

学校编码：10384

学号：20720101150096

分类号__密级__

UDC_____

厦门大学

硕士学位论文

压电陶瓷传感器车辆动态称重系统的
研制及应用

Development and Application of Piezoelectric Ceramic
Sensors for Vehicle Weight-in-Motion System

肖小朋

指导教师姓名：熊兆贤教授

专业名称：材料学

论文提交日期：2013年5月

论文答辩时间：2013年6月

学位授予日期：2013年 月

答辩委员会主席：_____

评阅人：_____

2013年6月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(熊兆贤)课题(组)的研究成果,获得(熊兆贤)课题(组)经费或实验室的资助,在(熊兆贤)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

本论文采用流延工艺制备 BaTiO₃ 和 PZT 压电陶瓷厚膜，研究热处理制度和助烧剂对其晶体结构和压电性能影响；然后以 BaTiO₃ 和 PZT 陶瓷厚膜为传感元件，设计制备混凝土基压电陶瓷传感器并对其测量电路进行分析；最后组建出可以进行动态称重测试实验的动态称重（WIM）系统，并对实验数据进行分析、拟合、计算。得出以压电陶瓷为传感元件的便携式 WIM 系统进行动态载重称量，速度对动态称重精度的影响很大。

首先探讨热处理制度和添加助烧剂 CuO 对 BaTiO₃ 陶瓷厚膜的结构和压电性能影响。实验得出采用 1240°C×10min + 1140°C×24h 两步法热处理 BaTiO₃ 陶瓷厚膜可以获得较好的压电性能，其 $d_{33}=210$ pC/N， $k_{33}=0.4$ 。通过添加 0.2%CuO 助烧剂，可以有效降低 BaTiO₃ 陶瓷的热处理温度的同时提高其压电性能，采用 1140°C×10min + 1040°C×24h 两步法热处理钛酸钡添加 0.2%CuO 陶瓷厚膜，可以获得压电性能优异的陶瓷厚膜，其 $d_{33}=320$ pC/N， $k_{33}=0.45$ 。

同时探讨热处理工艺对 PZT 陶瓷厚膜结构和压电性能的影响。实验得出采用 1220°C×3h 热处理 PZT 陶瓷厚膜就可获得较佳的压电性能，其 $d_{33}=350$ pC/N， $K_{33}=0.45$ 。

然后研究 BaTiO₃ 和 PZT 陶瓷厚膜作为传感元件的抗老化和酸碱腐蚀能力，BaTiO₃ 和 PZT 陶瓷厚膜都有较好的时间和温度稳定性以及较强的抗酸碱腐蚀能力，其中 PZT 陶瓷厚膜的抗老化和腐蚀能力要稍优于 BaTiO₃ 陶瓷厚膜，两者都可以作为动态称重传感元件使用。以制备的压电性能优异的 BaTiO₃ 和 PZT 陶瓷厚膜为传感元件，设计制备出压电陶瓷传感元件、环氧树脂层、混凝土层二层包裹保护压电陶瓷传感器，对其进行力学性能测试，混凝土经 28 天养护后强度达到 40MPa 以上，达到了公路设计用水泥强度。同时对压电陶瓷传感器测量电路进行分析，确定了以电压放大电路为其信号采集的测量电路。

最后，以车辆、压电陶瓷传感器、信号调解电路、A/D 模数信号采集卡和计算机组成便携式动态称重（WIM）系统进行动态称重实验，对数据进行采集、分析、拟合出车辆重量与脉冲信号之间的有效关系式。在静态作用下，荷载与信

号电压幅值之间有很好的线性关系，线性拟合相关系数 (R^2) 都在 0.99 以上，且具有很好的稳定性，压电陶瓷传感器具有优异的静态称量精度。在实际路面动态称重实验，相同载荷不同速度通过称重平台，脉冲信号积分值和幅值波动在 9%~23% 之间，速度对动态称重精度影响很大。对脉冲信号进行峰值 (U) 与速度 (V) 的比值处理分析，同一重量不同速度下 U/V 比值的相对误差仅为 6.9%，可以有效消弱车辆行驶速度对测量精度的影响，提高称重系统的稳定性和精度。通过 U/V 的比值信号处理方法，可能能有效解决目前普遍对脉冲信号实行按速度不同分别拟合曲线的复杂处理方式，为动态称重信号处理提供了一种更简便的方法。

