中国公路建设行业协会标准

T/CHCA xxxx-xxxx

道路压电陶瓷俘能设计与施工应用技术规程

Technical Specifications for Road Piezoelectric Energy

Harvesting Design and Construction Application

xxxx-xx-xx发布 xxxx-xx-xx实施

中国公路建设行业协会发布

中国公路建设行业协会标准

道路压电陶瓷俘能设计与施工

应用技术规程

Technical Specifications for Road Piezoelectric Energy

Harvesting Design and Construction Application

T/CHCA xxxx-xxxx

主编单位：温州大学
批准部门：中国公路建设行业协会
实施日期： xxxx 年 xx 月 xx 日

Xxxx出版社

前 言

根据中国公路建设行业协会关于下达《公路桥面铺装混凝土整平层全断面自动化施工技术规范》等25项协会标准的编制通知（中路建协技发〔2023〕号）的要求，由温州大学作为主编单位，承担对《道路压电陶瓷俘能设计与施工应用技术规程》的编制工作。

本规程编制的指导思想：在编制过程中贯彻执行国家和交通运输部有关技术政策；在总结道路压电发电施工实践经验并借鉴国外先进技术标准的基础上，吸纳技术成熟 、工艺先进、经济合理、安全环保、节能减排的“四新”技术；更好地体现“安全、耐久、环保、节能减排、可持续发展”的道路压电发电工程建设理念，使规程真正起到保证工程施工质量和安全、提高施工技术水平的作用。

本规程的编制原则：注重条文的技术先进性、合理性和可操作性，强调对施工关键工序和关键过程的控制；借鉴国外先进技术标准和成果；与相关的而标准、规范、规程协调配套。

本规程的主要技术内容包括：1总则；2术语与定义；3道路压电能量采集器设计；4压电俘能道路施工；5压电俘能道路施工；6工程质量检验与评价。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规程日常管理组，联系人：刘志明（地址：浙江省温州市温州茶山高教园区，邮编：325035；电话：17858936733，电子邮箱：liuzhiming680@163.com），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：温州大学

参 编 单 位：江西中煤建设集团有限公司、赣州高速公路有限责任公司、温州市公路运输与管理中心、武汉大学、中国地质大学、长安大学、华东交通大学、江西理工大学、温州市交通发展集团有限公司、泰顺县交通运输局、温州市瓯飞开发建设投资集团有限公司、温州市瓯江口开发建设投资集团有限公司、温州市教育基建中心、温州市瓯江口城市建设发展有限公司、瑞安经济开发区发展总公司。

主 编：王军、刘志明

主要参编人员：林江东、符洪涛、倪俊峰、高紫阳、钟瑾、王秋平、钟鑑方、王鹏、丁光亚、章荣军、龚文平、蒋玮、童立红、吴建奇、郭林、谷川、朱萧霄、按打日拉、应梦杰、高世虎、袁国辉、王龙、徐敏涛、王航宇、叶剑可、王福良、金锦强、李建储、谢忠武、陈礼游、李明枫、庄恒、戴鸣、朱炜豪、叶飞龙、周梦绮、饶昱、应豪康、李辉、唐杨怡、张凯宇、朱照棉

主 审：

参与审查人员：

目录

[1 总则 4](#_Toc178098868)

[2 术语与定义 5](#_Toc178098869)

[3 道路压电能量采集器设计 6](#_Toc178098870)

[3.1 一般规定 6](#_Toc178098871)

[3.2 压电陶瓷材料 6](#_Toc178098872)

[3.3 压电换能器结构 6](#_Toc178098873)

[3.4 道路压电能量采集器封装结构 6](#_Toc178098874)

[3.5 压电能量采集电路 7](#_Toc178098875)

[3.6 室内标准检测 7](#_Toc178098876)

[4 低功耗道路附属设施设计 9](#_Toc178098877)

[4.1 一般规定 9](#_Toc178098878)

[4.2 储能装置 9](#_Toc178098879)

[4.3 低功耗无线传感器 9](#_Toc178098880)

[4.4 低功耗道路附属设施 9](#_Toc178098881)

[5 压电俘能道路施工 10](#_Toc178098882)

[5.1 一般规定 10](#_Toc178098883)

[5.2 施工准备 10](#_Toc178098884)

[5.3 沥青路面铣刨 10](#_Toc178098885)

[5.4 道路压电能量采集器埋设 11](#_Toc178098886)

[5.5 沥青路面摊铺及压实 12](#_Toc178098887)

[5.6 道路低功耗附属设施安装 12](#_Toc178098888)

[6 工程质量检验与评价 13](#_Toc178098889)

[6.1 一般规定 13](#_Toc178098890)

