

(沪)新登字 202 号

电 子 光 学

华中一 顾昌鑫 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 19.125 字数 537,000

1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—2,000

ISBN 7-309-00930-4/O·111

定价: 6.10 元

目 录

前言

绪论	1
----	---

上篇 电子光学原理和系统

第一章 旋转对称静电场和静磁场	8
§ 1.1 旋转对称静电场	10
一、旋转对称静电场的级数表示法	10
二、旋转对称电场的近轴性质	14
三、旋转对称静电场的力函数(流函数)	18
§ 1.2 旋转对称静磁场	20
一、旋转对称磁场的矢量磁位	20
二、旋转对称磁场的级数表达式	23
三、旋转对称磁场的近轴性质	25
四、旋转对称磁场的标量磁位	26
第二章 静电磁场中带电粒子的运动	29
§ 2.1 电子及其运动的基本概念	29
一、电子的电荷和质量	29
二、罗仑兹力和电子运动方程式	30
三、能量关系式	32
§ 2.2 电子轨迹方程	33
一、直角坐标系中的轨迹方程	34
二、圆柱坐标系中的轨迹方程	36
§ 2.3 旋转对称电磁场中电子近轴轨迹方程	40
一、旋转对称电场中近轴轨迹方程	41

	二、复合场中近轴轨迹方程	43
§ 2.4	旋转对称电磁场的聚焦成像性能	48
	一、旋转对称电场的理想成像	49
	二、复合场中的理想成像	52
§ 2.5	电子光学系统尺寸变换时的轨迹相似性	59
	一、零初速、无磁场、无空间电荷	59
	二、零初速、有磁场、无空间电荷	60
	三、零初速、无磁场、有空间电荷	61
	四、有初速、无磁场、无空间电荷	61
	五、有初速、无磁场、有空间电荷	63
附录 I	最小作用量原理和普遍情况下的电子光学折 射率	64
	一、最小作用量原理	66
	二、普遍情况下的电子光学折射率	68
附录 II	光学方法推导电子轨迹方程	73
附录 III	相对论修正下的普遍轨迹方程	76
第三章	电子透镜	80
§ 3.1	电子透镜的参量及其基本关系式	80
	一、电子透镜的基点	80
	二、朗斯基行列式	84
	三、电子透镜的成像关系式	85
§ 3.2	静电透镜的焦距和主平面位置	90
	一、静电透镜的焦距公式	91
	二、静电透镜的主平面	98
§ 3.3	电子透镜的矩阵表示	101
	一、薄透镜的矩阵表示和薄透镜的组合	101
	二、薄透镜物像关系的矩阵计算	104
	三、厚透镜的矩阵表示	107
§ 3.4	静电透镜的分类和性能分析	108
	一、静电透镜的分类和特征	108
	二、静电透镜的轴上电位和性能分析	115
§ 3.5	磁透镜	138

	一、均匀磁场的聚焦作用——长磁透镜	133
	二、旋转对称磁场的透镜作用	137
	三、短磁透镜	139
	四、磁透镜的场分布	143
	五、钟形磁场中的电子运动轨迹和电子光学参量	146
第四章	电子光学系统的像差	159
§ 4.1	几何像差	160
	一、几何像差的一般数学表示	160
	二、几何像差的复数表示	163
§ 4.2	各种几何像差的定义和相应的图形	167
	一、球差	167
	二、彗形像差	169
	三、像散、场曲和畸变	172
§ 4.3	球差系数 C_s 的计算	178
§ 4.4	色差	183
	一、像位色差	184
	二、放大色差	185
	三、转角色差	186
	四、色差系数 C_c 的计算	186
§ 4.5	空间电荷像差	188
§ 4.6	电场的非旋转对称性产生的像差	195
§ 4.7	电子的波性与衍射像差	197
	一、惠更斯-菲涅尔原理	199
	二、圆孔光阑的夫琅和费衍射和成像系统的分辨率	200
第五章	电子束的偏转	206
§ 5.1	偏转系统的一般要求	206
§ 5.2	静电偏转	208
	一、平行板静电偏转系统	208
	二、倾斜板静电偏转系统	213
	三、多折板静电偏转系统	217
	四、静电偏转板的对称供电	222

