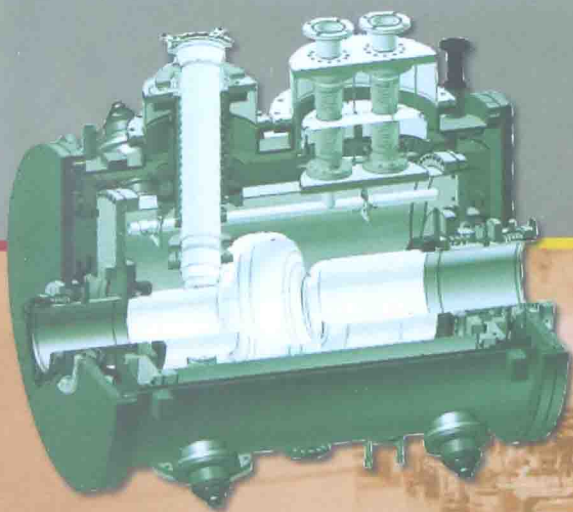




科学专著：大科学工程

北京正负电子对撞机 重大改造工程加速器 的设计与研制

张 闯 马 力 主编



上海科学技术出版社

北京正负电子对撞机 重大改造工程加速器 的设计与研制

张 闯 马 力 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

北京正负电子对撞机重大改造工程加速器的设计与研制 / 张闯, 马力主编.

—上海: 上海科学技术出版社, 2015. 4

(科学专著: 大科学工程)

ISBN 978-7-5478-2319-4

I. ①北... II. ①张... ②马... III. ①正负电子对撞—对撞机—技改工程 ②电子加速器—研究

IV. ①O572.21 ②TL54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 157575 号

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助

责任编辑 刘小莉 段 韬

装帧设计 戚永昌

北京正负电子对撞机重大改造工程加速器的设计与研制

张 闯 马 力 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

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 55.75 插页 4

字数 1100 千字

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2319-4/O·37

定价: 268.00 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

内容提要

北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)是我国“十一五”期间投资建设的重大科技基础设施,包括加速器和探测器两大部分。BEPCII 加速器瞄准国际高能加速器发展前沿,采用先进的正负电子双环大交叉角对撞的方案,发展了一系列具有国际先进水平的加速器技术,设计研制成功了数百台高技术设备,成为 τ -粲能区世界上对撞亮度最高的对撞机,在国际粒子加速器的高亮度前沿占据了一席之地。

本书全面介绍了 BEPCII 加速器的科学目标、物理设计、技术路线、研制内容、测试结果和调束运行,包括注入器电子直线加速器、储存环磁聚焦结构、阻抗和束流不稳定性、射频系统、注入系统、磁铁系统、磁铁电源系统、真空系统、控制系统、束流测量系统、对撞区系统、机械及准直系统、低温系统、辐射防护系统、通用设施、调束和运行等各个方面。

本书由参加 BEPCII 加速器设计与研制全过程的科技人员撰写,对于从事粒子加速器及其相关专业,包括束流物理、电磁场、微波技术、电磁铁、稳恒电源、特种磁铁及其电源、真空技术、快电子学、计算机控制与软件、机械设计与制造、准直测量、低温超导等方面的科研人员和青年学生具有重要的参考价值,也可供技术开发人员和科研管理人员在工作中参考。

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,继承性和连续性的特点,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

序 言

《北京正负电子对撞机重大改造工程加速器的设计与研制》专著的出版,使我想起了 41 年前,我第一次回到祖国时看到的中国高能物理发展的情景。当时,高能物理研究所还没有成立,中国还没有自己的高能加速器,高能物理实验主要在海拔 3 200 m 的云南宇宙线观测站进行。经过这 40 年的发展,中国建造了先进的北京正负电子对撞机(BEPC),开展了高能物理实验,取得了许多重要的物理成果。现在又成功地对 BEPC 做了重大改造,每天获取的事例数提高了 2 个数量级。BEPCII 的建成,是中国高能物理实验研究的又一次重大飞跃,为保持和发展中国在粲物理和 τ 轻子物理研究领域的国际领先地位打下了坚实的基础。

