

# 基于变参数的混合拓扑无线充电系统

李新<sup>1</sup>, 李云笛<sup>2</sup>, 姜捷<sup>1</sup>, 付学光<sup>1</sup>

(1. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116022;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 在利用无线电能传输(WPT)技术为电池充电过程中,为了保证电池寿命和安全,会采用恒流(CC)-恒压(CV)充电模式。为此,提出了一种串联-串联(SS)和LLC的混合拓扑。在SS拓扑基础上,原边额外串联一个由开关并联的电容,并在副边串联的电容上并联开关。当开关断开时,系统利用SS拓扑保证输出为恒流。当满足切换条件时,通过闭合开关,将系统切换至LLC拓扑,使系统为恒压输出。针对两种系统拓扑的WPT系统,通过KVL方程进行数学建模和理论分析,确立了满足CC/CV模式下的系统参数和切换条件。最后,搭建了与理论分析一致的实验样机,验证了系统能实现CC和CV两种模式,满足系统充电要求。在CC模式下系统效率最高可达95%。

**关键词:** 无线电能传输;混合拓扑;恒流/恒压

**中图分类号:** TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23846

## Hybrid Topology Wireless Charging System Based on Variable Parameters

LI Xin<sup>1</sup>, LI Yundi<sup>2</sup>, JIANG Jie<sup>1</sup>, FU Xueguang<sup>1</sup>

(1. CRRC Dalian Co., Ltd., Dalian 116022, Liaoning, China; 2. School of Electrical Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

**Abstract:** In the process of using wireless power transfer (WPT) technology to charge batteries, constant current (CC)-constant voltage (CV) charging mode is adopted to ensure battery life and safety. Therefore, a hybrid topology of series-series (SS) and inductor-inductor-capacitor (LLC) topology was proposed. Based on the SS topology, an additional capacitor is connected in parallel with a switch is connected in series on the primary side. On the secondary side, a switch is connected in parallel with the capacitor. When the switch is off, the system operates as the SS topology with a constant current. When the switching condition is satisfied, the system is switched to LLC topology by closing the switches, so that the system has constant voltage output. Two kinds of WPT system topologies were modeled and analyzed by KVL equations, and the system parameters and switching conditions satisfying CC/CV mode were established. The experimental prototype was built according to the theoretical analysis. The experimental results show that the system can work in CC and CV modes, and meet the charging requirements of the system. In CC mode, the maximum system efficiency can reach up to 95%.

**Key words:** wireless power transfer (WPT); hybrid topology; constant current (CC)/constant voltage (CV)

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)因不需要物理接触便能为各种用电设备充电,因而大大方便了充电过程。

在生物医学方面,无线充电技术还可以为人体内部医疗器械充电。同时在电池发展陷入瓶颈的现状下,无线充电技术作为一种便利、安全可靠的供电手段,为减少蓄电池数量,减轻电动汽车蓄电池载重提供了一种可行的思路。利用

WPT可以不增大电池容积的情况下,提升电动汽车的行驶里程,因而无线电能传输技术具有广阔的前景<sup>[1-2]</sup>。

在为蓄电池充电的过程中,充电过程主要分为恒流(constant current, CC)和恒压(constant voltage, CV)两种模式,其原因是充电过程中蓄电池的等效电阻呈非线性变化,为了保证电池寿命和安全的同时尽可能提高充电速度,因而采用恒

流-恒压充电模式<sup>[3-4]</sup>。

无线电能传输系统中基本的补偿网络有SS, SP, PP, PS系统。其中SS拓扑应用最为广泛,然而一种拓扑在谐振状态只能使系统拥有一种输出特性。因此,为了实现CC/CV模式的切换,在基本拓扑上需要进行一定的改进。对此,已有一些相关研究:文献[5]提出在原边利用TS/FS的变结构补偿网络实现恒压/恒流的切换,但系统引入元器件较多,结构复杂;文献[6]提出的基于LCC复合谐振补偿网络,引入了3个双向开关实现模式的切换,同时系统拓扑本身就存在多个电感和电容,结构同样复杂;文献[7]提出的方案在LCL-LCL的基础上,副边引入了3个可变电容,通过控制电容的容值来进行CV/CC模式的切换,但其引入的可变电容增加了系统的复杂程度;也可以通过逆变器和可变电感协同控制,来实现输出电压的恒定,但其系统控制较为复杂<sup>[8]</sup>。

