

无桥 PFC 与第三代半导体在大功率电源中的应用： 充电器与路灯电源领域对比研究

胡三义

河南 驻马店 463699

DOI:10.61369/ERA.2025100015

摘要： 本文针对充电器与路灯电源领域的大功率电源设计需求，对比分析无桥 PFC 与第三代半导体（SiC/GaN）的技术适配性与经济性差异。研究表明，无桥 PFC 通过高频特性与拓扑简化适配充电器的动态响应及小型化，而 SiC 器件的高温稳定性更契合路灯电源的长期可靠性；GaN 的高频优势推动快充效率提升，但其成本压力与工艺瓶颈制约规模化应用。技术局限性集中于 EMC 复杂度与材料缺陷率，未来需通过宽禁带材料创新与拓扑优化实现突破。基于对比结论，提出充电器侧重高频集成与协议兼容、路灯电源强化智能电网交互的差异化研发策略，为行业技术选型与政策部署提供参考。

关键词： 无桥 PFC；第三代半导体；大功率电源

Application of Bridge-Free PFC and Third-Generation Semiconductor in High Power Supply: Comparative Study of Charger and Street Lamp Power Supply

Hu Sanyi

Zhumadian, Henan 463699

Abstract： Aiming at the design requirements of high-power power supplies in the field of chargers and street lamps, this paper compares and analyzes the technical adaptability and economic differences between bridge-free PFC and third-generation semiconductor (SiC/GaN). The research shows that the dynamic response and miniaturization of the adaptive charger are simplified by the high frequency characteristics and topology of the bridgeless PFC, and the high temperature stability of the SiC device is more suitable for the long-term reliability of the street lamp power supply. The high frequency advantage of GaN promotes the fast charging efficiency, but its cost pressure and process bottleneck restrict the large-scale application. Technical limitations focus on EMC complexity and material defect rate, and breakthroughs need to be achieved through wide band gap material innovation and topology optimization in the future. Based on the comparison conclusions, the differentiated research and development strategy of chargers focusing on high-frequency integration and protocol compatibility and street lamp power to strengthen smart grid interaction is proposed, which provides a reference for industry technology selection and policy deployment.

Keywords： bridgeless PFC; third generation semiconductor; high power supply

引言

随着新能源汽车普及与智慧城市升级，大功率电源在充电器与路灯领域需求增长，高效、高可靠性及小型化成为技术迭代方向。无桥 PFC 通过简化拓扑结构省却整流桥较大损耗，第三代半导体（SiC/GaN）凭借宽禁带特性提升频率与高耐高温性能，二者协同推动电源性能跃迁。然而，充电器的动态响应需求与路灯电源的长期稳定性要求存在技术路径分化，且成本控制与复杂环境适应性仍是产业化难点。政策层面，2023年国务院《新型电力系统发展蓝皮书》提出“高效电能转换与智能化配电”任务，2024年工信部政策强调第三代半导体在新能源装备中的规模化应用。本文对比两大场景的技术需求、成本结构及环境约束，揭示无桥 PFC 与第三代半导体的差异化适配机制，为行业研发与部署提供理论依据。

一、无桥 PFC 与第三代半导体技术概述

(一) 无桥 PFC 技术原理及优势

无桥 PFC (Power Factor Correction) 通过消除传统 PFC 拓扑中的整流桥这一元件, 其典型拓扑采用双向开关器件直接连接交流输入与直流母线, 避免了传统 Boost PFC 中整流桥的二极管压降损耗^[1]。传统 PFC 电路中, 输入电流需经过整流桥二极管, 导致其损耗显著, 特别是输入低电压时, 整流桥上损耗巨大, 导致整体效率下降明显, 较大损耗需要通过较大的散热器和产品体积来散热, 并增加成本, 而无桥 PFC 通过交流直接连接至 PFC 电感及功率管端。消除了整流桥损耗。极大的提高了效率, 缩小产品体积, 且成本进一步降低。从而降低整体损耗^[2]。在高功率密度场景下, 无桥 PFC 的损耗优化特性尤为突出: 其导通损耗降低可提升整机效率 1%~3%, 同时高频开关特性支持更小体积的磁性元件设计, 进一步压缩电源体积^[3]。此外, 无桥拓扑可通过动态调整开关策略减少电磁干扰 (EMI), 为紧凑型大功率电源提供技术基础^[3]。

