

摘 要

目前，供电方式主要有两种。一种是通过两根线缆构成闭合回路进行电能传输，另一种是借助空间无形软介质进行电能传输的无线电能传输技术。虽然这两种供电方式满足了生活中大部分的用电需求，但随着用电场景的不断丰富，两种供电方式存在的弊端逐渐开始暴露出来。传统有线输电技术容易产生火花放电，从而影响用电安全。而传输距离是限制无线电能传输技术进一步发展的瓶颈。因此，为进一步提高电能传输的便捷性与高效性，有必要对一种新型的供电方式进行研究。单线电能传输技术，有机会弥补两种输电方式存在的弊端，成为第三种可靠输电的方式。

当前，单线电能传输技术相关的研究相对较少。以往研究中的结构通过发射结构和接收结构直接产生耦合，或者通过分布电容与单线构成闭合回路进行电能传输。这些方法容易受到空间杂散电容的影响，难以进行远距离电能传输。本文对单线电能传输技术原理深入研究，提出了一种新型的单线电能传输方法。该方法不需要通过分布电容形成回路进行电能传输，电能由发射端定向的传输至负载。并对该方法中最为关键的结构传输介质的各种特性，以及存在金属异物时的传输效果进行研究，以提高该技术的实用性。

首先，对单线电能传输技术的原理进行了分析，并提出了一种不构成回路进行电能传输的单线电能传输方法。根据提出的方法设计了新型的单线电能传输系统结构，并对传输介质上电磁场分布做了定性分析。利用麦克斯韦方程组，推导得出了传输介质上电场、磁场的表达式，对其电磁场分布做了定量分析。

其次，根据理论分析中提出的单线电能传输方法，利用有限元仿真软件搭建相应的仿真模型，并对其传输介质的各种特性进行了研究。仿真验证了传输介质上的电磁场分布。研究得出了传输介质材料电磁性能、截面变化、长度变化、发生弯折以及传输介质周围存在金属异物时对系统传输效率的影响。

最后，根据理论和仿真中提出的单向单线电能传输结构，搭建相应的实验系统。对单向单线电能传输系统中传输介质的材料电磁性能、截面变化、长度变化、发生弯折等与系统传输效果之间的关系以及传输介质附近存在金属异物对系统传能的影响进行实验验证。研究表明，实验结果和仿真结果具有较好的一致性。利用单向单线电能传输实验系统实现了 75m 距离的电能传输，进一步证实了该方法的可行性。

关键词：单线电能传输；传输结构；介质特性；传输效率

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 单线电能传输研究背景.....	1
1.2 单线电能传输技术国内外研究现状.....	3
1.2.1 国外研究现状.....	3
1.2.2 国内研究现状.....	8
1.3 本课题研究的目的是意义.....	10
1.4 本文研究的主要内容.....	11
第二章 单线电能传输原理研究.....	13
2.1 单线电能传输结构分析.....	13
2.2 单向单线电能传输原理分析.....	14
2.3 单向单线电能传输结构.....	16
2.4 传输介质电磁场分布.....	17
2.5 本章小结.....	21
第三章 单线电能传输介质特性仿真研究.....	23
3.1 仿真模型的建立.....	23
3.2 单向单线电能传输原理仿真分析.....	25
3.3 介质材料电磁性能对单线电能传输效果的影响.....	26
3.4 介质截面变化对单线电能传输效果的影响.....	31
3.5 介质长度对单线电能传输效果的影响.....	34
3.6 介质弯折对单线电能传输效果的影响.....	35
3.7 金属异物对单线电能传输效果的影响.....	37
3.7.1 金属异物对单线电能传输效果的影响分析.....	38
3.7.2 金属异物尺寸对单线电能传输效果的影响.....	39
3.7.3 金属异物纵向距离对系统传输效率的影响.....	41
3.7.4 金属异物横向距离对单线电能传输效果的影响.....	43
3.8 本章小结.....	46
第四章 单向单线电能传输介质特性实验研究.....	47
4.1 单线电能传输实验系统搭建.....	47
4.2 介质材料电磁参数对单线电能传输效果的影响实验.....	49
4.3 介质截面变化对单线电能传输效果的影响实验.....	50
4.4 介质长度对单线电能传输效果的影响实验.....	51
4.5 介质弯折对单线电能传输效果的影响实验.....	52
4.6 金属异物对单线电能传输效果的影响实验.....	53

