

科学 专著：大科学工程

上海光源首批线站 设计与研制

徐洪杰 主编



上海科学技术出版社

上海光源首批线站 设计与研制

徐洪杰 主编



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

上海光源首批线站设计与研制 / 徐洪杰主编.

—上海:上海科学技术出版社,2015.1

(科学专著:大科学工程)

ISBN 978-7-5478-2468-9

I. ①上... II. ①徐... III. ①同步辐射装置

IV. ①O572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 267704 号

责任编辑 姚晨辉 刘小莉

装帧设计 戚永昌

上海光源首批线站设计与研制

徐洪杰 主编

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行 200001

上海福建中路 193 号 www.ewen.co

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 51.5 插页 4

字数 1050 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2468-9/O·44

定价: 248.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

科學 专著：大科学与工程

内容提要

上海光源是我国大陆设计建造的第一台第三代同步辐射装置,也是我国迄今建成的规模最大的国家重大科学装置,总投资约 14 亿元。上海光源由加速器和光束线站两部分组成,光束线站的作用是将高亮度、高强度的 X 射线稳定高效地引出供用户实验。本书从光束线站的总体设计和关键技术研发两个方面,全面介绍上海光源的设计思想、技术路线、研制内容、过程与方法以及测试结果。具体内容包括上海光源首批线站的物理目标、总体设计、前端区系统、精密机械系统、检测准直与有限元分析系统、光束线控制与安全连锁系统、安装调试与工程管理以及实验方法发展,并简要介绍已有的用户开放成果。该书的编著有望对我国第三代同步辐射光束线站的建设和相关科研起到一定的促进作用。

本书可作为同步辐射专业研究生、本科生教材,也可供有志于利用同步辐射开展科学研究的研究人员、同步辐射光束线站技术研发和建设的工程技术人员以及相关领域的科研人员参考。

《上海光源首批线站设计与研制》

作者名单

- 第 1 章 总论(徐洪杰)
- 第 2 章 生物大分子晶体学光束线站(何建华 黄胜 汪启胜 郁峰 刘科 徐春艳)
- 第 3 章 X 射线衍射光束线站(黎忠 王思胜 李晓龙 文闻 高梅)
- 第 4 章 X 射线吸收精细结构谱学线站(黄宇管 姜政 魏向军 邹杨 顾颂琦 马静远)
- 第 5 章 硬 X 射线微聚焦及应用光束线站(余笑寒 李爱国 杨科 王华 张丽丽)
- 第 6 章 X 射线成像及生物医学应用光束线站(肖体乔 谢红兰 邓彪 杜国浩 付亚楠 陈荣昌)
- 第 7 章 X 射线小角散射线站(王劼 柳义 边风刚 李秀宏)
- 第 8 章 软 X 射线谱学显微线站(邵仁忠 王勇 吴衍青 陈敏 甄香君 许子健)
- 第 9 章 高热负载前端区系统(吴冠原 张敏)
- 第 10 章 光束线关键设备与机械真空系统(薛松 祝万钱 傅远 赵雁 陈家华 陈明)
- 第 11 章 同步辐射光学检测、准直与有限元分析系统(王纳秀 罗红心 徐中民 王劼)
- 第 12 章 控制联锁与 XBPM 探测器(郑丽芳 龚培荣 张招红 朱周侠 刘平)
- 第 13 章 同步辐射实验大厅附属工艺及设施(朱卫华 杨东 苏东)
- 第 14 章 工程组织管理与用户开放(徐洪杰 李亚虹 李红红)

进入 21 世纪以来,中国的科学技术发展进入到一个重要的跃升期。我们科学技术自主创新的源头,正是来自于科学向未知领域推进的新发现,来自于科学前沿探索的新成果。学术著作是研究成果的总结,它的价值也在于其原创性。

著书立说,乃是科学研究工作不可缺少的一个组成部分。著书立说,既是丰富人类知识宝库的需要,也是探索未知领域、开拓人类知识新疆界的需要。特别是在科学各门类的那些基本问题上,一部优秀的学术专著常常成为本学科或相关学科取得突破性进展的基石。

一个国家,一个地区,学术著作出版的水平是这个国家、这个地区科学研究水平的重要标志。科学研究具有系统性和长远性,继承性和连续性等特点,科学发现的取得需要好奇心和想象力,也需要有长期的、系统的研究成果的积累。因此,学术著作的出版也需要有长远的安排和持续的积累,来不得半点的虚浮,更不能急功近利。