(二) 第三代半导体的特性及应用潜力

以碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 为代表的第三代半导体材料, 凭借宽禁带特性 (SiC: 3.3 eV, GaN: 3.4 eV), 具备高临界击穿场强 (SiC: 3 MV/cm, GaN: 3.3 MV/cm) 与高热导率 (SiC: 4.9 W/cm·K), 其性能显著优于传统硅基器件。SiC 器件适用于高压场景 (>1200 V), 其低导通电阻与高温稳定性可降低大功率电源的开关损耗, 而 GaN 器件凭借高电子迁移率 (2000 cm²/V·s) 更适配高频开关 (MHz 级), 可大幅缩减变压器与滤波器体积。在高频与高温性能方面, SiC MOSFET 在 150°C 下仍保持低导通损耗, 支持电源系统在严苛环境中的稳定运行; GaN HEMT 的高频特性则使开关频率提升至传统硅器件的 10 倍以上, 推动电源设计向超高频、高密度方向演进^[4]。两者的材料特性共同赋能大功率电源的高效化与小型化, 成为充电器与工业电源升级的核心技术路径, 并推动第三代半导体产业的规模化发展。

(三) 无桥 PFC 架构种类及特点

无桥 PFC 包含多种架构形式:

1. 其中主要应用包括交错并联无桥 PFC 和图腾柱无桥 PFC, 交错并联无桥 PFC 这种架构工作模式包括 CRM 模式, 和 CCM 模式, CRM 模式通常用在中小功率段产品上, 主要由两个硅 MOSFET 管和两个升压超快恢复二极管组成。其特点是 ZVS 开通, 因而没有开通损耗, 升压二极管没有反向恢复。但其峰值电流相对较高。纹波电流较大一点。效率与 CCM 模式等功率下高约 0.6%; 而 CCM 同样由两个开关管组成, 两个升压二极管组成, 由于 CCM 连续导通工作特性, 此二极管必须使用 SiC 二极管, 以此减少反向恢复损耗。但 CCM 模式由于其较小的纹波电流, 可显著减少输入 X 电容及母线电解电容容量, 减少输入元件电流应力。而开关管使用第三代半导体更有效率优势。此架构需要两个相同规格的 PFC 电感。

2. 图腾柱无桥 PFC 近年来应用越来越广泛, 因其复杂的技术特性和对 PCB 布局超高的要求, 及对第三代半导体器件的深入研究, 使得应用起来有较高的技术挑战与难度, 以及相对较高的

成本。通常用在功率较大的产品上以此释散成本压力, 图腾柱无桥 PFC 仍然主要包括 DRM, CRM 和 CCM 工作模式, 图腾柱无桥 PFC 架构共需要四只功率管; 两只快管必须使用第三代半导体, 慢管可以使用硅 MOSFET 管。与交错无桥 PFC 相比, 图腾柱无桥 PFC 仅需一个 PFC 电感, 而交错并联无桥 PFC 则需要两个同规格的 PFC 电感, 体积和效率相对低于图腾柱无桥 PFC。下面的介绍均包含交错无桥 PFC 和图腾柱架构的应用。

二、充电器领域的大功率电源设计应用

(一) 无桥 PFC 在充电器中的设计与优化

无桥 PFC 在大功率充电器及快充方案中通过优化拓扑结构与控制策略实现效率提升与体积压缩。以大功率充电器及 200W 以上大功率快充电源为例, 采用交错并联无桥 PFC 架构 (如 Dual-Sepic 拓扑) 可将输入电流纹波降低 30%~50%, 同时减少整流损耗, 整机效率提升至 95% 以上, 满足高功率密度需求 [5]。体积压缩依赖于高频开关特性: 无桥 PFC 支持 200 kHz 以上开关频率, 搭配平面变压器及分段式气隙技术与贴片电容, 使电源体积较传统方案缩小 30% [6]。电磁兼容性 (EMC) 挑战主要源于高频开关引起的传导与辐射干扰, 通过优化开关管驱动时序、引入共模滤波器及磁屏蔽技术, 结合闭环控制参数设计, 可将 EMI 噪声抑制至 CISPR 32 Class B 标准以下。

