DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.340 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

无铁心直流变压器的研究进展与技术剖析

赖 立[1]，张 波[1](中国电源学会会士)，李 虹[2](中国电源学会高级会员)，
林靖扬[1]，杨 伦[1]
(1.华南理工大学电力学院，广州 510641；2.浙江大学电气工程学院，杭州 310058)

摘要：直流变压器作为一类电力电子变压器已展现出极好的应用前景，然而传统有铁心隔离变压器的重量和成本直接制约着直流变压器的发展和应用，因此采用轻量化、低成本的无铁心直流变压器就成为一个新兴研究方向。首先系统阐述了无铁心变压器的特征及在直流变压器中的功能；然后分析了无铁心直流变压器的技术形式，将其分为线性与正弦2种；最后探讨了自感谐振型、漏感谐振型和PT对称型3种正弦无铁心直流变压器的技术特点，并进行了性能比较研究。

关键词：无铁心变压器；无铁心直流变压器；重量和成本；高频；PT对称

Research Progress and Technical Analysis of Coreless DC Transformers

LAI Li[1], ZHANG Bo[1], *Fellow*, *CPSS,* LI Hong[2], *Senior Member*, *CPSS*, LIN Jingyang[1], YANG Lun[1]
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: As a category of power electronic transformers, DC transformers have demonstrated excellent application prospects. However, the weight and cost of traditional magnetic-core isolation transformers directly constrain the development and applications of DC transformers. Consequently, coreless DC transformers employing lightweight and low-cost coreless isolation transformers have emerged as a new research direction. First, the characteristics of coreless transformers and their functions within DC transformers are systematically reviewed. Second, the technical configurations of coreless DC transformers are analyzed, categorizing them into linear and sinusoidal types. Final, the technical characteristics of three sinusoidal coreless DC transformer variants (i.e., self-inductance resonant, leakage inductance resonant and PT-symmetrical) are examined, and a comparative study of their performance is also conducted.

Keywords: Coreless transformer; coreless DC transformer; weight and cost; high frequency; PT symmetry

直流变压器是指利用电力电子技术实现直流变换的装置，属于电力电子变压器或固态变压器的一类，被广泛应用于可再生能源、交直流混合电网、轨道交通及工业等领域的电能变换装备中，其中高频变压器是直流变压器中必不可少的器件[1]。然而，现有直流变压器均采用有铁心变压器作为隔离器件，铁心的铁磁材料是有铁心变压器实现高效磁场耦合的关键，但该材料性价比低、铁耗大，极大地增加了变压器的重量、体积和成本，且对温度、频率敏感性高，导致变压器可靠性降低[2-3]。

高效无铁心变压器一直是人们追求的目标。两百多年来，国内外学者开展了大量无铁心变压器研究，从理论探索到工程实践，但始终未能取得突破性进展。近年来，无线电能传输在机理上得到了本

收稿日期：2025-09-05；**修回日期**：2025-10-28；**录用日期**：2025-11-17；**网络首发日期**：2025-12-29
基金项目：国家自然科学基金重点资助项目(52130705)
This work is supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China under the grant 52130705

质突破，其利用感应、谐振、宇称−时间 PT(parity-time)对称原理和分数阶机理[4-5]，通过松耦合变压器技术实现了近场的高效无线电能传输，这为无铁心变压器的发展提供了启示。文献[5]基于 PT 对称原理提出了无铁心直流变压器，并实现了中、大功率的高效电能变换。显然，无铁心直流变压器不仅弥补了有铁心直流变压器的不足，还具有以下优点。

(1)导磁方面：无铁心使变压器磁化曲线线性化，无磁饱和与磁导率漂移等问题，避免了温度和频率对变压器性能的影响，实现了更高的质量功率密度[6]。

(2)散热方面：绕组不受铁心形状制约，可直接采用自然空气对流冷却，温度仅与导线损耗有关，具有更高的极限温度[7]。

(3)绝缘方面：不需要考虑绕组与磁心的绝缘问题，且均匀分布的电场降低了击穿风险[8]。

为此，本文在对比无铁心变压器和有铁心变压器异同的基础上，论述无铁心变压器的技术特征，进而引出无铁心直流变压器现有的线性和正弦 2 种技术形式，并重点阐述正弦无铁心变压器的技术演进路径；然后分析正弦无铁心变压器所包含的自感谐振型、漏感谐振型和 PT 对称型无铁心变压器在频率、外特性和磁势特性方面的差异，从而系统地展现无铁心变压器到无铁心直流变压器的发展历程，以全面推动无铁心直流变压器的技术进步。

1　无铁心变压器的特征

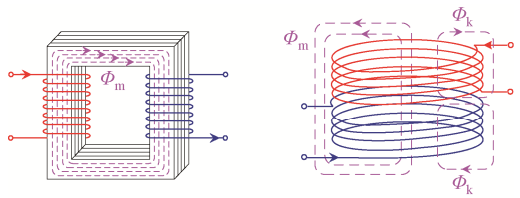
无铁心变压器与有铁心变压器具有相近的技术特征，均采用电磁感应定理，表 1 为 2 种技术的详细对比。

(1)有铁心变压器。该磁耦合器件绕组通常同轴绕在同一铁心磁柱上或分别绕在 2 个铁心磁柱上，形成一次侧和二次侧绕组，通过高导磁率(μ_r>>1)的铁心(如硅钢片、铁氧体等)将一次侧绕组产生的交变磁通引导至二次侧绕组，形成 1 个几乎无磁通泄漏的闭合磁路，从而保证高耦合系数(k>0.9)。其结构如图 1(a)所示，应用于隔离供电场合，一般设计为芯式或壳式结构，以优化磁路、降低磁阻。图中，Φ_m 为主磁通。

表 1　磁耦合技术的对比

Tab. 1 Comparison among magnetic coupling technologies

对比项	有铁心变压器	无铁心变压器
物理机理	法拉第电磁感应定理	
耦合方式	铁磁材料	空气
相对磁导率	>>1	1
磁通路径	闭合路径	非闭合路径、磁通空间小
耦合强度	定、强耦合(k>0.9)	定、松耦合(k≈0.4~0.9)
结构组成	绕组+铁心	绕组
结构形状	芯式或壳式	同轴结构
电磁模型	$L \propto N^2$	Biot-Savart 定律(第一性原理)
损耗模型	Steinmetz 公式、Dowell 公式	Maxwell 方程组(第一性原理)
散热模型	铁心约束、热极限低	绕组约束、热极限高



