

# 非接触式磁感应充电装置的设计

苏燕云

(闽南理工学院光电与机电工程学院,福建 石狮 362700)

**摘要:**非接触式磁感应充电系统相较于传统的有线充电方式具有布置灵活、使用便利、安全可靠等绝对优势。基于此,在对非接触感应耦合电能传输系统的原理与结构的基础上,探讨了最佳功率传输特性和多负载状态下的功率传输特性。研究表明:在传输相同电能的条件下高频系统的最佳功率传输特性更优;在多负载条件下拾拾器数量应在系统允许范围内才能确保频率不会发生偏移现象。

**关键词:**感应耦合;电能传输;传输特性;非接触式

**中图分类号:** TM724

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-755X(2019)04-0034-05

## Design of Non-contact Magnetic Induction Charging Device

SU Yan-yun

(Minnan University of Science and Technology, Shishi 362700, China)

**Abstract:** The non-contact magnetic induction charging system has the absolute advantages of flexible arrangement, convenient use, safety and reliability compared with the traditional wired charging method. Based on the principle and structure of the non-contact inductive coupling power transmission system, the optimal power transmission characteristics and the power transmission characteristics under multiple loads are discussed. The results show that the optimal power transmission characteristics of the high frequency system are better under the same power transmission condition. Under multiple loads, the number of pickup devices should be within the allowable range of the system to ensure that the frequency does not deviate.

**Key words:** inductive coupling; power transmission; transmission characteristics; non-contact

随着电力应用需求变化,传统物理连接的传输系统已不能满足日益增长的生产与生活要求,向无线能量传输系统转变。无线能量传输技术于 19 世纪提出,因其安全可靠、便捷、易维护等特点被广泛应用于智能通信、交通运输以及航天航海工程等多个领域,且应用范围与规模不断扩大,该技术被评为对世界最具影响力的发明之一<sup>[1]</sup>。电磁场的感应耦合式电能传输系统是无线能量传输技术的一种,也是应用最为广泛的一种,具有环保、安全、灵活等特点,成为了当前无线电能传输领域研究的重点与热点。国内外研究者展开了大量的研究与实践,德国法勒企业在利用能量信号分离技术方案的基础上增加信号耦合线圈从而实现了能量无线同步传输<sup>[2]</sup>;徐罗那等(2018)对非接触变压器的副边与原边开路的磁场进行分析研究,构建了磁路模型并提出采用梯形绕组截面的方式来提升装置的耦合性,通过实验结果显示耦合系数得到明显提高<sup>[3]</sup>;张震等(2018)提出一种以串联为基础的 S-LCC 型感应耦合无线电能传输系统结构模型并进行仿真,仿真结果显示具有 S-LCC 型系统结构在电流传输上具有很强的稳定性<sup>[4]</sup>。

从当前的研究现状不难看出研究学者对于非接触式磁感应电能传输系统持以了极大的关注度,主要

**收稿日期:** 2019-09-10

**作者简介:** 苏燕云(1986—),女,福建泉州人,实验师,硕士研究生,主要从事电子工程技术方面的研究。

集中于同步传输问题与实现,而对于提升系统性能研究还有所欠缺,尤其在传输效率方面,对此就主要针对非接触式磁感应充电装置存在的传输性能问题展开深入研究,寻找传输性能优化策略。

### 1 非接触式磁感应耦合充电的基本结构

感应耦合电能传输系统,简称 ICPT,是一种新型的无线电能传输技术,有着安全、环保与便捷等诸多优点,在通信设备、轨道交通以及医疗设备等领域有着广阔的应用前景。其是利用法拉第电磁感应原理通过分离的松耦合变压器与侧绕组之间产生的磁链耦合来实现电能传输的<sup>[5]</sup>,其系统的基本结构是由能量发射与接收两大装置组成,如图 1 所示。

