

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.011

# 平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触 电能传输系统的设计

杜博文, 肖伸平, 罗昌胜

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率和效率较低等问题, 提出了一种平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统。并运用 MATLAB 仿真软件, 对平面螺旋型四线圈和传统四线圈非接触电能传输系统的输出功率和传输距离、传输效率和传输距离之间的关系进行了对比分析。结果表明: 在相同距离时, 平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输功率和传输效率均高于传统四线圈传输系统的, 且平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输效率比传统四线圈传输系统的高 3%。

**关键词:** 磁耦合; 非接触; 平面螺旋型; 电能传输系统

**中图分类号:** TM72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2017)02-0061-05

## Design of a Planar Spiral Four-Coil Magnetic Coupling Contactless Power Transmission System

DU Bowen, XIAO Shenping, LUO Changsheng

(School of Electrical & Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the low output power and output efficiency exhibited by the conventional four-coil magnetic coupling contactless power transmission system, a planar spiral four-coil magnetic coupling contactless power transmission system has been proposed. A comparative analysis has been made between its output power and transmission distance, as well as its transmission efficiency and transmission distance by using MATLAB simulation software. The results show that, with the distance a constant, the output power and transmission efficiency of the planar spiral four-coil magnetic coupling contactless power transmission system are 3% higher than those of the traditional four-coil transmission system.

**Keywords:** magnetic coupling; contactless; planar spiral; power transmission system

## 0 引言

非接触电能传输系统, 是一种运用电磁场或者电

磁波来传递电能的新型电能传输系统。为了解决电线腐化、地下布线难、人为操作危险等问题, 近年来, 非接触电能传输技术成为了电能传输领域的研究热

**收稿日期:** 2016-10-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61672225), 国家火炬计划基金资助项目(2015GH712901), 湖南省教育厅科研基金资助重点项目(14A038)

**作者简介:** 杜博文(1991-), 男, 河北衡水人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为无线电能传输,  
E-mail: 386430669@qq.com

**通信作者:** 肖伸平(1965-), 男, 湖南东安人, 湖南工业大学教授, 主要从事时滞系统鲁棒控制, 电力系统稳定性分析及网络化控制等方面的研究, E-mail: xsph\_519@163.com

点。目前,电磁感应式非接触电能传输技术尚处于发展阶段,该传输方式存在传输距离短、传输效率低等缺陷,导致其应用受到限制<sup>[1-2]</sup>。

20世纪90年代,有国外科研团队发现并且验证<sup>[3]</sup>,可通过共振磁场发射和接收能量<sup>[4-5]</sup>,从而开创了基于磁耦合式的非接触电能传输技术,这是在电磁耦合式非接触电能传输系统上的一次突破。

非接触电能传输系统的主要传输参数是传输距离、输出功率和传输效率<sup>[6]</sup>,但是已有相关文献研究中,此类系统的传输距离较短,传输效率较低。因此,本研究提出了一个平面螺旋型四线圈磁耦合非接触电能传输系统,该系统中平面螺旋型线圈与传统型四线圈相比,不仅能够节省材料和空间,并且能够提高传输效率。最后,为了验证所提出系统的有效性,通过建立平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统模型,并且对其输出功率和传输效率进行了分析,且运用MATLAB进行仿真验证对比,以期为电能的传输和非接触电能传输系统的设计提供一定的理论参考依据。

### 1 模型的建立与分析

磁耦合式非接触电能传输系统,是基于线圈之间发生磁共振建立可传递能量的稳定电场,从而完成电能的传输过程。本部分内容主要基于系统传递能量的角度,通过建立等效电路、构建等效参数等,对平面螺旋型接收装置的四线圈系统模型的构建进行理论分析<sup>[7-9]</sup>。

#### 1.1 传统四线圈系统传输模型

传统的四线圈传输系统模型如图1所示。图中, $U_s$ 为高频电压源; $C_1\sim C_4$ 为4个线圈的补偿电容; $L_1\sim L_4$ 分别为4个线圈的等效电感; $D_{mn}$ 为线圈 $m$ 和线圈 $n$ 之间的距离; $R_L$ 为负载电阻。