对撞机是高能物理研究的重要工具。高能物理研究物质结构的最小单元构成及其相互作用规律,是国际科学研究的最前沿。世界上各先进国家都投入巨大的人力和物力开展粒子物理实验。粒子物理实验对加速器技术提出了十分苛刻的高要求。从这本专著中我们看到,BEPCII 涉及一系列高技术,包括高频微波技术、磁铁技术、电源技术、真空技术、束流测量技术、自动控制技术、低温和超导技术、辐射防护技术、精密机械和准直技术,等等。高能物理所的研究人员,深入开展设计研究,采用大交叉角对撞的方案,在 BEPC 窄小的隧道里安装了两个储存环,在很短的距离内实现了正负电子高流强束流的高亮度对撞和分离,很好地兼顾了高能物理实验和同步辐射应用。在加速器的研制与建造过程中,充分发挥了多年积累的经验,在全国有关单位的大力支援下,发展并采用了国际先进技术,使 BEPCII 工程按指标、按计划、按预算、高质量地完成,并培养了大批优秀人才。BEPCII 的成功反映了中国科学研究的水平,也体现了工业技术的长足进步,获得了世界高能物理界的普遍认同和高度赞扬。

在中国建造高能加速器、开展高能物理的研究,这是好几代科学家的愿望,也是我多年来全力推动的事业。中美高能物理的合作和其他的国际合作也促进了中国高能物理研究的发展步伐。BEPCII 的成功建设和高效运行,使我看到中国高能物理的持续发展和 BEPC 传统的继承发扬,倍

感欣喜。在这本专著出版之际,我衷心祝愿祖国在先进加速器技术和粒子物理研究等领域取得更多、更重要的成果,在物理学和其他基础及应用科学的研究中取得光辉的新成就。

李政道

二〇一三年五月

前 言

20 世纪 30 年代以来,在物理学的舞台上,粒子加速器扮演着重要角色。在粒子加速器问世之前,人们用于研究原子核结构的粒子束有两种:一种是天然放射性核素发出的射线;另一种则是来自天外的高能宇宙射线。前者固然简单方便,但放射线粒子的流强太低,能量不高,因而产生核反应的概率很小。宇宙线粒子可以达到很高的能量,但其强度太弱,更适宜于做定性的研究。这样,粒子加速器作为一种利用电磁场将带电粒子加速到高能量的人工装置,在 20 世纪 30 年代初应核物理研究之运而生。

用粒子加速器作为“显微镜”研究物质微观结构,其分辨率与束流的能量成正比,束流能量越高,用这种束流能“看”到的微观粒子的结构就越精细。在过去 80 多年间,粒子加速器的能量每隔十年增加一个多数量级,成为探索物质微观结构强有力的工具。高能物理需要寻找新粒子,研究新反应,因而关心的是质心系能量或有效作用能。在高能粒子束打静止靶情况下,大部分能量浪费在对撞粒子及其产物的动能上,有效作用能很小。对撞机则可使束流的能量得以充分利用。

对撞机在粒子物理近 40 年激动人心的进展中崭露头角,已成为一种占主导地位的高能粒子加速器。20 世纪 70 年代, J/ψ 粒子、 τ 轻子和 γ 粒子等都同时或相继在打静止靶加速器和对撞机上发现,并用对撞机进行更深入的研究;能量更高的 $W^\pm$ 、 Z_0 粒子、 t 夸克以及希格斯粒子等,则都在对撞机上找到并加以研究。

对撞机赢得了有效作用能,但要获得能与打静止靶的粒子加速器相比拟的反应事例,必须提高其对撞亮度。亮度定义为对撞产生的事例率与该反应的截面之比。更高的能量和更高的亮度,是国际上高能粒子加速器发展的两个前沿。

北京正负电子对撞机(BEPC)是一台工作在 τ -粲能区(质心能量 2~5 GeV)高亮度前沿的对撞机,也是我国第一台高能粒子加速器和同步辐射装置。对撞机涉及一系列高技术,包括射频微波技术、磁铁技术、电

源技术、真空技术、束流测量技术、自动控制技术、低温和超导技术、辐射防护技术、精密机械和准直安装技术等。在 BEPC 中,一对正、负电子束团在储存环中以相反的方向运动,在其中一个相互作用点进行对撞,为开展高能物理研究提供实验手段;同时利用电子束在环形轨道切线方向发出的同步辐射光,为原子核分子层次诸多学科的研究提供实验平台。

BEPC 的胜利建成和成功运行,使我国在 τ -粲物理能区的研究占据了国际领先地位,在高能物理和同步辐射领域取得了一系列重要成果。为了在激烈的国际竞争中继续保持这个领先的一席之地,中国科学家提出了对北京正负电子对撞机进行重大改造即 BEPCII 的计划。BEPCII 采用国际最先进的双环多束团对撞技术,设计亮度是 BEPC 的 30~100 倍。在国家的大力支持下,BEPCII 于 2004 年开工建设,经过全体建设者五年的努力,终于达到了工程目标,于 2009 年通过国家验收。验收报告指出:“BEPCII 工程按指标、按计划、按预算、高质量地完成各项建设任务,是我国大科学工程建设的一个成功范例。”