关键词：压电陶瓷厚膜；混凝土基压电陶瓷传感器；车辆动态称重

Abstract

In this thesis, BaTiO₃ and PZT piezoelectric ceramic thick films were prepared by casting process technique. The effects of thermal treatment and flux on the crystal structures and piezoelectric properties were investigated systematically. Then, concrete based piezoelectric ceramic sensors were fabricated by using of BaTiO₃ and PZT piezoelectric ceramic thick films as sensing element and the measuring circuit was also analyzed. Finally, the Weight-in-Motion (WIM) system was successfully established for dynamic weight measurement of vehicles. With the analysis, fitting and calculation of the experimental data, the speed greatly affect the dynamic weighing accuracy.

The thermal treatment and CuO used as flux impact on BaTiO₃ thick film structure and piezoelectric properties were investigated. The BaTiO₃ ceramic thick films show better piezoelectric properties: $d_{33}=210\text{pC/N}$, $k_{33}=0.4$, which sintered by two-step method ($1240^\circ\text{C}\times 10\text{min} + 1140^\circ\text{C} \times 24\text{h}$). By adding 0.2%CuO as flux, the piezoelectric properties increased and the thermal treatment temperature decreased. The best piezoelectric properties of BaTiO₃ ceramic thick films is $d_{33}=320\text{pC/N}$, $k_{33}=0.45$, which sintered by two-step method ($1140^\circ\text{C} \times 10\text{min} + 1040^\circ\text{C} \times 24\text{h}$). For PZT ceramic thick films, the best piezoelectric properties were $d_{33}=350\text{pC/N}$ and $K_{33}=0.45$ obtained by sintering at 1220°C for 3 hours.

The anti-aging and acid-base corrosion properties of BaTiO₃ and PZT ceramic thick films were studied. Both BaTiO₃ and PZT ceramic thick films show good time and temperature stability and strong anti-acid corrosion properties and can be used as dynamic weighing sensor elements. PZT ceramic thick films exhibited a little bit better than BaTiO₃ in anti-aging and acid-base corrosion properties. Piezoelectric ceramic sensors were fabricated by using BaTiO₃ and PZT ceramic thick films and protected by epoxy resin layer and concrete layer. The mechanics performance testing results indicate that the strength of concrete achieved 40MPa after 28 days curing

which is suitable for highway design. Voltage amplifier circuit was employed to collect signals by measurement circuit analysis.

Weight-in-Motion (WIM) system was established for dynamic weighing measurement by combination of vehicles, piezoelectric ceramic sensors, signal adjustment circuits, A/D digital-to-analog signal acquisition card and computers. The relationship between vehicles weight and pulse signal can be obtained by data collection, analysis and fitting. In the static weighing condition, a good linear relation between load and voltage amplitude with the linear correlation coefficient of fitting (R^2) above 0.99 was achieved. The results indicated the sensor shows a high stability and weighing accuracy. In the real dynamic weighing condition, the velocity plays an important role and affects the accuracy mostly. Using the same loading, the pulse signal amplitude and integral value's error varies from 9% to 23% with the velocity changes. But the pulse signal amplitude(U) and the speed(V) ratio's error is 6.9% with the velocity changes. It can effectively weaken the speed impact and improve the stability and weighing accuracy, providing a more simple way of dynamic weighing signal processing.

Keywords: Piezoelectric ceramic thick films; concrete based piezoelectric ceramic sensor; Vehicle Weight-in-Motion

目录

摘要.....	I
Abstract.....	I
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 车辆测重概述	2
1.2.1 车辆测重的分类.....	2
1.2.2 车辆动态称重系统.....	2
1.3 压电传感器的基本特性	4
1.3.1 压电材料的主要特性参数.....	4
1.3.2 压电传感器动态称重工作原理.....	5
1.3.2.1 压电效应与压电方程.....	5
1.3.3 压电材料.....	8
1.4 车辆动态称重系统的有关规范	9
1.5 车辆动态称重系统的国内外研究现状	11
1.5.1 国外车辆动态称重系统的研究现状.....	11
1.5.2 国内动态称重系统的发展.....	12
1.6 车辆动态称重系统存在的问题与发展趋势	13
1.7 本论文研究的研究目的及主要内容	14
第二章 压电陶瓷厚膜的合成制备及表征方法	16
2.1 实验药品与仪器	16
2.2 压电陶瓷厚膜的制备方法	17
2.2.1 流延成型工艺概述.....	17
2.2.2 压电陶瓷厚膜的制备工艺过程.....	18
2.2.3 流延工艺制备压电陶瓷厚膜.....	21
2.2.4 陶瓷厚膜的热处理.....	22
2.2.5 披覆银电极.....	23
2.2.6 电极化处理.....	23

