

DOI:10.11918/202409062

调幅调谐式的双向能量与信号同步传输

张欣¹, 王龙龙¹, 高鹏翔¹, 方支剑²

(1. 天津工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300387; 2. 中国地质大学(武汉) 自动化学院, 武汉 430074)

摘要: 为解决感应式无线电能传输中双向能量与信号同步传输系统存在的结构复杂、传输速率低、能量信号串扰等问题, 提出了一种新型基于调幅调谐式的双向能信同传方法。文中通过改变逆变器移相全桥控制的移相角对正向信号进行调幅调制实现信号正向传输, 采用改变副边谐振电容对反向信号进行调谐调制实现信号反向传输, 从而使得线圈两端电流带有信号特征, 并利用电流互感器将带有信号特征的电流信号通入解调电路中还原信号。首先, 通过对电路结构进行理论推导分析; 其次, 采用 Matlab/Simulink 进行仿真分析并且验证理论分析的正确性; 最后, 根据仿真结果搭建了一个功率为 120 W 实验平台。结果表明: 在功率为 120 W 的条件下, 负载电压波动小于 3%, 电能传输对信号传输影响较小, 可实现正向 4 kbps、反向 20 kbps 的高速半双工传输, 信号传输误码率为 0.1%; 仿真试验结果证明了该方法在感应式无线电能传输中能够有效实现双向能量与信号同步传输, 具有较高传输速率和低误码率, 可为无线电能传输系统设计提供参考。

关键词: 无线电能传输(WPT); 信号双向传输; 移相全桥; 电容调制; 解调电路

中图分类号: TM937

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)08-0079-09

Amplitude-modulation tuned bidirectional simultaneous power and signal transmission

ZHANG Xin¹, WANG Longlong¹, GAO Pengxiang¹, FANG Zhijian²

(1. School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To address issues such as structural complexity, low transmission rates, and power-signal crosstalk in bidirectional power and signal synchronous transmission systems for inductive wireless power transfer, a novel bidirectional power-signal synchronous transmission method based on amplitude modulation and tuning is proposed. In this paper, the forward signal is amplitude-modulated by changing the phase shift angle of the inverter phase-shifted full-bridge control to achieve forward signal transmission. The reverse signal is tuned-modulated by changing the secondary resonant capacitance to achieve reverse signal transmission. This results in the current at both ends of the coil carrying signal characteristics. A current transformer is then used to feed the current signal with signal characteristics into the demodulation circuit to restore the signal. First, theoretical analysis of the circuit structure is conducted. Then, simulations are performed using Matlab/Simulink to verify the theoretical analysis. Finally, a 120 W experimental platform is constructed based on the simulation results. Experimental results demonstrate that at a power 120 W, the load voltage fluctuation is less than 3%, and the impact of power transmission on signal transmission is minimal. The system achieves half-duplex communication with a forward rate of 4 kbps and a reverse rate of 20 kbps at a bit error rate of 0.1%. Both experimental and simulation results confirm that this method effectively achieves bidirectional power and signal synchronous transmission in inductive wireless power transfer systems, offering high transmission rates and low bit error rates, which provide valuable guidance for wireless power transfer system design.

Keywords: wireless power transfer(WPT); bidirectional signal transmission; phase-shifted full-bridge; capacitive modulation; demodulation circuit

在当今数字化和智能化的时代,无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术^[1-4]的重要性日益凸显。与传统的电能传输方式相比, WPT 技术避

免了线路磨损和插拔时产生火花等安全问题,具备了安全性高、可靠性强、灵活性好和操作方便等特点。该技术已在电动汽车^[5-6]、植入医疗设备和移

收稿日期: 2024-09-24; 录用日期: 2025-01-04; 网络首发日期: 2025-07-08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250708.1445.012>

基金项目: 国家自然科学基金(52077153); 湖北省重点研发计划项目(2023BAB082)

作者简介: 张欣(1978—), 男, 教授; 方支剑(1978—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 方支剑, wangll_tiangong@163.com

动便携设备^[7]等领域得到广泛应用。然而,在大多数应用场景中,需同时进行能量传输和信号交互,即能量与信号同步传输技术(simultaneous wireless power and information transfer, SWPIT)。

目前,WPT系统中的能量与信号同步传输技术主要分为:共享通道传输技术^[8-9]、分离通道传输技术^[10-11]以及射频技术^[12]。射频技术便于为无线设备提供充电和数据传输功能,无需全面重新设计设备,但受限于成本、电磁干扰、数据安全性及特殊环境适应性。Wang等^[13]采用激光束能信同传,输出功率5 W左右,可用于较远距离比如能源网和物联网传感器供电。分离通道技术需多线圈,系统复杂且占空间,成本较高。Wang等^[14]利用可编程超表面实现LED阵列供电和视频传输,展现了在复杂电磁环境中可持续无线通信的潜力。LEE等^[15]通过两组天线阵列分别以27.10、4.23 MHz传输能量和信息。Wu等^[16]采用矩形线圈和DD线圈传输电能与数据,减少串扰并通过正交频分复用提高频谱利用率和传输速率。相比之下,共享通道技术只需一对线圈即可同时传输能量与信号,避免了通道间耦合,具备系统简单、抗干扰能力强等优势,成为研究主流。郭尧等^[17]采用了一种基于双谐振结构的设计方法,通过其双谐振特性实现能信同传。Li等^[18]通过电流电压相位控制,实现了能量与信号的同步传输;张爱国^[19]在逆变电路前加入Boost电路,通过改变输入电压幅值实现了能信同传。此外,还有传统的调幅调制^[20]和调频调制^[21]等方法。这些方法有效解决了能量与信号间的干扰问题,降低了误码率,但信号传输速率低、负载电压易受干扰等问题尚未被解决。

