

# 压电薄膜轴传感器及其在智能交通系统中的应用

中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所 刘九卿

**【摘要】** 本文介绍了共聚物压电薄膜材料的压电效应、特性参数,压电薄膜轴传感器的检测原理、技术性能,以及该传感器在智能高速公路管理系统和车辆超限监测系统中,用于车辆轴数、轴距、轮胎数计量,车速监测,车型分类,动态称重,道路监控等实施方案与测量原理。

**【关键词】** 共聚物 压电薄膜 轴传感器 压电效应 动态称重 超限监测 信息采集

## 一、概述

20世纪60年代,美国科学家发现在鲸鱼的骨和腱内存在着微弱的压电效应,于是开始了对它有可能具有压电效应的有机材料的研究工作。1969年Kawai(凯沃)发现在极化的含氟聚合物聚偏氟乙烯(PVDF)中有很高的压电能力,其它材料如尼龙和PVC也都具有压电效应,但没有一种能像PVDF及其共聚物一样呈现出那么高的压电效应。

PVDF压电薄膜通常很薄,不但柔软、密度低、灵敏度极好,而且还具有很强的机械韧性,其柔顺性比压电陶瓷高出10倍。可以说是一种柔性、质轻、韧度高的塑料膜,可制成较大面积和多种厚度。它可以直接贴附在机件表面,而不会影响机件的机械运动,非常适用于需要大带宽和高灵敏度的应变传递。作为一种执行器件,聚合物很低的声阻抗,使其可以有效的向空气和其它气体中传送能量。PVDF压电薄膜传感元件,在美国已形成具有一定规模的产业,有较大的发展空间。

近年来,又研制出PVDF新的共聚物,近进一步扩大了共聚物压电薄膜传感器的应用。这种共聚物可以在135℃高温下使用,同时还能提供所需要的形状,如圆柱形、半球形等,最小厚度可达28 $\mu\text{m}$ 。应用于20多个科研、工业、商业、医疗、汽车、交通等领域,例如:机器人技术的触角感应器,微定位器,缓冲器等;汽车的加速度计、座位占据感应器、汽油液位计、轮胎转速器、防盗感应器等;医疗诊断的血压臂套、脉搏计数器、呼吸监视器等;智能交通系统的车辆轴数、轴距、轮胎数计量,车速监测、车道控制,停车区域监控,动态称重等。

## 二、共聚物压电薄膜的压电效应与特性参数

共聚物聚偏氟乙烯(PVDF)是一种经特殊加工后能将动能转化成电能的聚合体材料,具有很高的压电性能。应用此种压电材料制成的传感器,当受到机械冲击或振动时,压电材料原子层的偶极子(氢—氟偶对)的排列顺序被打乱,并试图使其恢复原来的状态,这个偶极子被打乱的结果就是一个电子流的形成而产生电荷,这就是PVDF的压电效应。此压电效应是可逆的,它可以把机械能

转换为电能，也可以把电能转换为机械能。即当有外载荷施加到传感器上时，就会产生电荷（电压），而当卸去外载荷时，就会产生一个极性相反的信号。它产生的电压可以相当高，但传感器产生的电流却比较小。

PVDF 压电薄膜具有密度低、材质轻、灵敏度高、机械韧性好等特点，可制成多种厚度和较大面积。作为一种传感器它的主要特性参数如下：

- (1) 频带宽：0.001Hz~10<sup>9</sup>Hz；
- (2) 动态范围广：10<sup>-8</sup>~10<sup>9</sup>Psi（磅/平方英寸）；
- (3) 声阻抗低：与水、人体组织和粘胶体系接近；
- (4) 弹性柔顺性好；
- (5) 高电压输出：在同样受载条件下，比压电陶瓷高 10 倍；
- (6) 高介电强度：能耐强电场作用(75V/μm)，此电场强度大部分陶瓷都退极化；
- (7) 机械强度高，耐冲击、振动性能好；
- (8) 稳定性高：耐潮湿、耐多数化学品、耐氧化剂、耐强紫外线和核辐射；
- (9) 可加工成特定形状；
- (10) 可以用市售胶粘合。

