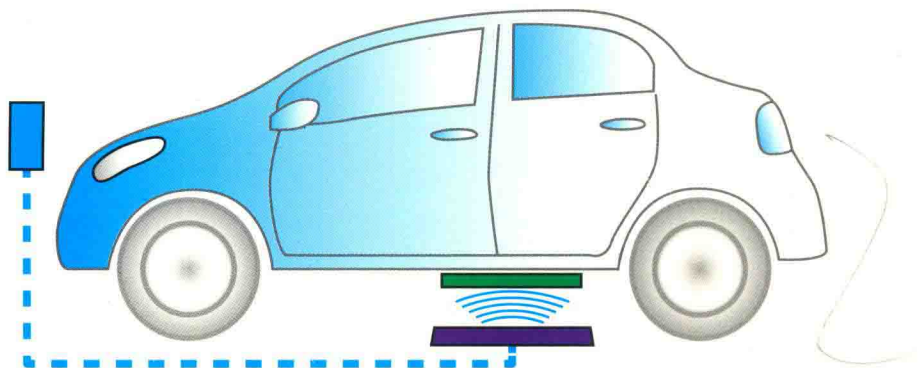


SAE 国际自动机工程师学会 (SAE INTERNATIONAL) 授权出版

北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Wireless Charging Technology and the Future of Electric Transportation




无线充电技术和 电力传输的未来

【韩】徐寅秀 (In-Soo Suh) 等 著
翟丽 (Li Zhai) 译

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

 国际自动机工程师学会 (SAE INTERNATIONAL) 授权出版

北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书



Wireless Charging Technology and the
Future of Electric Transportation

无线充电技术和 电力传输的未来

【韩】徐寅秀 (In-Soo Suh) 等 著
翟丽 (Li Zhai) 译

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

无线充电技术和电力传输的未来 / (韩) 徐寅秀 (In - Soo Suh) 等著; 翟丽 (Li Zhai) 译. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 1

书名原文: Wireless charging technology and the future of electric transportation
ISBN 978 - 7 - 5682 - 5276 - 8

I. ①无… II. ①徐… ②翟… III. ①电动汽车 - 充电 IV. ①U469. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 084795 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2016 - 4591

Originally published in the English language by SAE International, Warrendale, Pennsylvania, USA, as *Wireless Charging Technology and The Future of Electric Transportation* Copyright © 2015 SAE International.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 220 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 78.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

本书的出版得到了北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金的资助和国家外国专家局“外国文教专家项目”的大力支持，在此表示衷心的感谢。

译者序

无线充电技术不仅可用于消费电子产品、工业自动化设备和医疗设备，还可用于新能源汽车和轨道交通车辆的电力供应。《无线充电技术和电力传输的未来》是一本关于无线电能传输技术的参考书，描述了无线电能传输（WPT）技术的发展现状，重点描述了WPT在电动汽车无线充电和未来绿色交通领域中的应用。本书对WPT的一些关键问题进行了深入分析，并提供了有价值的参考。

第1章描述了无线充电的基本工作原理，并比较了不同类型的电能传输技术。第2章描述了未来汽车电气化及其关键技术问题。第3章讨论了电动汽车传导充电和无线充电的技术发展。第4章描述了网联电动汽车的特征和商业化应用。第5章描述了无线充电技术存在的问题和面临的挑战。第6章描述了WPT电动汽车市场策略和无线充电技术标准。第7章讨论了无线充电技术在汽车消费电子产品上的应用。第8章描述了WPT在轨道交通中的应用。第9章描述了远距离电能传输的发展历程、原理和应用。第10章介绍了WPT在工业运输方面的应用。

本书翻译过程中，曹玉、林立文等研究生做了大量工作，同时和宋超、黄鸿、冯惠源、章涛、李广召、孙天民、侯如非、王泽达、钟广缘、胡桂兴等研究生参与了部分翻译和校对工作，在此一并表示感谢。感谢北京理工大学电动车辆国家工程实验室各位同事给予的帮助和提出的宝贵意见或建议。感谢北京理工大学出版社各位编辑认真细致的工作。全书由翟丽统稿，由于译者水平有限，加上本书无线充电技术涉及的知识面广而新，译文中难免有不妥甚至错误之处，恳请广大读者批评指正。译者电子邮箱：zhaili26@bit.edu.cn。

