

上海光源储存环高频功率源*

陈明¹⁾ 封自强 赵申杰 周祖圣 于海波 侯洪涛 张志刚
马广明 毛冬青 马震宇 刘建飞

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 上海光源(SSRF)是一台能量为3.5GeV的中能第三代光源. 储存环的设计束流是300mA, 总的束流功率约625kW, 借鉴国际先进经验, 从THALES等公司引进500MHz 300kW (CW) 高频发射机(包括速调管和相应的PSM型电源)及350kW (CW) 环流器等作为三套高频功率源的主体, 一一供给三套超导高频腔, 加速电子以补偿其同步辐射以及其他功率损耗. 近一年来我们完成了储存环高频厅和其水冷、风冷、配电系统的建设, 4台速调管的制造厂验收测试, 三套发射机的就位安装和调试, 第一套发射机的现场验收测试, 第一台环流器的安装和高功率验收测试, 第一套高频功率源的高功率传输系统在不同反射相位下的满功率老炼. 第二、三套发射机的现场验收测试正在进行中, 预计10月份全部完成. 迄今为止所有的验收项目均达到技术指标. 本文简要地叙述了SSRF高频功率源的选型、技术指标、设计方案、总体布局, 重点介绍了现场验收测试的结果.

关键词 高频功率源 连续波速调管 PSM型电源

1 SSRF 储存环高频功率源选型

SSRF 储存环运行初期和将来装满插入件之后, 分别要求超导腔提供4.5MV和5.4MV的总加速电压以及491kW和625kW的总束流功率, 因此SSRF需要三套超导腔和三套高频功率源. 每套高频发射机输出功率必须大于227kW. 世界上迄今为止尚无500MHz/300kW的全固态发射机, 感应输出管(IOT)单管功率只有80kW, 需要庞大而复杂的多级功率合成系统才能得到300kW, 速调管发射机则远较IOT发射机和全固态发射机成熟得多, 为此选用3台500MHz/300kW PSM型的速调管发射机不失为最稳妥可靠的方案, 以确保工程的如期完成. SSRF 储存环高频系统的布局如图1所示. 图2是SSRF 储存环高频厅内3台PSM型速调管发射机的照片.

PSM型高压电源在广播发射机领域内已使用了几十年, 技术上已经相当成熟. 由于它性能优异和故障率很低, 近十年来在粒子加速器领域的应用越来越广泛, 世界上新建和改建的同步光源, 如SLS, SRS, CLS, DLS, BEPC II 等都选用THOMSON公司生产的PSM型高压电源作为高频发射机的主电源.

SSRF的预制研究阶段曾从该公司引进过1台180kW的PSM型速调管发射机, 现用于增强器, 运行七年来只损坏过2只PSM模块和1个继电器座, 故障率极低.

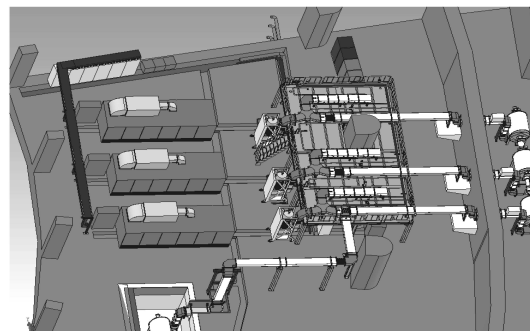


图1 上海光源储存环高频系统布置图

PSM型高压电源的突出优点在于可靠性高, 冗余度高, 运行中个别PSM模块的损坏不影响电源的运行, 55kV/12A PSM型高压电源共有86个模块, 直至4个模块损坏, 仍能保证全部技术指标, 更换模块十分方便, 每个PSM模块的典型的平均无故障时间(MTBF)多于200000h; 关断时间极短(10—20 μ s); 短路储能的典型值约为10J, 不必用撬棒, 故障率很低.

