

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.023

# 基于参数辨识的锂离子电池无线充电技术

刘国庆, 吴付祥, 施元春, 黄 卫, 翟 渊

(中煤科工集团重庆研究院, 重庆 400037)

**摘要:** 针对感应模式无线电能充电系统中输出控制问题, 增加了参数辨识环节, 实现了对原边线圈的电压电流相位的实时检测, 使 Buck 变换器根据辨识参数结果控制输出电压, 有效地克服了传统控制方法需要两个控制器以及原副边需要通信的弊端, 简化了系统的设计, 提高了系统的可靠性。最后制作了一个感应模式锂离子电池无线电能充电装置并进行了试验测试, 测试结果验证了参数辨识控制技术的有效性。研究表明, 相对于传统的通讯控制方法, 该辨识控制方法控制效果好, 电能传输效率高。

**关键词:** 感应模式; 单边控制; 参数辨识; Buck 变换器

中图分类号: TM133

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)11-1401-05

## Wireless charging of lithium-ion battery technology based on parameter identification

LIU Guo-qing, WU Fu-xiang, SHI Yuan-chun, HUANG Wei, ZHAI Yuan

(Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering

Group Corporation, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** Aiming at the output control of the wireless charge system based on electromagnetic induction, a parameter identification unit was applied to measure the voltage, current and the phases of them on the primary coil. The output voltage of the wireless charge system was controlled by the Buck converter according to the result of the parameter identification. The disadvantages of the traditional system efficiently were overcome, in which the two controllers and the communication between the primary side and secondary side were used. The wireless charge system was simplified and the reliability of the system was improved. Then a setup of the wireless charge system with the parameter identification unit for charging the lithium battery was built to verify the design. The experimental results verify the effectiveness of the control parameter identification technology. The results indicate that the charge efficiency of the identification control method is higher than that of the traditional control method with the communication.

**Key words:** induction mode; unilateral control; parameter identification; Buck converter

## 0 引言

感应模式无线电能传输技术借助于高频磁场构建供电设备与用电设备之间的能量传输通道, 实现能量以非接触形式传输, 克服了传统接触式供电方式在恶劣环境(如高湿、高温、高腐蚀、易爆燃环境)下应用的弊端, 具有高可靠性、高安全性、低维护性等特点<sup>[1-5]</sup>。在锂离子电池充电系统中, 电池的充电需要经过 3 个

阶段, 在各个阶段系统需要不同的电流, 对于感应模式无线充电系统, 在系统输出端看来, 表现为各个阶段系统具有不同的负载, 当系统负载发生变化时系统应能够检测到并实时调整输出电压或输出功率以满足负载的要求。一个稳定的感应系统应有较宽的带载范围以及参数变化适应能力, 在系统运行的过程中, 当系统参数或负载发生变化时系统仍具有较强的鲁棒性。但是, 由于感应系统特殊的结构, 在不与拾取端通信的情

况下无法对负载以及系统参数的大小与性质进行检测和推算,系统的稳压控制与输出功率控制也就缺乏相应的控制依据。因此,在感应模式无线充电系统中接收端负载的在线计算对于系统的鲁棒性与传输效率具有重要的意义。

本研究中拾取端参数的在线计算指的是通过检测发射端来在线计算接收端的负载大小。在感应系统中,接收端对发射端的耦合作用直接体现在接收端反射回发射端的反射阻抗,当反射阻抗中含有电抗成分时,在发射线圈的直接体现就是发射线圈的电流与电压不同相,那么电压与电流的比值的余弦分量就反映了反射阻抗的实部大小,而正弦分量则反映了反射阻抗的虚部大小。如果电压与电流的比值的余弦分量或正弦分量只包含系统的负载,那么通过检测发射线圈的电压、电流以及电压与电流的相角便可实时计算出系统的负载的大小。

本研究在进行等效负载理论研究的基础上<sup>[6-8]</sup>,提出一种新型的感应模式下的参数计算以及控制方法,利用计算出的参数得出负载两端输出电压与逆变桥输入电压的函数关系,通过 Buck 变换器控制逆变桥的输入电压。由于 Buck 变换器的输出可结合计算参数直接得出,不需要增加额外的无线通信检测电路以及接收端控制器,从而降低系统成本,提高系统的可靠性。最后,通过搭建锂离子电池充电平台对本研究的理论分析进行实验验证。

