

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.5.325

中图分类号: TM552

文献标志码: A

应用于车载充电机的三相四线制差共模集成电感

——一种带“准十字”差模磁支路的差共模集成电感

杨海军(中国电源学会会员), 卢增艺

(台达电子企业管理(上海)有限公司磁技术研发部, 上海 201209)

摘要: 随着环保、节能意识不断深入人心, 对新能源电动汽车及其车载充电机的要求越来越高。磁性元件作为车载充电机中一类重要的元器件, 也相应获得越来越广泛的关注与研究。针对车载充电机抗电磁干扰滤波电路中三相四线制差共模电感的集成进行理论分析和研究。基于电源应用背景、差共模电感集成原理及业界和学术界已有集成方案的对比分析, 提出 1 种采用“准十字”差模磁支路的三相四线制差共模集成电感, 通过对集成电感单体的磁场特性分析、偏磁情况下的电气性能研究及上机测试, 验证了所提集成方案的有效性, 可显著减小三相不平衡电流情况下差模磁支路的偏磁问题并有效帮助电源改善抗电磁干扰性能。

关键词: “准十字”; 磁集成; 差模; 共模; 三相四线制

Integration of DM and CM Chokes for 3P4W in the Application of On-board Charger: Integration of DM and CM Chokes with Quasi-cross DM Magnetic Branches

YANG Haijun, *Member, CPSS*, LU Zengyi

(MSBU, Delta Electronics(Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201209, China)

Abstract: In the background of environment protection and power-saving awareness, the requests for new energy electric vehicles and their on-board charger(OBC) keep growing. As one of the important components in the OBC module, magnetics is getting more and more attention accordingly. The magnetics integration of differential mode(DM) and common mode(CM) chokes for a 3-phase 4-wire(3P4W) electromagnetic interference(EMI) filter used in OBC is theoretically analyzed and studied. Based on the analysis and comparison of the background of power supply applications, the integration principle for DM and CM chokes, and the available integration schemes in industry and academia, an integration of DM and CM chokes for 3P4W with quasi-cross DM magnetic branches is proposed. Through the magnetic flux simulation analysis, electrical characteristics under DC-bias and the on-board tested data, the effect of the magnetics integration scheme was proved, i.e., it can obviously decrease the DC-bias on DM magnetic branches in the case of unbalanced 3-phase current and effectively improve the anti-EMI performance of power supply.

Keywords: Quasi-cross; magnetics integration; differential mode(DM); common mode(CM); 3-phase 4-wire(3P4W)

随着新能源汽车市场需求的高速增长, 车载充电机电源也蓬勃发展起来。车载充电机的功率级架构通常为四级, 由输入 EMI 滤波电路、PFC 功率因数校正电路、LLC 电路或 Boost SRC 电路和输出 EMI 滤波电路级联形成, 其 EMI 通常要求满足

CISPR25 Class 3 或更高标准。因为车载充电机电源对高效率、高功率密度及小体积、轻质量、低成本的持续追求, 其 PCB 板的布局均较紧凑, 每颗元器件的设计与布置均需充分考虑其尺寸大小和与其他元器件之间的相对位置关系。本文主要针对单/三相兼容的三相四线制 EMI 滤波器中的电感进行研究, 特别是对 1 种差共模集成^[1-3]电感进行分析和

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-05-22, 2022-06-02;
录用日期: 2022-06-21; 网络首发日期: 2022-08-18

讨论。首先对业界及学术界常用的三相三线制和三相四线制 EMI 共模滤波电感惯用的差模磁支路设计方式进行了调研,即其常采用一体成型的“Y”字形^[4,6]或“十”字形^[7-8]磁体,或采用分相(也包含中性线)磁体(即“分线式”方案)^[9-11]的设制方式,以此来提升差模感量和差模阻抗,增强 EMI 滤波器对差模干扰的滤除效果,但每条磁支路均是独立的,导致其对工频电流偏置较为敏感,即当三相电流不平衡时,极易发生差模磁支路的偏磁问题,甚至影响到共模磁支路的饱和^[12],导致共模阻抗的显著降低,恶化 EMI 性能。本文就以上问题提出了 1 种新型差共模集成方案,以期可以同时满足提高差模阻抗和减小三相工频电流不平衡时的差模磁支路偏磁问题。

