DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.10 中图分类号：TM46 文献标志码：A

基于 LLC 谐振变换器的开关电源优化方法综述

谷彦洁(中国电源学会学生会员)，于人杰，张 岩(中国电源学会会员)
(西安交通大学电气工程学院，西安 710049)

摘要：开关电源 SMPS(switch mode power supply)中的 DC-DC 变换器是影响装置体积质量和工作效率的核心。LLC 谐振变换器作为经典的 DC-DC 拓扑结构，其运用软开关技术和磁集成技术，具有高效率、高功率密度及抑制谐波等特点。从变压器绕组结构方案和控制拓扑优化方案出发，综述了应用于开关电源中的 LLC 谐振变换器的优化方法研究现状，并针对同步整流和APR(all-primary-referred)磁集成模型下平面变压器对电路的影响提出自身见解，最后依据第三代宽禁带材料及电磁兼容性进行优化方法的展望。

关键词：软开关技术；同步整流；磁集成；宽禁带材料；电磁兼容

Review of Optimization Methods for Switch Mode Power Supply Based on LLC Resonant Converter

GU Yanjie, *Student Member*, *CPSS*, YU Renjie, ZHANG Yan, *Member*, *CPSS*
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xianyang 712000, China)

Abstract: The DC-DC converter in a switch mode power supply (SMPS) is the core part that affects the device's volume, weight and working efficiency. As a classic DC-DC topology, the LLC resonant converter uses the soft switching technology and magnetic integration technology, which has characteristics such as a high efficiency, a high power density and harmonics suppression. The research status of optimization methods for LLC resonant converters applied in SMPS is reviewed, starting from the transformer winding structure schemes and control topology optimization schemes. In addition, suggestions on the effects of synchronous rectification and the planar transformers under an all-primary-referred (APR) magnetic integration model on the circuit are given. Finally, the optimization methods based on the third-generation wide bandgap material and electromagnetic compatibility are prospected.

Keywords: Soft switching technology; synchronous rectification; magnetic integration; wide bandgap material; electromagnetic compatibility

开关电源是一种高频化电能转换装置，当输入为交流电压时，经整流滤波可获得指定数值的高质量直流电，经 DC-DC 变换装置即可得到宽范围可调节的输出直流电[1]。开关电源具有体积小、效率高且供电稳定性好等优点，常用在国防航空航天、移动通信和分布式电源等领域，以保证电气设备的安全运行[2]。

DC-DC 变换器的发展方向之一即高频化[3]，频率的提高伴随着诸多问题。由于硬开关电压尖峰较大以及开关管的交越损耗随频率的增大而增大，开关管的高数值电压变化率及电流变化率使得系统的电磁干扰 EMI(electromagnetic interference) 更加严重，因此必须采用软开关技术实现高频化。LLC 谐振变换器运用软开关技术，使开关变换器中的电流或电压按照正弦或者准正弦规律变换，当其经过零点时使开关器件开通或关断，以达到开关损耗为 0 的目的[4]。应用于 LLC 谐振变换器的常见拓扑结构有半桥及全桥 2 种，在此

收稿日期：2023-06-14；**修回日期：**2023-08-15；**录用日期：**2023-10-20；**网络首发日期：**2024-01-19
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601503)
This work is supported by National Key R&D Program of China under the grant 2021YFB2601503

基础上可再结合双向、多电平及多相技术。LLC 谐振变换器作为一种典型的双端谐振 DC-DC 拓扑，具有显著的优势，可适用于多种电路结构及工业应用领域，如开关电源、机载雷达、基站电源及交流传动电力机车充电机等[5-6]。

本文希望在保证电能质量的前提下进一步探索基于LLC谐振变换器的开关电源优化方法，目的在于降低设备的电路损耗和磁路损耗。首先，分析LLC谐振全桥变换器的工作原理。其次，依据变压器绕组结构方案和控制拓扑优化方案，总结得出应用于开关电源中的 LLC 谐振变换器的各类优化方法。然后，在新一代智能开关电源中，采用同步整流技术提高能效[7]，采用可控器件代替二极管降低电路损耗；变压器工艺的限制导致漏感数值难以控制，采用APR平面变压器磁集成模型分析测算，能实现以LLC谐振变换器作为拓扑结构的 DC-DC 变换装置的量产化，高效、便捷、易操作的同时降低了变压器磁损；同时探讨同步整流现存问题、驱动创新技术及现有工艺绕组绕制下漏感精度对电路工作的影响。最后，依据第三代宽禁带材料和电磁兼容性讨论优化方法的发展趋势。

1　LLC 谐振全桥变换器

1.1　LLC 谐振全桥变换器的工作原理

相比于传统的串联谐振变换器和并联谐振变换器，LLC 谐振变换器既具有谐振电流随负载轻重变化的特点，又具有小范围内拐点频率的调节即可实现输出电压的调节的特点。虽然其设计结构复杂，但由于芯片领域控制器的发展，LLC 谐振变换器逐步成为最受欢迎的主功率拓扑。LLC 谐振变换器有 2 个谐振频率[8]，其中一个是由谐振电感 L_r 和谐振电容 C_r 形成的谐振频率 f_r，另一个是由 L_r、C_r 及励磁电感 L_m 形成的谐振频率 f_m，即

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_rC_r}} \tag{1}$$

$$f_m=\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r+L_m)C_r}} \tag{2}$$

LLC 谐振变换器的开关频率 f 有 3 个变化范围：$f_m<f<f_r$，$f=f_r$，$f>f_r$。当 LLC 谐振变换器工作在 $f_m<f<f_r$ 范围时，整个变换器工作在感性模式下，其电流相位滞后于电压相位，在驱动信号到来之前，开关管并联的体二极管已提前导通，零电压开通 ZVS(zero voltage switch)得以实现；当谐振变换过程中励磁电流与谐振电流相等时，整流二极管零电流关断 ZCS(zero current switch)得以实现[9]。以可控器件下全桥谐振变换器为例，分析 4 个工作阶段。可控开关管漏源电压及栅源电压、原边谐振电流及励磁电流、副边电流波形如图 1 所示，可控器件下 LLC 谐振变换器电路拓扑状态如图 2 所示。

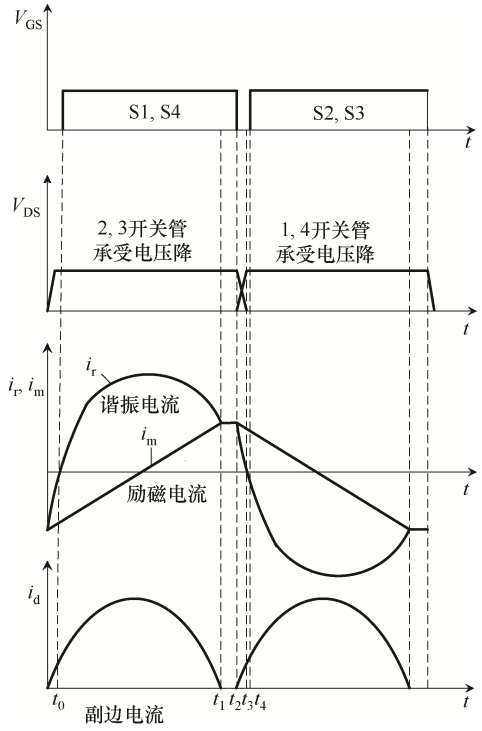


图 1　可控开关管漏源电压及栅源电压、原边谐振电流及励磁电流、副边电流波形

Fig. 1 Waveforms of drain-source voltage and gate-source voltage in controllable switch, primary resonant current and excitation current, and secondary-side current

