



·粒子束及加速器技术·综述·

束流轨道快校正磁铁电源研究进展*

邵琢瑕, 高 辉, 张海燕, 胡保进

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘 要: 快校正磁铁电源能够对束流轨道的偏离进行快速校正, 提升同步辐射光源运行的可靠性。随着第四代衍射极限储存环 (DLSR) 光源品质的进一步提高, 为了保证束流轨道的稳定性, 快速轨道反馈 (FOFB) 系统对校正磁铁电源的性能也提出了更高的要求。针对先进同步辐射光源 FOFB 系统对快校正磁铁电源的需求, 将目前国内外第四代同步辐射光源束流轨道快速校正磁铁电源的研究成果分为线性电源和开关电源两类, 对各方案的拓扑结构、控制策略以及性能参数的特点等进行了简要对比分析, 可以看出目前国内外正在研制的快校正磁铁电源响应带宽基本可以达到 5 kHz 甚至 10 kHz 水平, 线性电源的低纹波噪声特性具备应用优势但需要关注效率低的问题; 开关电源方案具有高效、模块化等特点, 如果可以有效解决纹波噪声问题, 将会更广泛地应用在快校正磁铁电源的设计中。

关键词: 衍射极限同步辐射光源; 轨道反馈; 快校正电源; 线性电源; 开关电源

中图分类号: TL503.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220223

Recent development of beam orbit fast corrector power supply

Shao Zhuoxia, Gao Hui, Zhang Haiyan, Hu Baojin

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The deviation of the beam orbit can be quickly corrected by the fast corrector power supply, which improves the reliability of the operation of the synchrotron radiation light source. With the further improvement of the quality of the fourth-generation Diffraction-Limited Storage Ring (DLSR) light source, the Fast Orbit FeedBack (FOFB) system places higher requirements on the performance of the corrector power supply to achieve the stability of the beam orbit. In this paper, the current research achievements of beam orbit fast corrector power supply in international fourth-generation synchrotron radiation light sources are divided into two categories: linear power supply and switching power supply. According to the requirements of the FOFB system in the advanced synchrotron radiation light source for the fast corrector power supply, the topology, control strategy and performance parameters of each scheme are briefly compared and analyzed.

Key words: diffraction-limited synchrotron radiation light source, orbit feedback, fast corrector power supply, linear power supply, switching power supply

储存环同步辐射光源追求“更新换代”的一个显著特征就是不断降低电子束流发射度。衍射极限储存环是电子束流两个横向方向上的发射度均达到其主要辐射波段光子束由衍射限制的本征发射度水平的同步辐射光源, 又称为第四代储存环同步辐射光源。衍射极限储存环可以产生极高亮度且横向相干的同步辐射光, 将对物理学、化学、材料科学、生命科学、环境科学和能源科学等众多领域产生极为重大而深远的影响^[1]。

对于先进同步辐射领域, 通常要求束流轨道稳定性小于束流尺寸的 10%, 第四代衍射极限同步辐射光源具有极小的束流尺寸, 因此对束流稳定性的要求将会大幅提高。光源运行时, 束流轨道会受到地基振动、BPM 电子学噪声、电源系统噪声以及微波系统噪声等多种快速变化的扰动影响。作为快速轨道反馈系统 (FOFB) 的执行人, 快校正磁铁电源能够提供足够的带宽并且保证磁铁产生精确的校正场, 对扰动误差进行抑制和修正, 将束流轨道

* 收稿日期: 2022-07-11; 修订日期: 2022-09-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (WK2310000095); 合肥先进光源预研工程项目

联系方式: 邵琢瑕, std@ustc.edu.cn。

通信作者: 高 辉, gaohui@ustc.edu.cn。

快速恢复到参考轨道,从而保证光源的品质^[2]。FOFB系统基于高速通讯网络,拥有较大的带宽,可以对较高频率扰动进行有效抑制。目前的三代光源如SPEAR3、SLS、ESRF等,FOFB带宽都在100 Hz左右,而目前正在建设的四代光源,FOFB带宽都达到了几百 Hz,甚至接近1 kHz^[3]。

