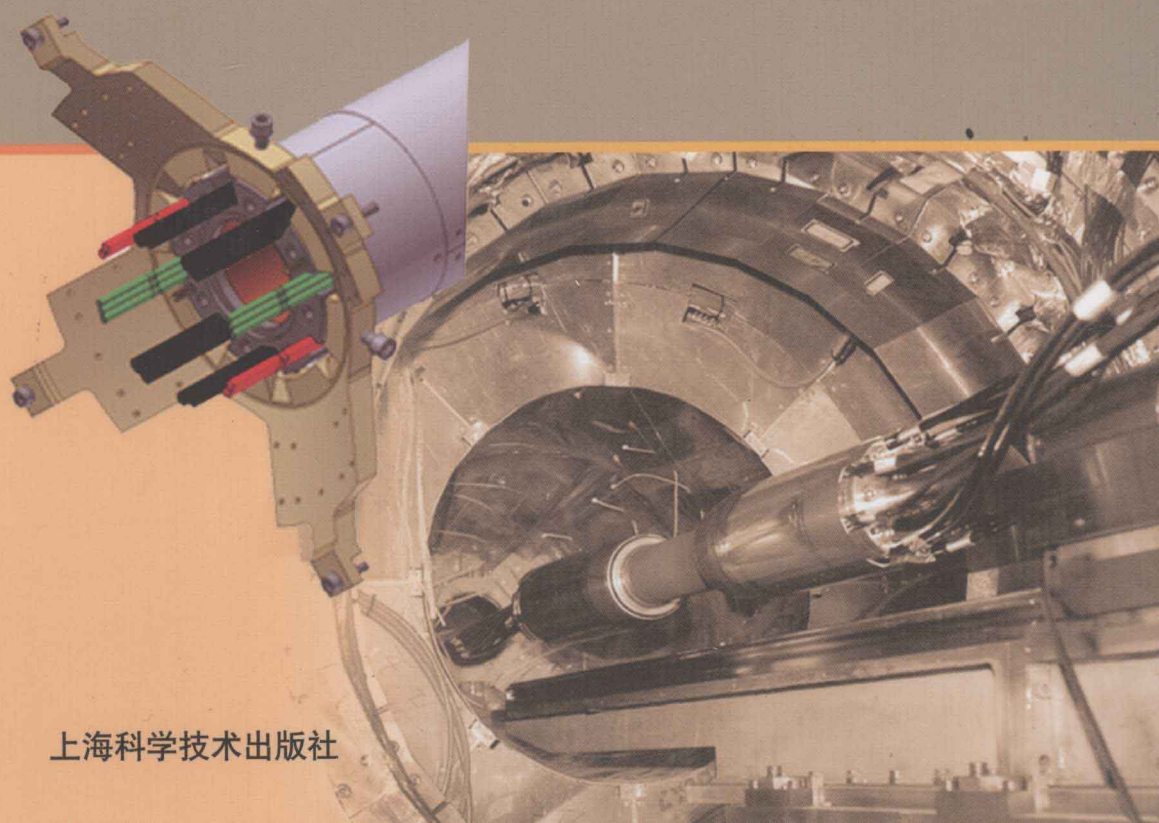




科学 专著：大科学工程

北京谱仪(BESIII) 的设计与研制

王贻芳 主编



上海科学技术出版社

北京谱仪(BESⅢ) 的设计与研制

王贻芳 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

北京谱仪(BESⅢ)的设计与研制 / 王贻芳主编.