BEPCII 加速器的设计瞄准国际高能粒子加速器发展前沿,针对美国康奈尔大学 CESRc 的竞争,创造性地采用正负电子双环大交叉角对撞和“内外桥”连接两个外半环形成同步辐射环的“三环方案”,在较短的周长和窄小的 BEPC 隧道安装双储存环;实现了“一机两用”,并保持原有光束线出口基本不变,最大限度地利用 BEPC 原有的设施;提出了超导插入磁体和双孔径四极磁铁对撞区的创新性设计方案,在很短的距离内实现了正负电子束流的分离和高流强六维束流精确对撞。

BEPCII 采用和发展了一系列国际先进水平的粒子加速器技术。新建的电子枪实现了强流和小发射度的要求;自主研制成功的正电子源采用具有大俘获效率的磁号和直流强磁场获得了高产额的正电子束流;提出了新型的注入冲击磁铁的设计,满足了束流阻抗和磁场均匀性的要求;首次研制成功了常规切割型的双孔径四极磁铁;成功研制了对撞区特种磁铁、特殊真空盒和最复杂的紧凑型对撞区超导插入磁体;设计研制了储存环低阻抗超高真空部件,有效地抑制了束团拉伸效应等束流不稳定性;在国内首次研制成功基于事件的定时系统、逐束团流强测量系统、

横向束流反馈系统、500 MHz 超导腔系统和用于大型粒子加速器装置的 4.5 K 低温系统等,并成功投入 BEPCII 的运行。

BEPCII 建成后即投入运行,实现了高能物理和同步辐射“一机两用”,性能达到国际先进水平,最高对撞亮度达 $7 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,为改造前的 70 倍,是此前世界纪录的 10 倍以上;获取的 J/ψ 、 ψ' 和 ψ'' 数据超过此前国际上最大样本的 3~4 倍,并为多学科研究提供平台,取得一批重要成果,保持和发展我国在 τ -粲物理研究的国际领先地位。

本书是 BEPCII 加速器设计与研制的总结,作者都是工作在一线的粒子加速器物理或技术专家,内容涵盖注入器电子直线加速器、储存环磁聚焦结构、阻抗和束流不稳定性、射频系统、注入系统、磁铁系统、磁铁电源系统、真空系统、控制系统、束流测量系统、对撞区系统、机械及准直系统、低温系统、辐射防护系统、通用设施、调束和运行等。第 1 章由陈和生、张闯、李卫国、马力执笔编写,第 2 章由裴国玺、王书鸿、周祖圣、池云龙、赵风利、侯汨、裴士伦、邓秉林、孔祥成、曹建社执笔编写,第 3 章由徐刚、陈利民、黄楠执笔编写,第 4 章由王九庆、秦庆、刘瑜冬、张源、王生执笔编写,第 5 章由王光伟、潘卫民、孙毅、李中泉、沙鹏、徐波执笔编写,第 6 章由康文、陈锦晖执笔编写,第 7 章由石才土、倪淦林、孙献静执笔编写,第 8 章由程健、王放安、张旌、陈斌、陈福三、龙锋利执笔编写,第 9 章由董海义执笔编写,第 10 章由王春红、赵籍九、李刚、雷革、战明川、赵卓、孔登明执笔编写,第 11 章由曹建社执笔编写,第 12 章由吴英志、彭全岭、尹兆升、陈福三执笔编写,第 13 章由董岚、屈化民、康玲执笔编写,第 14 章由李少鹏、边琳、张卓、桑民敬、刘亚萍执笔编写,第 15 章由王庆斌、张清江、李俊刚、吴青彪、马忠剑执笔编写,第 16 章由林国平、范志香、吴耀清、申桂林、栗青、王博东、冯光、王亮、蔡小平、马忠剑、徐中雄执笔编写,第 17 章由王九庆、张闯、秦庆执笔编写。全书由张闯和马力统稿,赵宁协助了文稿的编辑和整理,做了大量的工作。

BEPCII 的建设和本书的写作得到谢家麟院士、方守贤院士、陈佳洱院士、陈森玉院士、何多慧院士等老科学家的关心和支持,著名物理学家、诺贝尔奖获得者李政道先生自始至终关心 BEPCII 的设计与建设,多次亲临

现场指导,并为本书作序。这本书也是全体工程建设者辛勤工作、协力创新的结晶,他们都是本书的作者。值此《北京正负电子对撞机重大改造工程加速器的设计与研制》出版之际,我们谨向关心和支持 BEPCII 工程的各位专家、领导表示崇高的敬意,向参加工程建设的全体同事表示衷心的感谢。