为了保证FOFB系统整体的低延时、高带宽,快校正磁铁电源系统必须同样具备快响应特性,第四代衍射极限储存环要求快校正磁铁电源的带宽要达到5 kHz以上,甚至10 kHz^[4];对于整个FOFB系统来说,快校正磁铁电源的输出纹波相当于噪声,为了保证正常的束流轨道不受影响,快校正磁铁电源的输出纹波必须保持较低的水平,目前第四代衍射极限光源需要快校正电源的纹波特性优于20 ppm。与此同时,微小的束流轨道偏差要求快校正磁铁电源的输出具有较高的分辨率以实现微小的调节步长,目前第四代同步辐射光源要求快校正电源的输出分辨优于20 ppm。校正磁铁作为电源的负载通常具有较大的电感特性,高带宽、高分辨、低噪声等几个关键参数在磁铁负载条件下如何同时保证成为了快校正电源的设计难点。本文将结合国内外先进光源工程建设过程中快校正磁铁电源的研究成果,以线性电源和开关电源两种类别区分,介绍了快校正磁铁电源的拓扑结构设计、控制策略等,期望为先进同步辐射光源领域束流轨道快速校正解决方案提供思路。

1 线性快校正磁铁电源

线性电源也称为线性稳压器,通常组成线性电源使用的器件较少,制造成本也更低。在机械、电子领域使用更简洁的设计意味着本质上会产生更少的问题,这也使得线性电源具有较高的可靠性。同时,相比于开关电源,线性电源的直流输出叠加的纹波噪声非常小,这也是线性电源最突出的优势。尽管线性电源的效率不高,但考虑到快校正磁铁电源的额定功率通常只有几百 W,因此可以采用线性电源的方案实现快校正磁铁电源高带宽和低噪声的需求。

1.1 基于H桥拓扑结构的线性电源方案

合肥先进光源(HALF)采用一种基于MOSFET线性放大区的、类开关电源H桥拓扑结构的方案研制了一台10 A额定电流输出的线性快校正磁铁电源^[5],系统框架如图1所示。为了满足快校正磁铁电源的双极性输出特性,采用了H桥拓扑结构的优点,上部两个功率器件 Q_1 和 Q_2 用于切换负载电流的方向,但和常规H桥用法不同的是,下部两个功率器件 Q_3 和 Q_4 工作在线性放大状态,提供功率输出。这一方案参考了商业电子负载的恒流模式(CC mode)工作原理,由功率MOSFET充当可变电阻,负载电流首先经过LEM公司的零磁通电流传感器(DCCT)进行比例缩小,然后搭配VISHAY的低温漂精密电阻进行I/V转换,最后传输到24位模拟数字转换器(ADC)AD7760器件进行采样。采用高精度、低温漂的数字模拟转换器(DAC)AD5791器件实现电流的输出设定。输出电流采样值和设定值进行PID运算,最终实现电源的恒流输出。

HALF最初设计的线性快校正磁铁电源样机采用了模拟控制方案,采用运算放大器搭建的模拟电路实现闭环调节,环路PI参数由电阻、电容的取值决定。但考虑到工程建设过程中负载参数、线缆长度变化等带来的误差,