SWPIT技术根据信号传输方向可以分为3种方式:信号正向传输、信号反向传输以及信号双向传输。信号双向传输因其能够在同一通道上实现控制指令和反馈信息的双向传递,具有重要的研究价值。Liu等^[22]提出了一种基于软开关逆变器谐波特性的双向SWPIT实现方法,采用DFEE原理和2FSK技术。该方法选择最适合的软开关频率点作为驱动频率,实现基波能量传输和谐波信号传输,传输效率高达90%,负载电压波动小于3%。然而,信号传输会影响功率传输,并且负载的变化会对信号的解调误码率产生影响,限制了其应用范围。Wu等^[23]介绍了一种将双向信号通信融合到高功率发电系统的新方法。该方法利用共享感应链路实现能信同传,采用能量/信号频分复用技术,使能量和信号分别在不同的频率载波下进行传输。但由于通信谐振回路功率损耗,WPT系统总功率略有下降,并且能量与信

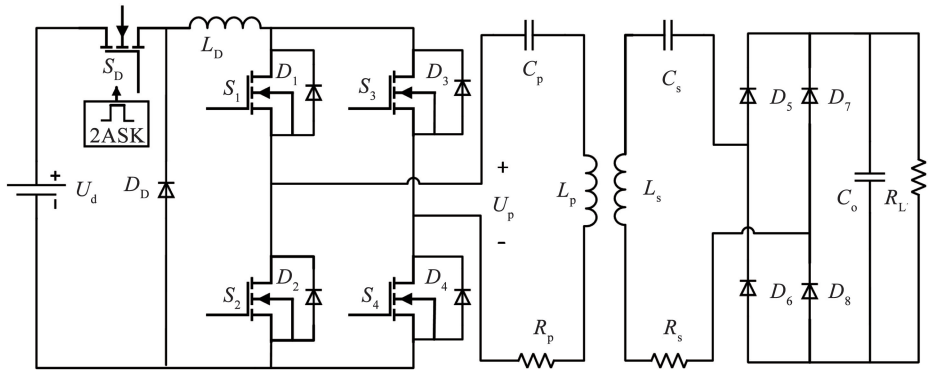
号载波间可能产生干扰。

针对双向能信同传技术的不足,本文提出一种基于调幅调谐式的双向能信同传方法。正向信号通过DSP将信号转换为PWM变量,通过控制移相角改变电流幅值,能量与信号经发射线圈传输到接收线圈,接收端通过副边电路为负载供电,同时利用解调电路还原信号。反向信号通过MSP控制器调节接收端双向开关以改变次级补偿电容大小,从而影响发射端电流幅值,并通过解调实现信号还原,最终实现双向能量与信号的同步传输。本文方法无需DC-DC调制电路,减少了系统体积,降低了无源器件的影响,提高了信号传输速度,并且无需额外信号通道,最大程度减小了能量与信号的互扰。传输信号时将接收端负载电压幅值波动控制在3%左右,通过采用ASK调制方法,使电能对信号无干扰。本文分析了系统拓扑结构和数学模型,提出了信号调制与解调的方法,讨论了系统能量传输效率、功率、信号传输速率及信号与能量之间的干扰问题,最后通过仿真试验验证了方法的可行性。

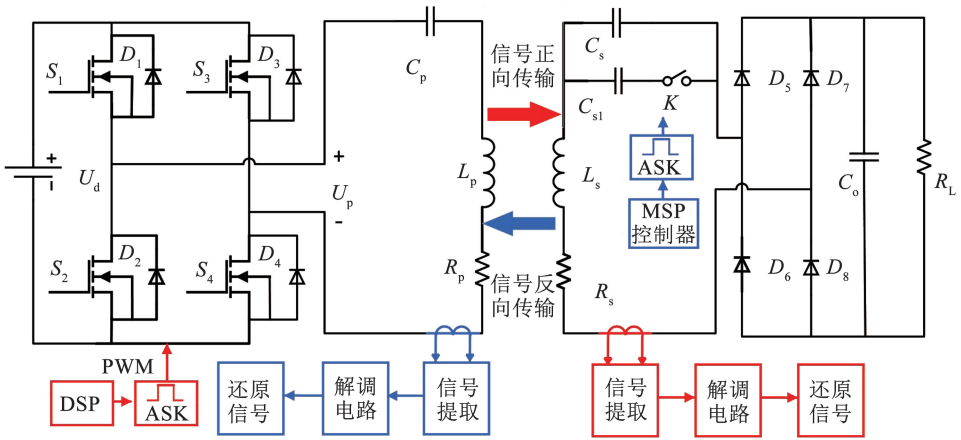
1 系统结构模型

1.1 系统结构

传统的调幅式能量与信号同步传输系统结构图如图1(a)所示,该系统主要由电压源、开关管 S_d 和二极管 D_D 以及电感 L_D 组成的DC-DC调制电路、由MOSFET管 $S_1 \sim S_4$ 与二极管 $D_1 \sim D_4$ 构成的可控全桥逆变器、二极管 $D_5 \sim D_8$ 组成的不可控全桥逆变器以及S-S型拓扑结构的耦合网络组成。其中DC-DC电路中 L_D 存在滤波的作用,但其同时也会限制信号传输速率。本文提出的基于调幅调谐式的双向能量与信号同步传输系统结构图如图1(b)所示,去掉了DC-DC调制电路,使整个系统结构更加简单,减少了无源器件对系统的影响,提高了波特率,没有 L_D 的滤波,可以传递更高位宽的数据。信号正向传输时发射电路是由可控全桥逆变器和发射线圈 L_p 以及谐振电容 C_p 组成,此时的接收电路包括信号检测部分和能量接收部分, L_s 、 R_s 、 C_s 和 C_{s1} 分别为接收线圈的电感、接收线圈的内阻和副边谐振电容以及信号补偿电容。信号检测部分是利用电流互感器和解调电路对信号进行还原。信号反向传输时,其信号发射电路是由接收线圈 L_s 、接收线圈的谐振电容 C_s 和信号补偿电容 C_{s1} 以及双向开关 K 组成的,发射端的信号检测部分与接收端相同。



