



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材

刘祖平 冯光耀 / 编著

束流光学

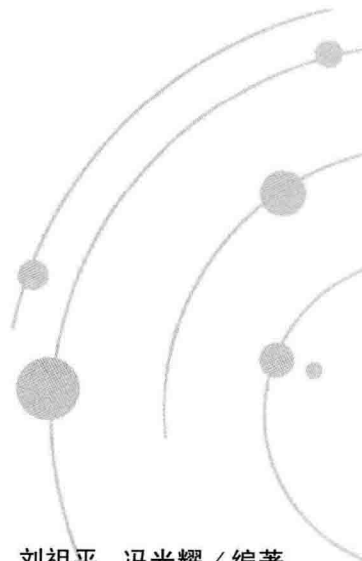
Beam Optics 第2版

中国科学技术大学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材



刘祖平 冯光耀 / 编著

Beam Optics

束流光学

第2版

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书主要研究带电粒子束流的形态及其在电磁场中的运动规律,侧重点不在于粒子能量的变化,而在于约束粒子的轨迹,使束流在传输中偏转、会聚、发散、成像、成形、实现相空间匹配或满足其他要求。全书分为电子光学和束流传输理论两篇,分别针对电子束器件中的低能电子束和加速器系统中的其他带电粒子束,讲述其运动规律、数学描述手段、主要元器件、组合系统设计计算方法和误差分析方法。本书用作粒子加速器物理专业的教科书,亦可供其他与粒子加速器、电子束器件相关专业的大学本科生或研究生,或者已在相关领域供职而需要进修的人员选读。

图书在版编目(CIP)数据

束流光学/刘祖平,冯光耀编著.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2014.8

(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03520-3

I. 束… II. ①刘… ②冯… III. 束流光学—高等学校—教材 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 167895 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:21.75 字数:419 千

2005 年 10 月第 1 版 2014 年 8 月第 2 版 2014 年 8 月第 2 次印刷

定价:42.00 元

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列.在各方的共同努力下,共组织选题 281 种,经过多轮严格的评审,最后确定 50 种入选精品教材系列.

五十周年校庆精品教材系列于 2008 年 9 月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书 50 种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划.为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持.国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划.

1958 年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所.作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统.同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中.虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变.正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才.

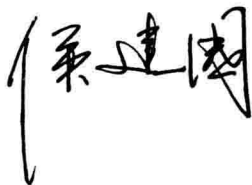
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,这也是她特别成功的原因之一.当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献.建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课.他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养

了一届又一届优秀学生.入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神.

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可.这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校.在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现.

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材.进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神.教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术.

入选的这些精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果.希望该精品教材系列的出版,能对我们继续探索科教紧密结合培养拔尖创新人才,进一步提高教育教学质量有所帮助,为高等教育事业作出我们的贡献.



中国科学技术大学校长
中国科学院院士
第三世界科学院院士

前 言

《束流光学》这本书的名称可能引起初学者的好奇.它研究带电粒子流(称为“束流”)在电磁场中行进时的所谓“横向运动”,例如这一束粒子的轨迹如何(按照设计者的要求)偏转、会聚、发散、“成像”,或者构成某种形态.这些要求与控制光束传输的光学理论相似,所以被比喻为束流的光学(Beam Optics),这个名称一直沿用下来.

“束流光学”是核技术应用学科粒子加速器物理专业的必修课之一,各种与粒子加速器、电子束器件有关的专业的学生,或者已在相关领域供职的人员进修时皆可选读.按作者设想,本书读者是大学本科生或研究生,数理基础较好,学过高等数学、普通物理、理论力学、电动力学和狭义相对论,了解物理基本概念,喜欢物理学的思维逻辑,对物理图像有一定想象力,对束流运动及如何人为加以控制有较强的好奇心.