基于此,本文提出的系统拓扑基于最基本的SS拓扑,仅需要利用开关管短路2个电容切换至LCC拓扑,即可实现CC/CV模式的切换。所提拓扑不需要增加额外的电感,系统结构简单,控制简便,并且CC模式下的系统为完全谐振状态,传输效率高。

本文针对SS和LLC混合拓扑,利用等效电路模型分析其恒流-恒压模式下需满足的电容条件。最后根据理论分析搭建了实物样机,并完成了相关实验,分析其电压电流波形及系统传输效率,证明了提出方法的可行性。

### 1 系统原理分析

基于SS/LLC切换的无线电能传输系统结构拓扑如图1所示,原边采用单相全桥逆变电路,副边为无源整流电路,补偿网络采用LLC拓扑和SS拓扑相互切换的结构。图中, $L_p$ 为原边线圈电感, $L_s$ 为副边线圈电感, $C_{p1}$ 和 $C_{p2}$ 为原边的两个电容, $C_s$ 为副边补偿电容;双MOSFET反串联的开关管 $Q_1, Q_2$ 分别并联于 $C_{p1}$ 和 $C_s$ 两端,通过控制开关管的通断以切换拓扑结构。 $Q_1, Q_2$ 采用双MOSFET反串联的目的是为了保证在开关管断开时,正向或反向的电流都不会通过MOSFET管的寄生二极管; $U_p$ 为直流侧输入电压, $u_1$ 为逆变器交流侧输出电压, $u_2$ 为整流器交流侧输入电压, $U_s$ 为输出直流侧电压, $i_1$ 为原边交流侧电流, $i_2$ 为副边交流侧电流。

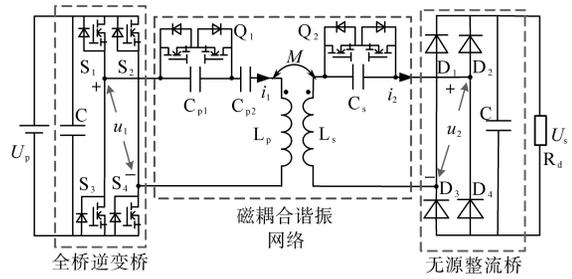


图1 基于SS/LLC切换的无线电能传输系统结构

Fig.1 Diagram of the WPT system based on switching of SS/LLC

接下来将详细分析两种工作模式——恒流输出模式和恒压输出模式。

#### 1.1 恒流模式

恒流模式拓扑如图2所示。图中, $R_s$ 为交流侧等效电阻, $M$ 为原、副边线圈互感。

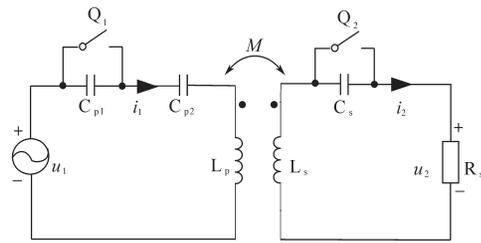


图2 恒流模式拓扑

Fig.2 Constant current mode topology

恒流模式时,系统为SS拓扑的补偿网络,此时开关管 $Q_1$ 和 $Q_2$ 都处于断开状态。为使得系统工作在谐振频率,系统工作角频率 $\omega$ 需满足:

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

其中

$$C_p = \frac{C_{p1} C_{p2}}{C_{p1} + C_{p2}}$$

对原、副边分别列写KVL方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - (\frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{U}_2 - j\omega L_s \dot{I}_2 - \frac{1}{j\omega C_s} \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)化简,得出系统原、副边电流:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega M} \\ \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{j\omega M} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,系统的输出电流 $i_2$ 仅和输入电压和互感 $M$ 有关,与负载无关。因此系统为恒流输出模式。

## 1.2 恒压模式

恒压模式时,系统为 LLC 拓扑的补偿网络,此时开关管  $Q_1$  和  $Q_2$  都处于导通状态,将系统拓扑简化为图 3 所示。

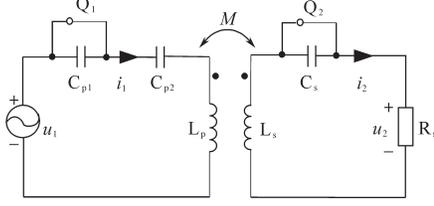


图3 恒压模式拓扑

Fig.3 Constant voltage mode topology

同样,对原、副边列写 KVL 方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - \left( \frac{1}{j\omega C_{p2}} + j\omega L_p \right) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{U}_2 - j\omega L_s \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

为了让系统工作在恒压输出模式,应使得  $u_2$  与  $i_2$  无关。计算得到  $C_{p2}$  如下:

$$C_{p2} = \frac{L_s}{\omega^2 M^2 - \omega^2 L_p L_s} \quad (5)$$

此时系统的输出电压为

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1 C_{p2} \omega^2 M}{\omega^2 C_{p2} L_p - 1} \quad (6)$$

因此,电压仅和系统本身补偿网络数值有关,和负载无关,为恒压输出。

系统输入阻抗如下式:

$$Z_{in} = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_{p2}} + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_s + R_s} \quad (7)$$

在恒压模式下,系统并未处于完全谐振状态,为感性输入阻抗。

综上所述,只需设计好系统电容的容值,便可以实现恒流模式和恒压模式的切换。

## 1.3 切换控制策略

在电池充电恒流过程中,随着电量不断增加,电池内阻也不断增加,因此为了保持输出电流的恒定,则输出电压  $U_s$  也会随着提升。当恒流模式下的  $U_s$  与恒压模式下的  $U_s$  相等时,切换控制模式。

根据前文分析,恒流和恒压模式下的直流侧电压为

$$\begin{cases} U_{s,SS} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_1 R_s = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{U_1 R_s}{\omega M} \\ U_{s,LLC} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_1 \cdot \frac{C_{p2} \omega^2 M}{\omega^2 C_{p2} L_p - 1} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_{s,SS}$  为恒流模式直流侧的输出电压;  $U_{s,LLC}$  为

恒压模式下直流侧的输出电压。

则切换前后的直流侧输出电压增益可以表示为下式:

$$G_{SS,LLC} = \frac{U_{s,SS}}{U_{s,LLC}} = \frac{R_s}{C_{p1} \omega^3 M^2} \quad (9)$$

随着  $R_s$  不断增大,当增益为 1 时,即当  $R_s = C_{p1} \omega^3 M^2$  时,则闭合开关  $Q_1$  和  $Q_2$ ,将系统模式切换至恒压模式,模式切换流程框图如图 4 所示。