学术著作的出版,既是为了总结、积累,更是为了交流、传播。交流传播了,总结积累的效果和作用才能发挥出来。为了在中国传播科学而于 1915 年创办的《科学》杂志,在其自身发展的历程中,一直也在尽力促进中国学者的学术著作的出版。

几十年来,《科学》的编者和出版者,在不同的时期先后推出过好几套中国学者的科学专著。在 20 世纪三四十年代,出版有《科学丛书》;自 20 世纪 90 年代以来,又陆续推出《科学专著丛书》、《科学前沿丛书》、《科学前沿进展》等,形成了一个以刊物名字样**科学**为标识的学术专著系列。自 1995 年起,截至 2010 年“十一五”结束,在**科学**标识下,已出版了 25 部专著,其中有不少佳作,受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

为了继续促进中国学者对前沿工作做有创见的系统总结,“十二五”期间,《科学》的编者和出版者决定对**科学**系列学术著作做新的延伸,将**科学**专著学术丛书扩展为三个系列品种,即《**科学**专著:前沿研究》、《**科学**专著:生命科学研究》、《**科学**专著:大科学工程》,继续为中国学者著书立说尽一份力。

随着中国科学研究向世界前列的挺进,我们相信,在**科学**系列的学术专著之中,一定会有更多中国学者推陈出新、标新立异的佳作问世,也一定会有传世的名著问世!

周光召

(《科学》杂志编委会主编)

2011年5月

第三代同步辐射装置在基础科学和高新技术诸多前沿领域的研究中已成为一种不可替代的重要手段,对产业技术的支撑作用也十分显著。我国经济和科技发展对第三代同步辐射装置提出了迫切需求,国务院批准、国家发展和改革委员会立项建设上海光源国家重大科学基础设施是科教兴国的利器之举。

自 1947 年首次观察到同步辐射以来,同步辐射光源装置的发展已经历了三代。20 世纪 90 年代初,基于低发射度储存环技术和插入件(波荡器和扭摆器)技术的第三代同步辐射光源,将束团发射度降低到 $5\sim 12\text{ nm}\cdot\text{rad}$,光源亮度提高到 $10^{17}\sim 10^{20}\text{ phs}/(\text{s}\cdot\text{mm}^2\cdot\text{mrad}^2\cdot 0.1\%\text{BW})$ 。高亮度的第三代同步辐射光源使得同步辐射应用从过去静态的手段扩展为动态的、空间分辨的和时间分辨的手段,发生了质的飞跃,为众多的学科和广泛的技术应用领域带来前所未有的新机遇。

早年的第三代同步辐射光源的储存环电子束能量分布在两个能区,即 $1.5\sim 2.5\text{ GeV}$ 和 $6\sim 8\text{ GeV}$ 。 $6\sim 8\text{ GeV}$ 主要产生硬 X 射线,也称作高能同步光源。由于建设和运行成本高,世界上只有三台(欧洲的 ESRF、美国的 APS 和日本的 SPring-8)。21 世纪以来,结构生物学、分子环境科学、材料科学、纳米科学和地质科学等学科领域蓬勃发展,硬 X 射线能区同步辐射的需求急剧增加。性价比优异的中能第三代同步辐射装置应运而生,中能光源的电子束能量为 $3\sim 3.5\text{ GeV}$,但是借助基于真空内插入件等技术,却可以产生与高能光源同样性能甚至更好的硬 X 射线同步光。中能光源代表了未来的发展方向,上海光源是世界上首批高性能的中能第三代同步辐射光源。2004 年 1 月,国务院第 34 次常务会议批准通过了上海光源工程项目建议书;2004 年 12 月 25 日,上海光源国家重大科学工程正式破土动工。上海光源是我国当时规模最大的国家重大科学装置,总投资约 14 亿元人民币。

