

基于双T型补偿网络的无线充电系统研究

吴华杰^{1,2},戴晓锋¹

(1.扬州工业职业技术学院 机械与汽车工程学院,江苏 扬州 225000;

2.扬州市车辆工程学会,江苏 扬州 225000)

摘要:为实现电动汽车无线充电系统的恒压输出,提出一种基于双T型补偿网络的电动汽车无线充电系统,无需加入闭环控制电路和动态调谐电路,通过对补偿网络的设计即可实现系统输出电压,具有负载无关性,且系统同时具有单位功率因数输入特性。首先建立了双T型补偿网络电动汽车无线充电系统的等效模型,并分析了系统的恒压输出特性与单位功率因数输入特性,接着给出了系统一般性设计方法,最后通过仿真和实验验证了理论分析的可行性及有效性。

关键词:电动汽车;感应耦合电能传输系统;双T型补偿网络;恒压;单位功率因数

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19297

Research on Wireless Charging System Based on Double-T-type Compensation Network

WU Huajie^{1,2}, DAI Xiaofeng¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Yangzhou Industrial Vocational Technical College,

Yangzhou 225000, Jiangsu, China; 2. Yangzhou Vehicle Engineering Society,

Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

Abstract: In order to realize constant output voltage of wireless charging system for electric vehicles, a wireless charging system for electric vehicles based on double-T-type compensation network was proposed. Without adding closed loop control circuit and dynamic tuning circuit, the system could realize constant output voltage characteristic and unity power factor input characteristic at the same time through designing compensation network. Firstly, the equivalent model of wireless charging system for electric vehicles with double-T-type compensation network was built, and constant output voltage characteristic and unity power factor input characteristic of system were analysed, then the general system design method was given. Finally, the feasibility and validity of theoretical analysis was verified by experiments.

Key words: electric vehicles (EVs); inductively coupled power transfer (ICPT) system; double-T-type compensation network; constant voltage; unity power factor

近年来,随着能源危机以及环境污染日益加剧,电动汽车(electric vehicles, EVs)因其高效、节能和环保等优点得到人们的广泛关注^[1]。目前,电动汽车充电方式主要包括有线充电与无线充电两种。相比于有线充电,无线充电没有机械磨损、无接触损耗,具有安全可靠、供电灵活等优点^[2-3]。感应耦合电能传输(inductively coupled power transfer, ICPT)技术已经成为无线电能传输(wireless power transmission, WPT)的主流技术之一,在短距离条件下可实现大功率、高效

率能量传输,电动汽车无线充电通常采用ICPT技术^[4]。

ICPT系统实现无线电能传输的核心元件是磁路耦合机构。因为原副边气隙较大,磁路耦合机构的本质为松耦合变压器。相比于紧耦合变压器,其具有励磁电感小、漏感大的缺点,会带来较大的无功功率。过大的无功功率会增大供电电源的容量,增加器件应力和线路损耗,为系统的设计和实际运行带来很大的困难,这就需要采用电容对磁路耦合机构的励磁电感与漏感进

基金项目:高等职业教育创新发展行动计划(2015~2018)项目(XM-01)

作者简介:吴华杰(1987—),男,硕士,讲师,Email:714698778@qq.com

行补偿,以提高系统输出功率和传输效率,同时补偿网络直接影响着系统特性,因此对补偿网络的研究成为ICPT系统理论研究和工程应用的热点。

电动汽车ICPT系统要求具有恒压输出特性,一种最好的方法就是通过设计系统的补偿网络使系统自然获得上述特性,这种方法不需加入动态调谐电路、闭环控制电路,既简化了系统结构、节约了系统成本,又提高了系统的可靠性。文献[5]基于S/S补偿提出一种自激控制策略,使ICPT系统实现动态负载下输出电压恒定,但系统输入相角随负载变化明显,不具有单位功率因数特性。文献[6]以P/S补偿的ICPT系统为研究对象,使系统在设计的参数约束条件下具有恒压恒频特性,但系统不能在全负载范围内实现恒压输出。文献[7]基于 π 型补偿网络使输出电压具有负载无关性,但系统采用电流型逆变电路,需要串联大电感,造成系统复杂度高、体积大。文献[8]基于双LCL补偿网络,对副边LCL网络加以改造,在其输出端并联电容,通过参数设计实现动态负载下输出电压恒定,但系统所需谐振元件多、效率不高,而且参数设计复杂。

