

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.03.012

无线电能传输 TS-S 型补偿网络的建模与设计

林抒毅, 黄晓生

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 补偿网络是无线电能传输系统中的重要组成部分,可用于提高电能传输的效率、输出功率及稳定性。在对 TS-S 型补偿网络建模及其参数化设计分析的基础上,采用算例验证 TS-S 型补偿网络模型的定频谐振、恒定电压增益和高效率特性,通过实验验证相关推论及方法。结果表明,样机电压输出稳定,在耦合系数为 0.2 时的效率峰值达到 90%。

关键词: 无线电能传输; 补偿网络; 谐振; 电压增益

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2016)03-0269-05

Modelling and design of TS-S compensation networks for WPT system

Lin Shuyi, Huang Xiaosheng

(College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Compensation networks are important parts of wireless power transfer (WPT) system, which can be utilized to improve the efficiency of electrical transmission, output power and stability. Firstly, TS-S networks were modelled in this paper, and its parameter design method was also proposed. Secondly, design examples were analysed to verify the features of TS-S networks, which can work efficiently at constant frequency resonance with constant voltage gain. Finally, a prototype that can realize constant voltage gain was constructed. The results indicate that the output of the prototype is stable with the peak efficiency reaching 90% when the coupling coefficient is 0.2.

Keywords: wireless power transfer (WPT); compensation network; resonance; voltage gain

在磁耦合谐振式无线电能传输 (magnetic couple resonance-wireless power transfer, MCR-WPT) 系统中, 电能的无线传输依靠发射线圈与接收线圈间的电磁感应实现。其耦合线圈的距离较大, 耦合系数远低于传统的变压器, 漏感远大于互感。为了提高输出功率及效率, 必须对耦合线圈进行无功补偿。根据电容的串并联方式, 常见的补偿网络有 4 种基本的拓扑^[1-2]。而常用的补偿网络拓扑则为 SS (series-series) 与 SP (series-parallel), 这两种拓扑首先通过电容对接收线圈的自感进行补偿, 然后再计算发射线圈的串联电

容, 使得其输入阻抗呈纯阻性。

SS 补偿网络的阻性输入特性不随耦合系数及负载电阻的变化而改变。但是其电压增益具有负载相关性, 不利于接收端的恒压输出。SP 在谐振频率点上的电压增益具有负载无关性, 但是一旦耦合线圈的耦合系数发生变化, SP 补偿网络的输入不再呈阻性, 且电压增益的负载无关性也会受到影响。因此, SP 补偿网络不适合变耦合系数的情况。

近年来, 发射端多谐振补偿网络受到了研究人员的关注。这类补偿网络通过 T 型或 π 型谐振

收稿日期: 2016-05-25
基金项目: 福建工程学院科研发展基金项目 (GY-Z15102); 福建工程学院科研启动基金项目 (GY-Z14074)
第一作者简介: 林抒毅 (1985-), 女, 福建福州人, 讲师, 博士, 研究方向: 无线电能传输技术、电器智能化技术。

环节使得电压馈电型的发射端线圈电流幅值恒定,即工作于额定电流状态^[3-6]。同时,接收端通过单电容串联实现恒压输出。因此,其电压增益具有负载无关性,且可工作在固定的谐振频率并保持阻性输入。补偿网络的阻性输入特性有利于实现逆变器的软开关,提高系统效率。这种补偿网络兼具有 SS 补偿网络的阻抗频率特性以及 SP 补偿网络的增益特性,可用于提高 WPT 系统的传输效率并实现恒压输出。

本文对发射端 LCL-T 及 CLC-T 这两种 TS-S 型补偿网络进行了建模与分析。这两者补偿网络均是在 SS 补偿网络的基础上串联 T 型谐振环节,并且具有相似的传输特性。同时,对这两种补偿网络的设计方法进行了研究,分析了其效率与增益特性,为补偿网络的设计提供了参考。最后,通过样机的实验验证了本文设计方法的可行性与准确性。

