

无线电能传输技术研究与应用综述

黄学良 谭林林 陈 中 强 浩 周亚龙 王 维 曹伟杰

(东南大学电气工程学院 南京 210096)

摘要 随着技术的不断发展与进步,无线电能传输技术越来越备受关注,尤其在一些特定场合,无线电能传输技术具有传统电缆线供电方式所不及的独特优势,可以极大地提高设备供电的可靠性、便捷性和安全性。本文在讲述无线电能传输技术发展历史的基础上,阐述了现有几种无线电能传输技术的实现方式及优缺点,并针对目前无线电能传输技术领域的研究热点,重点论述了磁耦合谐振式无线电能传输技术的研究现状、分析方法及关键技术,最后针对谐振式无线电能传输技术应用热点及发展前景进行了探讨与展望。

关键词: 无线电能传输技术 磁谐振耦合 综述

中图分类号: TM133; TM72

Review and Research Progress on Wireless Power Transfer Technology

Huang Xueliang Tan Linlin Chen Zhong Qiang Hao Zhou Yalong Wang Wei Cao Weijie

(Southeast University Nanjing 210096 China)

Abstract With the continuous development and progress of technology, the wireless power transfer(WPT) technology has attracted wide spread attention recently. Especially in some specific occasions, the WPT technology has its unique advantages, which do not exist in the tradition V-MODE based on the wired power supply, to greatly improve the reliability, convenience and safety of power supply. In this paper, the development and application of WPT technology is investigated. Firstly, several major means of WPT technology and their relative merits are elaborated based on the development of WPT history. Secondly, in view of the current hot focus of WPT technology, the WPT based magnetically coupled resonance is discussed in detail, including its current research, analysis methods and some key technologies. Finally, the application focus and development prospects of WPT technology are further investigated.

Keywords: Wireless power transfer, magnetically coupled resonance, review

1 无线电能传输技术的发展历程

传统的电力输送采用有线的方式实现(即利用电缆线作为传输媒介),因此在电力的传输过程中不可避免的会产生传输损耗,同时线路老化、尖端放电等因素也易导致电火花,大大降低了设备供电的

可靠性和安全性^[1,2],缩短设备的使用寿命。一方面在矿场、海底等一些特殊场合,传统的电缆线供电方式所产生这些缺点往往有时将是致命的,严重时会引起爆炸、火灾及设备的损坏等,带来了极大的安全隐患和经济损失,另一方面生活中大量的电器供电势必会导致多种电源线的交叉给人们生活带来的极大的不便。

人类从刚开始利用电能时就期待着一种能实现将电力能量无线输送的方式。早在 19 世纪中后期,无线电能传输技术(Wireless Power Transfer Technology)就被著名的电气工程师尼古拉·特斯

国家自然科学基金(51177011),国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA050210),教育部学术新人奖资助项目和江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ11_0150)资助项目。

收稿日期 2013-04-20 改稿日期 2013-05-20

拉提出^[3],并进行了相关的实验研究,受早期技术、财力等因素的限制,该技术仅仅局限于构想阶段,但同样为后来无线电能传输技术的发展绘制了美好的蓝图和奠定了一定的研究基础。随后伴随着电磁波理论的发展,古博(Goubau)等人从理论上推算了自由空间波束导波传输能量的可行性,并做了大量的理论与实验研究。到20世纪初期,日本的H. Yagi等人发明了一种可用于无线电能传输的定向天线(又称八木-宇田天线)^[4],可将能量以微波的形式发送出去,在此基础上雷声公司(Raytheon)的布朗(W.C.Brown)等人又做了大量的研究工作,设计了一种效率高、架构简单的半导体二极管整流天线,可将微波能量转换成直流电^[5,6],从此微波作为无线电能传输的一种重要方式被广泛研究。到目前为止,利用微波传输电能已经可以实现大功率、远距离的功率输送^[7-9],与此同时激光作为一种新型的无线能量传输方式也被用来实现大功率远距离的能量传输^[10,11]。

到20世纪80年代,以电磁感应耦合方式为主的非接触能量传输技术开始被学者们关注,并逐渐应用到电动牙刷、手机、电动汽车等产品的无线供电中,以此为代表的有新西兰奥克兰大学波依斯(Boys)教授为首的课题组。该课题组经过多年努力在理论和实践上取得了很多重大突破^[12,13],实现了国家地热公园载人游览车的无线供电试验系统。随后美国汽车工程协会根据Magne-chargeTM系统的设计,制定了在美国使用非接触感应电能传输技术进行电动汽车充电的统一标准——SAEJ.1773^[14,15],但感应式无线电能传输技术对磁路的设计要求比较苛刻,导致传输距离较低(多在厘米范围内),导致该技术在功率无线能量传输的应用中具有很大的局限性。

2007年麻省理工大学的物理学助理教授马林·索尔贾希克(Marin Soljacic)和他的研究团队利用磁场的谐振方式,通过构建两个半径为30cm的发射和接收谐振器线圈,在1.9m之外成功点亮了60W的灯泡^[16],成功开辟了无线电能传输技术的一个新方向,该方式不仅弥补了感应式非接触无线电能传输技术传输距离短的缺陷,将传输距离提高到米级范围,同时还极大地降低了能量传输对环境的影响(具有较低的电磁辐射)。该技术的提出将无线电能传输技术推到一个新的研究高度,无论感应方式和磁耦合谐振方式都是基于磁场来实现能量的传输,虽然磁耦合谐振式具有相对较低的电磁辐射

问题,但在一些对磁场环境要求更为严格的特定场合,该两种方式都具有应用的局限性。因此近些年不少学者也提出了多种其他方式的无线能量传输方案,诸如基于超声波和电场的无线能量传输方式等^[17,18],虽然能量传输功率方面有待提高,但在电磁环境要求较高、功率要求不大的场合具明显的优势。