(a) 芯式变压器　　(b) 同轴无铁芯变压器

图 1　磁耦合器件的结构

Fig. 1 Structure of magnetic coupling devices

(2)无铁心变压器。该磁耦合器件取消了传统的闭合铁心，而是采用空气作为磁通通道。由于其具有紧凑的绕组结构，磁路径短，磁通扩散空间更小，因此耦合系数较低(k≈0.4~0.9)，其结构如图 1(b)所示，图中 Φ_k 为漏磁通。无铁心变压器的应用场合与有铁心变压器相同，绕组常设计为同轴结构，类似于壳式变压器的绕组结构，以提升器件功率密度和优化磁场分布。

值得指出的是，因为近场磁场的本质是无源连续场，磁感线必然是闭合的，但这种“闭合”是沿空气中分散的磁场路径形成的，磁通路径不受控，故本文称为“非闭合”。

为实现电压变换和稳压调节这 2 个功能，有铁心变压器衍生出 2 种常用的设计方法，即基于

电路面积与磁路面积乘积的 AP 法[9]和基于磁心尺寸的几何参数法[10]，但有铁心变压器的设计方法并不能被无铁心变压器参考，两者在电磁模型、损耗模型和散热模型方面存在显著差异，详细对比如下。

(1)电磁模型。铁磁材料的相对磁导率足够大，因此有铁心变压器的电感与匝数的平方成正比、与磁阻成反比，对匝数和气隙进行设计可轻易获得目标电感。然而，相对磁导率等于 1 的无铁心变压器并不满足这条简单规律，这导致对自感量和耦合系数的精确定量设计极其困难，需采用最基本的 Biot-Savart 定律。

(2)损耗模型。有铁心变压器的损耗涉及磁损和铜损，可分别由 Steinmetz 公式[11]和 Dowell 公式[12]计算得到；且当铜损=磁损时，可获得最优转换效率。与之不同的是，无铁心变压器仅含铜损，其效率曲线与交流电阻线性相关，且由于磁场分布的差异，一维 Dowell 公式并不适用于无铁心变压器，其计算需采用最经典的 Maxwell 方程组。

(3)散热模型。温升是损耗和散热能力的综合表现。损耗引起线圈和铁心发热，而绝缘等级决定了温升限制。如果超过绝缘温升，材料将加速老化。常用温度等级为 V155 的 Litz 线，其最高工作温度为 130 ℃，但磁心的平均温度需控制在 100 ℃以下，这便限制了有铁心变压器的极限温升。但无铁心变压器却不受此限制，其绕组可被直接冷却和定制化设计，因此无需考虑绕组与铁心的绝缘问题。

综上可知，尽管无铁心变压器的名称中含有“变压器”，但其耦合机制和物理模型与传统的有铁心变压器相差甚远，因此无铁心变压器在理论和应用上均是 1 种完全有别于有铁心变压器的磁耦合器件。

2 无铁心直流变压器的技术类别

无铁心直流变压器由无铁心变压器与半导体器件构成的整流、逆变电路组成，如图 2 所示。图中，U_{dc} 与 U_o 分别为输入和输出电压。

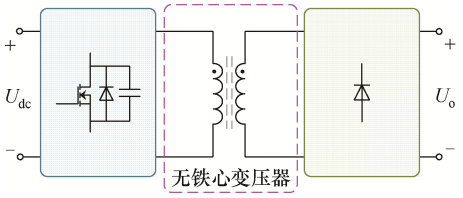


图 2 无铁心直流变压器

Fig. 2 Coreless DC transformer

本文按照电感电流形状将无铁心直流变压器分为线性和正弦 2 种基本形式，如图 3 所示。图中 L_{k1}、L_{k2} 与 L_m 分别为一次侧漏感、二次侧漏感和励磁电感。

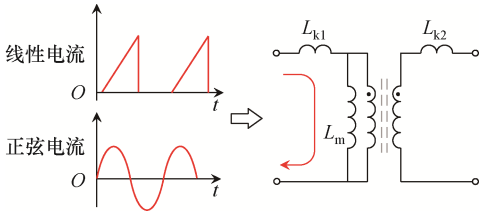


图 3 线性与正弦无铁心直流变压器的波形

Fig. 3 Waveforms of linear and sinusoidal coreless DC transformers

线性无铁心直流变压器的特点是电感电流呈斜坡式线性变化，代表拓扑有 Flyback[13]、Forward[14]和移相全桥[15]等无铁心直流变压器。因其结构简单在小功率场合中应用最为广泛，且最大功率不超过百瓦；但其缺点也较为突出，其漏感不仅会导致开关的高电压尖峰，还严重削弱了通过励磁电感传递到二次侧的能量和电压幅值，导致系统转换效率难以超过 90%。

正弦无铁心直流变压器的特点是电感电流呈谐振正弦变化，代表拓扑有 LLC、CLLC 和 LCLC 等无铁心直流变压器。其优点在于串/并联谐振电容的引入避免了低耦合、传能弱的问题，现有样机的最大传输功率达到了 166 kW，系统效率超过了 99%[16]。因此，目前最具有发展前景和应用价值的是正弦无铁心直流变压器技术，按照谐振机理又可将其分为 3 种，具体如下。

(1)自感谐振无铁心直流变压器。系统定频工作，补偿电容与自感谐振，输入阻抗为 0；其工作方式与无线电能传输中的双调谐拓扑相近。

(2)漏感谐振无铁心直流变压器。系统定频工作，补偿电容与漏感谐振，谐振支路阻抗为 0；其工作方式与最常见的谐振变换器相近。

(3)PT 对称无铁心直流变压器。系统自治工作，输入阻抗为 0；有别于自感谐振频率，其工作频率可使电路状态具有对称性，系统在空间和时间反演的同时作用下保持不变。

3　正弦无铁心直流变压器的发展

本文以时间顺序对 3 种正弦无铁心直流变压器的演进综述如下。

3.1　自感谐振无铁心直流变压器

自 20 世纪 80 年代起，随着对电力电子设备小型化、高频化需求的逐步增加，平面变压器技术在高频电源设计中逐渐兴起[17]，如弗吉尼亚理工大学的 Lee 团队利用厚膜电路开发了 6 MHz、40 W 和最大效率为 71%的微型变压器[18]；麻省理工学院的 Kassakian 团队利用印刷电路板 PCB (printed circuit board)制造了 1 款平面螺旋绕组结构的变压器[19]。在此背景下，平面无铁心直流变压器应运而生[20]。1997 年，香港大学的许树源团队开始对 PCB 无铁心变压器展开深入研究，系统地探讨了其在宽频率范围下计及杂散参数的工作特性和电磁特性[21-23]，分析了不同绕组结构的器件建模与设计[24-25]，并将其应用在信能传输[26]和功率 MOSFET 驱动[27-28]中，展示了其在电子电力中的潜力。2001 年，该团队在文献[28]中提出了工作频率为 8 MHz 的自感谐振无铁心直流变压器，如图 4 所示，其工作点位于二次侧并联电容与自感谐振点附近，实现了最大功率为 0.5 W、效率为 63%。