	五、静电偏转盒	223
§ 5.3	磁偏转	227
	一、均匀磁场的偏转灵敏度	227
	二、实用的偏转线圈结构	230
§ 5.4	偏转解聚	237
	一、静电偏转的偏转解聚	237
	二、磁偏转的偏转解聚	241
第六章	非旋转对称电子光学系统	247
§ 6.1	柱面透镜	247
§ 6.2	静电四极场透镜	253
	一、静电四极场的构成及其空间电位分布	253
	二、静电四极场中的电子运动轨迹	264
	三、静电四极透镜的焦距	265
	四、电子运动的相对论修正	271
	五、静电四极透镜的应用	272
§ 6.3	磁四极透镜	282
	一、磁四极透镜的构成和空间磁场分布	282
	二、磁四极透镜中带电粒子运动轨迹和焦距、主平面位置	285
	三、带电粒子运动的相对论修正	288
	四、四极透镜对和双聚焦条件	289
	五、周期四极透镜	297
附录 I	转换矩阵的判别式	298
第七章	电子枪	300
§ 7.1	细束电子枪的基本结构	301
§ 7.2	细束电子枪的发射系统	304
	一、发射系统中的电子运动和交叠点的形成	304
	二、交叠点截面的大小	309
	三、交叠点截面的电流密度分布	313
	四、交叠点截面的位置	315
	五、发射系统的特性参量	315
	六、发射系统的替代法设计	324

	七、四极式发射系统	332
§ 7.3	细束电子枪的主聚焦系统(主透镜)	337
	一、静电聚焦电子枪	338
	二、新型的静电透镜	338
	三、磁聚焦电子枪、磁透镜与静电透镜的比较	346
§ 7.4	电子枪发射系统与主聚焦系统的匹配	348
§ 7.5	细束电子枪的新型式	353
	一、层流枪	353
	二、低能枪	356
	三、场发射枪	358
§ 7.6	强流电子枪	360
	一、矩形截面平行电子注的皮尔斯电子枪	364
	二、圆柱形平行电子注的皮尔斯电子枪	368
	三、锥形电子注的皮尔斯电子枪	369
	四、阳极孔的发散效应	375
第八章	电子光学的相空间理论	380
§ 8.1	相空间、系综及刘维定理	380
	一、相空间与系综	380
	二、刘维定理	381
	三、相面积、发射度与接收度	383
§ 8.2	电子光学系统中电子运动的相空间表示	384
	一、线性力作用下的粒子运动的相图	385
	二、四极场透镜中粒子束运动的相空间分析	387
	三、旋转对称电子光学系统的相空间分析	390
§ 8.3	电子束传输的相椭圆变换	394
	一、相椭圆的矩阵方程	394
	二、粒子束传输过程的椭圆变换	395
	三、相椭圆系数矩阵 σ 的物理意义	397
	四、束流的匹配传输	399
§ 8.4	相空间理论与传统电子光学理论比较	401
第九章	电子光学传递函数和像质评价	406
§ 9.1	传递函数的数理基础	407

	一、傅里叶级数	407
	二、傅里叶变换	409
	三、常见函数的傅里叶变换	411
	四、傅里叶变换的若干性质	414
	五、卷积	415
	六、相关	418
§ 9.2	光学传递函数	419
	一、基本概念	420
	二、光学传递函数	422
	三、光学传递函数与光瞳函数的关系	429
§ 9.3	电子光学传递函数与像质评价	432
	一、电子光学传递函数与像质评价	432
	二、电子光学调制传递函数(MTF)的测量	434
第十章	静电电子能量分析器及其电子光学	440
§ 10.1	平板镜式分析器	443
§ 10.2	柱形偏转分析器	445
§ 10.3	球形偏转分析器	449
§ 10.4	筒镜分析器	451
	一、带电粒子的运动方程及轨迹	453
	二、角度像差	456
	三、筒镜分析器的最佳工作参数	458
上篇参考文献	464