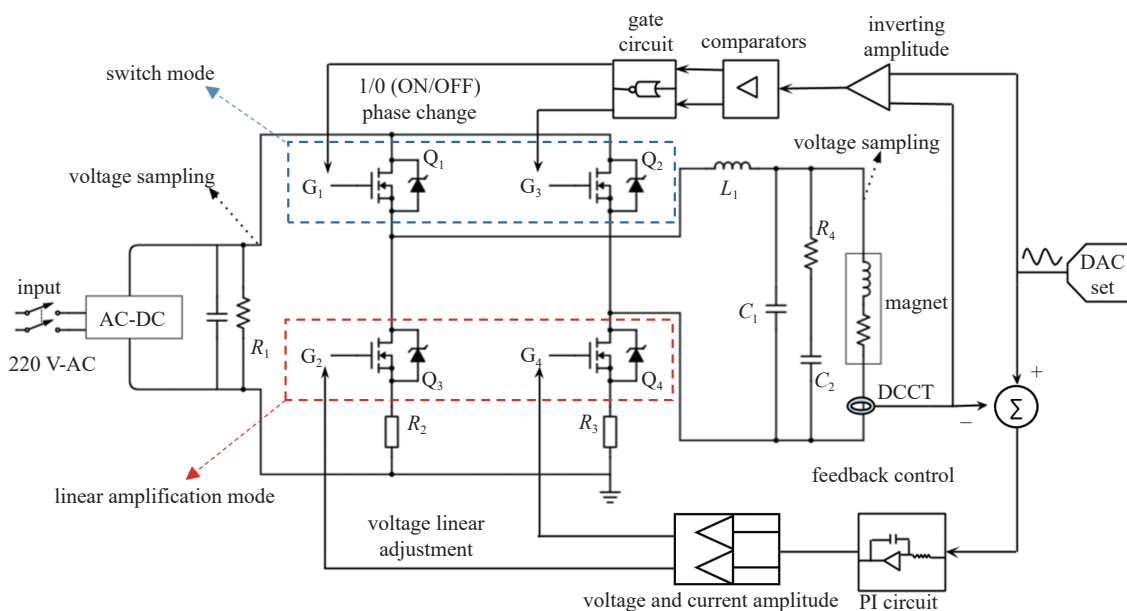


Fig. 1 System block diagram of the linear power supply based on H-bridge

图1 基于H桥的线性电源系统框图

每一台电源都需要进行控制环路参数的校正和调试,模拟电路控制方案调节PI参数需要拆卸电阻电容元件,这对工程建设带来了不便,因此最新的线性快校正磁铁电源样机拟采用以FPGA为核心控制器的数字控制方案。闭环控制算法在FPGA中实现,环路PI参数的修改可以直接在软件中完成,这样将极大的提升电源的通用性和工程建设效率。基于H桥的线性快校正磁铁电源样机和测试结果如图2所示,采用10 kHz正弦信号激励,输出响应信号的幅值衰减小于-3 dB,相位延迟约为26.29°,说明电源带宽能够达到10 kHz,采用0.1 mA电流阶跃测试输出分辨率结果优于10 ppm,采用10 A对应3.33 V的电压型电流传感器进行转换后经频谱仪测试输出电流纹波大约为12.9 ppm (RMS(overall)/3.33 V)。