2008-01-07 收稿

* 国家大科学工程上海光源资助

1) E-mail: chenming@sinap.ac.cn

效率高达96%，功率因数高(0.96)；采用全数字化控制技术，同SSRF所采用的EPICS控制界面一致；不同电位上的控制采用光纤技术连接。

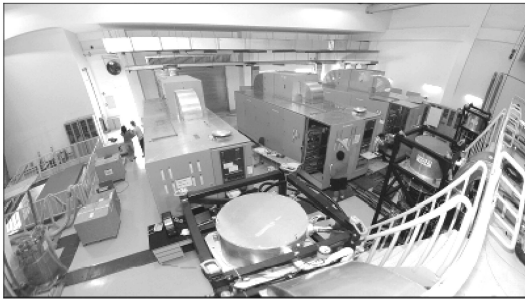


图2 三套发射机系统

2 高频发射机和环流器等的技术指标和验收测试结果

高频发射机、环流器和高功率负载的主要技术指标如表1所示。今年元月第一套发射机运到张江SSRF现场，1月30日开始开箱检查设备的完好性、就位安装；联接各种动力电缆、供电电缆、信号电缆、冷却水管、风管和许多流体压力、温度、流量、导电率测量仪表；对43个需要检测或设定的量进行线性定标或非线性定标；检查并重新设置全部连锁信号的阈值；按合同规定逐项进行现场验收测试，在表1中也列出了验收测试的实测结果。图3—9是发射机验收测试的实测结果。

表1 上海光源储存环高频发射机等性能要求和实测结果

参数	要求值	测量值
中心频率/MHz	499.654	499.654
射功率输出/(kW CW)(max.)	≥300	303.4
速调管增益/dB	≥40	40.8
速调管效率(%)	≥60	62.0
二次谐波/dB	≤-30	-43.7
三次谐波/dB	≤-30	-50.2
±1.0MHz带宽内的衰减/dB	≤1	0.30
速调管阴极电压/kV/电流/A	≤55/11	53.2/9.2
速调管阳极电压/kV/电流/mA	≤37/5	31.6/2.1
速调管X射线辐射/(μSv/h)	≤0.1	≤0.1
速调管RF辐射/(mW/cm ²)	≤0.1	≤0.1
PSM型高压电源储能/J	≤20	10.3
PSM型高压电源最大噪声	≤1%	0.28%
PSM型高压电源电压上升率	1000ms	957ms
PSM型高压电源电压过冲	≤5%	1.9%
PSM型高压电源效率	≥96%	96.3%
PSM型高压电源功率因数	≥0.96	0.96
300kW发射机连续运行试验	≥50hr	>50hr
350kW环流器插入损耗/dB	≤0.1	<0.02
350kW环流器隔离度/dB	≤-26	≤-26
350kW高功率负载/VSWR	≤1.065	≤1.03