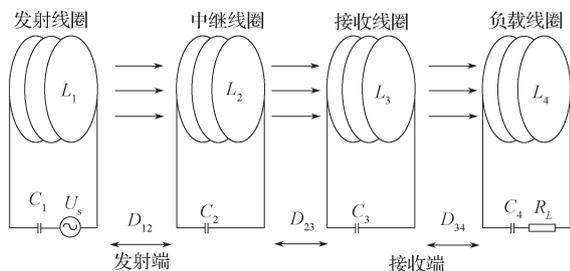


图1 传统四线圈传输系统模型

Fig.1 Traditional four-coil transmission system

如图1所示,传统的四线圈传输系统由4个完全相同的线圈组成,每个线圈上接有补偿电容,且由发射线圈和中继线圈构成发射端,接收线圈和负载线圈构成接收端。

#### 1.2 平面螺旋型四线圈系统传输模型

本研究所设计的平面螺旋型四线圈传输系统模型如图2所示。

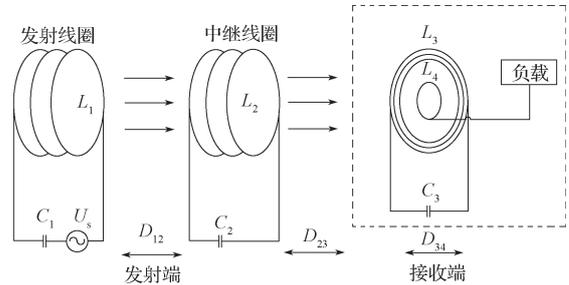


图2 平面螺旋型四线圈传输系统模型

Fig.2 A planar spiral four-coil transmission system mode

由图2所示平面螺旋型四线圈传输系统模型可知,该系统中将接收装置线圈设计成平面螺旋型,这样使得接收线圈的厚度仅为单匝线圈的厚度,而线圈的大小可根据负载的大小和实际需求确定<sup>[10]</sup>。

根据图2所示平面螺旋型四线圈非接触电能传输系统模型,建立如图3所示的系统等效电路。

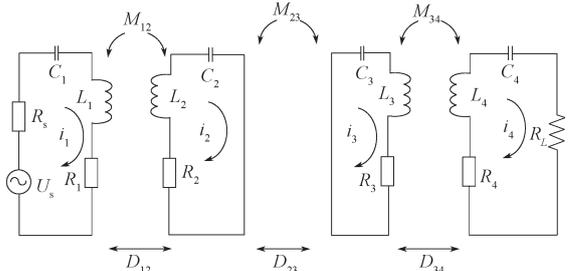


图3 平面螺旋型四线圈传输系统等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of the planar spiral four-coil transmission system

图3中: $M_{mn}$ 为线圈 $m$ 和线圈 $n$ 之间的互感; $R_s$ 为电源内阻; $R_1\sim R_4$ 分别为4个线圈的等效电阻; $\omega$ 为系统的角频率。

由等效电路可得4个线圈的自阻抗 $Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}, Z_{44}$ 分别为:

$$\begin{cases} Z_{11} = R_1 + R_s + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, \\ Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}, \\ Z_{33} = R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_3}, \\ Z_{44} = R_4 + R_L + j\omega L_4 + \frac{1}{j\omega C_4}. \end{cases} \quad (1)$$

耦合互阻抗为:

$$Z_{mn} = Z_{nm} = j\omega M_{mn}, (m \neq n; m, n \in \{1, 2, 3\}), \quad (2)$$

互感为:

$$M_{mn} = D_{mn} \sqrt{L_m L_n} = \mu_0 \pi N_m N_n r_m^2 r_n^2 / (2D_{mn}^3), (m \neq n; m, n \in \{1, 2, 3\}). \quad (3)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;

$N_m$  和  $N_n$  为线圈  $m$  和线圈  $n$  的匝数;

$r_m$  和  $r_n$  为线圈  $m$  和线圈  $n$  的半径。

当平面螺旋型四线圈传输系统发生谐振时, 4 个线圈的电流分别为  $i_1, i_2, i_3, i_4$ , 由等效电路可以列出 KVL (Kirchhoff laws) 方程, 为