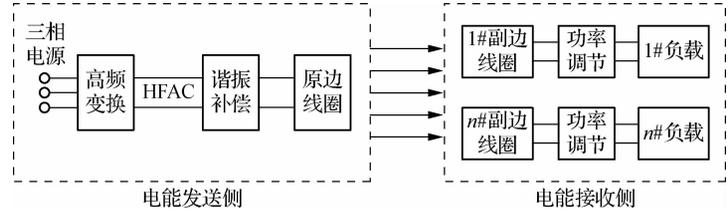


图 1 非接触式磁感应耦合电能传输系统基本结构示意图

在非接触式磁感应耦合电能传输系统中,由高频变换电路、谐振补偿电路以及原边线圈构成电能发射侧,电能接收端则是由副边线圈、功率调节电路以及漏感谐振补偿电路共同组成。该系统的原边线圈通过高频电流形成磁场,通过电磁感应原理在临近的电能接收侧副边绕组线圈中形成感应电动势,并通过功率调节等系列变换后为负载提供电能<sup>[6]</sup>。感应耦合电能传输系统与传统有线电能传输相比,两侧的金属导体没有直接接触,故不存在线路老化、接触火花等的不安全因素,使得安全性、便捷性得到大幅度提升。

### 2 非接触式磁感应充电装置设计分析

#### 2.1 电路补偿特性分析

补偿电路有单边补偿和双边补偿之分。单边补偿指的是仅仅在系统的原边或者副边有补偿电路,而另一侧没有。采用单边并联补偿方式时,补偿电容值与电路参数、负载参数、频率有关,计算公式更为繁琐,不具有灵活性,电路稳定性差,所以一般采用双边补偿。依据补偿电容与电路的连接方式,如图 2 所示。双边补偿可分为四类:原边串联副边串联补偿(SS)、原边串联副边并联补偿(SP)、原边并联副边串联补偿(PS)、原边并联副边并联补偿(PP)。

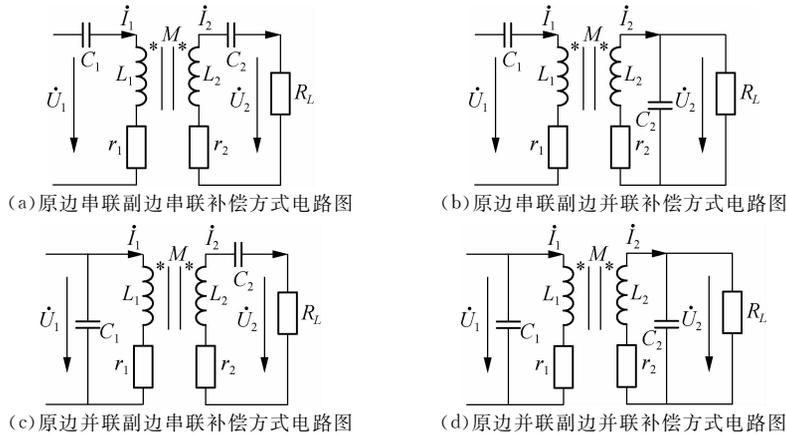


图 2 双边补偿电路图

然而,原边的并补电容将极大地使相关参数的计算复杂化,而且均与线圈寄生电阻相关,忽略时造成较大计算误差。原边串补方式相比更为理想,此时副边并补时副边并补电容与寄生电阻有关,副边串联时则均与线圈寄生电阻无关,即忽略其大小时,不会影响电路参数的精确计算,而且此时具有恒流源特性。

#### 2.2 最佳功率传输特性分析

ICPT 系统是通过电磁感应原理实现电能的非接触式传输的,假定电能发送侧的原边线圈中的电流  $I_p$  是恒定的,那么就可以将其视为电流源,由于电路实际的内阻抗很大,造成了传输效率低下,对此需采用谐振补偿的方式让两边同处于谐振状态<sup>[7]</sup>,从而使得系统达到最佳功率传输状态,如图 3 所示。