如果读者觉得自己大致符合这样的描述,“束流光学”适合你选修,而且对你来说不是一门“难学”的课.你可以把这门课当作电动力学的一道大习题,只是这道题比较有普适性或曾经最常见的部分已经有了前人(其中有些相当出名)的解答.重要的不是记住他们的结论,而是理解、掌握他们研究解决问题的思维方法,并且在你将来的工作中运用;一定程度上,你的运用是这道题的后半部分.

书中列出了不少公式,目的是供你将来用到时查找和参考,不该成为记忆的负担.有的公式已在行文中详细推导,也有的只在公式后给出提示性的“推导要点”,比较喜欢严谨的数学推导过程、甚至非如此不能安心的读者,不妨自行完成推导;而对此不感兴趣的读者不必勉强.因为《束流光学》涵盖电子光学和束流传输理论两部分,涉及面很广也很杂,专业方向已比较明确的读者不必对每一章同等看待,在了解线性运动方程、相空间、传输矩阵和束流矩阵等基本概念的基础上,可以“各取所需”.

希望读完本书后,你觉得书中一切结论或断语都是你已有物理知识和数学工具自然而然的延伸,是以你学到的思维方法分析具体问题的结果,无须死记硬背.前人的研究如同种植和培育了一大片硕果累累的园林,作者的任务是陪诸位游园,希望各位读者一面欣赏美景,一面琢磨园艺,乐在其中,如果你在学习中受到启发,将来有机会也在这片果园里栽下你的树苗,那是作者最大的快乐.

自“文革”后恢复研究生学位制度以来,中国科学技术大学为加速器物理专业的研究生开设“束流光学”课,使用教师自编讲义和参考书,没有正规教材.1992年,作者之一刘祖平接受了讲授这门课的任务.刘祖平自己的学业被“文革”打断,没有机会学习这样的专业课,却在称为“科学的春天”的1978年有幸参加我国第一台专用同步辐射光源(电子加速器的一种类型)的设计建造,出于工作需要,在实践中边学习边运用,直到逐渐掌握了包括束流光学在内的一些加速器物理知识,也不得不做一些探索创新;当他有机会讲授这门课时,很想将从多种参考书、国外实验室内报告或其他文献中学到的知识系统化,其中融入自己的工作经验和心得,希望对学生有所裨益.这是编撰本书的缘起和动力来源.另一作者冯光耀是在20世纪90年代选听此课的少数本科生之一,此后从事加速器物理研究工作,并在本世纪初接替刘祖平担任“束流光学”授课教师.本书两名作者的经历说明,只要学用结合,先学后用或边学边用都能达到掌握知识的效果.

总之,《束流光学》从最初的手写稿复印本,到照相排版印刷的讲义,经过十几年教学相长的切磋磨合,渐臻成熟,在2005年10月正式成书出版.

将近十年后,本书作为中国科学技术大学精品教材丛书修订再版.除了纠正第1版的少数瑕疵、规范公式(及译名)写法和修改一些明显过时的表述之外,新增部分主要如下:

上篇“电子光学”,增加第5章5.4节“射频直线加速器中的电子横向运动”.

下篇“束流传输理论”,第9章9.2节关于“腔式加速狭缝”的一段和关于“增强 z_d 随 δ 变化的效果的几种典型结构”的一段重写;9.3节增加对智能搜索算法的简介,补充聚焦元件强度微小偏差引起下游各有关函数增量的公式.

作者多年来工作繁重、时间紧张而水平有限,特别是书中某些讲法出自作者个人心得,有的概念的归纳或公式的推导未必严谨,虽然作者夙夜以思,殚精竭虑,不当之处一定不少.诚恳地希望读者和加速器物理界同仁批评指正.