4.7 75m 传能实验.....	58
4.8 本章小结.....	59
第五章 总结与展望.....	61
5.1 总结.....	61
5.2 展望.....	62
参考文献.....	63
发表论文和参加科研情况.....	69
致 谢.....	71

第一章 绪论

1.1 单线电能传输研究背景

早在公元前，人类对电就已经有了初步的认识。1831 年，英国物理学家法拉第发现电磁感应现象，揭示了电与磁之间的相互联系。这为人类获取电能开辟了道路，在电能的发展史上具有重大意义。电磁感应现象的发现，也意味着一场重大的工业和技术革命的来临。1866 年，德国科学家西门子发明了世界上第一台工业用大功率自励发电机。大功率发电机的问世，使人们可以便捷地获得电能。此后，电能也慢慢融入人类社会，成为人类生存发展的主要能源。时代的发展，科技的进步，越来越多利用电能进行工作的设备开始涌入人类社会。第二次工业革命的完成，也标志着人类正式进入了“电气时代”。

时至今日，人类的生产生活更是离不开电能。电能从其生产到使用，主要经过“发电-输电-变电-配电-用电”这五个步骤^[1-3]。通过搭建输电线路^[4-6]，人类可以便捷地从电力系统中获取电能。然而在一些特殊的工作环境下（矿井油田^[7-9]、植入式医疗设备^[10-12]、便携式电子设备^[13-15]、无线传感网络^[16-18]等），通过线缆输电不能达到安全、可靠的用电要求。有线输电的种种弊端开始暴露出来，例如：

- 1、在一些易燃易爆的特殊施工环境如：地下矿井、石油开采地等，极易因传统有线输电方式中的线缆破损问题导致严重人身安全事故，造成重大经济损失。线缆的绝缘老化^[19-21]、破损等问题，严重影响到特殊生产活动的安全进行。

- 2、随着医疗技术的不断提升，植入式医疗设备在疾病治疗中发挥着愈来愈重要的作用。植入式医疗设备的高速发展，对其供电方式提出了更高的要求。植入式医疗设备安全供电是保证其持续、稳定工作的必要组成部分。而通过手术将设备取出进行充电的供电方式，不仅存在易感染、操作复杂、开销大等问题，还会给患者带来二次伤害。因此，传统有线输电并不能为植入式医疗设备进行可靠供电。

- 3、越来越多的便携式智能设备进入了我们的生活。受限于电源线的长度，便携式设备无法随意移动，给用户带来极大的不便。且频繁地拔插插头不仅会降低设备的使用寿命，还容易产生电火花放电，对用户的人身安全造成影响。此外，各种电源线标准的不统一，也会带来资源浪费和环境污染问题。

传统有线输电方法并不能满足人类对供电方式提出的安全、便捷、灵活等更高的要求。因此，人类开始寻求新的电能传输方式来摆脱线缆的制约。无线电能传输技术由此得到了快速发展。无线电能传输技术（Wireless Power Transfer, WPT）是一种借助空间无形软介质（电场、磁场、微波等）进行电能传输的方法^[22-25]。由于无线电能传输技术并不需要使用两根线缆来连接用电设备，因此其又被称为非接触式电能传输技术（Contactless Power Transfer, CPT）。无线电能传输技术根据其传输原理主要被分为：磁谐振耦合式、电磁感应耦合式、电场耦合式、微波辐射式和激光式等^[26-30]。

