方向为主方向 y 。假设 PVDF 薄膜在厚度方向(主方向 z)上不受力(自由表面),且输出电荷与这个方向的应变无关。这样,由(1)式,两片 PVDF 应变片的输出电荷分别为

$$Q_1 = K_x S_x + K_y S_y \tag{2}$$

$$Q_2 = K_x S_y + K_y S_x \tag{3}$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为 PVDF1 和 PVDF2 的输出电荷; $K_x = Ae_x$, $K_y = Ae_y$, 为 PVDF 应变片的灵敏度系数; S_x 、 S_y 为待测物体表面两个相互垂直方向的应变,其方向分别对应 PVDF1 的主方向 x 和 y 。由(2)、(3)式求出

$$\begin{cases} S_x = \frac{Q_1 K_x - Q_2 K_y}{K_x^2 - K_y^2} \\ S_y = \frac{Q_1 K_y - Q_2 K_x}{K_y^2 - K_x^2} \end{cases} \tag{4}$$

这样,就实现了应变信号的解耦。利用标定好的 PVDF 应变片,即已知了 K_x 和 K_y , 测出每片 PVDF 应变片的输出电荷 Q_1 和 Q_2 , 由(4)式就可以计算得到待测物体表面的应变 S_x 和 S_y 。

3 应变电荷常数的标定

对国产的两种 PVDF 薄膜(厚度分别为约 40、28 μ m),经电极引出和封装,分别制成了面积为 16、9mm²的 PVDF 应变片(分别记为 1[#]和 2[#]PVDF 应变片),并依据薄膜表面的单向拉伸条纹(很明显)确定其 x 方向。标定实验在一种用 LY12 铝加工的单向应变块试件上进行(见图 2)。其主要变形区域(应变片粘贴区域)厚 4mm、长 50mm、宽 15mm,敲击区域厚 15mm。理论表明,这样尺寸下的变形区域只能产生沿敲击方向的应变,垂直于敲击方向的应变可以忽略不计。实验结果也证明了这一点。

标定原理:在应变片粘贴区域粘贴主方向 x 和主方向 y 沿着敲击方向的 PVDF 应变片各一片,输出电荷分别为 Q_1 、 Q_2 。由于是单向应变,即 $S_x \neq 0$, $S_y = 0$, 则由(2)和(3)式可以得到: $K_x = Q_1/S_x$, $K_y = Q_2/S_x$ 。其中的参考应变 S_x , 采用中原电测仪器厂生产的 BB120-2BB 型电阻应变片进行测量。

测量系统:采用 YE3818 型动态应变仪测量应变;采用 YE5862 型电荷放大器测量 PVDF 的输出电荷;系统终端用 TDS460A 数字存储示波器作记录。

标定实验对 1[#]和 2[#]PVDF 应变片分别进行了 25 次、35 次,得到的数据点及其拟合直线,见图 3。按标定原理,图中拟合直线的斜率即为对应的灵敏度系数。标定实验结果见表 1。