—上海: 上海科学技术出版社, 2011.8

(科学专著: 大科学工程)

ISBN 978-7-5478-0678-4

I. ①北... II. ①王... III. ①正负电子对撞—对撞机

IV. ① 0572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 017147 号

责任编辑 孙正凡

装帧设计 戚永昌

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

上海书刊印刷有限公司印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张 35.5 插页 4

字数 700 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-0678-4/O · 4

定价: 170.00 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

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

内容提要

北京谱仪(BESⅢ)是国家大科学装置——北京正负电子对撞机上的科学研究装置,是新一代大型通用粒子探测系统,用来探测正负电子对撞的产物并重建对撞过程。根据国内外粒子物理研究的现状和发展趋势,特别是在轻强子物理、粲物理、粲偶素物理、 τ 物理和量子色动力学的检验等方面,我国科学家研究并设立了 BESⅢ的物理研究目标,分析研究了具体的技术路线,独立设计并建造完成了这台国内最大的单台科学仪器。其各项指标达到了国际先进水平,部分达到国际最好水平,并有许多独创的重要设计与制造工艺。

本书全面介绍 BESⅢ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 BESⅢ的物理目标、总体结构、BESⅢ四个子探测器系统及其读出电子学、超导磁铁系统、触发判选系统、数据获取系统、环境监控系统、离线软件及海量数据的计算机处理系统等,涉及粒子探测、快电子学、机械、低温超导、自动控制、计算机技术与软件等各项技术。

本书由参与设计与研制全过程的有关科学家撰稿,对从事核与粒子物理实验、快电子学、机械、低温超导、计算机控制与软件等方面的科研人员和学生具有重要的参考价值,对技术开发人员和科研管理人员也有一定的参考价值。

序 言

我很高兴看到《北京谱仪(BESⅢ)的设计与研制》这本专著的出版。刚刚完成的北京正负电子对撞机重大改造工程顺利通过了国家验收,各项指标达到了设计要求和国际水准,特别是在试运行期间已获得了许多物理成果,表明了中国高能物理研究近年来的进步与水平。这本书总结了北京谱仪(BESⅢ)的设计思想,详细介绍了研制方法与过程,是对过去历史的一个纪录,是一本很好的高能物理实验方法教材,对高能物理的未来发展也是一个参考。

北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCⅡ)主要包括两个部分:加速器与谱仪。加速器创造条件,通过加速粒子并使其碰撞,得到我们希望的环境与条件,如各种次级粒子。而谱仪是观测与科学研究设备,通过探测正负电子对撞后产生的次级粒子,研究物理过程及其规律。BEPCⅡ的科学目标是要通过谱仪来实现的,因此谱仪的设计既要充分反映物理目标的需求,也要兼顾技术、造价、工期等具体条件的限制,是一项极为复杂的工程。从书中可以看出,BESⅢ的设计与建造涉及粒子物理、粒子探测技术、快电子学技术、机械、自动控制、低温超导、计算机技术等各个领域,在许多方面达到了国际水平的极限。中国科学院高能物理研究所的研究人员能够克服重重困难,依靠自己的力量,与国内工业界合作,完成这样一项任务,是值得庆贺的。这不仅反映了中国科学研究能力的提高,也反映了中国工业水平的提高。

基础科学的研究起源于人类的观察和好奇心,它是推动人类进步的源泉之一。大力发展基础科学,特别是其中的实验科学,对推动国家的进步,具有重要意义。高能物理是国际科学研究的最前沿,其技术涉及面极广,要求也常常是最高的,是科学与技术结合的最好范例。推动中国高能物理的发展是我多年的心愿,因为我相信这对中国的发展是很有好处的。北京谱仪(BESⅢ)就是一个很好的实例。我希望中国能出现更多类似 BESⅢ的成功,并坚信在未来的二十年内,中国的科学研究会成为国际的中坚力量。

李政道

2010年4月28日

前 言

粒子物理,又称为高能物理,是研究物质最基本的结构及其相互作用的一门基础学科。从早期的原子物理、原子核物理发展到今天的粒子物理,一脉相承,一直是近代物理发展的最前沿。最近几十年来,粒子物理又与宇宙学和天体物理紧密结合,成为理解早期宇宙形成与演化的基础。

