



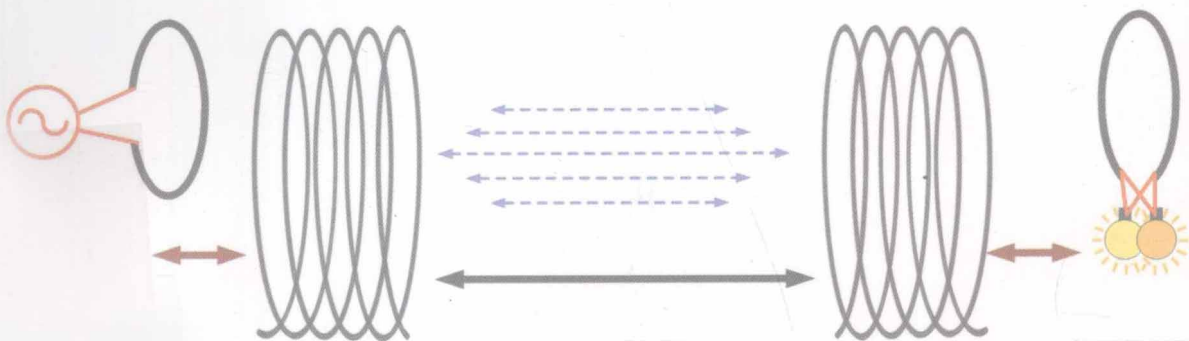
中国科协学会学术部 编

新

观点新学说学术沙龙文集

57

无线电传输关键技术 问题与应用前景



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

新观点新学说学术沙龙文集⑤⑦

无线电能传输关键技术 问题与应用前景

中国科协学会学术部 编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

无线电能传输关键技术问题与应用前景/中国科协学会学术部编.
—北京:中国科学技术出版社,2012.6
(新观点新学说学术沙龙文集;57)
ISBN 978-7-5046-6115-9

I. ①无… II. ①中… III. ①电能-传输-无线电技术 IV. ①TN925

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第136230号

选题策划 赵 晖
责任编辑 赵 晖 夏凤金
责任校对 王勤杰
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编 100081
发行电话 010-62173865
传 真 010-62179148
投稿电话 010-62103182
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16
字 数 200千字
印 张 8.75
印 数 1-2000册
版 次 2012年7月第1版
印 次 2012年7月第1次印刷
印 刷 北京金信诺印刷有限公司

书 号 ISBN 978-7-5046-6115-9/TN·45
定 价 18.00元

(凡购买本社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)
本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

倡导自由探究

鼓励学术争鸣

活跃学术氛围

促进原始创新

序

无线电能传输技术是当前电气工程领域最活跃的热点研究方向之一,是集基础研究与应用研究为一体的前沿课题,涵盖电磁场、电力电子技术、电力系统、控制技术、物理学、材料学、信息技术等诸多方面,是当前国内外学术界和工业界探索的一个多学科强交叉的新的研究领域。无线电能传输技术能够有效克服电线连接方式传输电能存在的各种缺陷,实现电子电器的无线供电,具有重要的应用预期和广阔的发展前景。

无线电能传输技术分为三类:基于微波方式的长距离无线电能传输、基于感应耦合方式的近距离无线电能传输和基于磁谐振耦合方式的中等距离无线电能传输。国内科技界从20世纪90年代开始跟踪国际无线电能传输技术,2000年之后开展系统研究。目前国内许多高校和科研院所国家自然科学基金、“863”计划等项目支持下先后开展了该技术领域的相关研究工作,取得了许多成果,也从中发现了很多问题和疑惑。

中国电工技术学会时时关注行业发展需求,了解到无线电能传输技术领域之前从未开展过全国范围内科研专家间的交流和探讨,存在着诸如名词术语不统一、原理理解有差异、应用前景不明确等许多问题,迫切需要组织一次该技术领域的专题学术交流活动,对各科研团队业已取得的科研成果、发现的问题,以及未来研究应用方向进行研讨。在行业专家的大力支持和帮助下,经认真调研,中国电工技术学会拟定了“无线电能传输关键技术问题与应用前景”这一沙龙主题。