作者

2014年8月

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
绪论	(1)
0.1 束流光学的研究对象	(1)
0.2 束流横向运动的一些基本概念	(3)
0.3 电子光学与束流传输理论各自的特点	(6)
0.4 束流光学与几何光学的相似性	(7)
0.5 课程内容简介	(13)

上篇 电子光学

第 1 章 电子在轴对称场中的运动	(17)
1.1 轴对称电场和磁场	(17)
1.2 电子在轴对称电场中的运动 · 高斯轨迹方程	(23)
1.3 电子在轴对称电磁场中的运动 · 布许定理	(26)
1.4 横向运动线性方程的解的矩阵形式	(31)
1.5 传输矩阵与相空间、发射度和包络 · 刘维尔定理	(38)
第 2 章 电子透镜	(49)
2.1 电子透镜概述	(49)
2.2 电子透镜的主要参量和传输矩阵、场分布	(51)
2.3 常用静电透镜简介	(62)
2.4 常用磁透镜简介	(77)

2.5 电子透镜应用举例	(91)
第 3 章 有关像差的基本概念	(95)
3.1 像差概述	(95)
3.2 几何像差	(96)
3.3 色差和其他像差	(110)
第 4 章 非轴对称电子光学器件	(116)
4.1 偏转系统	(116)
4.2 四极透镜	(123)
4.3 静电柱面透镜	(133)
第 5 章 宽束、强流及射频加速结构中的电子光学简介	(136)
5.1 宽电子束及其聚焦成像	(136)
5.2 强流中的空间电荷效应	(144)
5.3 强流电子束的成形和维持	(156)
5.4 射频直线加速器中的电子横向运动	(162)
第 6 章 场与轨迹方程的数值解	(182)
6.1 差分法计算场分布	(183)
6.2 有限元法计算场分布	(193)
6.3 实验、测量法确定场分布	(198)
6.4 电子运动轨迹的计算	(204)

下篇 束流传输理论

第 7 章 束流传输理论的主要问题	(211)
7.1 概述	(211)
7.2 曲轴正交坐标系及磁场、轨迹方程表达式	(213)
7.3 多维相空间和传输矩阵	(223)
第 8 章 束流传输元器件和对应的传输矩阵	(233)
8.1 概述及标准运动方程的解	(233)
8.2 四极透镜和其他有恒定横向磁场的直线型元件	(238)

8.3 弯转磁铁及其边缘场	(254)
8.4 色散函数和包络函数	(267)
第 9 章 组合系统设计	(282)
9.1 概述	(282)
9.2 消色散系统及其他与纵向运动有关的组合系统	(292)
9.3 发射度匹配和组合系统设计计算	(308)
第 10 章 误差与非理想场	(321)
10.1 概述	(321)
10.2 线性误差和非理想场	(327)
10.3 非线性效应	(334)

绪 论

0.1 束流光学的研究对象

束流光学(Beam Optics)是研究带电粒子流在电磁场中的运动的理论.

“束流”在本书中指带电粒子流,它是物质的一种特殊形态.一般地说,粒子组成束流,意味着大量粒子在进行基本上整体有序的运动,其与做热运动的粒子群的区别,恰似整齐行进中的军队与市场上的人群的区别.

束流在现代科学技术中应用广泛,遍及基础科学研究的各个分支、工农业生产、医学、国防和人们的日常生活.例如:

- (1) 粒子加速器,原发粒子流和次级粒子流的收集、传输、加速;
- (2) 电子束器件,如显像管、摄像管、示波管等;
- (3) 科学仪器,如电子显微镜、质谱仪、能谱仪、电子探针、离子探针等;
- (4) 微波电真空器件,如行波管、速调管、磁控管等;
- (5) 其他电子束与光的转换,如 X 光管、光电管、夜视管、“条纹相机”、切伦柯夫效应、隧道效应等;
- (6) 重大新技术,如受控热核反应、自由电子激光、等离子体波、各种新加速原理等;
- (7) 束流加工(处理)技术,如电子束打孔、焊接,离子注入、刻蚀,集成电路生产,塑料变性处理,金属表面处理,种子、食品、材料的辐照等;
- (8) 无损探伤手段,用于工业探伤、危禁品检查等;
- (9) 癌症治疗和其他医学诊断、治疗;
- (10) 放射性核素生产,核燃料生产;

(11) 粒子束武器,等等.