(a) 传统调幅调制式



(b) 基于调幅调谐式双向能信同传系统结构图

图1 系统结构图

Fig.1 System structure diagram

1.2 系统正向传输信号和电能的等效模型分析

该系统正向传输信号与电能时的等效电路图见图2。图中: U_d 为电压源电压, U_p 为全桥逆变器的输出电压, R_L 为接收端的负载, I_p 、 I_s 分别为发射侧和接收侧的电流, ω 为电源的工作频率, M 为接发线圈之间的互感。 L_p 、 L_s 分别为发射线圈和接收线圈的电感, R_p 、 R_s 分别为发射线圈和接收线圈的内阻, C_p 、 C_s 分别为发射线圈和接收线圈的谐振电容。

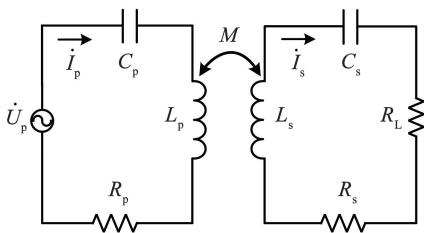


图2 正向传输信号与能量系统等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of forward power and signal transmission

电路等效总阻抗 Z_p 与接收端总阻抗 Z_s 可表示为

$$\begin{cases} Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L + R_s \\ Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \end{cases} \quad (1)$$

发射端与接收端的电流可表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_p = \frac{\dot{U}_p}{Z_p} \\ \dot{I}_s = \frac{\dot{I}_p \cdot j\omega M}{Z_s} \end{cases} \quad (2)$$

输出功率可表示为

$$P_{out} = |\dot{I}_s^2 \cdot R_L| = \frac{8U_{in}^2 \omega^2 M^2 R_L}{\pi^2 Z_p^2 Z_s^2} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

输出效率可表示为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{|\dot{I}_s^2 \cdot R_L|}{|\dot{I}_p^2 \cdot Z_p|} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{Z_s^2 Z_p} \quad (4)$$

从式(3)、(4)可以看出,系统的输出功率会受移相角的影响,但系统的传输效率不会随之发生变化。因此,在实现正向能量与信号同步传输的过程中,应选择适当的移相角在减小误码率和保证信号

传输速率的同时,要尽可能降低输出功率的波动。

逆变器正常工作时输出的波形见图 3。为了控制全桥逆变器输出电压的移相角的大小,DSP 生成两对周期互补的 PWM 用于全桥逆变器中 MOSFET 的驱动信号。图 3(a)、(b)为 DSP 生成的控制信号,图 3(a)、(b)中的虚线分别为 U_{s4} 和 U_{s3} , α 为移相角,图 3(c)、(d)为逆变器的输出电压波形和电流波形。

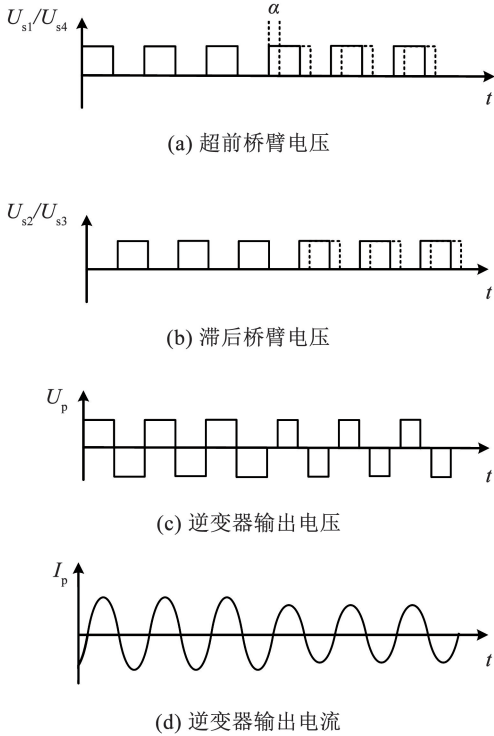


图 3 逆变器波形图

Fig.3 Inverter waveform diagram

逆变器输出电压 U_p 的时域表达式为

$$U_p(\varphi) = \begin{cases} U_d, & \varphi \in (0, \pi - \alpha] \\ 0, & \varphi \in (\pi - \alpha, \pi] \\ -U_d, & \varphi \in (\pi, 2\pi - \alpha] \\ 0, & \varphi \in (2\pi - \alpha, 2\pi] \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)按照傅里叶级数展开可得

$$U_p(\varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4U_d}{k\pi} \cos\left(\frac{k\alpha}{2}\right) \sin\left(k\alpha + \frac{k\alpha}{2}\right) \quad (6)$$

逆变器输出电压的 k 次谐波有效值为

$$U_{pk} = \frac{2\sqrt{2}}{k\pi} U_{in} \left| \cos \frac{k\alpha}{2} \right|, \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (7)$$

从式(7)可知,在电源电压不发生改变的情况下,由于发射端串联的谐振电容 C_p ,因此可以只考虑基波分量。输出的基波分量会随着移相角的增加而逐渐减小至零。通过调整移相全桥超前桥臂与滞后桥臂之间的移相角,可以控制逆变器输出的逆变