粒子物理研究的一个突出特点是其涉及的实验设备均为庞大的专用设备。粒子物理学家必须根据要研究的科学问题,自己设计和制造专用的实验设备。这个专用设备不仅涉及粒子探测技术,通常还涉及大量的材料技术、精密机械技术、低温超导技术、快电子学技术、自动控制技术、海量数据获取、存储与处理技术、大型软件技术等,是一项极为复杂的系统工程。有关技术需求经常会达到或超过极限水平,成为带动技术发展的引擎,其成功建造也是一个国家工业和技术发展水平的标志。在国内,粒子物理研究还常常扮演了技术引进者与先导者的角色。

北京正负电子对撞机重大改造工程中的科学研究设备——北京谱仪(BESⅢ),就是这样一台用于探测正负电子对撞后产生的次级粒子、研究其物理过程和规律的大型设备。这台粒子探测谱仪就像对撞机的眼睛,可以观测和记录正负电子对撞后在纳秒时间尺度内发生的全部过程,测量各种次级粒子的能量、动量、质量、飞行时间等参数,以定量重建整个反应过程,研究其与已知物理过程的异同,寻找新的物理现象、规律和粒子。

北京谱仪(BESⅢ)大型国际合作组,特别是中国科学院高能物理研究所的科研人员,通过仔细研究可能的物理目标,参考了国际上最新的探测技术与理念,完成了这台谱仪的全新设计。BESⅢ的各项指标均达到了国际先进水平,部分实际上是国际最好水平,充分满足了物理研究的需求。这台谱仪总重约 700 多吨,共包括 4 个子探测器,一台大型超导磁铁,三万多路读出电子学,实时数据量达 50 MB/s,全年超过 1 PB。自行开发的用于数据分析与处理的大型软件系统超过 1 000 万行。

北京谱仪(BESⅢ)在建造中,克服了重重困难,解决了一系列国内工业界从未遇到过的问题,在很多方面使有关企业的技术水准上了一个新

台阶,达到了国际水平。一些创新性的设计、材料、工艺、方法也使我国的探测器研制在国际上有了相当的影响,标志着我国的粒子探测技术及其电子学的研制达到了国际水准。

根据物理目标设计、研制探测器系统是粒子物理学家的一个基本任务。这本书介绍了 BESⅢ的设计思想与理念,详细讨论了研制方法和过程,包括预研、工程设计、模型试制、测试方法与结果、制造、组装、调试、运行等各个方面,是上百位科研人员、工程技术人员和青年学生八年努力的一个总结,也是他们智慧的结晶。这本书将他们工作的精华呈现给读者,期望能对我国未来粒子物理的研究、探测器的研制和青年学生的培养有所帮助。

北京谱仪(BESⅢ)的成功研制是我国高能物理学界几代人奋斗的结果。从 20 世纪 80 年代开始建造第一代北京谱仪(BES),到 90 年代改造完成 BESⅡ,直至今天的 BESⅢ,高能所及国内有关单位积累了丰富的经验和人才,使 BESⅢ能顺利完成。BESⅢ的建设和本书的写作,是在高能所的前任所长叶铭汉先生、郑志鹏先生的关心和支持下,在现任所长兼北京正负电子对撞机重大改造工程指挥部经理陈和生院士和副经理李卫国研究员的领导下完成的。著名物理学家、诺贝尔奖获得者李政道先生自始至终关心 BESⅢ的设计与建设,曾多次亲临现场视察,并为本书作序。值此本书出版之际,谨向我国高能物理学界的前辈和有关领导、专家表示衷心的感谢。

