

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.6.168

中图分类号: TM724

文献标志码: A

# 家用电器无线电能传输技术发展及现状

朱焕杰, 张 波

(华南理工大学电力学院, 广州 510641)

**摘要:**近年来,家用电器智能化受到广泛关注。相比有线供电,无线电能传输技术具有高安全性、高便利性等优点,在家用电器智能化发展中具有广阔的应用前景。对家用电器无线电能传输技术的发展及现状进行了梳理。首先介绍了无线家电的产品化及标准化进展,然后归纳了家用电器无线电能传输系统的特点,接着分别从耦合机构、拓扑设计、控制方法、异物检测等方面展现了家用电器无线电能传输技术研究现状,最后分析了家用电器无线电能传输技术的发展趋势和目前亟待解决的关键问题。

**关键词:**无线电能传输;家用电器;耦合机构;拓扑设计;控制方法;异物检测

## Present Situation and Development of Wireless Power Transfer Technology for Household Appliances

ZHU Huanjie, ZHANG Bo

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In recent years, intelligent household appliances have attracted extensive attention. Compared with the wired power supply, the wireless power transfer (WPT) technology has broad application prospects in the intelligent development of household appliances owing to its advantages such as high security and high convenience. In this paper, the development and status quo of the WPT technology for household appliances are elucidated. First, the productization and standardization progress of wireless household appliances are introduced. Second, the characteristics of the WPT system for household appliances are summarized, and its research status is presented from aspects of magnetic coupler, topology design, control methods, foreign object detection, etc. Finally, the development trends of the WPT technology for household appliances and the critical issues to be solved are analyzed.

**Keywords:** wireless power transfer (WPT); household appliance; magnetic coupler; topology design; control method; foreign object detection

无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术彻底摆脱了传统导电缆线的束缚,以其安全性、便利性和实用性获得了越来越多的关注。WPT 技术主要有以下 3 种:磁场耦合式、电场耦合式和微波无线电能传输技术。目前,磁场耦合式 WPT 技术使用最为广泛,已经在移动设备、电动汽车、植入式医疗设备以及家用电器等领域得到了应用。采用 WPT 技术的家用电器主要有无尾电视、无线厨房

电器、无线吸尘器、无线照明灯具等,这类家用电器无需电源线,可称为无线家电。相比传统有线家电,无线家电具有诸多优点:①用电安全性高。免插拔,无电火花,避免电源线腐蚀、老化带来的触电风险。②便利性高。即放即用,一个发射器兼容多种无线家电。③整洁美观,密封性好,具有较好的防水防潮能力,可安全使用。④有利于实现家电的自动化和智能化。

无线家电是智能家居的发展方向之一,具有广阔的市场前景。无线充电联盟等标准组织已经开展无线家电的标准化工作,许多国内外企业和科研院所也开展了家电无线电能传输技术的研究。

收稿日期:2019-07-04;录用日期:2019-11-26

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51437005)

Project Supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (51437005)

## 1 无线家电行业的发展

根据 Market Research Future 的市场预测,到2022年底,全球无线电能传输市场规模将达到约120亿美元,2016—2022年复合年增长率约为24%<sup>[1]</sup>。消费者对无线电能传输设备的需求数量每年都在增长。随着小功率移动电子设备无线充电的市场化和普及程度的提高,国内外企业逐渐将无线电能传输技术应用到中大功率家用电器领域,发布了许多无线家电产品及其解决方案。一些标准组织已经制定或正在制定无线家电的行业标准,进一步推动了无线家电的市场化。

### 1.1 产品化进展

国外企业较早对家电无线电能传输技术开展产品化应用,部分产品如图1所示。2009年,日本Sony公司开发了一套用于电视机等产品的无线电能传输系统,通过增设中继单元可提升传输距离<sup>[2]</sup>。美国Fulton Innovation公司将其eCoupled技术应用到较大功率的厨房电器,供电距离可达数英寸,能够实现为多个不同功率等级的设备供电<sup>[3]</sup>。2013年日本Toshiba公司推出了基于电磁感应技术的无线照明灯具<sup>[4]</sup>。荷兰Philips公司从2014年开始陆续推出了一系列磁耦合式无线供电的厨房电器。GaN器件公司EPC在2017年设计了一套6.78 MHz的液晶电视无线供电系统<sup>[5]</sup>。韩国Samsung公司、美国Witricity公司等也推出了相关无线家电方案<sup>[6-7]</sup>。

国内企业在无线家电领域的产品化应用起步稍晚,但发展迅速,部分产品如图2所示。2010年,海尔(Haier)公司在第43届国际消费电子展CES(International Consumer Electronics Show)展示了无尾电视<sup>[8]</sup>,随后海尔公司在2012年推出了无线供电的电饭煲及搅拌机,并在2013年成功上市。中惠创智、上海楚山电子科技、厦门新页集团等也研发出了无线家电产品或无线家电解决方案<sup>[9-11]</sup>。