上海光源由加速器和光束线站两部分组成,光束线站的作用是将高亮度、高强度的 X 射线稳定高效地引出供用户实验。由于第三代同步辐射光

源亮度、相干性等指标有大幅度提高,相应光束线站技术的难度也大幅度增加。上海光源是我国大陆设计建造的第一台第三代同步辐射装置,此前没有第三代同步辐射光束线站的研制经验。上海光源建设者经过近 14 年的努力,成功解决了一系列的设计和研制难题,建成了具备国际先进水平的光束线站。本书将从光束线站总体设计和关键技术研发两个方面重点介绍上海光源首批线站的研制过程,有望为我国后续新线站建设及上海光源用户提供重要参考。

上海光源装置开放运行以来,用户需求强劲,已显示出提升我国在诸多科技领域创新能力上的重要作用,成为我国提升原始创新能力和培养凝聚优秀人才的重要多学科实验研究平台。用户开放成果丰硕,对我国的基础研究和产业研发提供了重要支撑。目前机时供需矛盾日益凸显,仅能满足不到 1/4 的用户需求。截至 2013 年 12 月 31 日,在基础研究方面,利用上海光源取得的科研成果丰硕,已发表学术论文 1 363 篇,包括 *Nature*、*Science*、*Cell* 三种国际顶级刊物 30 篇。用户成果产出率居国际同类光源最好水平,显著提升了我国相关基础研究的水平。产业研发方面,已有 32 家企业利用上海光源进行技术开发,取得了良好的效果和效益,涉及制药、化工、技术鉴定等行业。

《上海光源首批线站设计与研制》将从光束线站的总体设计和关键技术研发两个方面,全面介绍上海光源的设计思想、技术路线、研制内容、过程与方法以及测试结果。具体内容包括上海光源首批线站的物理目标、总体设计、前端区系统、精密机械系统、检测准直与有限元分析系统、束线控制与安全联锁系统、安装调试与工程管理以及实验方法发展,并简要介绍已有的用户开放成果。该书的编著出版有望对我国第三代同步辐射光束线站的建设和相关科研起到一定的促进作用。

本书可作为同步辐射专业研究生、本科生教材,也可供有志于利用同步辐射开展科学研究的研究人员、同步辐射光束线站技术研发和建设的工程技术人员以及相关领域的科研人员参考。

本书若有错误或不妥之处,敬请广大读者批评指正。

徐洪杰

第 1 章 总论	1
§ 1.1 同步辐射装置应用研究的现状和发展趋势	1
1.1.1 同步辐射装置应用发展概况	1
1.1.2 建造上海光源的必要性	4
§ 1.2 上海光源的建设目标和科学目标	5
1.2.1 上海光源的建设目标	5
1.2.2 上海光源的科学目标	6
1.2.3 上海光源的先进性、科学意义和社会效益	12
第 2 章 生物大分子晶体学光束线站	14
§ 2.1 科学目标与建设目标	14
2.1.1 科学目标	14
2.1.2 建设目标	15
§ 2.2 光源与前端区	17
2.2.1 光源	17
2.2.2 前端区	21
§ 2.3 光束线	26
2.3.1 光学系统	26
2.3.2 光束性能分析	29
2.3.3 关键光学元件的热分析	36
2.3.4 主要部件技术参数	40
§ 2.4 实验站	46
2.4.1 实验方法概述	46
2.4.2 实验站布局与设备配置	47
2.4.3 数据处理	49
§ 2.5 线站总体	51
2.5.1 总体布局	51
2.5.2 真空	51
2.5.3 辐射防护	57
2.5.4 束线控制系统	59
2.5.5 束线安装与准直	59
§ 2.6 束线调试及验收测试	61
2.6.1 束线调试	61

2.6.2 验收测试	62
§ 2.7 实验站升级改造	67
2.7.1 实验站升级改造的主要指标	70
2.7.2 实验站的硬件升级	70
2.7.3 实验站控制及数据获取系统	72
2.7.4 实验站升级后的测试	82
§ 2.8 运行开放	85
附录 束线设计中未列出的各计算曲线的输入参数及通量曲线数值列表	89
第3章 X射线衍射光束线站	92
§ 3.1 物理设计	93
3.1.1 实验方法	93
3.1.2 物理参数	94
3.1.3 光束线设计	96
3.1.4 实验站设计	101
§ 3.2 工程设计	102
3.2.1 光源与前端区	102
3.2.2 光束线	103
3.2.3 实验站	115
3.2.4 线站总体	119
§ 3.3 安装与调试	122
3.3.1 安装	123
3.3.2 调试	124
§ 3.4 测试与验收	125
3.4.1 光子能量范围	125
3.4.2 能量分辨率	126
3.4.3 光子通量、光斑尺寸和发散角	128
3.4.4 测试结果	132
§ 3.5 运行	133
3.5.1 方法学研究	133
3.5.2 用户开放与成果	137
第4章 X射线吸收精细结构谱学线站	151
§ 4.1 X射线吸收精细结构谱学方法简介	151
4.1.1 XAFS基本原理	151
4.1.2 XAFS实验方法	153
§ 4.2 研制目的及意义	154

