

压电石英称重传感器及其在动态公路车辆称重系统中的应用

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】本文介绍了以石英晶体为敏感元件的压电石英称重传感器的工作原理、结构与特点；石英晶体的压电效应，压电石英晶体片的并联、串联连接方法，电荷电压计算；石英晶体片的装配要求和装配工艺；石英晶体敏感元件与电阻应变计的性能比较。分析利用多个石英晶体敏感元件组装的工字梁型动态称重传感器的结构与技术特点，及其在动态公路车辆称重系统中的应用。

【关键词】石英晶体；压电效应；称重传感器；电荷放大器；动态称重；轴重秤

文献标识码：B

文章编号：1003-1870（2023）012-0005-06

概述

尽管早在1908年Pierre（皮埃尔）和Jacquese Curie（雅克卡里）就发现了石英晶体的压电效应，但是它用于动态力的测量还是在20世纪60年代。当时由苏黎世的瑞士联邦技术研究所研制出压电石英测力传感器，并利用它制成风洞天平，对空气动力进行测量。瑞士联邦工学院和德国Aachen大学分别利用石英晶体研制出刚性非常好的三分量测力传感器，用来测量机床的切削力。

20世纪70年代，扩展了压电石英三分量测力系统，用来测量6个分量和计算力作用点的坐标；军事工程部门用于测量火箭推力向量（力的大小、方向和位置）；汽车工业部门用于测量轮胎的附着力；生物力学领域用于运动矫形术、整形和姿态控制。

20世纪80年代，在汽车制造业中，压电石英测力传感器用于测量汽车点火压力和汽车碰撞的冲击力。利用二分量测力传感器同时测量汽车检测平台的垂直力和水平力，将压电石英测力传感器埋在路面下，测量汽车轮胎与路面之间的接触力。

20世纪90年代，公路车辆轴载超限越来越严重，已成为世界难题。在公路车辆轴载超载预判，桥梁超载报警和轴载动态称重计量中，迫切需要体

积小、高度低、重量轻、刚度大，固有频率高，动态范围广，灵敏度高的动态称重传感器和动态公路车辆称重系统。压电石英晶体敏感元件及其组装的压电石英称重传感器就具备上述特点。瑞士Kistler（奇石乐）公司开发出可以埋在路面下的以石英晶体为敏感元件的工字梁型动态称重传感器，用于公路车辆轴载超载预判、桥梁超载报警和隧道保护和车辆轴载计量，取得了很好的应用效果。这种压电石英称重传感器已在美国、英国、德国、澳大利亚、韩国、日本等许多国家广泛应用。1993年7月在苏黎世的瑞士联邦技术研究所，根据欧洲研究项目“COTS323道路动态称重”的要求，对压电石英称重传感器与另外8个商用称重传感器进行了道路比较试验。试验使用数字式示波器显示重量信号、并将其储存在软盘上，然后将数据用计算机进行离线分析。除了车辆的轴重和毛重外，车速、轴距、轮距和单双轮胎等均可确定。在20~50km/h速度下，动态称量结果与动态校准结果非常吻合，证明压电石英称重传感器完全可以用于公路车辆轴重计量。

进入21世纪以来，许多工程领域研究结构动态特性的需求不断增加，受到相关行业极大的重视，测量动态力、实现动态称重的需求越来越多。对动

态测量的力与称重传感器提出了动态测量范围广、刚度大、灵敏度高、固有频率高、动态响应快、体积小、重量轻等特殊要求。压电石英晶体力与称重传感器完全符合上述要求，其特点是刚度大、固有频率高（一般都在几十千赫以上），配上适当的电荷放大器后，能在低至接近零周，高达十千周的频带范围内工作，尤其适于测量速变参数；其测量值可达上百吨，又能分辨出小至几克的力；结构紧凑、重量轻，一个量程为15千牛的力传感器，本身重量只有6.5克；使用时不必事先调整平衡，操作极为方便。

1 石英晶体的压电效应

石英晶体（Quartz Crystal）为二氧化硅无水化合物，分子式 SiO_2 ，是各向异性的材料，通常用直角坐标轴来表征它的方向性。典型的石英晶体外形和直角坐标轴如图1所示。

