一种基于最小频移键控的无线电能与信息同步 传输系统设计

沈傲栋

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月8日

摘要

无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术因其无需物理导线连接带来的灵活性,在植入式医疗、消费电子等领域应用广泛。随着应用的逐渐深入,闭环控制、数据交互等功能对WPT系统中的信息传输提出要求。文章针对传统频移键控信息传输方案造成输出电压较大波动的问题,提出了一种基于最小频移键控的信息传输方案。首先介绍了电路的结构与工作原理,然后分析了最小频移键控的工作原理以及信息调制与解调方案,最后搭建了Simulink仿真实验,验证了所提出信息传输方案对输出波动的改善,并实现了5 kbit/s的信息传输速率。

关键词

无线电能传输,信息传输,最小频移键控,全桥逆变器

Design of a Wireless Power and Information Synchronous Transmission System Based on Minimum Frequency Shift Keying

Aodong Shen

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 8th, 2025

Abstract

Wireless power transfer (WPT) technology has found widespread applications in implantable medical devices, consumer electronics, and other fields due to its flexibility from non-physical wire connections. As the application deepens, functional requirements such as closed-loop control, load identification, and data interaction impose demands for information transmission in WPT systems. To address the need for large fluctuations in the output voltage caused by the traditional frequency shift keying information transmission scheme, this paper proposes an information transmission scheme based on minimum shift keying. First, the structure and working principle of the circuit are introduced, and then the working principle of minimum shift keying as well as the information modulation and demodulation schemes, are analyzed. Finally, a Simulink simulation experiment is built to verify the improvement of the proposed information transmission scheme on output fluctuations and achieve an information transmission rate of 5 kbit/s.

Keywords

Wireless Power Transfer, Information Transmission, Minimum Shift Keying, Full-Bridge Inverter

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术通过非接触式松耦合变压器实现电能传输,无需依赖传统导线传导或物理接触连接,在便捷性、安全性、可靠性及空间布局灵活性方面展现出显著优于传统有线传输方式的技术优势[1]。该技术已在物联网设备供电、电动汽车动态充电、植入式医疗设备供能、智能电网节点互联,以及高危环境(如易燃易爆场所、深海作业设施)等特殊应用场景中取得一定的进展,展现出较为广阔的应用前景[2]-[5]。

在电动汽车产业快速发展的背景下,大规模的充电需求对电网的负荷调节能力提出较为严峻的挑战。 值得注意的是,电动汽车动力电池作为可移动的分布式储能单元,通过车联网技术(Vehicle-to-Grid, V2G)可 有效实现电网负荷的"削峰填谷",同时提升电动汽车系统的环境效益。在此过程中,无线电能传输技术 通过构建便捷式能量传输体系,为 V2G 系统提供了兼具灵活性、安全性和高效性的技术实现路径[6] [7]。

随着应用场景的复杂化,单一能量传输功能已经无法满足系统需求,负载控制、数据交互等复合功能需求日益凸显。在电子技术范畴中,能量传输与信息通信均基于电磁场理论构建,前者侧重功率密度与传输效率优化,后者聚焦通信带宽与传输距离提升。基于电磁波的双重物理特性,无线电能与信息同步传输技术(Wireless Power and Information synchronous Transmission, WPIT)通过单一物理媒介实现能量与信息的同时传输,成为当前研究的重要方向[8]。

传统无线通信方案多采用独立射频链路(如 Wi-Fi、蓝牙等)实现信息交互[9],但存在硬件成本高、连接延迟显著及高频电磁干扰敏感等固有缺陷。集成化 SWPIT 技术的核心在于实现能量传输与通信模块的协同设计,当前主要技术路线包括:采用独立电磁通道分别传输能量与信息的分离链路式、通过互感器将信息载波叠加在能量载波中同时传输的载波注入式,以及通过电力电子变换改变能量载波的时域特性进行信息编码来实现能量与信息同时传输的能量调制式[10]-[12]。从技术经济性角度分析,分离链路式SWPIT系统虽具有频段配置灵活的优势,但需构建独立的信息通道,这导致硬件复杂度与成本显著增加。载波注入式方案可实现高数据传输速率,但面临载波间隔离度低、需要额外滤波电路等难点。

