

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.010

引用格式: 菅志军, 张玉霖, 孟巍, 等. 基于双通道模式的 WPT 系统能量信号并行传输技术研究[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(12): 113-122.



基于双通道模式的 WPT 系统能量信号 并行传输技术研究

菅志军¹, 张玉霖¹, 孟巍¹, 贾亚辉²

(1. 中海油田服务股份有限公司, 河北 三河, 065201; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 围绕旋转机构无线供电系统能量与信号同时传输的需求, 提出了基于双通道模式的能量信号并行传输方法。在分析双通道模式下能量与信号传输机理基础上, 设计了相互解耦的能量信号传输线圈, 能量传输基于串联-无 (series-none, SN) 补偿拓扑的感应耦合技术。信号传输基于幅度调制方式, 结合包络解调技术, 实现信号的双向传输。实验结果验证所提方法有效, 能量信号传输通道互不干扰, 信号传输误码率为 0。

关键词: 无线电能传输; 双通道模式; 能量信号并行传输; 幅移键控; 包络解调

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)12-113-10

Research on power and data parallel transmission technology via a dual-channel for WPT system

JIAN Zhijun¹, ZHANG YuLin¹, MENG Wei¹, JIA Yahui²

(1. China Oilfield Service Limited, Sanhe, Hebei 065201, P. R. China; 2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To solve the problem of power and data parallel transmission simultaneously in wireless power transfer system for rotating mechanism, a parallel transmission method of power and signal based on dual-channel mode was proposed. Based on analyzing the power and signal transmission mechanism in dual-channel mode, a mutually decoupled power and signal transmission coil is designed. The power transmission is based on the induction coupling technology of series-none (SN) topology, and the signal transmission is based on the amplitude modulation mode, combined with the envelope demodulation technology, realizing the two-way signal transmission. Experimental results verify the effectiveness of the proposed method, the power signal transmission channels do not interfere with each other, and the signal transmission error rate is zero.

Keywords: wireless power transfer (WPT); dual-channel mode; power and data parallel transmission; amplitude shift keying (ASK); envelope demodulation

收稿日期: 2022-06-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA14030000); 中国海洋石油集团有限公司重点项目(CNOOC-KJ ZDHXJSGG YF 2019-01)

Supported by Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Class A) (XDA14030000) and Key Project of China National Offshore Oil Corporation (CNOOC-KJ ZDHXJSGG YF 2019-01)

作者简介: 菅志军(1966-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事随钻测井、旋转导向钻井等技术方向研究, (E-mail) jianzhj2@cosl.com.cn.

为旋转机构(滑环)供电问题普遍存在于航空航天、石油钻井、风力发电等领域。传统接触式供电(如碳刷等)方式易磨损老化、防护性较差,由此带来的高故障率、低可靠性问题亟待解决。

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术为解决旋转机构接触式传能问题提供了有效途径^[1-3]。该技术借助于高频电磁场实现电能非接触传递,具有较高安全性和可靠性,同时还具有更好的灵活性、易用性和免维护性。此外,在实际应用中,旋转机构不但需要完成电能的传输,还需要同时完成信息的传递并保证传输安全性^[4-10]。

近年来,国内外学者提出了实现能量信号并行传输的多种解决方法。文献[11]提出了一种电场耦合功率传输系统的功率和信号共享通道。所设计的通道可以同时传输超过 100 W 的输出功率和从 300 bps~120 kbps 的传输速率。文献[12]提出一种通过耦合线圈和金属屏蔽板的寄生电容产生高频电场来调制和传输功率以及数据的并行传输方法,该方法构建的系统具有良好的灵活性和较大的空间位置偏移冗余度,并且利用所提出方法,构建了 40 W 的原型并且数据传输速率达到 230 kbps。文献[13]提出了一个简单设计来实现通过电力传输通道的双向通信。实现传输距离为 10 mm,功率传输达到 30 W,数据传输速率可达 80 kbps。文献[14]提出了一种新型无线电力传输系统,开发出可以确保功率和信号传输没有不可接受的干扰或衰减的参数选择方法。然而,上述文献中能量与信号传输通道相互影响,信号传输信噪比不高。此外,信号传输的另外一个难题是实现双向传输。文献[15]利用正交相移键控调制双载波,实现全双工通信。文献[16]采用移频键控,通过部分耦合线圈实现全双工通信。然而,相对复杂的调制和解调方法成本较高,不易推广使用。

针对上述问题,研究提出了基于双通道模式的 WPT 系统能量信号并行传输技术,分析了能量与信号传输通道原理,设计了相互解耦的能量信号传输线圈,信号传输基于幅度调制方式,结合包络解调技术,实现信号的双向传输。搭建了实验平台,实验结果表明,系统能量传输与信号传输互不干扰,信号传输误码率为 0,实现了 WPT 系统能量与信号的并行传输。