1 “准十字”差模磁支路差共模集成电感

为了兼顾单/三相工作的需要,EMI 滤波电感需采用三相四线制,即单相工作时为两线制(一相线和一中性线),三相工作时为四线制。为高效、充分地利用充电桩 PCB(print circuit board)板上的紧凑空间,差共模集成的 EMI 滤波电感变得不可或缺。三相四线制 EMI 滤波电路示意如图 1 所示,从左到右由差共模电容 1、差共模电感 1、差共模电容 2、差共模电感 2、差共模电容 3 等五级电路串联形成,对差共模电感集成是 OBC 电源减小体积和质量的重要方法之一。

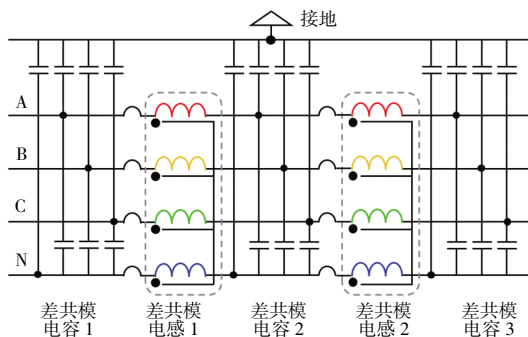


图 1 三相四线制 EMI 滤波器示意

Fig. 1 Schematic of EMI filter for 3P4W application

分析发现,无论是“分线式”差模磁支路方案,还是“Y”字形或“十”字形集成方案,其实质均为“分线式”结构。尤其是三相四线制,当三相电流不平衡时,此集成方案将会导致较严重的偏磁问题。从三相四线制绕组电流的时域关系出发,通过算式演化,从而提出对磁通有纠偏效果的“准十字”差模磁支路集成方案。

四线电流和为 0(或趋于 0),三相四线制电流的时域关系为

$$N(t)+A(t)+B(t)+C(t)=0 \quad (1)$$

传统的差共模集成如前所述,均是将式(1)单线上的电流作为研究对象,以 N 线为例可得

$$N(t)=-[A(t)+B(t)+C(t)] \quad (2)$$

从而在较大电流偏置那一线上将产生较大的偏磁,进而影响到差共模集成电感阻抗特性的稳定性。针对上述固有缺陷,本文提出 1 种全新的算式重组方案,即将式(1)中的任意相邻两线作为 1 个整体(设定 4 个绕组在共模磁路上的排列次序为 $A-B-C-N-A$),即 N/C 对 A/B ,得

$$N(t)+C(t)=-[A(t)+B(t)] \quad (3)$$

N/A 对 B/C 同理,不再赘述。基于式(3),并与式(2)进行对比分析:假定三相电流不平衡, A 相电流 X , B 相正偏 $+a\%$, C 相负偏 $-a\%$,从而在式(2)“十”字形最大相偏差 B 相中的磁通正比于 $X(1+a\%)$,而式(3)“准十字”体的偏差分析如图 2 所示,以 N/C 对 A/B 为例,通过对三相电路电流相量的分析,可得 A/B 的矢量和为

$$\sqrt{\left(X-\frac{1}{2}Y\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}Y\right)^2}=\sqrt{X^2+Y^2-XY}=X\sqrt{1-(1+a\%)+(1+a\%)^2} \quad (4)$$

式中: X 为 A 相电流; Y 为 B 相电流, $Y=X(1+a\%)$ 。

如图 3 所示,是根据式 $Y=X(1+a\%)$ 和式(4)的图形具化,本文新提出的“准十字”差共模集成方案较已有的“十”字形差共模方案在以下方面具有明显优势:①对不平衡电流的纠偏效果;②仅需采用简单结构的磁体按“准十字”叠合或卡合,可以使用高相对磁导率、低相对磁导率、块状、条状、片状等

艺,可优选高相对磁导率片状的硅钢片。

图 3 中,灰色实线表示“十”字形差模磁体磁通偏差比例与电流偏置量 $\alpha\%$ 的关系,黑色实线示意“准十字”形差模磁体磁通偏差比例与电流偏置量 $\alpha\%$ 的关系,虚线为黑色实线偏差比例与灰色实线偏差比例的相对比值。可知,在最大相电流正向偏置小于 25% 以内,“准十字”结构的差共模集成电感的差模磁支路磁通偏置量比“十”字形减小 45%,即新提出的集成方案不仅解决了差模磁支路制造的难题,还使 EMI 集成电感的抗偏磁能力提高约 80%。