电压的有效值。然后,通过发射线圈将电能传递给接收线圈,从而调节接收端的耦合能量,使接收端电压随移相角线性变化,同时影响接收端电流幅值的变化,使得电流幅值带有信号特征,从而产生综合能量信号流,实现了 ASK 调制,达到正向能量与信号同步传输的目的。

1.3 系统反向传输信号的等效模型分析

图 4 为系统反向传输信号时的等效电路,电路图中的系统参数与正向传输信号相同,其中发射线圈和接收线圈的电感值满足 $L = L_p = L_s$, C_p 、 C_s 和 C_{s1} 分别为发射端、接收端的谐振电容以及接收端信号补偿电容且 $C_s = C_p$,电源的工作频率为 ω , $\omega L = 1/\omega C$ 。接收端电路的等效补偿电容是 C ,当开关 K 开断时, $C = C_s + C_{s1}$,此时系统处于不谐振状态,当开关 K 断开时, $C = C_s$,系统处于谐振状态。

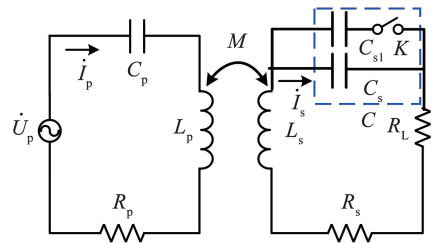


图 4 信号反向传输系统等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of reverse signal transmission

对于图 4,根据基尔霍夫电压定律可列方程如下:

$$\begin{pmatrix} R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} & -j\omega M \\ -j\omega M & R_L + R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_p \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

解式(8)可得发射端的电流 I_p 为

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_p (R_L + R_s + \frac{q-1}{q} j\omega L)}{R_p (R_L + R_s + \frac{q-1}{q} j\omega L) + \omega^2 M^2} \quad (9)$$

式中, $q = C/C_s$, ($q \geq 1$)。

由式(9)可以看出,随着 q 的增大,发射线圈的电流 I_p 也随之有所增加。通过调整 C_{s1} 的值,发射线圈的电流幅值会受到不同程度的影响,从而划分出电路的两种状态:1)当 $q = 1$ 时, I_p 幅值相对较小,系统处于谐振状态;2)当 $q > 1$ 时, I_p 幅值相对增大,系统处于非谐振状态。这两种状态下发射端电流幅值的差异使得系统能够解调出数字信号“0”与“1”,因此通过切换电路状态可以传输数字信号“0”与“1”。

2 信号传输方法介绍

2.1 信号调制

随着移相角变化, 逆变输出电压如图 5 所示, 系统的工作和谐振频率是 45 kHz。与图 3(c)一致, 通过改变移相角来改变逆变电压的占空比, 进而改变逆变电压的有效值, 验证了基于移相全桥进行 ASK 调制的可行性。

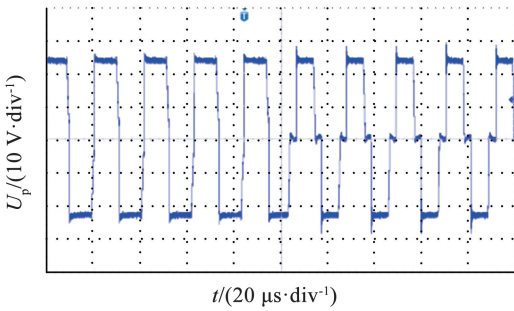


图 5 逆变输出电压

Fig. 5 Inverter output voltage

在 Z_s 、 Z_p 、 ω 、 R_L 保持不变, 移相角和输出功率以及输出电压变化趋势如图 6 所示, 仿真试验数据参考表 1。选取电压变化范围为 3%, 对应的 α 为 $0 \sim 27.6^\circ$ 。利用 DSP 生成两种不同相位的 PWM 波进行 ASK 信号调制, 为了保证速率的同时最大程度降低误码率和输出电压波动, 在规定的 α 范围内, 依照图 6, 选取移相角 0° 和 27.6° 。

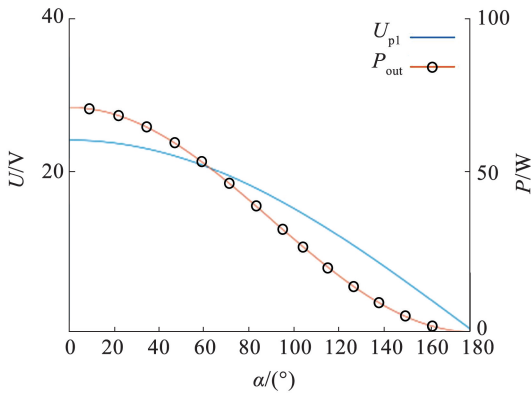


图 6 电压、功率与相位关系图

Fig. 6 Voltage, power and phase diagram

由式(9)可知, 在改变接收端的谐振电容并保持其他电路结构不变时, 发射端的感应电流 I_p 的幅值会发生变化。基于这一特征, 在副边谐振电容 C_s 处并联一个 C_{s1} , 通过控制信号补偿电容 C_{s1} 支路的开关的开关状态来发送数字信号。由于副边谐振电容两侧电压为交流电压, 因此开关 K 应该选择双向导通器件, 因此本文采用 MOSFOT 与二极管组合而成的共 S 极反串联结构的开关, 见图 7。