1 系统原理分析

1.1 双通道模式 WPT 能量信号并行传输系统

双通道模式 WPT 系统包括能量传输通道和信号传输通道 2 部分。能量传输通道主要采用了感应耦合无线电能传输技术,信号传输通道是基于幅度调制的感应耦合传输原理,系统总体方案设计如图 1 所示。

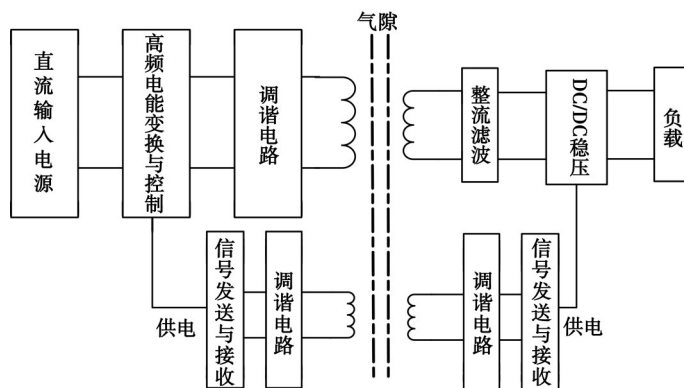


图 1 系统结构框图

Fig. 1 System structure diagram

为了实现系统能量与信号的并行传输,采用 2 组磁耦合机构,能量传输通道将系统输入的直流电源经高频电能变换为高频交流电,再经过初级的 LC 调谐电路形成高频振荡的电磁能量,通过电磁感应,能量次级线圈产生相应频率的感应电流,经过整流滤波及 DC-DC 稳压等环节形成稳定的直流输出。而信号传输通道则采取另外一组耦合机构来实现初级和次级双向传输,以初级向次级传输为例,基带信号经过幅度调制,再经功率放大后通过线圈耦合传输,在次级对信号解调,复原基带信号,这样既不影响负载能量的获取,同时也能防止噪声干扰,满足信号传输的要求。在这里,初级和次级的信号传输部分均由能量传输通道的直流电源进行供电。

1.2 电路拓扑分析

双通道模式 WPT 系统电路原理图如图 2 所示,其中信号传输通道仅以次级向初级传输为例,初级向次级传输过程与之类似。如图 2 为双通道 WPT 系统电路原理图,直流电源 U_{dc} 经过全桥逆变电路接入初级调谐电路,研究采用 SN 补偿拓扑结构,次级线圈经过整流滤波及 BUCK 变换器为负载 R_{Load} 供电。信号传输通道以次级向初级传输为例,数字信号经过 ASK 调制成高频模拟信号,然后经功率放大电路后驱动次级信号线圈,经过耦合把电信号传输到初级部分,经过带通滤波器滤除杂波,再经运算放大器和解调电路还原成数字信号。

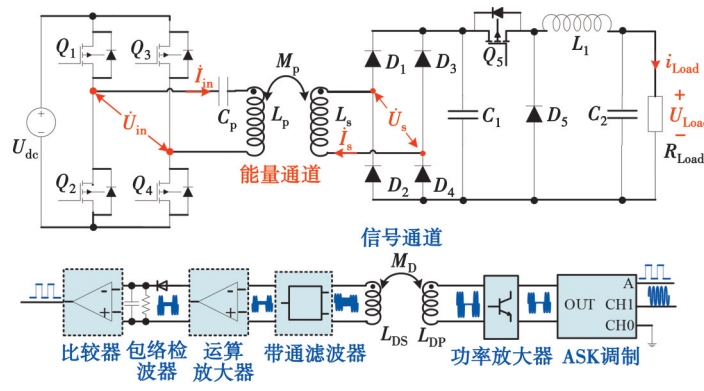


图 2 系统电路原理图
Fig. 2 Schematic diagram of system circuit

2 电磁耦合机构设计

无线电能传输系统分为初级和次级 2 部分,其耦合机构也分为初级部分和次级部分,同时系统要求既要传输电能,也要传输信号,为减少电能传输环节对信号环节的干扰,在设计中采用电能/信号分别独立的双通道传输方案。因此,系统耦合机构也分为能量部分和信号部分,设计采用磁环方案,其电能传输效果较好。如图 3(a)(b)所示,无线电能传输系统初级耦合机构为内筒,次级耦合机构为外筒,耦合线圈分别绕制于初

