

一种共享通道式全双工无线电能与信号同步传输系统

曾永康¹, 孙 敏¹, 蔡 礼², 何慧雯³, 曾 晗¹

(1. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要:针对无线电能传输系统信息交互的需求,文中提出了一种基于双侧LCC补偿网络的共享通道式全双工无线电能与信号同步传输系统,不仅实现了原边电流与负载电流恒定的功率传输,且有效降低了高次谐波对信号的干扰;基于数据载波串联注入方式设计了一套信号回路,并在其中加入阻波网络来抑制同侧信号发射源的干扰,以实现信号的全双工通信;此外,分析了信号传输增益与其优化方法,提出了一种参数设计方法,有效提高信道增益并抑制干扰;最后,搭建了系统仿真模型进行验证,成功实现了前向传输速率和后向传输速率均达100 kb/s的全双工通信。

关键词:无线电能传输;无线电能与信息同步传输;共享传输通道;载波调制;全双工通信

中图分类号:TP 206 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2026)03-0082-06

0 引言

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术是指电能从电源传输到负载没有经过电气设备直接接触的一种能量传输方式^[1],因其安全、灵活及可靠等优点,已经广泛应用于生物医疗^[2]、电动汽车^[3]及深海传感器^[4]等领域。原副边之间可靠的信息实时交互对WPT系统闭环控制、软开关运行、最大效率点跟踪等功能的实现具有重要意义^[5]。信息的交互可通过蓝牙、Zigbee及Wi-Fi等传统技术实现,但此类方法存在电磁兼容性差、匹配复杂等问题。与之相比,无线电能与信号同步传输(simultaneous wireless power and data transfer, SWPDT)技术具有时延小、配对简单等优点,受到了广泛的研究。当今SWPDT技术应用中往往需要双向数据同时交互,数据的单向传输难以满足系统的通信需求,因此,具备全双工通信能力的数据传输系统成为了SWPDT技术的研究热点。

当前SWPDT技术大致可分为两类:第一类是分离通道式,通过新增一对额外的耦合线圈单独完成信

息的传输,能有效减小功率传输与数据传输之间的串扰,通信速率高易于实现全双工通信,但增加了WPT系统的成本和增大了其体积;第二类是共享通道式,通过一对共享耦合线圈传输电力和数据,共享通道式SWPDT技术的实现主要有两种方法,分别为功率载波法和数据载波法。前者是指通过调制功率载波来传输数据,后者是指通过调制频率远大于功率载波频率的高频数据载波来传输数据。数据载波式SWPDT系统相较于功率载波式SWPDT系统,不仅通信速率快,且对功率传输影响较小,受到了更广泛的研究;文献[6]采用并联式注入与提取的方法,实现了全双工通信,有效提升了信号传输增益,但能量与信号之间干扰严重;文献[7]采用正交相移键控调制双载波,实现了全双工通信;文献[8]中使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解调方式提高了其成本。

文中提出一种基于双侧LCC补偿网络的共享通道式SWPDT系统,采用串联注入/提取的方式来实现全双工通信,具备良好的谐波抑制能力,可有效降低高次谐波的干扰;此外,还提出一种参数设计方法,有效提高了信道增益;最后,搭建仿真模型,验证所提出

收稿日期:2026-03-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52277148);江西省自然科学基金项目(20252BAC200328);江西省职业早期青年科技人才培养专项项目(20244BCE52157)。

作者简介:曾永康(2001),男,硕士研究生,从事电能变换与控制研究。

系统的可靠性和有效性。

1 系统结构

拟提议的SWPDT系统主要由直流电源 E_{dc} 、全桥逆变电路、双侧LCC补偿网络、耦合线圈 L_p 与 L_s （其值为 L_p 与 L_s ）、整流电路、负载 R_L 、信号发送电路和信号接收电路等组成，其拓扑结构如图1所示。