以上各种束流应用的机理有同有异,在此不容详述.

束流作为物质运动形态的特殊性,还在于它一般是“人造”的,是“不等待大自然恩赐,而向大自然索取”的好范例,可谓巧夺天工.它是人类在物质结构的深层(或曰微观世界)认识自然、改造自然的重要武器,近代科学的进步、人民福祉的提高皆与束流密不可分.束流的重要性由以下几例可见端倪:从19世纪末伦琴射线石破天惊般地打开了原子内层结构的帷幕开始,粒子流的“轰击”一次次地向我们展示了大自然最深处的奥秘;人们至今津津乐道于第二次世界大战中雷达技术扮演的重要角色,说明粒子流加速器及有关技术已不仅是国家综合国力的象征,也是国防能力的有效成分;电视、集成电路、计算机显示器和各种不断问世的与束流有关的技术产品,正日益成为当代人生活不可一日或缺的伴侣.

束流物理学是近代物理学的一个分支,它研究束流的形态和运动规律,束流与电磁波(包括光)的相互作用和能量转换,束流与物质的相互作用,束流内部粒子之间及与通过环境(所产生的电磁场)的相互作用,束流转换成其他束流或中性粒子流的过程,等等.束流物理学作为独立学科形成仅四五十年,得名的时间更短,其中关于束流运动的部分称“束流动力学”或“粒子动力学”.

束流光学是束流动力学(也是束流物理学)最基本的组成部分,其任务主要是研究如何利用能产生某种电场和/或磁场的器件控制束流的运动,使之按使用者的要求传输.一般而言,其侧重点不在于粒子能量的变化(称为纵向运动),而在于约束粒子的轨迹(称为横向运动),使束流偏转、会聚、发散、成形、成像或满足其他要求.

束流光学称为“光学”是历史形成的,其原因主要是人们对束流运动的要求与设计光学系统时对光束的要求相似.“电磁透镜”、“色散”等名词的来源也在于此.后面将专门谈及束流运动规律与光的传播规律的相似性.

束流光学的基础是经典理论力学、电动力学和狭义相对论,常用的数学工具包括微积分、微分方程求解、线性代数方法(在线性近似下描述粒子运动和状态的分布)、复变函数论和数学物理方程(描述场).

“束流光学”课程对粒子加速器专业的学生非常重要,对其他用到束流物理学基本知识的学生也十分有益.其目的是使学生能够从事与束流有关的学科的教学、科研、设计、生产、运行等工作,为学生在这些领域中运用和发展束流动力学理论打下良好的基础.

本课程讲课的重点是基本概念,而非知识罗列;是物理图像,而非数学推导;是一般规律,而非具体的元器件.重在理解和运用,欢迎问题和讨论.

本书分为“电子光学”和“束流传输理论”两部分,两者之间的关系将在后面介绍.主要参考书是东南大学赵国骏主编的《电子光学》和中国科学院高能物理研究所魏开煜著的《带电束流传输理论》,撰写过程中还参考了中国科学技术大学王馥华编写的《束流光学》讲义,相当一部分论点来自作者本人多年从事加速器物理工作的心得.

0.2 束流横向运动的一些基本概念

束流运动是一群状态大体相同(或曰十分相似)的粒子的运动.

单个粒子的状态用 3 维实空间的 3 个位置坐标和动量的 3 个分量表示,共 6 个自由度,其“状态”与 6 维“相空间”中的一个点对应.其运动方程是状态随时间 t 的变化关系,基本方程就是洛伦兹公式和位置、动量关系(1 个向量方程相当于 3 个方程;本书中,用黑体字母代表向量,否则为代表其大小的标量):

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = qe(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\mathbf{P} = m\mathbf{v} = m \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

本书采用国际(实用工程)单位制.上述方程中, $\mathbf{P}$ 为动量, $\mathbf{v}$ 为粒子速度, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别是电场强度、磁场强度, e 为单位电荷, m 是粒子质量, q 是粒子的电荷数.以上方程应能求解,故粒子在电磁场中的运动可解,其在任一时刻的状态由电磁场分布和初始状态唯一确定(由此可见,束流动力学的基础是经典理论力学,而非量子力学).