[6.2 材料与设备检验 13](#_Toc178098891)

[6.3 质量与验收 13](#_Toc178098892)

# 1 总则

1.0.1为适应道路车辆荷载振动能收集需要，规范道路压电俘能技术实施流程，保障工程质量和施工安全，提高能量俘获效率，制订本规程。

1.0.2 本规程规定了道路压电俘能技术的设计原则和施工流程，适用于各级道路的工厂化、装配化及标准化布设。

1.0.3 道路压电俘能技术的施工除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

# 2 术语与定义

2.0.1 压电效应 piezoelectric effect

对压电材料施加外部荷载可将机械能转换为电能，为正压电效应；施加外部电场可将电能转换为机械能，为逆压电效应。

2.0.2 道路压电俘能技术 road piezoelectric energy harvesting technology

利用压电效应将道路车辆行驶时产生的机械能持续转化为电能的技术。

2.0.3 压电陶瓷 piezoelectric ceramic

一种具有压电效应的无机压电材料，具有压电性能好，机电转换效率高的优势。

2.0.4 介电常数 dielectric constant

表征压电陶瓷在电场中的响应能力，同时反映了压电陶瓷储存电荷的能力。

2.0.5 机电耦合系数 electromechanical coupling coefficient

表示机械能和电能相互转换的的程度，是衡量压电性能强弱的重要参数。

2.0.6 压电电荷常数 piezoelectric charge constant

描述压电陶瓷的力学量和电荷量之间的线性响应关系的比例常数。

2.0.7 居里温度 curie temperature

压电陶瓷从铁电相转变为顺电相的温度点，超过这个温度点，压电效应消失。

2.0.8 疲劳退化率 fatigue degradation rate

压电陶瓷在长期激励作用下发生退化，力电转化能力的下降量与原转化量的比值。

2.0.9 压电换能器 piezoelectric transducer

利用压电材料的正压电效应制成的，可以进行能量转换的器件。

2.0.10 道路压电能量采集器 Road piezoelectric energy harvester

以多个压电换能器为核心集成的可用于捕获道路车辆振动能的能量采集器。

# 3 道路压电能量采集器设计

## 3.1 一般规定

3.1.1 道路压电能量采集器应满足道路施工要求，便于施工。

3.1.2道路压电能量采集器不能破坏路面结构，也不能对公路车辆行驶造成影响。

3.1.3道路压电能量采集器应满足水-热-力耦合的道路服役环境，发电具有长期稳定性。

## 3.2 压电陶瓷材料

3.2.1压电陶瓷种类

二元系PZT有铅压电陶瓷的综合性能最佳，其中以PZT-5系列发电量最高。

3.2.2压电陶瓷性能参数

3.2.2.1介电常数（*εr*）

利用精密阻抗分析仪测定，*εr*一般应大于1500。

3.2.2.2 机电耦合系数（*KP*）

利用精密阻抗分析仪测定，*KP*一般应大于0.6。

3.2.2.3压电电荷常数（*d*33）

利用准静态分析仪测定，*d*33一般应大于300 pC/N。

3.2.2.4居里温度（*Tc*）

利用环境温度箱及精密阻抗分析仪测定，*Tc*一般应大于180℃。

## 3.3 压电换能器结构

3.3.1压电换能器结构种类

主要包括圆柱式、堆叠式、悬臂梁式、钹式、桥式、瓦式、弹簧式和鼓式等，其中以鼓式的路用综合性能最佳。

3.3.2 压电换能器的工作模式

主要分为33模态、31模态、扭转模态和剪切模态，其中最主要为33模态和31模态。

## 3.4 道路压电能量采集器封装结构

3.4.1 压电换能器

道路压电能量采集器中应该排列尽可能多的压电换能器单元。通过整流电路使压电换能器交流电转换为直流电，再采用并联电路连接，增大电流。

3.4.2 整流并联电路

预留电路板卡槽，位置应该使得各个压电换能器正负极导线距离最短。

3.4.3 封装结构材料

可采用尼龙，PVC，铝合金等金属和非金属材料。其中，添加30%玻璃纤维的尼龙材料（PA66+GF30）具有强度和模量高、质量轻、耐受温度高，且具有一定韧性可与沥青路面协调变形。采用一体注塑成型，保证结构防水性能。

3.4.4 防水处理

采用绝缘柔性硅橡胶对内腔进行整体浇筑，包括压电换能器单元及整流并联电路。利用密封垫圈和固定螺丝对上下盖板缝隙进行压紧。导线出口处采用防水接口机航空插头进行与外部导线的连接。