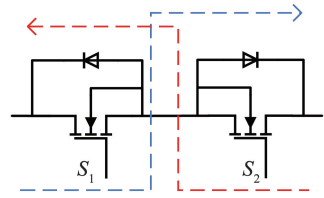


图 7 共 S 极反串联开关结构

Fig. 7 Common-source anti-series switch configuration

根据上述原理, 反向传输信号的调制方法为: 保持系统其他参数不发生变化, 当传输“0”时, 控制器将开关 K 设置为关断状态, 断开信号补偿电容 C_{s1} , 此时系统电路处于谐振状态, 且原边的谐振电流 I_p 的幅值很小; 而当传输“1”时, 控制器控制将开关 K 设置为导通状态, 使信号补偿电容 C_{s1} 并联到电路当中, 此时该系统电路处于非谐振状态, 且原边的谐振电流 I_p 的幅值很大。因此, 开关 K 在不同的开关状态下, 原边谐振电流 I_p 的幅值不同, 从而实现“0”和“1”的调制。

2.2 信号解调

解调电路是由电阻负载、同相放大、包络检波、低通滤波、电压比较、分压滤波、保护等电路构成的, 见图 8。首先, 将电流互感器采集到的带有信号特征的电流信号输入到解调电路中。通过电阻负载电路将其转换成电压信号, 接着经过同向放大电路增益电压信号。随后, 通过包络检波电路检测高频信号幅值的变化, 选取适当的时间常数 RC 至关重要。经过低通滤波后, 电压比较器会将滤波后的电压信号与设定的电压值 U_{ref} 进行比较, 将原本的正弦电压信号转换成方波, 分别表示接收的信号“0”和“1”, 然后将得到的方波电压进行分压滤波后接入保护电路中, 选取 2.7 V 的齐纳二极管 D_2 , 当输入的方波电压未超过 2.7 V, 齐纳二极管变为普通二极管, 但当输入的电压超过 2.7 V 时, 齐纳二极管将通过电流并控制输出电压为 2.7 V, 从而实现电路保护作用。

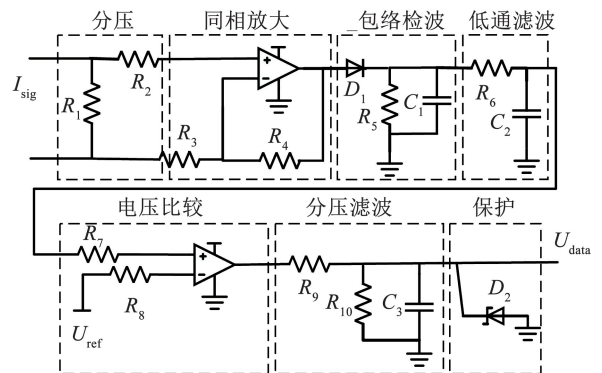


图 8 解调电路图

Fig. 8 Demodulation circuit diagram

3 仿真实验

为了验证基于调幅调谐式的双向能信同传研究

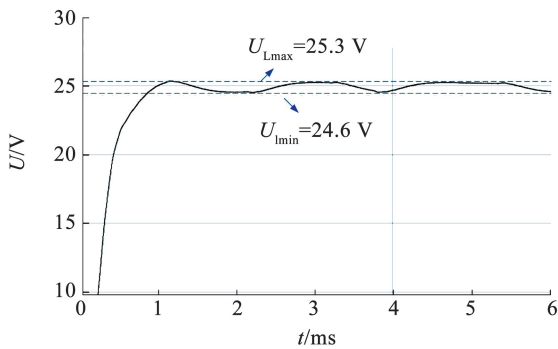
方法的可行性,在 MATLAB/SIMULINK 中按照图 1(b)中的系统拓扑结构搭建仿真模型,并对该模型进行仿真实验,所使用的主要的仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

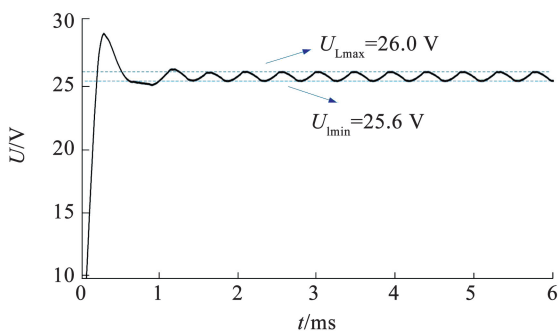
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
电源 U_d/V	24	工作与谐振频率/kHz	45
线圈内阻 $R_p, R_s/\Omega$	0.1	包络电容 $C_1/\mu F$	10
发射线圈自感 $L_p/\mu H$	124	负载 R_L/Ω	8
接收线圈自感 $L_s/\mu H$	124	R_1/Ω	10
谐振电容 $C_p, C_s/nF$	10	$R_2, R_3/\Omega$	100
信号补偿电容 C_{s1}/nF	5	$R_4/k\Omega$	2
滤波电容 $C_0/\mu F$	10	$R_5, R_6/\Omega$	500
滤波电容 $C_2, C_3/nF$	100	$R_7, R_8, R_9, R_{10}/k\Omega$	10

图 9(a)、(b)分别为信号正向传输时和信号反向传输时负载电压的波形图,由图 9 可以看到无论信号是正向传输还是反向传输负载电压的在达到稳态之后负载电压的波动均不超过 3%。



(a) 信号正向传输时负载电压波动



(b) 信号反向传输时负载电压波动

图 9 负载电压仿真波形图

Fig. 9 Load voltage simulation waveform

信号正向传输时采用根据图 6 选取的移相角,进行 ASK 调制,在移相角为 0° 的时传输的数据为 0,当移相角为 27.6° 时传输的数据为 1。正向传输通过控制逆变器的移相角,改变逆变电压的幅值,进而影响副边的电流的幅值。信号反向传输时通过方