综上所述,迄今为止能实现能量无线传输的方式主要有微波、激光、感应耦合、磁耦合谐振、电场耦合方式等,可实现小功率到大功率,远距离到近距离的不同应用场合、不同功率需求的能量传输,见图1所示。

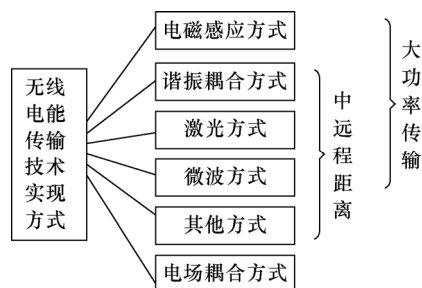


图1 无线电能传输技术主要实现方式

Fig.1 Main technologies of WPT

我国在无线电能传输技术领域的研究工作起步较晚,从本世纪初开始,国内才逐渐开始进行相关的研究,但主要集中在感应式非接触无线电能传输技术和磁耦合谐振式无线电能传输技术的研究上。中国科学院电工研究所是国内较早开展非接触无线电能传输技术研究的单位之一,取得了一定的研究成果^[19]。2002年,重庆大学也开始对非接触式电能传输技术的基础理论及工程应用进行研究^[20,21],并成功研制了一套电动汽车无接触供电系统。东南大学自2006年在无线能量传输方面也进行相关的研究工作,并提出了电场耦合的光电机技术,以及磁耦合谐振式无线能量传输系统功率调频控制技术、电动汽车无线充放电与电网互动技术等一系列关键技术^[22,23]。此外,哈尔滨工业大学、浙江大学、南京航空航天大学等^[24-26]高校和科研机构在基础理论和应用研究也做了大量的工作。随着国内无线电能传输技术研究的不断升温,2011年10月在天津召开了国内首次“无线电能传输技术”专题研讨会^[27],参会专家讨论了无线电能传输技术的新进展和存在的一些问题,并达成了“天津共识”。该次会议为无线电能技术在国内的研究与推广具有重要的意义。

在诸多的无线电能传输方式中,磁耦合谐振式能量传输技术由于传输距离远、对传输介质依赖小、

方向性要求不高等优势^[16,27],是当前无线电能传输技术研究领域中主要的研究热点。本文接下来的部分主要围绕磁耦合谐振式无线电能传输技术进行详细论述,介绍其传输机理和模型建立主要分析方法,探讨磁耦合谐振式无线电能传输技术的研究现状和关键技术问题,并对该技术目前研究的热点领域及发展趋势进行阐述。

2 磁耦合谐振式无线电能传输技术

2.1 传输机理与系统结构

磁耦合谐振式无线电能传输技术是利用共振的原理,合理设置发射装置与接收装置的参数,使得发射线圈与接收线圈以及整个系统都具有相同的谐振频率,并在该谐振频率的电源驱动下系统可达到一种“电谐振”状态,从而实现能量在发射端和接收端高效的传递。磁耦合谐振式无线电能传输系统主要由电源、能量转换与传输装置(线圈谐振器),能量接收装置三部分组成,系统的结构示意图如图 1 所示。

其中线圈谐振器是系统实现能量高效传输的关键。线圈谐振器性能的优劣主要体现在能量转换能力上,关键因素在是否具有高的品质因数^[28,29]。从电路理论可知,线圈的品质因数与线圈的电感,内

阻抗以及工作频率紧紧相关($Q=\omega L/R$)。所以线圈谐振器的设计也主要从以上三个方面着手,提高谐振频率和自身电感以及减小自身内阻。为了实现高品质因数线圈的设计,线圈谐振频率较高,高达几十 MHz,但受高频杂散电容参数(线圈对地、线圈匝间、线圈间)的影响,线圈的稳定性比较差。

如果线圈的谐振频率是利用线圈自身的电感和高频杂散电容所形成的线圈自谐振频率,虽然谐振频率高达 MHz,但是系统稳定性和可控性很不理想,系统的传输效率对频率的选择性较高(如图 3 所示),尤其当系统的工作频率偏离线圈的谐振频率时,整个系统的传输效率会急剧的下降。

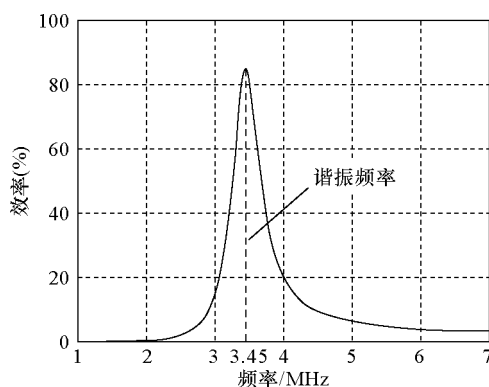


图 3 传输效率随频率的变化

Fig.3 Curve of transfer efficiency varied with frequency

为了提高能量传输稳定性和可控性,学者们提出了一种折中的方法,用小的补偿电容^[30-32]的方式来代替谐振线圈的等效电容,虽然降低了线圈的自谐振频率,却大大增加了系统的稳定性和可控性。

无论是利用自身参数进行谐振频率设计还是外接小的补偿电容进行频率设计,目前在整个传输系统的模型分析上,很少针对线圈分布式参数进行建模,大多数是通过耦合模、互感(电路)和二端口网络等理论利用集中参数进行建模^[33-35]。