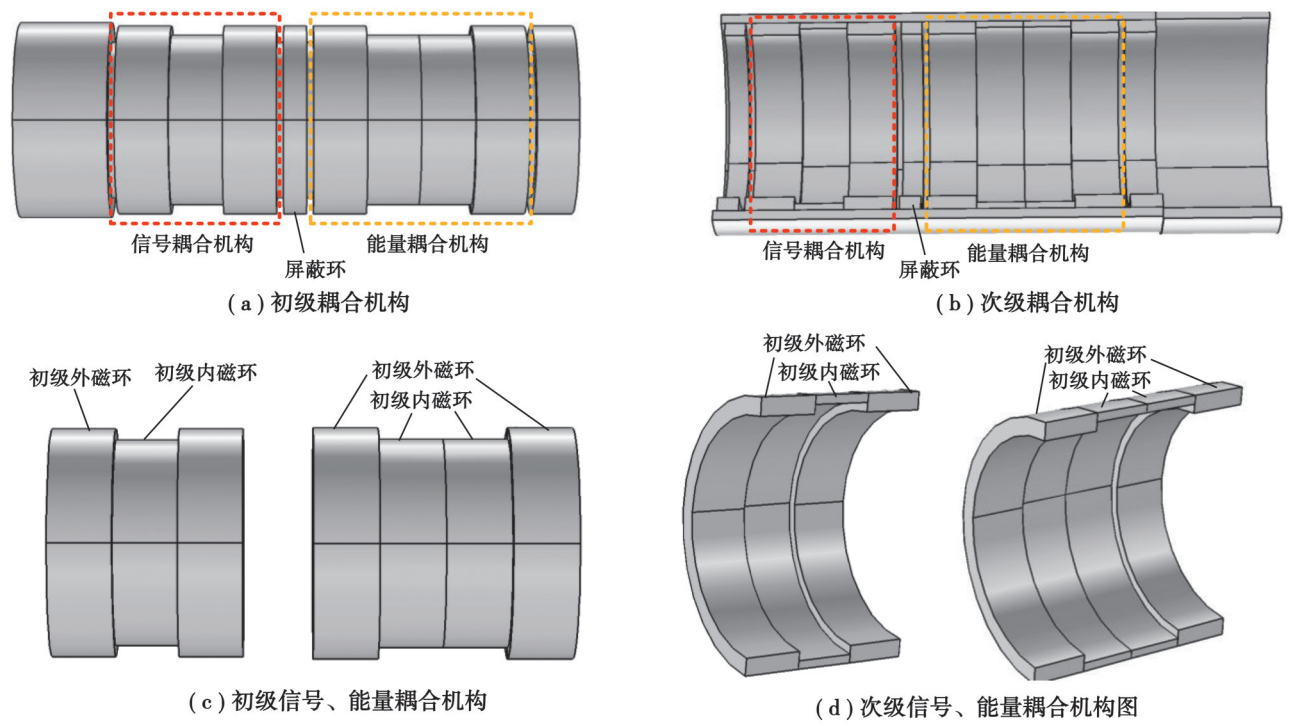


图 3 耦合机构模型剖面图
Fig. 3 Cross-sectional view of coupling mechanism model

级、次级内磁环上。同时,为减小能量与信号传输线圈的交叉干扰,在二者之间加入屏蔽环以减弱其相互耦合。利用有限元仿真软件 COMSOL 建立耦合机构模型,其剖面如下图 3(c)(d)所示。表 1 所示为耦合机构参数,其中能量与信号线圈的交叉耦合互感相较能量与信号初次级线圈互感小 3 个数量级以上,可以忽略不计。

表 1 耦合机构参数
Table 1 Parameters of the coupling mechanism

参数	数值
能量与信号初级线圈内径/mm	64
能量与信号次级线圈内径/mm	87
能量初次级线圈匝数	12
信号初次级线圈匝数	7
能量初次级线圈线径/mm	3.5
信号初次级线圈线径/mm	1.5
能量初级线圈自感/ μH	198.23
能量次级线圈自感/ μH	199.92
能量初级线圈内阻/ Ω	0.39
能量次级线圈内阻/ Ω	0.39
能量线圈互感/ μH	194.93
信号初级线圈自感/ μH	84.55
信号次级线圈自感/ μH	85.54
信号初级线圈内阻/ Ω	0.05
信号次级线圈内阻/ Ω	0.05
信号线圈互感/ μH	80
能量传输频率/kHz	25
信号传输频率/MHz	1.35

通过仿真得出磁耦合机构的磁力线仿真分布如图 4 所示。由图可知此结构漏磁较小,磁力线基本上分布在铁氧体内。磁通密度最大处位于铁氧体中部,气隙中磁通较小,磁通密度最小的部分为铁氧体外部的金属筒部分,磁通密度与磁力线密度仿真结果基本吻合。

