

压电式能量收集道路技术途径 及其长期经济性研究

牛衍亮 著



科学出版社

压电式能量收集道路技术途径 及其长期经济性研究

牛衍亮 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书通过介绍压电能量转换理论推导、结构稳定性约束计算、有限元模拟与实验、学习曲线理论等,对压电式能量收集道路技术途径及其长期经济性进行研究。主要包括:分析不同结构压电换能器性能,研究结构较为适合的换能器在交通荷载作用下的力学响应及能量转换能力;探索适合于交通荷载环境、能够收集可观能量的换能器结构,并研究其能量转换性能决定性因素,估算潜在资源规模;研究能源技术成本长期动态演化规律,综合考虑技术进步、环境与再生性等因素,研究压电式能量收集道路长期经济性,并提出相应的政策建议。

本书可作为交通工程科研工作者、新能源技术工作者的参考书,也可作为高校相关专业研究生和本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

压电式能量收集道路技术途径及其长期经济性研究/牛衍亮著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-041666-7

I. 压… II. 牛… III. 压电效应-应用-交通-运输-荷载-机械能-能量转换-电能-研究 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 185712 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:钟 洋

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 8 月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:173 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以此书献给我的父亲、母亲

前 言

常规一次能源以化石能源为主是当前时代的特点,然而化石能源可预见的耗竭及其开发、使用过程产生的环境污染问题,迫切要求加速新型可再生清洁能源技术的发展。压电式能量收集道路是将交通荷载产生的部分机械能通过压电效应转化为可利用电能的一种新型、清洁的收集可再生环境能量的模式。研发适合交通荷载环境、高效、可靠的压电换能结构对于压电式能量收集道路的开发前景意义重大,压电换能结构直接影响潜在产能规模及其经济性。新型能源技术在其研发初期往往成本较高,从长期发展的角度在学习效用的作用下,能源技术成本动态变化。综合考虑技术进步、化石能源的稀缺性、环境以及政府补贴因素,对压电式能量收集道路的长期经济性问题会有更为深刻、更全面的认识。

目前,压电式能量收集道路作为一种新型理念,可以收集到的国内外相关理论成果还比较少,完善的理论体系尚未建立,鲜有运用到道路工程中的实际案例。对压电式路面能量收集进行研究,符合寻求可再生绿色能源的社会发展需求,符合交通基础设施可持续、低碳化、智能化的发展趋势。国内外相关技术的研究尚处于起步阶段(国外较国内领先),而且国外的诸多技术处于保密状态,无法直接使用。因此,有必要针对压电式能量收集道路系统的各项技术,建立和完善其理论体系并展开研究,力求对该项工程的研究进展,甚至今后的应用有一定贡献。

感谢黄如宝老师、赵鸿铎老师慷慨无私的帮助与支持!感谢陶宇杰、梁颖慧等同学,以及同济大学道路与交通工程教育部重点实验室对压电式能量收集道路实验研究的贡献与支持!感谢赵璋、于振宇、林善波、洪志生、刘国平和何贵友在我困惑于模型构建问题时,帮我召开研讨会理清思绪、分析方法!感谢张哲、闫书佳在程序实现方面对我的热

忱帮助!感谢房学谦、赵红丹、吴英姿、黄炎龙、温修春、张作雄、杨彦军、郭国和、郭玮、商红发、王伟、常惠斌、赵磊、施文、孔祥宇、田浩在本书写作以及相关问题解决方面给我的建议与帮助!

感谢 Laboratory EDDEN (University of Grenoble) 以及 Patrick Criqui 和 Philippe Menanteau 在能源技术成本与产量研究数据方面给予的无私支持;感谢全球能源数据统计部 Pierre Boileau、Aidan Kennedy、Pierre Boileau 在能源技术研发资金、化石能源价格、CO₂ 排放量,以及历年汇率与通货膨胀率等研究数据方面给予的无私支持;感谢 Intercontinental Exchange 数据中心 Kate Jazgara 在 CERs 交易价格数据方面给予的无私支持;感谢 Israel Institute of Technology Haim Abramovich 在压电换能研究方向上的指引!

感谢石家庄铁道大学经济管理学院、学科建设办公室在本书出版过程中给予的支持与帮助。感谢国家自然科学基金(1172185)的资助,在此一并表示衷心感谢!