2011年4月8日,中国电工技术学会提交的项目方案获得了中国科协的肯定和支持,成为中国科协2011年度新观点新学说学术沙龙入选项目。本期沙龙主要就五个方面的议题进行研讨,即无线电能传输的方式及其优缺点;无线电能传输技术中的关键和瓶颈问题;无线电能传输的空间电磁环境问题;无线电能传输技术发展的未来预期;无线电能传输技术的应用前景。

在中国科协的指导下,中国电工技术学会作为项目承办单位,积极认真地

进行项目的策划实施,于2011年10月11—12日,在天津工业大学新校区成功举办中国科协第57期新观点新学说学术沙龙。本期学术沙龙是国内首次以无线电能传输技术为主题的学术交流活动,得到业内专家学者的热烈响应与大力支持,国内这一科研领域的40余位顶尖专家尽数到会参加研讨,会上专家们充分交流各自的科研成果,并就当前该领域存在的一些问题,包括器件和系统设计问题,效率、距离和功率问题,电磁环境和抗干扰能力问题,成本问题和标准等议题展开热烈讨论。与会专家一致认为,本次学术交流非常成功,收获很大,类似活动应定期举办。建议同行间精诚合作,积极开展基础研究工作,不断拓宽应用领域(包含潜在应用领域);为有利于交流、研究和推广应用,应加强“无线电能传输”研究领域相关名词术语的规范工作;为加深公众和专家对无线电能传输技术的认识和理解,应加强宣传工作,通过媒体、网络、会议等各种方式介绍无线电能传输技术,扩大影响;为有利于本领域科研工作的顺利开展,在研究和实际应用中要注意该技术引起的电磁环境问题,把安全性放在首位。

本书是与会专家在本期学术沙龙举办过程中精彩发言的汇编,是国内该技术领域顶级科研团队科研成果的浓缩和提炼。读者通过阅读本书,能够对国内无线电能传输技术研究现状有一个全面深入的了解,一定受益匪浅。



2011年10月

目 录

用于移动设备的非接触供电技术应用研究	朱春波(4)
非接触电能传输技术及其最新进展	孙 跃(11)
充满机遇的无线电能传输技术	黄学良(38)
特斯拉实验的再认识和重做	
——特大功率无线电能传输可行性论证	张 波(44)
无线电能传输技术在家电产品中的应用	李 聃(54)
电磁耦合谐振式有限元模型及数值仿真	张 献(60)
基于磁电层状复合材料的无线能量传输	于歆杰(74)
无线充放电技术助跑电动汽车与智能电网发展	顾 伟(78)
无线电能传输研究的主要工作及问题	杨庆新(90)
关于无线电能传输系统设计分析工具与	
超长电磁媒质应用的思考	徐小宇(96)
齐心协力促进无线电能传输科学与技术的发展	苏玉刚(106)
专家简介	(116)
部分媒体报道	(129)



会议时间

2011年10月11日上午

会议地点

天津工业大学电气工程与自动化学院会议室

主持人

杨庆新 朱春波

杨庆新：

首先非常欢迎各位专家和同学来到这里参加中国科协第57期新观点新学说学术沙龙，本次论坛经过中国电工技术学会的努力申请，按照程序得到了中国科协的批准。按照中国科协关于沙龙的管理实施办法，不举行开幕式，虽然在天津工业大学举行，但是没有领导的致辞。当然今天各位领导也来到了这里参与本次沙龙，我们对各位领导的到来表示欢迎！