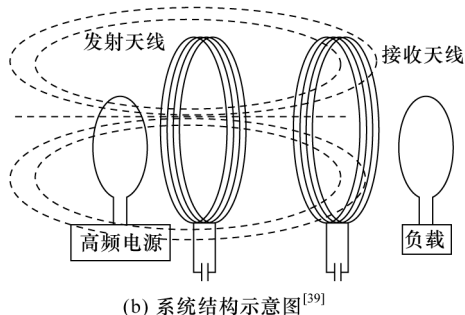
2.2 传输模型

2.2.1 耦合模理论

耦合模理论是一套微扰分析理论,可避开复杂物理模型的分析,直接对物体间的能量耦合进行分析。对于磁耦合谐振式无线能量传输系统来说,发射线圈和接收线圈之间的耦合强度相对较弱,因此耦合模理论在分析系统具有一定的适用性。根据耦合模理论,磁耦合谐振式无线能量传输系统可理解为发射线圈和接收线圈组成的耦合系统,当考虑电源、线圈及负载损耗时,系统运动模式方程为^[36]



(a) MIT 谐振式无线能量传输系统^[16]



(b) 系统结构示意图^[39]

图 2 磁耦合谐振式无线电能传输系统

Fig.2 Magnetically coupled resonant WPT system

$$\begin{cases} \frac{da_1(t)}{dt} = -j\omega_1 a_1(t) + jK_{12}a_2(t) - \tau_1 a_1(t) + S(t) \\ \frac{da_2(t)}{dt} = -j\omega_2 a_2(t) + jK_{21}a_1(t) - (\tau_2 + \tau_L)a_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 分别为发射线圈和接收线圈的模式幅度分量; $|a_1(t)|^2$ 、 $|a_2(t)|^2$ 分别表示两谐振线圈所存储的能量; ω_1 、 ω_2 为两线圈的谐振角频率, K_{12} 和 K_{21} 为耦合系数 (与线圈的互感、自感、谐振频率有关); τ 为线圈的损耗系数, $S(t)$ 为激励源。通过式 (1) 可求解出系统的谐振频率、单个线圈的模式分量、能量, 进一步可求出传输效率、接收功率等。

通过式 (1) 不难看出, 耦合模理论在分析系统的能量流通与转换方面具有较强的优势, 但该方法对系统具体参数较少涉及, 同时线圈的模式分量与耦合系数等参数较难获得。

2.2.2 互感理论

发射线圈和接收线圈之间的电路模型如图 4 所示, 根据互感理论和基尔霍夫定律, 列出发射线圈和接收线圈回路的电压方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_S = (R_1 + j\omega L_1 - j/(\omega C_1))\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2 \\ 0 = -j\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2 + R_L - j/(\omega C_2))\dot{I}_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_1 、 L_2 为发射和接收线圈在高频下的等效电感; R_1 、 R_2 为相应线圈的等效电阻; M 为线圈间的互感, $M = k\sqrt{L_1 L_2}$, k 为两谐振线圈的耦合系数; C_1 、 C_2 为发射线圈与接收线圈在高频下的等效电容; R_L 为等效负载电阻。

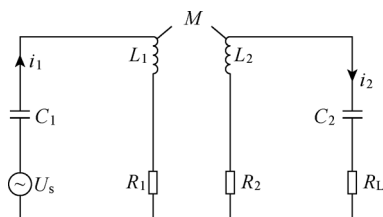


图 4 无线电能传输系统等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of WPT system

互感理论分析传输系统相对较为简单, 也是目前广泛使用的方法之一, 利用式 (2) 所示的关系, 根据两线圈回路的自谐振频率相同并且等于电源的输出频率的条件, 可以对系统进一步求解, 其关键是两线圈间的互感。而互感是与线圈的匝数、半径、间距等参数相关, 尤其当空间两线圈分布位置不确定时, 互感的求解比较复杂, 目前仍未有一种精确的求解方法, 多采用近似求解^[14-16,22]。

2.2.3 二端口网络

利用二端口网络分析传输系统的模型是继耦合模理论和互感电路理论之后又一主要研究手段, 它将能量传输与转换部分看成是一个二端口网络, 如图 5 所示, 其动力学方程为

$$\begin{cases} V_2 = A \times V_1 + B \times I_1 \\ I_2 = C \times V_1 + D \times I_1 \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (3) 以及各端口的参数可对系统进行求解。

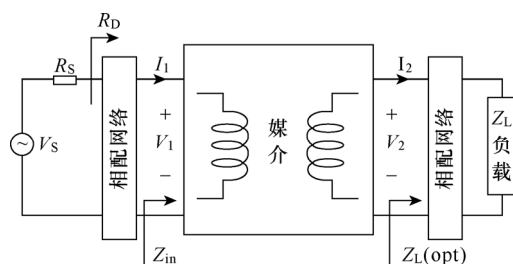


图 5 系统二端口模型^[37]

Fig.5 Two-port model of WPT system

3 关键技术及待研究的关键问题

3.1 高频功率电源技术

磁耦合谐振式无线能量传输之所以能高效传输主要取决于系统能否工作在谐振状态, 对于一套设计好的线圈谐振器, 故要求电源与谐振器之间的频率要保持一致, 如前所述谐振器一般设计为具有较好的谐振频率, 尤其在大功率能量传输方面要求电源不仅能够提供足够的驱动能力还要具有相应的输出频率, 因此给电源的设计提出了很高的要求。目前在兆赫兹的级别下能够实现的大功率电源方式主要有振荡式、逆变式和功率放大式。

振荡类电源结构较为简单, 易实现, 常见的振荡电路有变压器反馈式 LC 振荡电路、电感三点式 LC 振荡电路和电容三点式 LC 振荡电路, 但缺点也很明显。振荡电路的转换效率较低, 谐振频率与振荡的 LCR 参数相关, 调节起来较为困难, 目前在这一方面的研究较少, MIT 所实现的磁耦合谐振式无线电能传输系统中, 采用电容三点式振荡电路实现^[16,38], 虽然发射线圈和接收线圈的能量转换效率很高, 在 1m 范围内可达 90%, 但整个系统的转换效率却不到 20%, 可见电源的转换效率极大地影响了整个系统的转换效率。文献[39]也利用该技术在距离 1m 处实现了功率 1kW 的输出, 但系统的整体效率较低。