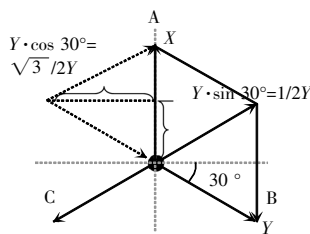


图 2 三相电路电流相量

Fig. 2 Vector for 3-phase current

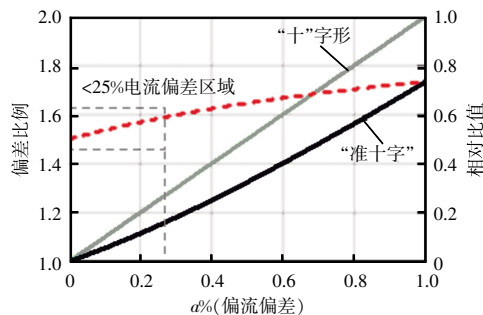


图 3 “准十字”与“十”字形差模磁体对偏置电流的适应性

Fig. 3 Comparison of current-bias adaptability between quasi-cross and cross-type DM magnetic branches

2 差模磁支路的各种适应性变形

本文提出的新型集成方案主要基于四线电流和时刻为 0 的条件,通过算式演化并用磁支路叠合或卡合的积木方式重构差模磁支路与共模电感的集成。图 4~图 6 所示为几种典型的差模磁支路磁体的变形。其中图 4 为叠合式,可以为条状或棒状的差模磁支路磁体;图 5 为块状卡合式,可以为各种压合成型的结构;图 6 为片材叠装型卡合式,可为各种片状材料叠装成型的卡合式结构,如硅钢、

纳米晶或非晶等。针对各种差模磁支路磁体的推荐性适用范围见表 1。

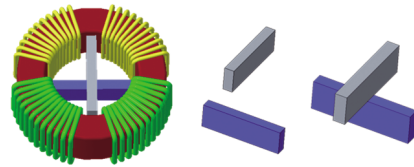


图 4 叠合式

Fig. 4 Type of stacked bars

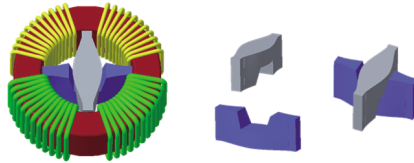


图 5 块状卡合式

Fig. 5 Type of clamped blocks

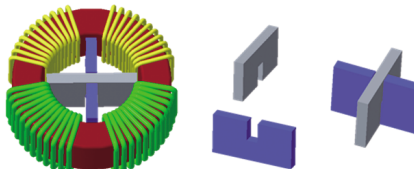


图 6 片材叠装型卡合式

Fig. 6 Type of clamped sheet-stackings

表 1 差模磁支路的推荐适用材料

Tab. 1 Recommended applicable materials for DM magnetic branches

图例	组装结构	推荐适用的材料
图 4	叠合式	铁氧体、磁粉芯、硅钢、纳米晶/非晶等
图 5	卡合式	铁氧体、磁粉芯等
图 6	卡合式	硅钢、纳米晶/非晶等

图 4 所示的叠合式结构,其适用范围最广,可以涵盖目前业界可用的几乎所有磁芯材料,如铁氧体、磁粉芯、硅钢和纳米晶/非晶等,且制造简单,但因其横截面较小,并未充分利用好共模磁芯内部的有效空间,故对差模电感及差模阻抗的提升有限。

图 5 所示的块状卡合式结构,其适用范围主要为铁氧体和磁粉芯等易于压铸成型的材料,其横截面较大,差模电感及其阻抗增加明显,有较广泛的应用。

图 6 所示的片材叠装型卡合式结构,其适用范围主要是片材叠装成型的材料,因卡合点处的截面有限缩,其差模磁支路优选高饱和磁密材料,以提

高差模电感及其阻抗,也具有一定程度的抗饱和特性,如硅钢、纳米晶/非晶等。

对于三相四线制的应用,“准十字”差共模集成电感相对于差模电感和共模电感分离元件设计,减少了 4 颗差模电感的体积和质量;相对于传统“分线式”集成,有效减小了不平衡偏置电流的影响,且使差模磁支路的制作和安装大为简化。

