



《中国工程物理研究院科技丛书》第 050 号

直线感应电子加速器

邓建军 主编

国防工业出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》第 050 号

直线感应电子加速器

Linear Induction Electron Accelerator

邓建军 主编
程念安 王华岑 戴光森 编著
刘承俊 石金水

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

直线感应电子加速器/邓建军主编;程念安等编著.

北京:国防工业出版社,2006.10

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-04321-4

I. 直... II. ①邓...②程... III. 电子直线加速器
IV. TL53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 009854 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{1}{2}$ 字数 270 千字

2006 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主 任 委 员 刘成海

副 主 任 委 员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓名笔画排序)

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》
第五届编审委员会

顾 问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 孙 颖 李志民

委 员 (以姓名笔画为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬

陈银亮 何建国 李 凡 李泽仁

苏 毅 汪小琳 吴志杰 张方晓

张富堂 张 健 罗顺火 孟凡宝

郑志坚 周德惠 竺家亨 顾 援

唐永建 黄 辉 彭述明

科技丛书编辑部 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》 已出版书目

- | | | | | |
|-----|---------------|-----------|---------|-------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能 | 董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学 | 章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法 | 胡家赣编著 | 科学出版社 | 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌 | 陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | 李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式粘性 | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |

- 012 炸药热分析
楚士晋编著 科学出版社 1994 年 12 月
- 013 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆主编 科学出版社 1994 年 12 月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长编著 科学出版社 1994 年 12 月
- 015 二维非定常流和激波
王继海编著 科学出版社 1994 年 12 月
- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演主编 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金编著 国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图像处理
吴世法著 国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿著 国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学 辐射效应及加固原理
赖祖武等著 国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨
段绍节编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦著 科学出版社 1999 年 09 月

- 027 无穷维动力系统**
郭柏灵著 国防工业出版社 2000年01月
- 028 真空吸取器设计及应用技术**
单景德编著 国防工业出版社 2000年01月
- 029 再入飞行器天线**
金显盛编著 国防工业出版社 2000年03月
- 030 应用爆轰物理**
孙承纬著 国防工业出版社 2000年12月
- 031 混沌的控制、同步与利用**
陈式刚等著 国防工业出版社 2000年12月
- 032 激光干涉测速技术**
胡绍楼著 国防工业出版社 2000年12月
- 033 空气炮理论与实验技术**
王金贵著 国防工业出版社 2000年12月
- 034 一维不定常流与激波**
李维新著 国防工业出版社 2000年12月
- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术**
孙景文编著 国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集**
董海山等编著 国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氚渗透**
王佩璇 宋家树著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学**
孙景文编著 国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础**
张 钧 常铁强著 国防工业出版社 2004年11月
- 040 系统可靠性工程**
金碧辉主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术**
田东风 伍 钧编著 国防工业出版社 2004年06月

- 042 高能激光系统**
苏毅 万敏编著 国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统**
郭柏灵 高平 陈瀚林著
国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应**
陈盘训著 国防工业出版社 2005年06月
- 045 高功率脉冲技术**
刘锡三编著 国防工业出版社 2005年08月
- 046 热电池**
陆瑞生 刘效疆编著 国防工业出版社 2005年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论**
方泉玉 颜君著 国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统**
郭柏灵 林国广 尚亚东著
国防工业出版社 2006年01月
- 049 动高压原理与技术**
经福谦 陈俊祥主编 国防工业出版社 2006年05月
- 050 直线感应电子加速器**
邓建军主编 国防工业出版社 2006年10月

前 言

早在 1939 年, A. Bouwers 就提出了利用电磁感应加速粒子的原理, 但直到 20 世纪 50 年代, 才由 Nicholas Christofilos 提出建立直线感应电子加速器。直线感应电子加速器可产生强流、高亮度、低能散度的高品质电子束, 部件式结构的特点使它可大量串接获得所需要的能量, 由于具备这些优越性能, 使得直线感应加速器得到了快速发展, 在闪光 X 射线照相、辐照效应、自由电子激光、粒子束聚变、高功率微波等研究领域得到广泛应用, 并在高能物理和能源科学领域有重要的应用前景。我国直线感应加速器技术的发展始于 20 世纪 80 年代初期, 至今已有 20 多年的历史, 但从事该领域的研究人员仍无系统地介绍直线感应加速器的参考书籍, 国内外出版的加速器书籍很少涉及直线感应电子加速器的内容。有鉴于此, 作者编著了此书, 以供从事脉冲功率技术、直线感应加速器、强流粒子束物理技术及应用研究的科技人员、研究生阅读和参考。

本书作者均为长期从事直线感应加速器技术和物理研究的科研人员, 是在 20 年来进行直线感应加速器理论和实验研究的基础上参阅了部分已发表的文献撰写而成。全书共分九章。第 1 章简要介绍了直线感应电子加速器的发展史、加速的基本原理和相关的基本问题; 第 2 章至第 6 章分别系统地阐述了电子注入器、感应腔、脉冲功率系统、束流传输线的基本构成和设计要求、强流束物理; 第 7 章重点介绍了控制系统的控制对象和使用环境; 第 8 章介绍直线感应加速器相关参数的测量方法及其原理, 最后一章介绍直线感应加速器的主要应用。