为了实现电源的可控,目前多采用电力电子逆变的方式实现^[40-42],但受电力电子器件的限制,该类型的电源输出频率很难达到兆赫兹级别,一般情况下电源输出频率多从几十 kHz 到几千 kHz 不等,功率越大,频率的提高实现起来越困难。

多数时候为了寻求更高频率的功率输出,借鉴了用于射频领域的电源技术,采用功率逐级放大的方式来实现高频率大功率的电源设计,此类电源频率较高可达几兆或更高^[43,41],不足之处在于逐级放大不仅损失了效率,而且对每一级的阻抗匹配要求比较严格,设计起来较为困难。目前多数无线电能传输研究所使用的频段为工业科研医疗允许频段(13.56MHz)或更高的频段,采用的电源多采用射频功率放大的原理实现^[45]。

3.2 谐振器设计与优化

3.2.1 谐振线圈设计

除了电源以外,谐振器线圈的设计也是磁耦合谐振式无线电能传输中的关键技术之一,如前所述高品质因数的谐振器线圈对系统传输性能的影响是至关重要的,它的参数与系统的传输效率、功率、传输距离等有着直接关系。

谐振器线圈自身参数的优化主要从线圈自身的匝数、绕制方法、匝间距设计、材料选择等方面考虑,结合系统的输出性能要求对谐振器线圈进行优化。文献[46,47]给出了在既定频率下线圈的匝数选取的优化方法,以及线圈结构不变的情况,通过改变线圈的半径尺寸实现系统的效率优化。文献[48]采用超导材料制作的谐振器线圈,研究结果表明在其他条件不变的情况下,可将 MIT 提出的系统的传输距离从 2m 提高到 100m,极大地提高系统的传输能力和传输距离。文献[49]则指出将铜导线表面覆盖铁等磁性介质,能够增加线圈的耦合以及减小临近效应引起的损耗。

另外作为一种新的研究方向,采用介电常数和磁导率同时为负值的左手材料,也被研究用于提高系统的传输性能。

3.2.2 多线圈的设计

多线圈设计指在能量的传输过程中,采用多于 2 个的线圈结构来实现能量的传输。采用多线圈设计的场合一般是在增加系统的传输效率、传输距离以及改变系统的能量传输方向等方面。文献[16]通过采用四套线圈结构,通过引入驱动线圈和负载线圈以降低电源侧和负载侧对发射和接收线圈品质的影响,以实现发射线圈和线圈最大化的能量转换。

MIT 的 Rafif E. Hamam 等人参照量子干涉现象的电磁感应透明效应^[50],提出了中继线圈的概念,通过在发射线圈和接收线圈之间增加一个同谐振频率的线圈(如图 6 所示),可以极大地提高能量转换效率,降低空间散热损耗,在此基础上,中继线圈作为系统提高的一种手段被广泛的研究^[54]。文献[51,52]采用多线圈的设计方法实现一对多和多对一的传输结构,即采用一个发射线圈和多个接收线圈或多个发射线圈对一个接收线圈的方式实现能量的传输(如图 7 所示),都取得了较好的传输效果。

在能量传输方面,虽然磁耦合谐振式无线能量传输对方向性的要求不高,但仍具有一定的方向,为了更好的实现能量的定向传输,多线圈设计也被应用在改变能量传输路径上^[53]。通过改变不同中继线圈的空间布局,从而达到改变能量传输路径的效果。

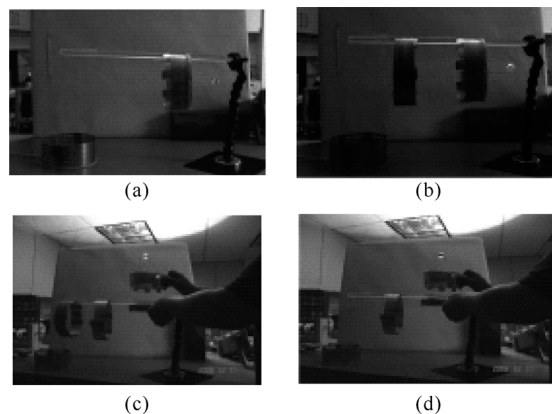


图 6 采用中继线圈的无线能量传输系统^[54]

Fig.6 WPT system based the relay coils

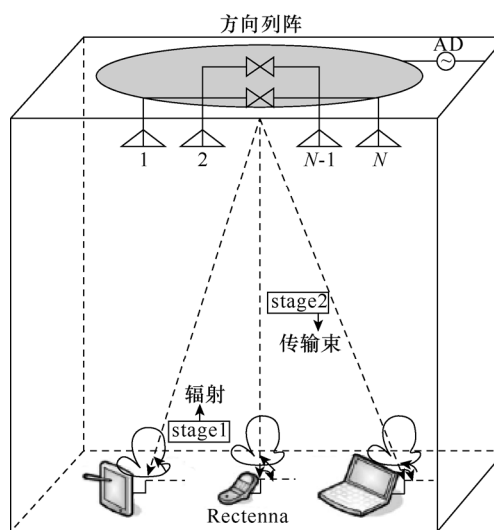


图 7 多电源多接收线圈的无线电能传输系统结构^[55]