本书由王贻芳主编,第一章由王贻芳执笔编写,第二章由王灵淑执笔编写,第三章由陈元柏执笔编写,第四章由盛华义执笔编写,第五章由衡月昆执笔编写,第六章由安琪执笔编写,第七章由吕军光执笔编写,第八章由王佩良执笔编写,第九章由张家文执笔编写,第十章由周永钊执笔编写,第十一章由朱自安执笔编写,第十二章由王贻芳组织编写,第十三章由刘振安执笔编写,第十四章由朱科军执笔编写,第十五章由李小男执笔编写,第十六章由陈刚执笔编写,第十七章由李卫东执笔编写,第十八章由王贻芳执笔编写。全书由王贻芳统稿,王勇涛协助了文稿的编辑与整理。书后所附光盘的素材由刘捷等人提供,蒋文奇协助完成了多媒体光

盘的制作。

BESⅢ的建设是 BESⅢ国际合作组全体成员共同努力的结果,也得到了国内有关科研单位、企业的大力支持。许多人对 BESⅢ的建设和本书的写作做出了重要贡献,他们或是实际工作任务的完成者,或为本书提供了素材,或参与写作了部分章节。在此不能一一列举,深表歉意。本书后附有 BESⅢ建设各子系统负责人名单和 BESⅢ国际合作组成员名单,以记录他们对 BESⅢ建设的贡献。

最后,感谢上海科学技术出版社的编辑人员为本书出版所做的努力。

王贻芳

2010. 5. 24

目 录

第 1 章 北京谱仪Ⅲ探测器的物理目标与总体设计	1
§ 1.1 τ -粲物理	1
§ 1.2 北京谱仪(BESⅢ)的物理目标	4
1.2.1 轻强子谱研究	5
1.2.2 粲偶素物理研究	6
1.2.3 粲物理研究	7
1.2.4 量子色动力学和强子产生性质研究	8
1.2.5 τ 轻子物理研究	9
§ 1.3 BESⅢ探测器的总体设计	9
第 2 章 谱仪机械系统	14
§ 2.1 设计目标、要求与限制条件	14
§ 2.2 谱仪轭铁	15
2.2.1 桶部轭铁结构设计	16
2.2.2 端部轭铁和移动机构设计	17
2.2.3 谱仪轭铁的制造及安装	18
§ 2.3 各子探测器的支承结构	20
2.3.1 超导磁体的支承	21
2.3.2 各子探测器的支承结构设计及安装	21
§ 2.4 端部量能器及其移动机构	25
2.4.1 端部量能器结构	25
2.4.2 端部量能器移动机构	25
§ 2.5 谱仪总体移动机构	27
2.5.1 谱仪基座的设计	27
2.5.2 谱仪总体移动及对撞点就位	27
§ 2.6 机械总体的技术特点	29
第 3 章 主漂移室系统	31
§ 3.1 物理设计	31
§ 3.2 机械设计	34
3.2.1 内室结构	34
3.2.2 外室结构	35
3.2.3 内外室连接	37
§ 3.3 漂移室研究	37
3.3.1 模型实验	37
3.3.2 定位子、丝、密封胶、夹丝钳	40
3.3.3 机械模型试制和预应力试验研究	42
§ 3.4 室体的加工与组装	43

3.4.1	室体零件加工	44
3.4.2	室体组装	45
3.4.3	室体测量	46
§3.5	漂移室布丝	48
3.5.1	预应力	49
3.5.2	蠕变过程计算分析	50
3.5.3	布丝机	50
3.5.4	布丝	52
3.5.5	张力和漏电流的测量	53
3.5.6	内室和外筒窗盖板的安装	55
3.5.7	漂移室的密封	56
§3.6	宇宙线试验	57
3.6.1	宇宙线测试系统的安装	57
3.6.2	气体系统	59
3.6.3	扫描测试	59
3.6.4	测试结果	61
§3.7	漂移室安装	62
§3.8	运行与性能测试结果	64
§3.9	创新与特点	65
第4章	主漂移室电子学系统	68
§4.1	设计要求	68
4.1.1	电荷测量	68
4.1.2	时间测量	70
4.1.3	系统设计须考虑的因素	71
§4.2	系统和电路设计	73
4.2.1	前置放大器	73
4.2.2	电荷与时间测量插件	76
4.2.3	校准刻度电路	83
4.2.4	读出控制插件(MROC 插件)	85
4.2.5	触发接口插件(MTI 插件)	86
4.2.6	扇出插件(MF-I 插件和 MF-II 插件)	87
4.2.7	信号电缆	87
§4.3	系统框图结构和在探测器大厅的布局	88
§4.4	研制进展	91
§4.5	性能指标的测试及结果	96
§4.6	技术特点和创新点	104
第5章	飞行时间探测器系统	107
§5.1	探测器目标分析	107
§5.2	探测器设计研究	111
5.2.1	桶部闪烁体的选择定型	111