本书第 1 章和第 9 章由邓建军编著; 第 2 章、第 5 章、第 6 章

分别由程念安、石金水、刘承俊编著；第3章和第7章由王华岑编著；第4章由戴光森和邓建军共同编著；第8章由戴光森、程念安和邓建军共同编著，最后由邓建军对全书进行了审阅和修改。

在本书完成之际，作者首先要感谢为我国直线感应加速器发展作出贡献的所有科研和工程技术人员，没有他们创造性的研究工作，就不会有本书编撰出版的可能。

感谢何多慧院士和林郁正教授为本书出版写了推荐意见。本书编写始终得到中物院科技丛书编委会和院、所领导的大力支持，也得到国内同行专家的关心和鼓励，刘锡三研究员对本书进行了认真审阅，并提出了许多宝贵修改意见，在此一并向他们表示衷心的感谢。张晓波、姚敏录入了全部书稿；文龙、黄子平和朱隽等绘制了部分附图；李劲、黄子平和王勳仔细阅读了书稿并提出了修改意见，作者对他们表示衷心的感谢。由于作者水平所限，加之时间仓促，本书错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2005年10月20日

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 加速器概述	1
1.2 直线感应电子加速器发展简介	2
1.3 直线感应电子加速器原理与基本组成	6
参考文献	12
第 2 章 电子注入器	15
2.1 注入器概述	15
2.1.1 注入器的组成	17
2.1.2 注入器的工作原理	23
2.1.3 注入器的主要参数	24
2.2 注入器中的物理现象	24
2.2.1 阴极发射电流的限制	24
2.2.2 空间电荷效应	24
2.2.3 电子束在管道中漂移时的能散	27
2.2.4 漂移管中空间电荷限制流	28
2.3 注入器的数值模拟和实验研究	29
2.3.1 数值模拟	29
2.3.2 实验研究	31
2.4 注入器设计	33
2.4.1 有箔二极管	34
2.4.2 皮尔斯二极管	36
2.4.3 无箔二极管	36
2.4.4 注入器的磁场分布设计	40

2.5	注入器阴极材料	42
2.5.1	冷阴极材料	43
2.5.2	热阴极材料	46
	参考文献	55
第3章	直线感应加速器感应腔	58
3.1	感应腔的工作原理	58
3.1.1	变压器模型	59
3.1.2	传输线模型	59
3.2	直线感应加速器感应腔的基本结构	62
3.2.1	变压器型感应腔	62
3.2.2	传输线型感应腔	63
3.3	直线感应腔物理设计	76
3.3.1	感应腔的主要性能指标	77
3.3.2	直线感应加速腔高压设计	79
3.3.3	加速腔的横向耦合阻抗设计	100
3.4	常用磁性材料	123
3.5	无磁芯加速腔和介质壁加速腔	129
3.5.1	无磁芯直线感应加速腔	129
3.5.2	介质壁加速腔	135
	参考文献	137
第4章	直线感应加速器脉冲功率技术	145
4.1	脉冲功率技术基础	145
4.1.1	概述	145
4.1.2	开关技术	145
4.1.3	初级储能技术	152
4.1.4	脉冲形成线	161
4.1.5	Marx发生器对 Blumlein 脉冲形成线的 充电电压波形及充电电压效率	174
4.2	直线感应加速器脉冲功率系统	178

4.2.1	国外典型的直线感应加速器脉冲功率系统	178
4.2.2	“神龙一号”加速器脉冲功率系统	182
4.3	多路高压脉冲同步控制及其对加速器性能的影响	183
4.3.1	单个高压脉冲的产生及影响	183
4.3.2	脉冲功率系统同步性能的影响及模拟研究	185
	参考文献	193
第5章	强流电子束的传输与聚焦	194
5.1	强流电子束动力学基础	194
5.1.1	电子在电磁场中的运动	194
5.1.2	带电粒子束及其基本特征	196
5.2	强流电子束的传输	198
5.2.1	束流产生的场	198
5.2.2	电子运动的轨迹方程	200
5.2.3	电子在螺线管磁场中的传输	201
5.2.4	电子在四极透镜场中的传输	202
5.2.5	电子在交变极性磁场中的传输	205
5.2.6	其它束流传输方法	207
5.2.7	各种传输系统传输效果的比较	208
5.3	束质心螺旋模运动	208
5.3.1	束质心螺旋模运动产生的机理	208
5.3.2	束质心螺旋模运动对束流运动的影响	211
5.4	束流不稳定性	215
5.4.1	束崩溃不稳定性	215
5.4.2	横向阻性壁不稳定性	219
5.4.3	镜像位移不稳定性	221
5.4.4	束包络半径的振荡	222