Fig.7 Structure of multi - power and multi - receiver coils WPT system

3.3 系统控制策略和优化方法

3.3.1 频率分裂及其优化技术

频率分裂现象是磁耦合谐振式和感应式无线电能传输技术都普遍存在的现象^[56,57]，它是由于发射线圈和接收线圈之间的耦合强度加强导致系统出现多个谐振频率的现象。图 8 给出了系统出现频率分裂现象时，整个系统负载侧接收到的功率情况，从图 8 所示的结果不难看出，随着发射线圈和接收线圈之间的距离不断加强（耦合强度增加），系统的负载侧接收功率不再出现在自然谐振频率处。根据耦合模理论，一般情况下系统会出现三个谐振频率，分别称为自然谐振频率、奇/偶谐振频率^[58]（极值功率对应的频率点）。这种现象不仅增加了系统控制的复杂性，而且增加了系统的不稳定性。

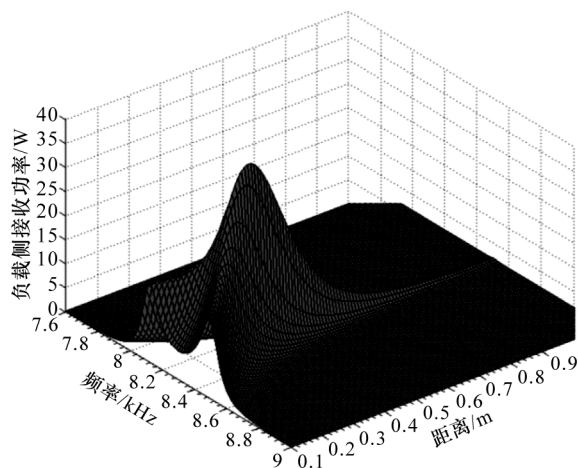


图 8 频率分裂与传输功率的关系

Fig.8 Relation of transfer power and frequency splitting

研究发现造成频率分裂的主要原因是线圈之间的过耦合，为了解决频率分裂目前主要从线圈的位置着手（如图 9 所示）：通过改变线圈之间的相对位置，从而减弱发射线圈和接收线圈之间的互感，实现系统退出频率分裂区域^[59]；改变两线圈之

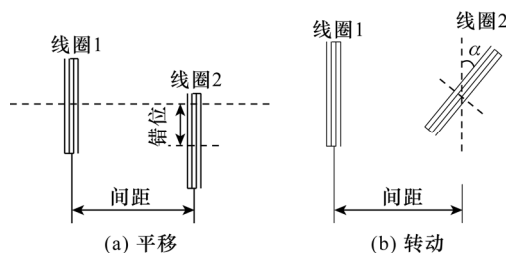


图 9 改变线圈间耦合的两种方式

Fig.9 Two ways to change the coupling between the coils

间的旋转角度，在不改变线圈的空间相对位置的情况下，改变发射或接收线圈的角度，可使得系统退出频率分裂区域；改变负载电阻的大小，当然在很多场合负载电阻是不易改变的，所以此种方法具有一定的局限性。

3.3.2 控制策略和优化方法

谐振频率是影响系统传输效率的一个主要因素，因此目前关于谐振式无线电能传输的优化和控制大多是围绕谐振频率来实现的。前面也提到谐振器线圈的高品质因数，往往导致系统在工作时稳定性较差，为了提高系统的稳定性，文献[60]提出了一种动态跟踪控制的方法，通过锁相环实现反馈，不断根据接收线圈的频率变化调整电源侧输出频率，从而实现系统谐振频率的实时调谐。锁相环闭环跟踪控制在解决谐振式无线电能传输系统稳定性差的问题上具有很大的优势。根据谐振频率与传输效率之间的关系，文献[61]提出了一种基于频率分段的效率控制方法，通过在不同传输距离段采用不同的谐振频率，来实现传输效率的稳定。文献[62]利用相控电感来实现谐振频率调节，从而达到传输效率稳定控制的目的。

3.4 电磁环境及其对生物体的影响

电磁环境问题不仅是谐振无线电能传输技术研究一个热点问题，还是一个难点问题，根据 MIT 提出的实验室数据，磁场强度为几个特斯拉，与核磁共振的磁场强度相当^[16]。文献[63]进一步研究指出由于人体具有很大的磁导率，在该强度的磁场下，对人体的影响是很小。关于磁耦合谐振式无线电能传输技术的电磁环境问题的研究尚处于起步阶段，虽然有部分关于电磁磁路和电磁兼容性的研究，但总体上仍处于探索阶段。

4 热点研究领域及发展趋势

4.1 电动汽车领域

将无线电能传输技术应用到电动汽车的无线充放电中，不仅可以解决各类充电桩的建设问题，同时还可以分散电动汽车充电的集中程度，还可以一定程度上缓解电动汽车规模化充放电对电网的冲击。

目前关于电动汽车的无线供电技术国内外各大汽车厂商以及科研机构等都在积极的开展研究，并取得了显著的成果^[64,65]。电动汽车无线充电已成为

当今世界研究的热点。

另外,电动汽车作为智能电网的一个重要组成部分,规模化的电动汽车还可作为电网的储能设备。无线充电技术的应用可以大大提高电动汽车电网间的互动能力,对智能电网的积极作用更显著。具体优势表现为:

(1)可更好地抑制可再生能源的输出波动。无线充放电的电动汽车具有更强的与电网的互动能力,通过双方的智能互动系统,自动控制电动汽车的合理充放电,从而达到抑制可再生能源输出波动,提高可再生能源的消纳。

(2)可更好地减少对电网冲击影响。相对于有线充电方式,无线充电方式充电地点更为分散,有利于电动汽车充电的聚集度;由于不存在于电网的物理连接,无线充电方式更为灵活、安全,能分散连续充电时间,同时也大大减少快速充电的可能性。无线充电方式能有效减轻电动汽车充电对电网产生的冲击。

(3)可更好地发挥削峰填谷作用。无线充放电技术可以通过用户意愿设定和电网智能调度,随时随地在停车位/停车场/移动途中完成与电网互动,执行充放电操作,完成蓄能/释能过程。电动汽车作为移动储能工具,能更好地发挥削峰填谷的作用,平衡负荷,提高电网稳定性,有效节约能源。