3 案例分析

本文就单/三相兼容的 11 kW 车载充电机 EMI 特性及其对 EMI 滤波电感的要求进行分析。原始设计采用环形铁氧体磁芯 $\Phi 51.5 \times 31.5 \times 16.0$, 相对磁导率 $\mu_r = 10\,000$, 共 4 个绕组, 每一绕组匝数为 11, A 相和 N 线采用 $\Phi 2.1$ 铜线, B 相和 C 相采用 $\Phi 1.5$ 铜线。在三相平衡及充电机满功率 11 kW 运行下, 每一相线上的峰值电流为 22.54 A, 考虑 10% 的电流不平衡度, 即 A 相电流 22.54 A, B 相 24.84 A, C 相 20.24 A, 此时 N 线上为 3.98 A。

本文对比分析了原始与添加“准十字”磁支路磁体的差模电感特性, 其“准十字”磁体材料采用硅钢片, 材质为 B50A470, 最大磁通密度 $B_{\max} = 1.5$ T, 尺寸为 $29.5 \text{ mm} \times 18.0 \text{ mm}$, 7 片叠合厚度为 3.5 mm, 如图 7 和图 8 所示, 可见其差模电感量显著增加。

仿真分析和对比了“十”字形与“准十字”差模磁支路在上述三相不平衡电流下的磁通特性, 如图 9 所示, 可见“准十字”结构的差模磁支路除了制造简单外, 还优化了磁通的分布并增强了抗偏磁能力, 与第 2 节理论分析吻合。其简洁的卡合式组装工艺, 也使此技术易于推广和使用。

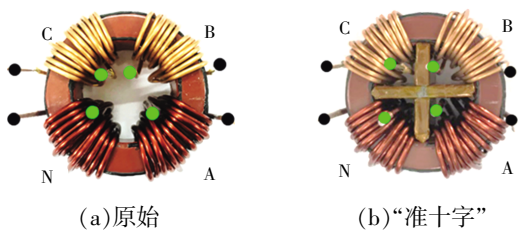


图 7 原始与“准十字”片材叠片的集成电感对比

Fig. 7 Comparison between original inductor and quasi-cross clamped sheet-stacking integration

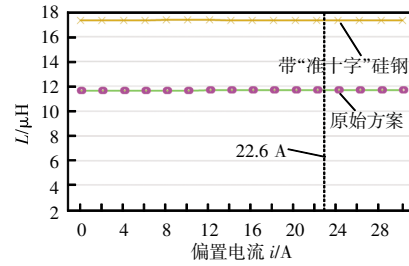


图 8 原始与“准十字”片材叠装的差模电感对比

Fig. 8 Comparison of DM inductance between original inductor and quasi-cross clamped sheet-stacking integration

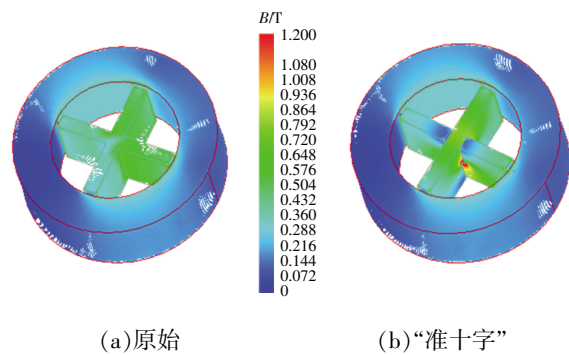


图 9 “十”字形与“准十字”结构的磁通分布对比

Fig. 9 Comparison of flux distribution between cross-type and quasi-cross structures

4 板载实验结果及推广

将“准十字”差共模集成电应用于单/三相兼容的 11 kW 车载充电机 EMI 滤波电路中, 并与原始的 EMI 测试结果进行对比, 结果如图 10(a)~(d) 所示。可见: 采用“准十字”硅钢片卡合式差模磁支路的差共模集成电感对车载充电机的差模抑制能力得到了提升, 在 150 kHz 频率点增强了 15~22 dB 的 EMI 抑制能力, 证明了前文理论分析的正确性。