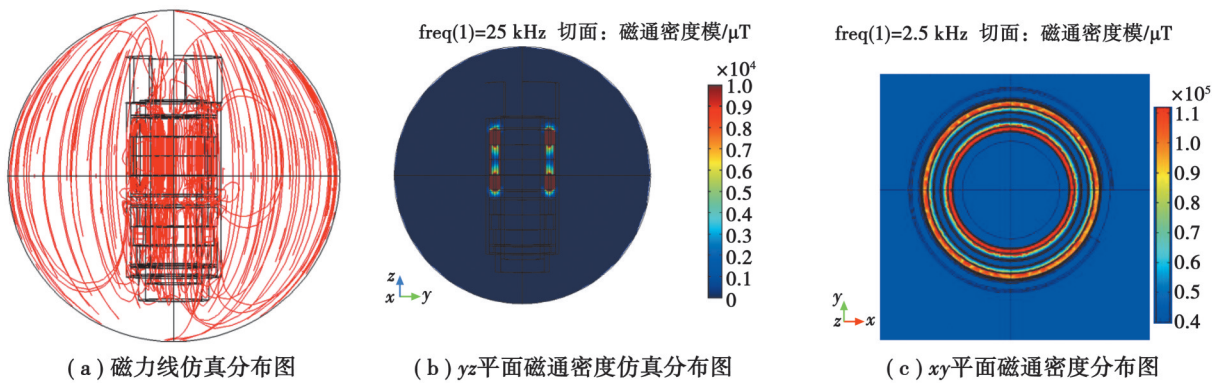


图 4 耦合机构仿真结果图
Fig. 4 Simulation results of coupling mechanism

3 能量与信号并行传输设计

3.1 能量电路设计

根据 SN 补偿拓扑原理^[17],有

$$\omega_p^2 \left(L_p - \frac{M_p^2}{L_s} \right) C_p = 1, \quad (1)$$

$$\frac{U_{in}}{U_s} = \frac{M_p}{L_s}, \quad (2)$$

式中:下标“p”表示初级侧参数;下标“s”表示次级侧参数; ω_p 为能量通道谐振角频率。假定整流滤波及 BUCK 电路功率损耗可以忽略不计,且 BUCK 电路工作在电流连续模式,系统能量传输通道输出电压及功率为

$$U_{Load} = \frac{\pi D U_{in} L_s}{2 \sqrt{2} M_p}, \quad (3)$$

$$P_{Load} = \frac{\pi^2 D^2 U_{in}^2 L_s^2}{8 M_p^2 R_{Load}}, \quad (4)$$

式中: D 为 BUCK 变换器的占空比。

3.2 信号电路设计

根据信号的双向传输要求,信号部分的传输原理框图如图 5 所示。

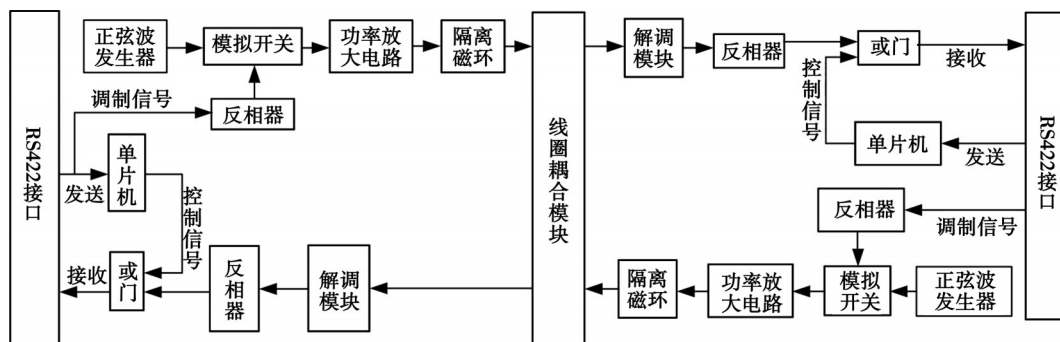


图 5 信号传输原理框图

Fig. 5 Block diagram of signal transmission

从初级部分到次级部分,上位机发出的数字信号经过电平变换电路输出所需要的晶体管-晶体管逻辑 (transistor-transistor logic, TTL) 电平经过调制电路变成高频的模拟信号,经过功率放大电路后驱动初级信号线圈,经过耦合把电信号传输到次级部分,数字信号经过功率放大和解调电路还原成原来的 TTL 信号,通过电平变换电路输出到下位机。从次级部分到初级部分传输原理是相同的,在进行信号传输时通过检测信号来源,再经过单片机控制信号传输的方向,实现信号的双向非接触传输。