针对现有补偿网络使电动汽车ICPT系统在

动态负载下保持恒压输出特性方面的不足,本文基于双T型补偿网络进行研究。该补偿网络使得系统输出电压具有负载无关性,且系统同时具有单位功率因数输入特性,有利于提高电动汽车ICPT系统的控制稳定性与功率传输能力,为电动汽车ICPT系统的方案设计提供参考。

1 双T型补偿网络的系统等效模型与特性分析

1.1 双T型补偿网络的电动汽车无线充电系统等效模型

图1为基于双T型补偿网络的电动汽车无线充电系统电路图。图1中, U_{dc} 为直流电压源; $S_1 \sim S_4$ 为开关管MOSFET; $D_1 \sim D_4$ 为其反并联二极管; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ 和 L_m 分别为磁路耦合机构原边漏感、副边漏感和励磁电感;原边补偿网络仅包括原边补偿电容 C_p ,副边补偿网络包括副边补偿电容 C_{s1}, C_{s2} 和1个电感 L_s ;整流二极管 $D_5 \sim D_8$ 与滤波电感 L_r 、滤波电容 C_f 构成整流滤波电路; u_m, i_m 分别为逆变桥输出电压、电流; i_p, i_r 分别为发射线圈电流和接收线圈电流; u_o, i_o 分别为整流桥输入电压、输入电流; R_L 为系统负载电阻; U_L, I_L 分别为负载电阻两端电压、两端电流。

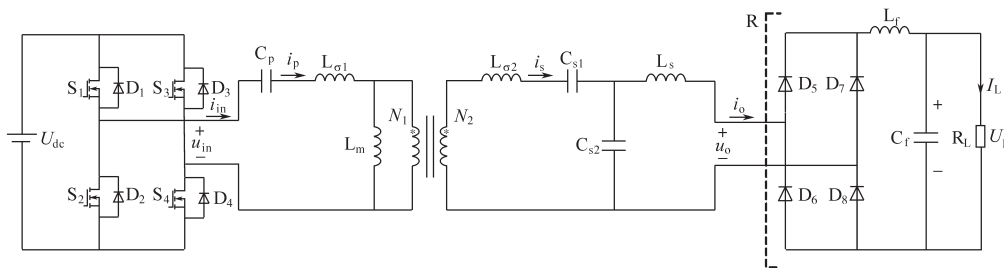


图1 基于双T型补偿网络的电动汽车无线充电系统电路图

Fig.1 Circuit diagram of wireless charging system for electric vehicles based on double-T-type compensation network

为简化分析,仅考虑逆变输出电压基波正弦分量,可将逆变电路及其之前的电路部分等效为理想交流电压源 u_m ;根据功率守恒定律,可将整流电路及其后的电路部分等效为负载电阻 $R^{[9]}$ 。此时图1所示的系统电路图可等效为图2。

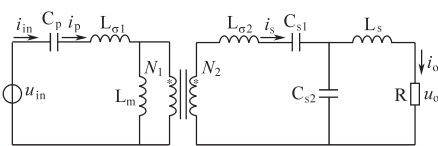


图2 系统等效电路图

Fig.2 System equivalent circuit diagram

常见的T型补偿网络主要有CLC和LCL两种。众所周知,T型补偿网络具有阻抗变换特性和电压源电流源的互易性。下面本文将通过对混合双T型补偿网络的特性分析与设计,使系统在动态负载下具有恒压输出特性和单位功率因数输入特性。为分析直观,当满足下2式时可将图2转化为图3。

$$j\omega L_{\sigma 1} + \frac{1}{j\omega C_p} = \frac{1}{j\omega C_{eq1}} \quad (1)$$

$$j\omega L_{\sigma 2} + \frac{1}{j\omega C_{s1}} = \frac{1}{j\omega C_{eq2}} + j\omega L_{s1} \quad (2)$$

