

帶電粒子束

[美] 小斯坦利·漢弗萊斯 著

原子能出版社

带电粒子束

[美] 小斯坦利·汉弗莱斯 著
赵夔 耿荣礼 杨志涛 等译

王传英 审校

原子能出版社

图字:01-96-0934号

图书在版编目(CIP)数据

带电粒子束/[美]小斯坦利·汉弗莱斯(Stanley Humphries, Jr.)著;赵夔等译. —北京:原子能出版社,1999.5

书名原文:CHARGED PARTICLE BEAMS

ISBN 7-5022-1497-6

I. 带… II. ①汉… ②赵… III. 带电粒子-粒子束 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 05784 号

内 容 简 介

本书是关于带电粒子束物理的最新论著。全书可分为两个部分:前面六章讲述带电粒子动力学和束流光学的基础理论;后面九章则通过前面所建立的物理模型,广泛讨论了一些实际应用中与带电粒子束相关的问题,比如电子(离子)枪、高功率电子(离子)二极管、束流传输、中性化、等离子体中的电子束、横向和纵向不稳定性,以及电子束所产生的电磁辐射等内容。

本书可用作束流和加速器专业的研究生教材,也可供该领域的科研工作者参考。

Charged Particle Beams

Stanley Humphries, Jr.

Copyright ©1990 by John Wiley & Sons, Inc.

All right reserved.

Authorized translation from English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

带电粒子束

原子能出版社出版 发行

社址:北京市海淀区阜成路43号 邮政编码:100037

中国文联印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092 mm 1/16 印张:28.5 字数:730千字

1999年5月北京第1版 1999年5月北京第1次印刷

定价:88.00元

中文版序

近半个多世纪来带电粒子束物理与技术有了长足的发展,以此为基础的种种设备和装置,诸如各种微波管、电子显微镜、质谱仪、粒子加速器、离子注入机、自由电子激光以及受控核聚变装置等等,比比皆是,在现代工业、农业、医学和国防中日益发挥着重要的作用。相应地,带电粒子束物理也逐渐地形成了一门独立的学科,并且在当今科学技术中占有着日益重要的地位。这些年来,我国致力于粒子束研究的专家学者日益增多,他们在该领域中做了大量的工作,取得了一系列有意义的成果。大家都希望有一本反映带电粒子束最新成就的综合性的教材或参考书。

1977年,英国卢瑟福实验室的J. D. Lawson完成了这一学科的第一本经典性的著作《带电粒子束物理》,迄今已有22个年头了。这些年来,束流物理与技术上取得了前所未有的进展,特别是在高功率、高亮度束方面。本书译自美国洛斯阿拉莫斯实验室Stanley Humphries, Jr. 1990年著的《Charged Particle Beams》,它论述了带电粒子束产生和传输的物理机制和基本规律,以及它在一些器件和装置中的应用。本书最大的特点是在选材新颖,无论是在原理上还是技术上都给人一种耳目一新的感觉。它并非对各有关方面都花费同等笔墨,而是着重探讨一些难点和热点问题,包括随机冷却、高亮度注入器和自由电子激光,等等。对一般读者较为熟悉的原理则略作交待或者站在一个新的高度去评述。同时本书十分强调物理概念,没有繁琐的公式推导,力图使读者有一个清晰的图像。在行文上,则力求深入浅出,没有晦涩的文字。

北京大学重离子物理研究所射频超导加速技术组的同志在开展高亮度电子束源研制的同时完成了该书的翻译工作。我相信它将对束流和加速器领域的科研人员、教学工作者和学生有所裨益。

陈佳洱

1999年5月15日

参加翻译工作人员

赵 夔	耿荣礼	杨志涛
郝建奎	张云弛	孙银娥
陈 昱	杨 希	唐渝兴
张保澄	王莉芳	

前 言

《带电粒子束》一书,是我在新墨西哥大学和洛斯阿拉莫斯国家实验室工作期间关于加速器技术和束流物理学连续两个学期的教学成果。用于两个学期的教材正好分成了两部分内容:带电单粒子动力学和大量粒子的描述——束流集团行为的描述。我的第一部著作《带电粒子加速原理》涉及了关于单粒子的诸如线性传输矩阵和加速器运行之类的内容。这部新书是对带电粒子束物理学的介绍。

撰写《带电粒子束》一书的目的是要为广大读者,包括加速器的设计者、加速器的使用者、工程技术人员和物理学家提供一部有价值的、比较系统的著作。我在组织材料时尽量使本书能够为初学者提供理解专著所需的背景知识并使他们能够有效地使用加速器。本书可作为一本独立的参考书。将《带电粒子束》与《带电粒子加速原理》结合起来为整个粒子加速领域提供了系统的介绍。