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

各线圈的品质因数  $Q_m$  为:

$$Q_m = \frac{\omega_m L_m}{R_m}, \{m \in (1, 2, 3, 4)\}; \quad (5)$$

$$j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m} = 0, (m \in \{1, 2, 3\}). \quad (6)$$

将式 (5) 和 (6) 代入式 (4), 可得:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{U_s (1 + D_{23}^2 Q_2 Q_3 + D_{34}^2 Q_3 Q_4)}{R_1 [(1 + D_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4) + D_{23}^2 Q_2 Q_3]}, \\ i_2 = -\frac{U_s D_{12} \sqrt{Q_1 Q_2} (1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4)}{\sqrt{R_1 R_2} [(1 + D_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4) + D_{23}^2 Q_2 Q_3]}, \\ i_3 = -\frac{U_s D_{12} D_{23} \sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{Q_2 Q_3}}{\sqrt{R_1 R_3} [(1 + D_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4) + D_{23}^2 Q_2 Q_3]}, \\ i_4 = -\frac{U_s D_{12} D_{23} D_{34} \sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{Q_2 Q_3} \sqrt{Q_3 Q_4}}{\sqrt{R_1 R_4} [(1 + D_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4) + D_{23}^2 Q_2 Q_3]}. \end{cases} \quad (7)$$

四线圈非接触电能传输系统的输出功率  $P_{out}$  和传输效率  $\eta$  为:

$$P_{out} = i_4^2 \times R_L = \frac{R_L \times U_s^2 \times D_{12}^2 \times D_{23}^2 \times D_{34}^2 \times Q_1 Q_2 \times Q_2 Q_3 \times Q_3 Q_4}{R_1 R_4 [(1 + D_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4) + D_{23}^2 Q_2 Q_3]^2}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{R_L (D_{12}^2 Q_1 Q_2) (D_{23}^2 Q_2 Q_3) (D_{34}^2 Q_3 Q_4)}{(R_L + R_4) [(1 + D_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + D_{34}^2 Q_3 Q_4) + D_{23}^2 Q_2 Q_3]} \times \frac{1}{(1 + D_{23}^2 Q_2 Q_3 + D_{34}^2 Q_3 Q_4)}. \quad (9)$$

## 2 仿真分析

为了验证本研究所设计的系统的有效性, 运用 MATLAB 软件, 对平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统和传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率和传输效率进行了仿真分析。

### 2.1 输出功率

在其他参数相同的情况下, 计算出平面螺旋型四

线圈磁耦合式非接触电能传输系统和传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率与传输距离之间的关系、传输效率与传输距离之间的关系, 所得结果如图 4 和图 5 所示。

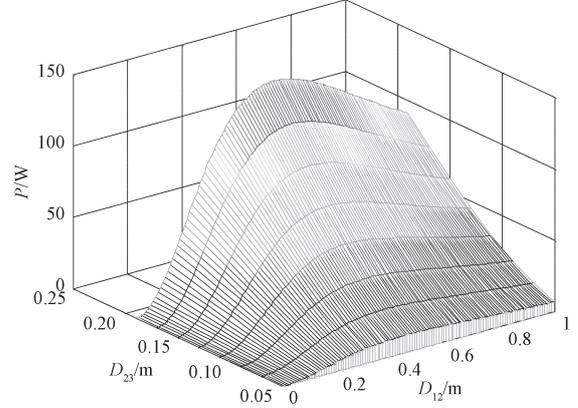


图 4 传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率与  $D_{12}$ 、 $D_{23}$  的关系

Fig. 4 The relationship between the output power of the conventional four-coil magnetic coupling contactless transmission system and  $D_{12}$ ,  $D_{23}$

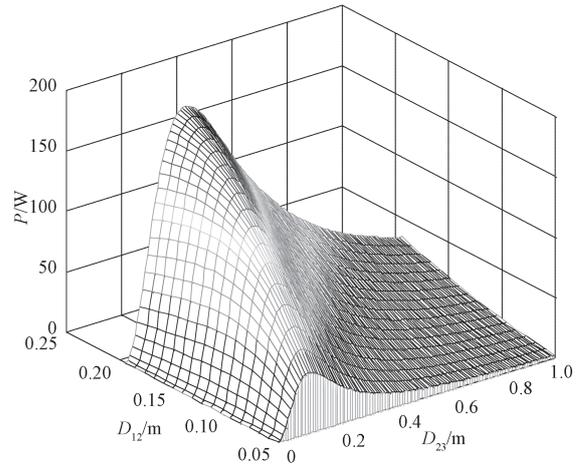


图 5 平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率与  $D_{12}$ 、 $D_{23}$  的关系