表1总结了部分国内外企业无线家电产品和相关解决方案的技术参数,功率等级从60 W至2 500 W不等,传输效率为65%~93%。



(a)Fulton Innovation 无线厨电



(b)Toshiba 无线照明灯具



(c)Philips 无线厨电



(d)Samsung/Witricity 无尾电视

图1 国外企业的无线家电

Fig.1 Wireless household appliances made by foreign enterprises



(a)海尔无尾电视



(b)海尔无线厨电



(c)海尔无线充电扫地机器人



(d)中惠创智无线厨电

图2 国内企业的无线家电

Fig.2 Wireless household appliances made by domestic enterprises

### 1.2 标准化进展

(1)无线充电联盟WPC(Wireless Power Consortium)。WPC 2010年公布了基于磁耦合感应式无线充电技术的Qi标准,功率等级为5~15 W。目前市场上有3 000多种经Qi标准认证的设备。在小功率标准获得成功普及的基础上,WPC发布了中等功率无线充电白皮书,计划制定一个中等功率无线标准,适用于30~200 W范围内工作的一系列电池驱动产品<sup>[12]</sup>,例如家用吸尘器、家用割草机、便携电动工具等。WPC在2013年建立了WPC的厨房工作组KWG(Kitchen Work Group),负责制定厨房电器无线电能传输规范标准,并于2019年9月将该

表 1 部分企业无线家电产品或解决方案的技术参数

Tab.1 Technical parameters of wireless household appliances or solutions provided by some enterprises

公司名称	产品或样机	线圈尺寸/cm	传输距离/cm	效率	工作频率/kHz	功率/W
Sony	TV 无线供电系统	—	50~80	80%	—	60
Fulton Innovation	无线厨电	—	—	—	—	1 500
Philips	无线厨电	—	3	—	—	2 500
Samsung/Witricity	无尾电视	—	50	—	250	100
Powermat	Charging Spot 4.0	—	≤4	65%~90%	100~300	40
Haier	无尾电视	30×30	100	约 80%	数 MHz	100
	无尾厨电发射器	—	垂直 4~5, 水平偏移 3	85%~90%	20~40	1 200
	无线充电扫地机器人	—	0.4~0.8	85%	110~205	15
中惠创智	无线电饭煲	—	6.5	93%	—	900
	无线搅拌机	—	6.5	90%	—	250
	无线供电桌面	—	5	90%	—	250
新页	NS1024	5×5	≤ 0.8	75%	125~180	24
	NS1100	5×5	0.5~0.9	80%~85%	50~150	100
		15×15	2.0~3.2			
楚山电子	100 W 模块	8.5×8.5	≤5	≥86%	80~300	65~100
	500 W 模块	12×12/15×15	≤5	≥80%		200~500
	2 kW 模块	15×15/20×20	≤20	≥80%		2 000

标准命名为 Ki 标准, 最高支持 2.2 kW 功率等级。目前标准仍在制定中, 尚未公布。Ki 标准为厨房电器无线电能传输提供规范和认证程序, 以建立智能和安全兼具的无线厨房<sup>[13]</sup>。

(2) 国际电工委员会 IEC (International Electrotechnical Commission)。IEC 在 2015 年公布了 ISO/IEC 15149-2:2015 标准第 2 部分: 无线电能传输带内控制协议, 适用于便携式设备、家用电器等。其中 TA 15 无线电能传输技术领域包括 WPT 技术标准框架, 用于设备级和系统级操作的 WPT 系统规范、要求、功能架构、接口和相应的服务, 管理和电源控制协议、WPT 设备和系统的功耗及能效测量方法。

(3) 全国家用电器标准化技术委员会无线电能传输家电分技术委员会。2014 年由国家标准委办公室批准成立, 主要负责无线电能传输技术应用于家用电器的安全、能效、性能、通信协议等标准化工作, 2017 年与 WPC 签署联络协议, 将在各自的标准制定过程中交换意见, 并推动全球无线家电的标准化进程。2017 年 10 月国家标准委员会批准并公

布了《GB/T 34439—2017 家用电器 无线电能发射器》<sup>[14]</sup>, 于 2018 年 5 月 1 日起实施。这项标准是针对非充电类家电的发射器, 该标准规定了家用和类似用途的无线电能发射器的术语和定义、分类与命名、技术要求、试验方法、检验规则等。

(4) 无线供电产业联盟 WPIA (Wireless Power Industry Alliance)。2016 年 12 月海尔联合院校、科研机构、无线充电企业等共同发起成立了 WPIA, 致力于无线供电技术专利化、专利标准化、标准产业化, 推动无线充电/供电技术在家电领域应用的发展。

(5) 其他国家相关组织。日本宽带无线研讨会 BWF (Broadband Wireless Forum) 成立了无线电力传输工作小组 (WPT-WG), 与日本无线工业及商贸联合会 ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) 及日本电子信息技术产业协会 JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) 的无线馈送项目组 (Wireless Feeding Project Group) 共同探讨 WPT 的频率、功率、距离、充电方式、人体健康等标准化问题。韩国电信技术协会

TTA (Telecommunications Technology Association) 的智能电力传输项目组 PG909 成立了家用电器和汽车的 WPT 小组 WG9092。

## 2 家电无线电能传输系统结构及特点

目前,应用于家用电器的磁耦合式无线电能传输系统基本结构如图 3 所示,包括功率因数校正 PFC (power factor correction)、高频逆变、发射侧补偿电路、发射线圈、接收线圈、接收侧补偿电路、接收侧电能变换电路以及两侧的通信和控制电路等。电网工频交流电经 PFC 和高频逆变等功率变换环节后,形成高频交流电激励发射线圈产生高频交变磁场,接收端在此高频磁场中拾取能量并通过电能变换电路对不同家电负载进行相应的电压和功率调节。