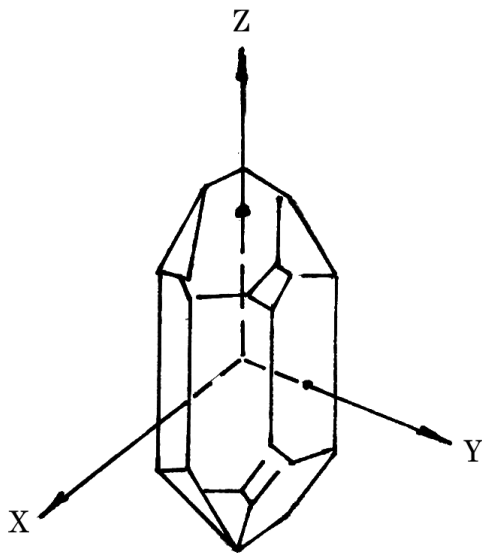


图1 石英晶体外形和直角坐标轴

Z轴是石英晶体的对称轴，在垂直于Z轴的平面上，通过相对两棱的直线叫X轴，由于石英晶体呈六角棱形，因此有三个X轴。与X轴和Z轴都垂直的是Y轴。X轴称为电轴，Y轴称为中性轴（或机械轴），Z轴称为光轴。通常所说的X（或Y）切割，就是切割出来的石英晶体片的两个平面都与X（或Y）轴相垂直。X切割的石英晶体片如图2所示。不难看出它是切割下来的一片平行六面体，其晶面分别垂直于X、Y、和Z轴。

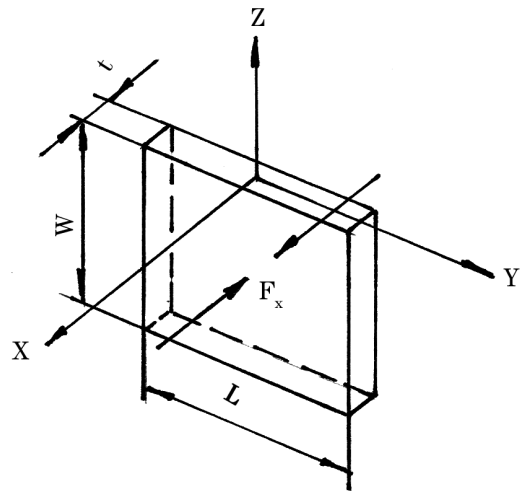


图2 X切割的石英晶体片

当石英晶体片沿X轴方向受一外力作用时，内部产生极化，在垂直于X轴的两个平面上产生等量的正负电荷，这种现象称为纵向压电效应。而在垂直于Y轴的平面上，沿着Y轴的方向施加外力时，在与X轴垂直的平面上产生电荷，这种现象称为横向压电效应。在Y切割（剪切型切割）石英晶体片中，当在垂直于Y轴的平面内，沿X轴方向受外力作用时，在受力表面产生电荷，这种现象称为剪切效应。

如果在沿X晶轴的垂直方向切割出来的石英晶体二氧化硅圆盘上施加压缩力，它就将产生电荷，其值为2.26皮库仑/牛顿。如果切割石英晶体圆盘的方向与Y晶轴垂直，并在某一特定的方向上施加剪切力，它产生的电荷值为4.52皮库仑/牛顿。在其它方向上施加的力则不产生电荷，没有输出信号。石英晶体的压电效应是由于在外力作用下石英晶体内的硅原子和氧原子的位置产生相对变形，正电荷和负电荷的重心互相移位所致，产生的电荷由覆盖在石英晶体表面的电极板进行收集、传输。力值的计量就是直接利用这3个压电效应，制成单分量或多分量测力与称重传感器。

用电荷放大器（带有电容反馈的运算放大器），将石英晶体产生的电荷转换为与其成比例的电压信号，即可进行测量。为了减少电荷的泄漏，电荷放大器的输入端需要有很高的绝缘电阻，一般应大于 $10^{12}\Omega$ 。