式中: ω 为系统工作角频率; C_{eq1} 为 C_p 与 L_{o1} 支路的等效电容; C_{eq2} 为 C_p 与 L_{o2} 支路的等效电容。

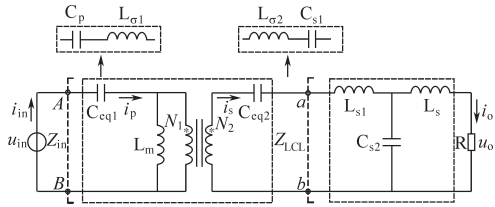


图3 混合双T型补偿网络系统等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of hybrid double-T-type compensation network system

由图3可以看出,系统谐振网络包括2个T型补偿网络,电容 C_{eq1} 、励磁电感 L_m 和电容 C_{eq2} 构成CLC电路,为第1个T型补偿网络;电感 L_{s1} 、电容 C_{s2} 和电感 L_s 构成LCL电路,为第2个T型补偿网络。

1.2 双T型补偿网络的系统特性分析

1.2.1 输出恒压特性分析

如图3所示,根据诺顿定理,电压源 u_{in} 与电容 C_{eq1} 串联可变换为电流源 i_{in} 与电容 C_{eq1} 并联,图3变化为图4。

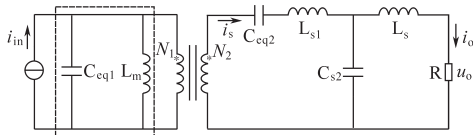


图4 系统诺顿等效电路图

Fig.4 Norton equivalent circuit diagram of system

设谐振角频率为 ω_0 。电容 C_{eq1} 与励磁电感 L_m 发生并联谐振,即系统工作角频率 ω 满足下式时, C_{eq1} 与 L_m 相当于断路,图4可以简化为图5。

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{L_m C_{eq1}} \quad (3)$$

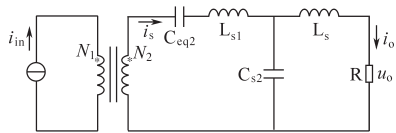


图5 系统初步简化等效电路图

Fig.5 Preliminarily simplified system equivalent circuit diagram

此时电流源 i_{in} 为

$$i_{in} = u_{in} j\omega_0 C_{eq1} \quad (4)$$

经过理想变压器可求得副边电流 i_s 为

$$i_s = \frac{N_1}{N_2} i_{in} = \frac{N_1}{N_2} u_{in} j\omega_0 C_{eq1} \quad (5)$$

副边电流 i_s 流过电容 C_{eq2} 与电感 L_{s1} ,图5可进一步简化为图6。

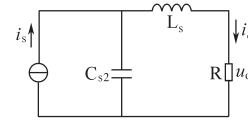


图6 系统进一步简化的等效电路图

Fig.6 Equivalent circuit diagram of further simplified system

如图6所示,根据戴维宁定理,电流源 i_s 与电容 C_{s2} 串联可变换为电压源 u_s 与电容 C_{s2} 串联,图6变化为图7。

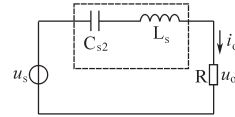


图7 系统戴维宁等效电路图

Fig.7 Thevenin equivalent circuit diagram of system

电容 C_{s2} 与电感 L_s 发生串联谐振,即系统工作角频率 ω 满足下式时, C_{s2} 与 L_s 相当于短路。

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{L_s C_{s2}} \quad (6)$$

此时系统输出电压 u_o 为

$$u_o = u_s = i_s \frac{1}{j\omega_0 C_{s2}} = \frac{N_1}{N_2} u_{in} \frac{C_{eq1}}{C_{s2}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,对于磁路耦合机构原副边线圈匝数比 $N_1:N_2$ 确定的系统,系统输出电压 u_o 仅与输入电压 u_{in} 、补偿电容 C_{eq1} 和 C_{s2} 有关,与负载电阻 R 无关,系统输出电压具有负载无关性。