1 TS-S 补偿网络

1.1 基本原理

如图 1 所示,TS-S 补偿网络是在 SS 补偿网络的基础上,在前端增加一级 LCL 或 CLC 的 T 型谐振环节。将这两种 TS-S 型补偿网络分别简称为 LCL-T 型与 CLC-T 型补偿网络。

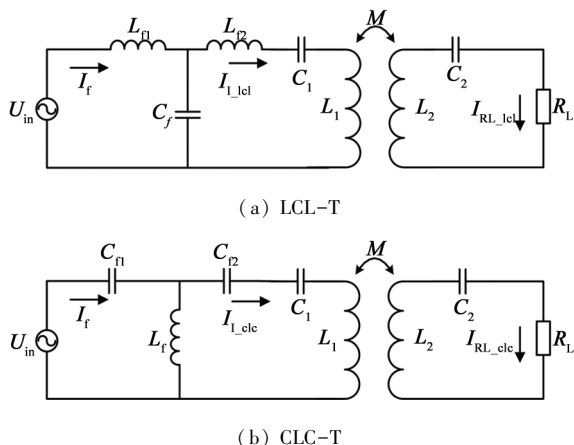


图 1 TS-S 补偿网络的两种拓扑

Fig.1 Topological structure of TS-S networks

在 SS 补偿网络中,系统谐振频率固定,且输入阻抗的零相角特征不随负载的变化而变化。但是,其发射线圈电流幅值变化较大,当接收端空载时,发射端谐振回路相当于短路。这不仅造成发射线圈设计困难,也使得控制器设计复杂化。

通过 LCL 或 CLC 的并联谐振,可以将前级高频电压源转换为电流源,从而使得发射线圈电流幅值恒定。根据电磁感应定律,其接收端的感应电压也恒定。利用接收端的单电容串联谐振补偿,即可实现恒定的输出电压。

1.2 阻抗分析

补偿网络的电压增益、效率等传输特性由其拓扑阻抗特性所决定。因此,首先分析 TS-S 补偿网络的阻抗特性。根据图 1 所给出的拓扑,接收端单电容串联补偿的环路阻抗可表示为:

$$Z_{2loop} = j\omega L_2 + \frac{\omega L_2}{Q_2} + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L \quad (1)$$

其中, ω 为工作角频率, L_2 为接收线圈自感, C_2 为接收线圈补偿电容, Q_2 表示接受线圈的 Q 值,下同。由于电容器件的 Q 值通常远高于电感器件,为了简化分析,本文仅考虑电感器件的同等系列阻抗 (equivalent series resistance, ESR), 而将电容视为理想器件。 R_L 为后级整流调压及负载的等效负载电阻。由耦合线圈的互感方程,可定义反射阻抗为:

$$Z_{2ref} = \omega^2 M^2 / Z_{2loop} \quad (2)$$

其中, M 为耦合线圈的互感。接收端负载电路对于发射端的影响即可等效为在发射线圈上串联反射阻抗。因此,SS 补偿网络的输入阻抗可表示为:

$$Z_{ss} = j\omega L_1 + \frac{\omega L_1}{Q_1} + \frac{1}{j\omega C_1} + Z_{2ref} \quad (3)$$

其中, L_1 为发射线圈自感, C_1 为发射线圈补偿电容, Q_1 为发射线圈 Q 值。LCL-T 与 CLC-T 补偿网络的输入阻抗分别为:

$$Z_{lcl} = j\omega L_f + \frac{\omega L_f}{Q_f} + \frac{1}{j\omega C_f} \parallel \left(j\omega L_f + \frac{\omega L_f}{Q_f} + Z_{ss} \right) \quad (4)$$

$$Z_{clc} = \frac{1}{j\omega C_f} + \left(j\omega L_f + \frac{\omega L_f}{Q_f} \right) \parallel \left(\frac{1}{j\omega C_f} + Z_{ss} \right) \quad (5)$$

其中, C_f 为补偿电容 C_{f1} 、 C_{f2} 的容值, L_f 为补偿电感 L_{f1} 、 L_{f2} 的感值, Q_f 为其对应的电感 Q 值。