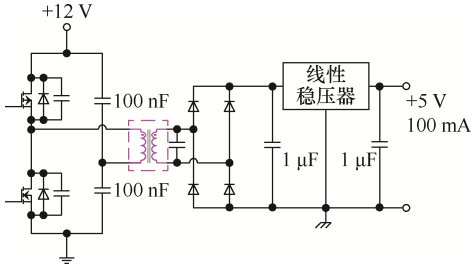


图 4　自感谐振无铁心直流变压器[28]

Fig. 4 Self-inductance resonant coreless DC transformer[28]

同时期，氮化镓器件的兴起令超高频直流变压器成为了研究热点。有铁心变压器在几十 MHz 工作频率下铁损急剧增加，促使学者与业界探索无铁心直流变压器这一方案。2008 年，麻省理工学院 Perreault 团队利用自耦无铁心变压器的自感与电容构成谐振网络，建立了基于 Class Φ_2 谐振逆变器的超高频直流变压器[29]，通过优化谐振频率与开关策略，实现了超高工作频率的高效率工作，其在 30 MHz 的工作频率下可输入 200 V 电压、输出 200 W 功率。随后，该团队进一步研究了基于解析和数值仿真的超高频 PCB 无铁心直流变压器综合设计方法[30]，可依据频率、阻抗匹配和尺寸限制对磁结构进行优化，解决了超高频下的变压器设计难题，即使开关频率高达 75 MHz，其整机效率仍可达 74%。2015 年，科罗拉多大学 Maksimović 团队提出了以螺旋平面 PCB 无铁心变压器作为隔离器件的直流变压器[31]，其工作频率高达 100 MHz，显著减小了磁件体积，在 20 V 输入电压和 1.8 W 输出功率下样机效率达到了 80.5%。2017 年，卡塔尼亚大学 Palmisano 团队开发了 1 款平面无铁心变压器的瓦级电源系统[32]，验证了在硅基工艺中实现电气隔离技术的可能性。在国内，从 2014 年开始，南京航空航天大学张之梁团队开展了对超高频功率变换与系统集成的研究[33]，其设计了 1 种具有电流均匀分布特性的超高频自感谐振无铁心直流变压器[34]，如图 5 所示，其中，U_{i} 为输入直流电压，L_{r1}、L_{r2} 均为漏感，C_{in}、C_{R}、C_{out}、C_{F} 分别为输入电容、S_{r} 的寄生电容、输出电容、S_{ctrl} 的寄生电容，R_{L} 为等效负载电阻，S_{r}、S_{ctrl} 分别为一次侧、二次侧开关管，解决了高频磁件中存在的热点与励磁不均问题，同时将该无铁心变压器应用于使用自感谐振传递能量的超高频 Flyback 直流变压器中[35-36]，验证了其在不同工作频率中的优越表现，该变压器的最高效率为 80.1%；文献[37]也开展了相关工作，在 Class-E 变换器中利用 PCB 无铁心变压器的寄生元件构建最佳开关阻抗，实现软开关特性和低开关电压应力，其在 10 W 的额定功率下效率为 80%。在 3D 打印无铁心变压器的研究方面，2020

年斯坦福大学 Rivas-Davila 团队通过 3D 打印和电镀方法制造出了环形无铁心变压器[38]，展示了其在体积小型化和制造灵活性方面的优势，并应用在 100 W、30 MHz 谐振直流变压器中。同年，挪威科技大学 Peftitsis 团队针对中压变流器的 MHz 无铁心隔离辅助直流变压器提出了优化设计方法[39]，在兼顾电气隔离和电磁抗扰的同时提升了系统的功率密度与效率，然后研究了无铁心变压器的高压绝缘设计方法[40]，其在设计时考虑了爬电距离、电场分布与材料选择等关键因素，可兼顾紧凑的结构和可靠的高压绝缘。此外，2022 年佛罗里达州立大学 Li 团队利用超高频自感谐振直流变压器实现了中压 SiC MOSFET 隔离栅极驱动器的信能同传，该驱动器具有高达数百伏的隔离电压与稳定的高速驱动性能[41]。

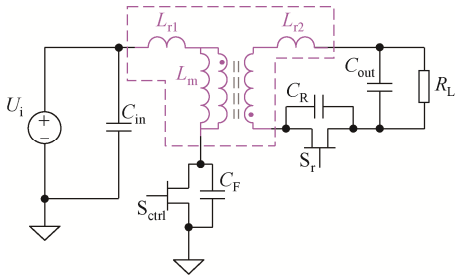


图 5 超高频自感谐振无铁心直流变压器[34]

Fig. 5 Very high-frequency self-inductance resonant coreless DC transformer[34]

3.2 漏感谐振无铁心直流变压器

与有铁心直流变压器中人为降低漏感不同，漏感谐振无铁心直流变压器利用并设计漏感作为谐振腔的一部分，实现高效能量传输及软开关。2013 年，中瑞典大学的 Kotte 提出与 LC 谐振变换器相同拓扑的降压型漏感谐振无铁心直流变压器[42]，将功率提升至 50 W、开关频率降至 2.6 MHz，变压器的器件效率为 86.5%。2016 年，文献[43]提出了可弯折的漏感谐振无铁心直流变压器[43]，采用 LLC 谐振拓扑实现了输出 5 V/500 mA 的直流电源，大电感的设计使得开关频率范围仅为 134~ 141 kHz，但效率仅为 63.4%。2020 年，该团队针对 LLC 无铁心直流变压器的平面变压器提出了多物理场设计与优化方法[44]，其综合考虑了电与磁对变压器性能的全面评估与优化，样机在 2.5 MHz 工作频率下的最大效率提升到了 86.6%。2021 年，基于文献[38]的变压器结构，文献[45]提出了采用零相位差同步驱动信号的 10 MHz CLLC 漏感谐振直流变压器设计[45]，通过精确控制驱动信号相位，显著减小了开关损耗。2022 年，文献[46]针对卫星电推进系统提出了 MHz 的 LCLC 漏感谐振无铁心直流升压变压器[46]，该变压器采用空心变压器实现了高频、高效率、高功率密度输出，为航天电源小型化与高效化提供了新技术路径。