我原来是从事等离子体物理学研究的,十年前才开始涉足粒子束领域。学术上的改行很难,我必须收集有关资料,向专家请教并寻找和浏览已取得的研究成果。虽然在一些专门领域里不乏优秀专著,但尚没有一本论述高功率加速器和高亮度粒子束的专著。我遇到的困难促使我撰写这本《带电粒子束》。本书简明地介绍了现代粒子束在如随机冷却、高亮度注入器和自由电子激光等应用方面的基本概念。

撰写本书的另一动机是与读者分享我在集团物理学应用方面的洞察力。我相信学生在学习集团粒子行为时肯定会遇到特别难的问题。在教授物理学和工程学的其他领域时,学生可以获得解题的明确步骤。然而,集团物理学几乎没有精确解或者现成的解法。由于涉及大量相互作用的粒子,其复杂性使得集团物理学成为一门运用近似方法的科学。一个问题的正确回答更多依靠设定方程时对问题的深入了解并进行简化而不是依靠某种巧妙的数学方法。这种抓住基本物理概念放弃枝节问题的能力只能来自多年的实践经验。本书可以帮助学生较快地获得这种能力。书中清楚地罗列出物理模型的近似解法及采用的原因。本书的重点在于说明如何建立物理模型,并以最快的方法解决问题,通常是数值计算。由于个人电脑的普及,我认为强调数值计算是进行物理研究的新途径。学生和实验人员可应用数学软件迅速解决理论问题,而过去需要大量的精心推导。

粒子束物理学内容广泛,一本书不可能包含它的各个方面。一本理想的书从不可能完成因许多潜在有价值的内容以讲义形式被无限期搁置,等待做“最后”补充。对本书由此而有一定限制,我甚表歉意。本书基本上是一本教材,着重阐述粒子束的物理内容。它既不是粒子束物理学的发展史,也不是现代文献的详细回顾。参考书引述不多。如果有充裕的时间和篇幅,我愿将所有学者对本学科的贡献编写在书里。作为一种自责的表示,我个人著述的引用也未注明。但是在书尾列出了有利于进一步研究的书目。

撰写一部概论式的书籍最难之处在于选题。我的选题标准是那些能够说明束流物理学应用的内容,这就不可避免地倾向于我个人和我工作过的实验室所研究过的课题。我知道很多读

者会感到我在书中漏掉了一些重要内容。对此,我准备了下面的补救方法:如果读者认为他们比较重要的研究课题应包括在本书里,只要(1)他们工作单位附近有至少 500 米长的高低起伏的步行小路,(2)这个单位在会议上可提供精美的小甜点,那么我就建议他们邀请我去做深入的讨论。如果这些全能办到,我保证他们的选题将会出现在本书将来的版本中。

我感到幸运的是在撰写本书时获得了大量直接或间接的帮助。在洛斯阿拉莫斯国家实验室工作的 Richard Cooper 对本书作出了巨大贡献。他以非凡的才能,通校了全书。除了大量的修订外,他对本书技术要点和重点的建议也是无法估价的。

我在新墨西哥大学电子和计算机工程系工作期间,利用休假开始了本书的部分选题工作。该校化学原子工程系前任系主任 David Woodall 建议开设加速器课程;在开设这门课程过程中他给予了支持,我表示感谢。在 R. Bruce Miller 关于高功率束流开拓性的著作和 John Lawson 关于现代束流物理学经典著作的鼓舞下,我决定按讲课内容撰写本书。

一些人对本书的某些章节提供了专业性的建议,他们是:海军研究部的 Charles Roberson,圣地亚国家实验室的 Kevin O'Brien,国际物理学会的 John Greedon,空军武器实验室的 Brendan Godfrey,劳伦斯伯克利实验室的 Edward Lee,斯坦福线性加速器中心的 William Herrmannsfeldt 和洛斯阿拉莫斯实验室的 Carl Ekdahl。我还要感谢费米国家加速器实验室的 A. V. Tollestrup,他慷慨地允许我评论他与 G. Dugan 合写的关于“初级随机冷却”的文章。