1.3 电压增益

为了维持接收端的恒压输出,传输网络电压增益应维持稳定。根据基尔霍夫定律,LCL-T 型与 CLC-T 型补偿网络的发射线圈电流 I_{1LCL} 及 I_{1CLC} 分别为:

$$I_{1lcl} = \frac{U_{in}}{Z_{lcl}} \frac{1/(j\omega C_f)}{1/(j\omega C_f) + j\omega L_f + \omega L_f/Q_f + Z_{ss}} \quad (6)$$

$$I_{\text{lelc}} = \frac{U_{\text{in}}}{Z_{\text{clc}}} \frac{j\omega L_f + \omega L_f / Q_f}{1/(j\omega C_f) + j\omega L_f + \omega L_f / Q_f + Z_{\text{ss}}} \quad (7)$$

根据电磁感应定律,所对应的负载电流分别为:

$$I_{\text{Rlcl}} = j\omega M \cdot I_{\text{llcl}} / Z_{2\text{loop}} \quad (8)$$

$$I_{\text{Rclc}} = j\omega M \cdot I_{\text{lelc}} / Z_{2\text{loop}} \quad (9)$$

由此可得电压增益分别为:

$$G_{\text{Vlcl}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{Rlcl}} \cdot R_L}{U_{\text{in}}} \quad (10)$$

$$G_{\text{Vclc}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{Rclc}} \cdot R_L}{U_{\text{in}}} \quad (11)$$

为了满足设计目标,电感与电容参数满足:

$$L_f C_f = L_1 C_1 = L_2 C_2 = 1/\omega^2 \quad (12)$$

根据(10)与(11),当系统工作于谐振频率时,且不考虑电感 ESR 时,其电压增益分别为:

$$G_{\text{Vlcl}} = M/L_f \quad (13)$$

$$G_{\text{Vclc}} = -M/L_f \quad (14)$$

由此可见,发射端采用 LCL-T 或者 CLC-T 时,系统在谐振频率点上的电压增益仅为互感 M 与电感 L_f 的比值,而与谐振频率及接收端负载的变化无关,且 LCL-T 与 CLC-T 的电压增益反相。

1.4 传输效率

多谐振补偿网络的引入提高了系统的传输性能,于此同时,其补偿器件的数量有所增加,在一定程度上降低了效率。由于电容器件的 Q 值通常远高于电感器件,因此仅考虑电感器件的损耗。LCL-T 与 CLC-T 型补偿网络的器件损耗分别为:

$$P_{\text{lcl}} = \left| \frac{U_{\text{in}}}{Z_{\text{lcl}}} \right|^2 \frac{\omega L_f}{Q_f} + |I_{\text{llcl}}|^2 \omega \left(\frac{L_f}{Q_f} + \frac{L_1}{Q_1} \right) + |I_{\text{Rlcl}}|^2 \frac{\omega L_2}{Q_2} \quad (15)$$

$$P_{\text{clc}} = \left| \frac{U_{\text{in}}}{Z_{\text{clc}}} - I_{\text{lelc}} \right|^2 \frac{\omega L_f}{Q_f} + |I_{\text{lelc}}|^2 \frac{\omega L_1}{Q_1} + |I_{\text{Rclc}}|^2 \frac{\omega L_2}{Q_2} \quad (16)$$

由此可知,其传输效率分别为:

$$\eta_{\text{lcl}} = |I_{\text{Rlcl}}|^2 R_L / (P_{\text{lcl}} + |I_{\text{Rlcl}}|^2 R_L) \quad (17)$$

$$\eta_{\text{clc}} = |I_{\text{Rclc}}|^2 R_L / (P_{\text{clc}} + |I_{\text{Rclc}}|^2 R_L) \quad (18)$$

2 参数设计与分析

2.1 设计系数

由上述的分析可知,LCL-T 型与 CLC-T 型的阻抗、电压增益相似。为了在实际的 WPT 系统中应用这两种补偿网络,需要对其设计方法进行研

究。由(12)可知,在补偿网络中,谐振环节的谐振频率相同,每个谐振环节仅有一个独立变量。因此,可定义电感与电容参数计算式如下:

$$L_f = \frac{\alpha_f}{2\pi f_0}, C_f = \frac{1}{2\pi f_0 \cdot \alpha_f} \quad (19)$$

$$L_1 = \frac{\alpha_1}{2\pi f_0}, C_1 = \frac{1}{2\pi f_0 \cdot \alpha_1} \quad (20)$$

$$L_2 = \frac{\alpha_2}{2\pi f_0}, C_2 = \frac{1}{2\pi f_0 \cdot \alpha_2} \quad (21)$$