4.2.1 科学目标	154
4.2.2 建设目标	157
§ 4.3 项目设计及其关键技术	159
4.3.1 国内外现状	159
4.3.2 光束线结构设计及关键技术	160
§ 4.4 主要研制内容及性能指标	161
4.4.1 多级扭摆器光源	162
4.4.2 标准扭摆器前端区	165
4.4.3 双模式光束线	165
4.4.4 实验站	170
4.4.5 光束线主要性能及技术指标	175
§ 4.5 研制进程	194
4.5.1 施工方案论证	194
4.5.2 落实关键部件	194
4.5.3 设计、结构及工艺改善	195
4.5.4 工程质量控制措施	196
4.5.5 工程总进程表	196
4.5.6 经验及教训	198
§ 4.6 设备装调总体情况	199
4.6.1 总装调节点汇总	199
4.6.2 系统测试情况	200
§ 4.7 线站用户开放成果	207
4.7.1 BL14W1 实验方法及相关 In-house 研究	207
4.7.2 催化领域	210
4.7.3 材料领域	214
4.7.4 环境、生物领域	217
第 5 章 硬 X 射线微聚焦及应用光束线站	223
§ 5.1 科学目标	223
§ 5.2 光束线站建设目标	225
§ 5.3 光束线	228
5.3.1 光源与前端区	228
5.3.2 光学系统	235
5.3.3 光束线性能模拟	252
5.3.4 关键光学元件热分析	255
5.3.5 主要部件技术参数	261
§ 5.4 实验站	267

5.4.1	实验方法概述	267
5.4.2	实验站布局	268
5.4.3	数据获取和处理	269
5.4.4	实验站设备配置	271
§ 5.5	线站总体	278
5.5.1	总体布局	278
5.5.2	真空系统	281
5.5.3	辐射防护	284
5.5.4	控制	287
5.5.5	安装与调试	288
5.5.6	公用设施	291
§ 5.6	光束线验收	293
5.6.1	指标测试	293
5.6.2	测试结果汇总	295
§ 5.7	实验站升级改造	296
5.7.1	100 nm 级硬 X 射线探针装置建成	296
5.7.2	高压原位微束衍射系统的完善	300
§ 5.8	用户实验结果介绍	302
5.8.1	同步辐射微束 X 射线荧光光谱原位研究金属在阿尔茨海默病模型 动物脑中的聚集分布	302
5.8.2	荧光扫描成像方法研究水稻籽粒砷的转运过程	303
5.8.3	利用同步辐射微区分析技术系统研究纳米材料生物效应	305
5.8.4	新型铁基超导体研究中取得重要进展	306
5.8.5	Ca-Al 金属玻璃非晶多形态相变的高压研究	308
附录 1	光束线、实验站主要设备清单	310
附录 2	面形误差影响分析模型	312
第 6 章	X 射线成像及生物医学应用光束线站	317
§ 6.1	科学目标	317
§ 6.2	设计目标	318
§ 6.3	物理设计	319
6.3.1	光源	320
6.3.2	前端区	321
6.3.3	光束线	322
6.3.4	实验站	327
§ 6.4	工程工艺设计	328
6.4.1	结构设计特点	328