## 1 基于互感耦合模型的参数计算

### 1.1 电路构成

当系统通过发射端计算电路检测出接收端以及系统参数时,可通过在发射端构建控制器来对输出进行控制,带有 Buck 控制器及参数计算的无线充电系统原理图如图 1 所示。

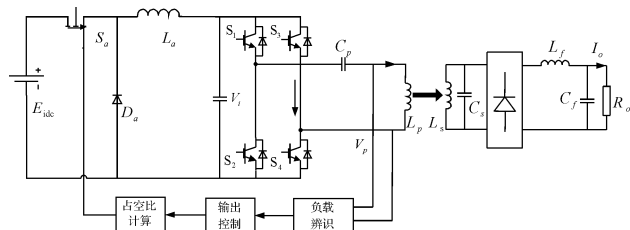


图 1 系统原理框图

图 1 中,直流电压源  $E_{dc}$  经过 Buck 变换器进行电压变换后,经开关网络  $S_1 \sim S_4$  逆变为准方波电流源,驱动原边谐振网络在能量发射线圈  $L_p$  上产生交变电

流,激发高频磁场,能量拾取线圈  $L_s$  上感应出同频交变电压,经串联补偿网络与原边产生谐振效应,补偿电容分别为  $C_p, C_s$ ,从而使得能量的无线传输在一定距离下可以高效地进行,原、副边线圈之间的互感为  $M_{ps}$ ,接收线圈感应到电能后经整流滤波后输出给负载  $R_o$ 。该负载  $R_o$  为输出端的等效负载。

### 1.2 参数计算

当负载为纯阻性时,参数设计时应人为使接收端的接收线圈工作在非谐振频率点上,而对于电池负载,由于其本身为非纯阻性负载,系统按照自然频率设计时,接收端可自然工作在非谐振点上,此时接收端阻抗含有电抗成分<sup>[9]</sup>,假设接收端的电抗为  $X_l$ ,则根据互感原理,对于如图 1 所示的拓扑结构,当发射线圈和共振线圈固有谐振频率为  $\omega_0$ ,且谐振角频率为  $\omega_0$  时,接收线圈的阻抗  $z_s$ ,发射线圈的反射阻抗  $z_{ps}$  分别为:

$$\begin{cases} Z_s = R_o + j\omega_0 X_l \\ z_{ps} = \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{z_s} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)经过化简,可得到发射线圈的反射阻抗  $z_{ps}$  为:

$$z_{ps} = \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{\sqrt{R_o^2 + X_l^2}} R_o - j \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{\sqrt{R_o^2 + X_l^2}} X_l \quad (2)$$

因此发射线圈的电抗  $z_p$  为:

$$z_p = \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{\sqrt{R_o^2 + X_l^2}} R_o - j \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2 X_l - \omega_0^2 L_p \sqrt{R_o^2 + X_l^2}}{\sqrt{R_o^2 + X_l^2}} \quad (3)$$

当发射线圈和接收线圈之间的距离固定时,  $M_{ps}$  为固定量(这在实际当中也是比较常见的),可以提前检测出来,由于  $\omega_0, X_l$  也是已知的,那么此时发射线圈的电抗实部只包含负载这一变量。当发射线圈两端的电压  $V_p$ ,电压与电流的相位角为  $\alpha$  时,电抗  $z_p$  的实部为:

$$\text{Re}z_{Lp} = \frac{V_p}{I_p} \cos\alpha = \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{\sqrt{R_o^2 + X_l^2}} R_o \quad (4)$$

当发射线圈上电压与电流过零点的时间差为  $\Delta t$ ,线圈的谐振频率为  $\omega_0$  时,电压与电流的相位角  $\alpha$  为<sup>[9-11]</sup>:

$$\alpha = \omega_0 \Delta t \quad (5)$$

由式(4,5)可得等效负载阻抗  $R_o$  为:

$$R_o = X_l \sqrt{\frac{V_p \cos\omega_0 \Delta t}{\omega_0^2 I_p M_{ps}^2 - V_p \cos\omega_0 \Delta t}} \quad (6)$$

其中,  $M_{ps}, \omega_0, X_l$  为已知,通过实时检测发射线圈两端的电压与电流,可得到过零点的时间差,因此负载

的大小可通过检测原边发射线圈的电压、电流以及电压电流的相角实时计算出来。

此时发射线圈上以及接收线圈上电流  $I_p$ 、 $I_s$  分别为:

$$\begin{cases} I_p = \frac{V_i}{Z_p} \\ I_s = \frac{j\omega_0 M_{ps} I_p}{Z_s} \end{cases} \quad (7)$$