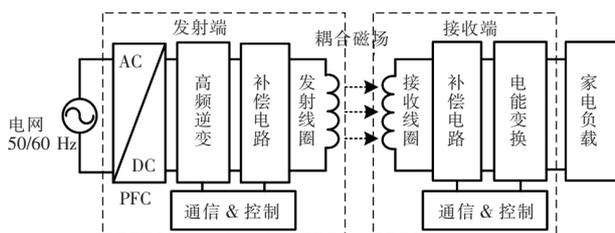


图3 家电无线电能传输系统示意

Fig.3 Schematic of WPT system for household appliances

无线电能传输技术在家电领域的应用具有以下 3 个特点:①接收端放置自由度大。当发射线圈与接收线圈的相对位置即互感耦合系数在较宽范围内发生改变时,需要保证家电正常工作。耦合机构及拓扑设计是提高位置鲁棒性的关键。②负载功率等级范围宽且负载类型复杂。家电功率从数 W (待机)到数百 W、kW (正常工作)不等,负载主要有 3 种类型:一是电阻性负载,如电视、电热水壶、电饭煲、电加热器等;二是感性负载,如搅拌机、洗衣机等;三是混合类型,如面包机、豆浆机、咖啡机等阻感负载。功率等级变化和负载类型切换会对系统稳定性造成影响,因此需要实现对负载的有效识别和鲁棒性控制。③需要保持高效率,以符合家电节能的要求。在负载宽范围变化时,对无线电能传输

系统的效率优化控制必不可少。

## 3 家电无线电能传输技术研究现状

针对无线家电的特点,本节主要从耦合机构、拓扑设计、控制方法及异物检测等方面介绍了家电无线电能传输技术的研究现状。

### 3.1 耦合机构

为了提高家电无线电能传输系统的传输效率及位置鲁棒性,耦合机构设计是关键。目前,无线家电耦合机构主要分为两线圈结构和三线圈结构,如图 4 所示。

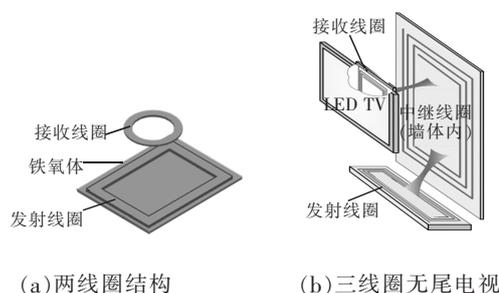


图4 两线圈和三线圈结构

Fig.4 Dual- and three-coil structures

(1)两线圈结构。两线圈结构设计简单,主要用于对安装形式无特殊要求、即放即用的家电。通过设置渐变匝间距、在平面线圈空心处串联小线圈<sup>[15-16]</sup>可以获得较高的品质因数从而提升传输效率。为了提高两线圈无线家电抗偏移能力,文献[17-18]的接收线圈采用较小的平面盘式线圈,发射线圈采用矩形线圈加平板磁芯结构,如图 4(a)所示,可实现 6~10 cm 距离时侧移 10 cm 以内耦合系数基本不变。受电器体积限制,往往采用接收线圈较小的非对称平面双线圈结构,有 2 个需要考虑的关键点:发射线圈内径大于接收线圈外径时,耦合系数对间距变化和偏移不敏感,然而平均耦合系数较低;随着接收线圈内径的增大,平均耦合系数增大,但对间距和偏移变化更敏感<sup>[19]</sup>。

(2)三线圈结构。当负载电阻偏离最优值时,三线圈系统效率下降较慢,因而具有较好的效率鲁棒性;电源电压一定时,随着线圈偏移增加,三线圈系

统电流增量比两线圈系统的小,因而电磁辐射强度增加更少<sup>[20]</sup>。文献[21]采用非对称的三谐振线圈结构设计无尾电视,其结构如图 4(b)所示,并给出了系统中互感的计算方法和各线圈的位置优化方法,当发射线圈、接收线圈的内阻  $r_1$ 、 $r_2$  以及与中继线圈的互感  $M_{1m}$ 、 $M_{2m}$  满足  $M_{1m}=M_{2m}(r_1/r_2)0.5$  时可实现最高传输效率。

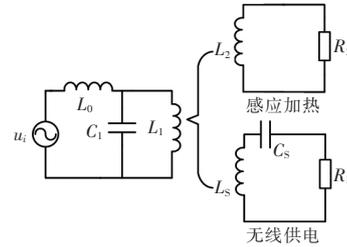
### 3.2 拓扑设计

(1)考虑系统稳定性的补偿拓扑参数设计。为了实现软开关降低损耗,一般采用浮频控制,然而参数的变化使系统具有多个零相角 ZPA(zero phase angle)频率点,因此在浮频控制下,当负载切换或扰动时,容易造成系统工作于不同的 ZPA 频率点,导致系统不能稳定运行,针对这一问题,文献[22-23]采用频闪映射建模,推导了用于家电的并联-串联补偿的原边谐振电流、系统工作频率和负载输出电压近似恒定的约束条件,给出了具有恒流恒频恒压特性的补偿网络参数的设计流程,当家电负载在所设置的范围内变化时均能自然实现原边谐振电流、系统工作频率及负载输出电压的近似恒定,但是要求较高的耦合系数,这限制了传输距离和偏移程度。