我先简单介绍一下本期沙龙的背景。

我是天津工业大学的杨庆新，原来我的工作单位是河北工业大学，调到这里三年多一点，在这里任校长。我就是电工学科的，一直在做电工的研究和教学。本次会议设立的背景是，最近几年无线电能传输方面开展的工作很多，10多年前就有很多人在做这方面的工作，大家最开始是做直接耦合的，发展得比较快，例如孙跃老师做得就相当不错，用在汽



车上的功率也比较大。

2007年麻省理工学院的研究人员发表了共振传能的成果以后,世界各国都在进行研究。但是文章的成果在使用过程中出现了很多问题,有的不像说得那么简单,或者可能人家因为专利原因没有阐述清楚。所以,在这样的背景下,我们需要进行探索研究。这几年,尤其是2007年该文章发表以来,需要把所有的成果、问题和研究进展在这里做研讨。有什么观点和认识大家可以直言不讳。

国家自然科学基金委员会这几年也对此项目进行了支持,有很多小组得到了基金项目的支持。2010年的指南中也将其列入当中,这也是我不断呼吁的结果。有很多人也质疑无线电能传输大面积推广应用的可行性,当然,任何一个学说出来之后都会有一段争议时间,我们到底会走什么方向,最终结果如何,还是要取决于大家的努力。做下去,不断取得进展,就有可能使我们的研究出现新的转机。

由于当时我们没有明确的目录,所以送审的时候有很多都不是做这个行业项目的,于是没有通过。我是现场的评委,拿到传能的材料我都认真看,但是评价都不高。所以我呼吁了半天,起码列进目录了,有效果,但是项目还比较少。所以,举办这个会议的目的首先是向国家自然科学基金委员会提供一个名单,让在座的各位同行互相支持,把盘子做大,才能把这个领域做起来。我们今天不只是大家阐述观点和看法,与此同时,一个很重要的目的就是凝聚大家的力量,真正把无线电能传输做起来,得到电工界的认可。

去年在立项改题目的时候,我曾经半开玩笑地说过一句话,搞电力系统的都不用电线了,将来就由我们做了。电力系统是非常强大的,国家自然科学基金电工学科1/3的重点项目都是他们的,所以,我们要慢慢地



发展。大家只要有兴趣就努力做,这个事情就能够逐步解决。

传能在电工领域应用比较多,现在利用微波传能作为武器,做得非常好。国际上也有建设空间太阳能电站的,当然由于效率和传输距离的问题,可能离出成果还有一段距离。但是我认为,无论对什么感兴趣,都可以去探讨。所以,我们申请这样一次沙龙给大家提供平台,让大家充分交流。我当时想要把能请的都请来,国外的也请了,但是时间比较急,他们没有来。

昨天我和一些专家一起探讨交流,也想如何把沙龙继续办下去,可能会以 workshop(小型论坛)的形式。很多老师在这个领域都做得很好,包括高校的一些专家。海尔技术中心的李总(李聘)也来了,他们做的无尾电视在国际上也很轰动。

本期沙龙的讨论内容有五个,当然也不局限于此。第一是无线传能的方式及其优缺点。第二是无线传能的关键和瓶颈问题。作为远距离的大功率传输,不可能不涉及电磁环境的问题。当然,这个频率和手机发射的频率差得远。第三是无线传能的发展未来,也就是发展技术未来能到什么程度。第四是我们付出努力,把它推向一个很好的发展前景,像小功率在生物医学领域对体内植入器件的传能也是非常有用的,还有电动汽车,包括家电产品,如果搬到哪儿都不用弄电线,把信号线也融合在一起,将来的应用前景就非常广阔。第五是它的危害。

沙龙包括自由讨论,每人不超过5分钟,可申请多次发言。陈述性发言10分钟,主题发言20分钟。

下面进入发言与讨论环节。



用于移动设备的非接触供电技术应用研究

◎朱春波

我认为沙龙这样的形式非常好,因为无线能量传输这个研究方向比较小也比较新,国内开展研究的人不是很多,采用小型学术沙龙的形式进行交流非常有必要。昨天我向杨校长建议做一个 workshop,扩大到一定规模,每年一次,我们还可以邀请国外的同行一起交流。如果将来发展得好,可以形成一个学术年会。