限于作者水平,书中疏漏之处在所难免,恳望专家和读者指正。

作 者

2014 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 能源与环境	1
1.1.2 压电式能量收集道路	2
1.1.3 能源技术长期经济性变化	3
1.2 研究目标与意义	3
1.2.1 研究目标	3
1.2.2 研究意义	4
1.3 研究现状	4
1.3.1 压电式能量收集道路相关研究	4
1.3.2 能源技术长期经济性相关研究	10
1.4 研究思路与框架	16
1.4.1 问题提出	16
1.4.2 主要研究内容	16
1.4.3 关键问题	17
1.4.4 方法及路线	17
1.4.5 创新点	19
第 2 章 压电式能量收集道路技术途径	20
2.1 能量收集原理	20
2.2 基于能量转换效率的压电材料与传统换能结构比选	22
2.2.1 压电材料比选	22
2.2.2 传统压电换能器比选	23
2.3 桥型压电式能量收集道路产能计算及实验	24
2.3.1 桥型压电式能量收集道路产能计算	24

2.3.2	桥型压电换能器实验室实验	27
2.3.3	桥型压电换能器结构优化	32
2.4	本章小节	33
第3章	桩型压电式能量收集道路技术研发与经济性分析	34
3.1	新模式技术原理与能量转换能力计算	34
3.1.1	无结构模式	34
3.1.2	新模式技术原理-桩型结构原型模型产生	35
3.1.3	桩型模式能量转换能力计算	36
3.2	桩型压电换能结构优化	37
3.2.1	不同支撑模式下的顶板拉、压、剪应力变化规律	37
3.2.2	不同支撑模式下顶板变形规律	40
3.2.3	不同支撑模式下压电陶瓷桩集中应力变化规律	41
3.2.4	面向能量收集的压杆稳定分析	43
3.2.5	动载作用下路面响应特征	46
3.2.6	桩型压电式换能结构实验室实验	49
3.3	压电式能量收集道路技术经济分析	51
3.3.1	基于能量转换效率的路面结构分析	51
3.3.2	平面布局模式	54
3.3.3	潜在资源总量	56
3.3.4	不同结构形式压电换能器的对比分析	57
3.3.5	单位成本估算	58
3.4	本章小结	59
第4章	能源技术成本长期动态演化	61
4.1	学习曲线模型因素分析与选择	61
4.2	累计研发与累计产量共同作用下的学习曲线模型	64
4.2.1	能源技术成本动态变化路径	64
4.2.2	模型构建	67
4.2.3	结果分析	69
4.3	能源技术成本长期变化的参考价值及模型改进	71
4.3.1	能源技术成本长期变化的参考价值	71

4.3.2	含有一个底限参数的学习曲线模型	71
4.3.3	累计知识与阶段性	72
4.4	本章小结	73
第5章	压电式能量收集道路长期经济性研究	74
5.1	能源经济性影响因素	74
5.1.1	能源分类与能源属性	74
5.1.2	技术进步因素、环境因素与再生性因素	76
5.2	压电式能量收集道路长期经济性模型及参数	77
5.2.1	关于技术进步因素的模型与参数	78
5.2.2	关于环境因素的模型与参数	79
5.2.3	关于再生性因素的模型与参数	79
5.3	长期经济性多情景敏感性分析	80
5.3.1	情景敏感性分析	80
5.3.2	针对技术进步因素的情景敏感性分析	81
5.3.3	针对环境因素的情景敏感性分析	84
5.3.4	针对再生性因素的情景敏感性分析	86
5.3.5	多因素变化情景综合分析	87
5.3.6	补贴情景	89
5.4	本章小结	91
第6章	新型可再生清洁能源补贴政策建议	93
6.1	区分公平属性与鼓励属性的补贴模式	93
6.2	针对能源再生性的政府补贴	95
6.3	针对能源环境属性的政府补贴	97
6.4	关于新型可再生清洁能源战略的思考	98
6.4.1	全球新能源产业布局	98
6.4.2	关于我国能源战略的思考	99
6.4.3	制定新能源鼓励性补贴政策需要研究的问题	101
6.5	本章小结	102
第7章	结论与展望	103
7.1	研究工作总结	103

7.2 进一步研究的展望	105
参考文献	108
附录 A 力学响应计算报表(部分)	118
附录 B 压电陶瓷性能参数	119
附录 C 桥型换能器实验尺寸及损坏图示(部分)	120
附录 D 路面结构层及标准轴载参数	121
附录 E 五种支撑模式下顶板各点竖向位移图	122
附录 F 桩型换能器实验图(部分)	124
后记	127