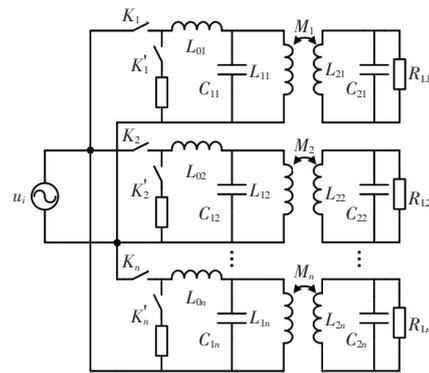
(2)兼具感应加热的补偿拓扑设计。发射侧采用 LCL 和 LCC 复合补偿拓扑,可获得与负载无关的恒定发射线圈电流,适宜多负载和空载运行,并且不会对开关管造成较大电压应力。文献[24]利用 LCL 拓扑设计了兼具感应加热的家电无线供电模块,如图 5(a)所示,铁质锅具等效为电感线圈与内阻串联而成的回路,其对发射侧的反射阻抗使发射线圈等效电感量减小、电阻值增加。无线电能传输和感应加热 2 种模式设置于不同工作频率以获得不同的输入阻抗,满足各自的功率需求。

(3)多分区拓扑设计。文献[25]研究了一种面向家电的多发射多接收无线电能传输系统,如图 5(b)所示,各发射侧采用 LCL 拓扑形成各分区,并联于同一电源,拓宽了供电区域,可解决单发射线圈在多负载投切时易引起系统不稳定的问题。改变补偿电感与原边线圈电感的比值可以改变系统输出电压,不同分区可实现升压或降压,具有较宽的

输出电压范围,满足不同家电负载需求,但各分区仅适用中小功率等级电器以防逆变器电流应力过大。而且,当各分区发射回路电流的相位不一致时会出现环流,需要进行环流抑制。



(a)兼具感应加热的 LCL 型拓扑



(b)LCL 型多分区拓扑

图 5 家电无线电能传输系统补偿拓扑

Fig.5 Compensation topologies of WPT system for household appliances

### 3.3 控制方法

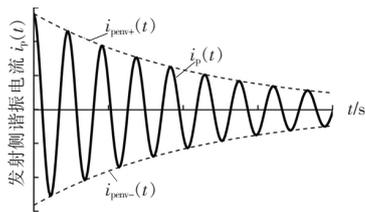
#### 3.3.1 家电无线电能传输系统负载识别

由于家电负载功率等级范围宽且负载类型复杂,系统通过在发射侧动态识别负载或互感参数,并进行相应控制,可提高系统的鲁棒性。文献[26]提出了一种利用能量注入模式和自由谐振模式来识别负载参数的瞬态负载检测模型,如图 6(a)所示,在初始阶段给系统注入微能量,通过对自由谐振模式中  $i_p$  的正极值和频率的实时采样检测,利用不同大小的负载对应不同的  $i_p$  衰减速度的特性,结合对应的动态方程,最终判断家电是否存在并获取其负载大小,从而开始相应等级的功率传输。该方法抗干扰性好,但只适用于电压型无线电能传输系统,不能同时求解负载和互感,由于需要自由谐振阶段,仅适用于供电起始时段,不能在线实时识别。因

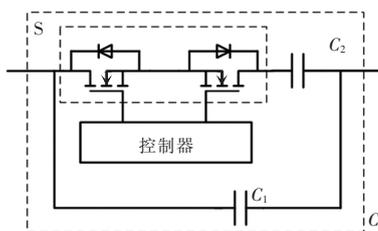
此有研究者利用接收端 P 型补偿拓扑在谐振情况下反射阻抗中负载电阻  $R_L$  和互感  $M$  解耦的特点,提出了负载实时识别的控制方法<sup>[27]</sup>。其反射阻抗为

$$Z_r = \frac{M^2 R_L}{L_2^2} - j \frac{\omega M^2}{L_2} \quad (1)$$

由发射侧输入阻抗推导出识别公式,通过检测发射端电压电流及其相位便能实时地分别求解出负载  $R_L$  和互感  $M$ ,进一步对发射侧全桥逆变进行移相控制、调节前级 DC-DC 变换器输出电压等,最终实现接收侧稳定输出,使家电负载正常工作,但是这种识别方法受到补偿拓扑类型的限制。文献[28]提出了基于开关电容电路的负载在线识别,可适用于各种补偿拓扑,如图 6(b)所示,控制器通过调节发射回路中的开关电容,获取系统在 2 种频率模式下的电气参数进而求解出互感和负载。该方法识别精度高,识别过程仅需 50 ms,但频繁切换负载的家电会造成开关电容的频繁动作进行识别,影响功率传输的连续性。



(a) 基于能量注入和自由谐振的负载识别



(b) 基于开关电容的稳态负载识别

图 6 家电无线电能传输系统的负载识别方法

Fig.6 Load identification methods for WPT system for household appliances

### 3.3.2 家电无线电能传输系统效率优化控制

家电负载与耦合系数的宽范围变化会导致系统效率剧烈波动,因此需要对家电无线电能传输系统进行效率优化控制,目前主要有基于调节电容阵列的效率优化控制和基于负载变换的最优效率跟

踪 2 种方法。

(1) 基于调节电容阵列的效率优化控制。基于调节电容阵列的效率优化控制电路基本结构如图 7 所示。文献[29-30]提出了分段频率动态跟踪的效率优化控制策略,其主要通过检测逆变器输入电流大致识别家电负载功率等级,选择不同的发射侧电容阵列的电容值,进而改变系统实际工作频率,从而实现不同功率等级的家电负载工作在不同的频率段,最终使系统效率  $\eta \geq \eta_0$  ( $\eta_0$  为目标效率),但该方法不适用于收发线圈耦合系数变动较大情况下的效率优化。对于距离变化和偏移的情况,文献[31]在发射侧和接收侧的自适应开关可以在不同的串联和并联电容器值之间切换,从而在不同的范围和偏移条件下获得更高的传输效率。随着功率容量的增加,采用调节电容阵列的方法将会导致无线家电系统的体积和控制复杂度增大,而且受控范围有限,电容切换过程对电器供电质量的影响还有待研究。