最后,衷心感谢上海科学技术出版社对本书的编辑和出版所做的努力。

张闯 马力

2013年7月

目 录

第 1 章 总论	1
§ 1.1 科学目标	1
1.1.1 北京正负电子对撞机及其物理成果	2
1.1.2 中国高能物理发展战略	2
1.1.3 科学意义及目标	3
§ 1.2 从 BEPC 到 BEPCII	4
1.2.1 BEPC 概述	4
1.2.2 从单环单束团到单环多束团对撞	9
1.2.3 从单环多束团到双环多束团对撞	11
1.2.4 BEPCII 的挑战	14
§ 1.3 BESIII 探测器概述	15
1.3.1 总体设计	15
1.3.2 漂移室	17
1.3.3 飞行时间探测器	19
1.3.4 电磁量能器	22
1.3.5 μ 子鉴别器	24
1.3.6 超导磁体系统	25
§ 1.4 工程实施	28
1.4.1 工程进展	28
1.4.2 工程管理	31
1.4.3 技术特点和创新	34
第 2 章 注入器改造	37
§ 2.1 概述	37
2.1.1 前言	37
2.1.2 BEPC 直线加速器改进目标与措施	39
2.1.3 项目实施概况	43
§ 2.2 直线加速器物理设计和研究	44
2.2.1 电子枪出口束流参数的选择和模拟计算	44
2.2.2 束流光路的优化设计和模拟计算	46
2.2.3 正电子产生靶上初级电子束的最小束斑尺寸研究	50
2.2.4 微波功率幅度和相位误差的影响	53
2.2.5 束流轨道校正的物理设计研究	53
2.2.6 束流发射度测量的物理研究和测量装置的改造	56
2.2.7 直线加速器物理设计和研究小结	57
§ 2.3 电子枪	57
2.3.1 概述	57
2.3.2 枪体的计算机模拟	58

2.3.3	脉冲产生系统	61
2.3.4	脉冲高压电源	61
§ 2.4	正电子源	63
2.4.1	改进介绍	63
2.4.2	正电子源物理设计	64
2.4.3	正电子源工程设计和制造	70
§ 2.5	微波功率源改造	78
2.5.1	概述	78
2.5.2	大功率速调管	78
2.5.3	脉冲调制器升级改造	80
§ 2.6	微波部件改进	87
2.6.1	新加速管的设计	87
2.6.2	聚束系统的改进	88
2.6.3	微波大功率超高真空波导阀门	90
2.6.4	高功率 SiC 型千负载	90
2.6.5	次谐波聚束系统	92
2.6.6	高功率波导系统及微波测量和相长度的调配	98
2.6.7	微波监控系统	99
§ 2.7	相位控制	101
2.7.1	概述	101
2.7.2	相控系统采取的技术路线	102
2.7.3	相控系统框架结构	102
2.7.4	相控系统的组成和关键部件	105
§ 2.8	真空系统改进	111
2.8.1	概述	111
2.8.2	各区段真空的改进	111
2.8.3	真空测量的改进	112
2.8.4	真空区段阀联锁保护的改进	112
2.8.5	大功率波导阀真空系统的改进	114
2.8.6	正电子源真空部件的处理和高真空获得	115
§ 2.9	控制系统改进	117
2.9.1	概述	117
2.9.2	计算机系统及网络	118
2.9.3	前端控制设备	119
2.9.4	控制系统软件与数据库应用	122
§ 2.10	束流测量系统改进	127
2.10.1	改进目的和改进内容	127
2.10.2	流强测量系统的改进	127
2.10.3	束流位置探测器(BPM)	131
2.10.4	束流截面测量	136
2.10.5	打靶电子束流截面测量系统	137
2.10.6	束流性能测量	138
2.10.7	束测系统特点和创新点	141