3.4.5 结构尺寸

封装结构高度一般应小于8cm，防止厚度过大无法嵌入水泥稳定基层。长度一般应大于80cm，保证道路压电能量采集器覆盖车道轨迹带。

## 3.5 压电能量采集电路

3.5.1能量采集电路种类

能量采集电路包括标准接口电路、同步电荷提取电路、并联同步开关电感电路、串联同步开关电感电路、降压式DC-DC转换电路。

3.5.2 最优匹配阻抗设计

当电路阻抗与道路压电能量采集器阻抗相等时，可以获得最大的输出功率。

## 3.6 室内标准检测

3.6.1输出功率检测

利用室内动力测试系统模拟车辆荷载，对封装后的道路压电能量采集器发电性能进行检测，并获取最优匹配阻抗。环境温度一般取-10℃-120℃，激励荷载一般取0.2MPa-1MPa，激励频率取0-10Hz。

3.6.2 室内充放电检测

通过连接储能模块进行充电检测，连接电池充放电系统进行放电检测。考虑到后期疲劳退化，道路压电能量采集器的初始电量要达到用电设备需求的2倍以上。

3.6.3 疲劳性能检测

激励荷载取标准轴载0.7MPa，激励频率取10Hz，加载次数1000万次以上（以单车道3000辆车，相当于5年），要求道路压电能量采集器形变小于1mm，输出功率疲劳退化率小于30%。

# 4 低功耗道路附属设施设计

## 4.1 一般规定

选择低功耗附属设施时，主要考虑道路压电能量采集系统的发电量能覆盖其功耗。

## 4.2 储能装置

4.2.1 储能设计

储能单元可采用充电电池或者超级电容，满电容量需保证整套系统在封路15天以上的情况下仍能待机工作。

4.2.2 工作环境

进行储能设备的安装设计时，需要充分考虑到环境因素，保证其正常运行。高温环境可将其埋入地下进行降温，低温环境可对电池舱采用保温隔热材料，并确保设备耐湿热等级达到IP54级。

4.2.3 保护功能

当外部用电设备被破坏发生开路或短路时，自动关闭电池供电，防止出现安全事故。当电池温度过高时，自动关停系统，待温度降低后重启，防止设备损坏。

## 4.3 低功耗无线传感器

4.3.1 设备组成

一般分为传感器模块、信号处理器模块、无线通信模块三部分。传感器种类包括地磁传感器、位移计、加速度计、雨量计、温湿度计等。

4.3.2安装要求

埋入式传感器埋入路面不能破坏路面结构和使用寿命，防护等级不得低于IP58。

4.3.3 性能指标

所有模块均应采用低功耗设计，并具有良好的抗冲击性能好防电磁干扰功能。

## 4.4 低功耗道路附属设施

4.4.1 低功耗道路附属设施种类

主要包括低功耗交通诱导灯、信号灯、警示牌等。

4.4.2 安装要求

设备需要支持低功耗模式，并符合相关的交通附属设施技术标准和规范。

# 5 压电俘能道路施工

## 5.1 一般规定

5.1.1 压电发电道路施工时，应对施工过程进行严格控制，遵循施工图纸进行施工。

5.1.2 不同材料应分别堆放、不得混杂，做好防水防尘措施，施工前后应注意保护周边环境，防止施工残渣影响周边环境。

5.1.3 施工一般采用半幅施工半幅通车的方式，半幅施工要求在2天内完成，全幅要求在4天内完成，不影响道路的正常通行。

## 5.2 施工准备

5.2.1 施工设计

测定施工道路路面各层材料及厚度，绘制施工图纸，包括施工材料清单、施工设备清单、施工计划安排等。

5.2.2 施工材料

施工前对各种施工材料进行质量检测，合格后方可使用，包括沥青混凝土材料、快速水泥稳定碎石材料、沥青粘层油、环氧树脂AB胶+硅微粉、道路压电能量采集器、道路附属设施、PVC管材、输电导线等。

