

核磁共振射频功率放大器国产化应用实践探析

周邈 严绍刚

成都创世芯通医疗科技有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i3.21372

[摘要] 射频功率放大器是核磁共振成像设备的核心部件,其性能直接决定成像清晰度与运行稳定性。国内高端核磁共振配套高功率射频功放长期依赖进口,海外企业垄断高端市场,导致采购运维成本高企,制约国内医疗影像产业自主发展。本文以成都创世芯通8KW核磁共振射频功放自研项目为基础,梳理行业技术现状与国产化攻坚难点,对比国内外主流产品性能差异;结合研发全过程,系统阐述硬件架构、核心技术攻关、软件逻辑优化等关键内容,重点介绍低插损功率合成、电容快速放电控制等技术,通过性能测试验证国产化设备应用价值,客观分析现存短板并提出适配产业需求的升级方向。本次研发实现高功率射频功放核心技术自主可控,打破高端领域进口垄断,可为国内核磁共振核心零部件国产化替代提供工程实践参考。

[关键词] 核磁共振; 射频功率放大器; 高功率设备; 国产化; 医疗核心部件

中图分类号: O482.53+2 **文献标识码:** A

Discussion on Localization of Magnetic Resonance Imaging RF Power Amplifier

Li Zhou Shaogang Yan

Chengdu NTS Healthcare Technology Co., Ltd

[Abstract] Radio frequency power amplifiers are a core component of magnetic resonance imaging (MRI) equipment; the imaging clarity and operational stability of the equipment depend directly on the performance of these amplifiers. Domestic high-end MRI systems have long relied on imported high-power RF power amplifiers, with overseas companies dominating the domestic high-end market. This has resulted in persistently high procurement and operational costs, hindering the independent development of China's medical imaging equipment industry. Drawing on the practical experience of Chengdu Chuangshi Xintong Medical Technology Co., Ltd.'s in-house development project for an 8 kW MRI RF power amplifier, this paper reviews the current state of technological development in the industry and the challenges faced in localisation, whilst conducting a comparative analysis of the actual performance differences between leading domestic and international products. Drawing on the entire R&D process, the paper systematically elaborates on key development aspects such as the device's hardware architecture, core technological breakthroughs, and software logic optimisation. It highlights the introduction of key technologies including low-insertion-loss power synthesis, TR switch drive, and capacitive discharge control, and validates the application value of the domestically produced equipment through performance test results. It objectively analyses the current shortcomings in product application and proposes directions for iterative upgrades that align with the needs of industrial development. This R&D project has achieved self-reliance and control over the core technologies of high-power RF power amplifiers, breaking the monopoly of imported products in high-end sectors. It provides a reliable reference for engineering practice in the localisation of core components for domestic MRI systems.

[Key words] Magnetic Resonance Imaging; Rf Power Amplifier; High-Power Equipment; Localisation; Core Medical Components

引言

医疗影像设备国产化是我国高端医疗装备产业发展的核心

方向,核磁共振因成像精度优势,广泛应用于临床诊断与医学科研领域。核心零部件自主化程度,直接决定国产核磁共振设备的

市场竞争力与产业发展底气。目前国内中小企业可量产交付中低功率射频功放,但高端8KW等级产品仍依赖进口,不仅采购成本高,后期运维、换件均依赖原厂,售后响应难以匹配国内医疗机构需求;现有国产产品多为3KW等级,仅能满足基础成像,动态响应与长期运行稳定性不足,无法适配高端高精度设备的运行要求。成都创世芯通医疗科技有限公司深耕医疗射频设备领域多年,依托自身技术积累完成8KW核磁共振射频功率放大器的全流程研发、调试与性能验证工作,攻克多项行业技术难题。本文依托该项目真实工程实践内容,探讨高功率核磁共振射频功放的国产化技术路径与落地价值,为同类医疗核心部件自研量产提供实践参考。

1 MRI射频功率放大器行业技术现状与国产化痛点分析

1.1 MRI射频功放工作原理与技术指标要求

核磁共振射频功率放大器负责放大特定频率窄带射频信号,为体线圈输送稳定能量以激发原子核跃迁,支撑高清成像与持续扫描。目前普及最广的1.5T核磁共振对其性能要求严苛,除输出功率外,信号失真度、频率精度、无磁化性能、散热及抗干扰能力均直接影响成像质量与运行稳定性,兼顾多高精度指标的高功率产品研发门槛高,是国内长期无法自主量产高端产品的核心原因。

1.2国内外主流产品技术对标分析

海外医疗设备企业起步较早,射频功放研发技术体系成熟,高功率产品稳定性与信号控制精度表现优异,长期垄断国内高端医疗配套市场。国内相关产业研发起步较晚,市面在售产品普遍集中在3KW功率等级,适用场景局限于基础核磁共振成像。低功率设备存在动态响应慢、长时间工作易性能衰减的问题,可靠性不足,难以适配高端设备复杂工况,高端高功率射频功放仍依赖进口,8KW产品国产化可补齐产业短板实现技术突破。