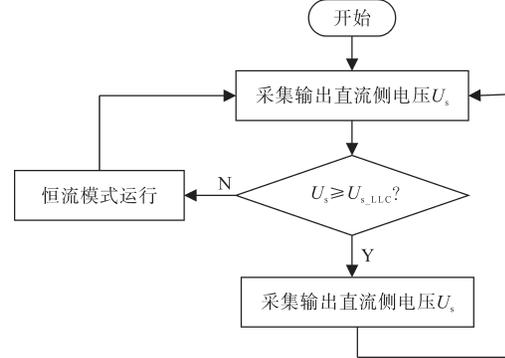


图4 系统控制策略流程图

Fig.4 System control strategy flowchart

## 2 实验

为了验证所提出理论的正确性,本文搭建了与仿真一致的实物模型,如图 5 所示。系统参数为:直流侧输入电压  $U_p = 100$  V,恒压模式下直流侧输出电压  $U_{s,LLC} = 250$  V,恒流模式下直流侧输出电流  $I_{s,SS} = 2.5$  A,原副边线圈电感  $L_p = L_s = 150$   $\mu$ H,原边电容  $C_{p1} = 146$  nF,  $C_{p2} = 27.8$  nF,等效电容  $C_p = 23.4$  nF,副边电容  $C_s = 23.4$  nF,互感  $M = 60$   $\mu$ H,系统工作频率  $f = 85$  kHz。线圈参数为:原边线圈尺寸  $300 \times 250$  mm<sup>2</sup>,副边线圈尺寸  $300 \times 250$  mm<sup>2</sup>,气隙 85 mm。

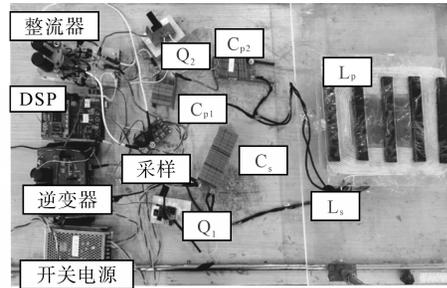


图5 实验系统

Fig.5 Experiment system

将系统参数代入式(9),计算出切换条件下的交流侧阻抗,计算得到  $R_s = 80.07$   $\Omega$ 。根据整流桥相关原理得到直流侧阻抗与交流侧阻抗关系为

$$R_s = \frac{U_2}{I_2} = \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)^2 R_d \quad (10)$$

计算得到此时直流侧负载 $R_d=99\ \Omega$ 。

因此,设定本次实验在负载为 $100\ \Omega$ 时进行模式的切换。

### 2.1 实验波形图

首先进行恒流模式下的实验,输入电压 $U_m$ 为 $100\ \text{V}$ ,断开开关 $Q_1$ 和 $Q_2$ ,使得系统拓扑为SS拓扑。给逆变器 $S_1\sim S_4$ 正、负 $180^\circ$ 半周对称的信号,改变系统直流侧负载,从 $30\ \Omega$ 到 $100\ \Omega$ 逐渐变化。在变化过程中记录系统 $u_1, i_1, u_2$ 和 $i_2$ 波形,同时记录系统的输入、输出功率,并计算效率。在此期间输出电流稳定在 $2.42\sim 2.5\ \text{A}$ ,最大输出电压为 $250\ \text{V}$ 左右,最大输出功率约为 $600\ \text{W}$ 。

当系统负载为 $55\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 时,记录此时的波形,如图6所示。可以看出系统输出电压为 $137\ \text{V}$ 和 $243\ \text{V}$ ,输出电流 $2.48\ \text{A}$ 和 $2.42\ \text{A}$ ,基本保持恒流输出。