调制方式在通信系统中具有重要作用,调制的目的是将数字信号变成可以在通信通道中传输的模拟信号,调制解调方式的选择是决定通信系统是否具有良好性能的关键。数字调制既可以用模拟方法实现,也可以用键控方式实现,键控法用数字电路完成,具有测试方便,可靠等优点。通常二进制数字信号具有以下 3 种调制方式:二进制移幅键控法(2ASK),二进制移频键控法(2FSK),二进制移相键控法(2PSK)。根据已调信号谱特点,数字调制也可分为线性调制和非线性调制。其中 ASK 属于线性调制,PSK 和 FSK 属非线性调制。由于 ASK 电路简单,易于实现,在设计中选择 2ASK 移幅键控方式进行调制。

经过调制的模拟信号到达下位机后,要还原成原来的基带信号,使信号能被计算机识别,这就是解调。

本设计采用包络检波的解调方式,通过带通滤波器滤除干扰,通过包络检波器还原出基带波形,其结构如图6所示。信号解调过程如图7所示。

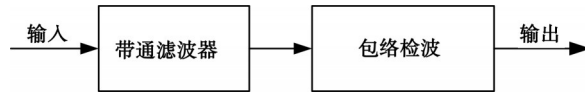


图6 2ASK 包络检波解调框图

Fig. 6 2ASK envelope detection demodulation block diagram

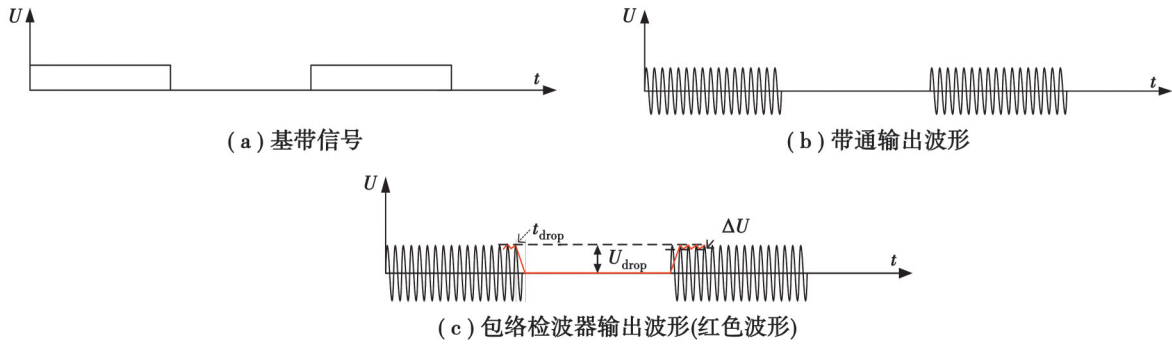


图7 解调示意图

Fig. 7 Demodulation diagram

包络检波器的基本电路图如图8所示。

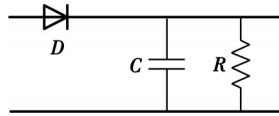


图8 包络检波电路图

Fig. 8 Envelope detection circuit diagram

根据包络检波器的原理有

$$t_{\text{drop}} = \tau \ln \frac{U_{\text{peak}}}{U_{\text{drop}}}, \quad (5)$$

$$\Delta U = \frac{U_{\text{peak}}}{f_c \tau}, \quad (6)$$

式中: U_{peak} 为正弦波的峰值; f_c 为正弦波频率; $\tau = RC$ 为时间常数; t_{drop} 为包络下降时间; ΔU 为包络高电平压降; U_{drop} 为包络压降。

由以上推导可知,要想加快包络下降时间则需要减小时间常数,减小 ΔU ,则需要增大时间常数,根据实际需要,选择适合的电阻 R 和电容 C ,确定时间常数 τ 。

4 实验验证

系统实验装置主要由初级发射装置和次级接收装置组成,其中发射端分别由逆变板、控制板和信号板组成,逆变板主要实现直流到高频交流的变换,控制板实现系统初级侧过流检测及提供逆变驱动信号,信号板实现信号的调制和解调,能量接收端由整流稳压板和信号板组成,其中整流稳压板包含整流电路和稳压电路。整机系统研发装置如图9所示,从左至右分别为初级发射电路、耦合机构及次级接收电路。