叠合式或卡合式差模磁支路磁体结构, 可进一步推广应用于更多线制的电源中, 如 6 线制、8 线制等。以 6 线制为例, 仅需满足 6 线上的实时电流和为 0 或近似为 0, 即可沿用此设计概念, 如图 11 所示。图 11 左侧的差模磁支路叠合或卡合在各磁支路的同一位置, 也可以如右侧图所示, 两两叠合或卡合在磁体的不同位置, 而不影响本方案的实质, 可根据具体情况选择使用。

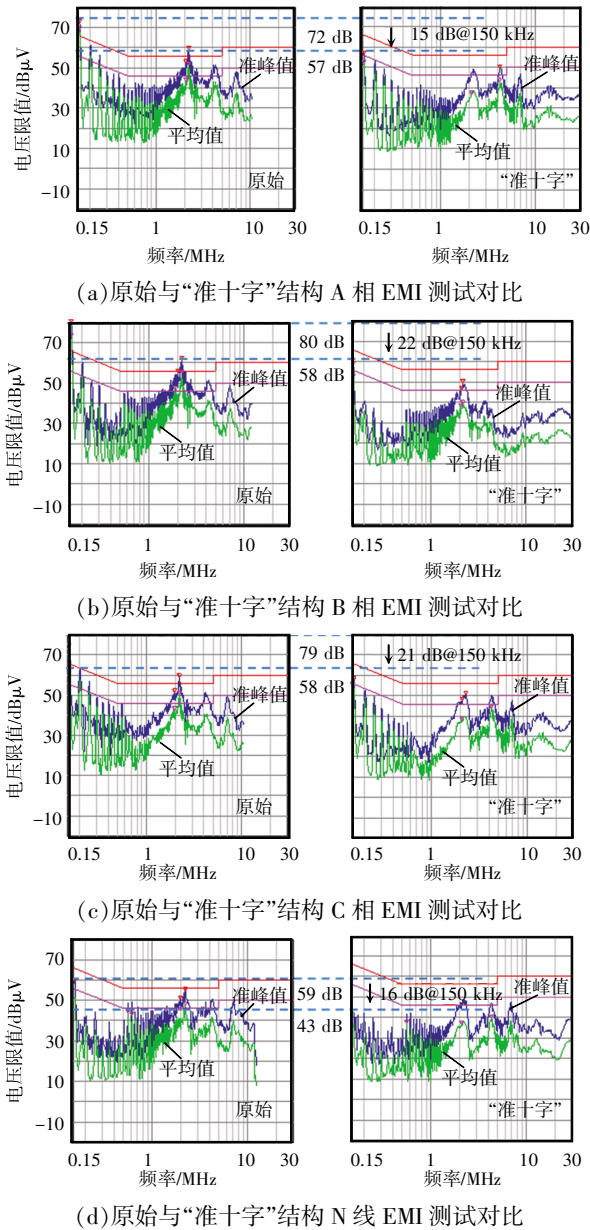


图 10 原始与“准十字”结构 A 相、B 相、C 相和 N 线 EMI 测试对比

Fig. 10 Comparison of EMI result between original inductor and quasi-cross structure in phases A-C and Neutral-N

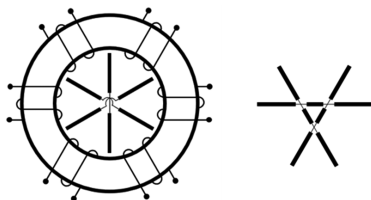


图 11 差模磁支路叠合或卡合式的 6 线制应用

Fig. 11 Stacked or clamped structure for DM magnetic branches in 6-wire application

5 结论

本文针对 1 种新型的应用于单/三相兼容车载充电机的差共模集成电感进行了理论分析、仿真对比和实际板上机测试等,证明了所提采用“准十字”差模磁支路的差共模集成方案的有效性,简化了生产工艺并增强了集成电感的抗偏磁能力。结论如下。

(1)应用于车载充电机的三相四线制电路,其对体积、质量等较敏感,充分利用共模电感内部的空置空间,相对于分离元件,可有效减小体积和质量,实现集成,提高功率密度;相对于传统的“分线式”集成方式,亦可有效降低不平衡电流的偏置影响,且使差模磁支路单体易于生产制作且便于与共模电感组装。