相较而言,能量调制式方案通过电力电子器件对能量载波的参数调制实现信息编码,虽传输速率受限于能量传输频率的制约,并且信息传输会干扰能量的传输,但其结构简洁、改造成本低的特性,结合现代电力电子技术的快速发展,展现出突出的工程应用潜力。在这其中,利用频移键控(Frequency Shift

Keying, FSK)对能量进行调制实现信息传输的方法由于其便捷性受到广泛应用。但对于 WPT 系统来说,不同频率的电能经过传输后往往会产生不同幅度的衰减,并且传统的基于开关法的 FSK 调制会导致频率 突变,使得输出电压产生较大波动。文献[13]与文献[14]分别通过双腔谐振与高阶补偿拓扑来降低由于系 统带通特性带来的输出电压波动,并且都需要对主电路拓扑进行一定改动。

本研究提出了一种基于最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)的信息传输方法,该方法基于全 桥拓扑构建电能传输架构,无需增加额外耦合机构,仅通过原边全桥变换器的控制策略优化即可实现信 息传输。其与全桥逆变器组合使用,改变电能传输频率的同时不会造成频率突变,从而可以降低输出电 压的波动,无需改动主电路拓扑。本文首先建立系统等效电路模型,分析无线电能传输机理,继而提出 信息调制解调方案,最终通过仿真实验的构建与测试,验证所提方法的可行性与有效性。

2. 系统原理与传输通道分析

2.1. 系统基本原理分析

无线电能传输系统架构如图 1 所示。图中各元件定义如下: *V_{dc}* 表示原边直流输入电源电压, *C_i*为输入滤波电容; 原边与副边变换器都是全桥拓扑结构; *L_p、L_s*分别表征原副边线圈自感参数, *R_p、R_s*为对应线圈等效串联电阻, *M* 为线圈间互感系数; *C_p、C_s*分别为原副边谐振补偿电容器; *C_o*为输出滤波电容器, *R_L*表征负载阻抗。



Figure 1. Wireless power transmission system 图 1. 无线电能传输系统

该系统总体采用对称式架构设计,包含原边与副边两个能量传输单元,通过松耦合变压器与补偿网络实现磁耦合谐振,从而传输功率。原边通过全桥逆变器将直流电源转换为高频交流信号,经谐振耦合传输至副 边,副边通过同步整流全桥实现交流-直流转换,最终经滤波电路为负载提供稳定直流电压。原边全桥逆变 器实现逆变功能,而副边全桥整流器结构将交流电整流为直流电,经过输出滤波电容之后为负载供能。



图 2. 等效电路

在无线电能传输系统中,谐振补偿网络对系统性能优化具有关键作用,其具有补偿感性元件引起的 无功功率损耗,以及调节系统输入输出特性等功能。本研究采用串联补偿拓扑,相较于复合补偿拓扑, 其元件数量最少化,有效降低谐振损耗,且在谐振状态下,系统输入阻抗角及谐振频率对耦合系数与负 载变化的敏感性显著降低,有利于后续信号调制处理。

图 2 为采用串联补偿拓扑时系统的互感等效模型,基于基尔霍夫电压定律可建立如下的回路方程:

$$\begin{cases} Z_p I_p + j\omega M I_s = U_p \\ j\omega M I_p + Z_s I_s = 0 \end{cases}$$
(1)

式中, I_p 、 I_s 分别表示原副边电流相量; Z_p 、 Z_s 为对应回路等效阻抗;M为互感系数; ω 为系统谐振角频率,其表达式为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$
(2)

经等效电路分析,原副边回路阻抗可表示为:

$$\begin{cases} Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p \\ Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_L \end{cases}$$
(3)

其中 *R_p、R_s*分别为原副边线圈等效串联电阻,忽略该参数将导致模型精度下降,*R_L*为等效负载电阻, 由式(3)可求得原副边的电流,进而可以得到发射线圈的等效输入阻抗与接收线圈的等效输出阻抗分别 为:

$$\begin{cases} Z_{pin} = Z_p + \frac{(\omega M)^2}{Z_s} \\ Z_{so} = Z_s + \frac{(\omega M)^2}{Z_p} \end{cases}$$
(4)