我也感谢那些在新墨西哥大学和洛斯阿拉莫斯研究生院听我讲授粒子束物理学的学生。他们为了弄清大量的难题,阅读我的手稿和理解我不太高明的演讲付出了艰辛的劳动,这使我在数年间不断修正和增加了课程内容。自开设这一门课程起,我一直得到洛斯阿拉莫斯国家实验室的支持。我要感谢加速器技术部的 Robert Jameson 和 Alan Wadinger 的鼓励。新墨西哥大学的公共电视中心的大力协助使我在洛斯阿拉莫斯的授课得以顺利进行。此外,我还在短期班讲授同一门课。我也感谢 Thomas Roberts 和 Stanley Pruett 曾为我在战略防御指挥部安排了一次这样的讲座。

在一些教科书的作者中间有一种新倾向,那就是对他们在编写教科书时所使用的软件致谢。虽然我觉得购买软件的当时已表示了适当谢意,但是这次我要破例说上几句。本书中几乎所有的数字计算工作都是应用 SCIMATH 软件完成的,该软件是由伯克利研究协会的 Robert Kares 和斯宾特软件公司开发的,对于科学家们,它是一种非常有效的、多用途的工具,值得得到广泛认可。

加速器领域的同行们对本书的内容做出了重要贡献。我曾在劳伦斯伯克利实验室与重离子聚变加速器研究小组共事多年。我感谢该组的 Henry Rutkowski, Thomas Fessenden, Denis Keefe 和 Edward Lee,他们为本书提出了很多建议并给予我在加速器惯性聚变新领域工作的机会。

新墨西哥大学的现代加速器研究得益于海军研究部 Charles Roberson 的长期支持。我的同事 Edl Schamiloglu 在我休假期间代我负责新墨西哥大学高能回旋加速器的 ONR 项目的工作,我对此表示感谢。洛斯阿拉莫斯国家实验室的 CLS-7 和 P-14 小组一直在研究方面给予大学慷慨的资助。Roger Bangerter 以及其后的 Kenneth Riepe 最先在新墨西哥大学制订了真

空等离子体弧源的研究计划,我对他们表示感谢。本书大部分内容得益于与 Carl Ekdahl 在强流束流物理学方面的有益探讨,我感谢他。

在撰写本书期间,我有幸参与了高功率加速器的多项研究工作。这要感谢国际物理协会的 Ralph Genuario 和 George Fraser;脉冲科学学会的 Sidney Putnam;海军研究实验室的 Robert Meger;西屋研究和发展中心的 Martin Nahemow;北星研究公司的 Richard Adler;CH2M-Hill 的 Daniel Sloan, Jaycor 的 Kenneth Moses 和泰坦技术公司的 R. Bruce Miller。

在本书的写作期间,我还参与了两次聚会。一次是由北大西洋公约组织在苏格兰的匹特罗切里召开的关于高亮度束流的研讨会。这次会议已普遍被认为是人类最有成就的大会之一,我对其组织者 Anthony Hyder 表示赞赏。另一次聚会,是我高兴地参加了由 Melvin Month 组织的美国物理协会加速器夏季学校,该校吸引了来自整个电子束应用领域的加速器研究人员,并为全部与会者提供了极好的服务。在此期间,我有幸在费米实验室学院授课。我希望将来在哈佛大学也能有这样的机会。或许这一表白也将会促成来自日内瓦的邀请。

对于每一位教科书的作者,他的家庭成员都会企盼他能回到他们中间。可是我的家庭却无此愿望,这使我在前言的最后一段难于下笔。我的妻子 Sandra, 儿子 Colin 和女儿 Courtney 都忙于各自的事情。两年来对我十分体谅。现在我已写完此书,希望可以和他们有更多的时间在一起。

Stanley Humphries, Jr.

1990年1月于新墨西哥州阿尔伯克基

目 录

1 引言	(1)
1.1 带电粒子束.....	(1)
1.2 方法与编排.....	(4)
1.3 单粒子动力学.....	(6)
2 带电粒子束的相空间描述	(13)
2.1 相空间中粒子的轨迹.....	(14)
2.2 分布函数.....	(17)
2.3 束流产生的力作用下的粒子轨道的数值计算.....	(19)
2.4 相空间体积守恒.....	(22)
2.5 密度和平均速度.....	(27)
2.6 麦克斯韦分布.....	(28)
2.7 无碰撞玻耳兹曼方程.....	(30)
2.8 电荷和电流密度.....	(33)
2.9 计算机拟合.....	(35)
2.10 矩方程.....	(37)
2.11 无碰撞分布中的压力.....	(41)
2.12 相对论性粒子分布.....	(44)
3 束流发射度——导论	(46)
3.1 层流束与非层流束.....	(46)
3.2 发射度.....	(49)
3.3 发射度测量.....	(53)
3.4 耦合束的分布、纵向发射度、归一化发射度和亮度.....	(58)
3.5 发射度力.....	(61)
3.6 漂移区中的非层流束.....	(62)
3.7 线性聚焦系统中的非层流束.....	(64)
3.8 非层流束的压缩和扩展.....	(71)
4 束流发射度——深入讨论	(75)
4.1 椭圆分布的线性变换.....	(75)
4.2 由粒子轨道理论得出传输参量.....	(82)
4.3 束流匹配.....	(85)
4.4 非线性聚焦系统.....	(88)
4.5 储存环中的发射度.....	(94)
4.6 束流冷却.....	(98)
5 束流产生的力——导论	(106)
5.1 束流的电磁场.....	(106)
5.2 非相对论性粒子的一维蔡尔德定律.....	(110)
5.3 磁约束电子束的纵向传输极限.....	(114)