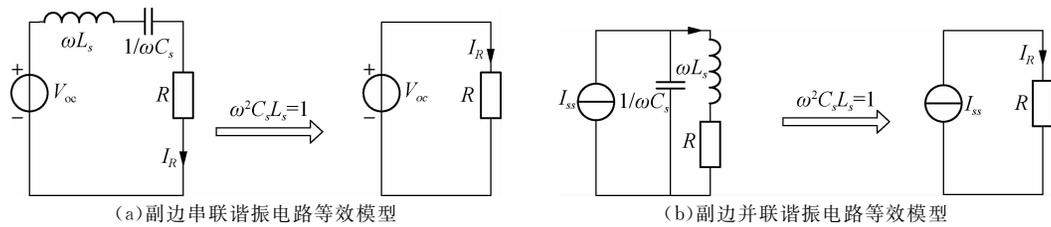


图 3 谐振补偿等效电路

在不同谐振补偿下,副边电路的输出电压、功率等特性如表 1 所示。从表中可以明显看到最大传输功率在串联、并联的谐振补偿条件下是无谐振补偿的  $2Q_s$  倍。

最佳功率传输关系式(1):

$$P_{\max} = \frac{\omega I_p^2 M^2 Q_s}{L_s} = \omega I_p^2 k_f^2 M Q_s / n_s \quad (1)$$

从上式(1)中可以看到最佳传输功率  $P_{\max}$  除了与匝数比  $n_s$  成反比外,与  $\omega, k_f$  等参数均成正比关系。充电装置中的  $M, k_f$  与  $n_s$  是固定的,那么调整  $\omega$  与  $Q_s$  能有助于提高最佳功率传输性能。在实际电路应用中串联谐振负载过小或者并联谐振电路负载过大会造成  $Q_s$  值过大,此时会出现谐振补偿相当困难的现象,影响系统的稳定性,一般而言约定  $Q_s$  小于 10 才能保证最佳功率传输的实现。对此调节  $\omega$  参数是提高最佳功率传输特性的有效方案,基于上述研究结果表明高频的 ICPT 系统有利于达到最佳功率传输性能。

### 2.3 多负载状态下传输特性分析

在多负载 ICPT 系统应用中,必须考虑多负载所带来的特殊问题,如捡拾器个数超过一定值时,系统频率会发生偏移,以及单个轻载负载会引起其他负载功率流阻塞问题,使系统电能传输达到最佳。多负载其实质是 ICPT 系统中有着多个捡拾器,如图 4(a) 所示,其可转化如图 4(b) 的多负载互感数学等效模型。