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 能源与环境

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,是国民经济发展的命脉。纵观人类的能源史,世界各国都经历了柴薪时期和化石能源时期,并逐步走向可再生能源时期。人类发展历史中最初的几千年里处于柴薪时期,能源主要以生物质能为主。18 世纪中期开始随着科学技术的发展、高品质能源需求的扩大、化石能源开采水平的提高,人类逐步过渡到以煤、石油为主的化石能源时期,能源的相对廉价在一定程度上促进了科技革命的进程,以及工业化国家的经济发展。然而,化石能源属于非可再生能源,虽然化石能源可开采的具体年限尚未有统一的定论,但其可预期的耗竭已是共识,能源结构从非可再生能源转向可再生能源的调整是人类能源结构发展的趋势。

从我国社会发展阶段及经济发展模式来看,能源需求总量将持续增长。国家规划从 2000 年到 2020 年,全国 GDP 翻两番,而能源消耗增长一倍,这意味着能源对 GDP 的弹性系数为 0.5,但是 2006~2008 年能源对 GDP 的弹性系数在 1.3 以上^[1]。我国处于并将长期处于社会主义初级阶段,经济发展较快,GDP 保持 7%~9% 的高速增长势头。能源需求总量的持续急剧增加将给我国能源供应带来巨大压力,化石能源价格同时呈现不断上涨态势。

从我国能源结构来看能源的开发和使用对环境的影响严重。中国的能源结构与发达国家以油气为主的能源结构有所不同。截至 2007 年年底,中国常规一次能源探明和剩余可采资源量中煤炭占 73.2%,石油占 1.3%,天然气占 1.3%,水能占 24.2%^[2]。我国能源结构的特殊性,决定了一次能源以煤为主(70%左右)的特点^[3]。能源使用中产生

的污染物质主要是 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5\sim 10}$ 和 Hg, 这些污染物 80% 是由化石能源的使用, 尤其是煤的直接燃烧所引起; 燃煤产生的 CO_2 占 CO_2 总排放量的比例超过 50%^[4]。

化石能源价格不断攀升, 且开发、使用化石能源造成的环境污染和生态退化等问题日益严重。为应对严峻的节能减排形势, 我国于 2005 年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》, 为大力推动可再生能源发展提供了法制保障。对可再生能源的开发利用规定了一系列的政策扶植措施, 设立国家专项基金, 制定可再生能源上网电价、费用分摊及税收优惠政策, 大力支持可再生能源发展。

能源是人类社会存在和发展的基础, 可持续发展首先是能源的可持续发展。大力发展可再生清洁能源技术是解决能源及与之相关的环境问题的重要措施。

1.1.2 压电式能量收集道路

可再生能源可以从环境中不断得到补充或在较短周期内再产生; 人类生存的物质环境中广泛存在大量可再生的环境能量, 如风能、水能、太阳能和生物质能等。将可再生的环境能源加以收集和利用, 与化石能源相比, 更加符合可持续发展的要求。

道路作为重要的基础设施, 对国民的生产、生活及国家的经济增长起着重要的作用。随着我国国民经济的快速发展, 运输需求持续增长, 既为道路工程建设事业的发展提供了难得的机遇, 同时也对其提出了更高的要求。

道路在承担交通功能的同时也存在大量的环境能量, 可以通过压电模式将道路上交通荷载产生的部分机械能源转化为可利用的电能。截至 2007 年年底, 我国公路里程为 358.37 万 km ^[5], 2008~2010 年共新建公路 32.45 万 km ^[6], 随着交通量的持续增长, 以良好的机电转换效率为基础, 潜在可利用的能量可观。从能量收集的角度来看, 作为一种潜在的、规模可观的、可再生的清洁能源, 压电式能量收集道路有巨大的研究前景。从铺面技术发展的角度来看, 智能道路中大量的传感器件, 以及交通工程中各种信息板、信号灯、发光路组等都需要能

量的供应,因此铺面技术的发展对道路能量收集技术也有广阔的需求。

1.1.3 能源技术长期经济性变化

20 世纪 70 年代的石油危机推动了能源系统模型研究的发展^[7]。

① 寻找减少对昂贵石油能源依赖程度的途径。

② 评估各种能源经济政策有效性。

基于这两个研究方向发展为两类模型,即自下而上式面向技术的优化与模拟模型,主要服务于第一目标;自上而下式面向宏观经济的将能源看作一个经济部门作为研究对象的模型,主要服务于第二目标。针对能源技术发展的研究在第一目标的推动作用下得到了广泛的关注。