2 压电石英称重传感器的工作原理

压电石英称重传感器是利用石英晶体的纵向压电效应将重量信号转换成电信号的装置。现以一个X切割的石英晶体圆片为例，计算它的电荷、电压。石英晶体圆片如图3所示。

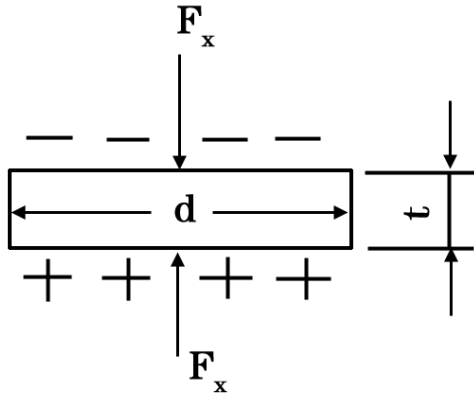


图3 石英晶体圆片受力图

设石英晶体圆片直径为 d ，厚度为 t 。当石英晶体圆片沿X轴方向受外力 F_x 作用时，在垂直于 F_x 的平面上产生电荷，而且其外力与产生的电荷存在线性关系。

$$Q_x = d_{11}F_x \quad (C)$$

式中： Q_x ——石英晶体圆片垂直于 F_x 平面产生的电荷；

d_{11} ——石英晶体的纵向压电模数， $d_{11} = \frac{2.31PC}{N}$ 。

两个表面之间的电压 U_x 为：

$$U_x = \frac{Q_x}{C_x} = \frac{d_{11}F_x}{C_x} \quad (V)$$

式中： C_x ——石英晶体圆片的电容量

$$C_x = \frac{\epsilon\pi d^2}{4t} \quad (F)$$

ϵ ——石英晶体的介电系数。

设石英晶体圆片直径为 d ，厚度为 t ，当石英晶体圆片沿X轴方向受外力 F_x 作用时，在垂直于 F_x 的平面上产生电荷，而且其外力与产生的电荷存在线性关系，其表达式为：

$$Q_x = d_{11}F_x \quad (C)$$

式中： Q_x ——石英晶体圆片垂直于 F_x 平面产生的电荷；

d_{11} ——石英晶体的纵向压电模数， $d_{11} = \frac{2.31PC}{N}$ 。

两个表面之间的电压 U_x 为：

$$U_x = \frac{Q_x}{C_x} = \frac{d_{11}F_x}{C_x} \quad (V)$$

式中： C_x ——石英晶体圆片的电容量，

$$C_x = \frac{\epsilon\pi d^2}{4t} \quad (F)$$

ϵ ——石英晶体的介电系数。

将X切割的石英晶体片加工成称重传感器壳体所需要的外形和尺寸，按要求连同电极板一起装入壳体内，施加足够的预紧力后，采用圆膜片与壳体焊接密封。当称重传感器受外载荷作用时，石英晶体圆片产生电荷，由电极板收集传至信号输出插座，再由低噪声的同轴电缆传输到电荷放大器（带有电容反馈的运算放大器），经灵敏度归一化后，按比例转换成电压输出。或放大器为重量信号的模拟—数字转换提供必要的驱动，并将此信号传输到计算机，然后用专用的软件将其转换为重量。为了减小电荷的泄漏，放大器的输入端要有很高的绝缘电阻，通常要求大于 $10^{12}\Omega$ 。电荷放大器的量程（与转换系数有关）由反馈电容确定，通常称为量程电容。通过测得的电压值，就可得到所测载荷的大小。

利用石英晶体制造称重传感器时，石英晶体片有并联和串联连接两种方法。

并联连接：两个压电石英晶体片按极化方向相反粘结，负电荷集中在中间的负电极板上，正电荷在两端的正电极板上。这时相当于两个电容器并联，输出电极板上的电荷和电容量将增加一倍，如图4所示。