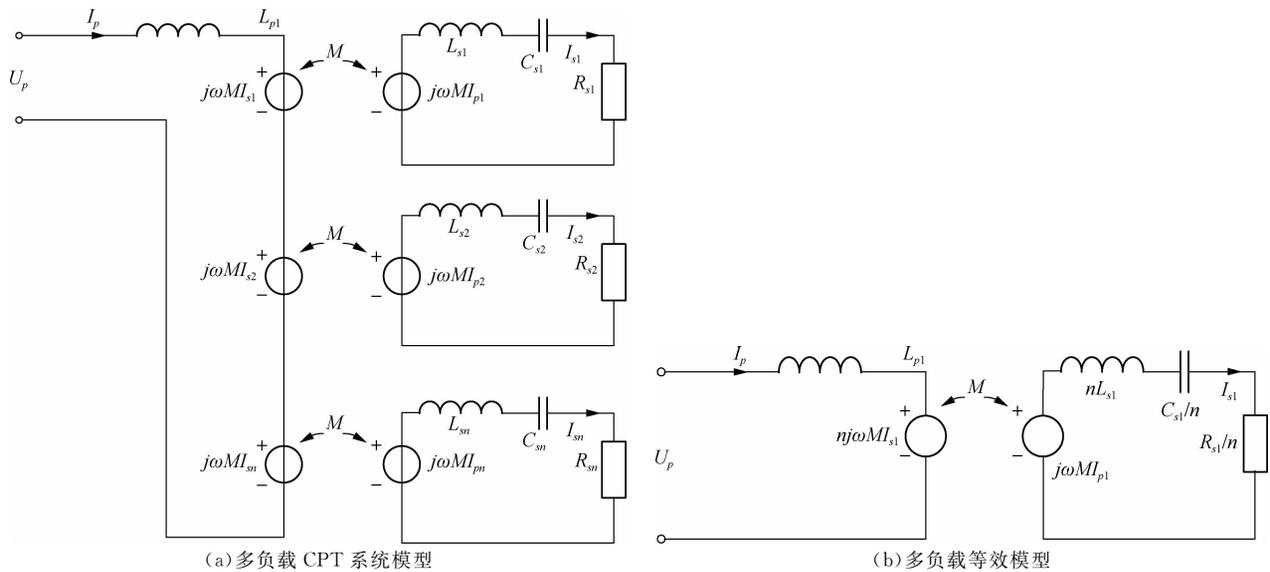


图 4 多负载系统模型

在图 4(b)模型中,原边输入的等效阻抗  $Z_p$  是由原边回路的自阻抗加上副边回路的反映阻抗,具体表达式如下式(2)所示。

$$Z_p = j\left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p}\right) + \frac{\omega^2 M^2}{Z'_s} = \frac{\omega^4 M^2 C'_s R'_s}{(1 - \omega^2 L'_s C'_s)^2 + \omega^2 C'^2_s R'^2_s} + j\left[\frac{(\omega^2 L_p C_p - 1)}{\omega C_p} - \frac{\omega^3 M^2 C'_s (\omega^2 L_p C_p - 1)}{(1 - \omega^2 L'_s C'_s)^2 + \omega^2 C'^2_s R'^2_s}\right] \quad (2)$$

若  $Z_p$  的虚部等于 0,  $L_p C_p = L_s C_s = 1/\omega_0^2$ , 那么可得到谐振频率  $\omega_0$  为  $Z_p$  的零相角。假设虚部  $\omega_0^2 L_p C_p - 1 = \omega_0^2 L_s C_s - 1$ , 那么可得到式(3):

$$(1 - \omega^2 L'_s C'_s)^2 + \omega^2 C'^2_s R_s^2 - \omega^4 M^2 C'_s C_p \quad (3)$$

其中, 副边  $Q_s = \omega_0 L_s / R$ ,  $k = M / \sqrt{L_p L_s}$  的公式可以转换成式(4):

$$(1 - k)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 + \left(\frac{1}{Q_s^2} - 2\right) \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1 = 0 \quad (4)$$

当  $k \neq 1$  或者  $k = 1$  时可以得到如下解:

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2_{1,2} = \frac{(Q_s^2 - 1) \pm \sqrt{1 + 4Q_s^2(Q_s^2 k^2 - 1)}}{2(1 - k^2)Q_s^2} \quad k \neq 1 \quad (5)$$

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2_{1,2} = \frac{Q_s^2}{2Q_s^2 - 1} \quad k = 1 \quad (6)$$

在非接触式磁感应充电传输系统中, 若存在多个相角频率则会影响系统频率的稳定性, 从而对最佳功率传输造成严重影响, 对此需避免存在多个零相角频率, 这就要求有着共扼的根。由此依据式(5)~(6)可得到如下关系式:

$$\frac{\sqrt{1 - \sqrt{1 - k'^2}}}{\sqrt{2k'}} < Q < \frac{\sqrt{1 + \sqrt{1 - k'^2}}}{\sqrt{2k'}} \quad k \neq 1 \quad (7)$$

$$\left(2 - \frac{1}{Q_s^2}\right) < 0 \quad k = 1 \quad (8)$$

当  $k = 1$  时,  $Q_s < 0.702$  就不会发生频率偏移现象。但是非接触式磁感应充电传输系统的  $k$  并不大, 由式(7)可得仅需  $\sqrt{1 - \sqrt{1 - k'^2}} < k'^2$  时系统也不会产生频率偏移, 对此可得到如下关系式:

$$Q_s < \frac{\sqrt{1 + \sqrt{1 - k'^2}}}{\sqrt{2k'}} \quad (9)$$

鉴于  $k'$  值非常下, 对此上式(9)可以进一步简化成  $Q_s < 1/k'$ 。

根据式(5), 取  $k = 0.1$ ,  $Q_5 < Q_{s1} (= 0.2Q_{s1})$ ,  $Q_4 < Q_{s1} (= 0.8Q_{s1})$ ,  $Q_1 = Q_{s1}$ ,  $Q_{s1} > Q_2 > Q_{s2}$ ,  $Q_6 = Q_{s2}$ ,  $Q_3 > Q_2$ , 做系统相频图, 如图 5(a) 所示。从下图中可以看到  $Q_s$  满足式(9)所限制的范围, 小于  $Q_s$  的  $Q_5$ 、 $Q_4$  仅会出现一个零相角; 否则大于  $Q_s$  的  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_6$  情况下会导致系统存在多个零相角, 致使系统频率产生偏移, 造成最佳传输受到严重影响。