在固定线圈间距的条件下,系统传输频率、互感参数及线圈固有参数均保持恒定。当电源频率偏移时,可在接收端检测到频率变化,通过 FSK 调制方法即可将原边的信息传输到副边。根据式(5),系统频率的变化将引起输出阻抗的变化,从而引起输出电压的波动,但这种电压的波动是根据信息的变化规律来波动的,为信息的解调提供了另一种方式,即对输出电压进行包络检波,可降低系统的成本。

2.2. 电能传输通道分析

 Table 1. Main component parameters of the experimental platform

 表 1. 实验平台主要元件参数

参数	数值
线圈自感 <i>L_p</i> , <i>L_s</i> /μH	50, 50
线圈耦合系数	0.2
线圈寄生电阻 R _p , R _s /Ω	0.2, 0.2
串联补偿电容 C_p , C_s/nF	50, 50
负载电阻 <i>R</i> ι/Ω	20

为进一步研究系统电能传输的动态特性,探究电能传输频率与输出电压衰减之间的关系,可以利用 Simulink 仿真平台获取系统伯德图,从而分析系统的幅频与相频特性。根据图 2 所示的系统等效电路搭 建仿真模型,模型具体参数如表1 所示。

在仿真模型中,将可编程电压源的输入作为开环输入,负载电阻两端的电压作为开环输出,利用线性化工具箱可获得系统的伯德图如图 3 所示。



Figure 3. Bode diagram of power transmission channel 图 3. 电能传输通道伯德图

根据幅频特性曲线可知,系统在电源频率为 100 kHz 时呈现出增益峰值,表明此时输出电能传输效率达到最优,输出电压为最高值。将仿真参数带入式(2)中,并转换为频率可得系统谐振频率为 100 kHz,验证了谐振补偿网络的频率匹配作用。当电源频率偏移谐振频率时,输出电压呈现出较快的衰减速度,如需输出电压偏移保持在 20%以内,那么根据伯德图,需要将频率偏移控制在 2.5 kHz 以内。根据相频特性曲线可知,在谐振点处相位偏移为 90°,当频率偏移时相位也会随之产生一定偏移。

3. 信息传输方案分析与设计

3.1. MSK 调制原理



Figure 4. MSK signal waveform example **图 4.** MSK 信号波形示例

尽管 FSK 调制体制具有很多优点,比如其具有较为优秀的传输性能、较低的实现难度以及广泛的应用基础。但 FSK 调制依然存在若干技术局限性亟待解决。首先,FSK 调制方式相较于二进制相移键控具

有更宽的频带宽度,这表现出了其较低的频谱利用率,将导致频谱资源浪费与系统容量受限等缺点。其次,当采用开关切换法生成 2FSK 信号时,相邻码元间可能产生相位不连续现象,当信号通过带通滤波器时,由于系统通频带的约束作用,将导致信号包络产生显著波动,这种现象对通信系统性能产生不利影响。在 WPT 系统通信的应用中,该特性将导致输出电能质量的显著下降。此外,理论分析表明,传统FSK 信号的两种码元波形通常难以严格满足正交性条件。根据数字调制理论,当二进制信号的码元波形满足正交性条件时,系统可获得更优异的误码率性能。鉴于此,研究者对 2FSK 体制进行了系统性改进,发展出 MSK 调制技术,其是一种满足包络恒定、相位连续、带宽占用最小以及严格正交的 FSK 信号,如图 4 所示为 MSK 信号波形示例。

MSK 信号的第 k 个码元可以表示为:

$$e_{k}(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_{1}t + \varphi_{k}) & \widehat{\mathfrak{m}} \wedge \overline{\mathfrak{m}} \overline{\mathfrak{m}} \rangle \mathbf{m}^{\mathsf{T}} \mathbf{m}^{\mathsf{T}} \\ \cos(2\pi f_{0}t + \varphi_{k}) & \widehat{\mathfrak{m}} \wedge \overline{\mathfrak{m}} \overline{\mathfrak{m}} \mathcal{m}^{\mathsf{T}} \mathbf{m}^{\mathsf{T}} \mathbf{m}^{\mathsf{T}} \end{cases} \left(kT_{B}(k+1)T_{B} \right) \end{cases}$$
(5)