阶段 1(t_0~t_1)，$i_r>i_m$，即谐振电流大于励磁电流，此时变压器一次侧有电流流过，即二次侧存在导通电流。由于励磁电感两端受到变压器侧的钳位作用，参与谐振的仅为谐振电容和漏感，因此谐振频率为 f_r，一般取 $i_r=i_m$，即 t_0 时刻作为整流端对应开关管的导通时刻，t_1 时刻作为整流端对应开关管的关断时刻，编写驱动程序可进一步减少电路的开关损耗。

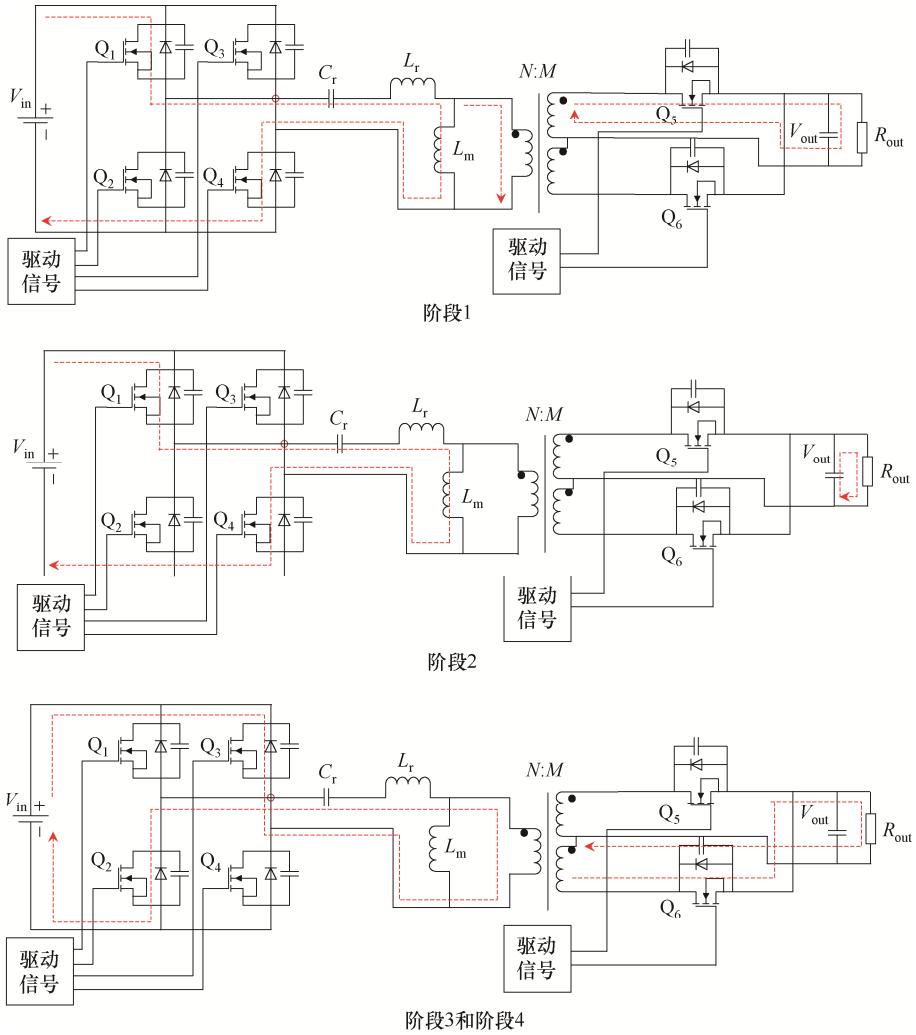


图 2 可控器件下 LLC 谐振变换器电路拓扑状态

Fig. 2 Circuit topology states of LLC resonant converter under controllable devices

阶段 2(t_1~t_2)，全桥 LLC 谐振变换器的优势在于零电压导通和零电流关断，逆变侧的开关管导通时其两侧的体二极管已提前导通，而在谐振过程中谐振电流 i_r 逐渐减小至等于 i_m，此时变压器一次侧丧失电流，二次侧由滤波大电容为负载供电，由于钳位的消失，参与谐振的器件为谐振电容、漏感及励磁电感，谐振频率为 f_m。

阶段 3(t_2~t_3)和阶段 4(t_3~t_4)，由于 t_2 时刻整流侧开关管驱动信号关断，电流方向不能立刻改变，出现电容充放电，因此当另一对开关管两端电压放电至 0 时，体二极管导通，满足零电压导通条件。因为一次侧电流变化率为负值，二次侧电压反向，所以 t_2 时刻逆变侧另一对开关管导通。

1.2 LLC 谐振全桥变换器的特性

(1)频率特性：工作在谐振频率 f_r 处时，不受品质因数 Q 和负载的影响，输出特性较好。

(2)短路特性：若遇到短路故障，增加变换器的工作频率 f 可以限制输出电流的增加。

(3)动态特性：输入量发生突变时能较快地恢复至稳定工作状态，具有良好的动态特性。

1.3 LLC 谐振全桥变换器的优点

LLC 谐振全桥变换器具有高效率、高功率密度、电气隔离、较低电磁干扰、较低谐波污染、较低器件应力、宽范围输入和输出、高频特性等优点，能够解决诸多 DC-DC 变换器存在的音频噪声问题，应用范围广泛，无论是轻载还是重载