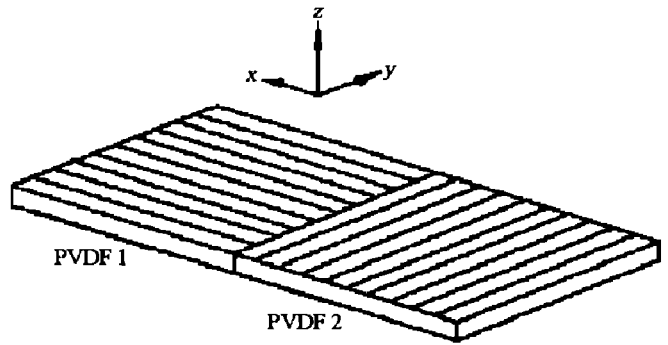


图 1 PVDF 应变片粘贴示意图

Fig.1 Adhition method of PVDF strain gauge

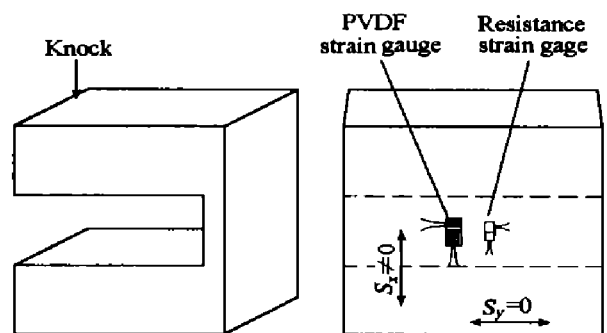


图 2 单向应变标块上的标定实验方法

Fig.2 Experiment configuration on the unidirectional strain block

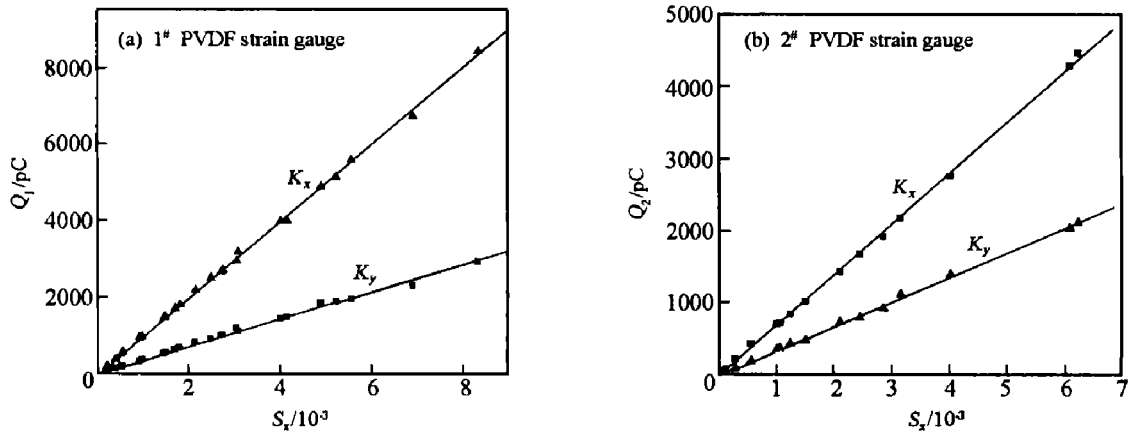


图 3 PVDF 应变片的标定曲线

Fig.3 Calibration curves of the PVDF strain gauge

表 1 PVDF 应变片的标定实验结果

Table 1 Calibration results of the PVDF strain gauge

PVDF 应变片	$h/\mu\text{m}$	A/mm^2	$S_y/10^{-6}$	$K_x/\mu\text{C}$	$K_y/\mu\text{C}$	$e_x/(\mu\text{C}\cdot\text{mm}^2)$	$e_y/(\mu\text{C}\cdot\text{mm}^2)$
1#	~40	16	169~8338	0.996	0.360	0.06225	0.0225
2#	~28	9	39~6235	0.670	0.339	0.07440	0.0377

从图 3 和表 1 中,可以看出:(1)各直线数据点的相关性相当好(与 1#PVDF 应变片的 K_x 、 K_y 和 2#PVDF 应变片的 K_x 、 K_y 对应数据点的线性相关系数分别为 0.99959、0.99818、0.99972、0.99951)。(2)不同的 PVDF 薄膜应变电荷常数不同;不同方向的应变电荷常数不同,且拉伸方向(x 方向)的较大。(3)PVDF 应变片(面积约 10mm^2)的输出灵敏度为 kV 量级(电荷放大器的放大倍数为 1 时),电阻应变片的输出灵敏度为 V 量级(应变仪放大倍数为 1 时),前者远远大于后者。

4 一维应力杆中的应变波形测量

用上述标定的 PVDF 应变片在一维应力杆上进行了实际的应变测量。图 4 所示为实验装置,主要结构为一细长的空心 LY12 铝杆(长 1.5m, 外径 20mm, 壁厚 3mm),上端用绳索悬挂固定,下端用重锤施加冲击载荷,其受力状况可以近似看成是一维的。在杆表面的应变片粘贴区域粘贴沿杆轴向和环向的电阻应变片和 PVDF 应变片各若干。设铝杆在一维应力下的轴向应变为 S_x , 环向应变为 S_y , 则根据弹性力学原理,有 $-S_y/S_x = \nu$, 其中 ν 为泊松比(对 LY12 铝, $\nu \approx 0.33$)。

以落高 10~80cm 端施加冲击载荷,对 1#和 2#PVDF 应变片各做了一组实验。实验中同时记录电阻应变片和 PVDF 应变片的输出(测量系统同前),主要的测量结果列于表 2。其中的应变值为实测波形第一峰值所对应的应变。

从表 2 的数据计算得到:(1)以电阻应变片的测量值为真值,则 1#PVDF 应变片测量值 S_x 、 S_y 的最大相对误差分别为 9.4%、6.5%, 2#PVDF 应变片测量值 S_x 、 S_y 的最大相对误差分别为 5.6%、11.4%;(2)电阻应变片、1#PVDF 应变片、2#PVDF 应变片的 ν 的算术平均值分别为 0.329、0.333、0.343,以前者的值为真值,则后两者的相对误差分别为 1.2%、4.3%。