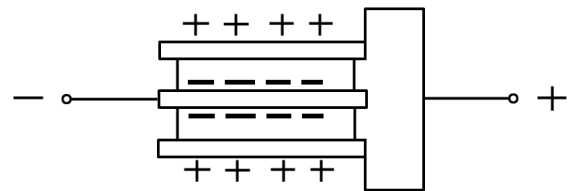


图4 两个石英晶体片并联示意图

如果有 n 个石英晶体片按并联方式连接，此时的总输出电荷将增加 n 倍，电荷灵敏度也增加 n 倍，而电压灵敏度则与单个石英晶体片工作时相同。 n 个石英晶体片并联所产生的电荷为：

$$Q_x = nd_{11}F_x \quad (C)$$

串联连接：两个石英晶体片按极化方向相同粘结，于是在两个石英晶体片粘结处的中间电极板上，正负电荷相互抵消，这时总电容量为单个石英晶体片工作时的一半，电压都增大一倍，而总电荷量则不变，如图5所示。

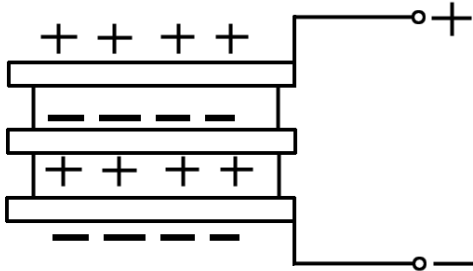


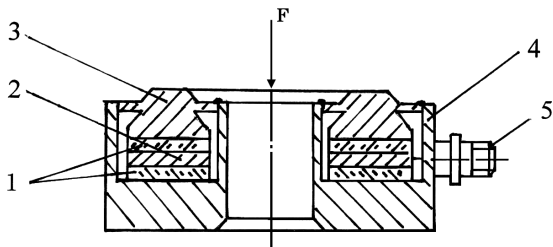
图5 两个石英晶体片串联示意图

若n个石英晶体片串联连接，由于输出电压增加n倍，因此电压灵敏度也增加n倍，而电荷灵敏度则与单个石英晶体片工作时相同。

由此可得出，多个石英晶体片并联连接时，输出电荷量大，电荷灵敏度高；串联连接时，输出电压大，电压灵敏度高。

3 压电石英称重传感器的结构与特点

单分量压电石英称重传感器的结构像一个承载垫圈，由带底座的外壳、两个X切割的石英晶体圆片、夹在两个圆片之间的电极板、带有密封膜片的上压头和信号输出插座组成，如图6所示。



- 1. 石英晶体片 2. 电极板 3. 上压板 4. 外壳
- 5. 信号输出插座

图6 压电石英称重传感器结构图

石英晶体的排列为以其晶轴X指向电极板的并联连接，使其在外载荷作用下产生的电荷和灵敏度都增加一倍。在装配时，必须对石英晶体圆片施加足

够的预紧力，就是在较高的预紧力下使上压板与外壳成为一个坚实的整体，上压板的膜片与外壳采用电子束焊或激光焊对石英晶体圆片进行密封和保持预紧力。密封膜片必须具有柔软的线性弹簧特性。对石英晶体圆片施加预紧力进行装配时应作到：预紧力必须垂直于称重传感器表面；在石英晶体圆片上产生的应力应尽量均匀分布；预紧元件的刚度应远远小于称重传感器的刚度，以保持较高的灵敏度。

将石英晶体敏感元件与电阻应变计进行比较，不难得出，电阻应变计实际上是测量称重传感器弹性体上的应变，而不是测量外力。在具体设计时必须使额定载荷下弹性体上产生的应变大小适当，即 $1100\mu\varepsilon$ 左右。实际上电阻应变计在弹性体上测量的是一个或几个位置上的表面应变值。表面应变是否代表弹性体每一种受载状态下的平均应变，取决于设计技术水平。应变式称重传感器的固有缺点在动态称重中受到较多限制：测量范围小，对于10的几次方的测量范围，必须用多个不同量程的称重传感器进行测量；量程与鉴别阈之比通常被限制在50000以下；弹性体结构较复杂；刚度偏小，固有频率低；使用温度范围小，一般为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 。相对压电石英称重传感器唯一的优点是可以进行绝对测量和静态称重，特别是非常适用于精确称重。