5.4	漂移束在空间电荷作用下的发散效应	(118)
5.5	相对论性束流的横向力	(122)
6	束流产生的力——深入讨论	(127)
6.1	具有初始注入能量时的空间电荷限制流	(127)
6.2	热阴极的空间电荷限制流	(128)
6.3	球形电极的空间电荷限制流	(131)
6.4	双向流	(134)
6.5	相对论性电子的空间电荷限制流	(136)
6.6	一维自洽平衡	(138)
6.7	KV 分布	(143)
7	电子枪和离子枪	(147)
7.1	皮尔斯设计法	(147)
7.2	中等导流系数的枪	(151)
7.3	高导流系数枪和射线跟踪程序	(153)
7.4	强流电子源	(156)
7.5	自由等离子体边界上的离子引出	(160)
7.6	等离子体离子源	(165)
7.7	栅控等离子体的带电粒子引出	(172)
7.8	离子引出电极	(177)
8	高功率电子、离子二极管	(180)
8.1	正交电磁场中电子的运动	(180)
8.2	箍缩电子束二极管	(184)
8.3	外加强磁场的电子二极管	(189)
8.4	高功率传输线的磁隔离	(191)
8.5	等离子体腐蚀	(194)
8.6	反射式三极管	(198)
8.7	低阻反射式三极管	(201)
8.8	磁隔离离子二极管	(205)
8.9	磁隔离二极管中离子流的增强	(210)
9	考虑空间电荷效应下的傍轴传输	(214)
9.1	带状束包络方程	(214)
9.2	傍轴射线方程	(217)
9.3	四极透镜阵列中的包络方程	(220)
9.4	傍轴束的限制电流	(222)
9.5	多束离子传输	(226)
9.6	射频加速器和感应直线加速器中的纵向空间电荷限制	(229)
10	强流电子束在真空中的输运	(234)
10.1	穿过磁会切的电子运动	(234)
10.2	来自浸没式阴极的束流传输	(237)
10.3	圆柱状电子束的布里渊平衡	(240)

10.4	电子与物质的相互作用	(243)
10.5	相对论性电子束的箔片聚焦	(247)
10.6	管道中束流的管壁电荷和返回电流	(253)
10.7	螺线管磁场中电子束的漂移	(257)
10.8	用螺线管磁场引导电子束	(259)
10.9	磁会切中的电子束流传输	(264)
11	离子束中性化	(270)
11.1	随动电子中性化	(270)
11.2	横向中性化	(275)
11.3	真空条件下的电流中性化	(278)
11.4	中性化离子束的聚焦限制	(280)
11.5	中性化离子束的加速和传输	(284)
12	等离子体中的电子束	(288)
12.1	平衡态等离子体中的空间电荷中性化	(288)
12.2	非磁化等离子体的振荡	(290)
12.3	中性化电子束的振荡	(294)
12.4	等离子体中脉冲电子束的注入	(297)
12.5	磁趋肤深度	(305)
12.6	有阻等离子体中的返回流	(308)
12.7	中性化电子束的极限流	(312)
12.8	贝内特平衡	(315)
12.9	在低密度等离子体和弱电离气体中的传播	(317)
13	横向不稳定性	(321)
13.1	周期性聚焦系统中受空间电荷支配的束流的不稳定性	(322)
13.2	施加于丝状束流上的自由振荡波	(331)
13.3	摩擦力和相位混和	(334)
13.4	横向谐振模式	(338)
13.5	束流崩溃不稳定性	(343)
13.6	横向阻性壁不稳定性	(348)
13.7	离子聚焦的电子束的软管不稳定性	(351)
13.8	阻性软管不稳定性	(355)
13.9	中性化的电子束的细丝化不稳定性	(360)
14	纵向不稳定性	(366)
14.1	双流不稳定性	(366)
14.2	束流产生的输向电场	(373)
14.3	负质量不稳定性	(378)
14.4	纵向阻性壁不稳定性	(382)
15	利用电子束产生电磁辐射	(391)
15.1	反向二极管	(392)
15.2	用电子束驱动谐振腔	(398)