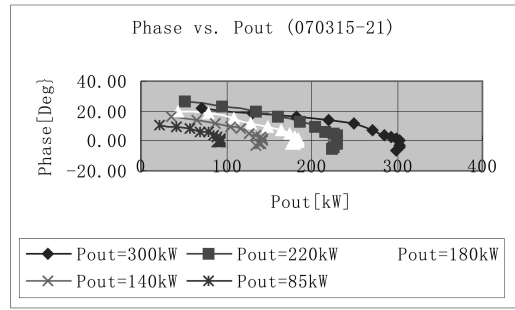


图3 发射机相位同输出功率的关系

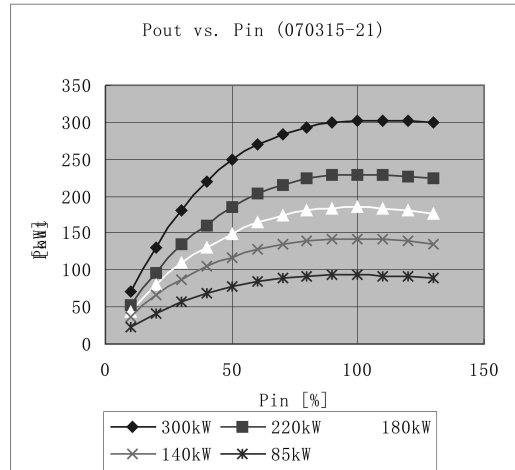


图4 发射机输出功率与激励功率的关系

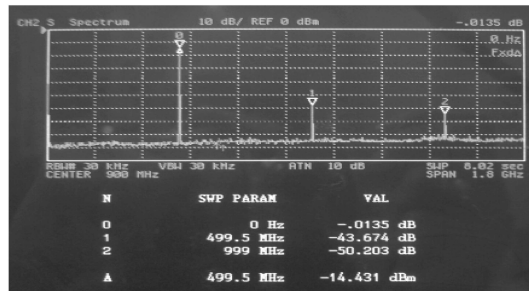


图5 发射机的二次谐波和三次谐波

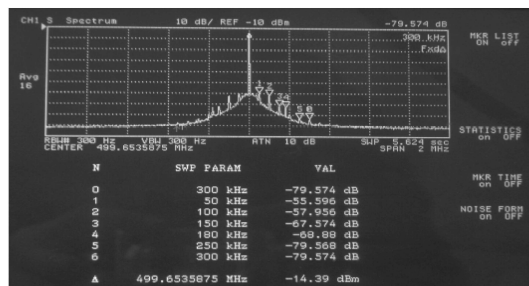


图6 发射机的寄生杂波

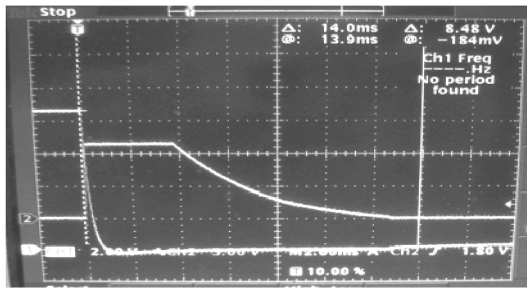


图 7 PSM型高压电源测试储能的短路试验的波形

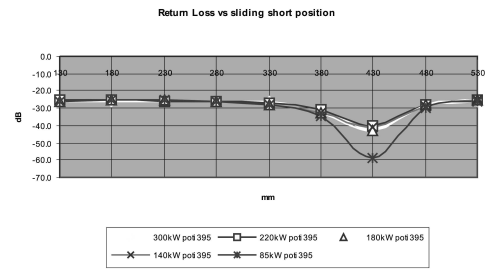


图 9 各个功率下不同反射相位时环流器的隔离度

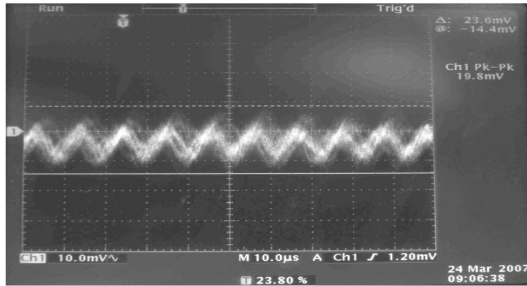


图 8 PSM型高压电源的纹波

3 结束语

迄今为止所有的验收项目包括速调管电源的储能、纹波和噪声、电压调整率、输出功率、效率和功率因数; 发射机的高频参数(输出功率、带宽、增益、效率等)、5个功率点上输出功率同激励功率和相位的关系、高次谐波、信噪比和带宽内噪声、X射线辐射水平、输出功率和相位同频率的关系以及50h连续运行试验、环流器的隔离度和插入损耗完全达到技术指标, 能够满足储存环运行的需要。

RF Power Sources of the Storage Ring for SSRF*

CHEN Ming¹⁾ FENG Zi-Qiang ZHAO Shen-Jie ZHOU Zu-Sheng YU Hai-Bo HOU Hong-Tao
ZHANG Zhi-Gang MA Guang-Ming MAO Dong-Qing MA Zhen-Yu LIU Jian-Fei
(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract 3 sets of 500MHz 300kW RF amplifiers to be used at the main ring of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) have been installed on site. The Site Acceptance Test (SAT) of the first RF power source was completed in last March. The second and third RF power sources are going well and will be finished in October. The type choice, the layout of the RF power sources and the comparison between the SAT conclusion and the design goals are presented.

Key words RF power source, CW klystron, PSM power supply

Received 7 January 2008

* Supported by National Large Science Engineering SSRF

1) E-mail: chenming@sinap.ac.cn