(4)减低对电池容量的要求。电动汽车电池是限制电动汽车发展的主要因素之一。据统计电动汽车行驶 15 万 km,电池就面临失效问题,用户只能更换新电池。而无线充电方式相对可以减小对电池容量的要求,减低更换新电池的成本。例如 2010 年 3 月 9 日在韩国首都首尔南部一座游乐园内首次使用的一款无线充电的公交汽车系统,所使用的电池体积只是传统电动车电池的五分之一,而且不需要长时间充电;2011 年欧洲进行了利用公交车进站停站时间进行无线充电的实验,公交车的电池容量从 145kW·h 降到 45kW·h。

4.2 智能家居

智能家居近些年逐渐被人们所关注,其中智能家居的供电中无线电能传输技术具有突出的优势,为摆脱传统充电线缆的限制,最大化体现便捷、人性化,“无尾”家电设备逐渐被提出。诸如“免电池”无线鼠标以及手机、笔记本电脑无线充电终端等^[66,67]。

4.3 医疗设备

无线电能传输技术在医疗设备应用主要集中在植入式医疗设备的无线供电中,诸如心脏起搏器、神经刺激器、全人工心脏、人工耳蜗和视网膜假体^[68-70]等。植入式医疗设备一般的供电功率需求很小,在几十微瓦到几十瓦不等,多采用经表皮直接供电、植入式电池无线充电等方式。例如,加利福尼亚大学 G. X. Wang 等人研制的人工视网膜供电装置^[71]。日本东北大学小柳光教授,试制出的可从外部向植入眼球的人工视网膜用进行无线供电的系统。英国南安普敦大学的研究成功的一款能将振动转化为电能的“迷你发电机”,可望将来能凭借心脏病人的心跳为自己的心脏起搏器供电。

人体植入设备的非接触电能传输也是无线电能传输的主要热点研究领域之一,植入式设备采用无线供电具有以下优点:

(1) 供电中没有物理连接,避免了导线与皮肤的直接接触,防止感染引起的并发症。

(2) 解决了植入式电池电能耗尽后需手术更换的问题,提高手术后病人的生活质量。

(3) 与人体皮肤没有直接的电气连接,不存在裸露的导线和接触机构,消除了意外电击的可能性,提高了设备对人体的安全等级。

(4) 不存在直接的摩擦,消除了机械上的磨损和电气腐蚀,具有高可靠性和免维护性。

(5) 由于非接触变压器一、二次是非紧密耦合的,系统在变压器一、二次产生一定程度的错位时仍可正常工作,提高了供电时的灵活性和病人的舒适性。

4.4 工业应用

无线电能传输技术随着不断的成熟和发展,其在工业领域也有非常广阔的应用前景。在工业上一些特殊场合如化工设备中的检测装置、水下机器人、分布式传感器的供电问题等等^[72,73],这些场合下的用电装置一般采用换电池模式或用电缆输电,给设备的正常使用和维护带来了诸多的不便,而无线电能传输技术克服了上述缺点成了近年来国内外学者和公司研究的一个新的热点。

5 存在的问题与发展趋势

无线电能传输技术不是一个新的概念,但新技术和新应用的引入逐渐使其成为一门新的研究学科。

尤其无线电能传输技术具有传统电源线供电技术所未有的独特的优势, 该技术的发展与进一步突破将在电动汽车、医疗、工业、电子等领域产生深远的影响。虽然近些年以磁耦合谐振式无线电能传输技术为基础的无线电能传输技术逐渐兴起, 实际上仍有很多问题亟待解决, 如理论不够完善, 现有的分析理论虽然能够给实际的研究提供一定理论支撑, 但关于系统特性、参数优化、空间电磁场分布等研究仍没有较为严谨的分析方法。

高频功率电源和整流技术仍未有较好的解决, 现有的高频电源方案普遍存在效率低下、设计复杂等弊端。系统的控制和优化问题有待解决, 对于高品质因数谐振器线圈给系统的运行带来的不稳定性问题, 也未得到有效地解决。当然作为目前能实现中程距离能量传输的无线实现方式, 仍具有较大的发展潜力。

参考文献

- [1] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54-63.
Yu Weiguo, Xiong Youjing, Zhou Xinfeng, et al. Analysis on technical line losses of power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-63.
- [2] 王涛, 张坚敏, 李小平. 计划线损率的计算及其评价[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 40-42.
Wang Tao, Zhang Jianmin, Li Xiaoping. Calculation of scheduled loss ratio and its assessment[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 40-42.
- [3] Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy: US 1119732[P]. 1914-10.
- [4] Yagi H, Uda S. Feasibility of electric power transmission by radio waves[C]. The 3rd Pan-Pacific Academic Conference, Tokyo, Japan, 1926.
- [5] Brown W C. Thermionic diode rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968, 1: 295-298.
- [6] Brown W C. The combination receiving antenna and rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968, 2: 273-275.
- [7] Matsumoto H. Numerical estimation of SPS microwave impact on ionospheric environment[J]. Acta Astronaut, 1982, 9(8): 493-497.
- [8] Brown W C. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9): 1230-1242.
- [9] Brown W C, Eves E E. Beamed microwave power transmission and its application to space[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(6): 1239-1250.
- [10] 杨雁南. 激光用于无线电力传输的探索[C]. 中国光学学会 2011 年学术大会摘要集. 2011.
- [11] 宇飞. 用激光在太空中传输电力[J]. 激光与光电子学进展, 1980(5): 30-41.
Yu Fei. Use laser to transmit power in space [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1980(5): 30-41.
- [12] Boys J T, Covic G A. Pick-up transformer for ICPT applications[C]. Electronics Letters. 2002: 1276-1278.
- [13] Hu A P, Boys J T. Frequency analysis and computation of a current-fed resonant converter for ICPT power supplies[C]. International Conference on Power System Technology, 2000: 327-332.
- [14] Wang Chwei-Sen, Stielau, Oskar H. Covic. Grant A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1308-1314.
- [15] Stielau O H, Covic G A. Design of loosely coupled inductive power transfer systems[C]. International Conference on Power System Technology, 2000: 85-90.
- [16] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [17] Jeff R C, Jietao L. A capacitively coupled battery charging system[J]. Dept. Elect & Comp. Eng. the Univ. of Auckland, New Zealand, 2006.
- [18] 柏杨, 黄学良, 邹玉炜, 等. 基于超声波的无线电能传输的研究[J]. 压电与声光, 2011(2): 324-327.
Bai Yang, Huang Xueliang, Zou Yuwei, et al. Study of wireless power transfer system based on ultrasonic[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011(2): 324-327.
- [19] 武瑛. 新型无接触供电系统的研究[D]. 中国科学院电工研究所, 2004.
- [20] 孙跃, 王智慧, 戴欣, 等. 非接触电能传输系统的频率稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2005(11): 56-59.