PVDF 应变片测得的环向或轴向应变相对误差较大,主要是由实验装置产生的应变场不均匀(如弯曲振动等)引起的,还有其它一些因素,如应变片的粘贴、电阻应变片的测量误差等。测得的泊松比 ν 相对误差较小,这表明, PVDF 应变片在本文的实验条件下达到了较好的测量精度。

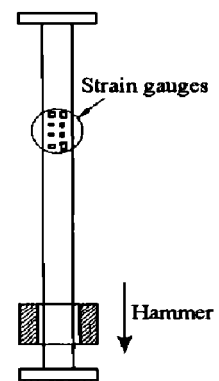


图 4 一维应力杆实验装置
Fig.4 Experiment setup of the uniaxial stress bar

表 2 一维应力杆中的应变测量结果

Table 2 Experimental results for the strain measured on the uniaxial stress bar

电阻应变片			1 [#] PVDF 应变片			电阻应变片			2 [#] PVDF 应变片		
$S_x/10^{-6}$	$S_y/10^{-6}$	ν	$S_x/10^{-6}$	$S_y/10^{-6}$	ν	$S_x/10^{-6}$	$S_y/10^{-6}$	ν	$S_x/10^{-6}$	$S_y/10^{-6}$	ν
308.0	-101.4	0.329	294.6	-98.46	0.334	206.6	-67.61	0.327	214.8	-71.61	0.333
298.6	-97.65	0.327	280.1	-94.42	0.337	217.8	-73.24	0.336	227.5	-77.21	0.339
302.3	-97.18	0.321	282.8	-94.88	0.336	323.9	-108.9	0.336	333.6	-116.1	0.348
306.1	-96.71	0.316	277.8	-93.35	0.336	394.4	-131.5	0.333	405.5	-140.8	0.347
298.1	-98.59	0.331	280.9	-93.68	0.334	469.5	-154.0	0.328	464.1	-155.4	0.335
476.5	-157.7	0.331	459.6	-149.6	0.325	507.0	-169.0	0.333	518.0	-178.1	0.344
568.1	-180.3	0.317	514.8	-168.6	0.328	535.2	-176.5	0.330	557.3	-194.3	0.349
650.2	-212.2	0.326	604.5	-203.1	0.336	619.7	-206.6	0.333	654.7	-230.1	0.351

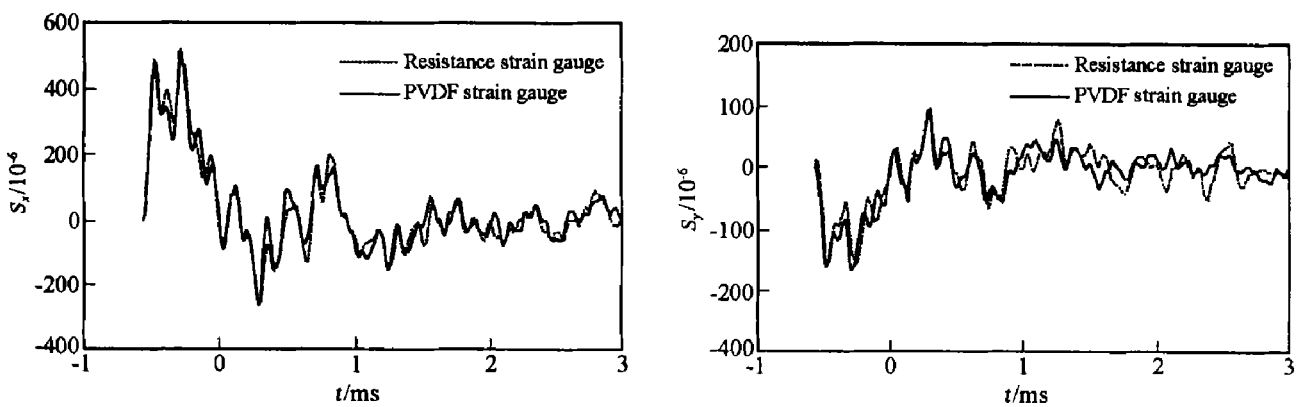


图 5 一维应力杆中的典型应变波形

Fig.5 Typical strain waves measured on uniaxial stress bar

图 5 给出了典型的应变测量波形。其中, PVDF 应变片的轴向应变 S_x 和环向应变 S_y 波形, 是从两片 PVDF 应变片的输出波形中取相同时刻的数据, 按 (4) 式分别计算得到的。比较电阻应变片和 PVDF 应变片的应变波形, 可以看出, 两者在大的形状上十分一致, 细节上也比较吻合。当然, 由于应变场的不均匀, 两者不可能完全重合。