我的报告分5部分:第一是国内外现状;第二是哈尔滨工业大学在该领域的研究情况;第三是无线能量传输技术的技术内涵和研究内容;第四是无线能量传输技术的发展瓶颈问题;第五是应用前景的探讨。

现在,我们的研究重点没有放在家用电器上,而是在电动汽车、移动机器人以及为无线传感器网络供电方面。现在的家用电器已经有一些很好的产品,这里不做赘述。

下面,看一下用于移动设备的非接触供电技术的国内外现状。

目前中国在电动汽车领域是后来居上,形势不错,美国和日本的技术以前比较领先,但是没有进行大规模产业化推进。当然,像日本的丰田等少数公司做得还是比较好的。而我们是由政府在推动这件事,所以在我国电动汽车产业化方面发展得非常快。刚才介绍说黄老师那边得到了一个“863”项目的重大支持,我感觉非常振奋,这对无线电能传输这



个研究方向具有重要的推动作用,我们需要获得更多的社会认可和政府支持。

先谈一下电动汽车非接触充电的必要性。传导式充电目前存在这样一些问题:①操作的安全性问题,高电压对人身安全的威胁。我国2010年就发生过不止一起充电站里面的充电电缆漏电烧伤工人手臂的事情;②在将来发展大规模应用的时候,雨雪天气可能会带来短路、断路的危险;③充电的机械接口标准化问题,在这方面始终存在争议,要知道,统一充电接口并非易事,国际上也没有完全统一;④传导式充电也不利于未来实现自动化充电。

采用非接触充电具有很多优点:①由于它完全绝缘,可以避免高电压危险;②全密封,短路和漏电的危险性也可以避免;③有利于接口的标准化,也便于实现自动化和无人操作。当然它的缺点是成本有所增加,效率也不可能比直接连接导线的效率高,也有其他弱势方面的东西,需要我们领域的同行不断研究和提高。现在有各种各样的充电接口,传导式充电有点像汽车的加油口,但实际上它是有接触点裸露在外的。

日本昭和飞机研制的电动汽车非接触充电系统(图略),这是2010年我们做访问的时候得到的资料,在非接触充电方面,尤其在电动汽车领域的应用,日本是做得最好的,也有很多正在实验的产品样机。

比较早的非接触充电产品是用在美国的电动汽车EV1上的,这款电动汽车是有故事的。有一部电影叫《谁杀死了EV One》,EV One是美国加州很早的一款电动汽车,新型电动汽车受到了地方政府和老百姓的喜爱,但销售到一定量之后,各方面矛盾交织在一起,最后这款产品还是被扼杀了,电影结尾揭示,通用公司的大股东们都是石油巨头,电动汽车的发展影响到了他们的利益,正是他们杀死了深受百姓喜爱的EV One。这



款产品用到了非接触充电技术,插入感应式充电器,非常安全,避免了人身伤害的危险。

日本三菱重工推出的用微波充电的电动汽车,采用的是微波发射源,但是效率比较低,功率也不大,只有 1kW。日本的小型车用非接触充电,采用的是和 EV1 一样的技术,手柄用在大一点的轿车上。