能源技术的经济性影响着能源技术的应用、推广及全球能源供给格局。单位成本的动态变化作为能源技术经济性的重要内生表现,能动的促进着能源技术的发展。新型能源技术在研发初期单位产出成本往往高于常规能源技术,然而随着前者技术的发展及生产经验的积累,其单位成本长期来看呈下降趋势。

除了新能源技术内生技术进步因素外,外生因素,如化石能源价格变化、环境、政府补贴等因素也对新能源技术长期经济性有重要的影响。能源技术经济性在技术进步、可/非可再生性、环境等因素的长期综合作用下动态演化。

1.2 研究目标与意义

1.2.1 研究目标

① 研究压电式能量收集道路技术途径,探索与交通荷载耦合性高、产能量可观的换能器结构形式。

② 推演能源技术成本动态变化、模拟分析压电式能量收集道路长期经济性,并提出响应政策建议。

1.2.2 研究意义

(1) 理论意义

将道路工程建设与能源开发利用相结合,逐步形成新型的从环境中收集可再生能源的道路建设模式,对丰富道路工程理论体系具有一定的理论意义。

推演能源技术成本长期动态变化路径,研究技术进步、再生属性、环境等因素共同作用下的压电式能量收集道路经济性,对于丰富和完善新型可再生能源经济性理论及自下而上式面向能源技术的优化与模拟体系具有一定的理论价值。

(2) 现实意义

压电式能量收集道路在满足传统道路使用功能的前提下,增加了收集能量的附加效果;作为一种新型能源模式,其能量来源清洁无污染,且在环境中持续稳定存在,符合国家大力发展新型可再生能源和保护环境的要求;转化的电能有较广的应用渠道,如交通工程设施、智能道路设备、电动汽车供电等。

从长期发展的角度,研究多因素共同作用下的新型可再生清洁能源技术经济性问题,对能源战略及支持政策的科学制定有一定的现实意义。

1.3 研究现状

1.3.1 压电式能量收集道路相关研究

1. 路域能量收集模式相关研究

近年来,能量收集技术迅速发展,随着科技的进步,多种不同的技术可以将环境中的能量收集并加以利用。在道路工程领域进行的能量收集方面的研究主要包括光能、热能和机械能。

(1) 光电模式

光能与电能之间的转化技术是较为成熟的技术之一。通过光电材料,如高纯单晶硅光电池等将太阳能转化为电能。其概念模型是将

太阳能板铺设于透明材料制成的路面面层之下,产生的电能可用于公路的照明。Wu 与 Huang 等^[8~10]对该模式经济的可行性进行了一定研究工作。

(2) 热能利用模式

热电模式:在热梯度空间中通过热电转化材料将热能转化为电能。Heseble 等^[11]研究了利用路面收集的热能并将其转化为电能的可能性,同时通过实验与理论模型论证其能量转换效率等问题。

热能直接利用模式:由于太阳光的照射以及行驶车辆与路面摩擦产生大量热量致使路面温度较高,尤其是黑色的沥青路面具有很强的太阳能吸收能力,其吸收系数可达 90%,且路面集热面积大^[12,13]。换热介质经管道将路面吸收的热量储存或直接与其他物质进行热交换。荷兰^[14]、英国^[15,16]和美国^[17~19]等国家都已广泛开展道路热能的利用研究,包括路面降温、饮用水加热、道路除雪和区域供暖等。

(3) 机械能—电能模式

气(液)压—电力发生器模式:将气压活塞或液压泵安装于路面结构中,利用车辆经过时向下的作用力对活塞或泵做功,通过活塞或泵驱动电力发生装置。Smith^[20]、Levan^[21]和 Bridwell^[22]在相关领域做了大量的研究工作。

压电模式:将压电材料铺设于道路路面结构中,利用压电效应将道路上交通荷载产生的部分机械能转化为电能,继而将产生的电能收集、处理加以利用,其本质是将机械能转化为电能。2008 年,以色列的 Innnowattech 公司与海法理工学院共同研发了用于道路的 IPEGTM压电发电系统^[23]。Lee 等^[24]研究了路面动态荷载作用下基于压电效应的能量转化影响因素及其之间的关系。剑桥大学 Ye 等^[25]采用遗传算法对基于路上交通荷载的压电能量收集系统进行了优化研究。我国西安交通大学、武汉理工大学的研究人员也进行了相关的研究工作,并申请了发明专利^[26,27]。Zhao^[28]基于有限元对应用于沥青路面进行能量收集的钹式压电能量收集器参数进行了分析优化,在 20Hz、0.7MPa 交通荷载的作用下,按照其设计的钹式换能器,计算机模拟单个钹式压电能量收集器可产出功率为 1.2mW 的电能。