实验发现, 由于 PVDF 应变片属于高阻抗型传感器, 经过电荷放大器后的输出信号容易受到电磁干扰的影响。对电荷放大器进行了有效的屏蔽后, 获得了较好的信噪比。

5 结 论

(1) PVDF 应变片成对使用, 按照本文提出的计算方法, 可以方便地实现信号解耦, 得到两个相互垂直方向的应变。

(2) 在应变测量范围 $0 \sim 0.009$ 内, PVDF 应变片的应变-电荷曲线呈现出良好的线性关系。

(3) 不同的 PVDF 薄膜应变电荷常数不同; 同种 PVDF 薄膜不同方向的应变电荷常数不同, 且拉伸方向的较大。

(4) PVDF 应变片的灵敏度远远大于普通的电阻应变片, 且与面积成正比。大面积使用时, 灵敏度还会成倍增加。

考虑到 PVDF 压电薄膜所具有的诸多优点, 再结合上述结论, 充分表明 PVDF 应变片在动态测量领域里具有巨大的应用潜力。但 PVDF 应变片也有其缺点, 如使用温度不能太高 ($< 60^\circ\text{C}$) 等。这里是初步的研究结果, PVDF 应变片要真正实用化, 还要做许多深入的工作。

参考文献:

- [1] Kawai H. The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride)[J]. Japan J Appl Phys, 1969, 8(7):975—976.
- [2] Graham R A, Lee L M, Bauer F. Response of Bauer piezoelectric polymer stress gauges to shock loading[A]. Schmidt S C, Holmes N C. Shock Waves of Condensed Matter—1987[C]. North-Holland: Elsevier Science Publishers B V, 1988: 619—622.
- [3] Bauer F. Method and device for polarizing ferroelectric materials[P]. United States Patent: 4611260, 1986.
- [4] Bauer F. Advances to piezoelectric PVDF shock compression sensors [A]. IEEE Staff. 10th International Symposium on Electrets[C]. Greece: IEEE Stands Office, 1999:647—650.
- [5] Reed R P, Graham R A, Moore L M, et al. The Sandia standard for PVDF shock sensors[A]. Schmidt S C, Davison L W. Shock Compression of Condensed Matter—1989[C]. North-Holland: Elsevier Science Publishers B V, 1990:825—828.
- [6] 李欣增,唐志平,虞吉林. 绝缘膜组合式高聚物压电式传感器[P]. 中国专利:922428875.
- [7] 席道瑛,郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2):174—179.
XI Dao-ying, ZHENG Yong-lai. Application of PVDF gauges to dynamical stress measurements[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2):174—179.
- [8] 温殿英,林其文. 冲击波压缩 PVDF 膜的电响应研究[J]. 高压物理学报, 2000, 14(4):291—297.
WEN Dian-ying, LIN Qi-wen. Electrical response of PVDF film under shock loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(4):291—297.
- [9] 王代华. 斜拉索横向振动的积分应变反馈控制实验研究[J]. 实验力学, 1999, 14(4):464—470.
WANG Dai-hua. Experimental study on the control of stayed-cables' vibration with integral strain feedback (ISF) control method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1999, 14(4): 464—470.
- [10] 罗志增,何发昌. 用 PVDF 制作的机器人传感器[J]. 传感器技术, 1997, 16(3):1—4.
LUO Zhi-zeng, HE Fa-chang. Robot sensors made of PVDF[J]. Journal of Transducer Technology, 1997, 16(3):1—4.
- [11] 石立华,陶宝祺,袁慎芳. 智能材料结构中的压电应变传感技术[J]. 测控技术, 1998, 17(6):8—10.
SHI Li-hua, TAO Bao-qi, YUAN Shen-fang. Piezoelectric strain sensing technologies in smart material and structures [J]. Journal of Measurement and control technology, 1998, 17(6):8—10.

Application of PVDF in dynamic strain measurement

LI Yan, ZHONG Fang-ping, LIU Qian, LIU Yu, QIN Xue-jun, TAN Hong-mei
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: The principle and the method of dynamic strain measurement with PVDF piezoelectric film were investigated. The strain-charge constants of two PVDF strain gauges were calibrated with a unidirectional strain block. The strain waves in a uniaxial stress bar were measured with these gauges. Experimental results of good precision were obtained.

Key words: solid mechanics; PVDF strain gauge; dynamic strain measuring; resistance strain gauge