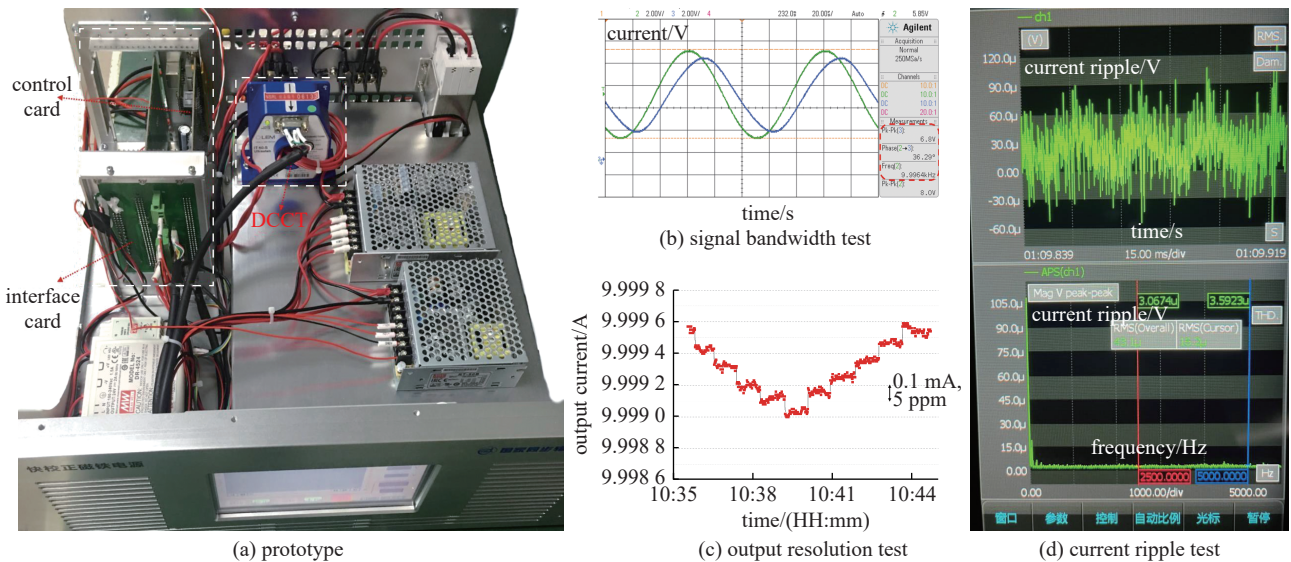


Fig. 2 Linear power supply of fast corrector and its test results

图2 线性快校正电源样机及其测试结果

1.2 基于功放电路的线性快校正磁铁电源

巴西光源(SIRIUS)的FOFB系统基于MicroTCA.4架构机箱实现,因此LNS直接选用了开源设计的硬件RTM-LAMP模块进行了快校正磁铁电源设计^[6]。如图3所示,RTM-LAMP共有12个通道,每个通道分别由一个

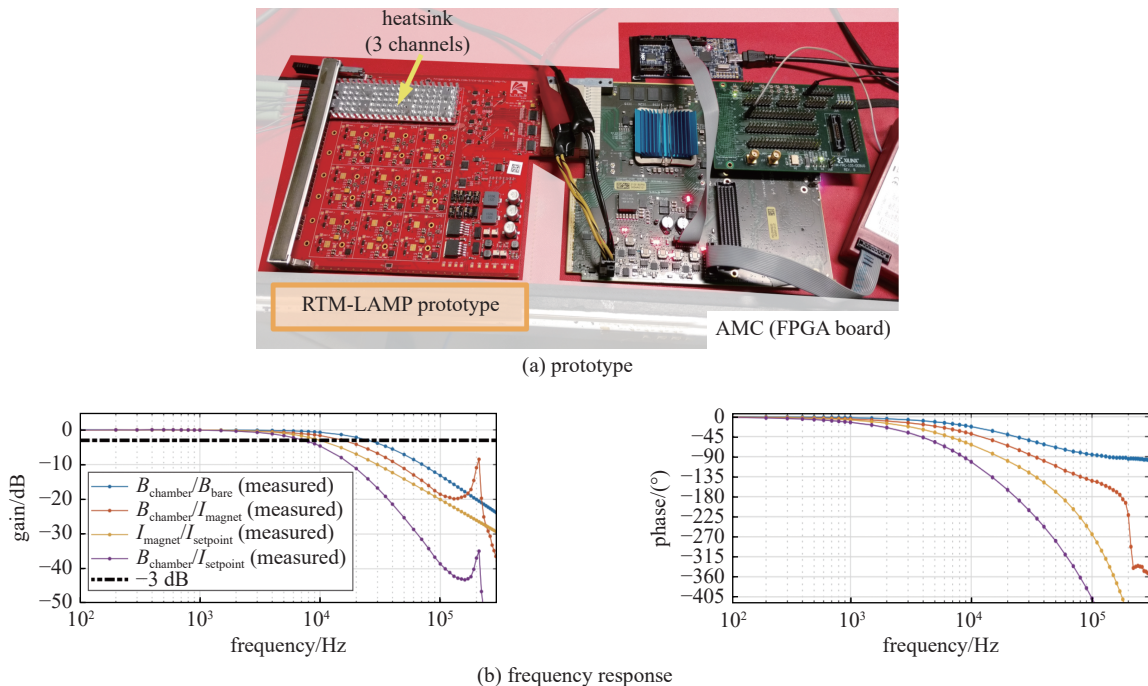


Fig. 3 Prototype and frequency response test results of the linear power supply based on OPA549