4.1 能量通道实验结果

将系统负载设为恒阻模式,输出功率为 138 W,当输入电压为 40 V 时用示波器测试系统关键波形,并记

录输入电压电流和输出电压电流、系统功率及效率,如表 2 所示。

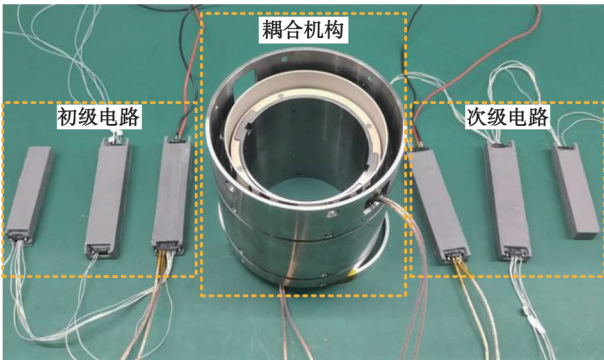


图 9 系统实验装置图

Fig. 9 System experimental device diagram

表 2 实验数据记录表

Table 2 Experimental data record sheet

参数	输入		输出	
	U_{in}/V	I_{in}/A	U_{out}/V	I_{out}/A
测量值	40	3.98	27.6	5
功率/W	159.2		138	
效率/%	86.68			

系统满载时逆变器输出电压电流波形如图 10 所示,此处电压相位超前电流,系统呈弱感性,实现逆变器开关管零电压开通,减小开关损耗。

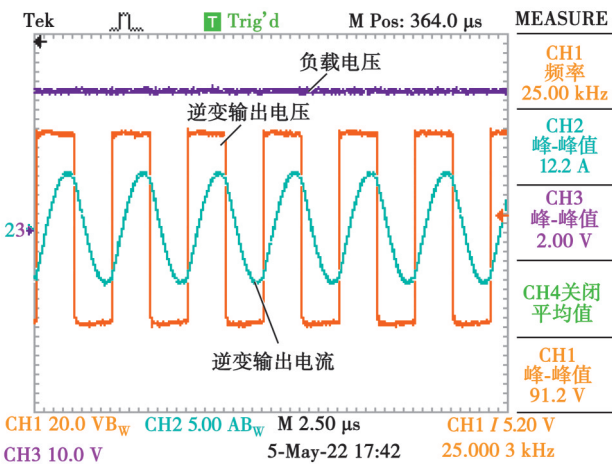


图 10 系统逆变器输出电压电流及负载电压波形

Fig. 10 System inverter output voltage current and load voltage waveform

4.2 信号通道实验结果

在信号通信测试过程中,观测了信号电路每一级模块的输出波形,同时对初次级双向通信过程中的信号波形在空载和满载条件下进行测试和对比。

图 11 为载波发生波形,其中右图为展开后的波形,通道 1 为 DDS 芯片 AD9833 输出的正弦波波形,通道 2 为第 1 级运放电路放大之后的波形,通道 3 为经过模拟开关控制后输出的调制波形,通道 4 为经过功放电路后的调制波形。

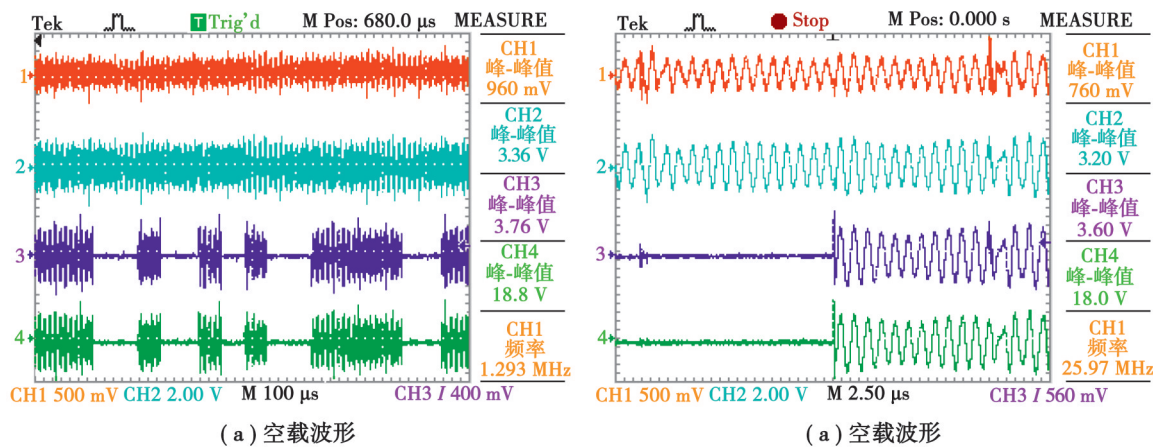


图 11 载波波形

Fig. 11 The carrier wave

初级到次级在空载和满载情况下信号传输过程分别如图 12(a)(b)所示,1 通道为初级调制波形,2 通道为次级接收波形,3 通道为次级包络解调后的波形,4 通道为比较器整形后的输出波形。由图可知,输出功率的大小不影响信号的传输。