- Sun Yue Wang Zhihui Dai Xin et al, Study of frequency stability of contactless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005(11): 56-59.
- [21] 孙跃, 祝兵权, 戴欣. CPT 系统输出电压主动控制技术[J]. 电源技术, 2011(1): 76-78.
- Sun Yue, Zhu Bingquan, Dai Xin. Active control technology of CPT system output voltage[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011(1): 76-78.
- [22] 黄辉, 黄学良, 谭林林, 等. 基于磁场共振的无线电力传输发射及接收装置的研究[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(1): 32-35.
- Huang Hui, Huang Xueliang, Tan Linlin, et al. Research on transmitter and receiver of wireless power transmission based on magnetic resonance coupling[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(1): 32-35.
- [23] Tan Linlin, Huang Xueliang, Li Hui, et al. Efficiency analysis and optimization on magnetic resonance coupled wireless transfer system[J]. Advanced Materials Research, 2011, 308-310: 1345-1348.
- [24] 孙勇, 楼佩煌, 吴亮亮. 非接触供电系统的应用平台研究[J]. 工业控制计算机, 2009(3): 86-88.
- Sun Yong, Lou Peihuang, Wu Liangliang. Research on application platform of contactless supply system [J]. Industrial Control Computer, 2009(3): 86-88.
- [25] 林宁, 姚纓英. 恒压输出的无线电能传输系统设计[J]. 电力电子技术, 2011(2): 86-88.
- Lin Ning, Yao Yingying. Design of a wireless energy transfer system with constant output[J]. Power Electronics, 2011(2): 66-68.
- [26] Zhu Chunbo, Liu Kai, Yu Chunlai, et al. Simulation and experimental analysis on wireless energy transfer based on magnetic resonance[C]. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008: 1-4.
- [27] 沈爱民. 无线电能传输关键技术问题与应用前景(新视点新学说学术沙龙文集)[M]. 中国科学技术出版社, 2012.
- [28] Li Xiuhan, Zhang Hanru, Peng Fei, et al. A wireless magnetic resonance energy transfer system for micro implantable medical sensors[J]. Sensors, 2012, 12: 10292-10308.
- [29] Uei-Ming Jow, Maysam Ghovnlloo. Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2007, 1(3): 193-200.
- [30] Zhen Ning Low, Raul Andres Chinga, Ryan Tseng. Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1801-1812.
- [31] Abe H, Sakamoto H, Harada K, A non-contact charger using a resonant converter with parallel capacitor of the secondary coil[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference Exposition, 1998, 1: 136-141.
- [32] Casanova J J, Low Z N, Lin J, et al. coil achieving uniform magnetic field distribution for planar wireless power transfer system[C]. IEEE Radio Wireless Symposium, 2009: 530-533.
- [33] Yin Ning, Xu Guizhi, Yang Qingxin, et al. Analysis of wireless energy transmission for implantable device based on coupled magnetic resonance[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 723-726.
- [34] Zhang Xiu, Ho s L, Fu W N. Analysis and optimization of magnetically coupled resonators for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4511-4514.
- [35] Chen ChihJung, Chu TahHsiung, Lin ChihLung, et al. A study of loosely coupled coils for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2010, 57(7): 536- 540.
- [36] Haus H. Waves and fields in optoelectronics[M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- [37] Zargham, M. Maximum. Achievable efficiency in near-field coupled power-transfer systems[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2012, 6(3): 228-245.
- [38] Robert Alexander Moffatt. Wireless transfer of electric power[D]. MIT, 2009.
- [39] 黄辉. 基于磁场谐振耦合的无线电力传输效率及电源研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [40] Wu Hunter H, Covic Grant A, Boys John T, et al. Series-tuned inductive-power-transfer pickup with a controllable AC-voltage output[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 98-109.