本书可作为从事无线充电技术的科研人员和工程技术人员的参考书，也可作为车辆工程、电气工程、信息与电子工程等相关专业本科生和研究生的参考书。

本书的出版得到了国家自然科学基金（项目号：51475045）和十三五装备预研基金的资助。

译者

2018年4月

概述

20世纪90年代初期,从尼古拉·特斯拉在长岛沃登克里弗广播塔进行的试验开始,一个世纪以来,人们一直想实现一个功能,即不通过电线就能将电能从电源处传输到电气设备。对于这项功能技术,科研人员做出了一些科研成果,而且近期在市场上也有一些相关产品出现。随着短距离感应式电能传输接口标准 Qi 的公布和无线充电联盟(WPC)2009年8月的关于 Qi 低功率传输规范的颁布,移动设备的无线充电技术获得了强劲的发展动力并成为主流趋势。在过去10年里,随着技术的巨大进步、商业化的实施和法规的完备,出版了在电动汽车、移动设备、家电、工业电子和医疗植入物等关于无线电能传输技术应用方面的文献。

2009年夏季,KAIST(韩国科学技术研究院, www.kaist.ac.kr)启动了一项称作OLEV的动态无线充电研发项目。该项目在技术潜在吸引力、传输距离和效率等技术指标以及商业化试运行等方面存在大量问题。当时,由于存在电池技术的限制、充电设施不足、总供电和用电需求的矛盾以及监管和社会阻力的应对措施迟缓等,尽管有政府和全球未来绿色交通需求大力推动,但电动汽车在市场的占有率仍并不理想。

几辆采用OLEV动态无线充电技术的电动客车和有轨电车在2009年至2011年的示范运行引起全球媒体的广泛关注。该示范运行突出了全电运行车辆、路面充电设施和诸如系统传输效率、电池充电速率、效能经济分析、电磁场抑制以及进一步的维修保养方面的考虑等运行参数的集成。

于2010年1月,作为负责OLEV有轨电车在首尔大公园历史性运行项目的总工程师,我对无有线充电器的OLEV有轨电车首次运行2.3 km环形路段的成果,感到十分自豪。就2015年而言,每15分钟有4辆载人的纯电动汽车运行是动态无线充电在历史上可商业运作的有力证明。此外,两辆公交车作为韩国龟尾市每天公共城市交通的一部分在运行服务,可成为一个实用的商业化试验平台。另外,在韩国

科学技术研究院校园内,有两辆班车每15分钟运行一次,可用于静态或动态充电来提供电能。这项创新技术从研发到运营阶段才用了不超过5年的时间。

韩国科学技术研究院的成果被《时代》杂志和《世界经济论坛》认可,并将其选为2010年和2013年最创新的交通技术之一。除了韩国科学技术研究院取得的成就之外,还有几家单位的贡献也是不容忽视的,如橡树岭国家实验室、汽车原始设备制造商、高通公司、MIT(麻省理工学院)、Bombardier(庞巴迪公司)、欧洲协会-FABRIC以及英国交通研究实验室(TRL)的最新建议等,他们通过会议讨论、提供试验平台等形式做出了不少贡献。

从2010年年底开始,电动汽车无线充电技术标准方面取得了比较大的进展。特别是SAE J2954标准的提出,重点阐述了电动汽车和插电式混合动力汽车的无线充电技术。总的来说,在过去几年中,对市场销售的电动车辆的规定已经足够全面、系统和细化。例如,IEC 61980、ISO 19363和IEC CISPER 62764。

本书作为一本参考书,描述了无线电能传输技术研究的发展现状,重点描述了WPT技术在电动汽车充电和未来绿色交通领域中的应用。本书只对全球研究发展现状做出了总体概述,而不是以专门技术及相关论述为重点。

在第1章中,讨论了与未来可持续性交通相关的无线电能传输技术的基本原理。在第2章中,讨论了电动汽车最新技术、市场现状和生产预期,也包括电动汽车WPT应用的技术可行性研究。在第3章中,讨论了电动汽车传导式充电和无线充电技术的技术性比较。在第4章中,描述了OLEV系统和系统的技术细节有关的内容。在第5章中,讨论了WPT技术在发展和使用阶段出现的技术问题和挑战,如充电过程中初级线圈和次级线圈之间的通信协议、技术性能参数、相关的安全性以及电磁场发射问题。在第6章中,讨论了与市场相关的投资者战略和技术标准。在余下的四章中,除了讨论远距离电能传输以外,还讨论了无线电能传输技术在消费电子、铁路、航空、海运和越野交通中的各种应用。