下篇 电子光学系统的计算机辅助设计

第十一章	电磁场计算	471
§ 11.1	有限差分法	472
	一、二维拉普拉斯方程和泊松方程的差分格式	472
	二、差分方程求解——迭代法	479
	三、空间电荷密度的计算	483
	四、边界处理	488
	五、有限差分法计算磁场	490

§ 11.2	有限元法	493
	一、有限元法的变分原理基础	494
	二、二维拉普拉斯方程有限元解法	497
	三、二维泊松方程的有限元解法	504
	四、磁场的有限元法计算	506
	五、有限元法与有限差分法的比较	509
§ 11.3	边界元法	509
	一、加权余量表示式的建立	510
	二、边界元法的基本原理	513
	三、边界元方程的数值计算	517
	四、边界元法和有限元法计算框图比较	523
§ 11.4	计算空间电荷场的非交替法	524
附录 I	电子光学中几种常用的数学方法	529
	一、求解线性代数方程组的高斯消去法	529
	二、矩阵作一维表示的消去法	533
	三、矩阵作一维表示的有限元法中的总体合成	538
第十二章	电子轨迹和电子光学参量的计算	542
§ 12.1	运动方程的数值计算	542
	一、降阶法	543
	二、级数展开法	550
	三、小步抛物线法	557
§ 12.2	轨迹方程的数值计算	567
	一、龙格-库塔法	567
	二、纽莫洛夫公式	568
§ 12.3	电子光学参量的计算	571
	一、电子透镜主平面的确定和基点参量的计算	571
	二、像差系数的计算	573
第十三章	电子光学系统的最优化设计	575
§ 13.1	最优化基本原理和方法	576
	一、最优化基本问题	576
	二、最优化问题的基本解法	577
§ 13.2	单纯形法——无约束最优化方法	580

§ 13.3 复合形法——有约束最优化方法	583
一、复合形法迭代	583
二、检验调整可行点方法	585
§ 13.4 单纯形法和复合形法计算实例与结果	586
§ 13.5 鲍威尔法	590
下篇参考文献	590
基本物理常数	599

绪 论

电子光学亦即带电粒子物理学，是研究带电粒子在电场和磁场中运动的规律以及如何利用电场、磁场来控制带电粒子的运动，使之会聚成束、聚焦成像、偏转扫描的一门科学。电子光学形成一门独立的学科，已有五十多年的历史。

由于带电粒子在电、磁场中的运动规律与光在光学媒质中传播的规律存在着一定的相似性，因此历史上沿用了“电子光学”这一名词。但是，在经典电子光学中把带电粒子作为单个粒子(质点)，研究它在保守场中的运动，毕竟还与光作为电磁波在空间的运动尚有相异之处。在本书中，我们并不打算较多地研究两者的异同，而只是着重讨论电子光学本身的基本内容。

一、电子光学的发展简史

现代许多重大科学技术的发展和在现代科学的许多研究领域，几乎都涉及到利用带电粒子束。例如：和国计民生密切相关的、在科学研究中广泛使用的各种电子束器件，在宇宙探索、卫星通讯、导航跟踪中直接应用的微波电真空器件，在基础科学研究中必须具备的各种电子谱仪(电子/离子能谱仪)、质谱分析器和电子显微镜，在近代电子、离子束微加工技术方面，以及在高能粒子加速器和受控热核反应中，都涉及到带电粒子束的形成和聚焦问题。和任何一门自然科学一样，正是在这些不断发展的生产实践和科学实验活动的推动下，要求人们研究如何用电场和磁场来控制带电粒子运动这一基本问题。于是在经典力学、光学和电磁学理论的基础上形成了这一门新的学科——电子光学。因此，电子光学一方面是以基础科学为其理论核心，另一方面又是与生产实践相结合而得到发展的。我们从这两方面来叙述电子光学的发展简