1.2.2 单位功率因数输入特性分析

根据上文的分析,当系统工作角频率 ω 满足式(3)、式(6)时,可实现动态负载下输出电压恒定,下一步需要使系统同时具有单位功率因数输入特性,即系统输入总阻抗 Z_{in} 呈纯阻性。

由图3可求得 AB 节点两端输入阻抗 Z_{LCL} 为

$$Z_{LCL} = j\omega L_{s1} + \frac{1}{j\omega C_{s2}} // (j\omega L_s + R) \quad (8)$$

根据LCL电路的特性分析^[10],当满足下式:

$$\begin{cases} L_{s1} = L_s \\ \omega = \omega_0 = 1/\sqrt{L_{s1} C_{s2}} \end{cases} \quad (9)$$

此时 AB 节点两端输入阻抗 Z_{LCL} 为

$$Z_{LCL} = \omega_0^2 L_{s1}^2 / R \quad (10)$$

图3可转化为图8。

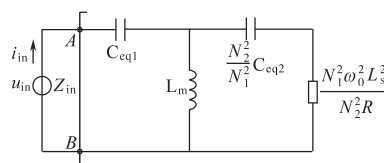


图8 副边参数被折算到原边的系统等效电路图

Fig.8 System equivalent circuit diagram with secondary side parameters is converted to primary side

根据CLC电路的特性分析^[11],当满足下式:

$$\begin{cases} C_{eq1} = \frac{N_2^2}{N_1^2} C_{eq2} \\ \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_m C_{eq1}}} \end{cases} \quad (11)$$

此时AB节点两端输入阻抗,即系统总的输入阻抗 Z_{in} 为

$$Z_{in} = \frac{N_2^2 L_m R}{N_1^2 \omega_0^2 L_{s1}^2 C_{eq1}} \quad (12)$$

由式(12)可知,系统总的输入阻抗 Z_{in} 在动态负载下虚部为0,始终呈纯阻性,系统具有单位功率因数输入特性。

综合上述分析可知,当系统满足下式时,系统输出电压具有负载无关性,且系统同时具有单位功率因数输入特性。

$$\begin{cases} L_{s1} = L_s \\ C_{eq1} = \frac{N_2^2}{N_1^2} C_{eq2} \\ \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_m C_{eq1}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{s1} C_{s2}}} \end{cases} \quad (13)$$

总结以上分析过程,可得到基于双T型补偿网络的电动汽车无线充电系统设计参数设计方案如图9所示。

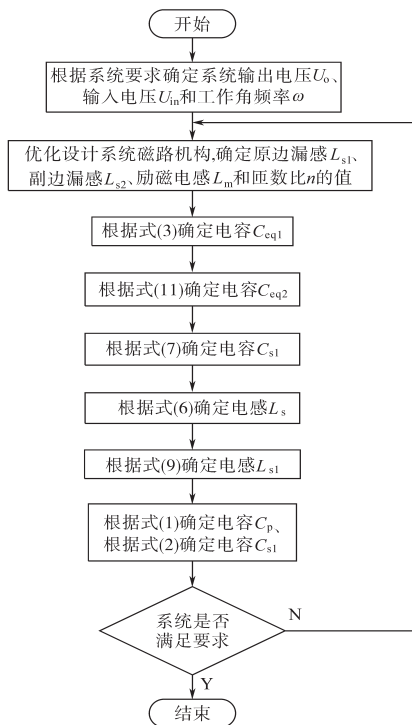


图9 双T型补偿网络电动汽车无线充电系统设计流程图
Fig.9 Design flow chart of wireless charging system for electric vehicles based on double-T-type compensation network

2 仿真和实验验证

为验证前文理论分析的可行性与有效性,本文搭建了基于双T型补偿网络的无线充电系统的仿真模型和硬件电路进行验证,系统参数如下: $U_{dc}=48\text{ V}$, $L_{o1}=91.84\text{ }\mu\text{H}$, $L_{o2}=91.63\text{ }\mu\text{H}$, $C_p=0.47\text{ }\mu\text{F}$, $C_{s2}=1.47\text{ }\mu\text{F}$, $R_p=0.19\text{ }\Omega$, $f_0=20\text{ kHz}$, $L_m=42.83\text{ }\mu\text{H}$, $N_1:N_2=1:1$, $C_{s1}=0.69\text{ }\mu\text{F}$, $L_s=43.08\text{ }\mu\text{H}$, $R_s=0.19\text{ }\Omega$ 。