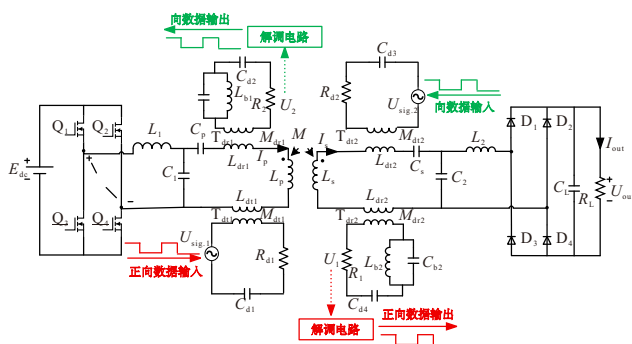


图1 基于双LCC补偿网络的SWPDT系统

图1中 $Q_1 \sim Q_4$ 为全桥逆变电路的MOS管； $D_1 \sim D_4$ 为全桥整流电路的二极管； M 为耦合线圈的互感； L_1 、 C_1 、 C_p 构成原边LCC补偿网络（其值为 L_1 、 C_1 、 C_p ）， L_2 、 C_2 、 C_s 构成副边LCC补偿网络（其值为 L_2 、 C_2 、 C_s ）； $U_{sig,1}$ 、 $U_{sig,2}$ 为信号发射源电压（其值为 $U_{sig,1}$ 、 $U_{sig,2}$ ）； R_{d1} 、 R_{d2} 为信号回路补偿电阻； R_1 和 R_2 为信号接收电阻； $C_{d1} \sim C_{d4}$ 为信号回路的补偿电容； T_{dt1} 、 T_{dt2} 为信号注入变压器， L_{dt1} 、 L_{dt2} 、 M_{dt1} 和 M_{dt2} 分别为对应变压器的自感和互感； T_{dr1} 、 T_{dr2} 为信号提取变压器， L_{dr1} 、 L_{dr2} 、 M_{dr1} 和 M_{dr2} 分别为对应变压器的自感和互感； L_{b1} 和 C_{b1} 、 L_{b2} 和 C_{b2} 分别为信号接收电路上的两个阻波网络的电感和电容，阻波网络用于阻隔正向和反向信号传输之间的影响。

对于所提出的系统，应满足以下方程：

$$\begin{cases} \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{C_p (L_p + L_{dt1} + L_{dr1} - L_1)}} \\ \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{C_s (L_s + L_{dt2} + L_{dr2} - L_2)}} \\ \omega_{d1} = \frac{1}{\sqrt{L_{b1} C_{b1}}} \\ \omega_{d2} = \frac{1}{\sqrt{L_{b2} C_{b2}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中： ω_p 为电能传输角频率； ω_{d1} 和 ω_{d2} 为信号载波角频率。为了尽量减小功率和数据传输之间的干扰，提

高数据传输速率， ω_{d1} 和 ω_{d2} 远大于 ω_p 。

2 系统分析

2.1 电能传输特性分析

在电能单独进行传输时，信号发射源均视为短路。为简化分析，采用基波等效法，电能传输通道的等效电路如图2所示。

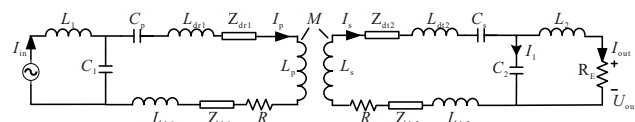


图2 电能传输等效电路

图2中， U_p 为全桥逆变电路等效输出电压； R_E 为交流等效电阻； R_p 、 R_s 分别为耦合线圈 L_p 、 L_s 的等效内阻； Z_{dt1} 、 Z_{dt2} 和 Z_{dr1} 、 Z_{dr2} 分别为信号发送和接收回路折算至电能传输通道的反射阻抗，其值分别为：

$$\begin{cases} Z_{dt1} = \frac{\omega^2 M_{dt1}^2}{R_{d1} + \frac{1}{j\omega C_{d1}} + j\omega L_{dt1}} \\ Z_{dr1} = \frac{\omega^2 M_{dr1}^2}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_{b1}} // j\omega L_{b1} + j\omega L_{dr1} + \frac{1}{j\omega C_{d2}}} \\ Z_{dt2} = \frac{\omega^2 M_{dt2}^2}{R_{d2} + \frac{1}{j\omega C_{d3}} + j\omega L_{dt2}} \\ Z_{dr2} = \frac{\omega^2 M_{dr2}^2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_{b2}} // j\omega L_{b2} + j\omega L_{dr2} + \frac{1}{j\omega C_{d4}}} \end{cases} \quad (2)$$