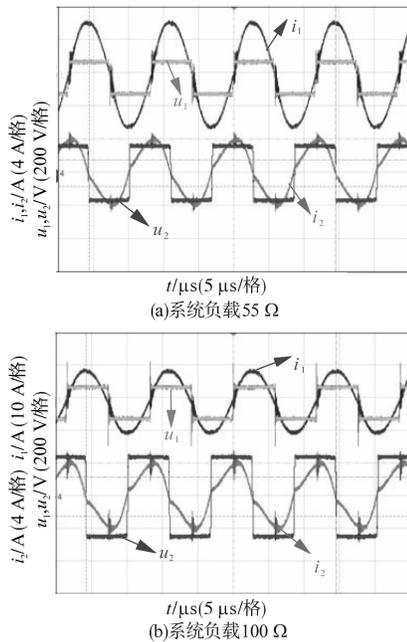


图6 恒流模式下 $u_1, i_1, u_2$ 和 $i_2$ 波形

Fig.6 Waveforms of  $u_1, i_1, u_2, i_2$  under CC mode

当系统阻抗在 $100\ \Omega$ 到 $300\ \Omega$ 之间时,将开关 $Q_1, Q_2$ 闭合,切换至LLC拓扑恒压输出模式。同样保持输入电压 $U_m$ 为 $100\ \text{V}$ ,记录系统 $u_1, i_1, u_2$ 和 $i_2$ 波形。其他操作步骤与恒流模式下保持相同。在此期间输出电压稳定在 $247\sim 253\ \text{V}$ ,最大输出电流为 $2.46\ \text{A}$ ,最大输出功率约为 $600\ \text{W}$ 。

当系统负载为 $100\ \Omega$ 和 $200\ \Omega$ 时,记录此时的波形,如图7所示。可以看到系统输入阻抗为感性,存在一定的无功功率,与前文理论分析保持一致。系统输出电压为 $247\ \text{V}$ 和 $251\ \text{V}$ ,基本保

持恒压输出;输出电流 $2.46\ \text{A}$ 和 $1.26\ \text{A}$ ,输出电流随着阻抗增大而减小。

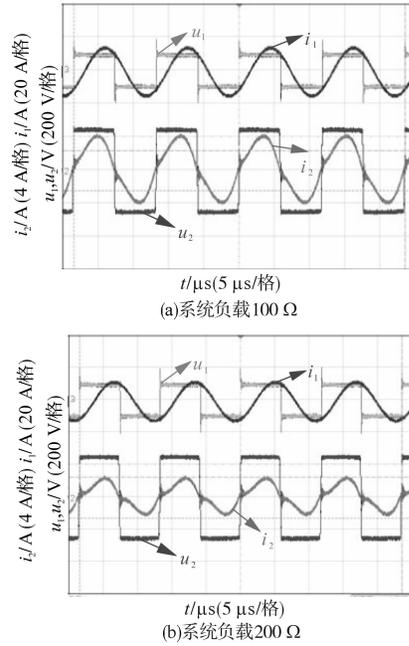


图7 恒压模式下 $u_1, i_1, u_2$ 和 $i_2$ 波形

Fig.7 Waveforms of  $u_1, i_1, u_2, i_2$  under CV mode

### 2.2 实验结果分析

将阻抗从 $30\ \Omega$ 至 $300\ \Omega$ 的变化过程中的电压 $u_2$ 和电流 $i_2$ 绘制成曲线,如图8所示。从图中可以清晰看到, $R_d$ 不超过 $100\ \Omega$ 时,即恒流模式下,系统输出电流基本保持恒定,电压不断上升。当 $R_d$ 为 $100\ \Omega$ 时,切换至恒压模式后,系统输出电压基本保持稳定,输出电流不断减小。

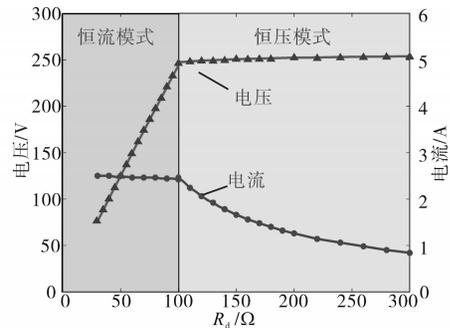


图8 系统电压电流随直流侧阻抗变化趋势

Fig.8 System output voltage  $u_2$  and current  $i_2$  versus with  $R_d$

图9为系统传输功率和效率随着直流侧阻抗变化的曲线。从图9可知,恒流模式下的系统功率随着 $R_d$ 增加而增加,恒压模式下不断减小。而系统效率在恒流模式下保持在 $93\%$ 以上,但切换至恒压模式后,系统效率有一定的下降。这是由于系统输入阻抗为感性,存在一些无功分量,导致系统线损增加,因此效率降低。但总体而言,系统效率良好,满足充电要求。