接收线圈两端的感应电压  $V_{oc}$  为:

$$V_{oc} = j\omega_0 M_{ps} I_p \quad (8)$$

则系统的输出电压为:

$$V_o = \frac{V_{oc} R_o}{Z_s} \quad (9)$$

由式(7~9), 经过化简可得感应系统输出电压为:

$$V_o = \frac{R_o}{M_{ps}} V_i \quad (10)$$

由式(10)可看出, 当负载改变时, 系统输出电压发生相应地改变, 负载可以通过测量发射线圈的电压与电流之间的相位通过原边计算出来, 而其余的为固定量, 可提前测量出来, 因此当输出电压由于负载变化将发生变化时, 研究者可通过改变输入逆变桥的输入电压  $V_i$  来对输出电压进行控制。

## 2 发射端控制器研究

发射端控制器通过检测发射线圈的电压与电流的相位角来在线计算负载的变化。当由于负载变化导致输出电压降低时, 控制器增大逆变器 Buck 变换器的占空比, 反之则减小 Buck 变换器的占空比。假设 Buck 变换器的输出占空比为  $D$ , 则逆变器输入电压  $V_i$  与系统输入电压  $E_{dc}$  之间的关系为:

$$V_i = D E_{dc} \quad (11)$$

接收端为一并联谐振网络, 根据正弦等效原理, 将变换器次级整流滤波电路等效为交流负载, 则其交流等效负载  $R_{ac}$  为:

$$R_{ac} = \frac{\pi^2 R_o}{8} \quad (12)$$

由式(10~12), 可得输出电压  $V_o$  与系统输入电压  $E_{dc}$  的表达式为:

$$V_o = \frac{8R_o D}{\pi^2 M_{ps}} E_{dc} \quad (13)$$

由式(13)可看出, 系统输入电压不变, 负载发生变化时, 通过调节 Buck 变换器的占空比可使系统输出电压保持恒定。此时图 1 所示的电路原理图可简化为如图 2 所示的 Buck 变化器。

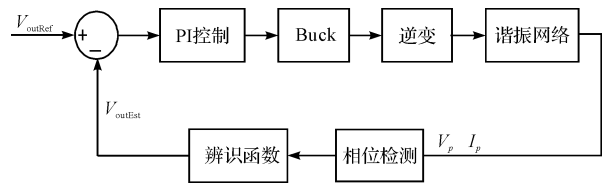


图 2 Buck 控制器原理框图

首先根据发射线圈上的电压、电流过零点的时间差与周期求出电压与电流的相位角, 然后由式(6)可求出负载阻抗的大小, 最后由式(10)可得到输出电压的大小, 输出电压计算值与输出电压给定值的误差传递给 PI 控制器, 控制器输出相应的占空比来控制 Buck 变换器, 从而控制逆变桥的输入电压大小, 进而控制系统输出电压的大小。

## 3 实验研究

为验证上述参数辨识与输出控制理论的正确性, 本研究搭建了一个工作频率为 26 kHz 的感应模式无线电能充电系统实验系统, 对系统的参数辨识方法和输出稳压控制进行实验验证, 实验中各主要元件参数如表 1 所示。

表 1 系统元件参数值

参数	数值
输入直流电压 $E_{dc}/V$	20
Buck 滤波电感 $L_a/\mu H$	500
Buck 滤波电容 $C_a/\mu F$	100
Buck 开关频率 $f/kHz$	40
原边发射线圈电感 $L_p/\mu H$	110
原边发射线圈补偿电容 $C_p/nF$	330
副边发射线圈电感 $L_s/\mu H$	110
副边发射线圈补偿电容 $C_p/nF$	330
原副边互感 $M_{ps}/\mu H$	29
系统谐振频率 $f/kHz$	26

该实验由 CPLD 产生 26 kHz 高频信号, 该高频信号经全桥逆变放大电路放大后, 在发射线圈上输出具有一定功率的正弦波, 该能量通过电磁感应传递到次级接收线圈, 次级接收线圈接收电能供负载使用, 为减少线圈损耗, 发射线圈和接收线圈均采用里兹线绕制。为方便进行试验验证, 该实验首先采用电阻切换来模拟电池的充电以及浮充模式。

该实验保持共振线圈间的互感不变对负载进行在线计算, 负载由 10  $\Omega$  增大到 50  $\Omega$  时互感和负载在线计算的结果如表 2 所示。其中,  $R_{Lide}$  为电阻的辨识值。