在电能传输角频率 ω_p 下四个信号回路的输入阻抗均呈高阻抗状态，其反射阻抗 Z_{dt1} 、 Z_{dt2} 和 Z_{dr1} 、 Z_{dr2} 均趋近于零，可看做短路。结合式(1)对原边电路联立方程可求得原边线圈电流为：

$$I_p = \frac{U_p}{j\omega_p L_1} \quad (3)$$

双侧LCC结构系统原边电流具有恒流特性，原边电流 I_p 只与输入电压 U_p 、电感 L_1 有关。

同理，对副边电路联立方程，可求得：

$$\begin{cases} I_{out} = \frac{U_p M}{j\omega_p L_1 L_2} \\ P_{out} = \left(\frac{U_p M}{\omega_p L_1 L_2} \right)^2 R_E \\ \eta = \left| \frac{\omega_p^2 L_2 B}{AB + P_p L_1^2 A} \right| \end{cases} \quad (4)$$

其中 A 和 B 分别为:

$$\begin{cases} A = R_E R_s + \omega_p^2 L_2^2 \\ B = R_E \omega_p^2 M^2 L_1^2 \end{cases} \quad (5)$$

双侧 LCC 结构负载电流 I_{out} 只与互感 M 和 L_2 有关,与负载自身阻值无关。

2.2 信号传输特性分析

2.2.1 信号通道阻抗分析

阻波网络 L_{b2} 、 C_{b2} (其值为 L_{b2} 、 C_{b2}) 中心频率为 ω_{d2} , 令 $\lambda = \omega_{d1}/\omega_{d2}$, 则其在 ω_{d1} 下的阻抗为:

$$Z_{b2} \omega_{d1} = \frac{j\omega L_{b2}}{1 - \frac{\omega_{d1}^2}{\omega_{d2}^2}} = \frac{1}{1 - \lambda^2} j\omega L_{b2} \quad (6)$$

正向信号传输通道参数谐振关系为:

$$\omega_{d1} = \frac{1}{\sqrt{C_{d1} L_{dt1}}} = \frac{1}{\sqrt{C_{d4} (L_{dr2} + \frac{1}{1 - \lambda^2} L_{b2})}} \quad (7)$$

反向信号传输分析与正向信号传输一致。同理, 可得反向信号传输通道参数谐振关系为:

$$\omega_{d2} = \frac{1}{\sqrt{C_{d3} L_{dt2}}} = \frac{1}{\sqrt{C_{d2} (L_{dr1} + \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} L_{b1})}} \quad (8)$$

2.2.2 信号传输的电压增益

正向信号传输时调制信号从信号发射源 $U_{sig,1}$ 注入, 最终在正向接收电阻 R_1 上提取, 正向信号传输的等效电路如图 3 所示。

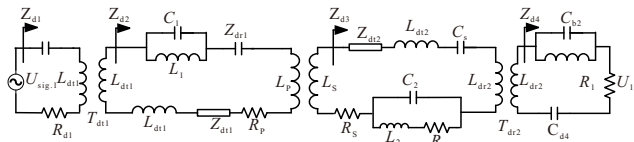


图3 正向信号传输等效电路

图 3 中各个部分阻抗及其表达式为:

$$\begin{cases} Z_{d4} = R_1 + \frac{j\omega L_{b2}}{1 - \omega^2 C_{b2} L_{b2}} + j\omega L_{dr2} + \frac{1}{j\omega C_{d4}} \\ Z_{d3} = R_s + j\omega (L_s + L_{dt2} + L_{dr2}) + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{j\omega L_2 + R_E}{1 - \omega^2 L_2 C_2 + j\omega C_2 R_E} + \frac{\omega^2 M_{dr2}^2}{Z_{dt4}} \\ Z_{d2} = R_p + j\omega (L_p + L_{dt1} + L_{dr1}) + \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{\omega^2 M^2}{Z_{d3}} \\ Z_{d1} = R_{d1} + \frac{\omega^2 M^2}{Z_{d2}} \end{cases} \quad (9)$$