称具有“理想”初始状态的粒子为理想粒子,它处于理想的位置,有理想的动量,故从此走在理想的轨道上……理想粒子的运动规律是简单易知的.如果“不太理想”(也“不太不理想”)呢?注意,作为束流家庭中一员的“任意”粒子,其不理想程度应是有限的或足够小的.

束流物理学的第一基本问题是:与理想粒子稍有差异的粒子如何运动?其运动是否受到足够的约束,或是否稳定?

坐标系是观察、描述粒子运动的表演的“舞台框架”,坐标变量及其变化率的大小是不理想程度的定量表述.

6 维相空间中的一点对应于一个状态. 通过一段距离或若干元件对应于状态的一个单值变换, 6 维相空间可以分解成(或称为“投影”到)较低维数的“子相空间”, 例如只有横向变量的横向相空间. 子相空间可是 4 维、3 维或 2 维的, 也可能是 2 维 $x-y$ 实空间. 如忽略场与“理想场”的不同和电荷相互作用等因素, 理想粒子总是与原点对应, 故原点总还是变换为原点. 相空间的概念和物理图像是本课程的重点之一.

本书中的相空间有两种定义. 其一作者称之为“物理相空间”, 坐标是位移和动量, 如 x, P_x, y, P_y , 其中, P_u 常用 $m_0 c$ 作为形式上的“单位”(m_0 是粒子的静止质量, c 是光速). 其二称为“几何相空间”, 坐标是轨迹的几何参量, 即位移和轨迹斜率, 如 x, x', y, y' , 其中, u 和 u' 的单位一般分别用 mm 和 mrad.

两个横向之间或横向与纵向之间的关联称为耦合. 一定条件下运动可以是无耦合的, 表现为方程可完全分离变量, 此时不同方向的变量彼此无关.

横向与纵向间有耦合发生时, 可能使纵向动量 P_z 因横向位置不同而不同; 也可能因能量(或相对动量 δ) 不同而使横向轨迹有异, 或曰散开, 即所谓“色散”, 得名于光子能量与颜色的关系和异色光通过媒质时有色散现象. 束流传输一般有色散.

束流是一群粒子, 在相空间中对应于许多点的集合. 研究其中心(质心), 可得中心轨迹或平均轨迹. 更重要的是此集合的集体性质, 如相空间中的分布范围、边界、密度和体积. 有关物理量有: 横向尺寸(u 的分布, 最大尺寸又名包络)、包络的变化趋势、发散角(u' 的分布)、发射度(指相空间中的体积或面积, 综合了 u 和 u' 的分布)、边界曲面、密度分布等. 这些量描述了粒子群作为一个集体的横向不理想程度.

纵向的相应量则有: 中心动量、动量分散(能散)、束团长度、纵向密度分布等.

本课程要用到若干束流物理的常用假设. 列举如下:

- (1) 小量假设. 认为不理想程度的标志如 u, u' 和 δ 是小量, 其高次幂可忽略.
- (2) 单粒子假设. 认为粒子相互间、束流与环境间的作用远小于外加场的作用, 予以忽略. 粒子的行为如同它是单个粒子, 束流中其他粒子仿佛并不存在.
- (3) 理想场假设. 忽略外加场的“缺陷”, 将电磁场作利于数学处理的简化. 例如, 轴对称假设和区间常数假设. 后者设场的参量在元件的有效区间内为常数, 而在其边界上跃变.

有时某些常被忽略的因素不可忽略, 则借助下述假设处理之.

- (4) 微扰假设. 将该因素视为小量, 求原得之解在其“微扰”下的不太大的、与该因素大致成比例(线性)的变化.