表 2 负载改变下的辨识结果

$R_L/\Omega$	$M_{st}/\mu\text{H}$	$V_p/V$	$t/\text{ns}$	$R_{\text{Lide}}/\Omega$
10	29	11	1 000	10.6
20	29	23	850	19.3
30	29	38	600	30.7
40	29	46	400	39.1
50	29	52	250	51.2

从表 2 中可看出,负载发生变化时,该变化会被控制器检测到并根据发射线圈电压以及电压与电流的相位角准确辨识出来,对于电池充电系统,由于充电芯片电源输入允许电压一定的浮动,辨识结果允许有一定的误差。

当得到辨识结果后,控制器进而计算系统输出电压的变化,然后改变 Buck 变换器的占空比,从而保证输出电压稳定在给定值上。

负载由 50 Ω 切换到 10 Ω,然后再切换到 50 Ω 的输出电压与发射线圈电压的波形图如图 3 所示。

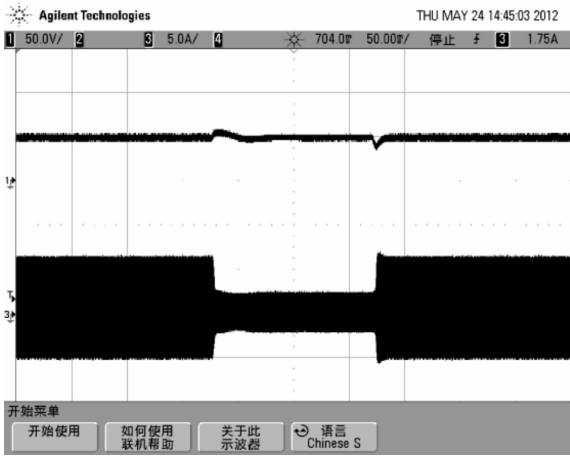


图 3 负载切换时输出电压与发射波形图

负载由 10 Ω 切换到 50 Ω,然后再切回 10 Ω 的输出电压与发射线圈电压的波形图如图 4 所示。从图

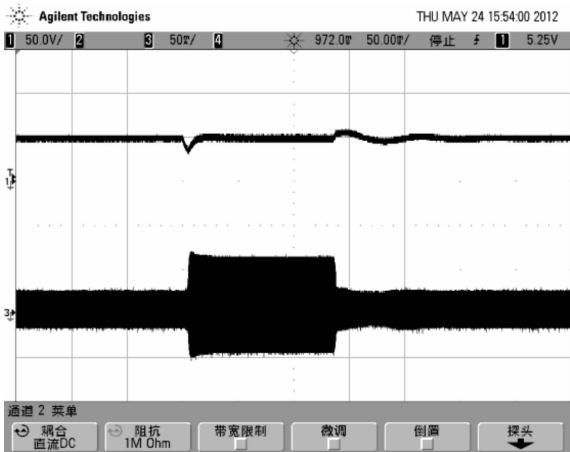


图 4 负载切换时输出电压与占空比的波形图

3、图 4 可以看出,采用该辨识以及控制方法可以对输出电压进行快速、有效地控制。本研究在通过电阻验证系统的控制性能以后,采用实际的充电芯片及电池进行实验验证,实验中充电芯片采用多节锂电充电芯片 SC1808,该芯片具有恒压、恒流以及浮充三段式状态自动转换的功能,同时内部集成了双灯 LED 充电指示转换电路及驱动电路,大大简化了外部元件的数量,提高了系统稳定性及降低了生产成本,可以对单双节锂电或三串、四串、六串锂电池充电,充电电流可以达到 3 A ~ 8 A。SC1808 芯片最大的亮点在于可以实现快速充电,根据设置充电电流时间可以控制在 10 min ~ 3 h 不等,输入电压可根据需要从 5 V ~ 40 V 选择。该实验中负载为三串锂电,充电电流选择为 2 A,系统输出电压也即 SC1808 的输入电压控制在 15 V 左右。实验结果表明:采用本研究所提出的负载辨识的原边控制模式与单一采用副边控制模式相比,系统的平均效率可提高 20% 以上,在浮充模式下由于系统工作在轻载模式,采用原边控制的系统,效率提升更为明显。

### 4 结束语

本研究利用互感模型,提出了一种感应电能传输系统的负载的参数辨识方法,该方法仅依赖于发射线圈的电压与电流的相位差,使复杂采样系统设计及硬件实现得以简化,通过对参数的动态辨识,原边仅需要一个控制器就可以对输出功率进行控制。基于该辨识方法,设计了一个基于原边控制的锂离子电池充电系统,通过实验表明,本研究所提出的基于参数辨识的充电方法具有设计简单、控制效果好、系统传输效率高的特点。