正向数据传输的电压增益 G_d 为:

$$\begin{cases} G_{d1} = \frac{1}{Z_{d1}} \\ G_{d2} = j\omega M_{dt1} \\ G_{d3} = \frac{1}{Z_{d2}} \\ G_{d4} = j\omega M \\ G_{d5} = \frac{1}{Z_{d3}} \\ G_{d6} = j\omega M_{dr2} \\ G_{d7} = \frac{R_1}{Z_{d4}} \end{cases} \quad (10)$$

$$G_d = \frac{U_1}{U_{sig,1}} = \prod_{i=1}^7 G_{di} \quad (11)$$

信号传输的电压增益 G_d 取决于整个系统的参数, 其中松耦合线圈、信号耦合变压器及信号回路的电阻是最重要的参数。为简化分析, 假设 $L_{dt1} = L_{dt2}$, $L_{dr1} = L_{dr2}$ 。正向传输电压传输 G_d 与 L_{dt1} 和 L_{dr2} 之间的关系如图 4 所示。

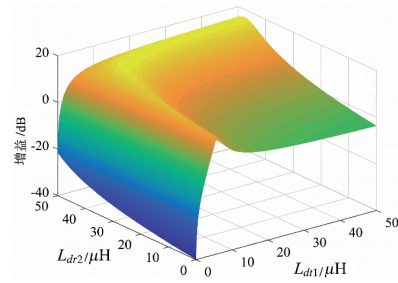


图4 G_d 与 L_{dt1} 和 L_{dr2} 之间关系

可以看出, 信号增益 G_d 随 L_{dt1} 的增大呈现先增大后减小的趋势, 最大值点大约出现在 $L_{dt1} = 6 \mu\text{H}$ 处; 随着 L_{dr2} 的增大, G_d 缓慢增大; 若要提高信号增益 G_d , 需要选择合适的 L_{dt1} 。

G_d 与信号接收电阻 R_1 之间的关系如图 5 所示。 G_d 随 R_1 的增大而增大, 当 R_1 约为 400Ω 时达到最高值, 此后 G_d 基本不变。若要提高 G_d , 应选择尽量大的接收电阻 R_1 , 但随着 R_1 的增大, 功率干扰电压增益也会逐渐增大, 所以 R_1 的选择也不宜过大。

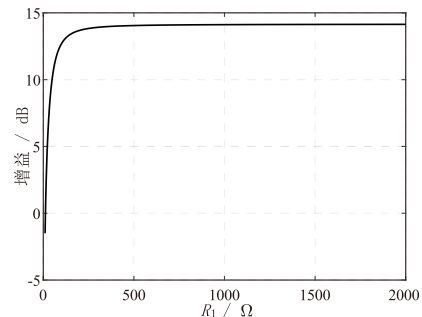


图5 G_d 与 R_1 之间关系

G_d 与补偿电阻 R_{d1} 之间的关系如图6所示, G_d 随着 R_{d1} 的增大而减小,故为了提高 G_d 应尽量选择较小的补偿电阻 R_{d1} 。

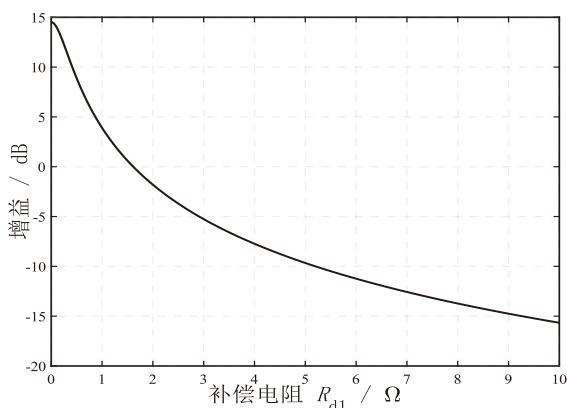


图6 G_d 与 R_{d1} 之间关系

3 串扰分析及参数设计

全双工SWPDT系统中主要存在三种串扰,分别是功率传输对信号传输的干扰、信号传输对功率传输的干扰及正反向信号传输之间的串扰。其中,信号传输功率较小,其对功率传输的影响可忽略不计。故文中只分析功率传输对信号传输的干扰、正反向信号传输之间的干扰。