(二) 第三代半导体在充电器中的技术突破

第三代半导体的高频开关性能显著缩短充电时间: GaN 器件支持 MHz 级开关频率, 结合零电压开关 (ZVS) 技术, 可将大功率充电器功率转换损耗降低至 2% (PFC 级) 以内, 同时缩短 90% 的充电周期, 这一技术突破推动第三代半导体在消费电子领域的产业化进程 [7]。SiC MOSFET 在高压大电流场景中通过低导通电阻 (<50 mΩ) 减少热损耗, 支持 100~277V 宽电压输入下的稳定快充, 其性能优势已在电力电子系统的高效电能转换中得到验证 [8]。热管理方案基于材料特性创新: GaN 的高电子迁移率允许芯片面积缩小, 结合铜基板与氮化铝陶瓷散热片, 实现热流密度均匀分布; SiC 的高热导率支持直接冷却设计, 通过 PCB 埋铜或微通道液冷技术将结温控制在 85°C 以下, 此类散热技术的高价值专利布局为规模化应用奠定基础^[9]。

三、路灯电源领域的大功率电源设计应用

(一) 无桥 PFC 在 LED 驱动电源中的适配性

在 LED 路灯电源中, 无桥 PFC 技术通过省去整流桥的较大损耗, 大幅提升效率, 降低整机温度, 满足长寿命与高可靠性需求。传统 Boost PFC 因整流桥损耗易致电解电容老化, 而无桥拓扑让输入交流直连 PFC 电感及功率管, 关键元件寿命超 10 万小时, 适配户外长期运行。DC/DC 采用 LLC 软开关技术与次边同步整流策略, 进一步提高效率。PFC 电感和 DC/DC 谐振电感运用平面绕组工艺及分段性气隙技术, 减少涡流损耗; LLC 变压器采用无骨架平面变压器, 优化初次级绕组叠加方式, 增强耦合

度,且无骨架设计利于散热。模块化电路技术提升空间利用率,支持产品系列化开发。本人在公司开发的 MXS 系列超大功率室外路灯电源,融合无桥 PFC 方案与第三代半导体技术,并结合本人发明多项专利应用于此平台。如“一种无桥 PFC 电路 ZCD 信号采集电路”(专利号:ZL 2024 1 1027428.5)用于检测退磁及开机信号;“一种无桥 PFC 输入欠压保护电路”(专利号:ZL 2023 1 1721924.6)在输入电压异常低于限时保护关机;“一种低温启动及快速关机电路”(专利号:ZL 2023 1 1454828.X)确保极寒天气正常启动且关机无回闪,为产品性能与可靠性提供保障。

(二) 第三代半导体在路灯电源中的实践

近年来路灯电源功率不断增大,从百瓦级迈向 1500 瓦以上,输出电流达几十安培,且采用宽电压、宽电流范围设计。图腾柱无桥 PFC 及第三代半导体器件提升了路灯电源效率,助力低碳目标实现,如 SiC MOSFET 或 GAN 配合无桥 PFC,在 430V 直流母线、230V 交流输入下,转换效率近 99%,谐波畸变率低于 6%。在户外适应性方面, SiC 器件高热导率减少散热器体积,结合防护封装可在 -40°C - 125°C 稳定运行; GaN 低栅极电荷降低损耗,通过防护工艺延长在高湿地区使用寿命。

四、充电器与路灯电源领域的对比分析

(一) 技术性能与可靠性对比

1. 效率与功率密度差异

充电器设计聚焦动态响应优化,需在毫秒级时间内完成功率调整以适应快充协议切换,其效率提升依赖于高频开关(如 GaN 器件支持 MHz 级开关)与拓扑简化,功率密度可达 30 W/in³ 以上。路灯电源则侧重稳态效率与散热设计,需在额定负载下维持 95% 以上转换效率超过 10 万小时,通过 SiC MOSFET 的低导通损耗与多级散热结构(如散热鳍片与热管组合)平衡效率与温升,功率密度通常低于 15 W/in³。动态响应与稳态性能的差异源于应用场景需求:充电器需快速响应用户插拔与协议握手,而路灯电源需在恒定负载下实现能源利用最优化及更高的可靠性。