其中, f_0 为谐振频率。负载电阻 R_L 与耦合线圈互感 M 计算式如下:

$$R_L = \alpha_2 / Q_L \quad (22)$$

$$M = k_m \frac{\sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}{2\pi f_0} \quad (23)$$

其中, Q_L 为接收端负载 Q 值, k_m 为耦合线圈的耦合系数。由(19)至(23)可知,补偿网络的参数由 α_f 、 α_1 、 α_2 、 k_m 与 f_0 等 5 个参数确定。将设计参数代入(10)、(11),电压增益表达式可简化为:

$$G_{\text{Vlcl}} = \frac{k_m k_\omega \alpha_2 \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}{Q_L F_2 (\alpha_f k_\omega - jF_{m1} (1 - k_\omega^2))} \quad (24)$$

$$G_{\text{Vclc}} = \frac{k_m k_\omega^3 \alpha_2 \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}{Q_L F_2 [\alpha_f k_\omega (k_\omega^2 - 1) + jF_{m1} + jF_{m2} (1 - k_\omega^2)]} \quad (25)$$

$$F_1 = j\alpha_f k_\omega - j\alpha_1 \left(\frac{1}{k_\omega} - k_\omega \right) \quad (26)$$

$$F_2 = -j\alpha_2 \left(\frac{j}{Q_L} + \frac{1}{k_\omega} - k_\omega \right) \quad (27)$$

$$F_{m1} = k_m^2 k_\omega^2 \alpha_1 \alpha_2 / F_2 + F_1 \quad (28)$$

$$F_{m2} = k_m^2 k_\omega^2 \alpha_1 \alpha_2 / F_2 - j\alpha_f / k_\omega \quad (29)$$

由此可见,通过上述参数化的设计方法,补偿网络的增益设计与具体的谐振频率无关,有助于提高设计的通用性。

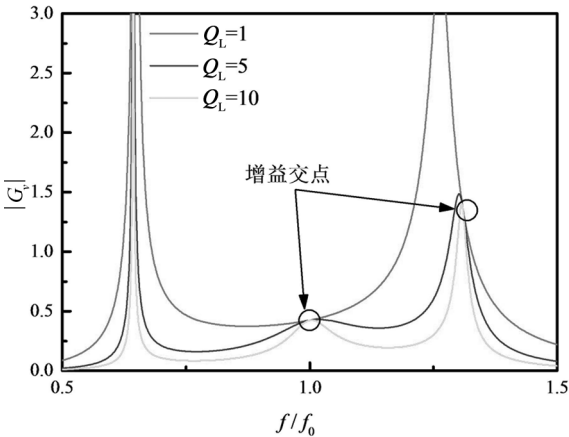
2.2 增益分析

为了分析补偿网络的增益特性,绘制电压增益在不同负载 Q 值下随工作频率 f 变化的曲线,如图 2 所示,其中 $\alpha_f = 5$ 、 $\alpha_1 = 10$ 、 $\alpha_2 = 5$ 、 $k_m = 0.3$,忽略电感 ESR。对比 LCL-T 与 CLC-T 的电压增益可知,两者都存在两个电压增益交点,即电压增益不随负载值变化而变化的频率点。在谐振频率点上,两者的增益值相同,而 CLC-T 的第二个增益交点频率值高于 LCL-T。