### 三、PVDF 压电薄膜轴传感器的检测原理与技术性能

PVDF 压电薄膜轴传感器是由镀银铜丝编织成的扁平芯线，缠绕在芯线上的在强电场中极化的薄膜（或涂层）和 0.4mm 的黄铜管外护套制成的同轴“线缆”式结构。在制造过程中，将 PVDF 材料置于一个强电场中进行极化，数量级为一毫米厚的压电材料大约 100000V。极化场使非结晶聚合物变成半晶体形式，同时又保留了许多聚合体的柔韧特性。

共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器的检测原理，与其说是在车辆经过时采集信息，不如说是在车辆轮胎压过轴传感器时采集信息。即轮胎压过压电薄膜轴传感器时，便产生一个与轮胎压力成正比的模拟信号，并且输出的周期与轮胎停留在轴传感器上的时间相同。每当一个轮胎经过轴传感器时，轴传感器就会产生一个新的电子脉冲。由此不难看出，压电薄膜轴传感器用于公路行驶车辆动态称重的检测原理是对动态载荷产生信号的积分。共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器的尺寸参数与技术性能如下：

- (1) 芯线：16AWG 扁平编织镀银铜线；
- (2) 压电材料：在强电场极化的共聚物 PVDF 涂层；
- (3) 外护套：0.4mm 黄铜管；
- (4) 外形尺寸（宽×厚）6.6×1.6mm；
- (5) 绝缘电阻：芯线与屏蔽层间的绝缘电阻>500MΩ；
- (6) 压电常数：>20PC/N（标称值）；
- (7) 无源信号电缆：RG58 型（HDPE）电缆外径为 4.75mm，额定电容率（介电常数）为 98PF/m，

采用地下直埋外层护套;

- (8) 温度灵敏度: 0.2%/°C (取决于灌封材料);
- (9) 输出一致性 (长度方向): 用于动态称重时±7%;
- (10) 工作温度范围: -40°C~80°C;
- (11) 车辆速度范围: 5~200km/h;
- (12) 包装: 压电薄膜轴传感器可盘卷装箱包装。

共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器属于电容式传感器类型, 不能检测静止在轴传感器上的车辆, 只能检测行驶中车辆的动态信号。由于内阻很高, 在低频时信号衰减很大, 低速时应考虑采用较高的电路输入阻抗。车辆行驶速度范围取决于电路设计, 一般为 5~200km/h, 较好的系统可达 10m/min (0.6km/h)。共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器的技术特性如下:

- (1) 无源传感器: 可在前置放大器前长距离传送而不需要供电;
- (2) 工作寿命长: 等效轴载荷可超过四千万次, 如果安装质量好可达 1 亿次;
- (3) 输出信号大: 200kg 轮载荷, 55 英里/小时 (88.5km/h) 时, 最小输出信号 250mv;
- (4) 动态特性好: 轴传感器 6:1 宽厚比的扁平结构, 使非受载方向的噪声最小, 包括路面噪声和车道车辆的噪声;
- (5) 对路面破坏最小: 安装轴传感器切口仅为 19×19mm, 并可以与路面轮廓一致;
- (6) 一次安装可获取多种信号: 可测量轴数、轴距、车速、动态称重、车辆分类统计等。

共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器有永久性的和临时性的两种安装方式。

永久性的是安装在公路中间, 使轴传感器的灌封材料顶部与路面平齐, 必须经得住年复一年的高密度车辆往来, 盐、砂、水等覆盖和扫雪车辆的清扫、铲刮。由于轴传感器独特的扁平结构外形, “导线”一般的柔顺性能, 很容易与路面轮廓保持一致。只要在路面上开一个 19×19mm 切口的长槽, 将轴传感器安装在槽内间距为 150mm 的若干个支架上, 用与路面材料温度性能基本一致的材料, 调成浆状进行灌封即可。