采用非接触充电,小型车只有二三十或十几千瓦就可以,而大车的功率往往比较大,要四五十到七八十千瓦,一次线圈和二次线圈也不大一样。从电动汽车的应用来看,越大功率的车电压越高,同时越大的车对于无线充电来说其功率要求越大,传输距离因为底盘和地面距离也会高一些,距离最大的车可以达到 150mm 甚至更高。在公路上,路面下面铺设发射线圈,汽车本身安装接收线圈,在跑的过程中可以给车充电。这种形式也是大家的一种设想,当然这样做并不一定在公路上到处都安装线圈,车上可以配有少量电池。在路面上将非接触充电技术应用于给电动汽车供电的一个重要思路就是,未来可以把车里的电池容量尽可能降低。电动汽车发展中一个瓶颈问题就是电池能量密度不够高,如果能量密度像汽油一样高,一箱充满的电池能跑几百公里,这个问题早就解决了,也会给电动汽车的发展注入非常重要的推动力。一个未来的设想,在路面或侧壁铺设线圈,以便随时给电动汽车供电或者补电。

下面介绍一下哈工大在这方面的研究情况。2006 年年底麻省理工学院的索尔贾希克教授在《工业物理学论坛》上发表了一篇文章,当时我正在开展无线传感器网络应用方面的研究,发现无线传感器网络发展的瓶颈技术之一就是供电技术。在很多应用情况下,无线传感器的使用寿命往往取决于电池储存的电量。比如埋在路面或建筑物里的无线传感器,电池电量没了,它的寿命也就到头了。如果能够采用无线的方式给



其电池补电,将会给无线传感器网络技术的推广应用起到重要的推动作用。我当时搜索非接触供电技术,发现了麻省理工学院在《工业物理学论坛》上刚刚发表一个月的一篇文章,对我的触动非常大,立刻开始安排学生做一些基础研究。到了2007年7月,学生发现了麻省理工学院发表在 *Science* 上的这篇文章,使我坚定了开展这个方向研究的决心。并在2008年申请了第一个发明专利,现在已经获得授权,在2008年发表了第一篇研究论文。我们当时的研究目标有两个方面,第一是用于电动汽车的非接触充电,第二是为无线传感器网络充电。研究方法分为理论研究和实验研究,目标是要提高性能指标。刚开始的时候,理论上研究的不是特别清楚,实验研究做得非常多,把目标向开发装置的方向推进。具体开展了两个研究方向,第一是磁共振式,第二是感应式,两个方向几乎是同时起步的。

最早做的基础研究是采用磁共振式,研究如何提高传输的功率、距离和效率,当时功率达到60W,传输距离50cm,效率是60%。后来有一个比较大的线圈实验,传输的距离和发射源的尺寸直接相关。我们也做了一些带有中继的无线能量传输,中间放无源的中继器,传输距离可达到2m以上。

我们最初并没有什么目的性,只是做一些基础研究,并申请了一些小的基金支持。2010年获得了一个国家自然科学基金项目的资助。基金项目名称是“用于无线传感器网络的磁共振式无线供电技术研究”,采用一个发射源对多个接收端的形式。发射源可以大,接收端肯定要小,当然这种应用对效率不追求那么高,重要的是要实现给无线传感器网络充电,距离越远越有应用价值。学生对此比较感兴趣,圣诞节之前做了一棵圣诞树,树放在红色的绒布上,绒布下面就是发射源,把1.5m高的圣



诞树上的二极管彩灯都点亮,学生把这个装置也申请了专利。

我们在感应电能传输方面也做了一些基础研究。一个毕业两年的学生做的实验装置,功率达到4kW左右。原先只是看到别人做出了大功率的装置,我们自己也能够把功率提高得比较大,采用有磁芯方式,所以这个装置做出来也增强了信心,认为这是可以做的,在此基础上,开始更大功率装置的研究。这是基于能效分析的电磁场仿真研究,目前这个方向需要非常好的研究软件和建模方法,始终感觉做得不是很顺。

这是有源干扰和无源干扰对系统影响的情况。这是线圈参数对系统的影响,产生两个功率极点的情况(图略)。也做了一些中等功率、加大距离的无线电能传输技术研究,2010年8月,在日本做过交流之后,我们自己做了一个实验装置。这个装置传输距离大约10cm,功率在1.6~1.9kW之间,这个参数几乎可以用于小型移动机器人。这个装置比较小,我现在正在让学生开发一个十几kW以上的大功率传输装置,根据现在的基础来看是肯定可以实现的,效率应该在80%以上。这是一个感应电能传输的实验平台(图略),是近距离的,1~2cm的传输距离,功率可以达到十几kW。