彼时，人们认为无铁心直流变压器的电感与高频是匹配的，更高的工作频率可降低电感在单个开关周期内存储释放的能量，对电感的需求更小，符合无铁心变压器的特性，但这也约束了功率的进一步提升，使效率难以超过 90%。

2018 年，苏黎世联邦理工学院 Kolar 团队以直流变压器的轻量化、高效率和低成本为实现目标，开始研究适用于交直混联电网、大功率电动汽车充电站、未来分布式电动飞机和船舶等场景的 166 kW/77.4 kHz 中压中频大功率漏感谐振无铁心直流变压器[16]，如图 6 所示。该团队的研究详细分析了在 10 kV 直流母线下无铁心直流变压器的设计与性能空间[47]，揭示了高频下结构参数对效率与体积的影响，提出了几何结构的优化设计方法[48]，并且详细验证和比较了中频无铁心变压器与有铁心变压器在 7 kV 条件下的性能极限[49]，其高压小电流、低 Q 值的设计核心使得满载工况下变压器的器件效率达到了 99.5%、系统效率为 99%、质量功率密度高达 16.5 kW/kg。

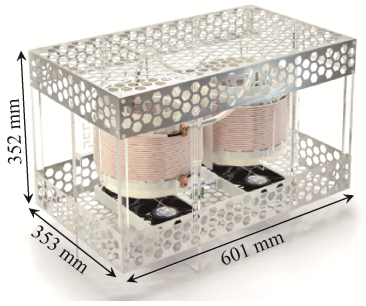


图 6 166 kW 漏感谐振无铁心直流变压器[79]

Fig. 6 Schematic of 166 kW leakage inductance resonant coreless DC transformer[79]

3.3 PT 对称无铁心直流变压器

2018 年，受 PT 对称无线电能传输技术的启发[50-51]，华南理工大学张波团队提出 PT 对称高频无铁心直流变压器[52-53]，其拓扑结构与漏感谐振无铁心直流变压器一致，为最简单的双调谐拓扑。随后，团队开展了详细的理论研究分析与样机设计验证，建立了 PT 对称无铁心直流变压器的统一理论[54]，如图 7 所示。图中：S_1~S_4 均为全桥逆变开关管；i_p、i_s 分别为一、二次侧电流；C_{r1}、C_{r2} 分别为一、二次侧谐振电容；U_{Cr1}、U_{Cr2} 分别为一、二次侧谐振电容电压；n 为变压器变比；D_1~D_4 均为全桥整流二极管；C_o 为输出滤波电容；R_o 为负载电阻；u_{ab}、u_{cd} 分别为逆变器输出电压和整流桥输入电压；R_n 为负电阻；R_{eq} 为等效负载电阻；S 为控制函数，有 S=sgn(i_p)；CCVS 为电流控制电压源。团队论证了 PT 对称、哈密顿存在性定理、赝厄米实谱和能谱不变性定理之间的相关性；构建了 SS 型无铁心直流变压器，阐述了其与理想变压器一样的磁势平衡和单位功率因素特性[55]，分析了非理想参数对变压器的影响[56]；推广到了电路结构不对称的 SP 型无铁心直流变压器[57]和广义 PT 对称无铁心直流变压器[58-62]。此外，从电磁热多物理场角度优化并验证了 PT 对称无铁心直流变压器的电气、结构和散热参数[63]，并巧妙地利用 PT 对称系统对参数的鲁棒特性设计了电磁屏蔽装置，兼顾了散热能力与屏蔽效能[64]。

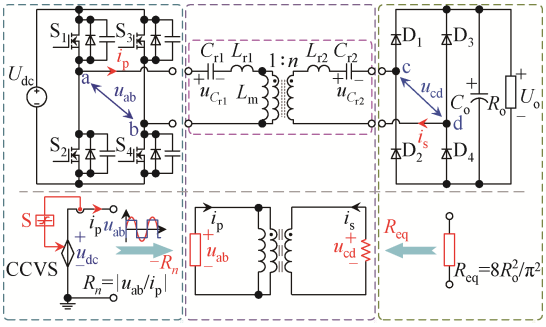


图 7　PT 对称无铁心直流变压器电路[55]

Fig. 7 Circuit of PT-symmetrical coreless DC transformer[55]

目前，团队制造的中功率 5.4 kW 样机效率已达到了 97.6%[65]，变压器的器件质量功率密度为 15.84 kW/kg，样机如图 8 所示。

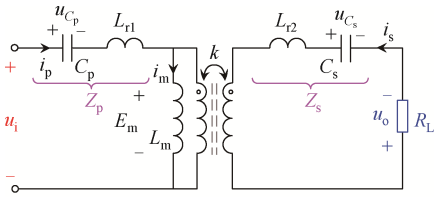


图 8　5.4 kW PT 对称无铁心直流变压器的样机[65]

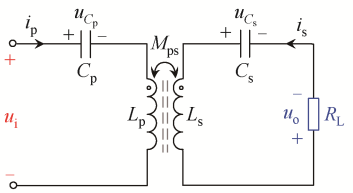
Fig. 8 Prototype of 5.4 kW PT-symmetrical coreless DC transformer[65]

4　正弦无铁心直流变压器的技术对比

以大功率应用中典型的 SS 型双调谐无铁心直流变压器为例，其谐振腔如图 9 所示。图中：u_i、u_o 分别为谐振腔输入、输出电压；u_{C_p}、u_{C_s} 分别为一、二次侧谐振电容电压；C_p、C_s 均为串联补偿电容；i_m 为励磁电流；Z_p、Z_s 分别为一、二次侧阻抗；E_m 为感应电动势；M_{ps} 为变压器互感；L_p、L_s 分别为一、二次侧自感。



(a) 漏感模型



(b) 互感模型

图 9　SS 型正弦无铁心直流变压器的谐振腔

Fig. 9 Resonant tank of SS-type sinusoidal coreless DC transformer

从工作频率、外特性和磁势平衡特性等方面详细对比分析漏感谐振、自感谐振和 PT 对称无铁心直流变压器的技术异同，对比结果见表 2。

4.1　工作频率的差异

结合图 9(a)的漏感模型可知，漏感谐振无铁心

直流变压器的工作频率 $f_{s,lr}$ 为

$$f_{s,lr}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r1}C_p}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r2}C_s}} \tag{1}$$