史。

首先,电子光学是建立在电子在电、磁场中的运动规律与光的传播规律相似的基础上的。在十七世纪由费马(Fermat)确定的光传播时光程取最短原理和在1744—1748年莫培督-欧拉(Maupertuis-Euler)建立的在力学中质点运动的最小作用量原理,反映了它们之间的相似性。在数学上,都可表示为相同的形式——变分取极值。1834年,哈密顿(Hamilton)由比较上述两个原理所发现的力学和光学的相似性,得出了这样的结论:运动质点(不连续的客体)与某种波动相联系,而光波(连续客体)则与某种运动质点相联系,从而统一了同一个现象的两个方面,成为建立电子光学的理论前提。对于这种质点和波动之间的联系,在光的量子论和电子的波动学说发现之前的哈密顿时代,是不可能有的深刻的理解的。直到光的量子论的发展和本世纪二十年代(1924年)德布罗意发现电子的波动性后,使人们进一步认识到了电子运动与光波本质上的相似性。根据光的量子论,在一定的条件下,光表现为某种质点(光量子)的运动,它的能量等于 $h\nu$ (h 是普朗克常数, ν 是光的频率)。电子波动学说认为,运动的电子具有某种波动性质,它与波长为 h/mv 的波动过程相联系(m 是电子质量, v 是电子速度)。

在建立电子光学理论体系的进程中,有突出贡献的有:1926—1927年德国布许(Busch)发表了关于磁聚焦的首篇论文,成为电子光学的先导;随后1932—1937年德国格拉曳(Glaser)、谢尔赤(Scherger)等人发表了一系列电子光学理论性论文。这些论文奠定了电子光学的理论基础。

电子光学理论的发展和完善,是和电子光学的实际应用——电子束器件、微波器件、电子显微镜等——的发展相互依赖、相互促进的。

在1859年发现了阴极射线——电子束之后,于1897年制成了第一只电子束管——布劳恩管(Braun管),但它很少有实用价值。以后二十年内,由于没有利用电子透镜,因此没有取得什么重大进展。本世纪二十年代后,人们认识了旋转对称电场和磁场对电子的会聚能力,在由此建立的电子光学的指导下,研制出各种电子透镜,使电子束聚焦的品质迅速改善,从而电子束管有了迅速的发展。在1924年奥斯特罗莫夫

(OCTPOMOB) 研制成了第一个实用的高真空低电压(阳极电压低于1000伏)磁聚焦电子束管,为电子光学的发展准备了条件。到了三十年代,由于无线电技术的发展,需要记录和研究快速无线电波形,促进了示波管的研制。在此期间,为适应电视技术发展的要求,出现了电视发送管(摄像管)和电视接收管(显像管),五十年代后期出现了彩色显像管,进入了所谓电视时代。四十年代,由于第二次世界大战军事上定位技术的需要,促进了定位管(雷达指示管)的深入研究。定位管的研制成功使人们有可能准确方便地确定目标位置。与此同时,出现了可在夜间进行微光观察的像增强器和利用物体热辐射的红外线来观察目标的变像管。在第二次世界大战期间,同样在军事需要的刺激下,研制成功了作为雷达设备基本部件的三种典型的微波管:速调管、行波管和磁控管。同时建立起了电子束与电磁波相互作用的微波管电子学和强流电子光学理论,并逐渐发展为电子光学中的一个独立分支。五十年代和六十年代,由于军事上的竞争和宇宙航行、卫星通讯、导弹控制的需要,使微波管有了迅猛的发展,微波电子学理论也日臻完善。

自从德波罗意发现电子波动性后,使人们认识到了电子波比光波的波长更短,由此可推论出,以电子束为工作物质的电子显微镜可能比光学显微镜获得更高的分辨本领,1933年德国的克诺尔(Knoll)和鲁斯卡(Ruska)制成了世界上第一台电子显微镜。电子显微镜是电子波动学说和经典电子光学理论相结合的辉煌成果。为此,鲁斯卡获得了1986年度诺贝尔物理学奖。