在我们规划好了这本书的涵盖内容之后,还发表了许多关于无线电能传输技术进展的论文。这些论文的技术概述涵盖了近期技术进展,可能会在另外的图书或综述论文中论述。

序言

2011年1月，我编辑了SAE出版物——《绿色科技和移动性产业》。它强调了把环境作为商业发展的一个重要的新型“绿色发展模式”。环境和气候的变化、石油价格、安全以及经济关注点都是区域和全球经济发展所面临的挑战。电动汽车的研发进展为移动产业如何应对少污染、可持续以及长期有效的技术解决方案提供了有说服力的参考。In-Soo Suh博士和他的同事们在《无线充电技术和电力传输的未来》这本书中，对该主题进行了进一步讨论并且推动了电气化移动性解决方案的进程。

没有任何可以违背成本效率规律的产业，现在的成本计算公式包括由环境破坏造成的货币价格和非货币价格、碳排放的持续影响以及应承担的社会责任。在世界各地，政府越来越控制和限制温室气体（GHG）排放，并激励创造和使用无污染技术。

在接下来的十年左右，相关产业预测表明，尽管目前电动汽车在亚洲的普及率还比较低，但是电动汽车的产量却在逐年增加。大多数分析师保守地预计到2025年电动汽车的普及率将低于5%，但是在目前一些产业的预测结果看来，到2025年电动汽车的市场普及率会达到15%。更多的电动汽车研发计划将会继续实施。

在世界各地，主要的汽车制造商正在研发传导式充电和无线充电技术策略，致力于建立电动汽车无线充电技术标准，重点考虑安全性和互用性。除了电气安全的要求，工作频率配置和人体电磁场暴露已成为技术标准委员会关注的重要问题。

尽管目前汽车产业集中发展插电式混合动力汽车或电动汽车的静态无线充电技术，传输容量低于7 kW的一些原型产品研发技术已表明动态无线充电传输容量已超过10 kW。在本书中提及的由In-Soo Suh博士负责项目中的在韩国首尔大公园公开投入使用的载客车辆运行情况已充分说明了这一点。

《无线充电技术和电力传输的未来》涵盖了无线电能传输（WPT）技术的现状以及在未来道路和轨道交通运输

系统中的潜在应用。这是一本可以引起读者兴趣的参考书，它提供了以下几个方面的内容：

- 无线电能传输技术的工作原理。
- 目前的技术现状及其对未来电动汽车行业的影响。
- 电动汽车传导式充电与无线充电的比较。
- 动态无线充电系统介绍。
- 技术挑战和国际技术标准。
- 在消费电子、铁路、航空、海运和越野交通中的应用。
- 远距离电能传输。

通过提供近期 WPT 技术的研发现状，本书为读者、年轻工程师、研究人员和其他在这些学科上寻求先进知识的人们提供了非常宝贵的帮助。

Andrew Brown, Jr. 博士, PE, FESD, FSAE, NAE
副总裁兼首席技术专家 (退休)

德尔福汽车

2010 SAE 总裁

致 谢

作为这本书的第一作者，我衷心地感谢其他作者接受我的邀请和做出的贡献。刚从 ORNL 退休的 John M. Miller 博士作为本书的作者和审稿人提供了有价值的反馈意见。感谢来自德国弗里德里希-亚历山大埃朗根-纽伦堡大学领导、国际电力驱动生产协会领导 Jorg Franke 教授和 Florian Risch 博士做出的贡献；感谢来自日本京都大学的 Naoki Shinohara 教授，正是由于他的热情和不断的好奇心，鼓励了我继续出版这本书。我还要感谢来自德国 Vahle 的 Faical Turki 博士在 WPT 商业化应用方面贡献了自己的观点；感谢 KAIST 的 D. H. Cho 教授和 S. Jung 研究教授有价值的建议；感谢刚从韩国铁道研究所总裁 (KRRI) 卸任的 S. Hong 博士关于 WPT 在铁路应用方面做出的贡献。尤其感谢 KAIST OLEV 项目组的自 2009 年以来的所有参与成员，因为我们共同经历了许多挑战。