1.3国内国产化发展核心痛点

结合行业整体研发水平与成都创世芯通项目研发经验来看,高功率核磁共振射频功放国产化研发存在多项实质性技术与工程难题。高功率输出易出现信号畸变,传输损耗难以控制,影响成像质量;强磁场环境下,无磁化结构设计与高效散热存在技术矛盾,难以兼顾;高功率输出需多路功率叠加,输出均衡调控难度大,易出现局部过载、功率波动;现有技术难以保障长时间连续运行稳定性,且缺乏落地案例、应用经验与临床数据,提升了研发迭代难度。

1.4同类产品核心参数对比

为直观体现本次国产化设备的技术突破,结合行业通用检测标准,对国内常规3KW样机、国外高端商用机型与本次自研8KW机型的核心参数进行横向对比,清晰展现国产设备的性能优势与升级亮点,具体参数如下表1所示。

对比数据可以看出,国内传统3KW样机各项性能存在明显短板,无法适配高端医疗应用场景。成都创世芯通8KW国产化机型核心性能指标完全对标国外高端设备,弥补了国产低功率产品

的性能缺陷。设备依托本土化研发生产的优势,有效控制生产与运维成本,售后响应更为及时,真正实现高端设备性能对标进口、成本自主可控的国产化突破。

表1 不同类型MRI射频功率放大器核心技术参数对比

技术参数	国内常规样机(3KW)	国外高端商用机型	成都创世芯通国产化机型(8KW)
额定输出功率	3KW	7-8KW	8KW
信号失真度	≤5%	≤2%	≤2%
频率稳定度	±50Hz	±20Hz	±20Hz
无磁化适配性	基础适配,高功率易磁化干扰	完全适配医疗场景	全无磁化优化设计
连续运行稳定性	8小时连续运行	24小时不间断运行	24小时不间断运行
成本与售后	成本较低,性能受限	采购、售后成本极高	成本可控,本土化售后

2 8KW射频功放核心技术攻关与方案设计

本次8KW射频功放研发工作完全依托企业工程实践经验开展,围绕高功率稳定输出、医疗场景适配、长期可靠运行三大核心目标优化整体方案。硬件架构与软件算法均经过多轮试验迭代,所有技术攻关内容均针对行业实际痛点设计,形成适配国产核磁共振设备的成熟落地方案。

2.1整体硬件架构设计

本次自研8KW射频功放硬件体系包含五大核心功能模块,分别为射频信号预处理单元、多级功率放大单元、功率合成单元、智能控制监测单元、散热与防护单元。传统国产3KW射频功放普遍采用单路功率放大架构,单路模块的功率输出上限较低,无法实现高功率稳定输出。本次设备采用多路并行放大搭配均衡功率合成的全新架构,从硬件层面突破单路功率输出的技术局限,为8KW额定功率持续输出提供坚实支撑。整体架构充分贴合医疗设备安装运行要求,在保障高功率性能的同时,适配核磁共振设备的无磁化运行环境,兼顾设备实用性与场景适配性。

2.2核心关键技术攻关

项目研发高功率低失真放大技术,通过优化多级放大电路拓扑、筛选适配高功率工况的射频器件、搭建精准阻抗匹配网络,有效抑制信号畸变与谐波干扰,将信号失真度控制在行业优质水平,保障核磁共振成像清晰度。

均衡功率合成技术是实现8KW高功率输出的核心,针对单路模块无法承载8KW输出的问题,项目自研可调平衡功率合成器,采用低插损方案,基于LC高通阻抗匹配网络与1:1电流型Balun逐级阻抗翻倍结构实现无损功率汇聚,解决了传统合成级联损耗累积问题,8路合成效率接近单管峰值,改善了多路叠加功率不均、局部过载、功率波动问题,实现功率均衡输出,提升整机利用率与运行稳定性,支撑8KW高功率输出。

团队针对核磁共振强磁场环境开展医疗级无磁化优化设计,全面筛选无磁化元器件,优化电路布局与整体结构,规避金属磁化带来的磁场干扰,彻底解决高功率设备干扰成像精度的行业难题,适配1.5T医用核磁共振临床运行场景。项目配套研发高功率智能散热与稳定性控制技术,采用水冷加导热结构的一体化散热方案,搭建全覆盖实时监测体系,动态采集设备运行核心数据,依托智能系统实现过载保护、高温预警与功率自适应调节,

保障设备全天候不间断稳定运行,满足医疗机构持续扫描作业需求^[3]。

此外,针对射频功放储能电容大下电时放电缓慢影响生产效率的问题,引入了基于数据驱动与物理模型融合的电容放电控制方法:实时采集电压电流序列特征,动态调整可调负载电阻,将放电电流波动抑制在预设范围内,在确保安全的前提下将平均放电电流最大化,大幅缩短放电时间。

2.3 软件控制逻辑优化

软件控制系统负责设备运行参数的精准调控,直接影响设备适配性与成像稳定性。本次研发优化数字化信号调控算法,搭建高精度闭环控制体系,精准管控制频输出的功率、频率与相位参数。系统摒弃固定参数运行模式,可根据核磁共振不同扫描序列与临床场景自适应调整输出参数,兼容多种临床扫描模式。优化后的控制逻辑有效提升设备与国产核磁共振整机的适配度,改善设备运行稳定性,弥补传统国产射频功放智能化调控能力不足的短板,更贴合临床诊疗的实际使用需求。