Fig. 5 The relationship between the output power of the planar spiral four-coil magnetic coupling contactless transmission system and  $D_{12}$ ,  $D_{23}$

由图 4 与图 5 可以得知: 两个磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率均随着传输距离  $D_{12}$  的增大而增加, 随着  $D_{23}$  的增大出现先增大后减小的变化趋势。当  $D_{12}$  一定且较小时, 随着  $D_{23}$  的逐渐增大, 两个磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率  $P_{out}$  逐渐变大; 当  $D_{12}=D_{23}$  时, 取得最大输出功率  $P_{out}$ ; 当  $D_{12}$  和  $D_{23}$  取相同参数时, 平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率大于传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率。

## 2.2 传输效率

平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统和传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输效率 $\eta$ 与线圈1和线圈2之间的距离 $D_{12}$ 、线圈3和线圈4之间的距离 $D_{34}$ 、总的传输距离 $D$ 之间的关系如图6~8所示。

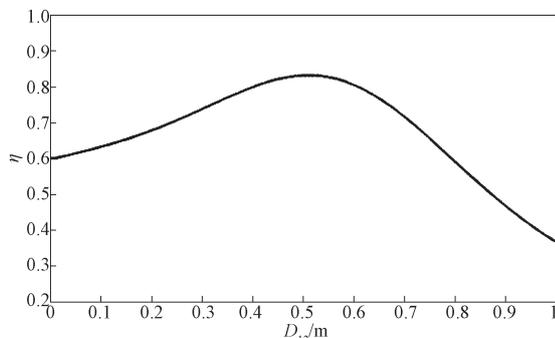


图6 传输效率和发射线圈与中继线圈间距离的关系曲线

Fig. 6 The relationship curve between the transmission efficiency and the distance between the transmitting coil and relay coil

由图6所示平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统和传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输效率 $\eta$ 与发射线圈到中继线圈 $D_{12}$ 之间的关系曲线,可以得知当发射线圈到中继线圈的传输距离为0.5 m时,系统的传输效率达到最大值。

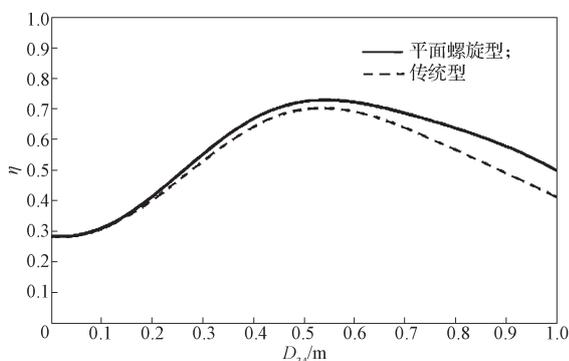


图7 传输效率和接收线圈与负载线圈间距离的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve between the transmission efficiency and the distance between the receiving coil and load coil

由图7可以看出,随着线圈3和4之间的距离不断增大,系统的传输效率先增大后减小。在接收线圈与负载线圈距离 $D_{34}=0.5$  m时,系统的传输效率达到最大值,且平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输效率比传统型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的高3%。其后,随着线圈3和4之间的距离不断增大,传输效率逐渐降低,且平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的下降速度比传统四线圈磁耦合式非接触传输系统的缓慢。

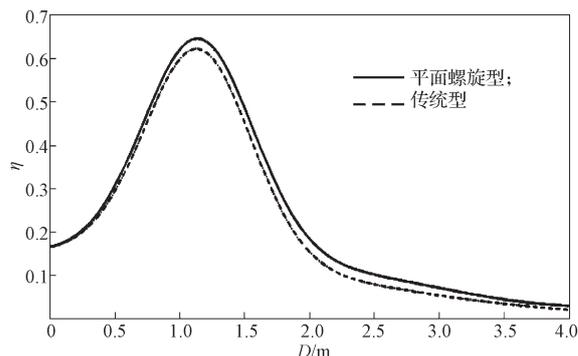


图8 传输效率和总传输距离的关系曲线

Fig. 8 The relationship curve between the transmission efficiency and the total transmission distance