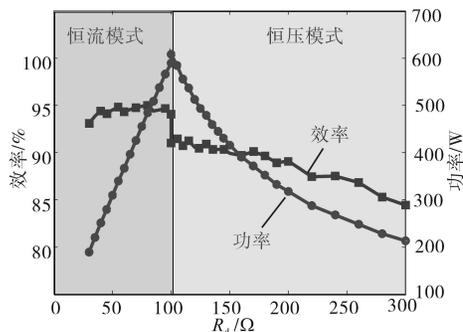


图9 系统功率和效率随直流侧阻抗变化趋势

Fig.9 System efficiency and power versus with  $R_d$ 

### 3 结论

本文提出了一种基于SS/LLC拓扑切换的无线充电系统。在原边线圈串有两个电容  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$ , 副边线圈串有电容  $C_s$ 。分别在电容  $C_{p1}$  和  $C_s$  两端并联开关管  $Q_1$  和  $Q_2$ 。断开  $Q_1$  和  $Q_2$  时系统为SS拓扑, 系统保持为恒流输出状态, 随着充电过程电池电阻不断增加, 系统输出电压逐渐增加, 系统输出功率也不断增加。当其电压与计算得到的恒压模式下的输出电压相等时, 切换拓扑, 将开关  $Q_1$  和  $Q_2$  都闭合, 此时系统为LLC拓扑, 系统为恒压输出状态, 随着阻抗的增加系统电流逐渐减小, 输出功率也逐渐减小, 直至充电结束。实验结果表明, 通过拓扑的切换, 系统在恒流模式下保持了电流的恒定输出, 电流稳定在2.42~2.5 A之间, 在恒压模式下系统能够保证电压输出恒定, 电压稳定在247~253 V之间, 满足电池充电需求, 同时CC模式下系统效率最高可达95%, 而CV模式由于存在一定的无功分量, 因此效率下降, 但平均效率仍有89.3%。

#### 参考文献

[1] Patil Devendra, Mcdonough Matthew K, Miller John M, *et al.*

Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 3-37.

[2] Zhang Zhen, Pang Hongliang, Georgiadis Apostolos, *et al.* Wireless power transfer—an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.

[3] Huang Zhicong, Lam Chi-Seng, Mak Pui-In, *et al.* A single-stage inductive-power-transfer converter for constant-power and maximum-efficiency battery charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8973-8983.

[4] 张楠. 基于复合拓扑的恒流恒压无线充电系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

Zhang Nan. Research on hybrid topology-based wireless charging system with constant current or constant voltage output[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[5] 谭平安, 廖佳威, 谭廷玉, 等. 基于发射端T/F变结构补偿网络的恒压/恒流型无线充电系统[J]. 电工技术学报, 2021, 36(2): 248-256.

Tan Ping'an, Liao Jiawei, Tan Tingyu, *et al.* Constant voltage/constant current wireless charging system based on T/F variable structure compensation network of transmitter-side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 248-256.

[6] 戴晓锋, 吴华杰. 电动汽车恒流恒压型无线充电系统设计[J]. 电气传动, 2019, 49(12): 98-108.

Dai Xiaofeng, Wu Huajie. Design of constant current constant voltage wireless charging system for electric vehicles[J]. Electric Drive, 2019, 49(12): 98-108.

[7] 黄悦华, 谌桥, 程江洲, 等. 电动汽车LCL复合型无线充电研究[J]. 电气传动, 2021, 51(10): 69-80.

Huang Yuehua, Chen Qiao, Cheng Jiangzhou, *et al.* Research on LCL-compound wireless charging of electric vehicle[J]. Electric Drive, 2021, 51(10): 69-80.

[8] Li Yong, Liu Shunpan, Zhu Xiao, *et al.* Extension of ZVS region of series-series WPT systems by an auxiliary variable inductor for improving efficiency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7513-7525.

收稿日期: 2021-07-15

修改稿日期: 2021-08-11