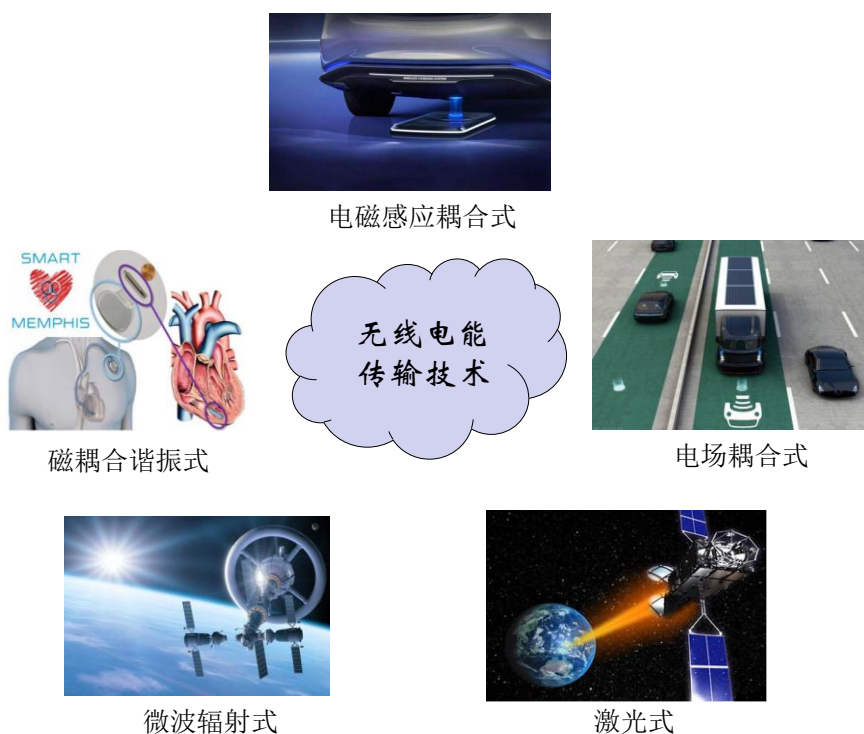


图 1-1 典型无线电能传输技术

Fig.1-1 Typical wireless power transfer technologies

无线电能传输技术摆脱了线缆的束缚，使得供电方式的灵活性得到了大大提升，成为了继有线电能传输后又一大供电方式。虽然近年来无线电能传输技术的原理和应用得到了长足发展，但是包括感应耦合式、磁耦合谐振式等在内的无线电能传输技术都无法实现远距离、高效率的电能传输。当传输距离增加到一定范围，随着传输距离的进一步增加，系统传输功率、效率急剧下降。无线电能传输技术在传输距离上的限制使得其并不能完全弥补有线输电方式存在的问题。因此，有必要提出一种新的电能传输技术来完善无线电能传输技术和有线电能传输技术的缺陷。

作为介于传统使用线缆进行电能传输和无线电能传输技术之间的一种新型

电能传输方式，单线电能传输技术仅使用一根导线连接电源与负载^[31-35]。既不使用双根导线也不完全摒弃导线，在保证供电灵活性的同时，又能保证在较远的传输距离下的电能高效传输，有望成为新型供电方式的有力补充。其简易结构示意图如图 1-2 所示。当前研究表明，单线电能传输系统中的单导线有机会被现有介质（如：大地、管道、海水等）替代，从而实现广义上的无线电能传输。目前，有关单线电能传输的研究相对来说较少，相关的研究仍处于初级阶段。因此有必要对单线电能传输技术进行深入研究，促进该技术的发展成熟。