与电阻应变计不同，石英晶体敏感元件测量的是应力，是它产生的电荷对于应力的平均值，也就是说石英晶体具有把敏感元件（石英圆片）整个表面上的载荷进行积分的能力。

压电石英称重传感器与应变式称重传感器的最大区别是石英晶体没有热电效应，即使是温度瞬变也不会引起信号漂移，而且灵敏度温度系数非常小，约为 $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ ，因此不必采取特殊手段补偿路面温度的影响。而应变式称重传感器则必须进行零点和灵敏度温度补偿。垫圈式压电石英称重传感器一般有额定量程为100、200、500kg，1、2、5、10、20、50、100t十种规格。灵敏度均为 40pc/kg ，固有频率 $\geq 40\text{Hz}$ ，线性度 $\leq 1\%\text{FS}$ ，绝缘电阻 $\geq 10^{12}\Omega$ ，50t的压电石英称重传感器的重量只有100g。压电石英称重传感器具有如下特点：

(1) 量程范围广，测量范围达10的几次方，一个称重传感器即可完成全量程测量，频率响应范围

能在低至接近零周，高达十千周范围内工作；

(2) 量程与鉴别阈之比可达100000000，一般比值超过1000000。灵敏度高，测量值可到上百吨载荷，又能分辨出小至几公斤的动态力；

(3) 刚度大，固有频率高（几十千赫以上），是同尺寸应变式称重传感器的8倍，动态响应快；

(4) 时间老化率低，无热释电现象，工作可靠性高，寿命长；

(5) 石英晶体的居里点高（573℃），对温度的敏感性低，灵敏度变化极小，长期稳定性好；

(6) 石英晶体具有较好的线性，在一般情况下无滞后，组装成称重传感器其动态测量的综合误差优于1%；

(7) 结构紧凑，体积小，高度低，重量轻，可用多个石英晶体片组装大型称重传感器；

(8) 用多分量称重传感器进行称重计量时，抗交叉干扰能力强，交叉干扰达到800Hz时，测量误差仍然低于10%，交叉干扰到400Hz时，测量误差小至2%以内；

(9) 使用温度范围广，通常为-200℃~200℃；

(10) 在使用时不用事先调整平衡，操作方便。

压电石英称重传感器唯一的缺点是不能在长时间内进行静态测量。

4 压电石英称重传感器在动态公路车辆称重中的应用

石英晶体敏感元件及压电石英称重传感器在动态公路车辆称重中的应用主要有两种方式。一种是利用多个垫圈式压电石英称重传感器组装成薄形电子轮重、轴重秤或条形称重板。一种是利用多个石英晶体片和电极板直接安装在特制的梁式承载器内，形成专用的压电石英称重传感器，将其埋在公路表面截面为50mm×50mm的长槽内，形成动态公路车辆轴重秤。瑞士Kistler（奇石乐）公司研制的石英晶体动态称重传感器就是这种应用的典型代表。它的总体结构如同1m长的工字梁，所不同的是工字梁的腹板为圆形空心截面，实际上其空心是由平行于工字梁上下翼缘的两个平面形成的矩形通孔，它的结构如图7所示。