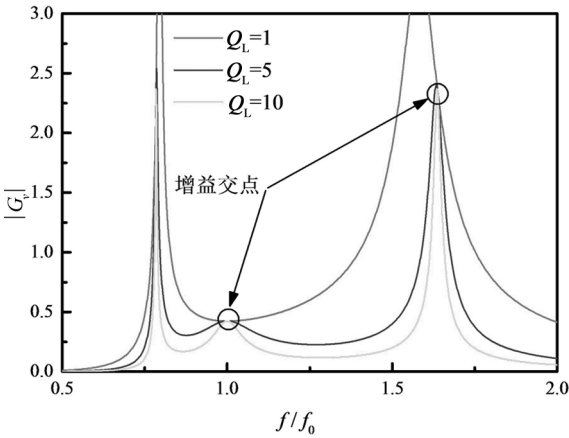
2.3 效率分析

在实际的补偿网络中,由于电感 ESR 的存在,传输过程存在损耗,且效率会随着电感 Q 值的提高而提高。绘制传输效率随频率变化的曲线,如图 3 所示。为了简化分析,补偿电感与耦合线圈的 Q 值均设置为相同数值,即 Q 。

由图 3 可知,传输效率在谐振频率附近达到最高值,因此,补偿网络适合工作于定频谐振模式。传输效率随着补偿电感与线圈 Q 值的提高而提高。而当 Q 值较高时($>1\,000$),传输效率的变化则不明显。



(a) LCL-T

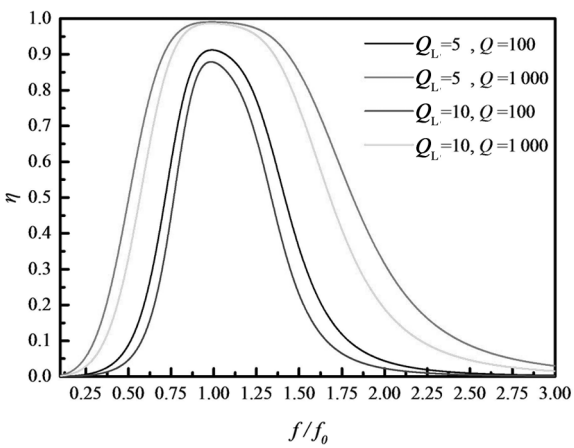


(b) CLC-T

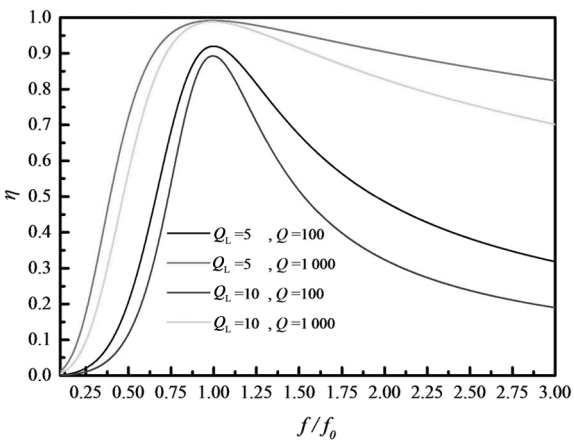
图 2 电压增益随频率变化的曲线

Fig.2 Voltage gain with the variation of frequency

LCL-T 的传输效率随负载 Q 值变化的曲线如图 4 所示。由图可知,由于发射线圈电流幅值固定,其损耗也固定。因此,存在最佳的负载 Q 值,使得传输效率最高,且当电感 Q 值变化时,最佳负载 Q 值也随之改变。CLC-T 也存在类似的



(a) LCL-T



(b) CLC-T

图 3 传输效率随频率变化的曲线

Fig.3 Transmission efficiency with the variation of frequency

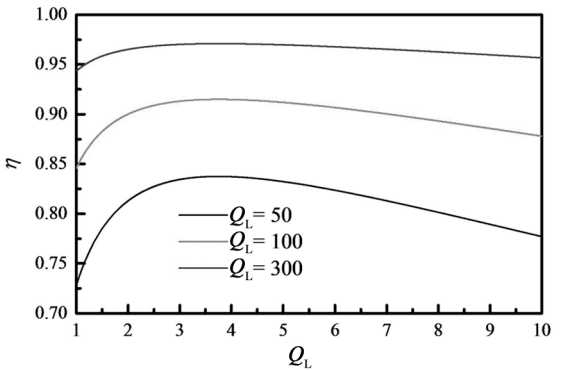


图 4 传输效率随负载 Q 值的变化趋势

Fig.4 Transmission efficiency with the variation of Q_L

最佳负载 Q 值点。
2.4 LCL-T 与 CLC-T 补偿网络的简化设计
由上述的算例分析可知,两种补偿网络具有

非常相似的增益与效率特性。在实际的设计过程中 LCL-T 的第二个补偿电感可与发射线圈进行集成,从而简化为 LCC-S 型补偿网络。同样的 CLC-T 型的第二补偿电容可与 SS 发射线圈补偿电容进行串联,从而简化为 CLC-S 型补偿网络。