(5) 冲量假设. 将该因素视为短时间或短距离内起作用的“冲量”, 能改变粒子的动量使之跃变而不改变其位置, 故轨迹有折转, 但保持连续.

这些假设如皆成立,运动方程一般只包含变量(及其一阶、二阶导数)的一次项,故为线性方程;不同变量的方程常可以分离,即为无耦合的单变量方程;方程的常数项为 0 (对于理想场、单粒子,各变量恒为 0 是对应于理想粒子的解),即为齐次方程.这种单变量的齐次线性二阶微分方程可称为粒子运动的基本方程.

深入的分析常引入与此相异的情形:高阶项的影响产生非线性效应,又叫“像差”或“畸变”;场不尽理想时常数项不为 0,对应于中心轨迹畸变;存在耦合时不同变量相关;束流较强时,其他粒子的存在不可忽略,其作用称为“空间电荷效应”……皆为学人深入研究的课题,也是束流光学“的前沿”所在,本课程仅做简介。重点是粒子轨迹的基本方程。

本节概括了本课程的主要基本概念,下文还要详述.

0.3 电子光学与束流传输理论各自的特点

本课程分为电子光学与束流传输理论两个部分,其特点分列于下:

电子光学——

- (1) 历史上首先形成学科。
- (2) 基本上只针对电子(修改后其原则亦可用于其他粒子)。
- (3) 主要处理低能束流。
- (4) 侧重束流的聚焦、成像、成形。
- (5) 电子一般也被加速,其动量不是常数。
- (6) 多用纵向聚焦元件(电磁场主方向在 z 向),如电子透镜,场呈轴对称。
- (7) 不同元件的场常互相渗透,故“不可分离”。
- (8) 主要用柱坐标系。
- (9) 相对论效应多不明显,常用非相对论性公式,必要时再修正。
- (10) 是低能电子束器件原理的基础。

束流传输理论——

- (1) 逐渐从加速器物理中分离出来,与束流物理其他分支关系更密切.
- (2) 面向所有带电粒子.

- (3) 处理各种能量的束流,本课程以中高能为主.
- (4) 满足束流传输中的各种要求:控制束截面大小、消除或产生色散、相空间匹配等.
- (5) 粒子能量一般不变,其动量是常数.
- (6) 多用横向聚焦元件(电磁场与 z 轴垂直),如四极透镜,非轴对称场为主.
- (7) 元件常可分段处理.
- (8) 基本用直角坐标系或曲线正交坐标系.
- (9) 相对论性程度相差很大,往往不可忽略.用相对论性公式,不必要时自然简化.
- (10) 是各种加速器、束流加工设备,尤其复杂系统设计和运行的重要依据之一.

两者的共性首先在于所关注的主要是粒子的横向运动,它们的轨迹和束流的横截面(包络).显然二者不能断然分开,与束流动力学的其他分支亦易互相重叠.

本课程的原则是:基本不谈加速过程及加速原理;少谈纵向运动,不谈纵向振荡(以区别于“加速器原理”课程).认为粒子运动是“一去不复返”的,而非“周而复始”的,粒子“记得过去”、“看不到未来”;重视初始条件;不重视横向振荡,不谈“闭合解”与稳定性(以区别于“储存环物理”课程).

0.4 束流光学与几何光学的相似性

今天的人们熟知粒子束和光波皆具有波粒二象性,此标题已非惊人之语.

之所以只提几何光学,是因为带电粒子的德布罗意波长一般很短,不易发生衍射、干涉等波动光学现象.顺便在此说明:

粒子的德布罗意波长

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{\beta\gamma m_0 c}$$

其中,电子的康普顿波长 $\frac{h}{m_0 c} \approx 0.0024 \text{ nm}$,低能时 $\beta \approx 0.002 \sqrt{V}$ (单位用 V), $\gamma \approx 1$,

故低能电子束的波长 $\lambda \approx \frac{1.225}{\sqrt{V}} \text{ nm}$,一般小于 0.1 nm .