灌封材料对轴传感器的工作寿命影响很大, 应选择压电薄膜轴传感器制造商推荐的产品, 美国 MSI 公司推荐的灌封材料主要有: Global Resin PU200, E-Mond G-100, ECM P5G, IRD AS-475 等。

临时性的是将压电薄膜轴传感器粘贴在路面上, 进行短期监测。

永久性安装的轴传感器在对行驶车辆进行动态称重时, 要求轴传感器在长度方向上的输出一致性为±7%, 对临时安装的轴传感器要求不高, 达到±20%即可。

#### 四、共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器的应用

共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器主要用于智能高速公路管理系统, 公路车辆超限监测系统和桥梁、隧道保护预警系统等。检测项目为轴数、轴距、轮胎数测量, 车速测量, 车辆动态称重等。

##### 1. 车速监测

在车辆行驶道路上安装 A、B 两条永久性的轴传感器, 一般 A、B 轴传感器的距离为 3m (可根据

需要确定)。当行驶车辆的轮胎经过轴传感器 A 时,电子时钟起动,经过轴传感器 B 时,时钟停止,此时距离和时间已知,就可求出车辆行驶速度。根据德国 PTB 的报告,汽车以 200km/h 的速度行驶时,测量准确度可达 1%。

有的国家在行车道上安装 A、B、C 三条轴传感器,车轮从轴传感器 A 到 B,再到 C,最终从轴传感器 AB、BC 和 AC 三个间距中,可计算出 3 个车辆行驶速度,然后对 3 个车速进行对比,它们都应在规定的范围内,之间的误差通常不超过 2%。

## 2. 轴距测量

由于车速在 A、B 轴传感器 3m 间距内基本是匀速,用车轴经过轴传感器时建立的信号时间差乘以车速,就可得出轴距。

## 3. 轴数测量

由于轴传感器是检测轮胎压过时的力,因此即使轮胎靠得很近时,也很容易计量出轴数。但当车辆密集、低速行驶及车型相似时,很难区分所计轴数是同一辆车的还是两辆车的,而电感线圈只能感受不能计量轴数。因而用电感线圈+压电薄膜轴传感器的方案即可测得车数又能计量轴数。一般多采用轴传感器+电感线圈+轴传感器的方案,来获取车速信号并进行轴数等其它计算。

## 4. 轮胎数测量

尽管世界上各国的车辆分类标准有所不同,但都有自己国家在用车型的特点,有些国家是以双轮胎作为车辆等级划分标准。为了检测双轮胎,通常在与行车方向成  $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  角再加装一条压电薄膜轴传感器。当双轮胎经过斜埋的轴传感器时,就会产生双峰脉冲,通过电路处理即可识别双轮胎信号。垂直行车方向安装的轴传感器仍用来检测车速、轴数,并与斜埋的轴传感器计量数据进行比较。

我国交通部颁布的并于 2000 年 4 月 1 日起实施的《超限运输车辆行驶公路管理规定》,要求公路车辆动态称重系统应具备识别单、双轮胎的能力,通过斜埋压电薄膜轴传感器就可解决此问题。

## 5. 轮距测量

我国的车辆种类很多,存在同轴距而不同轮距的问题,如果检测系统能分辨轮距,将增加系统的覆盖率和准确度。将压电薄膜轴传感器以一定角度斜埋路面就可完成轮距测量任务。

## 6. 车辆分类统计

压电薄膜轴传感器的主要用途是车型分类,根据所用车辆的种类,不同国家制定了不同的车型分类表,对行驶车辆进行分类。车辆的类型是根据检测的轴数、轴距、轮距等数据确定。

## 7. 动态称重(WIM)

公路车辆行驶中称重主要是用于整车或轴载超限监测的预选和桥梁超载警告系统。压电薄膜轴传感器用于动态称重时,必须采用永久性的安装方式,按工艺要求的安装程序将轴传感器埋在路面内,必须确保轴传感器笔直平整,并使支架顶部、灌封材料与路面平齐,灌封材料应完全包住轴传感器及引线的连接区域。轴传感器的称量准确度与车辆振动、轮胎压在轴传感器上的面积、环境温