3 实验验证

为了验证上述设计的可行性,本文使用如图 5 的实验装置。补偿网络采用 LCL-T 型,其设计参数约为: $\alpha_f = 10$ 、 $\alpha_1 = 35$ 、 $\alpha_2 = 10$ 、 $f_0 = 50$ kHz。 V_{in} 使用波形发生器输出 50 kHz 的正弦波,通过功率放大器对信号进行放大以对补偿网络进行馈电。接收端补偿网络输出接负载电阻 R_L ,随着负载电阻的变化,输出电压基本维持恒定,电压增益维持恒定。

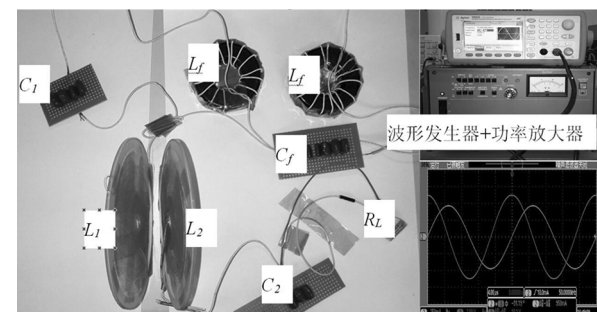


图 5 实验电路及设备

Fig.5 Experimental setup of TS-S compensation networks for WPT system

耦合系数 $k=0.2$ 时, R_L 在 $3\ \Omega$ 时达到效率峰值,约为 90.2%。因此,TS-S 型补偿网络可实现高效率的无线电能传输。

4 结论

在 MCR-WPT 系统中,TS-S 型补偿网络有助于提高传输效率并简化控制设计。本文以 LCL-T 与 CLC-T 两种 TS-S 型补偿网络为研究对象,详细探讨了其建模、分析与设计方法,为 MCR-WPT 系统设计提供了理论依据。结论如下:

(1) 补偿网络存在两个增益交点,其中一个固定在谐振频率点上,其电压增益为互感 M 与电感 L_f 的比值,而与谐振频率及负载的变化无关,有助于实现接收端恒压输出;另一个增益交点则高于谐振频率点。

(2) 通过所提出的参数化设计方法,补偿网络的参数设计与具体的谐振频率无关,从而简化了设计过程,并提高设计通用性。

(3) 传输效率在谐振频率点附近达到峰值。因此,TS-S 补偿网络适合工作于定频谐振模式。

(4) 存在最佳负载 Q 值,使得谐振状态下的传输效率达到峰值。

(5) 样机实验验证了本文建模与设计方法的可行性与准确性。样机在耦合系数为 0.2 时实现了 90% 的传输效率。

参考文献:

- [1] Zhang W, Wong S C, Tse C K, et al. Design for efficiency optimization and voltage controllability of series-series compensated inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 191-200.
- [2] 周雯琪, 马皓, 何湘宁. 感应耦合电能传输系统不同补偿拓扑的研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 133-139.
- [3] Li Siqi, Wei Han, Den Junjun, et al. A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2261-2273.
- [4] Samanta S, Rathore A K. A new current-fed CLC transmitter and LC receiver topology for inductive wireless power transfer application: Analysis, design, and experimental results[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(4): 357-368.
- [5] 周豪, 姚钢, 赵子玉, 等. 基于 LCL 谐振型感应耦合电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 9-16.
- [6] 邹爱龙, 王慧贞, 华洁. 基于 LCL 补偿的多负载移动式感应非接触电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4000-4006.

(责任编辑: 肖锡湘)