均能投入使用[10]。

2　优化方法的研究现状

2.1 变压器绕组结构方案

LLC 谐振变换器中的变压器绕组结构方案以平面变压器、矩阵变换器及整体设计为优化侧重点，不同前沿优化方法对应的实验样机数据见表 1。

为设计优化LLC谐振变换器的整体装置效率[11]，需从 4 个改进点出发。首先，利用氮化镓 GaN(gallium nitride)器件和变压器形成调制隔离型两层级变换器；其次，将合并绕组式矩阵变压器用于磁通抵消，可以减少传统变压器中由于涡流现象、集肤效应和邻近效应造成的交流绕组损耗；然后，一、二次侧交流终端及流经路径的崭新设计被用于减少损耗和漏磁；最后，运用一维模型分析并采用对称绕组层来平衡电流分布。为改善尖峰处畸变严重的波形[12]，运用寄生电容模型分析得出的传统样机的上、下支臂谐振电流波形并不相同，由电压尖峰引起的位移电流将使谐振电流波形发生严重畸变，甚至导致开关管无法实现 ZVS，将分离式谐振腔与一次侧串联、二次侧并联的矩阵变压器相结合，能抑制电流畸变并实现 ZVS；为抑制共模噪声[13]，在绕制平面变压器绕组时采取成对层交错的方法替代笨重的共模扼流圈，使平面变压器保持扁平状，屏蔽具有高电压尖峰的问题匝数并交叠具有相同电压变化率的一、二次侧绕组匝数，对采用该方法绕制后的变压器建立六电容模型，分析得出流经一、二次侧绕组的循环电流被抑制且共模噪声几乎为 0，适用于高功率密度变换器的实现；为减小磁性器件的体积并降低整体磁心损耗[14]，将并联辅助开关管的谐振电容集成进入一次侧单匝串联、二次侧并联的矩阵变压器结构中，在一次侧绕组走中心磁柱的前提下比较二次侧绕组的 3 种方案，并采用二次侧中心抽头结构下的两级绕组交叠对称式绕法，以减少器件数和引脚数并提高功率密度和装置效率；为制作出涡流损耗与磁心损耗极低的精良磁心[15]，依据多维度谐振波长与磁心厚度选取工作频

表 1　变压器绕组结构方案实验样机数据对比

Tab. 1 Comparison of experimental prototype data under different schemes for transformer winding structure

引用文献	输入工况/V	最大功率/W	优化前性能	优化后性能
[11]应用于 48 V 电源转换器的 LLC 谐振变换器的整体优化设计	40~60	1 000	峰值效率为 90%左右	峰值效率提高至 97.8%
[12]结合矩阵变压器与分离式谐振腔的 1 000 V 输入的 SiC 式 LLC 谐振变换器	850~1 150	3 000/4 000	尖峰处波形畸变严重	波形畸变率降低了 68%
[13]应用成对层交错平面变压器的 LLC 谐振变换器	300	1 000	固定频率下选取的共模噪声幅值为 25 dB/μV	固定频率下选取的共模噪声幅值衰减接近 0 dB/μV
[14]应用于数据中心的LLC谐振变换器下矩阵平面变压器的优化设计	30	660	磁性器件总体引脚数多且元件数多，绕组损耗较大	引脚尺寸减小了 32.53%，阻抗减小且峰值效率达到 97.7%
[15]多维尺寸下的磁心损耗及高频磁件的优化设计	400	3 000	磁通分布不均且磁心损耗较大	提高功率密度并降低磁心损耗与涡流损耗
[16]低损耗集成式的电感和变压器结构及其在 48 V 母线转换器下调制型 LLC 谐振变换器中的应用	40~60	12	磁器件体积庞大笨重且效率低、损耗大	总体绕组损耗减小 38%，磁心损耗减小 30%以上
[17]应用于LLC谐振变换器的平面变压器高频边缘损耗模型的建立	150~350	62~175	边缘损耗将导致额外磁损和散热点	依据精确的边缘损耗模型设计气隙间距和气隙宽度，减小总体磁损

率范围，并实验测量不同材料下的电环渗透性曲线及铁心叠片介电常数曲线和交流磁导率曲线，以选取优良材料，通过 2 个 EI 磁心集成制作出一个矩形薄片 UI 磁心并结合平面多层状 PCB 绕组进一步提高装置密度、降低磁心损耗与涡流损耗；为减小绕组与磁心损耗[16]，可运用改进后的含 2 组绕组系列的 2 对并联变压器保证各磁性器件电流路径的对称相等，并结合由较小的 PCB 绕组和引脚构成的可控集成式谐振电感和片段式交叠绕法来降低总体绕组损耗和磁心损耗；为减小额外磁损和散热点[17]，对间隙平面变压器的磁心深入研究，当绕组与磁心间距远大于气隙距离时，针对由空气间隙引发的边缘磁通及损耗，建立模型和公式并校准精确度，依据公式计算优化后的结果，选取气隙间距及气隙宽度。

2.2 控制及拓扑优化方案

控制及拓扑优化方案主要从改进控制、设计新谐振网络参数及抑制共模噪声出发，以实现减缓冲击、增大输入电压范围、降低电压纹波、精确化设计参数并提高变换器功率密度等多种目的，不同前沿优化方法对应的实验样机数据见表 2。

为减小谐振电流冲击[18]，可采用结合 PWM+PFM 变占空比控制方法及降频控制方法，在软启动阶段实现电路中电流冲击的减小；为实现输出端恒频稳压[19]，可采用柔性电感作为谐振电感，依据输入电压的变化控制柔性电感磁偏置绕组中的控制电流，进而实现谐振频率能实时符合电压增益需求而无需额外调节磁性元件，并能保证宽范围输入电压下的恒频控制；为实现装置效率提高[20]，可采用改进型间歇控制方法，使驱动脉冲数保持为 3 的前提下沿最优途径实现能量传输，并利用电压环调节关断时间，能提高轻载时变换器的效率并有效降低输出电压纹波；为合理设计谐振参数[21]，通过公式推导出乘积因子 kQ 与一、二次侧导通损耗的函数关系，其中 k 为励磁电感与谐振电感之比，Q 为谐振网络的品质因数，根据给定电压增益确定最优乘积因子为 4 时的磁集成参数，该新型谐振网络参数设计既能满足参数精确化计算而非经验化选取，又能保证给定电压增益时变换器的效率达到最高；为抑制共模噪声[22]，可运用替代理论使两电容集总电容模型替代变压器，并令电压源与电流源替代相应器件，再运用叠加定理简化全桥 LLC 变换器共模噪声模型，通过该模型分析得出采用平衡电容可以进一步削减共模噪声，从而减小 EMI 滤波器的体积，实现高功率密度变换器；为提升峰值效率[23]，

表 2 控制及拓扑优化方案实验样机数据对比

Tab. 2 Comparison of experimental prototype data under control and topology optimization schemes

引用文献	输入工况/V	最大功率/W	优化前性能	优化后性能
[18]基于 PWM+PFM 的 LLC 谐振变换器软启动研究	60~200	200	谐振电流冲击较大	谐振电流冲击减小了 450%
[19]基于柔性电感的恒频控制 LLC 谐振变换器	23~35	200	输入电压变化时不能实现稳压输出	恒频稳压
[20]提高 LLC 谐振变换器轻载效率的改进型间歇控制	300~400	300	负载 5 W 工况下效率为 71.3%	负载 5 W 工况下效率提高至 88.2%
[21]LLC 谐振变换器的新型谐振网络参数设计方法	48	1 000	负载电流 0.5 A 工况下效率为 85%	负载电流0.5 A工况下效率提高至92%
[22]一种适用于全桥 LLC 变换器的共模噪声抑制方法	270	3 000	共模噪声幅值为 96.01 dB/μV	共模噪声幅值衰减至 76.47 dB/μV
[23]磁性控制下 LLC 谐振变换器的理性分析和设计	190~210	120	为适应连续性变化的开关频率及占空比，使得磁性元件和驱动电路设计较为复杂	磁性器件灵活可调，恒频稳压下实现最大效率 94.5%
[24]适应性直流电压控制下的 LLC 谐振变换器	350~420	350	所需工作频率范围较宽，损耗较大	工作频率范围缩短 8 kHz，峰值点效率提升 0.88%