15.3	纵向束流聚焦.....	(405)
15.4	速调管.....	(410)
15.5	行波管.....	(416)
15.6	磁控管.....	(421)
15.7	自由电子激光原理.....	(427)
15.8	自由电子激光中的相位动力学.....	(431)
	参考文献	(437)
	名词对照	(441)

1 引言

1.1 带电粒子束

带电粒子束是指具有大致相同的动能并在几乎相同的方向上运动的一群粒子。这群粒子的动能高于它们在常温下的热能。束流中带电粒子的高动能以及极好的方向性使其有应用价值。虽然我们常常将加速器仅与高能物理的大型设备联系起来,但是带电粒子束在其他许多研究与技术领域的应用却是一直处于不断的扩展中。近期活跃的方面包括平面阴极射线管、同步辐射光源、微电路的束流印刷术、薄膜技术、短寿命医学同位素的生产、食物的辐照加工以及自由电子激光。

加速器在研究及工业领域中的重要应用往往掩盖了束流物理学作为一门科学的本身的内涵。带电粒子束理论不仅仅是实验装置的设计工具——它也是经典物理学最丰富多彩、最有活力的领域之一。通过对带电粒子束流的研究,我们将会对实用电磁学和集团物理学有一个全面的理解。

尽管束流物理学有着重要的实用价值与内在的完整性,但是这一领域尚未像等离子体物理学一样获得有力的身份。虽然这方面已经有了许多的论文和著作,但是却几乎没有一本书覆盖了束流物理学的整个领域。造成这种残缺不全局面的原因有很多。加速器科学家大都为眼前的目标驱动,集中精力解决手头的理论和技术问题。每个大加速器都有自己的任务和一群科学家。由于所用的束流参数范围很大,不同的加速器所采用的技术也很少相同。尽管技术上差别很大,我们也应当看到有一些基本原则隐藏于所有的加速器和束流传输系统的设计之中。随着加速器的问题越来越具有挑战性,而且束流的应用也更加趋于复杂,加速器科学家们就越来越有必要交流他们的见识和经验。近些年,科学家们已经作了努力来增强他们之间的联系以及强调这个领域的一致性。在美国的例子有:召开粒子加速器会议,它的成员不断增多,这些成员来自所有加速器研究领域;举办美国粒子加速器学校及出版了粒育刊物;新近成立了美国物理学会加速器物理分会。

本书为那些刚进入加速器科学领域的学生提供指导,并且为研究人员提供广泛的参考材料。本书在导论这一层次对束流物理学做了统一的处理。这本书与早先的一本《带电粒子加速原理》为学生们进入加速器科学和束流理论领域中的高级研究工作提供了一座桥梁。《带电粒子加速原理》对单粒子动力学基础进行了总结,叙述了加速器从小的弱流装置直到高能和高功率研究中的最为庞大的机器是如何工作的。本书则集中探讨束流物理学、大量带电粒子的加速和控制的问题,它所涉及的范围是相当广泛的,并为各种类型加速器的设计者和用户都提供了参考材料。

这一节我们从总结带电粒子和粒子束的性质开始。1.2节讨论了集团物理学中的一些问题,并概述了本书的编排。1.3节总结了《带电粒子加速原理》中对许多推导运算有用的理论结果。束流物理学的目标就是描述束流中的大量粒子之间的相互作用。出于这个原因我们不必考虑带电粒子的内部结构。通常把一个粒子表示为具有电量 q 、静止质量 m_0 的一个点实体就足够了,并假设在加速和传输过程中粒子的特性是不变的。本书中,我们将忽略粒子尺度以及像自旋这样的量子性质所带来的影响,除了特殊情形,这些性质对于束流的形成与加速几乎没有影响。

本书中的绝大多数内容都适用于任何带电粒子,如从高能物理研究中的基本粒子到超高速运动的带电群束。常见的应用只涉及到两种粒子之一:电子或离子。电子是具有如下特征的基本粒子:

$$\begin{aligned} q_e &= -e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ m_e &= 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.1)$$

本书中除了作为单一粒子能量单位的电子伏特以外,我们将全部使用 MKS 单位制。

离子是复合的粒子,正离子是一个失去了一个或几个电子的原子,而负离子,是附加了电子的原子。下列物理量描述离子的性能:

A: 原子质量数,等于原子核中质子与中子数的总和。

Z: 原子序数,等于中性原子中的电子数。

Z*: 离子的电荷态,等于原子失去或增加的电子数。

质子是最简单的离子(它是氢原子失去了唯一的电子后形成的。质子是具有如下特征的基本粒子。

$$\begin{aligned} q_p &= +e = +1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ m_p &= 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned} \quad (1.2)$$

我们把其他离子的电量和质量表示为:

$$q_i = Z^* q_p = Z^* (1.602 \times 10^{-19}) \text{ C} \quad (1.3)$$

$$m_i \approx A m_p = A (1.673 \times 10^{-27}) \text{ kg} \quad (1.4)$$

一个粒子的静止能量等于其静止质量乘以光速的平方,电子的静止能量等于:

$$m_e c^2 = 8.19 \times 10^{-14} \text{ J}$$

当一个粒子的动能接近或超过其静止能量,我们就必须用相对论运动方程来处理。MKS 单位制的能量单位焦耳对于单个带电粒子并不方便,束流物理学中的标准能量单位是电子伏(eV),一个电子伏相当于一个电子或质子通过 1V 的电位差后动能的改变,或写为:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.5)$$

电子静止能量用电子伏表示如下:

$$m_e c^2 = 5.11 \times 10^5 \text{ eV} = 0.511 \text{ MeV} \quad (1.6)$$

当一个电子被 $5.11 \times 10^5 \text{ V}$ 的电位差加速后,其动能等于静止能量。当电子的动能高于 100 keV (10^5 eV) 时,电子是相对论性的,牛顿运动学方程对于低于这个动能的电子束流基本上是准确的。质子的静止质量是电子的 1843 倍——质子的静止能量 $m_p c^2$ 也相应高一些:

$$m_p c^2 = 938 \text{ MeV} \quad (1.7)$$

由于离子具有较高的静止能量,因而我们在许多应用中可以用牛顿动力学解决它的运动问题。

也许单一带电粒子对于某些物理实验可能有用,但对大多数应用讲我们需要的是大量的具有能量的粒子。当下列两个条件成立时,一群粒子流可称为束:

1. 粒子几乎沿同一方向运动;
2. 粒子的动能能散很小。

束是一群有序的带电粒子流。像热等离子体这样无序的粒子群就不是束流。图 1.1 说明了束与等离子体间的差别。它们间的关系类似于激光与电灯之间的关系,激光发出的光子具有很好的方向性与单色性。一群粒子流的有序程度被称为相干性。高水准的相干性对于许多应用是必不可少的,例如,扫描电镜最小的束斑点的尺寸取决于束流中电子的平行度。

有几个物理量用来描述带电粒子束的特性,它们是:(1)粒子种类,(2)平均动能,(3)流强,

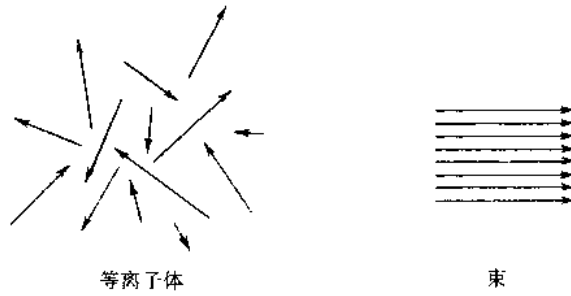


图 1.1 等离子体与束中粒子轨道的比较。箭头表示速度矢量。

(4)功率,(5)脉冲宽度,(6)横向尺度,(7)平行度,(8)能散。实际应用中带电粒子束的参数分布范围很大。表 1.1 给出了束流特性的高限和低限的数值。没有任何其他工程与应用物理领域具有如此宽的参数范围。

表 1.1 应用中的带电粒子束参数

	低 限	高 限	范 围
质 量	$m_e(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$	$238 m_p(4.0 \times 10^{-25} \text{ kg})$	10^6
电 荷	$e(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$	约 100 $e(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$ ^①	10^2
动 能	$\leq 1 \text{ eV}$	10^{12} eV	10^{12}
流 强	10^{-10} A	10^6 A	10^{15}
功 率	$< 1 \text{ W}$	10^{12} W	$> 10^{12}$
脉冲宽度	$< 10^{-10} \text{ s}$	连续	$> 10^{10}$
尺 度	10^{-6} m	$> 1 \text{ m}$	$> 10^6$
发散角度	10^{-6} rad	1 rad	10^6