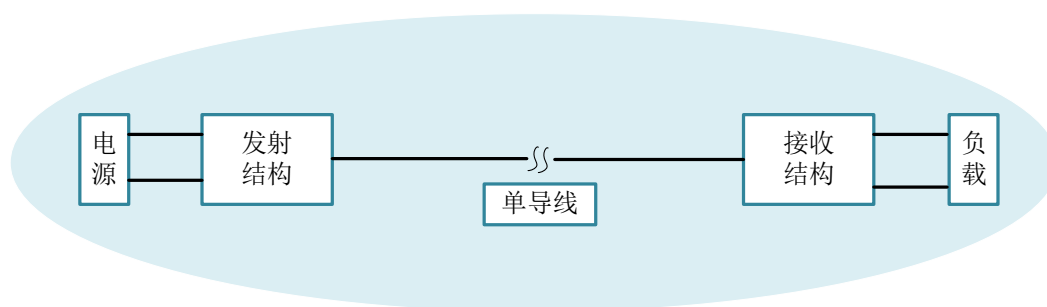


图 1-2 单线电能传输系统简易结构图

Fig.1-2 Simple structure diagram of single-wire power transfer system

1.2 单线电能传输技术国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

单线电能传输技术相关的研究可追溯到 1897 年塞尔维亚裔美籍科学家尼古拉·特斯拉的专利。在该专利中，特斯拉对单线电能传输系统结构进行了详细描述，其系统结构如图 1-3 所示。系统由位于左侧的发射装置和右侧的接收装置共同组成。高频电源 G、初级线圈 C、次级线圈 A，以及顶端球形导体 D 共同构成了电能发射装置。电源与初级线圈相连为传输系统供能，次级线圈一端与大地相连，另一端连接顶端球形导体 D。接收装置组成和结构连接方式与发射装置相同，不同的是发射端次级线圈与电源两端相连，而接收端的次级线圈两端连接用电设备。在他的设想中，利用顶端球形导体的电容耦合作用以及大地的传导作用来实现电能传输，为了使得发射和接收装置产生电气联系，两装置必须同时接地。

1899 年，特斯拉开始了大规模的 WPT 实验。他提出这种能量可以在全球范围内传输，其中主要的一个用途就是家庭照明。1924 年，在一次演讲中，他向

人们展示了仅使用一根导线进行电能传输的实验。理论上，当这根导线被大地替代时，可实现全球范围内的无线电能传输。时隔三年，特斯拉在文章中指出，通过设计发射、接收装置，并合理规划其分布，巨大的能量可以通过大地向任何位置进行能量传输。并且在传输时几乎没有能量损失，效率高达 99.5%^[36-39]。该装置的顶端电容球必须具有良好的曲率半径才能避免尖端放电，且装置中电塔的高度需要足够高，以避免带来危险。受限于当时的技术条件，特斯拉的很多主张并未得到当时主流科学家的认可，他的很多想法也并未得到实施。由于缺乏资金支持，宏伟的全球无线电能传输计划也最终无奈宣告破产。此后，陆续又有科研机构 and 高校开始对该技术进行探索。

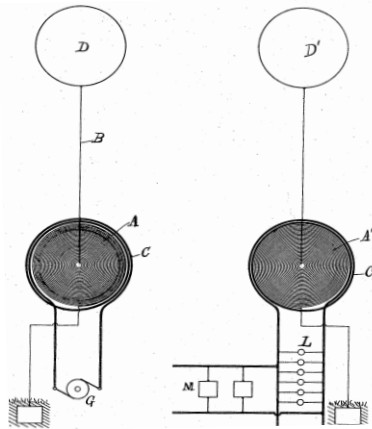


图 1-3 特斯拉设计的单线电能传输系统

Fig.1-3 Single-wire power transfer system designed by Tesla

2000 年，全俄农业电气化科研所的研究人员为实现给电动拖拉机供电并节约导线的目标，对单线电能传输技术进行了深入研究^[40, 41]。根据供电对象电压等级的差异，利用单线电能传输技术研制了两条不同电压等级的线路。低压线路电压等级为 1KV，而高压线路电压等级达到 1000KV。文献中提到，该系统电能并没有以传导电流的方式输送，而是借助于位移电流传输。此时，欧姆定律与楞次定律并不起作用，线路中不产生有功损耗。且系统工作频率低于 100 赫兹，电磁辐射损耗较小，系统传输效率高达 98%。研究人员还对传输介质替代性做了进一步研究，在实验中将传输介质(单线)替换为铝、钢、镍铬合金等金属介质，以及聚乙烯管、石墨烯等非金属导电介质。实验表明，将传输介质替换后，系统仍能有效工作。此外，他们还提出了利用位移电流从传导的无功功率中获取热量的方法。

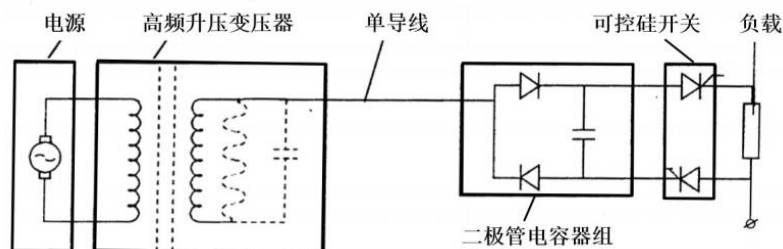


图 1-4 俄罗斯学者设计的单导线输电系统

Fig.1-4 Structure of single-wire power transfer system designed by Russian scholars