式中:

$$f_1 = f_c + \frac{1}{4T_B}, \quad f_0 = f_c - \frac{1}{4T_B}$$
 (6)

 f_c 为载波频率, T_B 为码元宽度, φ_k 为第 k 个码元的初始相位, 它在一个码元宽度中是不变的。可以证明, $f_1 \sim f_0$ 即为 FSK 信号可满足正交性的最小频率间隔, 可见 MSK 调制可有效提高频谱利用率, 有效降低带宽占用。由于 MSK 调制信号是一个正交的 FSK 信号, 根据信号正交相关条件, 即可求得 $T_B = f_c$ 之间的关系为:

$$T_B = n \frac{1}{4f_c}$$
 $n = 1, 2, 3, \cdots$ (7)

由式(8)可知,在 MSK 调制信号中,每个码元持续时间 T_B 内包含的波形周期数必须是 1/4 载波周期的整数倍。进而可以求出一个码元持续时间 T_B 内包含的正弦波周期数为:

$$T_B = \left(N + \frac{m+1}{4}\right)T_1 = \left(N + \frac{m-1}{4}\right)T_0 \tag{8}$$

式中 $T_1 = 1/f_1$, $T_0 = 1/f_0$ 。由此式可以得出,当选取任意不同的信号频率时,两种码元所包含的正弦波周期数均相差半个周期。举例来说,当 N = 1, m = 3 时,一个码元持续时间内分别有 2 个和 1.5 个正弦波周期,如图 3 所示。

通过设置 MSK 调制中 N 的大小,可获得不同的信息传输速率。对应的信息传输速率越快,不同码 元对应的载波频率相差越大,信息传输速率越慢,不同码元对应的载波频率相差越小。在 WPT 系统中, 补偿网络与线圈所组成的通路可看作是允许频率范围较窄的带通滤波器,对于非谐振频率,频率偏移越 大,输出的衰减就越大。所以需要在信息传输速率与电能传输频率之间寻求平衡。在表 1 所示参数的 WPT 系统中,若将 MSK 信号频率 f_1 选取为系统谐振频率 100 kHz,根据 2.2.小节的分析可知,需将 $f_1 与 f_0$ 的 差值保持在 2.5 kHz 以内。根据计算,可选取 N = 19, m = 3,此时 f_0 = 97.5 Hz,满足需求。进一步计算 可知 T_B = 20/ f_1 ,可得信息传输速率为 5 kbit/s。

对于 MSK 信号,其归一化(平均功率为1W)单边功率谱密度可表示为:

$$P_{MSK}(f) = \frac{32T_B}{\pi^2} \left(\frac{\cos 2\pi z}{1 - 16z^2}\right)^2, z = (f - f_c)T_B$$
(9)

MSK 信号功率谱的第一个零点出现在 $0.75/T_B$ 处, 当 $f-f_c$ 趋向于正无穷时, MSK 信号的功率谱以

 $(f-f_c)^{-4}$ 的速率衰减。相比于其他调制类型,如各种相移键控,根据计算,对于 QPSK、OQPSK、MSK, 包含 90%信号功率的带宽近似值为 $B \approx 1/T_B$ (Hz),对于 MSK,包含 99%信号功率的带宽近似值为 $B \approx 1.2/T_B$ (Hz),对于 QPSK 及 OQPSK 为 $B \approx 6/T_B$ (Hz),由此可见,MSK 信号的带外功率下降非常快[15]。 进一步配合系统伯德图分析可知,MSK 调制带外功率下降快的特性使其更加适合在 WPT 系统中应用。

3.2. 信息调制方案

首先需要根据所需传输的信息来产生 MSK 信号, MSK 信号具有正交性, 因此可以将其用两个正交的分量来表示:

$$e_t(t) = p_k \cos\frac{\pi t}{2T_B} \cos\omega_c t - q_k \sin\frac{\pi t}{2T_B} \sin\omega_c t \quad kT_B \le t \le (k+1)T_B$$
(10)

式(10)中,等号右端的第一项称为同相分量,第二项称为正交分量,他们分别由两个频率的载波相乘来得到,这两个载波的频率分别为1/4*T*_B与*f*_c。据此可得到 MSK 信号调制的框图,如图 5 所示。



Figure 5. Block diagram of MSK signal orthogonal modulation principle 图 5. MSK 信号正交调制原理框图