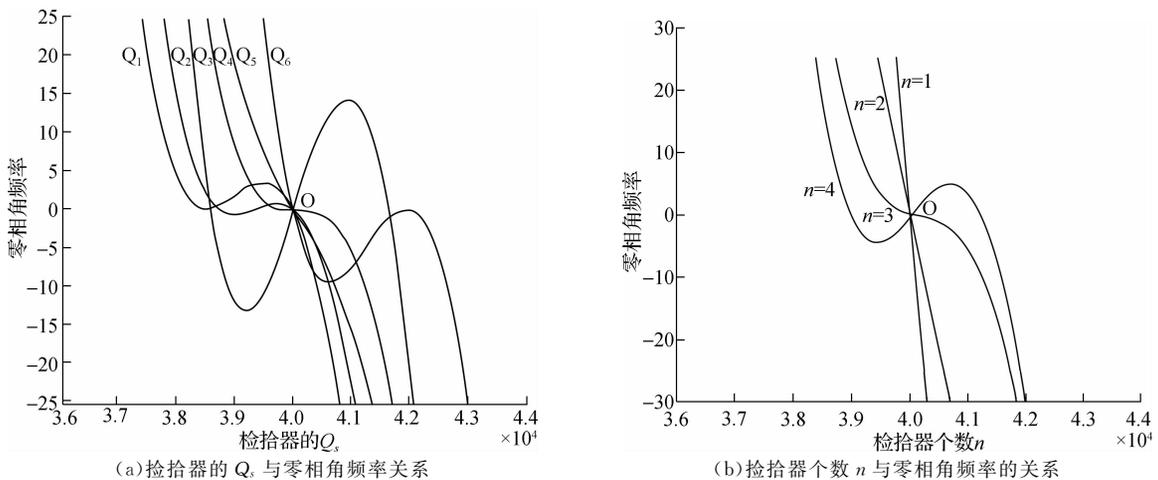


图 5 拾拾器  $Q_s$ 、个数与零相角频率的关系

对此根据以上分析可以得到拾拾器的  $Q_s$  为 2.8。进一步绘制系统拾拾器数量与零相角频率的关系得到如图 5(b) 所示。从下图中可以明显看到当拾拾器数量不超过 3 时, 系统频率的稳定性良好, 且输出功率随着数量的增加呈现倍数增长趋势; 当拾拾器数量超过 3 时, 系统的谐振频率发生变化从而影响系统的运行频率, 最终影响最佳功率传输性能。

根据上述结果可知在多个负载状态下非接触式磁感应充电传输系统运行过程中,为考虑最佳传输功率,需将捡拾器数量控制在运行范围内才能确保系统频率不会产生偏移。

### 3 非接触式磁感应充电装置的仿真实验

如图 6 所示,为实验无线充电系统的电路仿真图。交流电压源 AC 产生的交流电压经过桥式整流及电容  $C_1$ 、 $C_2$  滤波后送给逆变电路。半桥式逆变电路由开关管  $Q_1$ 、 $Q_2$ , 电感  $L_r$ 、 $L_1$ , 电容  $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  和电阻  $R_1$ 、 $R_2$  组成。 $Q_1$ 、 $Q_2$  采用 3DK7-9 小功率开关管。为了降低开关损耗,在开关管外并联电容  $C_5$ 、 $C_6$ , 串联电感  $L_r$ , 使流过开关管的电流为正弦波;在正弦波过零时导通开关管,实现零电压的软开关技术。电压经分离式变压器到达接收端,经过次级补偿和桥式整流后转换为直流电压,再经过电容滤波输出比较稳定的直流电压,最终采用 LM317 稳压芯片调整稳压。考虑到不同电子设备的充电电压不同,而且适当提高充电电压有利于改善充电效率。因此,采用 LM317 来调整输出电压。