表 2 无铁心直流变压器的技术对比

Tab. 2 Comparison among coreless DC transformer technologies

对比项	漏感谐振	自感谐振	PT 对称
工作频率	定频，$f_{s,lr}$	定频，$f_{s,ls}$	变频，$f_{s,PT}$
输入阻抗角	$\theta_{ui}>0$	$\theta_{ui}=0$	
电流夹角	接近 180°	90°	接近 180°
谐振方式	串联谐振	电路谐振	
外特性	恒压特性	恒流特性	理想变压器特性
磁势特性	$\lvert I_p\rvert>\lvert I_s\rvert$	$\lvert I_p\rvert<\lvert I_s\rvert$	$\lvert I_p\rvert=\lvert I_s\rvert$

根据图 9(b)的互感模型可知，自感谐振无铁心直流变压器的工作频率 $f_{s,ls}$ 为

$$f_{s,ls}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_pC_p}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_sC_s}} \tag{2}$$

漏感模型和互感模型的转换关系为 $L_{r1}=(1-k)\cdot L_p$，即两者的频率与负载无关，均为定频工作，彼此间工作频率的转换关系为 $f_{s,lr}=f_{s,ls}/(1-k)^{1/2}$。

PT 对称无铁心直流变压器的工作频率 $f_{s,PT}$ 随负载变化而变化，可表示为

$$f_{s,PT}=f_{s,ls}\sqrt{\frac{2Q^2-1\pm\sqrt{(2Q^2-1)^2-4Q^4A}}{2AQ^2}} \tag{3}$$

式中：变量 $A=k^2-1$；Q 为品质因素，$Q=(L/C)^{1/2}R^{-1}$。PT 对称的条件为：①$R_n=R_L=R$，即 $Q_p=Q_s=Q$；②$\omega_p=\omega_s=\omega_o$，$\omega_p$、$\omega_s$、$\omega_o$ 分别为一次侧、二次侧、系统谐振频率。其频率具有分岔特性，分岔点 $Q_{EP}=[1+(1-k^2)^{1/2}]^{1/2}/\sqrt{2}k$。

图 10 为 3 种无铁心直流变压器的归一化频率曲线。当耦合系数 k 较大时，在式(3)中有 $A\to0$，则 PT 系统的工作频率为

$$f_{s,lr}=\lim_{A\to0}f_{s,PT+}=\frac{f_{s,ls}}{\sqrt{1-k}} \tag{4}$$

式中，$f_{s,PT+}$ 为 PT 系统工作频率。

由此可知，有 $f_{s,lr}>f_{s,PT+}>f_{s,ls}$，且在无铁心变压器中越低的频率意味着越小的交流杂散电流。

4.2 外特性的异同

定义一次侧阻抗 $Z_p=j\omega L_p+1/j\omega C_p$ 和二次侧阻抗 $Z_s=j\omega L_s+1/j\omega C_s$，可得图 9(b)所示电路的电压变比 G_u 和输入阻抗角 θ_{ui} 的归一化表达式分别为

$$\begin{cases}G_u=nk\left\{Q\left[\left(\dfrac{2}{f_n}+f_o(k^2-1)-\dfrac{1}{f_n^3}\right)^2+\left[\dfrac{1}{Q}\left(1-\dfrac{1}{f_n^2}\right)\right]^2\right]^{1/2}\right\}^{-1}\\ \theta_{ui}=\tan^{-1}\left\{\dfrac{Q}{f_nk^2}(f_n^2-1)\left[\dfrac{1}{f_n^2Q^2}+\left(1-\dfrac{1}{f_n^2}\right)^2-k^2\right]\right\}\end{cases} \tag{5}$$

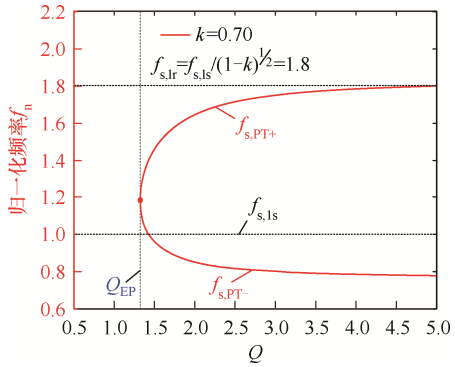


图 10 三种无铁心直流变压器的归一化频率(k=0.70)

Fig. 10 Normalizod frequencies of three types of coreless DC transformers (k=0.70)

由式(5)可知，电流增益 $G_i=I_p/I_s=F_p/(nF_s)$，绘制出关于 G_u、G_i 和 θ_{ui} 的频率特性曲线，如图 11 所示。

由图 11(a)可知，零输入阻抗($\theta_{ui}=0$)的解有 3 个，分别为 $f_{s,PT+}$、$f_{s,PT-}$ 和 $f_{s,ls}$，对应 PT 对称和自感谐振的频率，输入阻抗为纯阻性，无铁心直流变压器均工作在单位功率因数。而漏感谐振直流无铁心变压器有所不同，其漏感与串联电容处于谐振状态，系统工作在感性区域，存在一定的无功功率。

由图 11(b)可知，存在 2 个恒压点 $f_H=f_{s,ls}/(1-k)^{1/2}$ 和 $f_L=f_{s,ls}/(1+k)^{1/2}$，$f_{s,PT}$ 位于 f_H 和 f_L 之间，有 $f_{s,lr}=f_H$。$f_{s,PT}$ 对应的 G_u 和 G_i 均等于 1，可使得无铁心直流变压器具有与理想变压器一样的外特性，这是恒流型自感谐振型不具备的。

4.3 磁势特性的不同

正弦无铁心直流变压器的主磁通由一、二次侧

磁动势 $\dot{F}_p$ 和 $\dot{F}_s$ 共同产生，磁动势关系为

$$\dot{F}_p+\dot{F}_s=\dot{F}_m \Rightarrow \dot{I}_p+\dot{I}_s=\dot{I}_m \tag{6}$$

式中：$\dot{F}_m$ 为合成磁动势，也称励磁磁动势；$\dot{I}_p$、$\dot{I}_s$、$\dot{I}_m$ 分别为一、二次侧电流相量和励磁电流相量。此外，一、二次侧回路电压平衡方程式为

$$\begin{cases}\dot{U}_i=-\dot{E}_m+\dot{I}_pZ_p\\ \dot{U}_o=\dot{E}_m-\dot{I}_sZ_s\\ \dot{E}_m=\mathrm{j}\omega L_m\dot{I}_m\\ \dot{U}_o=\dot{I}_sR_L\end{cases} \tag{7}$$