图3 基于OPA549的线性电源样机和频响测试结果

DAC 转换器、一个功率放大器电路、一个用于电流检测的分流电阻、一个仪表放大器以及一个 ADC 组成。LNLS 使用 RTM-LAMP 的 8 个通道控制 8 个快校正磁铁, 每个通道由功率运算放大器 OPA549 组成的 AB 类功放提供 1 A 的双极性输出的额定电流。RTM 功率板卡的控制由前级 AMC 板卡完成, AMC 板卡以 FPGA 为核心, 实现以下三个功能: (1) 每个通道的电流闭环反馈控制; (2) BPM 的数据收集; (3) 千兆光纤接口与 FOFB 控制器进行数据交互。这种方案控制板卡和功率板卡集成在一起, 满足 MTCA.4 的标准, 便于 FOFB 系统的整体设计。同时一个功率板卡可以完成与多台快校正磁铁的连接, 有效减少了快校正磁铁电源的数量和体积。测试结果显示该方案实现的校正电源与校正磁铁闭环系统的带宽优于 10 kHz。

2 开关型快校正磁铁电源

随着 IGBT、MOSFET 等开关器件的发展以及数字控制技术的进步, 采用高频逆变技术的开关型数字电源因其具有高效率、小型化等特点, 受到了广泛关注。开关型快校正磁铁电源可以实现比线性快校正磁铁电源更高的功率等级, 在电感参数较大、励磁电流需求高的应用中具备优势。

2.1 基于多电平拓扑结构的快校正磁铁电源

传统的快校正磁铁电源的功率变换采用的是 H 桥逆变技术, 这种拓扑结构简单、易控制。但想要提升功率变换器的性能、改善快校正磁铁电源的纹波特性, 只能通过提高开关器件的开关频率的方法, 这样会使电路开关损耗和电磁干扰增大。针对这个问题, 高能同步辐射光源(HEPS)采用了 4 个 H 桥级联的多电平逆变器技术^[7], 多电平逆变器通过增加电路输出电压的电平数, 有效减小电路中功率开关管的电压应力, 有效减小多电平逆变器的输出电压谐波含量。方案如图 4 所示。前级采用 4 个 24 V 直流源模块, 电源额定输出为 96 V/15 A, 经过测试在 10.59 mH 的电感负载条件下能够实现 10 kHz 小信号带宽以及优于 20 ppm 的输出电流纹波。