将输出电压与预设值的比较值经 PI 环节转化为电流控制信号，并测量不同控制绕组匝数下的控制绕组损耗及直流偏置电流和柔性电感量的曲线图，以选取最佳控制绕组匝数；为缩短工作频率范围的同时避免输出振荡响铃现象并提升装置效率[24]，可运用结合同步整流技术的适应性直流电压控制下的两级控制器，第一级控制器将直流输入电压与开关管电流信号经功率因数校正控制器输出第一级频率控制信号保证输入端稳压，第二级控制器将直流输出电压与输出电流经预设值比较后通过频率控制器以保证工作频率稳定在谐振频率点附近，第三级互联计算维持输出电压与所需输入电压的恒定增益比。

2.3 依据调研现状所得见解及验证

近 5 年内国内外研究 LLC 谐振变换器的优化方法时大多集中于电路拓扑、控制方法及磁性元件结构的优化。

同步整流作为广泛运用的经典技术[25]，其驱动技术有电流驱动、电压驱动、原边同步驱动、芯片驱动及导通时间计算控制等方法。以功率 1 200 W 和输出 24 V/50 A 的开关电源为例，用英飞凌的 IPB-014N06NATMA1 整流管代替肖特基二极管后，正常工作时减少的损耗达 24 W，且效率提升 2%。由于采用的可控整流管存在寄生结电容，一旦发生振荡将导致二次侧同步整流管电流反冲，同时整流管漏源级也会遭受电压反冲，如何抑制冲击保护器件是未来同步整流的探索方向之一。经仿真验证，针对电压变换为 340 V-50 V、输出功率为 85 W 的基于同步整流的 LLC 谐振全桥变换器，选取有效的二次侧滤波电容[26]数值下的同步整流管电流反冲对比，如图 3 所示，该类现象将得到明显的改善，但现有驱动技术不足以应对，未来仍需通过驱动电路创新去攻克这类问题，且二次侧可控整流管侧驱动电路的 PCB 连线布局是变换器追求整体效率极致优化的工艺创新热点。

当网络谐振参数确定下来后，精密化磁集成器件制备工艺是制作 LLC 谐振变换器的核心，需要采用恰当的物理模型分析测算，以保证器件的精密

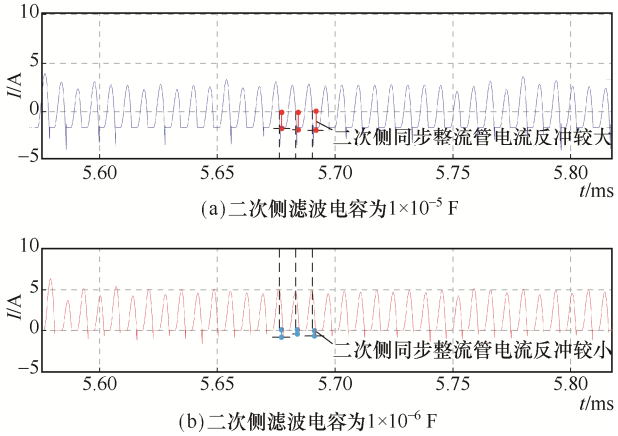


图 3　不同二次侧滤波电容数值下的同步整流管电流反冲对比

Fig. 3 Comparison of synchronous rectifier current kickback under different values of secondary-side filter capacitance

度。以 APR 平面变压器磁集成模型为例[27-28]，通过建模分析物理模型[29]参数与谐振参数的关系，再结合磁心绕制参数 A_σ 和 A_L 的函数关系式[30]，计算实际施工参数，即一、二次绕组匝数 N_1、N_2 和气隙厚度 l_G。由于 A_σ 是与铁心和绕组结构相关的“每平方转的特定漏感”，只取决于所选的铁心和线圈绕制的几何参数，因此在简化假设的基础上其表达式仍能提供相当准确的结果，具体为

$$A_\sigma = \frac{\mu_0}{6} l_W \frac{d_W + 2d_S}{d_H} \tag{3}$$

式中：μ_0 为与磁心相关的介质系数；l_W 为栅格(图中黑色隔板)的宽度；d_W 为不包含磁心厚度的磁心内部空间长度；d_S 为栅格的间隔长度；d_H 为不包含磁心厚度的磁心内部空间宽度(磁心内部的上半部分或下半部分的宽度)。变压器结构三视图如图 4 和图 5 所示。

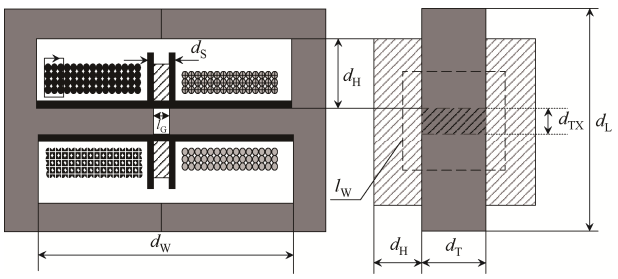


图 4　变压器结构主视图、左视图

Fig. 4 Main and left views of transformer structure

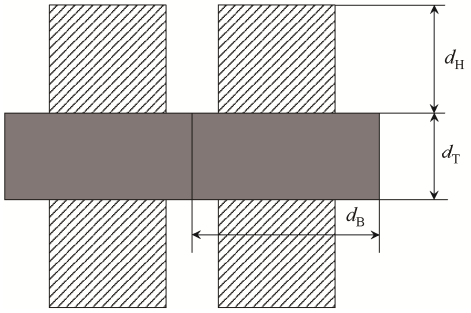


图 5 变压器结构俯视图

Fig. 5 Top view of transformer structure

经典的三明治绕法(一次和二次绕组交错绕制)可以有效降低漏感，但会增大寄生电容。寄生电容的产生是由于磁心绕组绕制的导线之间存在电压差，寄生电容表示为

$$C=\frac{aS}{4\pi kd} \tag{4}$$

式中：a 为常数；S 为截面积；k 为介质系数；d 为截面距离。若不控制寄生电容，则当能量转换时存储于寄生电容中的能量便会以尖峰的形式释放出来。仅针对变压器装置本身，当拉开绕组距离时，寄生电容数值减小，则漏感又因分布不均而增加。当绕制过程无法恒定控制绕组中每根导线的距离时，漏感和寄生电容数值便较难控制。

采用多层 PCB 技术的平面变压器结构如图 6 所示。由于每层 PCB 自身携带的铜片可以充当铜线绕组，且精密的 PCB 工艺可以保证铜片等距分布，因此可以通过调整绝缘层的厚度确定精确数值的漏感及寄生电容，方便 LLC 谐振变换器的量产化[31-32]，但因整体装置成本过大且铁心的高度不可能无限增大，所以寄生电容的数值难以控制到最优。