2. 可靠性要求差异

充电器的可靠性集中于短时高负载耐受性,例如大功率充电器及 120W 以上快充需在 30 分钟内承受峰值电流(如数 A 以上)而不触发过温保护,其元件选型以瞬时抗冲击能力为核心,通常

采用低 ESR 固态电容与 GAN MOSFET。路灯电源的可靠性则依赖长期运行稳定性,需在 -40°C 至 70°C 环境温度下连续工作,通过冗余设计(如并联 PFC 模块)与抗老化材料(如长寿命电解电容)降低故障率,通常选用 SiC MOSFET。环境适应性要求进一步分化:充电器仅需满足室内温湿度范围,而路灯电源需通过 IP67 防护与盐雾测试以应对户外极端气候。

(二) 经济性与应用场景适应性对比

1. 成本结构差异

第三代半导体在路灯电源中因规模化应用具备显著降本潜力: SiC 与 GaN 器件的成本随晶圆尺寸扩大(如 6 英寸向 8 英寸升级)及制造工艺成熟逐年上升,规模化采购可使单颗器件成本降低 30%-50%,且长寿命特性减少全生命周期更换成本。大功率充电器领域面临快速迭代压力:消费电子快充协议频繁更新(如 PD 3.1 至 PD 3.2)迫使电源方案需频繁适配,研发投入与模具成本占比高达总成本 25%,叠加市场竞争导致的低价策略,压缩第三代半导体高端器件的渗透空间。

2. 场景适配性

大功率充电器的便携性需求驱动拓扑简化与小型化:基于 GaN 的平面磁性元件与无桥 PFC 结合,使 200W 及以上大功率充电器体积缩小至传统方案的 1/3,适配移动场景的轻量化需求。路灯电源则需强化智能化与电网交互能力:集成物联网(IoT)模块支持远程调光与故障诊断,通过 SiC 高抗冲击性满足智能电网的动态负载调节需求。场景差异导致设计优先级分化:大功率充电器追求极致的功率密度与用户交互体验及较短的充电时间,而路灯电源需兼顾电网稳定性与多设备协同管理,形成技术路径的天然区隔。

五、总结

无桥 PFC 与第三代半导体在大功率充电器和路灯电源领域适配性不同。无桥 PFC 结合 GAN 高频特性满足充电器动态响应与小型化需求,但在路灯电源复杂环境应用受限; GaN 是大功率充电器核心, SiC 则因高温稳定契合路灯电源户外需求。技术局限于成本和工艺成熟度,如 GaN 衬底缺陷、SiC 加工精度及无桥 PFC 共模噪声等。未来可通过材料创新、拓扑优化、AI 融合发展。行业应差异化布局,前者强化高频集成与协议兼容,后者推动 SiC 电源标准化及与分布式能源融合。

参考文献

- [1] 王慧贞, 张军达. 一种新型无桥 Boost PFC 电路 [J]. 电工技术学报, 2010(5):7.
- [2] 易俊宏, 马红波, 孟庆伟. 高效率、高功率密度无桥 PFC 设计 [J]. 电力电子技术, 2017, 51(12):5.
- [3] 谭乐彬, 李志忠, 龙淑群, 等. 一种无电流采样的无桥 PFC 变换器研究 [J]. 电力电子技术, 2023, 57(5):102-105.
- [4] 吴玲, 赵璐冰. 第三代半导体产业发展与趋势展望 [J]. 科技导报, 2021, 39(14):20-29.
- [5] 曹太强, 李清, 王军, 等. 无桥 Dual-Sepic PFC 变换器分析与设计 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2):6.
- [6] 杨雁勇, 戴慧纯, 王正仕. 无桥 PFC 的性能改善及控制参数设计 [J]. 电工技术, 2018, 000(005):42-45.
- [7] 李楠, 徐欢. 发展第三代半导体 打造千亿级未来产业 [J]. 浙江经济, 2023(3):70-71.
- [8] 黄灵钟. 基于第三代半导体技术的电力电子应用发展浅析 [J]. 新潮电子, 2023(12):43-45.
- [9] 柏松, 张弛, 王亚利, 等. 第三代半导体电力电子器件模块高价值专利培育模式与机制探析 [J]. 江苏科技信息, 2019(5).