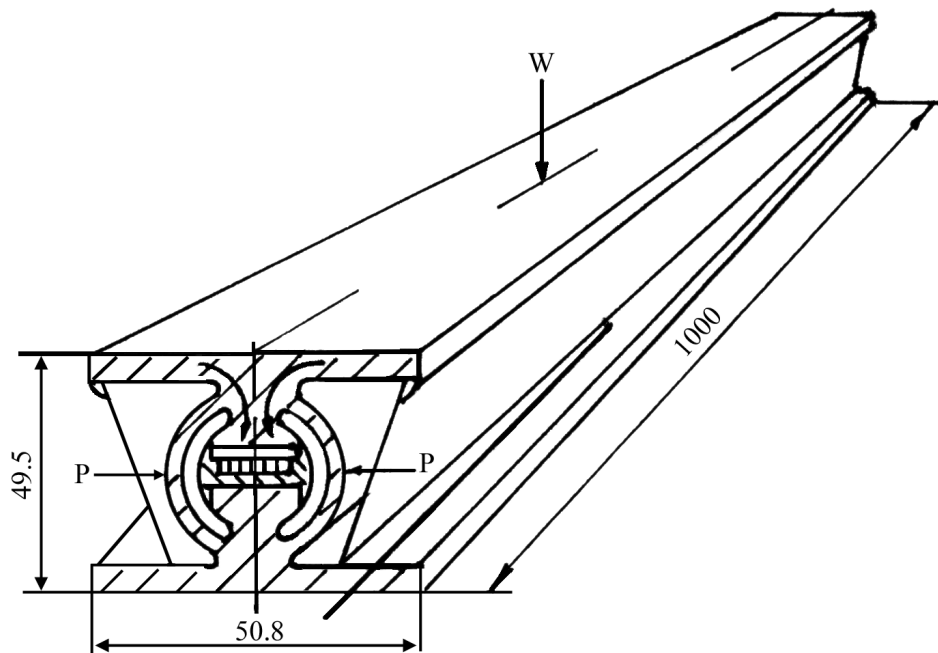


图7 梁式压电石英称重传感器

多个石英晶片在梁式称重传感器内的安装及所施加的预紧力的大小, 对称重传感器的性能影响较大, 应有严格的装配要求和装配工艺。装配时首先沿梁式称重传感器的水平对称轴, 对圆形腹板施加水平力 P , 使腹板变形, 矩形通孔高度增大。在梁长 1m 的范围内, 先插入电极板, 再每隔 50mm 插入一个石英晶片。然后卸掉水平力 P , 此时石英晶片已被施加了预紧力, 并得到了很好的保护和密封。利用称重传感器内部的沟槽从中间引出低噪声的同轴电缆, 接入与其配套的动态称重仪表就可实现公路车辆动态称重。

压电石英梁式称重传感器在应用时必须埋在路面下, 梁的上表面为载荷测量面, 下表面安放在公路基础上为支撑面。由于在高速公路上行驶的车辆, 在路面上产生的水平力可能与垂直力的大小相当。为保证动态称量的准确度, 应对梁式称重传感器与路面采取隔离措施, 尽量消除或减少水平力的影响, 以获得高质量的信号脉冲形状和可重复的测量结果。例如: 在梁式称重传感器埋入地面时, 采用窄条柔软泡沫围绕上部整个周边, 将称重传感器与水平力隔离, 采用 75% 石英沙和 25% 环氧树脂混合物固定称重传感器本体等。由于压电石英梁式称重传感器测量表面的宽度比车辆轮胎的印迹窄, 重量信号必须沿车轮接触长度积分。因此, 称重传感器的性能主要取决于积分时段内信号质量的稳定性和称重传感器与路面相互作用的长期稳定性。为提高动态称重的准确度, 一般都采用排列多个称重传感器求动态称量平均值的方法。

采用压电石英称重传感器进行动态称重时, 应特别注意以下两个问题:

(1) 电缆: 在动态称重中, 应选择低噪声屏蔽电缆, 芯线接称重传感器信号级, 屏蔽套接外壳, 屏蔽套应有绝缘层; 必须尽可能固定夹紧电缆, 防止连接电缆产生噪声; 与称重传感器、电荷放大器的连接接头, 及电缆线之间的连接均需要清洁、干燥, 电缆线的绝缘电阻应等同称重传感器的要求, 即静态校验时大于 $10^{13}\Omega$, 动态校验时大于 $10^9\Omega$; 称重传感器与电缆接好后, 在接入电荷放大器前, 应使插头短路, 将称重传感器内的剩余电荷放掉后, 再接入电荷放大器, 否则会造成干扰。瑞士Kistler(奇石