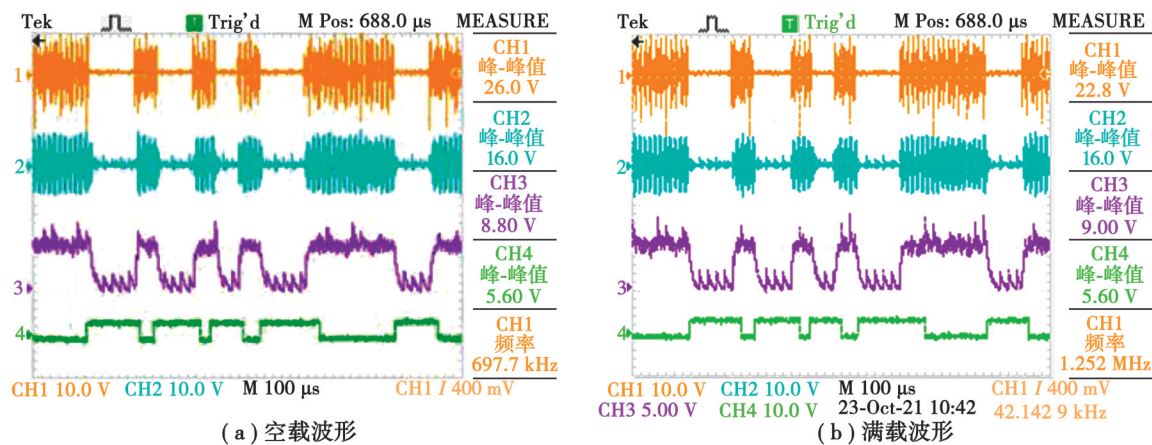


图 12 初级信号传递过程波形

Fig. 12 Primary signal transfer process waveform

次级到初级在空载和满载情况下信号传输过程如图 13 所示,1 通道为次级调制波形,2 通道为初级拾取波形,3 通道为初级包络解调后波形,4 通道为比较器整形后的输出波形。同样,系统输出功率的大小不影响信号的传输。

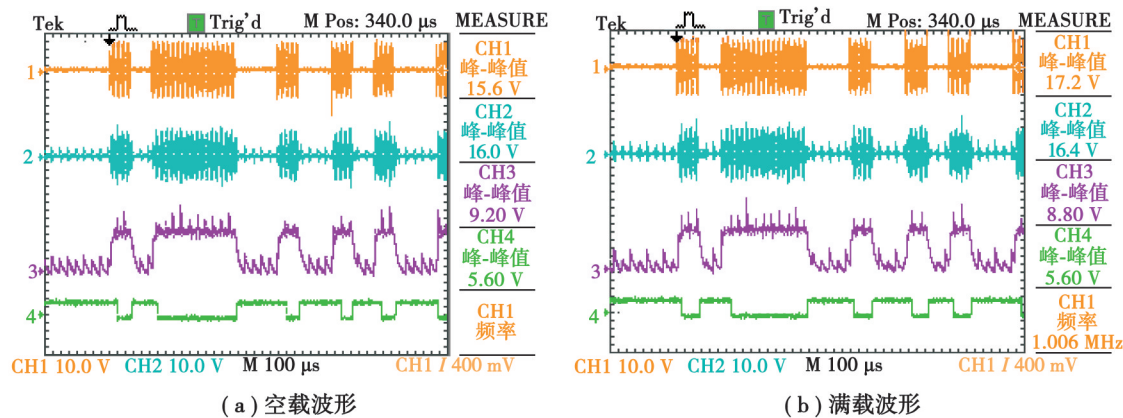


图 13 次级信号传递过程波形

Fig.13 Secondary signal transfer process waveform

表 3 所示为通讯检验记录表,图 14 为信号误码率测试结果,信号传输波特率为 19.2 kb/s,结果表明数据传输全部正确,误码率为 0,双通道 WPT 系统实现了能量与信号的并行传输。