3 产品性能测试与工程应用实践

3.1 测试方案与测试环境

为验证自研8KW国产化射频功放样机综合性能,本次测试严格遵循医用射频功放行业检测规范,搭建贴近临床的模拟运行场景,从静态参数、长时间连续运行稳定性、高低温环境适应性、磁场抗干扰多维度开展测试,全程完整记录数据,避免单一场景偏差,保障测试结果真实反映实际性能。

3.2 核心性能测试结果分析

整合各项测试数据并与国内3KW样机、进口高端设备对比分析,本次自研设备核心优势明确:样机可长期稳定输出8KW额定功率,满负荷下信号失真度、频率稳定度、抗干扰能力等核心指标均达进口设备标准,完全满足1.5T医用核磁共振临床使用要求;长时间连续运行未出现性能衰减、功率波动、高温报错等异常,可靠性良好。针对测试初期出现的小幅功率波动,研发团队通过优化电路参数、微调功率合成模块平衡精度彻底解决问题,进一步提升运行精准度与稳定性。得益于低插损功率合成技术,多路合成后整机功率附加效率达79.4%,较传统方案提升约10个百分点;电容放电控制装置将下电后放电时间缩短约60%,有效提升生产效率。

3.3 国产化工程落地实践成效

本项目属于高端医疗核心部件首台套国产化项目,落地应用具备多重产业价值。技术层面,项目突破高功率射频功放多项核心技术,硬件架构、控制算法与核心器件均实现自主可控,摆脱对海外技术体系的依赖。产业层面,项目打破国外企业对8KW级别高功率射频功放的长期垄断,有效降低核磁共振整机核心部件采购成本,助力国产医疗设备降本增效。应用层面,设备已完成多轮整机适配调试,可批量配套国产核磁共振设备生产,具备成熟的产业化落地条件。企业层面,本次项目积累了高功率医疗射频设备的研发调试经验,完善国产化技术迭代体系,进一步巩固企业在核磁共振核心部件领域的技术优势。

4 项目现存问题与国产化优化升级方向

4.1 当前项目存在的短板问题

结合多轮测试与试运行结果来看,本次自研设备核心性能虽可对标进口产品,但相较于海外成熟机型仍存在不足。设备整体集成化水平有待提升,机身结构体积偏大,安装适配的灵活性不及进口紧凑型设备。极端工况切换过程中,动态响应速度存在轻微滞后,工况适配灵敏性需进一步优化。目前设备仅完成实验室测试与小范围试点运行,长期临床服役运行数据积累不足,产业化批量应用的迭代经验相对匮乏。

4.2 后续国产化优化升级方向

针对现阶段设备存在的短板,后续将从多个维度推进技术迭代升级。重新优化硬件集成架构,精简电路布局与结构设计,保证性能的前提下,实现设备小型化、轻量化升级,提升场景适配灵活性。迭代智能调控算法,优化工况切换响应逻辑,缩短动态响应时间,提升极端工况下的适应能力^[4]。持续推进临床试点应用,长期跟踪设备运行状态,积累临床运行数据,完善设备可靠性评价体系。推进核心元器件全面国产化替代,持续压缩生产成本,提升核心供应链自主可控能力,推动产品规模化产业化应用^[5]。

5 结束语

核磁共振射频功率放大器国产化,是补齐高端医疗影像产业链短板、实现产业自主可控的关键举措。成都创世芯通医疗科技通过本次8KW高功率射频功放研发项目,攻克高功率信号调控、多路功率合成、医疗级无磁化设计等核心技术难题;自研设备核心性能远超国内传统3KW样机,达到进口高端设备标准,兼具成本可控、本土售后优势,顺利实现高端核心部件国产化替代,验证了国内企业自主研发高端医疗射频设备的技术能力。针对现存集成度不足、临床数据欠缺等问题,后续可通过持续技术迭代与临床应用积累完善产品性能。随着国产化技术成熟,国产高功率高稳定射频功放将逐步替代进口,推动国内核磁共振产业链全面升级,为高端医疗装备国产化高质量发展提供有力支撑。

【参考文献】

- [1]王佳升.超高频磁共振大功率无磁射频功放设计[D].重庆理工大学,2024.
- [2]骆俊.5T磁共振无磁射频功率放大技术研究[D].重庆理工大学,2022.
- [3]何聪.关于西门子核磁共振设备射频系统的分析[J].科技创新,2020,(22):74-75.
- [4]余晖.宽频带核磁共振信号测量方法研究[D].中国石油大学(北京),2020.
- [5]曹志良.磁共振系统中微型射频功率电桥的设计与测试[J].电子器件,2020,43(02):345-348.

作者简介:

周通(1982—),女,汉族,成都市人,本科,工学学士,电子中级职称,从事医疗射频功率放大器项目开发。