5.2.2	端盖闪烁体的选择定型	113
5.2.3	光电倍增管的选择	115
5.2.4	小模型实验的初步结果	116
5.2.5	监测系统	116
§ 5.3	探测器制造	118
5.3.1	闪烁体研究与质量控制	118
5.3.2	光电倍增管研究与质量控制	120
5.3.3	探测器配件的制作与质量控制	121
§ 5.4	探测器安装	122
§ 5.5	探测器离线刻度与时间分辨率	124
5.5.1	离线刻度流程与方法	124
5.5.2	刻度后飞行时间探测器的时间分辨率	125
§ 5.6	总结	127
第 6 章	飞行时间探测器电子学系统	129
§ 6.1	飞行时间探测器读出电子学系统的设计	129
6.1.1	性能指标	129
6.1.2	技术路线	132
6.1.3	系统描述	140
§ 6.2	系统研制	141
6.2.1	方案调研和论证	142
6.2.2	TOF 电子学系统的研发	142
6.2.3	小系统建立与联调	148
6.2.4	安装、调试和初步取数	149
§ 6.3	测试结果	150
6.3.1	TOF 前置放大器	150
6.3.2	读出电子学	152
6.3.3	TOF 时钟系统	154
6.3.4	TOF 监测器电子学	156
6.3.5	其他功能模块	157
§ 6.4	技术特点与创新点	157
6.4.1	信号链路的全差分处理	157
6.4.2	时间、电荷量的统一数字化处理	158
6.4.3	HPTDC 非线性实时修正	158
6.4.4	光电倍增管快脉冲的“电荷—时间转换”技术与温度漂移补偿	159
6.4.5	高精度时钟系统	159
第 7 章	电磁量能器系统	161
§ 7.1	电磁量能器的设计	161
7.1.1	晶体的选择	161
7.1.2	CsI(Tl)晶体尺寸的设计	162
§ 7.2	量能器的结构	164

7.2.1	晶体排列	164
7.2.2	晶体单元结构	165
7.2.3	量能器电子学	166
7.2.4	量能器的机械结构	166
§ 7.3	量能器的预研	167
7.3.1	CsI(Tl)晶体反射材料的研究	167
7.3.2	硅光二极管及前置放大器	168
7.3.3	晶体探测单元的电子学噪声	169
7.3.4	晶体支撑机械结构	170
§ 7.4	量能器晶体单元的制作与测试	171
7.4.1	晶体	171
7.4.2	硅光二极管检测	173
7.4.3	前置放大器检查	174
7.4.4	晶体探测单元的制作	175
7.4.5	晶体探测单元的宇宙线检查	177
§ 7.5	量能器的组装	179
7.5.1	量能器的机械结构制造	179
7.5.2	桶部量能器的组装与安装	180
7.5.3	端部量能器的组装与安装	183
§ 7.6	辅助支撑系统	184
7.6.1	LED-光纤刻度系统	184
7.6.2	温度冷却控制	185
7.6.3	温湿度监测系统	185
7.6.4	辐射剂量监测系统	185
§ 7.7	量能器测试与运行结果	190
7.7.1	晶体探测单元阵列的试验束联调	190
7.7.2	利用 EMC 时间信息去除束流本底	192
7.7.3	运行结果:能量与位置分辨率	192
§ 7.8	技术特点与创新点	194
第 8 章	电磁量能器电子学系统	195
§ 8.1	设计指标	195
8.1.1	动态范围	195
8.1.2	电子学噪声	195
8.1.3	通道之间的串扰	195
8.1.4	积分非线性	196
§ 8.2	系统设计	196
8.2.1	概述	196
8.2.2	电磁量能器读出电子学框图	197
8.2.3	前置放大器	198
8.2.4	主放大器	201
8.2.5	电荷测量插件	204