2.3 测试与表征方法	24
2.3.1 X射线衍射分析.....	24
2.3.2 热重分析.....	24
2.3.3 显微形貌分析.....	24
2.3.4 介电性能测试.....	24
2.3.5 压电性能测试方法.....	25
2.3.6 机电耦合系数测试.....	25
2.4 本章小结	26
第三章 热处理工艺和助烧结对钛酸钡厚膜的性能影响结果	27
3.1 热处理工艺对钛酸钡厚膜结构与性能的影响	27
3.1.1 排胶制度和热处理工艺的确定.....	27
3.1.2 钛酸钡厚膜的相对密度和径向收缩率测量与分析.....	28
3.1.3 钛酸钡陶瓷厚膜 XRD 物相表征与分析.....	30
3.1.4 钛酸钡陶瓷厚膜 SEM 微观形貌分析.....	32
3.1.5 钛酸钡陶瓷厚膜介电性能测量与分析.....	34
3.1.6 钛酸钡陶瓷厚膜压电性能测量与分析.....	37
3.2 热处理制度对钛酸钡添加 CuO 陶瓷厚膜结构与性能的影响	40
3.2.1 钛酸钡添加 CuO 陶瓷厚膜的相对密度和径向收缩率测量与分析	40
3.2.2 钛酸钡添加 CuO 陶瓷厚膜 XRD 物相表征与分析.....	41
3.2.3 钛酸钡添加 CuO 陶瓷厚膜 SEM 微观形貌分析.....	43
3.2.4 钛酸钡添加 CuO 厚膜介电性能测量与分析.....	45
3.2.5 钛酸钡添加 CuO 厚膜压电性能测量与分析.....	48
3.3 本章小结	49
第四章 常规法热处理 PZT 陶瓷厚膜的结构与性能研究结果	50
4.1 热处理温度对 PZT 陶瓷厚膜结构影响	50
4.1.1 PZT 陶瓷厚膜相对密度和径向收缩率测量与分析.....	50
4.1.2 PZT 陶瓷厚膜 XRD 物相表征与分析.....	51
4.1.3 PZT 陶瓷厚膜 SEM 显微形貌分析.....	52
4.2 热处理温度对 PZT 陶瓷厚膜性能的影响	53

4.2.1 PZT 陶瓷厚膜介电性能测量与分析	53
4.2.2 PZT 陶瓷厚膜压电性能测量与分析	55
4.3 本章小结	56
第五章 混凝土基压电陶瓷传感器的制备与测试电路分析	57
5.1 压电陶瓷老化性能测试	57
5.1.1 压电陶瓷厚膜时间老化性能测试	57
5.1.2 压电陶瓷厚膜温度老化性能测试	59
5.2 压电陶瓷厚膜抗酸碱腐蚀性能测试	61
5.3 混凝土基压电陶瓷传感器的制备	62
5.3.1 环氧树脂包裹保护压电陶瓷厚膜	63
5.3.2 混凝土基压电陶瓷传感器的制备与力学性能	64
5.4 压电陶瓷传感器等效电路及其测量电路	66
5.4.1 压电传感器等效电路	66
5.4.2 压电传感器的信号测量电路	67
5.4.2.1 电压放大器	67
5.4.4.2 电荷放大器	70
5.5 本章小结	71
第六章 压电陶瓷传感器动态称重系统的设计及应用	72
6.1 动态称重系统的设计	72
6.1.1 A/D 模数转换采集卡	73
6.1.2 采集系统稳定性测试	74
6.2 车辆动态称重的影响因素	75
6.3 车辆动态称重数据的处理方法	77
6.4 压电陶瓷传感器静态输出特性研究	77
6.5 室内小车动态称重测试	79
6.5.1 不同载荷下动态称重测试	79
6.5.2 压电陶瓷传感器动态称重稳定性测试	85
6.6 实际路面动态称重测试	86
6.7 本章小结	90

第七章 总结与展望	94
7.1 本论文的结论	94
7.2 未来工作展望	95
参考文献	96
攻读硕士学位期间科研成果	101
致谢	102

厦门大学博硕士论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库