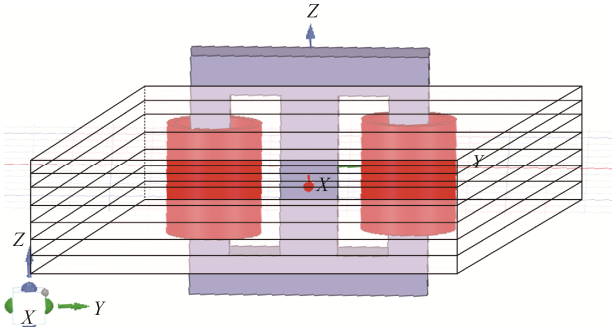


图 6 结合多层 PCB 技术的平面变压器

Fig. 6 Planar transformer combining multilayer PCB technology PCB structure

采用架空单层 PCB 结构并围绕中心磁柱绕制的平面变压器如图 7 所示。则可以在电压增益确定的情况下，选取特定品质因数下的电压增益三维曲面[33]与电压增益平面相交的特定曲线函数，如图 8 所示，将漏感与谐振电容的计算公式代入，并采用“预测-修正-校正-修正”等方法求解漏感最小值的最优组合点；依据最小漏感、谐振电容与励磁电感且针对“每平方转的特定漏感”A_σ 的公式进行绕组绕制，固定磁心的长和宽并拿去栅格间距(结合一、二次侧交错绕制法)，在经济成本最小的约束条件下确定内层绕组与铁心的距离、最外层绕组与铁心的距离；根据变比严格控制绕组匝数与间距的选取，并等距绕制每层绕组(保证变比的前提下匝数尽可能少)，选取性能优良的绝缘介质材料，保证漏感达到最小值的同时寄生电容数值较小，使得磁集成器件的磁损和热损降到

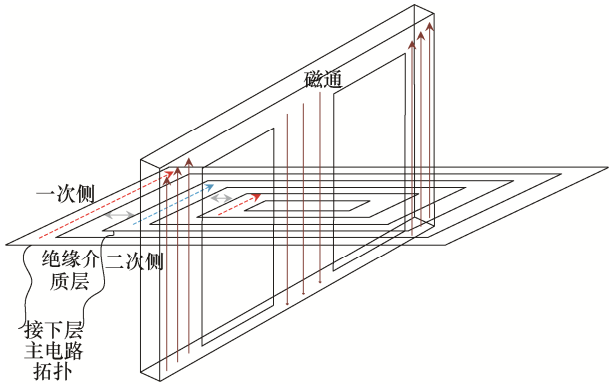


图 7 架空单层 PCB 结构的平面变压器

Fig. 7 Planar transformer with overhead single-layer

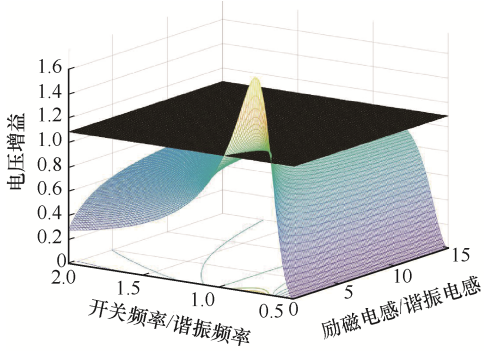
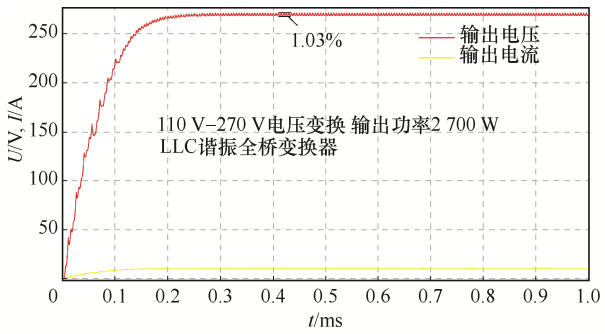


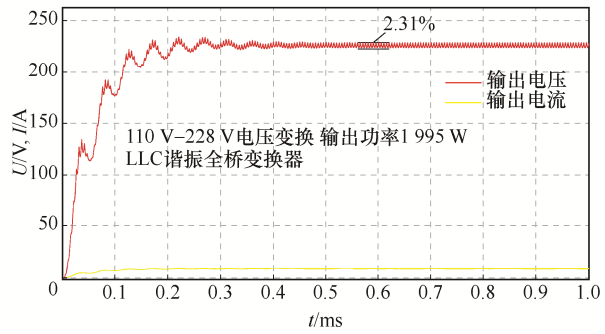
图 8 与电压增益平面相交的特定品质因数下的电压增益三维曲面

Fig. 8 Three-dimensional surface of voltage gain at a specific figure of merit that intersects the voltage gain plane

最小。采用经验法选取谐振参数与运用特定曲线函数法选定谐振参数后的对比如图 9 所示，经验法的输出电压振荡时间长且振幅大，输出电流振幅也明显，输出电压纹波较大，为 2.31%；特定曲线函数法的输出电压振荡时间短且振幅小，保证确定电压增益和最小漏感值的同时输出电压纹波较低，为 1.03%。



(a)特定曲线函数法



(b)经验法

图 9　经验法与特定曲线函数法的输出对比

Fig. 9 Comparison of output between empirical method and specific curve function method

3　发展趋势

3.1　第三代宽禁带材料

电路模块内部精密器件的选型必然要与第三代宽禁带材料[34-35]的发展保持同步，以实现更高的电能转换效率[36]。碳化硅 SiC(silicon carbide)和 GaN 作为第三代宽禁带材料中具有较强阻断能力、抗压能力和高导热率的材料，其导通损耗不会随阻断电压的升高而增大，在高功率密度和高温情况下得以运行。与 GaN 相比，SiC 的热导率是 GaN 的 3 倍以上，更适用于高温领域，而 GaN 的高电子迁移率和较低成本则使其有更快的研发速度。

第三代宽禁带材料的单晶衬底制备技术、外延生长技术、器件工艺技术、高温封装技术及驱动技术仍具有诸多可探索创新之处[37]。首先，国内大尺寸单晶制备技术仍需赶超国际标准，以实现 6 inch 晶圆量产化并制备出 8 inch 晶圆样品，同时需改进晶体的切割、研磨及抛光工艺，从而进一步提高加工效率，降低晶圆表面粗糙度，并为制造双极性功率器件研究 p 型单晶衬底，且衬底可以不必局限于硅基材料，如完全氢化的氮化硼 BN(boron nitride)衬底[38]等；其次，外延生长技术需要实现加工设备及测试设备自主化，并改进气流和温度控制技术，以实现高均匀性的外延材料；然后，器件工艺需要创新化，如电极接触可以采用新式金属欧姆接触[39]生成热稳定性更优异的化合物，以帮助器件在高温、高压下更加稳定地工作，针对尚未成熟的器件工艺技术需提高研发时间和技术储备投入；此外，专门应用于第三代宽禁带材料器件的可靠性验证及测试方法也需被提出，如采用双脉冲测试电路[40]计算增强型 GaN 和共源共栅结构 GaN 的开通及关断损耗，运用结合集成式耦合电感的临界导通模式下两相降压电路[41]检验 GaN 的出厂性能指标；最后，需改进烧结工艺实现更高功率密度的器件封装以提高器件可靠性，同时需创新研发专门应用于以 SiC 为代表的第三代宽禁带材料式驱动芯片的驱动电路技术和焊板布线技术，如采用非对称双路同步谐振栅极驱动电路[42]运用负压偏置解决高频下寄生参数易引起驱动信号振荡的问题，采用 SRD 型驱动电路[43]抑制非开尔文封装器件下驱动回路中叠加的共源电压引起栅源极反向充电和漏源极开通振荡的问题，匹配耗尽型 GaN 功率器件采用可集成单电源低延时负压驱动电路[44]等，而创新驱动回路布线可将多并联多层陶瓷输入电容布局在全桥电路两臂之间的同时运用双层板平行布线下的开尔文连接[45]，降低驱动回路电感以抑制栅源电压过冲并增强电路可靠性，针对器件布局可采用纵向(元件垂直布局)添加回路层及横向(元件 U 型布局)添加屏蔽层的方式减小寄生电容以提高功率密度