5.2.3 施工机械

施工前对各种施工机械进行调试，防止机械故障引发的事故，包括铣刨机、铲车、路面切割机、冲击钻、摊铺机、双钢轮压路机、五胶轮压路机等。

## 5.3 沥青路面铣刨

5.3.1铣刨前依据施工图纸，确定道路压电能量采集器的布设和施工位置，并划线定位。

5.3.2 使用路面切割机沿着定位划线进行切割，切割深度为沥青路面面层高度加上道路压电能量采集器高度。

5.3.3 采用铣刨机将沥青路面面层及部分水泥稳定基层挖除，水稳层挖除高度与道路压电能量采集器高度一致。

5.3.4 利用冲击钻对铣刨不平的地方进行修整，保证道路压电能量采集器能水平放置。

5.3.5 铣刨完成后，采用人工及机械对沥青残渣进行清除转运，并对路面进行清扫。

5.3.6新建道路施工，浇筑水泥稳定层时利用模板浇筑留出埋置道路压电能量采集器的坑槽。

## 5.4 道路压电能量采集器埋设

5.4.1 利用快速水泥砂浆对坑槽底部进行找平，并将道路压电能量采集器放置于车道轮迹带上，利用膨胀螺丝进行初步固定，并使用水平尺调整至水平。

5.4.2 通过输电导线及防水盒并联连接各个道路压电能量采集器，并引出一条输电总线至路边。

5.4.3 利用快速水泥搅拌的水泥稳定基层材料进行浇筑，直至道路压电能量采集器表面和原水稳层表面齐平。用塑料布遮盖浇筑区域防止雨淋，待水泥凝固24小时后方可进行下一步。具体埋设位置如图1和图2所示。



图1 沥青道路水平铺设图



图2 沥青道路垂直埋设图

## 5.5 沥青路面摊铺及压实

5.5.1 铺设前将水稳层打扫干净，并铺洒沥青粘层油，增加层间结合力。

5.5.2 利用摊铺机进行沥青摊铺，沥青混凝土摊铺温度不低于160℃但不大于180℃，防止压电材料超过居里温度而失效。摊铺需满足各级公路沥青路面摊铺规范要求。

5.5.3 使用双钢轮压路机对沥青路面进行1-2遍初压，采用五胶轮压路机进行2-4遍复压，再利用双钢轮压路机进行2-3遍终压。压实需满足各级公路沥青路面压实规范要求。

## 5.6 道路低功耗附属设施安装

5.6.1 准备好需要埋设的道路低功耗附属设施，例如地磁传感器、温湿度传感器及LED诱导地灯等。

5.6.2 利用钻孔取芯机钻出对应尺寸的孔洞，将设备埋入后灌入环氧树脂AB胶和硅微粉，配合比为A胶：B胶：硅微粉=1：1：0.5。

5.6.3 将输电总线穿过PVC线管，PVC线管沿着道路外侧引至储能装置处，PVC线管采用路面钉及卡扣固定。

5.6.4 储能装置处的信号控制中心可采用一体式立杆，立杆需采用钢筋地脚笼+水泥混凝土的方式固定于路侧，并且不能影响行车视野。

# 6 工程质量检验与评价

## 6.1 一般规定

6.1.1 工程施工质量管理应符合本规范规定的技术要求。

6.1.2 压电发电道路施工应采用动态质量管理，强化施工前和施工过程中质量控制。

6.1.3 加强相关设备的监管，施工人员的培训，熟悉设备的应用场景及操作方法。

6.1.4 建立现场试验、施工质量及工序间的交接验收制度，试验、检验应做到原始记录齐全，严禁编造、修改，保证数据真实可靠。

6.1.5 各个施工工序完结后，均应进行检查验收，经检验合格后，方可进行下一个工序。经检验不合格的段落，必须进行返工或补救，使其达到要求。

## 6.2 材料与设备检验

6.2.1 道路压电能量采集器检验

（1）平整度：道路压电能量采集器上表面允许偏差不大于3 mm。

（2）整体强度：道路压电能量采集器的抗压强度应大于5 MPa，防止车辆碾压造成设备损坏。

（3）防水性能：道路压电能量采集器的防水性能要求达到IPX8等级。

（4）发电性能：埋设前使用万用表对道路压电能量采集器的输出电压进行检验，确保设备正常使用。

6.2.2 沥青混凝土材料

应满足当前公路等级的路面面层要求。

6.2.3 水泥稳定碎石基层材料

应满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF20—2015)要求。

6.2.4 施工机械设备检验

在正式施工前，应对所有施工机械设备进行检验，防止施工机械事故的发生。

## 6.3 质量与验收

6.3.1 压电发电道路施工质量验收

（1）当压电发电道路施工完成后，需对路面进行钻孔取芯，取样送至检测站对沥青混凝土面层和水泥稳定基层的质量进行检测，并出具检测报告。

（2）沥青路面压实完成后检测平整度，允许偏差值不大于3mm，不得存在明显拱起或凹陷路面，有严重缺陷时应进行修整乃至返工。

（3）在压电发电道路施工完成后，应每隔7天对路面平整度进行检测，观察压电路面是否出现裂缝、沉降、凹陷、凸起等现象，直至通车90天后。

6.3.2 压电发电道路发电性能验收

（1）在压电发电道路施工完成后，应采用示波器对道路压电能量采集器的输出功率进行测试，保证其埋设后的发电量仍满足系统供能。

（2）在压电发电道路施工完成后，应通过后台管理软件对电池电量进行实时监控，确保道路压电能量采集器处于正常工作状态。