2008 年，美国内华达雷电实验室的研究人员重做了特斯拉电能传输实验^[42]。他们猜想特斯拉电能传输系统中可能存在的电场耦合、磁场耦合和接地电流耦合这几种耦合方式。并根据猜想，进行了仿真与实验研究，实验图如图 1-5 所示。仿真结果表明，系统中的谐振变压器中磁场耦合较弱，而电场耦合方式较为明显。他们认为，受大气吸收和能量多重转换的损失，特斯拉电能传输系统整体效率较低。直接使用近场谐振的变压器可实现更高效率的能量传输。实验中，利用两个谐振变压器在实验室中以 22.27% 的效率实现了 500W 以上的电能传输。研究结果表明，即使发射与接收装置大小不完全相同，电能也可以通过电场耦合的方式进行有效传输。

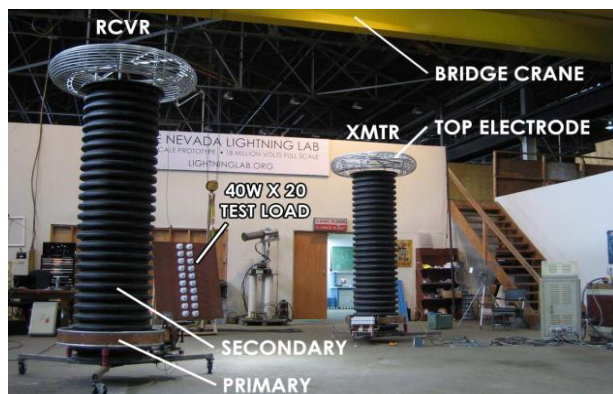


图 1-5 内华达雷电实验室设计的实验系统

Fig.1-5 Experimental system designed by Nevada Lightning Laboratory

2009 年，美国田纳西理工大学的研究人员测试了使用海水替代单线进行电能传输^[43]。他们通过改造特斯拉电能传输系统，设计了一种以水—导线为通路的复合电能传输系统，系统传输结构如图 1-6 所示。发射装置中，直流电源向初级线圈供电，次级线圈一端接电容球，另一端接地并通过 5m 长单导线连接水渠。接收装置中的次级线圈一端空置，另一端通过 10.5m 长导线连接水渠。接收装置中的初级线圈两端与小灯泡相连。该传输系统在传输距离为 20m 的情况下，

以 54% 的传输效率，传输了 25W 功率，并成功点亮了接收侧的灯泡。实验证实，特定结构下海水能够作为单线电能传输中单导线的替代介质。

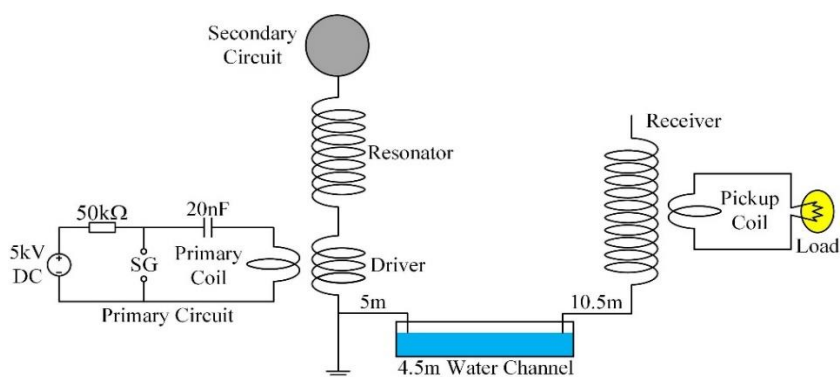


图 1-6 田纳西科技大学的学者设计的单线电能传输系统

Fig.1-6 Single-wire power transfer system designed by scholars at Tennessee University of Technology