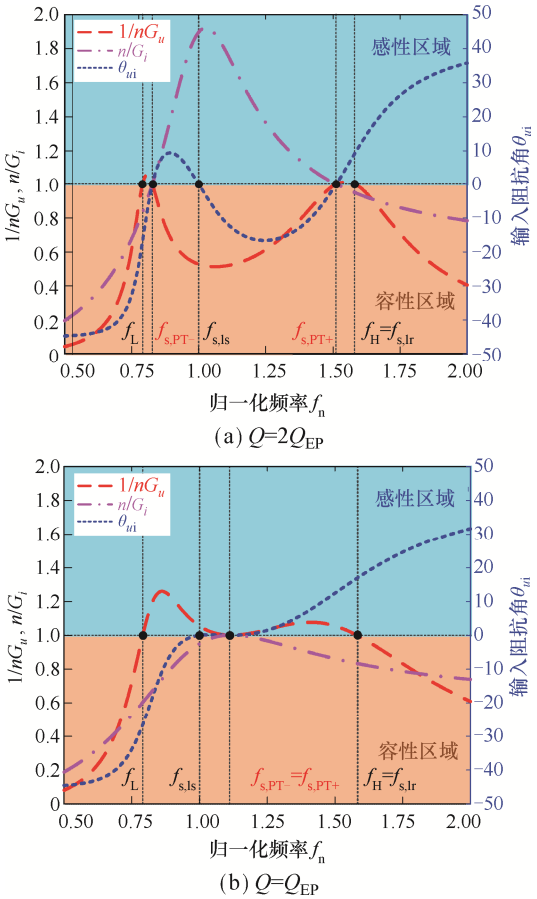


图 11　特性曲线比较(k=0.52, Q_{EP}=2)

Fig. 11 Comparison among characteristic curves (k=0.52, Q_{EP}=2)

根据式(6)和式(7)可得 3 种正弦无铁心直流变压器的相量，如图 12 所示。

图 12(a)为漏感谐振直流无铁心变压器的相量图，一、二次侧分别加入串联补偿电容后，漏感压降为 0，使得励磁感应压降 $|\dot{E}_m|=|\dot{U}_i|=|\dot{U}_o|$，具有更高的输出功率。一、二次侧的电流关系为 I_p>I_s，励磁电流分量由一次侧电流提供。无铁心带来的低自感量意味着较小的励磁电感，这将产生较大的励磁电流，进而增大无功损耗。同时更大的一次侧谐振电流会增加开关器件的电流应力，且关断损耗和通态损耗也会随之增大。因此，为实现高效率，常设计漏感谐振无铁心直流变压器具有较高的耦合系数，如文献[47]中的 0.707。

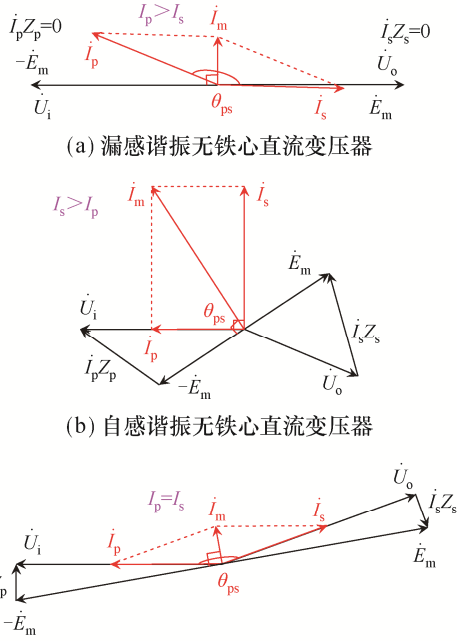


图 12　无铁心直流变压器相量

Fig. 12 Phasor of coreless DC transformer

图 12(b)为自感谐振无铁心直流变压器的相量图，电流夹角为 90°，励磁电流分量由一、二次侧电流的欧几里得合成，有 I_s>I_p。由于 $\dot{U}_i$ 与 $\dot{I}_p$ 同相位，因此关断电流极小，对于开关器件更为友好。又由于自感谐振型工作频率更低，故对电感量的依赖更低。但其需要较高的漏感以降低谐波含量，因此耦合系数往往更低，如文献[39]中的 0.480。

图 12(c)为 PT 对称无铁心直流变压器的相量图，其兼顾了漏感谐振型和自感谐振型的优点，有 $\dot{U}_i$ 与 $\dot{I}_p$ 同相位以及 $|\dot{U}_i|=|\dot{U}_o|$，且一、二次侧变量均以 $\dot{I}_m$ 镜像对称。电流夹角接近 180°，励磁电流由一、二次侧电流等幅的电流 I_p 和 I_s 的合成，故能量利用率极高，其磁势平衡方程与理想变压器一致，为 $|\dot{F}_p|=|\dot{F}_s|$。为扩大 PT 对称的区域，常设计较

高的耦合系数，但会出现谐波含量高的问题，因此 PT 对称无铁心直流变压器的耦合系数常设计在漏感谐振型和自感谐振型之间，如文献[55]的 0.550。

5 挑战与展望

尽管无铁心直流变压器展现出了巨大潜力，但其在工程化过程中仍面临以下挑战。

(1)标准化设计体系尚不完善。由于无铁心变压器的空气导磁特性，尚未建立如 AP 法般的标准化统一设计理论，制约了工程应用的可复制性。

(2)电磁屏蔽与损耗存在权衡难题。兼顾重量、损耗和散热的前提下实现有效电磁屏蔽，是中、大功率应用必须解决的问题。

(3)绝缘与散热之间存在复杂的耦合关系。工作频率提升导致绝缘材料介电损耗增加，绕组温升与绝缘寿命矛盾凸显，对绝缘与散热设计提出了更高的要求。

因此，无铁心直流变压器的未来研究应聚焦于标准化设计方法的构建、电磁兼容设计、绝缘与散热综合优化等关键问题的突破。同时，3 种典型正弦无铁心直流变压器技术路线将结合其性能特征，向不同应用领域差异化推进，具体如下。

(1)漏感谐振型无铁心直流变压器具有控制简单、定频恒压的特点，在交直流混合电网领域已得到验证，有望推广至舰船综合电力系统、轨道交通等大功率场合。

(2)自感谐振型无铁心直流变压器凭借其低工作频率特性，适用于芯片供电、隔离栅极驱动等高功率密度、高开关频率的小功率场景。

(3)PT 对称型无铁心直流变压器具有独特的理想变压器外特性和对参数的鲁棒性，使其在追求极致效率与可靠性的航空航天电源、特种工业电源等中、大功率领域具有显著优势。