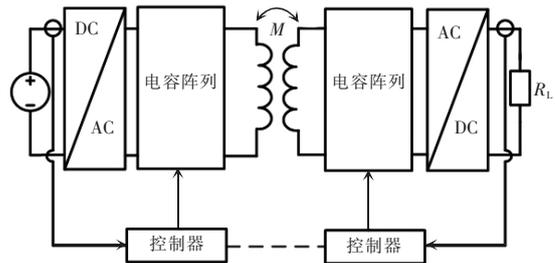


图 7 基于调节电容阵列的效率优化控制拓扑

Fig.7 Efficiency optimization control topology based on adjusting capacitor array

(2) 基于负载变换的最优效率跟踪。对于串联-串联型拓扑,系统的效率可以表示为

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_{Leq}}{[(R_2 + R_{Leq})^2 + X_2^2] R_1 + (\omega M)^2 (R_2 + R_{Leq})} \quad (2)$$

式中:  $R_{Leq}$  为负载  $R_L$  折算到接收侧整流电路前端的等效负载;  $X_2$  为接收侧的电抗。根据式(2),其他参数一定时,  $X_2$  越小系统的效率越高,当副边处于谐振状态时  $X_2=0$ ,此时,令  $\partial \eta / \partial R_{Leq} = 0$  即可得到系统的最优效率及对应的最优等效负载  $R_{Leq-opt-\eta}$ <sup>[32]</sup>,即

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2}{1 + \sqrt{1 + (\omega M)^2 / (R_1 R_2)}} \quad (3)$$

$$R_{Leq-opt-\eta} = R_2 \sqrt{1 + (\omega M)^2 / (R_1 R_2)} \quad (4)$$

通过对  $R_{Leq}$  进行变换,令其在不同互感和负载时均等于对应的  $R_{Leq-opt-\eta}$ , 便能跟踪系统的最优效率。基于负载变换的最优效率跟踪根据其实现方式可分为信息交互式和无信息交互 2 种。

信息交互式最优效率跟踪核心算法是: 接收侧调节等效阻抗  $R_{Leq}$  产生扰动,同时发射侧利用通信获取接收侧反馈的输出电压信息,控制输出电压稳定并计算效率,当判断效率达到最优值时两侧均停止进行调节。如图 8(a)所示,文献[32-33]的发射和接收侧均采用 DC-DC 变换器,通过按一定步长调节各自占空比实现该算法;文献[34-35]去掉收发侧 DC-DC 变换器,如图 8(b)所示,对发射侧全桥逆变器和接收侧有源整流采用移相控制或占空比控制来实现,减小了电路体积;文献[36]的发射侧采用 ON-OFF 控制实现宽范围负载下的高效运行,这种简单有效的方法降低了平均开关频率和开关损耗,但是输出电压纹波较大。

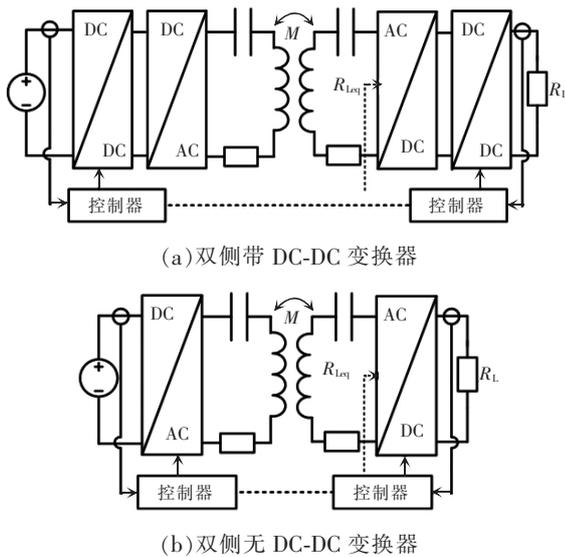


图 8 信息交互式最优效率跟踪拓扑

Fig.8 Optimal efficiency tracking topologies based on information interaction

无信息交互的最优效率控制的核心思想是: 利用扰动观察法,发射侧对输入电压进行微扰动,接收侧控制输出电压恒定,发射侧无须获取接收侧信息,当发射侧寻找到输入功率最小值即表明效率已达最优值。如图 9(a)所示,文献[37]发射侧利用移相控制调节输入电压产生微扰动,接收侧利用后级 DC-DC

变换器控制输出恒定,采用离散滑模控制,相比 PI 控制减小了超调量和稳定时间,具有更好的动态响应效果。有研究者将后级 DC-DC 变换器省去,如图 9(b)所示,采用有源整流对输出进行控制,控制方法有双侧移相控制<sup>[38]</sup>、基于  $\delta$ -Sigma 调制器的脉冲密度调制<sup>[39]</sup>,脉冲密度调制可以实现双侧软开关,避免了复杂性、硬开关、功耗高、平均效率低和输出电压波动等缺点。