6.4.2 关键部件研制加工	331
§ 6.5 安装调试和测试	333
6.5.1 安装调试	333
6.5.2 测试	334
§ 6.6 实验方法发展	341
6.6.1 同轴相位衬度成像相位恢复研究	342
6.6.2 光栅微分相位衬度成像	346
6.6.3 螺旋显微 CT	349
6.6.4 局部 CT	351
6.6.5 X 射线荧光 CT	353
6.6.6 X 射线 K 边减影成像	354
6.6.7 数据处理	355
§ 6.7 用户开放成果	360
6.7.1 上海光源成像线站在生物医学领域中的应用	360
6.7.2 上海光源成像线站在古生物及考古领域中的应用	369
6.7.3 上海光源成像线站在材料科学领域中的应用	370
6.7.4 上海光源成像线站在环境领域中的应用	373
第 7 章 X 射线小角散射线站	379
§ 7.1 X 射线小角散射线站综述	379
7.1.1 X 射线小角散射基本原理	379
7.1.2 X 射线小角散射线站的科学目标与建设目标	385
§ 7.2 X 射线小角散射线站设计	387
7.2.1 光源点与前端区	387
7.2.2 光束线	390
7.2.3 X 射线小角散射实验站	418
7.2.4 X 射线小角散射光束线指标测试	425
7.2.5 反常 X 射线与掠入射小角散射实验方法研究	429
7.2.6 X 射线小角散射线站用户成果	440
第 8 章 软 X 射线谱学显微线站	450
§ 8.1 科学目标	450
§ 8.2 设计目标	451
§ 8.3 物理设计	452
8.3.1 光源与前端区	452
8.3.2 光束线	456
8.3.3 实验站	474

§ 8.4 工程工艺设计	478
8.4.1 线站总体布局	478
8.4.2 光束线主要部件技术参数	479
8.4.3 实验站设备配置	486
8.4.4 辐射防护	487
§ 8.5 安装、调试和测试	489
8.5.1 安装与调试	489
8.5.2 专家组测试报告	492
§ 8.6 实验方法发展	494
8.6.1 扫描透射显微的基本原理和方法	495
8.6.2 已实现常规应用的实验方法	496
8.6.3 先进实验方法发展	498
§ 8.7 用户开放成果	507
8.7.1 地质环境科学领域	507
8.7.2 生物医学领域	509
8.7.3 纳米材料科学	511
8.7.4 物理科学	513
第9章 高热负载前端区系统	516
§ 9.1 前端区总体设计	516
9.1.1 前端区引出、引入张角	516
9.1.2 光源参数	517
9.1.3 边界条件	517
9.1.4 技术要求	518
9.1.5 总体布局	518
9.1.6 工作模式	519
9.1.7 安装准直	520
9.1.8 真空系统设计	521
9.1.9 同步光追迹	522
9.1.10 韧致辐射追迹	525
§ 9.2 前端区结构设计	527
9.2.1 光阑	527
9.2.2 活动光子挡光器 1	527
9.2.3 ID 活动光子挡光器 2	528
9.2.4 安全光闸	528
9.2.5 光束位置探测器	529
9.2.6 有限元分析条件	529

9.2.7 前端区典型元件的有限元分析	530
§ 9.3 前端区的安装调试	532
9.3.1 前端区安装	532
9.3.2 前端区的调试	533
第 10 章 光束线关键设备与机械真空系统	536
§ 10.1 光束线机械真空系统总体要求	536
10.1.1 光束线组成	536
10.1.2 机械真空系统设计总体要求	536
§ 10.2 水冷白光狭缝	538
10.2.1 弯铁白光狭缝	538
10.2.2 插入件白光狭缝	540
§ 10.3 准直镜、聚焦镜	556
10.3.1 固定面形反射镜箱	557
10.3.2 压弯镜镜箱	561
§ 10.4 单色器	570
10.4.1 变包含角平面光栅单色器	570
10.4.2 液氮冷却单色器	580
10.4.3 弧矢聚焦单色器	587
§ 10.5 光束位置探测器	603
10.5.1 交叉丝扫描探测器	604
10.5.2 平行丝扫描探测器	606
10.5.3 白光荧光靶	607
10.5.4 单色光荧光靶	609
§ 10.6 单色光狭缝	609
10.6.1 精密四刀单色光狭缝	611
10.6.2 柔性铰链式单色光狭缝	614
§ 10.7 安全光闸	620
10.7.1 安全光闸组成	621
10.7.2 安全光闸技术指标	622
10.7.3 安全光闸机械结构方案与设计	624
10.7.4 安全光闸关键技术及解决方案	624
10.7.5 安全光闸制造与测试	625
§ 10.8 滤波器	627
10.8.1 滤波器的用途	627
10.8.2 滤波器的组成	627
10.8.3 滤波器主要技术指标	628