8.2.6	测试控制器	206
8.2.7	扇出	208
8.2.8	电磁量能器监测器	208
§ 8.3	研制进展	210
§ 8.4	性能指标及测试结果	212
8.4.1	电磁量能器电子学性能指标	212
8.4.2	实验室条件下 384 路小系统性能测试	213
8.4.3	推入对撞点后 6240 路读出电子学系统测试	217
§ 8.5	技术特点与创新点	218
第 9 章	μ 子鉴别器系统	221
§ 9.1	探测器的选择	222
9.1.1	阻性板计数器简介	222
9.1.2	RPC 与流光管的比较	224
§ 9.2	蒙特卡罗模拟	224
§ 9.3	探测器设计	226
9.3.1	桶部结构	227
9.3.2	端盖结构	227
9.3.3	RPC 结构	228
9.3.4	高压系统	230
9.3.5	气体系统	231
9.3.6	探测器预期性能	231
§ 9.4	μ 子鉴别器的研究开发	232
9.4.1	阻性板的研制	232
9.4.2	垫片材料的选择	233
9.4.3	胶的选择	233
9.4.4	胶体石墨的研制	233
9.4.5	气体比分的研究	233
9.4.6	阈值研究	235
9.4.7	阻性板电阻率对探测器性能的影响	235
9.4.8	温度对实验结果的影响	237
9.4.9	探测器寿命的研究	238
§ 9.5	探测器的生产、安装	241
9.5.1	RPC 裸室生产和测量	241
9.5.2	RPC 模块组装和测量	241
9.5.3	探测器安装	242
§ 9.6	探测器的性能测试	242
§ 9.7	技术特点和创新点	244
第 10 章	μ 子鉴别器电子学系统	246
§ 10.1	电子学设计条件和指标	247
§ 10.2	μ 子读出电子学系统方案的确定	247

10.2.1	核电子学和高能物理读出电子学方案的异同	248
10.2.2	μ 子读出电子学系统电路程式	249
10.2.3	μ 子读出电子学系统方案物理结构的选择	250
§ 10.3	μ 子鉴别器读出电子学系统预研	251
10.3.1	小系统预研内容	252
10.3.2	小系统结构	252
10.3.3	小系统传输信号电平选择	253
10.3.4	小系统传输时钟选择	253
10.3.5	FEC板设计	254
10.3.6	NIM-USB读出板的设计	267
10.3.7	小系统抗干扰措施	268
10.3.8	小系统测试	269
§ 10.4	VME插件研制	272
10.4.1	VME机箱控制插件	272
10.4.2	扇入扇出插件	273
10.4.3	读出插件	273
10.4.4	VME插件的测试	276
§ 10.5	其他设备	278
§ 10.6	研制进展	278
§ 10.7	μ 子鉴别器读出电子学系统技术说明	279
10.7.1	数据链的组织	279
10.7.2	FEC输出串行数据格式	282
10.7.3	VME读出插件数据格式	282
§ 10.8	技术特点与创新点	282
第 11 章	超导磁体系统	285
§ 11.1	物理要求及磁路设计	286
§ 11.2	超导线圈设计及制造	288
11.2.1	超导电缆	288
11.2.2	超导线圈设计	289
11.2.3	超导电缆短样性能测试	291
11.2.4	模型线圈绕制	293
11.2.5	正样线圈绕制	294
§ 11.3	低温恒温器	295
11.3.1	低温恒温器设计	295
11.3.2	低温恒温器装配	297
11.3.3	阀箱和电流引线	297
§ 11.4	电源和失超保护	300
§ 11.5	真空子系统	302
§ 11.6	超导磁体安装	303
§ 11.7	超导磁体冷却及励磁	304
11.7.1	低温参数及控制	304