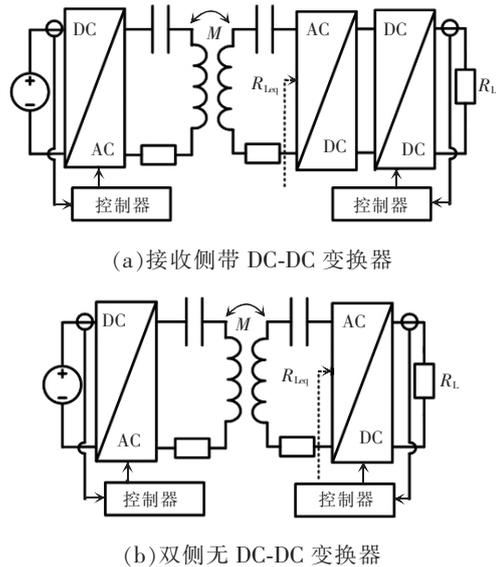


图 9 无信息交互的最优效率跟踪拓扑

Fig.9 Optimal efficiency tracking topologies without information interaction

基于负载变换的最优效率跟踪可使家电负载宽范围变化时保持高效率,但控制较为复杂,在不同负载条件下,负载变换环节和前级控制环节的损耗也会导致系统整体效率有所下降。

### 3.4 异物检测

金属异物(刀具、锡箔等)位于正在工作的发射线圈上时,交变电磁场会使其产生涡流损耗,导致温度升高,系统效率下降,影响系统稳定性,尤其对于功率较大的无线厨房电器,易导致发热或着火。因此,异物检测 FOD(foreign object detection)是家电无线电能传输系统的一项重要技术。

表 2 对目前家电无线电能传输系统的异物检测方法进行了归纳对比。功率损耗法<sup>[40]</sup>是通过比较正常工作和有金属异物存在时的功率变化量是否超过阈值来进行判别,这一方法操作简单,已经被 WPC

表2 家电无线电能传输系统异物检测方法对比

Tab.2 Comparison among FOD methods for WPT system for household appliances

检测方法	优点	缺点	应用	
检测电路参数	检测发射线圈电压电流、频率、接收线圈品质因数	实现简单,成本低廉,无需额外设备	准确性易受接收线圈偏移、负载变动影响;小金属异物难以检测;功率传递过程不能检测	小功率家电
检测能量	判断功率损耗变化量	效果较好,功率传输过程实时检测	功率等级较高时难以检测出较小的金属异物,需要通信	小功率家电
辅助线圈	检测磁场变化	结构简单,适合大功率场合,实时检测	受发射线圈磁场分布影响,存在检测盲区	大功率家电
利用传感器	红外传感器、压力传感器、光学传感器、温度传感器等	准确性高,不受异物大小影响,可进行活体异物检测	成本高,集成度有限	各功率等级

用于 Qi 标准的异物检测,但是在大功率场合灵敏度不高。因此对于功率较大的无线家电,多采用辅助线圈检测<sup>[41]</sup>,当存在金属异物时,由于其涡流造成磁通变化,导致辅助线圈输出电压值发生变动而被检测到,灵敏度较高。文献[42]建立了金属异物涡流对辅助线圈影响的方程,据此进一步优化辅助线圈的尺寸设计,提高检测精度。利用传感器进行异物检测直接有效,但产品化需进行成本控制。

## 4 亟待解决的关键问题

### 4.1 空间传输范围与耦合机构尺寸及电磁辐射强度的矛盾

磁场耦合式无线家电产品传输距离较短,往往需要接收端与发射端正对才能正常工作,造成使用体验感较差,难以满足消费者需求。当要求较大的空间传输范围时,需要以增大线圈尺寸和增加磁芯为代价,导致耦合机构体积较大,电器设计不够紧凑,占用较多的空间。同时,由于传输范围扩大而带来的电磁辐射也更严重。如何在不影响家用电器体积的条件下进一步提升空间传输范围、减小电磁辐射强度是家电无线电能传输技术的一个难点。超材料、石墨烯等新材料为提升传输范围、减少线圈发热、缩小耦合机构体积提供了可能,但新材料在实用化过程中还存在许多问题。家电无线电能传输系统的耦合结构及电磁屏蔽有待深入优化设计,无线电能传输理论也有待突破。

### 4.2 感性负载对家电无线电能传输系统的影响

家电负载类型决定了家电无线电能传输系统与手机及电动汽车无线充电系统有所不同。除电阻性负载以外,家电无线电能传输系统还需对感性负载供电,如包含电机的家电。文献[43]研究了带感性负载的无线电能传输系统,分析了直流供电的串励电机在无线电能传输系统中的负载特性;文献[44]针对他励电机设计了电枢和励磁绕组的独立无线供电装置,但这些研究并没有深入分析感性负载对无线电能传输系统的影响。在启动、调速、恒转矩控制等不同运行条件下,电机负载对系统频率分裂特性、输出特性、传输效率的影响有待进一步研究,为感性家用电器无线供电系统的拓扑与控制设计提供依据,保证其高效稳定可靠工作。

### 4.3 家电无线电能传输系统动态建模与多扰动分析

家电无线电能传输系统易受到家电负载变化、人为操作、环境变化带来的扰动。家电负载变化包括阻值、负载类型及工作状态的变化,如电饭煲根据温度利用继电器控制加热盘的投切进行烹煮,人为操作可能导致耦合角度、传输距离的变动,温度、湿度等环境变化易造成系统参数漂移、传输性能下降,这些变化过程往往比较迅速且难以预知,使系统存在暂态过程和非线性特性。目前针对这些问题的控制方法多基于系统的稳态模型,仅考虑单一变量,不能准确地描述动态过程,因而控制效果有限。在现有基础上,应对家电无线电能传输系统建立动态模型,进一步开展多变量扰动分析,得到更准确