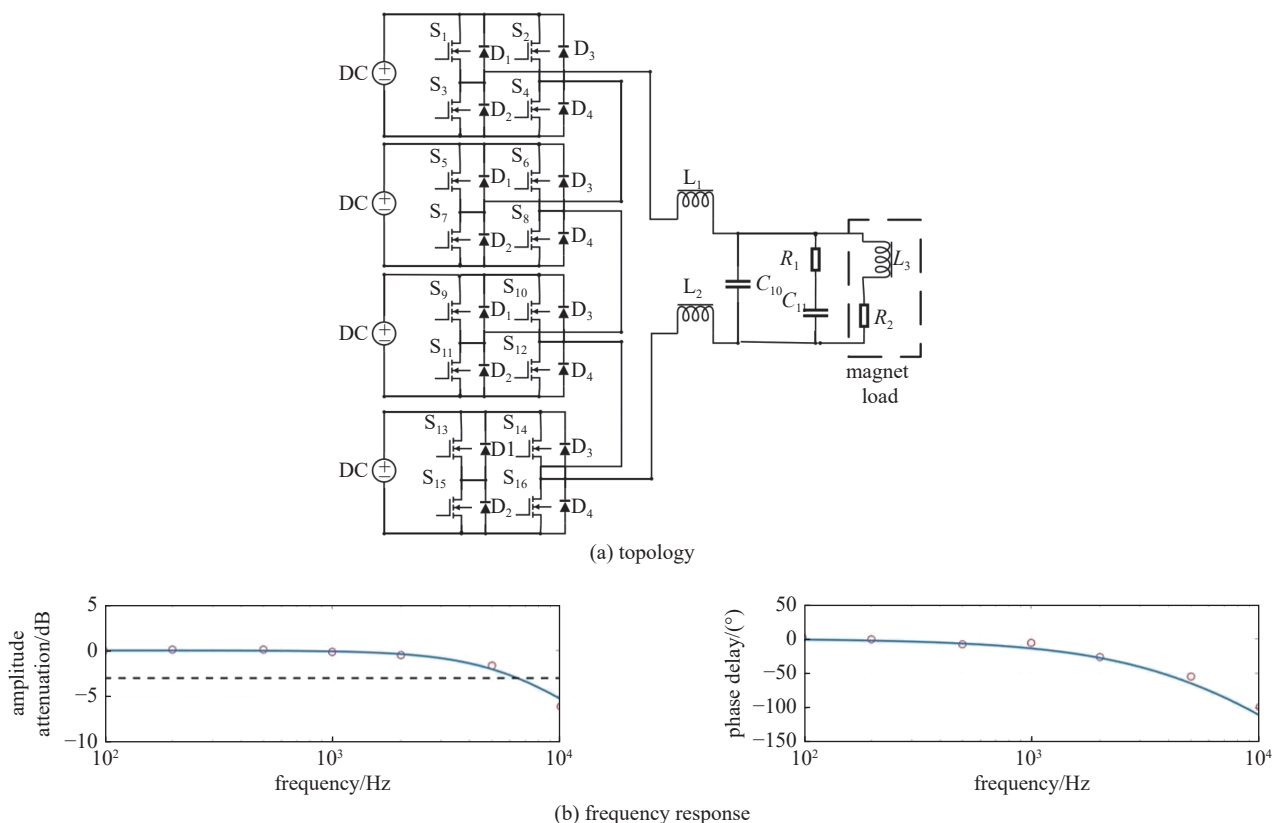


Fig. 4 4H-bridge cascade multi-level inverter structure and frequency response test results

图 4 4H 桥级联多电平逆变器结构及频率响应测试结果

合肥先进光源(HALF)采用了 3 个降压型直流斩波电路级联的多电平拓扑结构^[8], 方案和阶跃响应测试结果如图 5 所示。前级采用 3 个 12 V 的直流源组成降压型直流斩波电路模块, 通过 PWM 载波移相控制, 三个降压型直流斩波电路的开关器件的驱动信号分别移相 120°, 将开关频率等效 3 倍频, 可以有效减小逆变器工作频率, 减小电路中功率开关管的开关损耗, 提升电路的电磁兼容性。电源额定输出为 30 V/10 A, 该方案有效减少了开关器件的