由前文分析可知,当系统工作在谐振角频率 ω_0 下时,系统输出电压具有负载无关性,且系统具有单位功率因数特性,因此本系统适合采用恒频控制策略,相比于变频控制,恒频控制更为简单易行、可靠稳定,最终选取系统谐振频率 f_0 为20 kHz。

本文在仿真和实验时未接入整流滤波电路,直接在副边补偿网络输出端接负载电阻进行实验验证。

负载电阻为10 Ω 和30 Ω 时,系统输出电压 u_o 稳态波形分别如图10和图11所示。负载电阻从10 Ω 突变到30 Ω 时系统输出电压 u_o 与输出电流 i_o 波形如图12所示。

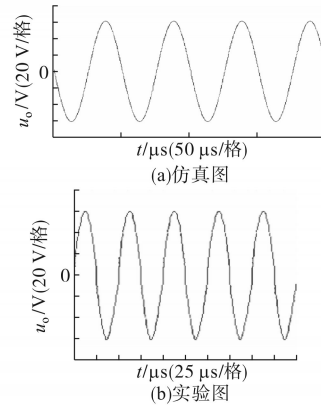


图10 负载电阻为10 Ω 时系统输出电压稳态波形
Fig.10 System output voltage steady state waveforms when load resistance is 10 Ω

由图10和图11可以看出,稳态时不同负载电阻下系统输出电压幅值保持不变;由图12可以看出,当负载电阻突变时,系统输出电压略微发生波动后又快速恢复到原值,恒压输出特性良好。结合输出电压稳态与突变情况可说明本系统输出电压在稳态、瞬时情况下均具有良好的负载无关性,与理论分析相一致。

负载电阻分别为10 Ω 和30 Ω 时,系统逆变器的输出电压 u_{in} 与输出电流 i_{in} 分别如图13和图14所示。

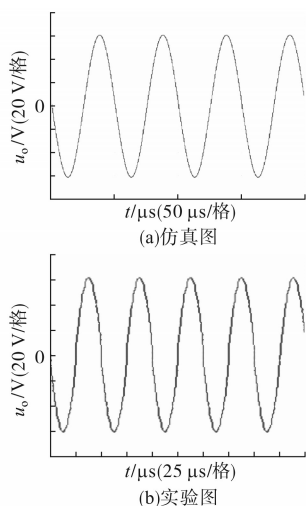


图 11 负载电阻为 30 Ω 时系统输出电压稳态波形
Fig.11 System output voltage steady state waveforms when load resistance is 30 Ω

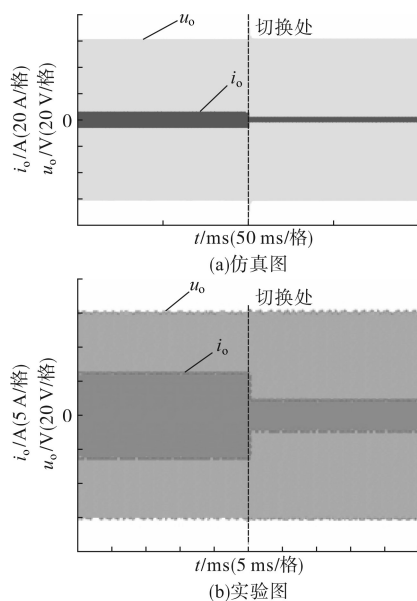


图 12 负载电阻从 10 Ω 突变到 30 Ω 时系统输出电压与输出电流波形
Fig.12 System output voltage and output current waveforms when load resistance changes from 10 Ω to 30 Ω

由图 13 与图 14 可以看出,在不同负载电阻下系统逆变器输出电压 u_{in} 与输出电流 i_{in} 都保持同相位,说明系统在不同负载下始终具有单位功率因数输入特性。

综合上述仿真和实验过程,验证了当系统工作在谐振角频率时,动态负载下系统输出电压恒定,且系统同时具有单位功率因数输入特性,与理论分析相吻合,证实了本文理论分析的正确性与有效性。