输入数据序列为 a_k ,其经过差分编码后变成序列 b_k ,差分编码在 $a_k = -1$ 时翻转输出,例如输入序列如式(11):

$$a_k = a_1, a_2, a_3, \dots = +1, +1, -1, +1, -1, -1, \dots$$
 (11)

经过差分编码后可得输出序列为:

$$b_k = b_1, b_2, b_3, \dots = +1, +1, -1, -1, +1, -1, \dots$$
 (12)





序列 *b*_k经过串并转换后,分成 *p*_k支路与 *q*_k支路,*b*_k的码元交替变成两支路的码元,支路码元的长度 是 *b*_k的 2 倍,图 6 为这些码元之间的时间关系。这两路数据序列再经过两次与相应载波的乘法,即可合成 MSK 信号。

在 WPT 系统中,原边逆变器输出的方波信号会在补偿网络与线圈的谐振下变换为正弦波传输至副 边。由于 MSK 信号相位连续的特性,可以通过调整逆变器的导通时机,从而获得近似 MSK 信号的电能 调制波形,驱动信号的获取过程如图 7 所示。



Figure 7. Driving signal acquisition process 图 7. 驱动信号获取过程

3.3. 信息解调方案

解调是通信系统中将已调制的信号恢复为原始基带信号的过程。发送端通过数字调制将基带信号加 载到高频载波上,而解调则是接收端对载波进行的逆过程,用于从高频信号中提取出原始信息。解调的 方法主要分为相干解调与非相干解调两大类。其中相干解调需要精确恢复发送端载波的频率和相位,其 解调的信息误码率低,适用于高阶调制,但是实现过程复杂,需要较高精度的同步性能。而非相干解调 无需载波同步,通过信号包络或频率差异直接进行载波的解调,其实现过程简单,但抗噪声性能较差, 误码率较高。



Figure 8. Block diagram of coherent demodulation principle for MSK signal 图 8. MSK 信号相干解调原理框图

MSK 调制作为一种特殊的 FSK 调制,可以使用各种 FSK 解调方法来实现信息的解调。比如,包络 检波法通过两组带通滤波器分别匹配 FSK 调制中的两个频率,将信号分离,然后通过包络检波器和抽样 判决器输出码元,其对硬件结构要求简单,但对滤波器的设计精度要求较高;鉴频器法是利用鉴频器将 频率变化转换为幅值的变化,通过检测该信号的幅值来判断信号,其抗干扰能力较强,但对鉴频电路的 性能有一定要求;过零检测法通过统计信号波形在单位时间内的过零点数来判断频率差异,适合频率较 低的场合,且对噪声较为敏感。

除了利用 FSK 信号的解调方法,基于 MSK 调制的特性,可以通过信号延迟解调法进行解调。该方 法利用 MSK 信号的相位连续性,将接收信号延迟一个码元宽度后再与原接收信号相乘,提取相位差信息 来恢复原始数据。由于 MSK 的相位变化在相邻符号间连续且线性,延迟后的信号与原信号相乘会生成包 含相位差信息的低频分量,经低通滤波后通过抽样判决即可恢复原始数据。若将低通滤波器转换为积分 器,则可得到 MSK 最佳接收机。该解调方法原理框图如图 8 所示,其中两个相乘载波来自于载波同步 器,位同步信号 *cp*₁*t*)与 *cp*₂(*t*)来自于位同步器,其中 *cp*₂(*t*)比 *cp*₁(*t*)滞后一个码元宽度 *T*_B。

4. 仿真实验及分析

为验证所提出的无线电能与信息传输方案的可行性和有效性,在 Simulink 平台中根据图 1 搭建了仿 真实验,原副边元件均采用相同规格,关键元件参数同表 1,并设置电源频率为 100 kHz,电源电压为 50 V。仿真中元件均采用附带寄生参数的 PS 模型,并在发射线圈前与接收线圈后均添加高斯白噪声增加仿 真可靠性。



Figure 9. Output voltage waveforms of two modulation methods 图 9. 两种调制方式输出电压波形

如图 9 所示为系统在补偿网络之后的电压输出波形,其中图 9(a)为使用开关法进行 FSK 调制来传输 信息时的输出波形,图 9(b)为使用 MSK 调制来传输信息时的输出波形。对比两图可知,通过 MSK 调制 来代替 FSK 调制可有效降低输出电压的波动,提高电能传输的质量。使用 MSK 调制时,输出电压峰值 在约 200 V 与约 170 V 之间跳动,电压波动在 15% 左右,满足 2.2.小节中的需求。