6 结语

无铁心直流变压器并不是简单地去掉铁心，作为一种有别于有铁心直流变压器的新兴技术，其需要从电磁设计、物理模型、结构形状等方面革新。目前，无铁心直流变压器展示出的无铁损、架构轻量、设计灵活等优势，在质量受限、高绝缘需求、高可靠性场合中展现出巨大潜力，如分布式能源系统、航空航天电源、特种工业电源等。尽管无铁心直流变压器的研究和应用仍处于发展阶段，但随着研究的深入推进和技术的持续发展，围绕标准化设计、多物理场优化、制造工艺等关键问题的系统研究将成为重点突破方向，无铁心直流变压器必将走向工程化和产业化，从而为人类提供更加安全、稳定、清洁的电能。

参考文献：

[1] 陈建福, 程旭, 陈勇, 等. 老化时间对电力电子变压器绝缘劣化影响[J/OL]. 电源学报, 1-10. (2025-04-29) [2025-09-05]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250429.1104.015.
Chen Jianfu, Cheng Xu, Chen Yong, et al. Effect of aging thime on insulation deterioration of power electronic transformers [J]. Journal of Power Supply, 1-10. (2025-04-29)[2025-09-05]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250429.1104.015. (in Chinese)

[2] 傅恺宁, 涂江涛, 陈为. 高频变压器传导共模干扰分析与评估[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 37-43.
Fu Kaining, Tu Jiangtao, Chen Wei. Analysis and evaluation of conducted common-mode interference of high-frequency transformer [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 37-43. (in Chinese)

[3] Muhlethaler J, Biela J, Kolar J W, et al. Improved core-loss calculation for magnetic components employed in power electronic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 964-973.

[4] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3-17.
Zhang Bo, Shu Xujian, Huang Runhong. The development of inductive and resonant wireless power transfer technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 3-17. (in Chinese)

[5] 张波, 赖立, 林靖扬, 等. 基于量子力学的 PT 对称无

铁心变压器机理提出及研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7479-7490, I0028.
Zhang Bo, Lai Li, Lin Jingyang, et al. Mechanism proposal and research progress of PT-symmetric coreless transformers based on quantum mechanics [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7479-7490, I0028. (in Chinese)

[6] Janowski T, Kozak S, Kondratowicz-Kucewicz B, et al. Analysis of transformer type superconducting fault current limiters [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1788-1790.

[7] Xiao Yudi, Zhang Zhe, Duraij M S, et al. Review of high-temperature power electronics converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 14831-14849.

[8] Bagheri P, Xu W, Freitas W. A resonant tertiary winding-based novel air-core transformer concept [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1519-1528.

[9] Hurley W G, Wölfle W H. Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications [M]. Chichester: Wiley, 2013.

[10] McLyman C W T. Transformer and Inductor Design Handbook [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.

[11] Reinert J, Brockmeyer A, De Doncker R W. Calculation of losses in Ferro-and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation [C]// Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting. Phoenix, AZ, USA, 2002: 2087-2092.

[12] Dowell P L. Effects of eddy currents in transformer windings [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(8): 1387.

[13] Kotte H B, Ambatipudi R, Bertilsson K. High speed cascode flyback converter using multilayered coreless printed circuit board (PCB) step-down power transformer [C]// 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. Jeju, Korea, 2011: 1856-1862.

[14] Ghaderloo R A, Sirat A P, Shoulaie A. A high frequency active clamp forward converter with coreless transformer [C]// 2023 North American Power Symposium (NAPS). Asheville, NC, USA, 2023: 1-6.

[15] Wang Weizhong, Fahmy Y A, Preindl M. A low-cost battery-balancing auxiliary power module with dual-active half bridge links and coreless transformers [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 3801-3809.

[16] Czyz P, Guillod T, Krismer F, et al. Design and experimental analysis of 166 kW medium-voltage medium-frequency air-core transformer for 1: 1-DCX applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 3541-3560.

[17] Lo D S, Henze C P. Development of a DC-to-DC power converter [C]// Proceedings, Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Baltimore, MD, USA, 2002: 413-422.

[18] Ngo M, Cao Yuliang, Dong Dong, et al. Design of a high current, 1 MHz, 5 kW partial power processing converter with hybrid flex PCB for 80 C ambient automotive conditions [C]// 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA, 2024: 75-82.

[19] Goldberg A F, Kassakian J G, Schlecht M F. Issues related to 1-10-MHz transformer design [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1989, 4(1): 113-123.

[20] Onda K, Kanouda A, Takahashi T, et al. Thin type DC/DC converter using a coreless wire transformer [C]// Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference - PESC'94. Taipei, China, 2002: 1330-1334.

[21] Hui S Y, Tang S C, Chung H S H. Optimal operation of coreless PCB transformer-isolated gate drive circuits with wide switching frequency range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(3): 506-514.

[22] Tang S C, Hui S Y, Chung H S H. Coreless printed circuit board (PCB) transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(3): 431-437.

[23] Hui S Y, Tang S C, Chung H S H. Some electromagnetic aspects of coreless PCB transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 805-810.

[24] Hui S Y, Chung H S H, Tang S C. Coreless printed circuit board (PCB) transformers for power MOSFET/IGBT gate drive circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electro-

nics, 1999, 14(3): 422-430.

[25] Tang S C, Hui S Y, Chung H S H. Characterization of coreless printed circuit board (PCB) transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(6): 1275-1282.

[26] Tang S C, Hui S Y, Chung H S H. Coreless planar printed-circuit-board (PCB) transformers-a fundamental concept for signal and energy transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(5): 931-941.

[27] Tang S C, Hui S Y R, Chung H S H. A low-profile wide-band three-port isolation amplifier with coreless printed-circuit-board (PCB) transformers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(6): 1180-1187.

[28] Tang S C, Hui S Y, Chung H S H. A low-profile low-power converter with coreless PCB isolation transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(3): 311-315.

[29] Sagneri A D, Anderson D I, Perreault D J. Transformer synthesis for VHF converters [C]// The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -. Sapporo, Japan, 2010: 2347-2353.

[30] Rivas J M, Leitermann O, Han Yehui, et al. A very high frequency DC-DC converter based on a class Φ2 resonant inverter [C]// 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece, 2008: 1657-1666.

[31] Sepahvand A, Zhang Yuanzhe, Maksimović D. 100 MHz isolated DC-DC resonant converter using spiral planar PCB transformer [C]// 2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Vancouver, BC, Canada, 2015: 1-8.

[32] Fiore V, Ragonese E, Palmisano G. A fully integrated watt-level power transfer system with on-chip galvanic isolation in silicon technology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1984-1995.