波信号控制信号补偿电容的电路的双向开关,当方波信号为低电平的时传输的数据为 0,当方波信号为高电平的时传输的数据为 1,反向传输通过改变补偿电容的大小,来影响原边电路的感应电流的幅值。在信号正向传输和反向传输过程中,都是通过观察副边电流和原边电流的幅值变化来接收传输的信号。

当该系统正向和反向分别模拟传输信号“1010101010”时仿真波形见图 10。图 10(a)为信号正向传输时所传输的信号发生改变时逆变电压占空比发生改变,与上文的移相全桥逆变器的原理分析相符。图 10(b)、(c)为信号正向传输和信号反向传输的解调电路波形图, U_1 为将采集到的带有信号特征的电流经过分压电路转换成的电压波形, U_2 为经包络检波和低通滤波电路后的电压波形,该电压波形出现了较为明显高低分明的电压曲线,因此将该输出电压与设定的 U_{ref} 进行比较得到 U_3 。 U_3 为经过电压比较电路的电压波形即解调出来的数字信号。图 10(d)、(e)分别为信号正向传输时和信号反向传输时发送的数字信号与解调出来的数字信号,由图 10 中可以明显看出解调出来的数字信号与发送的信号除了相位稍有滞后其他完全一致,因此该系统传输信号时的仿真结果与理论分析的预期目标相一致。

表 2 中可以看出,在无信号传输状态下,系统传输效率达到 80.4%。当系统进入正向信号传输状态时,传输效率略微下降至 77.6%;在反向信号传输状态下,系统处于非谐振状态,传输效率也相应降低到 78.6%。这些结果表明,不同信号传输状态对系统传输效率具有一定影响。

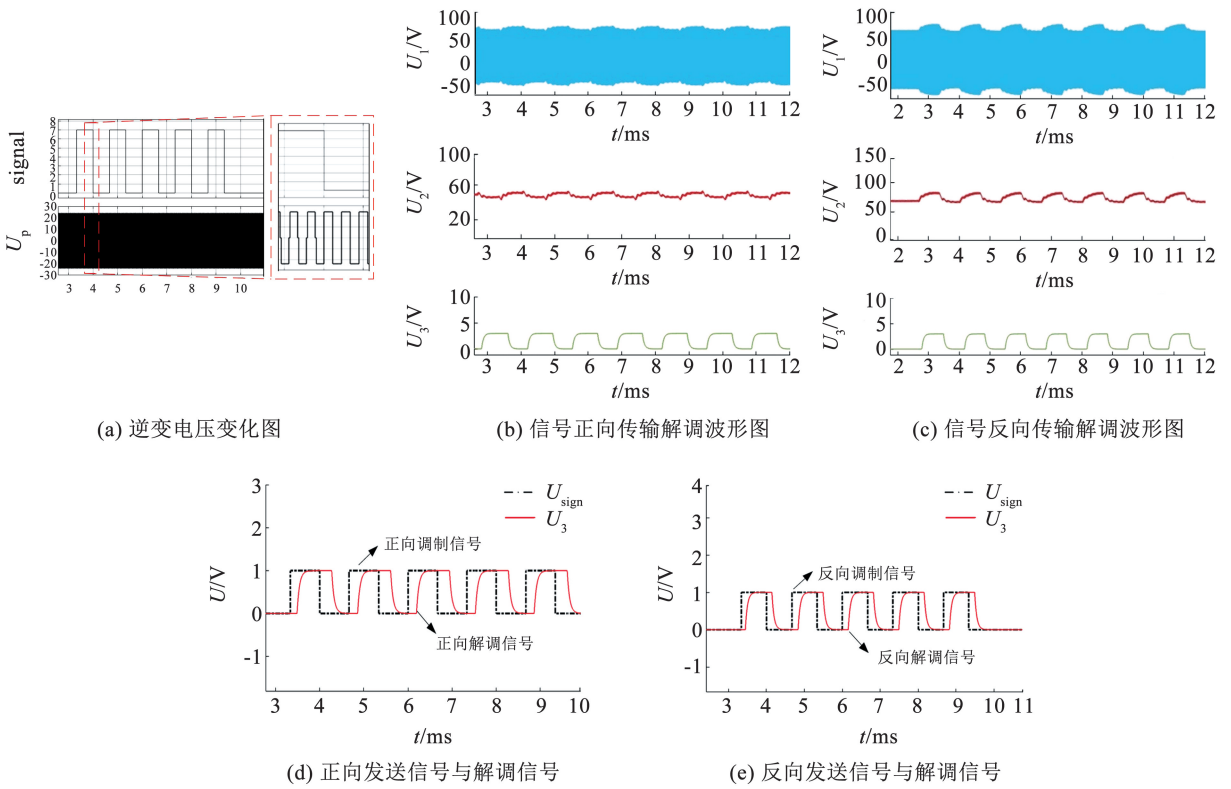


图 10 系统传输信号时仿真波形图

Fig. 10 System signal transmission simulation waveforms

为进一步分析能量与信号同步传输方法在不同传输状态下对系统输出功率和传输效率的影响,本文进行了无信号传输、正向信号传输和反向信号传输 3 种状态的仿真测试。结果见表 2。

表 2 传输信号对输出功率与传输效率影响的仿真结果数据
 Tab.2 Simulation result on the effects of transmission signals on output power and transmission efficiency

传输状态	输入功率/W	输出功率/W	传输效率/%
无信号传输	80.09	64.42	80.40
信号正向传输	79.78	61.98	77.60
信号反向传输	82.00	64.48	78.60