对输出电压进行解调,将其分别与两个恢复的载波相乘后可得如图 10 所示的波形,可见波形的高低 变化十分明显,通过低通滤波之后即可进行抽样判决,再将两路信号进行并串转换之后即可得到所需传 递的信息。根据图 10 所示波形,并串转换前每路信号的码元宽度为 0.4 ms,对应并串转换后的码元宽度



为 0.2 ms, 即所实现的信息传输速率为 5 kbit/s, 与理论分析相符。

Figure 10. Demodulation output waveform before serial-to-parallel conversion 图 10. 并串转换前解调输出波形

5. 结语

本文提出一种采用 MSK 调制代替 FSK 调制来传输信息的无线电能传输与信息同步传输系统,并给 出信息的调制与解调方案。在信息传输方面,通过 MSK 调制将所需传递的"0"、"1"信息调制为相应 的载波,再通过文中的驱动获取方案将载波转换为全桥逆变器的驱动信号,将信息加载到电能载波中实 现信息传输。最后搭建了仿真实验验证所提方案的可行性,实验表明,利用 MSK 调制包络恒定与载波相 位连续变化的特点,可有效降低电能输出波形的波动。并且,基于能量调制式信息传输方案的优点,对 于普通的全桥无线电能传输电路,无需增加额外器件即可使系统具备信息传递功能。

参考文献

- [1] 夏晨阳, 李玉华, 雷轲, 等. 变负载 ICPT 系统电能与信号反向同步传输方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1857-1867.
- [2] Lin, W. and Ziolkowski, R.W. (2021) Wireless Power Transfer (WPT) Enabled IoT Sensors Based on Ultra-Thin Electrically Small Antennas. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, 22-26 March 2021, 1-4. <u>https://doi.org/10.23919/eucap51087.2021.9411495</u>
- [3] Chen, S., Xiao, J., Wu, X., Mo, Y., Gong, W. and Zhang, Y. (2023) Improving Misalignment Tolerance by Variation of Self-Inductance for EV-WPT with Small Air Gap. 2023 *IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, Dali, 11-13 October 2023, 210-214. https://doi.org/10.1109/iccasit58768.2023.10351497
- [4] Kim, H., Ahn, J., Rhee, J. and Ahn, S. (2022) Application of Wireless Power Transfer Technology to Implantable Medical Devices. 2022 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC), Suzhou, 16-18 May 2022, 299-301. <u>https://doi.org/10.1109/imbioc52515.2022.9790118</u>
- [5] 吴旭升, 孙盼, 杨深软, 等. 水下无线电能传输技术及应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1559-1568.
- [6] 孙敏, 戴欣, 李艳玲, 等. 双向无线电能传输技术的研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8580-8597.
- [7] Shuguang, L. and Zhenxing, Y. (2019) Progress and Prospect of Electric Vehicle's V2G Technology. 2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Shanghai, 20-22 December 2019, 412-416. <u>https://doi.org/10.1109/icisce48695.2019.00089</u>
- [8] 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): 3487-3501.

- [9] Fazzini, E., Costanzo, A. and Masotti, D. (2021) Ranging On-Demand Microwave Power Transfer in Real-Time. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **31**, 791-793. <u>https://doi.org/10.1109/lmwc.2021.3063816</u>
- [10] Li, X., Hu, J., Li, Y., Wang, H., Liu, M. and Deng, P. (2019) A Decoupled Power and Data-Parallel Transmission Method with Four-Quadrant Misalignment Tolerance for Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 11531-11535. <u>https://doi.org/10.1109/tpel.2019.2920441</u>
- [11] 周岩, 刘志丹, 李烁涵. 虚拟多输入多输出无线电能与信息同步传输技术[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4282-4293.
- [12] 华超,周岩,胡震,等.基于移相调制的无线供电与信息协同传输技术[J].电工技术学报,2023,38(16):4233-4245.
- [13] 陈毅. 基于磁耦合谐振的无线能量与信息同步传输系统设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [14] 季鸿宇. LCC-S 型 MC-WPT 系统的电能与信号同步传输技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- [15] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 240.