表 3 通讯检验记录表
Table 3 Communication inspection record form

数据个数	原边到副边	正确率/%	副边向原边	正确率/%	总正确率/%
661 402	661 402	100	661 402	100	100

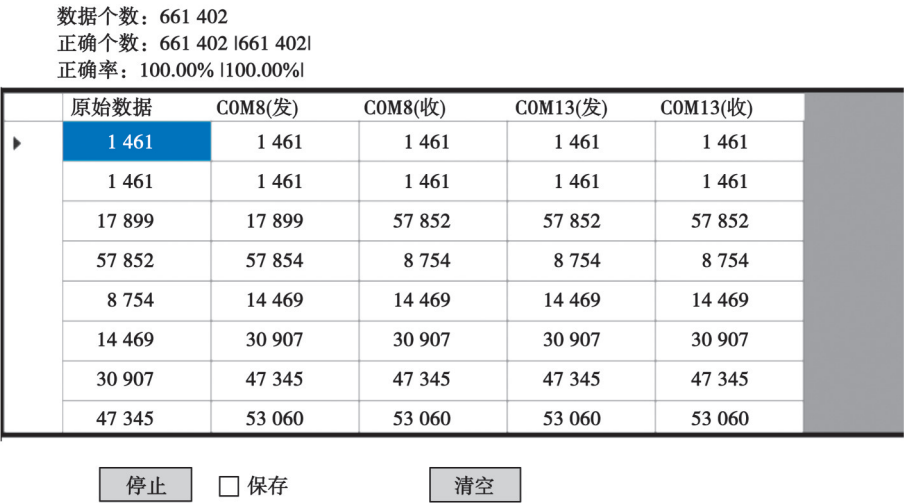


图 14 信号误码率测试
Fig. 14 Signal error rate test

5 结 论

研究分析了双通道模式下的能量信号并行传输原理,设计适用于旋转机构的能量信号传输线圈,实现其相互解耦。在此基础上,进一步分析了基于 SN 拓扑及 BUCK 变换器的系统输入-输出关系,设计了基于 ASK 调制及包络解调的信号传输方法,实现信号的双向传输。实验搭建了旋转机构 WPT 系统实验平台,能量传输功率为 138 W,信号传输速率为 19.2 kb/s,实验结果表明信号传输误码率为 0,双通道 WPT 系统实现了能量与信号的并行传输。

参 考 文 献

[1] Li M Y, Chen X Y, Huang Q, et al. Conceptual design and characteristic analysis of a rotary-type superconducting wireless power transfer system using ReBCO primary at 50Hz[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.

[2] He G M, Chen Q H, Ren X Y, et al. Modeling and design of contactless slirings for rotary applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4130-4140.

[3] Jiang X G, Wang K Q, Shao R J, et al. Self-compensation theory and design of contactless energy transfer and vibration system for rotary ultrasonic machining[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8650-8660.

[4] Ji L, Wang L F, Liao C L, et al. Simultaneous wireless power and bidirectional information transmission with a single-coil, dual-resonant structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4013-4022.

[5] 刘晓胜, 顾轩溥, 姚友素, 等. 基于电容调制的无线电能传输系统信号电能同步传输[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 140-146.

Liu X S, Gu X P, Yao Y S, et al. Synchronous transmission of signal and power in WPT system based on capacitor modulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 140-146. (in Chinese)

[6] 杨庆新, 李阳, 尹建斌, 等. 基于移幅键控的磁耦合谐振式无线电能和信号同步传输方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 153-161.

- Yang Q X, Li Y, Yin J B, et al. Wireless synchronous transmission of power and information based on ASK in WPT via coupled magnetic resonances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 153-161. (in Chinese)
- [7] Sato F, Nomoto T, Kano G, et al. A new contactless power-signal transmission device for implanted functional electrical stimulation (FES)[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4): 2964-2966.
- [8] Huang C C, Lin C L, Wu Y K. Simultaneous wireless power/data transfer for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 682-690.
- [9] Shyu K K, Jwo K W, Chen Z Y, et al. Inductive power supply system with fast full-duplex information rate device[C]// EUROCON 2007-The International Conference on Computer as a Tool. Warsaw, Poland: IEEE, 2007: 1382-1386.
- [10] Hirai J, Kim T W, Kawamura A. Practical study on wireless transmission of power and information for autonomous decentralized manufacturing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 349-359.
- [11] Su Y G, Zhou W, Hu A P, et al. A shared channel design for the power and signal transfers of electric-field coupled power transfer systems[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(2): 805-814.
- [12] Li X F, Tang C S, Dai X, et al. An inductive and capacitive combined parallel transmission of power and data for wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 4980-4991.
- [13] Zheng H C, Wang Z H, Li Y C, et al. Data transmission through energy coil of wireless power transfer system[EB/OL]. (2017-05-20) [2021-05-12]. <http://Data transmission through energy coil of wireless power transfer system>.
- [14] Su Y G, Zhou W, Hu A P, et al. Full-duplex communication on the shared channel of a capacitively coupled power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 3229-3239.
- [15] Qian Z N, Yan R, Wu J D, et al. Full-duplex high-speed simultaneous communication technology for wireless EV charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9369-9373.
- [16] Yao Y S, Cheng H S, Wang Y J, et al. An FDM-based simultaneous wireless power and data transfer system functioning with high-rate full-duplex communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6370-6381.
- [17] Zhang Y M, Kan T Z, Yan Z C, et al. Modeling and analysis of series-parallel compensation for wireless power transfer systems with a strong coupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1209-1215.

(编辑 侯 湘)