的系统性能变化规律,为提出更有效的控制方法奠定基础。

#### 4.4 家电多负载无线电能传输系统优化设计

家电负载的特点决定了其多负载无线电能传输控制的复杂度,需要解决在不同负载类型下输出电压稳定、功率分配、效率优化、参数漂移等问题。现有研究忽略了负载间的交叉耦合或假定各负载与发射侧耦合一致等理想情况,提出了一些功率分配和总体效率优化方法,不完全符合实际使用情况,也没有结合家电负载的特点。应考虑接收线圈尺寸、耦合情况和家电负载类型不相同的状况,分析家电投切、工作状态改变时系统的输出特性、效率特性以及功率分配机理,提出更实用的控制策略。文献[45]考虑了多发射多接收系统的交叉耦合,通过系统  $Z$  参数矩阵推导出了发射线圈电流、负载与系统最优效率的关系式,该结论假定负载是可控制的,与实际不符,但是为解决多负载无线电能传输系统分析及控制问题提供了新思路。另外,通过设计新型耦合线圈及拓扑消除交叉耦合、稳定输出电压,也是家电多负载无线电能传输系统优化设计的途径。

## 5 结语

无线电能传输技术的应用已经进入快速发展阶段,是实现家居智能化的一项重要技术。虽然无线家电已经初步产品化,但大规模商业化应用仍面临着关键理论尚未突破和复杂应用场合难以兼容等诸多制约,相关标准也尚未完善。然而,相信在广大企业组织和科研机构的共同努力下,以无线家电为主的智能家居生活指日可待。

#### 参考文献:

- [1] Market Research Future. Global wireless power transmission market research report-forecast 2022 [EB/OL]. [2019-07-04]. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/wireless-power-transmission-market-2341>.
- [2] Sony Corporation. Sony develops highly efficient wireless power transfer system based on magnetic resonance [EB/OL]. (2009-10-02) [2019-07-04]. <https://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200910/09-119E/index.html>.
- [3] Newatlas Electronic. Fulton innovation demonstrates latest wireless power breakthroughs at CES 2013 [EB/OL]. (2013-01-08) [2019-07-04]. <https://newatlas.com/fulton-innovation-wireless-power/25691/>.
- [4] Toshiba shows transparent and wirelessly-powered OLED lighting panels [EB/OL]. (2013-03-10) [2019-07-04]. <https://www.oled-info.com/toshiba-shows-transparent-and-wirelessly-powered-oled-lighting-panels>.
- [5] EPC. How we devised a wirelessly powered television set [EB/OL]. (2017-03-09) [2019-07-04]. <http://epc-co.com/epc/GaNtalk/Post/13935.aspx>.
- [6] Witricity Corporation. Highly resonant wireless power transfer: Safe, efficient, and over distance [EB/OL]. (2016-12-18) [2019-07-04]. [http://witricity.com/wp-content/uploads/2016/12/White\\_Paper\\_20161218.pdf](http://witricity.com/wp-content/uploads/2016/12/White_Paper_20161218.pdf).
- [7] Powermat Corporation. Charging Spot 4.0 [EB/OL]. (2017-12-14) [2019-07-04]. <https://www.powermat.com/wp-content/uploads/2017/12/Charging-Spot-4.0-data-sheet-2017Dec14.pdf>.
- [8] Messina J. Haier exhibits a wireless HDTV video system at the 2010 CES [EB/OL]. (2010-01-13) [2019-07-04]. <https://phys.org/news/2010-01-haier-wireless-hdtv-video-ces.html>.
- [9] 中惠创智. 无线供电桌面方案[EB/OL]. (2017-12-01) [2019-07-04]. <http://www.zonecharge.com/index.php?g=&m=article&a=index&id=194&cid=19>.
- [10] 中惠创智. 无尾厨电方案[EB/OL]. (2017-12-01) [2019-07-04]. <http://www.zonecharge.com/index.php?g=&m=article&a=index&id=136&cid=19>.
- [11] Chushantech. Up to 2 000 W solution [EB/OL]. (2018-12-01) [2019-07-04]. <http://www.chushantech.com/plus/list.php?tid=31>.
- [12] WPC. Medium power wireless charging: emerging applications, consideration and opportunity [EB/OL]. (2018-12-01) [2019-07-04]. [https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/2/1/5/5/wpc\\_medium-power\\_whitepaper\\_final.pdf](https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/2/1/5/5/wpc_medium-power_whitepaper_final.pdf).
- [13] WPC. Ki cordless kitchen: from concept to industry standard [EB/OL]. (2019-09-01) [2019-09-25]. [https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/2/1/5/5/wpc\\_ki\\_cordless\\_kitchen\\_standard.pdf](https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/2/1/5/5/wpc_ki_cordless_kitchen_standard.pdf).