### 参考文献(References):

- [1] BOYS J T, GREEN A W. Inductively coupled power transmission concept-design and application [J]. **IPENZ Trans.**, 1995, 22(1) : 1-9.
- [2] GREEN A W, BOYS J T. 10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control [J]. **Power Electronics and Variable Speed Drives**, 1994(399) : 694-699.
- [3] 杨民生,王耀南. 感应耦合电能传输系统动态解谐传输功率控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1) : 72-78
- [4] MAM G K, DAE S L, MYANG J Y. A new state feedback control of resonant converters[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronic**, 1991, 38(3) : 173-179.
- [5] WANG C S, COVIC G A, STIELAU O H. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled in-

- ductive power transfer systems[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2004,51(1):148-157.
- [6] LI H L, HU A P, COVIC G A. FPGA Controlled High Frequency Resonant Converter for Contactless Power Transfer [C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes:[s. n.],2008:3642-3647.
- [7] 戴欣,孙跃. 感应电能传输系统参数辨识与恒流控制[J]. 重庆大学学报,2011,34(6):98-104.
- [8] 唐春森. 非接触电能传输系统软开关工作点研究及应用[D]. 重庆:重庆大学自动化学院,2009.
- [9] HUANG C Y, BOYS J T, COVIC G A. Practical Considerations for Designing IPT System for EV Battery Charging [C]// IEEE Vehicle power and Propulsion Conference. Michigan, USA:[s. n.],2009:402-407.
- [10] 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.
- [11] SANGHOON C, KIM Y H, KANG S Y, et al. Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2011,58(7):2906-2914.

[编辑:李辉]

(上接第 1382 页)

新型机械设备开发的工艺流程设计和核心数据结构、控制算法是密不可分的,如果能够在机械制造的前期有一个验证和虚拟实现的步骤,可以有四大便利:①不会大规模修改数据结构、控制模型和 PLC 算法;②节省现场调试时间;③节省因调试而产生的调试垃圾;④得到客户的极大认可。

Matlab 软件用做模型建立和特性的仿真和分析很多,但是结合整体机械工艺,对模型数据结构、加工对象、检测元件、执行元件、控制器算法的五合一的仿真模拟,是一种新的研究方向。本研究为高校机电一体化专业的教学和毕业设计也提供了新的思路。

虽然这个仿真是为了解决 RFID 标签测试分选的功能而做的,但是其数据结构和算法都可以移植到印刷包装行业的其他机型去,比如贴标机之类,也可以适用于各种含色标定位的位置控制,用途很广阔。

#### 参考文献 (References):

- [1] 谭民,刘禹,曾隽芳,等. RFID 技术系统工程及应用指南[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1-29.

- [2] 游战清,刘克胜,吴翔,等. 无线射频识别(RFID)与条码技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007:285-308.
- [3] 钟振,赖顺桥,肖熠琳,等. RFID 车辆智能管理系统[J]. 机电工程技术,2011,40(2):39-40.
- [4] 周丽莎,黄波,贾春兰. RFID 在汽车物流监控与生产管理中的应用[J]. 机械,2012,39(12):1-5.
- [5] 中山市智能 IC 卡工程技术研究中心. 电子标签的生产工艺简介[J]. 金卡工程,2006(1):37-38.
- [6] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [7] 张志涌. 精通 Matlab 6.5 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [8] 李幼涵. Lexium5 伺服驱动器技术指南及案例[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [9] 佟伟光. 数据结构与算法[M]. 北京:北京大学出版社,2009.
- [10] 张威. STATEFLOW 逻辑系统建模[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [11] 李文川,王旭,吴昊,等. 基于内容分析法的国内 RFID 技术现状与发展趋势研究[J]. 情报杂志,2009,28(12):60-64.
- [12] 李庆伟,郑威. 无线射频识别(RFID)技术及其标签生产新工艺概述[J]. 今日印刷,2013(2):60-62.

[编辑:烘烤娜]

#### 本文引用格式:

刘国庆,吴付祥,施元春,等. 基于参数辨识的锂离子电池无线充电技术[J]. 机电工程,2013,30(11):1401-1405.

LIU Guo-qing, WU Fu-xiang, SHI Yuan-chun, et al. Wireless charging of lithium-ion battery technology based on parameter identification[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013,30(11):1401-1405.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>