电是非常好的载能体,而且电能已经建立了覆盖全球的网络^[1]。人类生活环境中存在的大量可再生的环境能量可以通过不同的技术转化为电。能量收集技术的能量转化强度如表 1.1 所示。

表 1.1 能量收集技术的能量转化强度^[29]

转化	光	热力梯度	气流	压电
能量转化强度	100mW/cm ²	375μW/cm ²	1mW/cm ²	200~700mW/cm ²

对于光电模式,光伏发电技术成熟,难点在于满足路面强度、刚度和耐久性能透明覆层设计。对于热能利用模式,利用热力梯度发电技术的能量转换效率较低,热能的直接利用具有较好的实用性,然而热能的使用与传输存在一定的局限性。气(液)压-电力发生器模式活塞运动对路面使用性影响较大,不利于推广使用。对于压电模式,能量转换率较高,随着交通量的增长,潜在可收集能量可观。

2. 压电式能量收集道路技术相关研究

Kymissis 等^[30]在麻省理工学院将压电晶体置于鞋内,研究出一种发电鞋。测定发现压电晶体产生的峰值电能为 80mW。

Yoshiyasu^[31]开发了一种基于压电效应的应用于地铁、商场入口的能量收集装置,并进行了现场测试。

Kwon 等^[32]将悬臂式压电换能结构置于低频荷载环境中(类似步行频率)研究其能量转换效率。

Robert 等^[33]研究出一种基于压电效应能量收集的智能地板。

图 1.1 和图 1.2 为以色列科研小组研制的可用于道路的压电能量收集系统^[23],采用该能量收集系统,交通流量为 600 辆/h 的一条双车道道路上每千米时能产生 0.4mW 以上的电量,可以支持 400~600 户家庭的日常用电,且随着交通量和车重的增加,收集的电能也随之增加。IPEGTM的使用不会增加车辆单位油耗,其使用寿命可达 30 年。

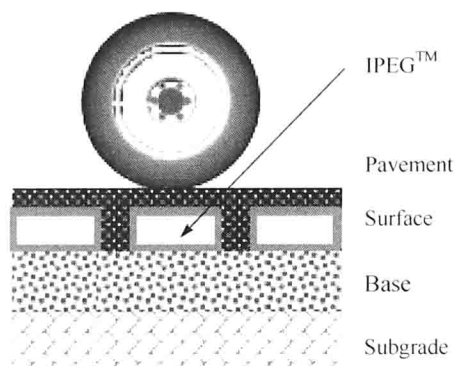


图 1.1 IPEG™的概念模型



图 1.2 IPEG™现场实验

除此之外,在交通领域压电材料还被用于采集交通量和车速。

3. 压电能量收集技术相关研究

压电材料包括无机压电材料、有机压电材料和复合压电材料三大类,其特殊性在于该材料具有正、逆压电效应。正压电效应表现为机械荷载作用于极化后的压电材料时,有电荷产生;反之,该材料在外加电场的作用下,会沿某个方向产生变形,称作逆压电效应。基于正压电效应,经过极化的压电材料受外部荷载作用则产生电能,对其进行预处理、储存和传输后可以加以利用。压电效应的实质是机械能与电能的转换效应。针对压电能量收集机制的研究可分为能量转化效率、压电材料与结构、能量储存与转换电路。

(1) 能量转化效率

针对压电材料能量转换效率的研究,为了有效地转换能量,我们希望有较高的机电耦合系数 k^2 值,但 k^2 不应被认为是效率量度的全部内涵。定义机电耦合系数是在理想的、不考虑损耗的情况下进行的,此时未转换的能量并不损耗,而是以弹性变形方式或电场方式储存起来。效率是有效的转换功率与输入功率之比,是对能量转换能力大小的量度。

Cho 等^[34]为了优化压电能量收集装置的性能,综合考虑机电耦合系数 k^2 和品质因子 Q 对能量转换效率的影响,利用不同 k^2 和 Q 组合可得到较高的转换效率,从而使压电能量收集结构的能量收集性能最佳。