(2)“准十字”差模磁支路,可以采用叠合式或卡合式结构,其设计可以涵盖业界所能提供的几乎全部磁材料,包括铁氧体、磁粉芯、硅钢和纳米晶/非晶等。

(3)叠合式或卡合式的“准十字”差共模集成方法,可进一步推广应用到更多线制的电路中,如 6 线制等。

参考文献:

[1] 杨玉岗,陈晓静,靳明智. 椭圆形平面无源集成 EMI 滤波器的特性研究[J]. 电源学报, 2017, 15(3): 44-49.
 Yang Yugang, Chen Xiaojing, Jin Mingzhi. Characteristics research for elliptic planar passive integrated EMI filter [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(3): 44-49 (in Chinese).

[2] 李洪珠,张垒,王俏,等. 一种双磁芯差共模电感集成 EMI 滤波器[J]. 电力电子技术, 2016, 50(2): 97-100.
 Li Hongzhu, Zhang Lei, Wang Qiao, et al. An EMI filter integrated by dual core common-mode inductance [J]. Power Electronics, 2016, 50(2): 97-100 (in Chinese).

[3] 温志伟,伍晓峰,徐德鸿,等. 集成 EMI 滤波器原理与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 160-166.
 Wen Zhiwei, Wu Xiaofeng, Xu Dehong, et al. Principles

- and design on integrated EMI filters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 160-166 (in Chinese).
- [4] 旺施 B, 德罗费尼克 U, 施其宾 S, 等. 用于多相电感器的磁性调整部件: 中国, CN110462758A[P]. 2019-11-15. Wunsch B, Drofenik U, Skibin S, et al. Magnetic adjustment member for multi-phase inductor: China, CN110462758A [P]. 2019-11-15 (in Chinese).
- [5] Todd S. Common mode, differential mode three phase inductor: US, US7768373B2 [P]. 2010-08-03.
- [6] Todd S. Adjustable integrated combined common mode and differential mode three phase inductors and methods of manufacture and use thereof: US, US9613745B2 [P]. 2017-04-04.
- [7] 钟显华. 三相四线宽频复合电感: 中国, CN204424030U [P]. 2015-06-24. Zhong Xianhua. Three-phase four-coil broadband compound inductor: China, CN204424030U [P]. 2015-06-24 (in Chinese).
- [8] 佐伯英人, 梁志勇. 一种环形电感: 中国, CN106158250A [P]. 2016-11-23. Hideto S, Liang Zhiyong. Annular inductor: China, CN106158250A [P]. 2016-11-23 (in Chinese).
- [9] 郑庆杰, 曹小昆. 一种三相差共模集成电感: 中国, 专利号 CN208335914U[P]. 2019-01-04. Zheng Qingjie, Cao Xiaokun. Three common mode integrated inductor that differ: China, CN208335914U [P]. 2019-01-04 (in Chinese).
- [10] 杨达, 张绪继, 刘茂金. 一种三相交流差模和共模一体化平面磁芯结构: 中国, CN204834277U[P]. 2015-12-02. Yang Da, Zhang Xuji, Liu Maojin. Planar magnetic core structure of three-phase AC differential mode and common mode choke integration: China, CN204834277U [P]. 2015-12-02 (in Chinese).
- [11] 叶飞, 石磊. 集成电感: 中国, CN107293389B[P]. 2019-06-21. Ye Fei, Shi Lei. Integrated inductor: China, CN107293389B [P]. 2019-06-21 (in Chinese).
- [12] 蒋胜勇, 赖永学, 胡春元, 等. 共模及共模/差模一体化滤波电感饱和问题[J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(2): 62-64, 67. Jiang Shengyong, Lai Yongxue, Hu Chunyuan, et al. Study on magnetic saturation of common and common-differential mode choke [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2011, 42(2): 62-64, 67 (in Chinese).

作者简介:

杨海军(1982—),男,中国电源学会会员,通信作者,硕士,高级工程师。研究方向:电力电子功率变换技术及高频磁技术。E-mail:songlinnavy@163.com。

卢增艺(1979—),男,博士。研究方向:电力电子高频磁技术。E-mail:zengyi.lu@deltaww.com。



杨海军