11.7.2 状态监测和联锁	305
11.7.3 冷却及励磁	307
§ 11.8 磁场测量	308
§ 11.9 技术特点与创新点	310
第 12 章 对撞区与本底	312
§ 12.1 束流管	312
12.1.1 束流管的设计要求	312
12.1.2 结构设计	313
12.1.3 模型及试验	316
12.1.4 关键技术的预研	322
12.1.5 铍束流管研制	324
12.1.6 镀金设备和工艺	329
12.1.7 总装焊接	330
12.1.8 束流管研制总结	331
§ 12.2 束流相关本底研究	332
12.2.1 束流相关本底的蒙特卡罗模拟	333
12.2.2 本底实验	336
§ 12.3 辐射本底剂量率监测系统	337
12.3.1 剂量率监测系统设计	337
12.3.2 探测器及其性能研究	338
12.3.3 数据采集系统	340
12.3.4 安装及运行	342
§ 12.4 零角度亮度监测器	343
12.4.1 单轭致辐射过程	343
12.4.2 零角度亮度监测器结构	344
12.4.3 零角度亮度监测器的读出电子学	346
12.4.4 测试与运行	348
§ 12.5 束流能量精确测量系统	349
12.5.1 工作原理	349
12.5.2 系统设计与建造	351
12.5.3 运行控制与数据获取系统	352
第 13 章 触发判选系统	354
§ 13.1 事例率的估算	354
§ 13.2 对 BESⅢ 触发判选系统的要求	355
§ 13.3 触发判选系统的方案确定与参数优化	356
13.3.1 触发方案的模拟优化	356
13.3.2 触发判选系统的结构	356
§ 13.4 触发系统的研制与建造	371
13.4.1 预制研究	371
13.4.2 技术攻关	372

13.4.3	技术评审与量产验收	372
13.4.4	质量管理	373
§ 13.5	测试结果、技术特点和创新点	373
13.5.1	测试结果	373
13.5.2	创新与特点	374
第 14 章	数据获取系统	376
§ 14.1	系统的主要任务	377
§ 14.2	系统构成	377
§ 14.3	系统配置	379
14.3.1	系统配置 GUI 工具	380
14.3.2	在线软件配置	380
14.3.3	在线硬件配置	380
§ 14.4	读出系统	383
14.4.1	BESⅢ 数据读出系统的需求分析	383
14.4.2	BESⅢ 数据获取读出系统的关键技术	384
14.4.3	基本功能测试结果与分析	385
14.4.4	DAQ 读出系统框架	387
§ 14.5	在线系统	394
14.5.1	进程间通信框架	394
14.5.2	进程管理与运行控制	394
14.5.3	事例组装	396
14.5.4	事例筛选与存储	397
§ 14.6	其他支持系统	400
14.6.1	非物理取数模式	400
14.6.2	在线监测系统	404
14.6.3	计算集群系统的管理与监测	411
§ 14.7	系统测试	413
14.7.1	四机箱读出性能测试	413
14.7.2	集群性能测试	414
14.7.3	与 MDC 电子学小系统的联合测试	415
14.7.4	综合性能测试	417
§ 14.8	质量管理	419
第 15 章	技术支持系统及工艺总体布局	421
§ 15.1	慢控制系统	421
15.1.1	慢控制系统的软件设计	421
15.1.2	慢控制系统软件的建设	426
15.1.3	慢控制计算机现场部署	427
15.1.4	慢控制系统软件的验收	431
§ 15.2	温湿度监控系统	431
15.2.1	温湿度监控系统的构成	431