4 实验验证

为了验证理论分析和仿真结果的有效性和可行性,搭建了一套基于调幅调谐式的能信同传输的实验平台进行验证,见图 11。该系统由系统电源、DSP 控制器、原副边解调电路、电流互感器、双向开关、MSP 控制器以及 S-S 型拓扑结构的耦合网络组成。其中发射端和接收端线圈的电感均为 124.2 μH,发射端和接收端的补偿电容为 100.0 nF,接收端的信号补偿电容为 12.3 nF,接收端负载使用的灯泡,总电阻为 2 Ω。

正向传输信号时发送两组信号“1010101010”,

接收端的解调电路波形图见图 12。正向传输信号是通过 DSP 生成的 PWM 波来控制全桥逆变器的移相角,由式(2)可知在逆变电压移相角发生改变时接收端的电流会随之改变,且当移相角增大至 27.6° 时,接收端的电流较小,以此区分信号“0”和“1”。图中 U_1 为将接收端带有信号特征的电流转换成的电压信号, U_2 为经过包络检波电路输出的电压波形,该电压波形带有信号特征,并以此作为电压比较器的输入电压, U_3 为经过电压比较器之后还原出来的解调信号,该图与理论分析以及仿真试验结果相一致。计算可知正向信号传输速率为 4 kbps。



图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

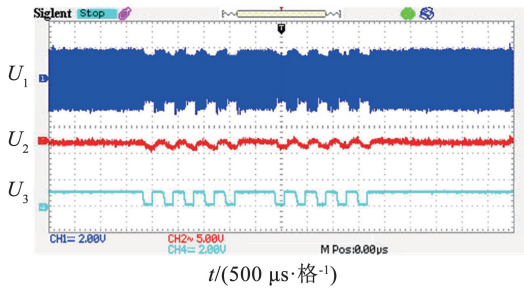


图 12 信号正向传输时解调电路波形图

Fig. 12 Demodulation circuit waveform during forward signal transmission

信号反向传输时以频率为 10 kHz 的方波信号来控制副边的双向开关,方波信号的高电平和低电平分别表示信号“1”和“0”,由式(9)可知当信号补偿电容接入电路中时,接收端的感应电流会变大,以此来区分信号“1”和“0”,发射端的信号解调电路见图 13。图 13 与仿真波形图 10(c)相一致。经计算可知反向传输信号的传输速率是 20 kbps。最后对正反向信号传输的误码率进行了测试,测试时发送数据为 0xFF,每次发送 1 000 组,使用串口调试助手和 USB 转 TTL 设备接入解调电路得到解调后的信号,对照之后得到信号传输的误码率为 0.1%

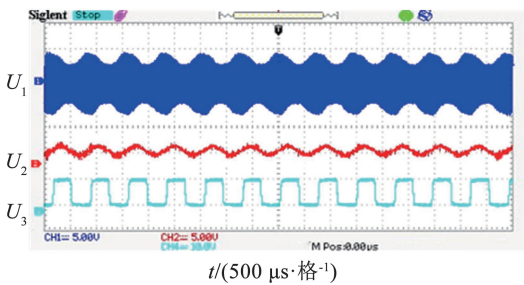


图 13 信号反向传输时解调电路波形图

Fig. 13 Demodulator circuit waveform during reverse signal transmission

为了验证仿真试验能量与信号同步传输方法在不同传输状态下对系统输出功率和传输效率的影响的准确性,本文在实际实验平台上对无信号传输、正向信号传输和反向信号传输 3 种状态的输入功率、输出功率和传输效率进行了测量。实验结果见表 3。

表 3 传输信号对输出功率与传输效率影响的实验数据

Tab. 3 Experimental data on the effects of transmission signals on output power and transmission efficiency

传输状态	输入功率/W	输出功率/W	传输效率/%
无信号传输	122.34	99.71	81.50
信号正向传输	120.86	95.01	78.60
信号反向传输	124.52	98.98	79.50

从表 3 可以看出,与仿真结果相似,在无信号传

输状态下,实验系统的传输效率达到 81.50%;当进行正向信号传输时,效率下降至 78.60%;在反向信号传输状态下,由于系统处于非谐振状态,传输效率为 79.50%。实验数据进一步验证了仿真结果中关于传输效率的变化趋势。

5 结论

本文提出一种基于调幅调谐式的双向能量与信号同步传输方法,能有效改善信号传输速率低、负载电压易受干扰以及 WPT 结构复杂等问题。通过理论推导、Matlab/Simulink 仿真分析与实验验证,得出结论如下:

1) 去除 DC-DC 调制电路有效减少了系统体积,降低了无源器件的影响,从而显著提高了信号传输速率。

2) 在传输信号过程中,通过适当选取全桥逆变器的移相角和副边信号补偿电容的容值,能够将负载电压波动减少至 3% 以内,并确保信号传输不受电能传输影响。

3) 搭建了功率为 120 W 的实验平台,实验结果表明,该方法可以实现正向 4 kbps、反向 20 kbps 的高速、准确半双工传输。

参考文献

- [1] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48
LIU Yao, XIAO Jinyu, ZHAO Xiaoling, et al. Development and application review on wireless power transmission technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(2): 48. DOI:10.12067/ATEEE2203007
- [2] 于宙,肖文勋,张波,等. 电场耦合式无线电能传输技术的发展现状[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1051
YU Zhou, XIAO Wenxun, ZHANG Bo, et al. Development status of electric-field coupled wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1051. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210258
- [3] 李建国,张波,荣超. 近场磁耦合无线电能与信息同步传输技术的发展(上篇): 数字调制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3487
LI Jianguo, ZHANG Bo, RONG Chao. An overview of simultaneous wireless power and information transfer via near-field magnetic links (part I): digital modulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3487. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211472
- [4] 李阳,石少博,刘雪莉,等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊2): 389
LI Yang, SHI Shaobo, LIU Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Sup 2): 389. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90276
- [5] 张学毅,任立权,熊鑫博,等. 电动汽车多车位 WPT 下沉式磁屏蔽系统研究[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(4): 76
ZHANG Xueyi, REN Liqun, XIONG Xinbo, et al. Research on WPT sunken magnetic shielding system for electric vehicles with multiple parking spaces [J]. Advanced Technology of Electrical