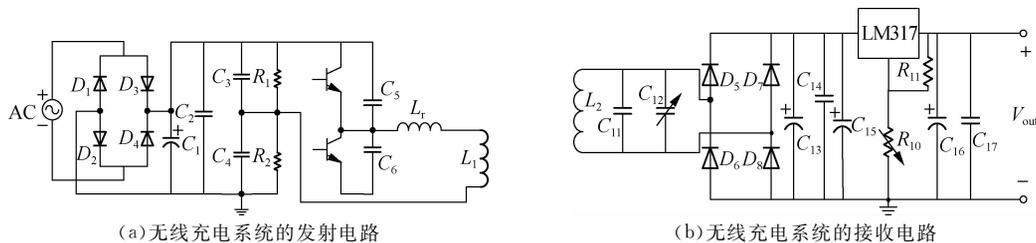


图 6 无线充电系统的电路仿真图

为了便于比较仿真实验系统与传统单边补偿 ICPT 系统的效率与负载数量的变化关系,分别在单负载、两负载、三负载工作状态下,通过实验结果绘制出各系统的效率随着负载数量变化的曲线,如图 7 所示。仿真和实验结果表明,仿真实验系统的效率在负载数量变化时要比传统单边补偿 ICPT 系统的效率高,且效率随负载数量的变化而变化不大,可实现不同负载数量下系统效率恒定高效运行。

### 4 结 语

在对非接触感应耦合电能传输系统的原理与结构的基础上,探讨了最佳功率传输特性和多负载状态下的功率传输特性。通过研究结果显示在传输相同电能的条件下,高频系统的最佳功率传输特性更优,即为获得最佳功率传输特性,非接触式磁感应充电装置应采用高频系统。同时,在多负载条件下捡拾器数量需控制在系统允许范围内从而达到最佳功率传输特性。

#### 参考文献:

- [1] 谢鸥,李华,周莲. 旋转超声振动加工非接触电能传输系统设计研究[J]. 现代制造工程,2018,451(4):131-135
- [2] 孙跃,代林,叶兆虹,等. 感应耦合电能传输系统中能量与信号反向同步传输技术[J]. 电力系统自动化,2018(17):134-139
- [3] 徐罗那,杜玉梅,史黎明. 非接触变压器磁路模型及结构优化[J]. 电工电能新技术,2018,30(27):108-116
- [4] 张震,刘树林,张榆茜,等. S-LCC 型感应耦合式无线电能传输系统建模及特性分析[J]. 广东电力,2018(11):66-71
- [5] 夏晨阳,马念,陈锐,等. 基波一谐波双通路并行感应耦合电能传输系统的电磁耦合机构[J]. 电力系统自动化,2018(17):127-133
- [6] 侯春,朱旺,水恒琪,等. 电流型 ICPT 系统恒流输出复合谐振网络研究[J]. 工矿自动化,2018,44(11):88-94
- [7] 高键鑫,吴旭升,高嵬,等. 基于 LCL 谐振变换器的电磁感应式非接触电能传输系统动态调压控制方法[J]. 电工技术学报,2018,33(18):31-40

(责任编辑:谭彩霞)

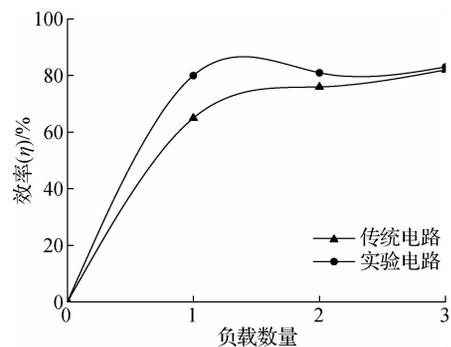


图 7 仿真实验电路与传统单边补偿 ICPT 系统效率比较