由图8可以得出,当线圈和负载的参数确定后,平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输效率比传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的高3%。

## 3 结论

本文提出了一种平面螺旋型的四线圈磁耦合式非接触电能传输系统,并且对平面螺旋型四线圈和传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的输出功率和传输效率的表达式进行了分析;最后,通过仿真验证,得出了平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统和传统四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的最大传输效率与线圈间距离 $D_{12}$ 和 $D_{34}$ 的关系。通过对比得出:

1) 当两线圈在相同的距离、取相同的参数时,平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输功率比传统型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的高;

2) 当发射线圈到中继线圈的传输距离、接收线圈与负载线圈间距离均为0.5 m时,2个传输系统的传输效率均达到最大值,但平面螺旋型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统的传输效率比传统四线圈螺旋型磁耦合式非接触电能传输系统的高3%。

本研究所提出的新型四线圈磁耦合式非接触电能传输系统与传统的四线圈传输系统相比,不仅能节省材料和空间,并且能提高传输效率,增大传输距离,可望被应用于解决电线腐化、地下布线难、人为操作危险等问题的电能传输系统中。

## 参考文献:

- [1] 张天予,张瑞成,耿晓红,等.接收端并联谐振的耦合式无线供电系统[J].电源技术应用,2016,42(1):

- 123-125, 132.  
ZHANG Tianyu, ZHANG Ruicheng, GENG Xiaohong, et al. The Coupled Resonances Wireless Power Transfer System Based on Parallel Resonance Receiver[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(1): 123-125, 132.
- [2] 樊英杰, 张开如, 狄东照, 等. 小型谐振器无线电能传输系统研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(3): 48-51.  
FAN Yingjie, ZHANG Kairu, DI Dongzhao, et al. Study of Wireless Power Transmission System of Small Size Resonator[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(3): 48-51.
- [3] 秦玉伟. 电磁耦合谐振式无线电能传输实验研究[J]. 河南科学, 2016, 34(1): 41-44.  
QIN Yuwei. Experimental Study on Electro-Magnetic Coupling Resonant Wireless Power Transmission System[J]. Henan Science, 2016, 34(1): 41-44.
- [4] 李江, 张鹏, 马腾, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的仿真与实验[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(11): 72-77.  
LI Jiang, ZHANG Peng, MA Teng, et al. Simulation and Experimental Analysis of Wireless Power Transmission System via Magnetic Resonance Coupling[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(11): 72-77.
- [5] 王国东, 原璐璐, 王允建. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的四线圈模型研究[J]. 电源学报, 2015, 13(1): 101-106.  
WANG Guodong, YUAN Lulu, WANG Yunjian. Resarch on the Four Coil Model of Magnetically-Coupled Resonant Wireless Power Transmission Systems[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(1): 101-106.
- [6] LI Yang, YANG Qingxin, CHEN Haiyan. Basic Study on Improving Power of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling[J]. Advanced Materials Research, 2012, 459: 445-449.
- [7] 张献, 杨庆新, 陈海燕, 等. 电磁耦合谐振式无线电能传输系统的建模、设计与实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 153-158.  
ZHANG Xian, YANG Qingxin, CHEN Haiyan, et al. Modeling and Design and Experimental Verification of Contactless Power Transmission System via Electromagnetic Resonant Coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 153-158.
- [8] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的频率特性[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7): 7-11.  
LI Yang, YANG Qingxin, YAN Zhuo, et al. Characteristic of Frequency in Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonance Coupling[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(7): 7-11.
- [9] 陈明, 肖强辉. UC3842 双管正激式单级 PFC 变换器研究[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(2): 46-51.  
CHEN Ming, XIAO Qianghui. Design of Dual-Transistor Forward Single PFC Converter Based on UC3842[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(2): 46-51.
- [10] KIANI M, JOW U M, GHOVANLOO M. Design and Optimization of 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and System, 2011, 5(6): 579-591.

(责任编辑: 廖友媛)