乐)公司采用的是铜质外壳, 内部充填了钙钛压电粉末的同轴电缆。

(2) 干扰问题: 在动态称重中, 为了获取准确的测量结果, 人们很自然地选用准确度高、稳定性好的动态称重传感器和高精度的测量仪表。这仅仅是一方面, 而往往被忽视的是测试系统理论和测试技术问题。事实上使用同样的仪器设备, 由于测试技术的完善与否, 会得到截然不同的测试结果, 不仅仅是准确度不同, 而且还会给测试结果引入新的频率分量。因此, 在动态称重中应特别注意解决附加地电干扰问题。

总之, 在动态称重中, 在保证各测量环节都正常工作的情况下, 引起动态称重误差的两个主要问题就是干扰和漂移, 应引起足够重视。

5 结语

近年来, 压电石英称重传感器组成的动态公路车辆称重系统, 在美国、英国、德国、澳大利亚、韩国、日本等国家的高速公路超载识别、桥梁超载报警、隧道保护和公路收费中得到广泛应用。例如, 美国密苏里州(Missouri)的所有称重站都使用以压电石英称重传感器为基础的动态公路车辆称重系统, 为其提供这套系统的是美国Cardinal(卡甸诺)公司。该公司为了实现快速、准确的动态称重和车速、轴距、单双轮胎识别等多参数测量, 放弃了传统的以应变式称重传感器为基础的组装电子秤方案, 选择了瑞士奇石乐公司的9195型压电石英称重传感器组成动态称重系统。这套动态称重系统的各项功能特别是动态称量准确度、动态响应速度、工作的稳定性和可靠性都达到了较高的水平, 经受了考验。在美国密苏里州的19个称重站工作了3年, 只有一个压电石英称重传感器出现故障。美国卡甸诺公司选择压电石英称重传感器的原因, 正是本文所要总结的压电石英称重传感器具有的突出特点:

(1) 测量比较准确且参数多, 长期稳定性好, 工作可靠性高, 在超过30个月的测试期内, 灵敏度变化在 2% 以内。

(2) 结构紧凑、坚固耐用, 可承受路面上通常见到的磨损、压力、振动和冲击等, 疲劳寿命长, 在环形疲劳试验场模拟重载交通试验10年, 没有任何损坏。

(3) 集成化、模块化设计, 容易与所有道路宽度和路面形状匹配。

(4) 安装方便, 费用低, 无需建造大面积混凝土地基, 只用一把混凝土锯在路面上锯开截面为 50mm × 50mm 的沟槽, 放进称重传感器并注入石英沙和环氧树脂混合物即可固定。

(5) 通过石英晶片在称重传感器内有规律地分布和接线, 不论车辆轮载施加在称重传感器长度方向上的任何位置, 都能产生均匀的信号输出, 所有检测参数在数秒内即可完成。

本文介绍的压电石英称重传感器, 美国MSI 公司研制的共聚物压电薄膜轴称重传感器以及光钎称重传感器, 制成的动态公路车辆称重系统其动态响应速度之快, 测量参数之多, 安装应用之方便, 是以传统的应变式称重传感器为基础的动态轮轴重电子秤无法比拟的。

利用这类动态称重传感器与车辆自动识别器 (AVI)、车辆伴侣 (Trucking companies) 组成智能高速公路管理系统, 完全可以满足需要采集各种信息的现代公路工程智能化管理的需要。我国有能力的企业应在这方面加强研究, 增加投入, 开发出适合我国公路工程管理需要的产品, 为我国公路工程

管理智能化做出新贡献。

参考文献

[1] Dave Mathieu, Bypassing Weigh Stations on Our Smart Highways, Weighing and Measurement, February 2003。

[2] 韩启国, 石英晶体压力传感器及其在动态测量中的应用, 传感器应用技术, 1986 N02。

[3] 奇石乐中国有限公司, 长期稳定的石英动态称重WIM 传感器, 治理公路车辆超限超载称重计量技术交流会论文集, 2004 年7 月。

作者简介

刘九卿 (1937—), 男、汉族, 1960 年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团有限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, 享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会发展战略咨询委员会委员、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》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》, 在相关计量技术杂志上共发表学术论文140 多篇。