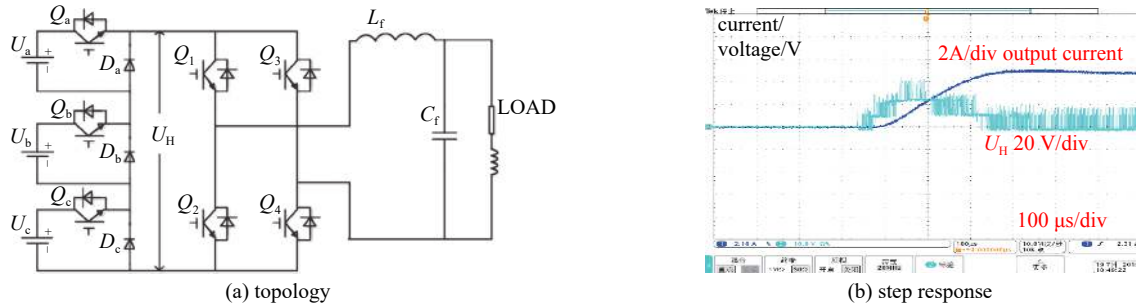


Fig. 5 Buck circuits cascade multi-level topology and step response test result

图 5 Buck 电路级联的多电平拓扑结构及阶跃响应测试结果

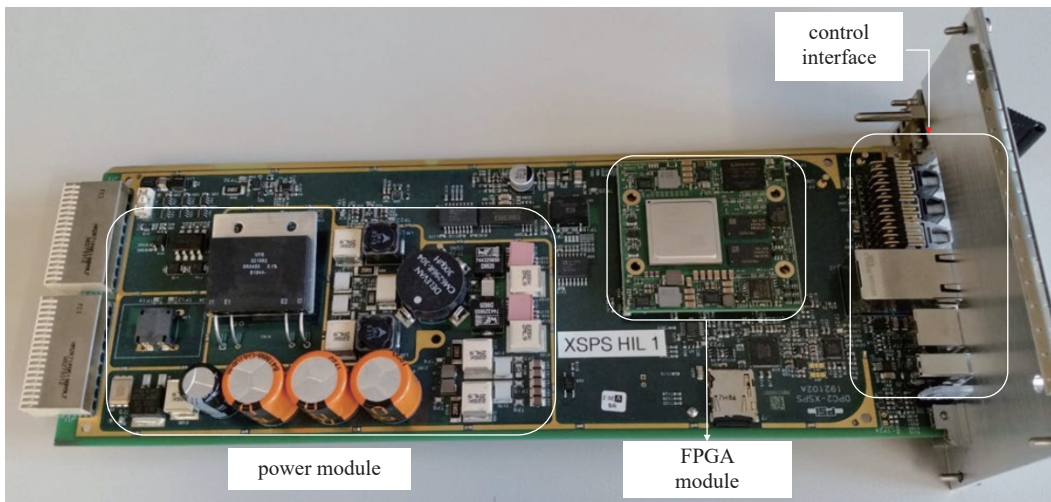


Fig. 6 Schematic overview and prototype of extra small power supply

图 6 快校正磁铁电源整体框图和样机

使用数量,进一步降低损耗,减少成本,控制相较于多个 H 桥级联的拓扑也更为简单。

2.2 基于 GaN 器件的快校正磁铁电源

GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 近几年发展迅猛,因为它们具有高的断态击穿强度以及导通状态下的优异沟道导电性。这些特征意味着给定器件尺寸条件下, GaN 器件可以承受的电压要比 Si 器件高数倍, GaN 器件的导通电阻甚至优于 SiC 器件,可以实现更高的开关频率保持更低的开关损耗。如图 6 所示,瑞士光源升级工程 (SLS 2.0) 中将 GaN 半导体应用在了快校正磁铁电源 XSPS 的设计中^[9]。XSPS 采用了 TI 公司生产的集成栅极驱动器的 LMG5200 GaN FET 模块,采用全桥的拓扑结构, GaN 开关频率达到了 500 kHz。以 FPGA 为控制器在较小的体积下实现了 20 V/5 A 的电源设计,精密采集和测量信号以及 PWM 信号在内部短距离连接,这有利于电源的高带宽和电磁兼容性。电源输出 5 A 电流时, 10~10 kHz 的纹波测试结果优于 5 ppm。

3 对比和讨论

表 1 列举了目前国际上的先进同步辐射光源的快校正磁铁电源性能参数。可以看出,在 HALF、SIRIUS 等光源装置中,校正磁铁负载具有较小的电感参数、励磁电流较低的情况下,快校正磁铁电源的功率需求较小,线性电

表 1 部分国内外同步辐射光源快校正磁铁电源参数

Table 1 Fast corrector power supply parameters of some synchrotron radiation light sources

institution	corrector load/mH	current /A	bandwidth/10 ³ Hz	topology/control method
HALF	0.8~7	10	5~10	linear and switched-mode/analog and digital
SIRIUS	3.5	1	10	linear/digital
HEPS	10.59	15	10	switched-mode/digital
SLS2.0	62	5	1.5	switched-mode/digital
APS-U	16.5	13	10	switched-mode/analog