§ 2.11 直线加速器调束和测试	141
2.11.1 束流调试过程中的主要问题和解决措施	141
2.11.2 直线加速器改造工艺测试	143
第 3 章 磁聚焦结构设计	150
§ 3.1 概述	150
§ 3.2 几何设计	151
3.2.1 射频频率的选择	151
3.2.2 对撞区的几何设计	151
3.2.3 射频区的几何设计	152
3.2.4 弧区的几何设计	153
3.2.5 总体设计	153
§ 3.3 对撞模式磁聚焦结构设计	154
3.3.1 BEPC 的磁聚焦结构	154
3.3.2 BEPCII 磁聚焦结构的设计	155
3.3.3 误差效应及闭轨校正	158
3.3.4 色品校正和动力学孔径	164
§ 3.4 同步辐射专用模式	168
3.4.1 磁聚焦结构布局	168
3.4.2 模式的设计和主要性能	169
3.4.3 色品校正和动力学孔径	170
3.4.4 插入件的影响	173
§ 3.5 束流注入	174
3.5.1 注入概述	174
3.5.2 注入组件	176
3.5.3 注入点参数及注入孔径要求	177
3.5.4 注入跟踪模拟	178
3.5.5 注入时克服寄生束束作用所需分离量估算	179
§ 3.6 备用方案	180
3.6.1 轨道设计	180
3.6.2 同步辐射模式的 Lattice 设计	181
3.6.3 正、负电子环的初调方案的磁聚焦结构设计	182
§ 3.7 特点与创新	184
第 4 章 阻抗和束流不稳定性	186
§ 4.1 概述	186
§ 4.2 阻抗	186
4.2.1 阻抗计算	189
4.2.2 真空部件工程设计中的阻抗控制	196
4.2.3 真空部件阻抗实验室测量	197
4.2.4 基于束流的阻抗测量	199
§ 4.3 束流集体效应	204

4.3.1	单束团集体效应	205
4.3.2	耦合束团不稳定性	207
4.3.3	离子效应	212
4.3.4	光电子效应	214
4.3.5	对束流反馈系统的要求	223
4.3.6	束流寿命	224
4.3.7	最佳取数时间与平均亮度	229
4.3.8	小结	231
§ 4.4	束束相互作用	232
4.4.1	设计阶段的弱强模拟研究	234
4.4.2	强强模拟和实际性能分析	237
4.4.3	可能的性能提高途径	241
第 5 章	射频系统	245
§ 5.1	概述	245
§ 5.2	超导加速腔	248
5.2.1	技术要求和解决方案	248
5.2.2	超导腔设计	250
5.2.3	主体部件	251
5.2.4	配套设备	251
5.2.5	安装测试条件的建立	252
5.2.6	整体组装	252
5.2.7	测试验收	252
5.2.8	隧道安装	254
§ 5.3	功率源	255
5.3.1	方案选择	255
5.3.2	技术指标和要求	256
5.3.3	功率馈送部分	258
5.3.4	配套设施改造与重建	259
5.3.5	现场安装	261
5.3.6	测试验收	262
5.3.7	小结	263
§ 5.4	低电平控制	264
5.4.1	反馈控制	265
5.4.2	安全联锁及快速保护	267
5.4.3	本地控制	267
§ 5.5	系统集成及联调	268
5.5.1	系统总体布局	268
5.5.2	系统集成和联调	268
§ 5.6	小结	270
第 6 章	注入系统	272

§ 6.1 概述	272
§ 6.2 冲击磁铁的设计和研制	273
6.2.1 方案选择	273
6.2.2 冲击磁铁的设计	275
6.2.3 冲击磁铁的研制	278
6.2.4 冲击磁铁的测试	280
§ 6.3 注入冲击磁铁电源的设计和研制	283
6.3.1 脉冲电源的线路设计	283
6.3.2 脉冲电源的结构设计	289
§ 6.4 注入系统集成和联调	290
6.4.1 系统集成	290
6.4.2 系统联调	291
§ 6.5 特点与创新	293
6.5.1 冲击磁铁的特点与创新	293
6.5.2 脉冲电源的特点与创新	293
第 7 章 磁铁系统	296
§ 7.1 概述	296
§ 7.2 偏转磁铁	297
7.2.1 偏转磁铁的物理设计	298
7.2.2 偏转磁铁的样机制造	303
7.2.3 偏转磁铁的批量生产与磁场测量	305
§ 7.3 四极磁铁	310
7.3.1 四极磁铁的物理设计	311
7.3.2 四极磁铁的样机制造	314
7.3.3 老四极磁铁的线圈改造	316
7.3.4 斜四极磁铁的物理设计	318
7.3.5 同步辐射专用模式四极磁铁设计	320
7.3.6 四极磁铁的批量生产与磁场测量	322
§ 7.4 六极磁铁	326
7.4.1 六极磁铁的物理设计	327
7.4.2 六极磁铁的样机制造	328
7.4.3 六极磁铁的批量生产与磁场测量	331
§ 7.5 校正磁铁	333
7.5.1 校正磁铁的物理设计	333
7.5.2 校正磁铁的样机制造	336
7.5.3 高频区特殊校正磁铁设计	336
7.5.4 校正磁铁的批量生产与磁场测量	341
§ 7.6 特点与创新	343
第 8 章 磁铁电源系统	345
§ 8.1 概述	345