[33] Zhang Zhiliang, Dong Zhou, Zou Xuewen, et al. A digital adaptive driving scheme for eGaN HEMTs in VHF converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6197-6205.

[34] Xu Jiahua, Zhang Zhiliang, Chen Xinlu, et al. A helical air-core transformer with even current distribution for VHF converters [C]// 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA, 2018: 2249-2255.

[35] Xu Ke, Zhang Zhiliang, Xu Zhiwei, et al. Air-core transformer integration for GaN VHF converters [C]// 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA, 2018: 2256-2263.

[36] Zhang Zhiliang, Xu Ke, Xu Zhiwei, et al. GaN VHF converters with integrated air-core transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3504-3515.

[37] Guan Yueshi, Wang Yijie, Wang Wei, et al. A high-performance isolated high-frequency converter with optimal switch impedance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5165-5176.

[38] Tong Zikang, Braun W D, Rivas-Davila J M. Design and fabrication of three-dimensional printed air-core transformers for high-frequency power applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8472-8489.

[39] Spro O C, Lefranc P, Park S, et al. Optimized design of multi-MHz frequency isolated auxiliary power supply for gate drivers in medium-voltage converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9494-9509.

[40] Spro O C, Mauseth F, Peftitsis D. High-voltage insulation design of coreless, planar PCB transformers for multi-MHz power supplies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8658-8671.

[41] Guo Zhehui, Li Hui. A MHz-pulse-transformer isolated gate driver with signal-power integrated transmission for medium-voltage SiC MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9415-9427.

[42] Kotte H B, Ambatipudi R, Bertilsson K. High-speed (MHz) series resonant converter (SRC) using multilayered coreless printed circuit board (PCB) step-down power transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1253-1264.

[43] Ho G K Y, Zhang Cheng, Pong B M H, et al. Modeling and analysis of the bendable transformer [J]. IEEE

Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6450-6460.

[44] Ho G K Y, Fang Yaoran, Pong B M H. A multiphysics design and optimization method for air-core planar transformers in high-frequency LLC resonant converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1605-1614.

[45] Guan Yueshi, Shi Zhenyu, Liu Chang, et al. A 10 MHz DC/DC converter with zero-phase difference synchronous driving signal [J]. IEEE Transactions on Power Electro nics, 2021, 36(12): 13878-13888.

[46] Yin Shan, Xin Xiong, Wang Runze, et al. A 1-MHz GaN-based LCLC resonant step-up converter with air-core transformer for satellite electric propulsion application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11035-11045.

[47] Czyz P, Guillod T, Krismer F, et al. Exploration of the design and performance space of a high frequency 166 kW/ 10 kV SiC solid-state air-core transformer [C]// 2018 International Power Electronics Conference (IPEC- Niigata 2018 -ECCE Asia). Niigata, Japan, 2018: 396-403.

[48] Guillod T, Czyz P, Kolar J W. Geometrical optimization of medium-frequency air-core transformers for DCX applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4319-4335.

[49] Czyz P, Guillod T, Zhang Daifei, et al. Analysis of the performance limits of 166 kW/7 kV air- and magnetic-core medium-voltage medium-frequency transformers for 1: 1-DCX applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2989-3012.

[50] Assawaworrarit S, Yu Xiaofang, Fan Shanhui. Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit [J]. Nature, 2017, 546(7658): 387-390.

[51] Zhou Jiali, Zhang Bo, Xiao Wenxun, et al. Nonlinear parity-time-symmetric model for constant efficiency wireless power transfer: Application to a drone-in-flight wireless charging platform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4097-4107.

[52] 张波, 吴理豪, 江彦伟. 一种基于 PT 对称原理的并联-并联型无铁心变压器[P]. 中国专利: CN109755006A, 2019-05-14.
Zhang Bo, Wu Lihao, Jiang Yanwei. A parallel-parallel type ironless transformer based on PT symmetry principle [P]. China Patent: CN109755006A, 2019-05-14.

[53] 张波, 江彦伟, 吴理豪. 一种基于宇称-时间对称原理的无铁心变压器[P]. 中国专利: CN109148130A, 2019-01-04.
Zhang Bo, Jiang Yanwei, Wu Lihao. A coreless transformer based on parity-time symmetry principle[P]. China Patent: CN109148130A, 2019-01-04.

[54] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang, et al. On Hamiltonian for PT-symmetric second-order circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(5): 2859-2863.

[55] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang. PT-symmetric CLLC coreless transformer with magnetic potential balance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12436-12446.

[56] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang. Analytical model and robust design of PT-symmetric CLLC coreless transformers with non-ideal parameters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2025, 72(9): 5168-5179.

[57] Lin Jingyang, Zhang Bo, Lai Li. Pseudo-Hermitian coreless transformer for current source converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 5624-5635.

[58] Yang Lun, Zhang Bo. Enhanced-magnetizing-impedance coreless transformer with virtual magnetic permeability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(3): 3464-3476.

[59] Lin Jingyang, Zhang Bo, Lai Li. Coreless DC transformer with near-unity power factor by a reactive power injector [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 1123-1134.

[60] 戴晨皓, 张波. 一种基于自由衰减振荡的固定占空比控制的无铁心变压器[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 1-9.
Dai Chenhao, Zhang Bo. Coreless transformer under constant duty control based on free decay oscillation [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 1-9. (in Chinese)

[61] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang. Linear-sinusoidal

air-core transformers featuring multicycle passive resonance for wide-input low-power applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(1): 803-813.

[62] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang, et al. Variable magnetic permeability coreless transformers via anti-resonant windings for wide input voltage range DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2025, P(99): 1-11.

[63] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang. Modeling and optimization of axial winding segmented coreless transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(4): 6069-6083.

[64] Lai Li, Zhang Bo, Lin Jingyang. On magnetic shielding for axial winding segmented coreless transformers in self-sustained converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2026, 41(3): 3695-3711.

[65] Lin Jingyang, Zhang Bo, Lai Li. Comprehensive design method for air-core transformer in dual-active-bridge resonant converter with wide output range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2026, 41(3): 4199-4217.



赖立

作者简介：

赖立(1996—)，男，博士，博士后助理研究员。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：laili@.scut.edu.cn。

张波(1962—)，男，中国电源学会会士，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：epbzhang@scut.edu.cn。

李虹(1980—)，女，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：hong_li@zju.edu.cn。

林靖扬(1999—)，男，博士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：202110182784@mail.scut.edu.cn。

杨伦(1999—)，男，博士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：997693734@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)