特别感谢 Andrew Brown 博士在审稿过程中给予的鼓励和详尽的反馈意见。在编辑过程中，我的博士研究生 J-Kim，给予了很大的协助。感谢 SAE 国际的 Monica Noguera 女士在整个成稿过程中给予的意见和所做的有益修订。

In - Soo Suh, 博士, 第一作者
副教授, 绿色交通研究生院, KAIST
《IEEE ITS》杂志副主编
研究策划人, 韩国国家研究基金会

目 录

- 第1章 引言 / 1
 - 1.1 无线电能传输技术简介 / 1
 - 1.2 交通运输领域的无线电能传输 / 9
 - 1.3 微型车辆和无线电能传输 / 12
 - 1.4 全书结构 / 15
 - 参考文献 / 16
- 第2章 绿色交通与电动汽车 / 19
 - 2.1 未来车辆的动力传动发展趋势 / 19
 - 2.2 智能交通系统 / 27
 - 2.3 电动汽车充电系统 / 30
 - 2.4 WPT 在电动汽车上的应用 / 34
 - 2.5 未来交通无线充电的含义 / 37
 - 参考文献 / 40
- 第3章 电动汽车充电技术：传导式充电和无线充电 / 42
 - 3.1 传导式充电 / 42
 - 3.2 无线充电 / 45
 - 3.3 商业 WPT 技术 / 49
 - 3.4 无线充电的推行 / 50
 - 参考文献 / 53
- 第4章 网联电动汽车 (OLEV) 技术概述 / 54
 - 4.1 背景 / 54
 - 4.2 定形共振磁场 (SMFIR) 技术 / 55
 - 4.3 总体系统 / 56
 - 4.4 供电基础设施的设计 / 58
 - 4.5 功率采集系统的设计 / 61
 - 4.6 SMFIR 在大巴车上的应用 / 63
 - 4.7 SMFIR 在列车上的应用 / 66
 - 参考文献 / 68
- 第5章 无线电能传输技术问题和挑战 / 70
 - 5.1 车辆与基础设施之间的通信 / 70
 - 5.2 初级侧充电板的对齐 / 74

- 5.3 间隙变化的挑战 / 75
- 5.4 充电过程控制 / 78
- 5.5 障碍物探测 / 80
- 5.6 紧急关断 / 81
- 5.7 正常关断 / 84
- 5.8 电气安全: 高频隔离变压器 / 86
- 5.9 发射 / 87
- 5.10 电网电能质量 / 89
- 5.11 安装与调试 / 90
- 5.12 总结 / 91

参考文献 / 91

第6章 电动车辆无线电能传输的市场、 战略及标准 / 93

- 6.1 简介 / 93
- 6.2 电动车辆 WPT 的最优化问题 / 96
- 6.3 WPT 基础设施优化设计的仿真方法 / 98
- 6.4 使用 WPT 系统运营车辆的应用领域 / 100
- 6.5 总结 / 106

参考文献 / 107

第7章 汽车工业消费电子产品的无线充电 / 109

- 7.1 消费电子产品的无线充电概述 / 109
- 7.2 设计上的考虑 / 114
- 7.3 汽车无线充电的应用 / 115

参考文献 / 116

第8章 WPT 在铁路中的应用 / 117

- 8.1 无线功率传输在铁路中应用的系统综述 / 117
- 8.2 轨道分段开关 / 119
- 8.3 WPT 在地铁和轻轨上的应用 / 123
- 8.4 磁悬浮列车 / 133
- 8.5 轻轨应用 / 138
- 8.6 无线低地板列车 / 141

参考文献 / 145

第 9 章 远距离电能传输 / 147
9.1 简介 / 147
9.2 远距离电能传输的历史 / 148
9.3 远距离电能传输的理论 / 151
9.4 远距离电能传输的近期应用 / 154
9.5 总结 / 159
参考文献 / 159
第 10 章 WPT 的工业应用 / 162
10.1 系统概述 / 163
10.2 起重机上的应用 / 165
10.3 自动导向车上的应用 / 166
10.4 平板式输送机上的应用 / 167
10.5 运输车上的应用 / 168
10.6 电力单轨系统中的应用 / 168
10.7 分选技术中的应用 / 169
10.8 无尘室技术中的应用 / 170
10.9 升降系统中的应用 / 171
参考文献 / 172
结束语 / 173
专业术语 / 174
作者简介 / 183
后记 / 187