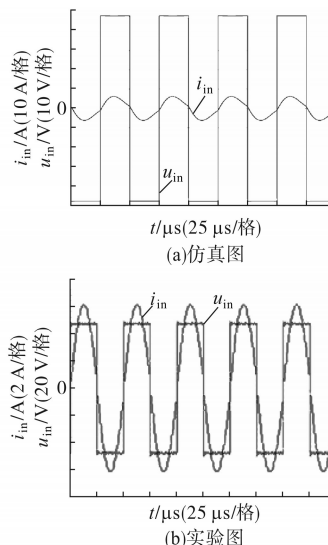


图 13 负载电阻为 10 Ω 时逆变器输出电压与输出电流波形
Fig.13 Output voltage and output current waveforms of inverter when load resistance is 10 Ω

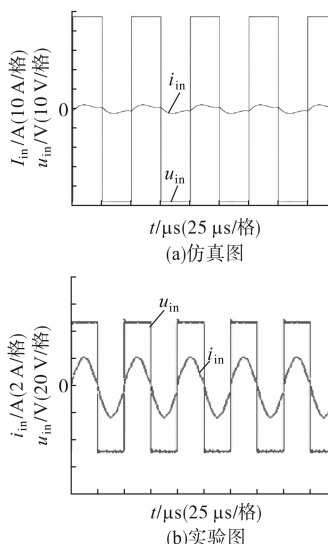


图 14 负载电阻为 30 Ω 时逆变器输出电压与输出电流波形
Fig.14 Output voltage and output current waveforms of inverter when load resistance is 30 Ω

3 结论

本文提出了一种基于双 T 型补偿网络的电动汽车无线充电系统,并对其特性进行了深入研究。不需要增加闭环控制电路和动态调谐电路,当系统谐振时即可实现系统输出电压负载无关性以及单位功率因数输入特性;根据特性分析过程给出了系统一般性设计所需的流程图;通过仿真和实验验证了理论分析的正确性与有效性。

参考文献

- [1] 章桐,贾永轩. 电动汽车技术革命[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [2] 赵争鸣,刘方,陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20):30-40.
- [3] Madawala U K, Thrimawithana D J. A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10):4789-4796.
- [4] Zhang W, White J C, Abraham A M, *et al.* Loosely Coupled Transformer Structure and Interoperability Study for EV Wireless Charging Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11):6356-6367.
- [5] Ren X, Chen Q, Cao L, *et al.* Characterization and Control of Self-oscillating Contactless Resonant Converter with Fixed-Voltage Gain [C]//Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2012:1822-1827.
- [6] 孙跃,李玉鹏,唐春森,等. 具有恒流恒频恒压特性的 IPT 系统参数设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3):57-62.
- [7] Hu A P. Selected Resonant Converters for IPT Power Supplies [D]. New Zealand: Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Auckland, 2001.
- [8] 张炯,楼佩煌,钱晓明,等. 基于双LCL补偿的无接触供电系统研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10):19-24.
- [9] 孙跃,张欢,唐春森,等. LCL型非接触电能传输系统电路特性分析及参数配置方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8):103-107.
- [10] 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.
- [11] Su Y G, Xie S Y, Hu A P, *et al.* A Capacitive Power Transfer System with a Mixed-resonant Topology for Constant-current Multiple-pickup Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11):8778-8786.

收稿日期:2018-07-13

修改稿日期:2018-08-11

作者告知书

本刊自2019年8月起,加入OSID(英文全称open science identity,简称OSID)开放科学计划。OSID开放科学计划是由国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室发起的,面向学术期刊行业的一项开放科学公益性计划。

每篇论文将拥有专属的OSID码,作者可在码内对论文作者、研究背景、学术价值等问题进行语音阐述,也可上传论文的补充性数据与材料(图片或视频),使论文成果更加立体化展现,增强论文质量,提升论文的阅读量、下载量和引用率,扩大论文和作者的影响力。此项计划能帮助作者提升论文影响力,拓展学术人脉与资源。

《电气传动》编辑部