在常规加速器上,粒子质量的分布从电子到用于核物理和加速器惯性聚变的重离子。铀离子的质量是质子的 238 倍,或者说是电子质量的 440000 倍。在大多数加速器中粒子的电荷态是 $q = \pm e$,重离子加速器是个例外,在这些设备上,高度剥离的离子($Z^* > 50$)可以由中能束流通过薄膜产生,随后,多电荷离子在直线加速器中被加速至很高的动能。

应用中的束流能量分布范围达 12 个数量级大小。在低端,我们会遇到能量低于 1 eV 的电子,这是研究热阴极电子发射时的情形,而高能物理加速器则给出了能量范围的高端,大约为 1 TeV(10^{12} eV)。

在目前的装置中,束流流强的分布范围甚至更宽,约 10^{15} 。离子和电子微探针的流强大约为 $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$,不管束流弱至如何,我们还需使用集团束流理论来测算最小束斑的大小。在另一端,脉冲离子或电子二极管源产生的束流流强超过了 $1 \text{ MA} = 10^6 \text{ A}$ 。

为了描述束流功率特性,我们必须区分平均功率和峰值功率。许多加速器是脉冲循环工作

①原文误作“约 100 $e(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$ 。”——译者注。

的,如用于惯性聚变实验的最高的峰值功率在约 50 ns 的时间内超过 10^{12} W。在低限,某些商用的设备如显像管连续工作功率小于 1 W。连续束加速设备给出了束流脉冲宽度的上限,而谐振加速器可产生极短脉冲链,脉冲持续时间低于 $100 \text{ ps} = 10^{-10} \text{ s}$,这是束流脉冲宽度的下限范围。

如果我们将天体物理的喷射考虑进去,则带电粒子束的最大横向尺寸将是巨大无限的。在一般的应用中,工业用大面积束流辐照源能产生很大的束流,大约有 2 m 直径,而扫描电镜生成的束斑的直径小于 $1 \mu\text{m}$ 。束流内轨道平行度的要求也有一较大的范围。正在为防务应用研制的加速器要求发散角度大约是 $1 \mu\text{rad}$ 。在另一极端,强聚焦电子束的发散角接近 1 rad,其纵向能散可与定向能量相比较。

1.2 方法与编排

束流物理学的中心议题是大量粒子集团问题的解答。粒子的轨道由电场和磁场决定,反过来,场也部分来自束流中的粒子,所以,场的大小取决于所有粒子的位置和速度。如果要准确推断出束流的状态就需要对每个粒子的轨道同时进行计算,这是一项惊人的挑战,即使最弱流强的束流也可能有超过 10^{10} 个粒子。很明显,即使使用最强功能的计算机,求精确解也行不通。

集团物理学是一门近似的科学。解决问题时的判断需要有洞察力和经验,我们必须舍弃不必要的材料而保留实质过程。对于初学者,学习束流物理学可能是困难的,因为没有现成的方法,而所有的计算都需要仔细分析并经简化假设后化简。本书的目的之一是给予学生们解决综合问题的洞察力,为此目的,本书素材的编制考虑如下:

1. 题目的顺序是由简到繁。理想的情形是读者从头到尾顺序学习本书中的内容。前面的章节给出了弄懂像束流不稳定性这样高深题目所必要的背景知识。

2. 对于集团问题,初始的分析和简化与正确的数学方程的解答具有同样的重要性。如果对问题的阐述在物理上是错误的,则最好的数学手段也是徒劳的。所以我们应首先确定问题,仔细列出所有限制条件,然后确定基本方程,再用直接的数学手段求解。

3. 在学习束流物理学的许多高难问题时遇到些挫折往往是由于书中的推导少列了一些步骤。这些对于作者或许是清晰的,然而对于一般读者就是模糊不清了。为了避免这种困难,在不惜有一些重复的情况下,我们应当写下推导的全部过程。

本书是一本人门教科书,它不探讨高深的数学分析方法、束流物理学的历史、或专著中广泛的范围,但附录 1 中的参考文献对于更进一步的学习是一个很好的起点。

第 1~6 章中的内容是后面章节的基础。第 2 章是对集团物理学的一个简要概括,重点讨论了带电粒子束理论。集团物理学建立了有关大量粒子运动的信息知识。不用计算单个粒子的轨道,我们就可以设法判别出它们行为的共性。编制有关粒子信息的最好方法是在相空间中作轨道矢量图。粒子密度在相空间中守恒的理论导致了集团物理学中的基本方程——玻耳兹曼方程。从这里出发,我们推导出了大的束团中描述粒子、动量、能量守恒的矩方程。