1.1 无线电能传输技术简介

无线电能传输 (WPT) 是指不需要通过导体或电缆将电能从电源传输到电气负载的电能传输。WPT 系统包含以下 4 种类型: 声传输、光传输、容性传输和感应式传输^[1-1]。

声波无线电能传输是一种通过由发射换能器组成的电力电子电路, 将电能发射到通过媒介传递的声波中。通常, 声波无线电能传输 (也叫超声波能量传输) 用于给生物医学设备供电, 功率最高可达 100 mW, 峰值功率的总转换效率通常低于 40%。

光 WPT 通过由激光二极管和光电二极管组成的光学系统传输能量。虽然光 WPT 技术和微波 WPT 的发射原理类似, 但它们在适用范围上存在差异。简单而言, 光 WPT 没有明确定义电磁力 (EMF), 但由于存在衍射损失, 它不能像微波 WPT 那样能传输大量的电能。相关报道指出光 WPT 效率是 20% ~ 30%。光 WPT 主要应用于航天器平台和陆地技术领域^{[1-2][1-3][1-4]}。

容性 WPT 系统是通过与高频谐振电力电子转换器连接的两个初级金属板来传输电能的。当两个隔离的次级金属板放置在电路中时, 两套板之间形成一个交变电场, 产生移位电流。因此, 能量可以传递到没有线缆连接的负载上, 并且在初级板和次级板之间可以进行一定的自由流动。容性 WPT 系统的功率等级是 5 ~ 50 W, 效率是 50% ~ 80%。容性 WPT 系统的典型应用是为发光二极管 (LED) 灯、手机、足球机器人、呼吸机传感器、生物电势测量系统和其

他设备提供电能^{[1-5][1-6]}。

感应式 WPT 技术是通过电流在初级和次级线圈之间产生的磁场耦合，并且不需要线束或者不直接与金属导电板接触。其概念类似于电力变压器^[1-7]。现有的感应式 WPT 技术的主要优点是传输电能的效率超过了 98%。然而，感应式 WPT 只有在初级线圈和次级线圈之间的距离很短时才有效。此外，两个线圈未对齐也会降低效率。

为了解决感应式 WPT 存在的局限性问题，目前，研究介绍了多种磁谐振 WPT 方法来增加两个线圈之间的气隙^[1-8]。这些方法将在后面的章节中讨论。磁谐振 WPT 的原理是当初级线圈和次级线圈满足谐振频率条件时，就会产生谐振磁耦合。与纯感应式 WPT 比较，磁谐振 WPT 的优点是存在较少的线圈对齐问题，能在具有更长距离的两个线圈之间传输能量。基于谐振的 WPT 可以应用在各种领域中，如电子、医学植入和交通运输领域。

1.1.1 无线电能传输理论

典型的传导式能量传输发生在闭合电路中，通过导体直接传输能量。无线电能传输是非接触式的能量传输，包括电感式或电容式耦合能量传输，如传统的变压器和电容器。值得注意的是，50 Hz 或 60 Hz 低频率的交流电能从变压器的初级线圈通过一个狭窄的气隙传递到次级线圈，这种现象称为强耦合近场感应能量传输或紧耦合无接触能量传输。如果工作频率足够高，因为磁场的快速变化会影响气隙间的能量传输，所以两个电路之间的感应耦合会加强。然而，为了满足高功率和线圈之间长距离的应用需求，需要提高功率传输效率（使功率因数最大化）。为了提高功率传输效率，可以在谐振电路中使用谐振电容器，根据初级线圈的工作频率来调节次级线圈的谐振频率。当获得最大的功率因数时，获得的传输效率最大，这被称为谐振条件。

为了解释 WPT 谐振原理，采用了两个隔离电路（由电阻、电容和电感组成）^[1-9]。根据描述，原理图可视为松耦合电路的等效初级电路和次级电路，如图 1.1 所示。图 1.1 中的下标 1 和 2 分别代表初级和次级线圈， L 、 R 、 C 分别代表电感、电阻和电容。 V_s ($= V_1$) 代表初级电路的源电压， R_L 代表次级电路的负载电阻。初级和次级线圈的匝数比为 n 。当电源的工作角频率是 ω 时，互感 M 可以由式 (1.1) 确定。

$$M = \frac{V_s}{\omega I_1} \quad (1.1)$$

两个线圈之间的耦合程度用耦合系数 k 表示，互感系数可以用式 (1.2) 表示。