- [41] Wang Chwei Sen, Covic Grant A, Stielau Oskar H. Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 995-1002.
- [42] Cha Hyouk Kyu, Park Woo Tae, Je Minkyu. A CMOS rectifier with a cross-Coupled latched comparator for wireless power transfer in biomedical applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2012, 59(7): 409-413.
- [43] Fotopoulou Kyriaki, Flynn Brian W. Wireless power transfer in loosely coupled links: coil misalignment model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 416-430.
- [44] Kusaka K, Itoh J. Experimental verification of rectifiers with SiC/GaN for wireless power transfer using a magnetic resonance coupling[C]. 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, 2011: 1094-1099.
- [45] Kiani M, Ghovanloo M. The circuit theory behind coupled-mode magnetic resonance-based wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2012, 59(8): 2065-2074.
- [46] 陈逸鹏, 聂一雄. 谐振式无线电能传输系统谐振线圈优化设计[J]. 厦门理工学院学报, 2012, 20(3): 62-66.
- Chen Yipeng, Nie Yixiong. An optimal design of resonant coil for magnetically coupled resonant wireless power transfer system[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2012, 20(3): 62-66.
- [47] Mauro Ettore, Anthony Grbic. A transponder-based, nonradiative wireless power transfer[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 1150-1153.
- [48] Raymond J. Sedwick. Long range inductive power transfer with superconducting oscillators[J]. Annals of Physics, 2010, 325: 287-299.
- [49] Mizuno T, Yachi S, Kamiya A, et al. Improvement in efficiency of wireless power transfer of magnetic resonant coupling using magnetoplated wire[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4445-4448.
- [50] Hamam Rafif E, Karalis Aristeidis, Joannopoulos J D, et al. Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: An EIT-like approach[J]. Annals of Physics, 2009, 324: 1783-1795.
- [51] Casanova Joaquin J, Low Zhen Ning, Lin Jenshan. A loosely coupled planar wireless power system for multiple receivers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3060-3068.
- [52] André Kurs, Robert Moffatt, Marin Soljačić. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96: 044102-044108.
- [53] Zhong W X, Chi Kwan L, Hui S Y. Wireless power domino-resonator systems with noncoaxial axes and circular structures[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4750-4762.
- [54] Zhang Fei, Hackworth Steven A, Fu Weinong, et al. Relay effect of wireless power transfer using strongly coupled magnetic resonances[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1478-1481.
- [55] Li Ying, Member, Vikram jandhyala. Design of retrodirective antenna arrays for short-range wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 206-211.
- [56] 武瑛, 严陆光, 徐善纲. 新型无接触电能传输系统的稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 63-66.
- Wu Ying, Yan Luguang, Xu Shangang. Stability analysis of the new contactless power delivery system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 63-66.
- [57] 张献, 杨庆新, 陈海燕. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 167-172.
- Zhang Xian, Yang Qingxin, Chen Haiyan. Research on characteristics of frequency splitting in electromagnetic coupling resonant power transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 167-172.
- [58] Huang Xueliang, Tan Linlin, Li Hui, et al. Frequency splitting and distance boundary condition in magnetic resonance coupled wireless power transfer system[J]. Advanced Materials Research, 2011, 308-310: 1349-1352.
- [59] Sample Alanson P, Meyer David A, Smith Joshua R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power

- transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554
- [60] 傅文珍, 张波, 丘东元. 频率跟踪式谐振式耦合电能无线传输系统研究[J]. 变频器世界, 2009(8): 41-46.
Fu Wenzhen Zhang Bo Qiu Dongyuan. Study on frequency-tracking wireless power transfer system by resonant coupling[J]. The World of Inverters, 2009(8): 41-46.
- [61] Tan Linlin, Huang Xueliang, Huang Hui, et al. Transfer efficiency optimal control of magnetic resonance coupled system of wireless power transfer based on frequency control[J]. Science in China Series E: Engineering & Materials Science, 2011, 54(6): 1428 - 1434.
- [62] 强浩, 黄学良, 谭林林, 等. 基于动态调谐实现感应耦合无线电能传输系统的最大功率传输[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(7): 830-837.
Qiang Hao, Huang Xueliang, Tan Linlin, et al. Achieving maximum power transfer of inductively coupled wireless power transfer system based on dynamic tuning control[J]. Science. China Technological Sciences, 2012, 42(7): 830-837.
- [63] Karalis Aristeidis, Joannopoulos J D, Soljacic Marin. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer[J]. Annals of Physics, 2008, 323: 34-48.
- [64] <http://www.letv.com/ptv/vplay/1014068.Html>.
- [65] http://news.xinhuanet.com/energy/2012-02/11/c_122688212.html.
- [66] 周成虎, 瓮嘉民. 一种用于无线鼠标的无接触供电电路[J]. 现代电子技术, 2011, 34(12): 138-140.
Zhou Chenghu, Weng Jiamin. Contactless power supply circuit for wireless mouse[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(12): 138-140.
- [67] Toshio Ishizaki, Satoshi Nojiri, Tetsuya Ishida, et al. 3-D free-access WPT system for charging movable terminals[C]. 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications(IMWS), 2012: 219 -222.
- [68] Yan Guozheng, Zan Peng, Ye Dongdong, et al. Design of transcutaneous energy transmission system for artificial anal sphincter[C]. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 1434-1438.
- [69] Lim H G, Yoon Y H, Lee C W, et al. Implementation of a transcutaneous charger for fully implantable middle ear hearing device[C]. IEEE Conference of Engineering in Medicine and Biology, 2005: 6813-6816.
- [70] Chaimanonart N, Olszens K R, Zimmerman M D, et al. Implantable RF power converter for small animal in vivo biological monitoring[C]. IEEE Conference of Engineering in Medicine and Biology, 2005: 5194-5197.
- [71] Wang G, Liu W, Sivaprakasam M, et al. Design and analysis of an adaptive transcutaneous power telemetry for biomedical implants[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2005, 52(10): 2109-2117.
- [72] David L Mascarenas, Eric B Flynn, Michael D Todd, et al. Experimental studies of using wireless energy transmission for powering embedded sensor nodes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(12): 2421-2433.
- [73] Li Zesong, Li Dejun, Lin Lin, et al. Design considerations for electromagnetic couplers in contactless power transmission systems for deep-sea applications[J]. Journal of Zhejiang University-Science C-Computers & Electronics, 2010, 11(10): 824-834.

作者简介

黄学良 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线电能传输技术、新型能量转换装置、智能用电技术。

谭林林 男, 1986 年生, 博士研究生, 研究方向为无线电能传输技术, 电力电子驱动与控制。