- Engineering and Energy, 2024, 43 (4): 76. DOI: 10.12067/AEEEE2210032
- [6] 侯春, 朱旺, 水恒琪, 等. 基于 LCL-LC/LCL 混合补偿的多电动汽车恒流恒压无线充电系统特性分析[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(11): 58
HOU Chun, ZHU Wang, SHUI Hengqi, et al. Characteristic analysis of constant current and voltage wireless charging system for multi-electric vehicles based on LCL-LC/LCL hybrid compensation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(11): 58. DOI: 10.12067/AEEEE1801029
- [7] 高欣芳, 杨中平, 王义, 等. 移动式 WPT 系统双 D 形耦合机构磁心设计[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(3): 8
GAO Xinfang, YANG Zhongping, WANG Yi, et al Core design of double-D coupling mechanism in mobile WPT system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(3): 8. DOI: 10.12067/AEEEE2103040
- [8] WEI Guo, FENG Jing, ZHANG Jingyang, et al. An efficient power and data synchronous transfer method for wireless power transfer system using double-D coupling coil [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10643. DOI:10.1109/TIE.2020.3038081
- [9] FAN Yuanshuang, SUN Yue, DAI Xin, et al. Simultaneous wireless power transfer and full-duplex communication with a single coupling interface[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6313. DOI:10.1109/TPEL.2020.3035782
- [10] LI Xiaofei, HU Jiefeng, LI Yong, et al. A decoupled power and data-parallel transmission method with four-quadrant misalignment tolerance for wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11531. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2920441
- [11] 姚友素, 唐程雄, 王懿杰, 等. 基于正交磁场的无线能量和数据协同传输技术[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 1875
YAO Yousu, TANG Chengxiong, WANG Yijie, et al. Wireless power and data transfer based on orthogonal magnetic fields [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 1875. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201234
- [12] 王佩月, 左志平, 孙跃, 等. 基于双侧 LCC 的全双工无线电能传输能量信号并行传输系统[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4981
WANG Peiyue, ZUO Zhiping, SUN Yue, et al. Full-Duplex simultaneous wireless power and data transfer system based on double-sided LCC topology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4981. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200634
- [13] WANG Yunshi, ZHAO Changming, ZHANG Liwei. Adaptive high-power laser-based simultaneous wireless information and power transfer system with current-fed boost MPPT converter [J]. IEEE Photonics journal, 2021, 13(4): 8400111. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3088887
- [14] WANG Xin, HAN Jiaqi, LI Guanxuan, et al. High-performance cost efficient simultaneous wireless information and power transfers deploying jointly modulated amplifying programmable metasurface [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 6002. DOI: 10.1038/s41467-023-41763-z
- [15] LEE Wangsang, PARK S, LEE J H, et al. Longitudinally misalignment-insensitive dual-band wireless power and data transfer systems for a position detection of fast-moving vehicles [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(8): 5614. DOI:10.1109/TAP.2019.2916697
- [16] WU Ning, FANG Xingbang, XIAO Jing, et al. Simultaneous wireless power and data transfer based on separated channel [C]//2023 IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Dali: IEEE, 2023: 164. DOI:10.1109/ICCASIT58768.2023.10351596
- [17] 郭尧, 魏国, 郝潇潇, 等. 双谐振耦合能量信息同步传输技术研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 18
GUO Yao, WEI Guo, HAO Xiaoxiao, et al. Study on wireless power and information synchronous transfer based on dual resonant coupling circuits [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 18. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2015.19.004
- [18] LI Hongchang, CHEN Shuxin, FANG Jingyang, et al. Synchronous rectification-based phase shift keying communication for wireless power transfer systems [C]//2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC). Singapore: IEEE, 2018: 1. DOI: 10.1109/SPEC.2018.8636023
- [19] 张爱国. 感应式电能和信号同步传输技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
ZHANG Aiguo. Study on synchronous transmission of inductive power and signal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. DOI:10.7666/d.D420952
- [20] 周锦锋, 孙跃, 苏玉刚, 等. 感应耦合电能与信号同步传输技术[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2009, 23(4): 93
ZHOU Jinfeng, SUN Yue, SU Yugang, et al. Synchronous transmission of inductively coupled power and signal [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2009, 23(4): 93. DOI:10.3969/j.issn.1674-8425-B.2009.04.023
- [21] 周晓东, 张河. 用于引信的能量和信息非接触同步传输技术 [J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 424
ZHOU Xiaodong, ZHANG He. Contactless synchronous transmission of power and information for fuzes [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3): 424. DOI:10.3321/j.issn:1000-1093.2003.03.033
- [22] LIU Xu, XIA Chenyang, HAN Xiaozuo, et al. Simultaneous wireless power and information transmission based on harmonic characteristic of soft-switching inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 6090. DOI: 10.1109/TIE.2021.3086710
- [23] WU Jiande, ZHAO Chongwen, LIN Zhengyu, et al. Wireless power and data transfer via a common inductive link using frequency division multiplexing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7810. DOI: 10.1109/TIE.2015.2453934

(编辑 张红)