《带电粒子加速原理》中对加速器理论的介绍集中在单一粒子轨道或粒子的轨道都是相似的层流上。本书第 3 章中,我们突破这一限制,研究束流中粒子的方向和能量是随机分布的。现实束流的轨道是如此的分散以至于我们在设计加速器时必须考虑非理想束流所带来的问题。第 3 章还定义了发散度,一个表征束流平行度的参量。发散度守恒原理对于加速器和束流光学系统具有广泛的应用。

第 4 章讨论了在小空间电荷力和低流强束流情形下束流发散度的问题。前三节定义了束

流的传输参量并对传输理论作了总结。这个理论对于设计束流传输系统是有用的。4.4节讨论了带电粒子透镜的非理想性以及它们对束流发散度增长的影响。最后两节讨论了在储存环与对撞机中束流发散度的重要性,我们将研究越过相体积守恒原理而在方向和能量上具有低发散性束流的产生方法。

第5章讨论束流激发电磁场的平衡稳定性效应。这一章引入了自洽计算的概念。在这一章里,我们将探索场中束流粒子的运动,而场取决于其他所有粒子的瞬时位置。这种蔡尔德(Child)推导是自洽束流平衡稳定性的原型计算,它导出蔡尔德条件,即对引出束流的流强密度的约束。第6章使用了平衡稳定束流产生场的表达式来计算几个实际情形中的一维束流输运。这一章还引入了KV分布,这是二维平衡态自洽模型的出发点。

第7章和第8章介绍了产生束流的方法,而第9~12章则讨论了束流的传输和加速。第7章涉及了从低流强到中等流强的电子和离子枪。7.1节~7.3节总结了枪的设计技术问题。7.4节讨论了电子源,而7.5节和7.6节讨论了离子源和从等离子体引出离子。最后两节叙述了产生大而积、强流离子束的方法。

第8章专门介绍了产生高功率脉冲电子和离子的二极管源。这些装置利用脉冲功率技术产生极高的流强。8.1节讨论了在正交电磁场中电子的运动,所得结论对于像磁控管这样的常规器件也是有用的。随后的两节讨论脉冲电子束的产生。8.4节和8.5节讨论了二极管技术中的两个重要技术,磁屏蔽和等离子体侵蚀。最后四节讨论了束流密度远远超过蔡尔德的脉冲离子束流的产生方法。

第9章我们开始研究束流传输。这一章讨论了常规加速器空间电荷和发散度对束流的影响。这些装置中的束流是傍轴的,即粒子轨道与轴间夹角很小。9.1节至9.3节推导了在几种聚焦系统中束流的包络方程。这些基于横向力平衡的方程对于束流光学系统是重要的一级设计工具。9.4节运用这些方程定义了加速器中的最大流强。9.5节介绍了一种避开流强极限的方法,即多束流传输。最后一节讨论了由轴向空间电荷力带来的对束流功率的限制。

第10~12章描述了控制高功率电子、离子束的方法。第10章集中讨论在高真空区域中的强流电子束,这些材料对于像微波管这样的应用是有用的。螺旋管透镜对于低能电子束是很有效的,前三节描述了在轴向磁场中电子的运动和线性束流的传输。10.5节描述了用薄膜或网格聚焦相对论性束流的方法。作为背景知识,10.4节总结了电子穿越物质时的散射和能量损失。10.6节推导了束流在周围金属结构中感应的电荷和电流的分布,导出的关系对于随后的束流稳定性计算是很重要的。10.7节~10.9节处理了弯曲传输系统中强流电子束的导向和聚焦问题。

第11章我们把注意力转向强流离子束。中能离子的速度很低,对于同样的流强和能量,离子束的空间电荷效应要比电子束高得多。所以,在真空中传输强流离子束是很困难的。强流离子束必须被中性化,即加入低能电子束以降低束流产生的电场。11.1节至11.3节描述了往离子束中加入电子的方法。11.4节讨论了中性离子束的焦点限制。11.5节介绍了控制和加速强流离子束的方法。

第12章讨论了电子束通过等离子体时的传输。我们将研究等离子体的特性,这些特性影响等离子体对各种脉冲束流的响应。12.1节和12.2节引入了两个基本的等离子体参量,即德拜长度和等离子体频率。12.3节应用等离子体振动理论描述电子束在离子柱中的横向运动。12.4节至12.6节着重于等离子体对脉冲电子束的响应。12.7节至12.9节讨论了等离子体中束流平衡的性质和限制束流流强、传输长度的过程。