- lesspowerconsortium.com/data/downloadables/2/3/7/5/ki-cord-less-kitchen-white-paper-september-2019.pdf.
- [14] 全国家用电器标准化技术委员会. 家用电器 无线电能发射器: GB/T 34439-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] Cove S R, Ordonez M, Shafiei N, et al. Improving wireless power transfer efficiency using hollow windings with track-width-ratio [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(9): 6524-6533.
- [16] Kim T H, Yun G H, Lee W Y, et al. Asymmetric coil structures for highly efficient wireless power transfer systems [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(7): 3443-3451.
- [17] 吴家宏. 用于家用电器的较大功率无线电能传输技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Wu Jiahong. Larger electric power wireless transfer technology research for household appliance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese).
- [18] 张剑韬, 朱春波, 陈清泉. 应用于无尾家电的非接触式无线能量传输技术[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(9): 33-37.
- Zhang Jiantao, Zhu Chunbo, Chen Qingquan. Contactless wireless energy transfer technology applied to tail-free household appliances [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(9): 33-37 (in Chinese).
- [19] Zheng Cong, Ma Hongbo, Lai J S, et al. Design considerations to reduce gap variation and misalignment effects for the inductive power transfer system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11): 6108-6119.
- [20] Zhang Jian, Yuan Xinmei, Wang Chuang, et al. Comparative analysis of two-coil and three-coil structures for wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(1): 341-352.
- [21] Kim J, Son H C, Kim D H, et al. Optimal design of a wireless power transfer system with multiple self-resonators for an LED TV [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58(3): 775-780.
- [22] 孙跃, 李玉鹏, 唐春森, 等. 适用于家电的感应电能传输系统频率稳定性[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(6): 1601-1606.
- Sun Yue, Li Yupeng, Tang Chunsen, et al. Frequency stability of inductive power transfer system for household appliances [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(6): 1601-1606 (in Chinese).
- [23] 孙跃, 李玉鹏, 唐春森, 等. 具有恒流恒频恒压特性的 IPT 系统参数设计[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(3): 57-62.
- Sun Yue, Li Yupeng, Tang Chunsen, et al. Parameter design of IPT system with characteristics of constant current, constant frequency and constant voltage [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(3): 57-62 (in Chinese).
- [24] 才多. 基于 LCL 拓扑的感应加热及无线电能传输系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Cai Duo. Research of induction heating and wireless power transfer system based on LCL topology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [25] 吴传林. 面向家电应用的多分区 ICPT 系统设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- Wu Chuanlin. Design and implementation of multi-region ICPT system for household appliance applications[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017(in Chinese).
- [26] Wang Zhihui, Li Yupeng, Sun Yue, et al. Load detection model of voltage-fed inductive power transfer system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(11): 5233-5243.
- [27] Nutwong S, Sangswang A, Naetiladdanon S, et al. A novel output power control of wireless powering kitchen appliance system with free-positioning feature [J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1671.
- [28] Su Yugang, Zhang Hongyan, Wang Zhihui, et al. Steady-state load identification method of inductive power transfer system based on switching capacitors [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11): 6349-6355.
- [29] 李玉鹏. 用于家用电器的无线供电关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- Li Yupeng. Study on key technologies of wireless power supply for household appliances [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013 (in Chinese).
- [30] Wang Zhihui, Li Yupeng, Sun Yue, et al. An efficiency optimization strategy with segmented optimal frequency in the common inductive power transfer platform [J]. *Information Technology Journal*, 2013, 12(8): 1512-1521.
- [31] Dang Z G, Abu Qahouq J A. Extended-range two-coil adap-

- tively reconfigurable wireless power transfer system [C]// 2015 Thirtieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2015). Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015: 1630-1636.
- [32] Li Hongchang, Li Jie, Wang Kangping, et al. A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems using magnetic resonant coupling [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3998-4008.
- [33] Yeo T, Kwon D, Khang S, et al. Design of maximum efficiency tracking control scheme for closed-loop wireless power charging system employing series resonant tank [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 471-478.
- [34] Diekhans T, De Doncker R W. A dual-side controlled inductive power transfer system optimized for large coupling factor variations and partial load [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6320-6328.
- [35] Mai Ruikun, Liu Yeran, Li Yong, et al. An active-rectifier-based maximum efficiency tracking method using an additional measurement coil for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 716-728.
- [36] Zhong Wenxing, Hui S Y R. Maximum energy efficiency operation of series-series resonant wireless power transfer systems using on-off keying modulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3595-3603.
- [37] Yang Yun, Zhong Wenxing, Kiratipongvoot S, et al. Dynamic improvement of series-series compensated wireless power transfer systems using discrete sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6351-6360.
- [38] Liu Xin, Wang Tianfeng, Yang Xijun, et al. Analysis of efficiency improvement in wireless power transfer system [J]. IET Power Electronics, 2018, 11(2): 302-309.
- [39] Li Hongchang, Fang Jingyang, Chen Shuxin, et al. Pulse density modulation for maximum efficiency point tracking of wireless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5492-5501.
- [40] Kuyvenhoven N, Dean C, Melton J, et al. Development of a foreign object detection and analysis method for wireless power systems [C]// 2011 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering Proceedings. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [41] Simon V, Morris P K, Katherine L H, et al. Foreign object detection in wireless energy transfer systems: US9442172 B2 [P]. 2016-09-13.
- [42] Zhang Huan, Ma Dianguang, Lai Xiaoyang, et al. The optimization of auxiliary detection coil for metal object detection in wireless power transfer [C]// 2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow). Montréal, QC, Canada, 2018: 1-6.
- [43] 岳强. 应用于感性负载的厨房电器无线供电模块研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Yue Qiang. Research on wireless power transfer system for inductive household appliance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [44] Jiang C, Chau K T, Ching T W, et al. Time-division multiplexing wireless power transfer for separately excited DC motor drives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-5.
- [45] Duong Q T, Okada M. Maximum efficiency formulation for multiple-input multiple-output inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(7): 3463-3477.

---

#### 作者简介:

朱焕杰(1993-),男,硕士研究生,研究方向:无线电能传输技术,E-mail:zhuhuanjie@live.cn。

张波(1962-),男,中国电源学会高级会员,通信作者,博士,教授,博士生导师,研究方向:电力电子与电力传动,E-mail:epbzhang@scut.edu.cn。



朱焕杰