和效率[46]。

β 相氧化镓(Ga_2O_3)是 5 种同分异构体中稳定性最高的第三代宽禁带材料，相较于 SiC 与 GaN，其禁带宽度更宽、击穿场强更强且巴利加优值更大，由于采用熔体法生长衬底成本较低，其产业化的关键突破核心在于薄膜外延技术和掺杂工艺。β 相 Ga_2O_3 未来会成为第三代宽禁带材料的主力军，在日盲探测器和功率器件等领域具有广泛的应用前景[47]。

3.2 电磁兼容性

关于 LLC 谐振变换器的电磁兼容性，大多文献通过改变拓扑结构从源头出发抑制电磁干扰。除此之外，加装 EMI 滤波器与改进驱动技术也是功率变换器电磁兼容技术未来发展的主流方向[48]。

EMI 滤波器分为有源 EMI 滤波器和无源 EMI 滤波器。无源 EMI 滤波器全频段噪声抑制效果佳，但体积和质量较大，未来可以从集成类技术出发以形成高功率密度变换，最新研究显示，可以利用磁集成技术将滤波电感绕制于一副磁心上并实现不同噪声源下的电感解耦，同时在中心绕组间插入陶瓷介电材质形成平面电感-电容结构，最后利用交错多地层结构减小寄生等效并联电容，能够实现分立元件数量与质量的降低并保障改进结构的高频段噪声抑制能力[49]。有源EMI滤波器集成度高且体积和质量小，但运放增益带宽定积限制了其高频段噪声抑制能力，未来可以改进控制方法以拓宽噪声抑制频段。最新研究显示，结合混沌脉宽调制与有源EMI滤波器，在低频段降低所需运放增益，拓宽高频段增益调节范围，可以避免因带宽过小而导致的高频段噪声抑制效果差[50]。

第三代宽禁带功率器件因高频通断会面临漏极电压电流尖峰和振荡、栅极串扰等电磁干扰现象。从改进驱动电路出发，降低漏源端寄生电感上的电流变化率和栅极电阻能保护器件并抑制高频噪声。相关研究表明，通过检测漏源端电压变化率并依据栅漏端寄生电容造成的电压突变确定栅极电压上升阶段的结束时刻，保障检测时段所需延时的前提下，于电流下降阶段开始时刻注入削减电流以改变栅源电压，进而减小寄生电感上的电流变化率，抑制漏极电压尖峰和振荡；同理，通过检测电路确定电压上升阶段和下降阶段，依据所需检测延时时间判断给定信号时刻，使流经栅极电阻的米勒电流流向已构造出的低阻抗回路和器件中的反并联二极管，减小正、负向串扰尖峰[51]。

由于电路模块内部与电路模块之间必然涉及电磁干扰等问题，而伴随着电磁兼容技术日新月异的发展，应用于不同装备及不同场合下的电磁兼容技术能否实现互联，互联后的抗干扰效果能否评估等问题都亟待解决[52]。相关文献表明，未来的大趋势为结合数字化[53]和人工智能等技术进行风险评估后再实现模块互联，这种方法可以有效降低电磁干扰对电子设备的损害。

4 结语

本文主要介绍了 LLC 谐振全桥变换器的工作原理及变压器绕组结构和控制拓扑等优化方案的最新研究进展，从降低电路损耗和磁路损耗出发，探讨了同步整流和 APR 磁集成模型下平面变压器对电路的影响，最后依据第三代宽禁带材料及电磁兼容性展望开关电源的发展趋势。

参考文献：

[1] Ali Saket M, Shafiei N, Ordonez M. LLC converters with planar transformers: Issues and mitigation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(6): 4524-4542.

[2] 杜圆利. 应用于半桥 LLC 谐振变换器的平面变压器设计与优化[D]. 南京: 东南大学, 2019.
Du Yuanli. Planar transformer design and optimization for half bridge LLC resonant converter [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)

[3] Ali Saket M, Ordonez M, Shafiei N. Planar transformers with near-zero common-mode noise for flyback and forward converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(2): 1554-1571.

[4] 黄森, 刘军, 徐忠良, 等. 全桥LLC谐振变换器的研究[J].

电力学报, 2017, 32(5): 382-391.
Huang Sen, Liu Jun, Xu Zhongliang, et al. Research of full bridge LLC resonant converter [J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(5): 382-391. (in Chinese)

[5] Zeng Junming, Zhang Guidong, Yu S S, et al. LLC resonant converter topologies and industrial applications—A review [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 6(3): 73-84.

[6] Ma Jianguang, Wei Xueye, Hu Liang, et al. LED driver based on Boost circuit and LLC converter [J]. IEEE Access, 2018, 6: 49588-49600.

[7] Fei Chao, Li Qiang, Lee F C. Digital implementation of adaptive synchronous rectifier (SR) driving scheme for high-frequency LLC converters with microcontroller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5351-5361.

[8] Bhuvaneswari C, Babu R S R. A review on LLC resonant converter [C]// 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC). Melmaruvathur, India, 2016: 620-623.

[9] Liu R, Lee C Q. Analysis and design of LLC-type series resonant convertor [J]. Electronics Letters, 1988, 24(24): 1517-1519.

[10] Zhang Guidong, Li Zhong, Zhang Bo, et al. Power electronics converters: Past, present and future [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2028-2044.

[11] Cai Yinsong, Ahmed M H, Li Qiang, et al. Optimal design of megahertz LLC converter for 48-V bus converter application [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(1): 495- 505.

[12] Ren Xiaoyong, Xu Zhiwei, Zhang Zhiliang, et al. A 1-kV input SiC LLC converter with split resonant tanks and matrix transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10446-10457.

[13] Ali Saket M, Ordonez M, Craciun M, et al. Common-mode noise elimination in planar transformers for LLC resonant converters [C]// 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA, 2018: 6607-6612.

[14] Li Mingxiao, Wang Chang, Ouyang Ziwei, et al. Optimal design of a matrix planar transformer in an LLC resonant converter for data center applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 11(2): 1778-1787.