3.1 功率传输对信号的干扰

以正向信号受到的干扰为例,电能输出对信号正向传输的干扰等效电路如图7所示。

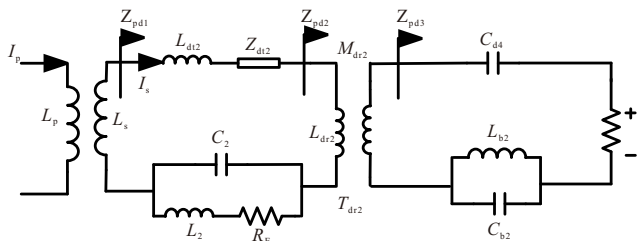


图7 电能传输对信号正向传输的干扰电路图

图7中各个部分的阻抗表达式为:

$$\begin{cases} Z_{pd3} = R_1 + \frac{1}{j\omega C_{d4}} + j\omega L_{dr2} \frac{j\omega L_{b2}}{1 - \omega C_{b2} L_{b2}} \\ Z_{pd2} = \frac{\omega^2 M_{dr2}^2}{Z_{pd3}} \\ Z_{pd1} = j\omega (L_{dr2} + L_s + L_{d1}) + \frac{L_2}{C_2 R_E} - j\omega L_2 \end{cases} \quad (12)$$

功率干扰电压增益 G_{pd} 为

$$\begin{cases} G_{pd1} = \frac{I_p}{U_p} = \frac{1}{j\omega L_1} \\ G_{pd2} = \frac{U_{LS}}{I_p} = j\omega M \frac{U_{L_s}}{I_p} = j\omega M_{RX1} \\ G_{pd3} = \frac{I_s}{U_{LS}} = \frac{1}{Z_{pd1}} \frac{I_{RX1}}{I_{LS}} = \frac{Z_s}{Z_{pf1} + Z_s} \\ G_{pd4} = \frac{U_{Ldr2}}{I_s} = j\omega M_{dr2} \\ G_{pd5} = \frac{U_{pd}}{U_{Ldr2}} = \frac{R_1}{Z_{pd3}} \end{cases} \quad (13)$$

$$G_{pd} = \frac{U_{pd}}{U_p} = \prod_{i=1}^5 G_{pdi} \quad (14)$$

3.2 正反向信号传输之间的干扰

正向信号对反向信号的干扰等效电路如图8所示。

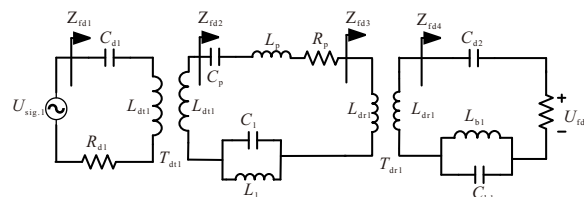


图8 正向信号对反向信号的干扰等效电路

正向信号对反向信号的干扰电压增益 G_{fd} 为:

$$\begin{cases} Z_{fd4} = R_2 + \frac{1}{j\omega C_{d2}} + j\omega L_{dr1} + \frac{j\omega L_{b1}}{1 - \omega C_{b1} L_{b1}} \\ Z_{fd3} = \frac{\omega^2 M_{dr1}^2}{Z_{fd4}} \\ Z_{fd2} = R_p + j\omega (L_{dr1} + L_p + L_{d1}) + \frac{j\omega L_1}{1 - \omega C_1 L_1} \\ Z_{fd1} = \frac{\omega^2 M_{dt1}^2}{Z_{fd2}} + R_{d1} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} G_{fd1} = \frac{1}{Z_{fd1}} \\ G_{fd2} = j\omega M_{dt1} \\ G_{fd3} = \frac{1}{Z_{fd2}} \\ G_{fd4} = j\omega M_{dr1} \\ G_{fd5} = \frac{R_1}{Z_{fd4}} \end{cases} \quad (16)$$

$$G_{fd} = \frac{U_{fd1}}{U_{sig,1}} = \prod_{i=1}^5 G_{fdi} \quad (17)$$

3.2 参数设计

为保证信号的稳定传输,系统参数应满足下式:

LCC 谐振网络实现了原边电流和负载电流恒定的功率传输,有效降低了高次谐波对信号传输的干扰,并在此基础上设计了全双工信号传输通道。电能与信号共用一对耦合线圈进行传输,在信号接收回路加入阻波网络以隔绝其它信号源的影响;文中分析了信号传输电压增益以及系统的干扰,提出了一种参数设计方法以提高信道增益;最后,搭建了双向传输速率均为 100 kb/s 的仿真模型,验证了所提方法的可行性。

参考文献:

- [1] FAN Y, SUN Y, DAI X, et al. Simultaneous wireless power transfer and full-duplex communication with a single coupling interface[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(06): 6313-6322.
- [2] Ge Xuejian, Sun Yue, Tang Chunsen, et al. Dual-output inverter for dynamic wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(04): 786-798.
- [3] X. Liu, C. Xia, X. Han, et al. Simultaneous wireless power and information transmission based on harmonic characteristic of soft-switching inverter[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 69, no. 6, pp. 6090-6100, Jun. 2022.
- [4] Z. Wu, L. Tan, X. Hu, et al. A three-channel M ary simultaneous wireless power and data transfer system[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 72, no. 5, pp. 5440-5451, May 2025.
- [5] 王佩月. WPT 系统双向信号并行传输技术与拓扑研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [6] P. Wang, Y. Sun, Y. Feng, et al. An improvement of SNR for simultaneous wireless power and data transfer system with full-duplex communication mode[J]. IEEE Trans. Power Electron. vol. 37, no. 2, pp. 2413-2424, Feb. 2022.
- [7] Y. Jing, K. Fu, J. Yu, et al. Simultaneous wireless power and data transfer system with full-duplex mode based on half-cycle OFDM[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 72, no. 2, pp. 1412-1421, Feb. 2025.
- [8] Y. Yao, H. Cheng, Y. Wang, et al. An FDM-based simultaneous wireless power and data transfer system functioning with high-rate full-duplex communication[J]. IEEE Trans. Inform., vol. 16, no. 10, pp. 6370-6381, Oct. 2020.
- (上接第 53 页)
- [11] 蒋惠中, 魏本刚, 文杰, 等. 分体式油浸自冷变压器三维温度场和流场仿真与分析[J]. 高压电器, 2021, 57(02): 63-69.
- [12] 蔡萌萌, 孙浩. 基于多绕组模型的变压器局部放电检测定位方法[J]. 电工技术, 2025(22): 270-272.
- [13] 回恩良, 蔡志远. 基于声电联合的局部放电定位方法研究[J]. 电工技术, 2024(23): 47-50, 54.
- [14] Mondal M, Kumbhar G B. Partial discharge localization in a power transformer: Methods, trends, and future research[J]. IETE Technical Review, 2017, 34(05): 504-513.
- [15] 韩毅, 徐梓斌, 张亮, 等. 国外新型智能优化算法—海鸥优化算法[J]. 现代营销(经营版), 2019(28): 70-71.
- [16] 王培崇, 张天颖, 李丽荣. 一种改进的海鸥优化算法及其应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(06): 991-998.
- [17] Ren S, Hao D, Zhao X, et al. An ultrasonic signal propagation model of transformer partial discharge considering nonlinear attenuation in the temperature gradient field[J]. Electrical engineering, 2024, 106(01): 53-62.
- [18] 徐艳春, 王泉, 李振兴, 等. SA-APSO 算法及其在变压器油中局部放电超声定位中的应用[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 143-149.