这是最近日本过来交流的时候委托我们做一个给AGV(自动小车)自动充电的装置。我只在丰田汽车厂看到过AGV,这个AGV实际上是一个移动机器人,它可以替代自动化生产线做很多事情,可以连续地循环工作。因此,为了保持电池中的能量,需要一个自动充电装置,利用其工作循环中的静止状态进行充电。日本某公司委托我们做样机试用,如果效果好可以进行小批量的试生产。

在国际合作方面我们也做了很多工作。和昭和飞机、丰田公司以及一些其他公司进行了一些交流。2011年他们又过来了两次和我们进行



学术交流。

下面介绍一下无线能量传输技术的技术内涵和主要研究内容。

无线能量传输技术的研究目标应该是最大可能地提升系统的传输功率、距离和效率,在研究方法上,除了实验研究以外,还要找到好的建模与仿真方法,以便开展深入的理论研究。

技术内涵和研究内容主要包括以下几个方面:首先是频率问题。具体来说就是,研究不同应用领域选择什么样的频段。因为磁共振的问题和感应的问题我都做,所以在频率的选择方面也研究了很长时间,做了很多尝试和探索。频率问题中还需要研究高频电能变换技术,大功率高频器件、软磁芯、导线的高频特性及高频损耗问题。二是磁路系统的研究。包括磁耦合能量传输系统的数学模型及优化配置研究;磁耦合输能机理及共振能量流动规律研究;磁路系统的结构设计和材料选择;多接收端系统的磁路耦合及解耦研究;同时,由于可分离变压器的耦合系数低、漏感大,还存在采用何种补偿方式的研究。三是高频电力电子技术,例如发射源、接收端、系统频率稳定性、软开关技术、谐振补偿、电磁兼容和热管理。做到产品方面,热管理不能不考虑,简单的实验装置热管理问题不大,往往都是开放的,但是如果真正做到产品里面,则必须要考虑得很细致,因为无线能量传输设备的发射端和接收端往往都是全密封的。效率也是一个非常大的问题,电能从发射端经过多次的变换传输到负载,每一次变换都会有能量的损耗,那么总的能量效率能够达到多高,直接关系到应用的领域以及成本。四是负载匹配技术,其中有很多值得深入研究的内容。包括基于无线通信的闭环反馈技术;负载特性,负载变化对系统谐振的影响;负载匹配特性,最大效率匹配与最大功率匹配研究;功率密度的提高;功率、频率控制的鲁棒性问题。



接下来谈一下无线能量传输技术发展的瓶颈问题。首先是该技术对人体、生物体的影响;其次是对环境的干扰,涉及电磁兼容问题;第三是环境对系统的影响问题、抗干扰能力问题;第四是器件问题;第五是效率问题;第六是成本问题;第七是标准问题。由于时间关系不细说了。

最后谈一下未来的应用领域和发展前景。目前有一些小家电产品已经用到了一些无线能量传输技术。未来在电动汽车应用领域,该技术肯定会占有一席之地,当然,其前提是上述我们提到的一些技术内容做得很好。而目前在移动机器人等小型设备(几个千瓦等级)上的应用会逐渐趋于成熟,比如前面谈到的我们正在为丰田公司开发的自动充电装置。而在一些特种场合,如植入式医疗仪器等小功率和不要求效率的应用方面,我觉得应该是先发展起来,这方面孙老师做了一些很好的研究。在有些特种应用领域没有非接触供电不行,只能采用无线方式来做,这样的领域肯定也要先发展起来。在军事上更会先发展起来,因为可以不用过多考虑成本问题甚至效率问题,之后再逐渐向民用领域拓展。