阿尔伯塔大学的研究人员对单线电能传输技术开展了一系列研究，提出了多种利用其他介质替代单线的传输方法^[44-47]。2014 年，阿尔伯塔大学的研究人员提出利用螺旋线圈与周围杂散电容产生谐振来进行电能传输。该系统不需要强电磁耦合就能在大范围内进行能量传输，当负载为 50W 时，传输效率为 83%。传输介质可由金属桌面、金属橱柜、铝箔等常见金属制品替代，系统结构如图 1-7 的 a 部分所示。2016 年，研究人员进一步提出利用土壤的导电性以及抗干扰性，在接地电极周围的表面产生电势差，进行电能传输的方法。该系统通过在地表与距离地表 40m 深的土壤下分别插入同为 1.5m 的电极，从而在土壤内部形成电势差，结构如图 1-7 的 b 部分所示。该技术有望解决如何将电能顺利分配给众多户外低功率设备的难题。2017 年，研究人员又对单线电能传输系统的能量与信号同步传输进行了研究。采用电感耦合与单线电能传输技术，实现了电能与信号在同一传输结构下的同步传输，并通过仿真与实验对系统的可靠性、互操作性等进行了证实。



(a) 传输介质用金属物体替代

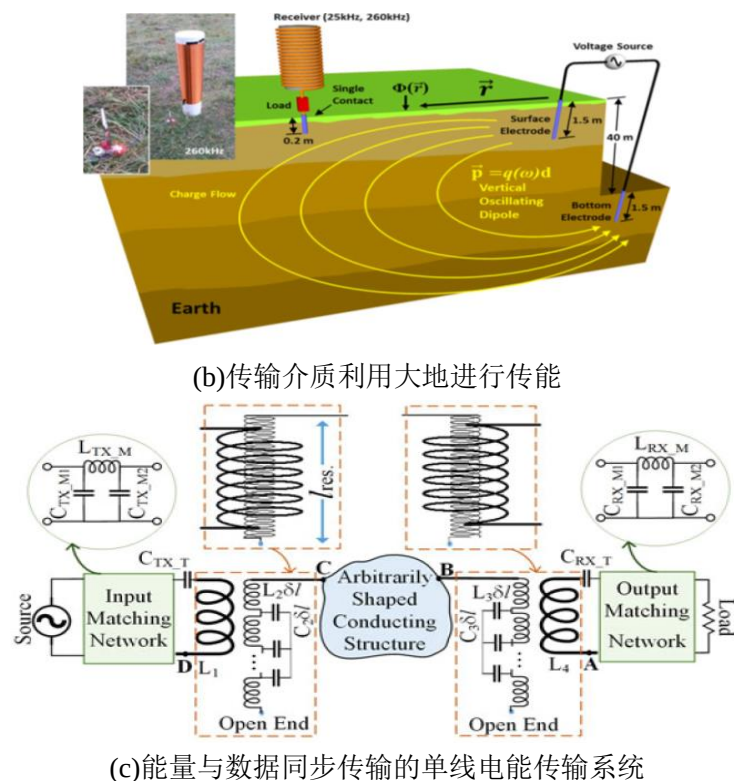


图 1-7 阿尔伯塔大学设计的单线电能传输系统

Fig.1-7 Single wire power transfer systems designed by scholars at University of Alberta

2018 年，新西兰奥克兰大学的研究人员对新型单线电能传输结构进行了研究。他们提出通过电场耦合的方式，来为带有金属后盖的显示器供电^[48]。该系统中电源通过一根导线连接至耦合板上，由于没有电流返回路径，电能能够跨金属屏障传输。实验证实，系统以 5W 的功率成功驱动 VMS 显示屏，传输效率约为 22.5%。

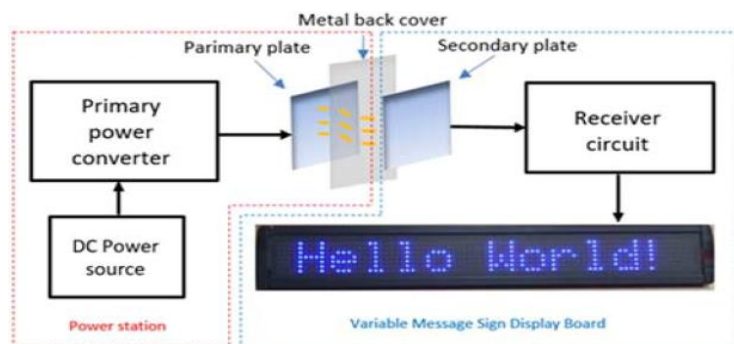


图 1-8 奥克兰大学设计的单线电能传输系统

Fig.1-8 Single-wire power transfer system designed by scholars at The University of Auckland

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/475110132042011324>