[15] Nabih A, Gadelrab R, Li Qiang, et al. Dimensional effects of core loss and design considerations for high frequency magnetics [C]// 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver, BC, Canada, 2021: 5488-5495.

[16] Ahmed M H, Nabih A, Lee F C, et al. Low-loss integrated inductor and transformer structure and application in regulated LLC converter for 48-V bus converter [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(1): 589-600.

[17] Shafaei R, Perez M C G, Ordonez M. Planar transformers in LLC resonant converters: High-frequency fringing losses modeling [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9632-9649.

[18] 赖娜, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 基于 PWM+PFM 的 LLC 谐振变换器软启动研究[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 17-24.
Lai Na, Du Guiping, Lei Yanxiong, et al. Research on soft-start of LLC resonant converter based on PWM and PFM [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 17-24. (in Chinese)

[19] 王锐, 阚加荣. 基于柔性电感的恒频控制 LLC 谐振变换器[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 28-35.
Wang Rui, Kan Jiarong. Constant-frequency controlled LLC resonant converter based on flexible inductor [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 28-35. (in Chinese)

[20] 王爱玲. 提高 LLC 谐振变换器轻载效率的改进型间歇控制[J]. 电源学报, 2022, 20(3): 98-104.
Wang Ailing. Improved burst control for improving light-load efficiency of LLC resonant converter [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 98-104. (in Chinese)

[21] 杨玉岗, 关婷婷, 许静, 等. LLC 谐振变换器的新型谐振网络参数设计方法[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 1-7.
Yang Yugang, Guan Tingting, Xu Jing, et al. Novel design method for resonant network parameters of LLC resonant converter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 1-7. (in Chinese)

[22] 刘颜, 张方华. 一种适用于全桥 LLC 变换器的共模噪声抑制方法[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 193-197.
Liu Yan, Zhang Fanghua. Common-mode noise suppersion method for full-bridge LLC converter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 193-197. (in Chinese)

[23] Wei Yuqi, Luo Quanming, Mantooth A. Comprehensive analysis and design of LLC resonant converter with magnetic control [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(4): 265-275.

[24] Shih L C, Liu Yihua, Luo Yifeng. Adaptive DC-link voltage control of LLC resonant converter [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2018, 3(3): 187-196.

[25] Wang Hongliang, Chen Yang, Liu Yanfei, et al. A new LLC converter family with synchronous rectifier to increase voltage gain for hold-up application [C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada, 2015: 5447-5453.

[26] Dang Hengkai, Du Sixing, Zhang Yan, et al. A novel LLC resonant converter with configurable capacitors in output stage for wide output voltage range operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6233-6236.

[27] De Simone S, Adragna C, Spini C, et al. Design-oriented steady-state analysis of LLC resonant converters based on FHA [C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. Taormina, Italy, 2006: 200-207.

[28] Adragna C, De Simone S, Spini C. A design methodology for LLC resonant converters based on inspection of resonant tank currents [C]// 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Austin, TX, USA, 2008: 1361-1367.

[29] 孙城皓, 孙秋野, 王睿, 等. 基于拓展型双曲正切函数的全桥 LLC 变换器大信号建模方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 234-245.
Sun Chenghao, Sun Qiuye, Wang Rui, et al. Large-signal modeling method of full-bridge LLC converter based on extended hyperbolic tangent function [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 234-245. (in Chinese)

[30] McLyman C W T. Transformer and Inductor Design Handbook[M]. 4th Edition. Boca Raton: CRC Press, 2011. https://doi.org/10.1201/b10865

[31] Zhang Jun, Hurley W G, Wolfle W H, et al. Optimized design of LLC resonant converters incorporating planar magnetics [C]// 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Long Beach, CA, USA, 2013: 1683-1688.

[32] Zhang Jun, Hurley W G, Wölfle W H. Design of the planar transformer in llc resonant converters for microgrid applications [C]// 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Galway, Ireland, 2014: 1-7.

[33] 鹿麒. 双向 L-LLC 谐振变换器研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
Lu Qi. Research on bidirectional L-LLC resonant converter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[34] 熊兰, 高迎飞, 宋佳, 等. 宽输入倍压整流 LLC 谐振变换器的时域分析[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 228-237.
Xiong Lan, Gao Yingfei, Song Jia, et al. Operation mode analysis of wide-input LLC resonant converter with voltage doubling rectifier [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 228-237. (in Chinese)

[35] 张杰, 杨淋, 邹晨, 等. 可拓展的宽输出变模态交错并联 LLC 变换器[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 1-10.
Zhang Jie, Yang Lin, Zou Chen, et al. Expandable wide-output variable-mode interleaved parallel LLC converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 1-10. (in Chinese)

[36] 周国华, 邱森林, 张小兵. 宽增益高效率级联式四开关 Buck-Boost LLC 变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1103-1115.
Zhou Guohua, Qiu Senlin, Zhang Xiaobing. Cascaded four-switch Buck-Boost LLC converter with wide gain range and high efficiency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1103-1115. (in Chinese)

[37] 蔡蔚, 孙东阳, 周铭浩, 等. 第三代宽禁带功率半导体及应用发展现状[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 42-55.
Cai Wei, Sun Dongyang, Zhou Minghao, et al. Third

generation wide bandgap power semiconductors and their applications [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(14): 42-55. (in Chinese)

[38] 肖美霞, 冷浩, 姚婷珍, 等. 电场调控范德华异质薄膜能隙的第一性原理研究: 单层 SiC 沉积在表面氢化的 BN 薄膜上[J]. 材料导报, 2022, 36(8): 64-69.
Xiao Meixia, Leng Hao, Yao Tingzhen, et al. First-principles of tunable band gaps of van der Waals heterostructures under electric field: Monolayer SiC on hydrogenated BN nanosheets [J]. Materials Reports, 2022, 36(8): 64-69. (in Chinese)

[39] 张可欣, 李庚伟, 杨少延, 等. n-GaN 上 Au/Zr 和 Au/Ti 金属电极的界面反应和金属间互扩散行为对比研究[J]. 材料导报, 2022, 36(21): 124-129.
Zhang Kexin, Li Gengwei, Yang Shaoyan, et al. Comparison study on the interfacial reaction and intermetallic interdiffusion behavior of Au/Zr and Au/Ti metal electrodes on n-GaN [J]. Materials Reports, 2022, 36(21): 124-129. (in Chinese)

[40] Fu Minfan, Fei Chao, Yang Yuchen, et al. A two-stage rail grade DC/DC converter based on GaN device [C]// 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Anaheim, CA, USA, 2019: 2110-2114.

[41] Lee F C, Li Qiang, Liu Zhengyang, et al. Application of GaN devices for 1 kW server power supply with integrated magnetics [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2016, 1(1): 3-12.