度等有关。尤其是道路质量对动态称重准确度影响较大, 用在水泥路面较好, 工作寿命长于沥青路面。车辆行驶速度范围可以从 5km/h 到 200km/h, 较成功的系统在低速端可达到 10m/min(0.6km/h)。动态称量准确度为 $\pm 10\%$ , 个别成功的系统可达 1~2%。

#### 8. 不停车电子收费系统 (ETC)

我国现行的公路车辆收费标准, 一直采用传统的按客车座位数分类, 收费效率低, 制约了车流量的提高, 是亟待解决的问题。由于行驶车辆种类繁多, 按现行分类方法在不停车电子收费系统中, 引入自动分类法十分困难。如按轴距、轴数分类, 再考虑整车重量, 应是比较合理的方法。建立合理的车辆分类标准是解决 ETC 问题的关键。制订标准的基础是各参数的检测手段, 应将压电薄膜轴传感器技术与视频技术及网络技术结合起来, 针对车辆的轴数、轴距、轮数, 长、宽、高等物理特性设计车型识别系统。

#### 9. 道路监控

随着智能高速公路管理系统和交通信息采集统计系统的发展, 压电薄膜轴传感器的应用范围不断扩大, 并形成了一门专业技术。近年来我国高速公路里程仅次于美国居世界第二位, 极需对公路的交通负载、车辆类型和轴载、车载进行监控, 以确定道路的磨损类型和等级。在这种方式下, 通常应用的是周期信息采集。由于我国高速公路车辆流量大且超限严重, 加重了道路负荷, 在设计使用年限之初就出现龟裂、塌陷、车辙而过早损坏, 使道路破坏修复次数增加, 造成养护费用上升, 因此对公路状态的监测变得越来越重要。利用网络技术、视频技术及埋在路面下的地感线圈和压电薄膜轴传感器组成的检测系统, 就能实现交通信息的短期或长期采集, 将车流量、车轴数、车速、轴距、车辆分类、载重量等信息进行收集分析, 为公路规划、设计、维护和决策提供可靠、全面的数据。

### 五、结 语

本文介绍的美国 MSI 公司研制的共聚物 PVDF 压电薄膜轴传感器, 以及瑞士 Kistler (奇石乐) 公司研制的压电石英晶体动态称重传感器, 已在世界许多国家的智能高速公路管理系统、动态公路车辆称重系统、高速公路超限监测预选、桥梁超载报警、隧道保护和自动电子收费系统中得到广泛应用。压电薄膜轴传感器和压电石英称重传感器, 其动态响应速度之快, 测量与监控参数之多, 安装、调试、使用之方便, 是以传统的电阻应变式称重传感器为基础的各种动态称重系统无法比拟的。利用这两种传感器的动态称重系统与车辆自动识别器 (AVI) 和车辆伴侣 (Trucking Companies) 组成的智能高速公路管理系统, 正是现代公路工程智能化管理所需要的。

### 参考文献

- (1) 美国 MSI 公司, 压电薄膜传感器技术手册, 国际互联网版本, 1998 年 8 月
- (2) 精良电子 (深圳) 有限公司, 压电薄膜轴传感器样本资料, 2000 年
- (3) 冯玉军、井晓天、楼秉哲, PVDF 及其共聚物的压电性和制备, 传感器技术, 1996 年第 4 期

(4) 陈艾主编, 敏感材料与传感器, 化学工业出版社, 2004年10月

### 作者简介

刘九卿(1937— ), 男, 1960年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团公司下属中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员, 享受国家特殊津贴专家。现为中国衡器技术专家委员会顾问, 《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》, 在有关杂志上共发表学术论文80余篇。

通讯地址: 北京市丰台区桃源里小区11号楼2单元6号

邮政编码: 100076