因此,电子束器件的发展,是和电子光学的建立和发展分不开的。但另一方面由于电子束器件的发展,也不断提出对于聚焦和成像质品的新的要求,对电子光学提出了新的课题,促进了理论的发展。例如高像质显示器件和高分辨本领电子显微镜的要求,促进了像差理论的发展。强流电子束的广泛应用,促进了强流电子束聚焦理论的发展。

近十几年来,由于现代科学技术上的研究成果,大型快速电子计算机的出现,为电子光学的发展提供了前所未有的条件。特别是七十年代以来,在蓬勃发展的一门新的科学——表面科学的研究工作中,必需配备一个电子光学系统,以产生细电子束或离子束,来轰击物体表面,

并且需要对物体表面产生的带电粒子进行质量和能谱分析，这就促进了低能和高能细窄电子束和离子束技术的发展，促进了离子光学理论的研究，成了电子光学中一个十分重要的组成部分。

由此可见，电子光学理论上的成就，大大促进了电子束器件的发展，因此电子光学的发展史就是理论和应用、认识和实践相互促进，不断深化的历史。

二、电子光学的研究对象和发展趋势

我们通常所讲的电子光学是指经典的电子光学，它研究带电粒子在电场、磁场中的运动规律。也就是说，是研究与利用带电粒子束在电、磁场中成束、聚焦、偏转及成像的规律，也即粒子电子光学。按照具体的应用范围可分为：

1. 弱流细束电子光学——是电子束管的理论基础，电子束管是它的具体应用。其中的电子光学系统是为了使电子束聚焦成像和偏转，因而起着电子透镜和电子棱镜作用。

2. 强流电子光学——是建立在电子束与电磁场相互作用(进行能量交换)的基础上的微波电子管的理论基础之一。强流电子束的形成和维持，是强流电子光学中的主要研究内容。

3. 高能电子光学——是原子能技术中粒子加速器、电子显微镜和各种电子束加工技术中的研究内容。

4. 谱仪电子离子光学——是表面分析谱仪中的理论基础。

经典电子光学的建立和发展虽然已有了半个多世纪的历史，已经形成了较为完整的理论体系，并且促进了电子束器件的研制和发展，但是就电子光学理论本身而言还不是十分完备的，也还在不断发展之中，目前的研究工作有以下几个方面：

(1) 应用电子计算机对电子光学理论和实用电子光学系统进行研究和设计。在这方面，工作开展得最多的是电子枪。把快速、大容量电子计算机应用于电子光学系统的设计是从六十年代开始的，至七十年代形成了比较成熟的计算方法，这就是所谓计算机辅助设计(CAD)。CAD方法是在已知电子光学系统的几何结构和电参数的边界条件下，

进行电子运动规律的研究和计算,最后算出电子光学性能参量。但是,如何从已知技术指标的要求(电子光学性能参量)出发,自动选择最合理的电极结构和电参数,即自动确定最合理的电子运动情况和能够得到这种电子运动情况的最合理的边界条件——确定电子光学系统的最佳电极结构和电参数,就是所谓电子光学系统的“最优化设计”方法,这是广大电子光学研究工作者长期追求的目标。本校自八十年代初开始在国内最早开展了电子光学系统最优化设计的研究。目前有关这方面的研究已取得了不少进展。

(2) 新的电子透镜的成像原理、结构以及像差理论的研究。为了适应电子束管向细束径(高分辨率)、大密度(高亮度)、高灵敏度、宽频带方向的发展,必须寻找新的电子聚焦成像的原理和结构。目前已成功地将四极矩透镜、多极透镜、强流、层流电子束发射系统、消像差透镜等用于高性能电子枪中。