源因具有低噪声、高带宽的特点可以作为解决方案。而在 HEPS、SLS2.0 以及美国的 APS-U^[10] 工程中, 由于校正磁铁的电感量较大、效率和电源尺寸要求高, 通常选用开关电源作为解决方案。为了解决大的电感参数对电源闭环系统带来的主极点影响, HEPS 和 APS-U 采用了一种在控制环路中添加相位超前校正的方法^[7], 有效降低了输入输出的相位延迟, 提高了带宽。线性电源的输出分辨率取决于高精度 DAC 芯片, 而开关电源则是依赖调节 PWM 占空比调节输出电流, 这就意味着在进行控制器选型的时候需要考虑生成 PWM 驱动信号的定时器模块必须具有极高的分辨率。比如 DSP 芯片的 HRPWM 功能能够实现 154 ps 的分辨率, STM32G474 数字电源芯片可以实现 184 ps 分辨率, FPGA 中实现 HRPWM 的一种方法是基于嵌入在 IP 核中的数字时钟管理器 (DCM) 模块, 第二种方法是基于 IODELAY 模块^[11]。另外, 关于快校正磁铁电源的外部接口设计必须参考 FOFB 系统中 BPM 控制器的接口, 并且具有高可靠性和较低的数据传输延迟, 目前常用的有百兆的以太网、光纤接口以及千兆以太网、SFP 光纤接口等。

4 结 论

本文中, 我们介绍了国内外在建的第四代同步辐射光源中的快校正磁铁电源设计, 分类讨论了线性电源和开关电源两种方案的研究进展和各自的特点。可以看出基于 H 桥的线性电源、功放电路、多电平拓扑结构以及 GaN 器件的使用, 都为快校正磁铁电源的设计提供了新的思路。具体方案的选择还要参考同步辐射光源的物理设计、磁铁负载参数选取、FOFB 系统带宽和接口需求等。由于第四代衍射极限同步辐射光源还在工程建设初级阶段, 这几类快校正磁铁电源的可靠性还需接受光源长期运行的验证。

致 谢 感谢高能物理研究所龙锋利老师和刘鹏博士给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Cai Yunhai, Bane K, Hettel R, et al. Ultimate storage ring based on fourth-order geometric achromats[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2012, 15: 054002.
- [2] Leemann S C, Liu S, Hexemer A, et al. Demonstration of machine learning-based model-independent stabilization of source properties in synchrotron light sources[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123: 194801.
- [3] Hubert N, Cassinari L, Denard J C, et al. Global orbit feedback systems down to DC using fast and slow correctors[C]//Proceedings of DIPAC. 2009: 27-31.
- [4] Kempf I, Goulart P J, Duncan S R, et al. Symmetry exploitation in orbit feedback systems of synchrotrons for computational efficiency[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021, 68(3): 258-269.
- [5] Shao Zhuoxia, Zhang Haiyan, Gao Hui, et al. A fast-response and high-stability power supply for a corrector magnet in HALS[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(3): 2293-2301.
- [6] Giachero A F, Russo L M, Tavares D O. Fast orbit corrector power supply in MTCA. 4 form factor for Sirius light source[C]//Proceedings of MicroTCA Workshop. 2021.
- [7] Liu Peng, Wang Xu, Long Fengli. Fast corrector power supply design for HEPS[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(1): 56-62.
- [8] Shao Zhuoxia, Liu Peng, Zhang Haiyan, et al. Research on a multilevel corrector magnet power supply based on a buck cascade circuit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 953: 163083.
- [9] Braun, H., Garvey, T., Jörg, M., et al. SLS2.0 storage ring technical design report, chapter 2.3: power supply types for SLS 2.0 [R]. Report No.: 21-02, 2017: 91-95.
- [10] Song B M, Wang Ju. Mathematical modeling and analysis of a wide bandwidth bipolar power supply for the fast correctors in the APS upgrade controller[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 3264-3266.
- [11] Navarro D, Lucía Ó, Barragán L A, et al. Synchronous FPGA-based high-resolution implementations of digital pulse-width modulators[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(5): 2515-2525.