[42] 林志杰, 董纪清. 应用于 LLC 谐振变换器的 GaN 器件及其驱动电路设计[J]. 电气开关, 2021, 59(2): 42-47.
Lin Zhijie, Dong Jiqing. GaN device and design of driving circuit applied to LLC resonant converter [J]. Electric Switchgear, 2021, 59(2): 42-47. (in Chinese)

[43] 王张辉. GaN 功率器件的负压驱动电路研究与设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
Wang Zhanghui. Negative voltage driver research of a GaN power device [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

[44] 陈建贵. SiC/GaN功率器件的高速应用和适应性驱动电路研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
Chen Jiangui. Research on high-speed application and adaptive drive circuit of SiC/GaN power device [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[45] 高珊珊, 王懿杰, 刘怡宁, 等. 针对 GaN 器件的非对称双路同步谐振栅极驱动电路[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4185-4193.
Gao Shanshan, Wang Yijie, Liu Yining, et al. Resonant gate driver with asymmetrical voltage and two synchronous drive signals for GaN switches [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20): 4185-4193. (in Chinese)

[46] Hammer J, Ali Saket M, Ordonez M. LLC converters with GaN: Commutation loop capacitance [C]// 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Houston, TX, USA, 2022: 1752-1756.

[47] 蒋骞, 张静, 谢亮, 等. 氧化镓薄膜外延生长及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(13): 17-27.
Jiang Qian, Zhang Jing, Xie Liang, et al. Research progress on epitaxy growth and application of gallium oxide thin films [J]. Materials Reports, 2022, 36(13): 17-27. (in Chinese)

[48] Glitz E S, Ordonez M. MOSFET power loss estimation in LLC resonant converters: Time interval analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11964-11980.

[49] 陆子健, 叶鑫, 刘艺涛. 基于交错多地层结构的平面磁集成 EMI 滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4706-4718.
Lu Zijian, Ye Xin, Liu Yitao. Design of planar magnetic integrated EMI filter with multi-GND-layer structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4706-4718. (in Chinese)

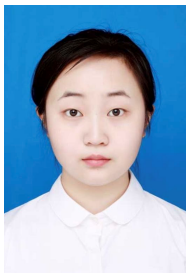
[50] 李虹, 张冲默, 丁宇行, 等. 基于混沌脉宽调制的有源 EMI 滤波器高频抑制效果优化设计方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4642-4652.
Li Hong, Zhang Chongmo, Ding Yuhang, et al. Optimization of high frequency noise suppression effect of active EMI filter based on chaotic spread spectrum PWM method [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4642-4652. (in Chinese)

[51] 李虹，邱志东，杜海涛，等. 提升桥式电路中 SiC MOSFET 关断性能和栅极电压稳定性的有源驱动电路

研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7922-7934.
Li Hong, Qiu Zhidong, Du Haitao, et al. Research on active gate driver for improving turn-off performance and gate voltage stability of SiC MOSFET in bridge circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7922-7934. (in Chinese)

[52] 王炳文, 郑久寿, 陈潇然. 基于电磁兼容风险评估方法的 EMC 整改研究[J]. 安全与电磁兼容, 2022(5): 60-65.
Wang Bingwen, Zheng Jiushou, Chen Xiaoran. Research on EMC rectification based on EMC risk assessment method [J]. Safety & EMC, 2022(5): 60-65. (in Chinese)

[53] 郑军奇, 叶琼瑜, 于超. EMC 行业的数字化转型[J]. 安全与电磁兼容, 2022(3): 9-12, 44.
Zheng Junqi, Ye Qiongyu, Yu Chao. Digital transformation of the EMC industry [J]. Safety & EMC, 2022(3): 9-12, 44. (in Chinese)



谷彦洁

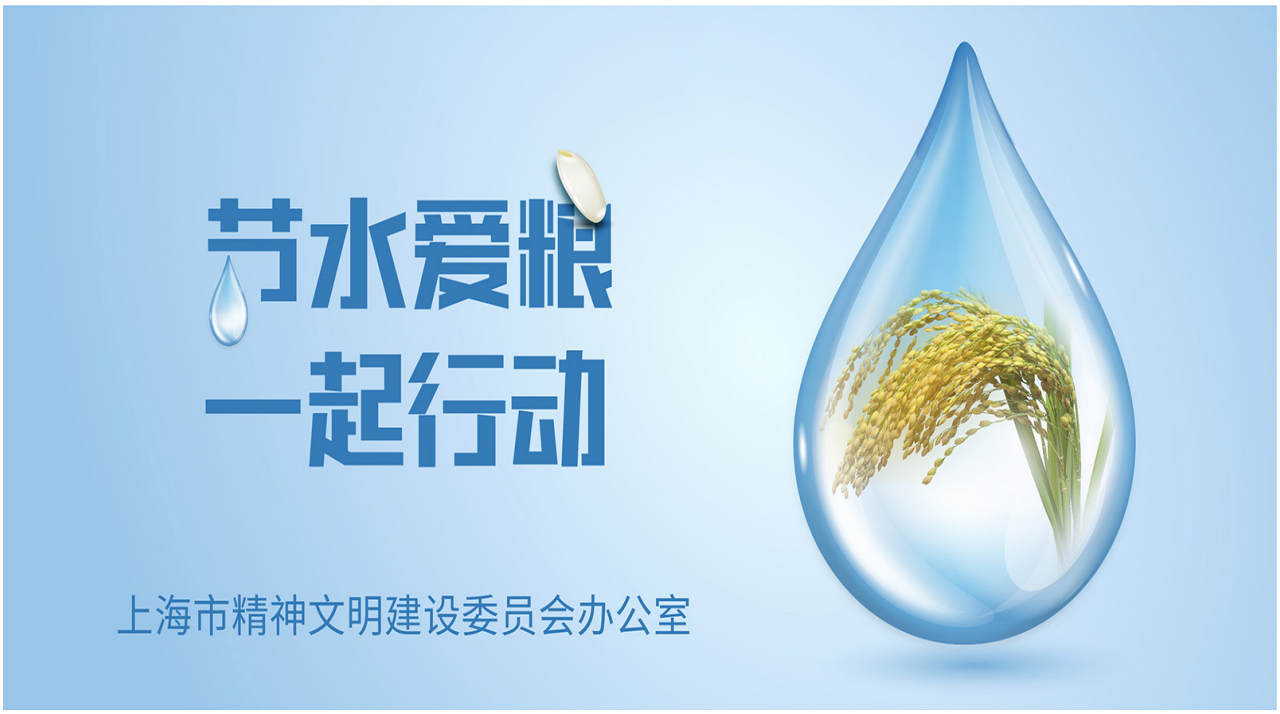
作者简介：

谷彦洁(1998—)，女，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：新能源及电力电子技术。E-mail：643520989@qq.com。

于人杰(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电器设计、仿真及智能化。E-mail：935048281@qq.com。

张岩(1983—)，男，中国电源学会会员，博士后，副教授。研究方向：分布式电源系统电力电子变流器拓扑、建模及控制理论；高频高效率、高功率密度谐振变换器软开关拓扑及其数字控制技术；电力电子装置及系统可靠性。E-mail：zhangyanjtu@xjtu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)



公益广告来源：文明上海