(3) 电子光学的发展出现了弱流电子光学、强流电子光学和高能电子光学相互渗透、相互结合的趋势。例如,在设计、研制高亮度、细束显示器件的电子光学系统时,利用了建立在强流电子光学上的发射系统与建立在弱流电子光学上的电子透镜的组合;在电子束管中用作新型主透镜的多极透镜,实际上是强流电子光学中用来维持电子束成形的周期聚焦系统的改型;在粒子加速器中则应用了具有相对论校正的高能强流电子光学。这种相互渗透、相互结合现象的发展,必将进一步推动电子光学理论的发展。

(4) 近年来随着所使用的电子束的能量的提高和相干性能的改善,电子在宏观和微观电磁场中的运动呈现出明显的波动性能,从而形成了研究电子波在电磁场中运动性能和规律的分支学科,即“波动电子光学”,使电子光学进入到一个全新的阶段。波动电子光学理论可以阐明电子束的干涉、衍射和成像等物理现象,成为电子显微学和电子衍射物理学的理论基础。相干电子束的成功获得,使电子全息、傅里叶电子光学和电子显微图像处理等研究工作取得了重大进展,成为当前一个十分活跃和有前途的研究领域,使传统电子光学进入到一个新的阶段。

本书主要介绍弱流(细束)电子光学和离子光学方面的内容。弱流电子光学部分将介绍带电粒子在各种对称分布电、磁场中运动的规律,电子束聚焦成像、聚束成形的基本原理,各种电子透镜性能,实用电子光学元件的组合和系统,电子光学的相空间理论和传递函数理论,最后介绍电子光学系统的计算机辅助设计和最优化设计方法。离子光学方面主要介绍用于表面科学研究中的能量分析器的结构和原理。限于篇幅,强流电子光学和波动电子光学方面的内容,只在有关部分稍有涉及,不作详细介绍。

上 篇

电子光学原理和系统

本篇系统地阐述电子光学的基本理论，从讨论各种对称分布的静电场和静磁场的基本性质出发，利用电动力学方法(或基于变分原理的光学方法)导出带电粒子在这些电磁场中运动的轨迹方程，进而阐明近轴电子光学聚焦成像原理和像差分析理论，然后讨论组成电子光学系统的各种实用电子透镜和元件的结构、性能及应用。现代电子光学研究中经常用到的电子运动的相空间分析方法和电子光学传递函数理论，以及电子能谱仪中电子(离子)光学，在本篇中也作了适当的介绍。

第一章 旋转对称静电场和静磁场

解释各种电子光学现象及进行电子光学系统的计算和设计, 首先必须了解电子在电场和磁场中的运动规律。要研究电子在由电子光学系统确定的电、磁场中的运动规律, 首先又必须知道电场、磁场的具体分布。如果知道了静电、磁场的电位分布, 就可以求得电子光学折射率的分布, 从而决定了该系统的电子光学折射性质和聚焦成像性质。一般说来, 电子光学系统中的场分布都具有比较复杂的形式, 是与空间坐标有关的非均匀场。因此, 任何电子光学系统的理论研究和实验工作都必须从确定该系统的场分布入手, 也就是说, 了解和确定电场、磁场的分布, 是研究电子光学系统首先面临的问题。

大家知道, 求电、磁场的场分布问题, 在数学上归结为用电动力学和数学物理方法求解场所满足的偏微分方程的边值问题。但能得出电、磁场的解析解的情况是很有限的, 大多数情况下只能应用各种数值计算方法(借助电子计算机)或实验方法来确定场的分布。

本课程所涉及的场, 假定满足以下条件:

- (1) 所研究的场为静场, 即场与时间无关或随时间变化甚慢, 亦即我们所研究的静场只是空间坐标的函数;
- (2) 在真空中;
- (3) 忽略电子束本身的空间电荷(或电流)分布对场的影响;
- (4) 电子速度远小于光速, 即不必考虑相对论效应。

众所周知, 电磁场理论是以麦克斯韦方程为基础的。真空中静电场和静磁场的麦克斯韦方程组(用 SI 制表示)为:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad (1.0.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_f \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.0.2)$$

其中 \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{D} 是电位移矢量, $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$; \mathbf{B} 是磁感应强度; \mathbf{H}