

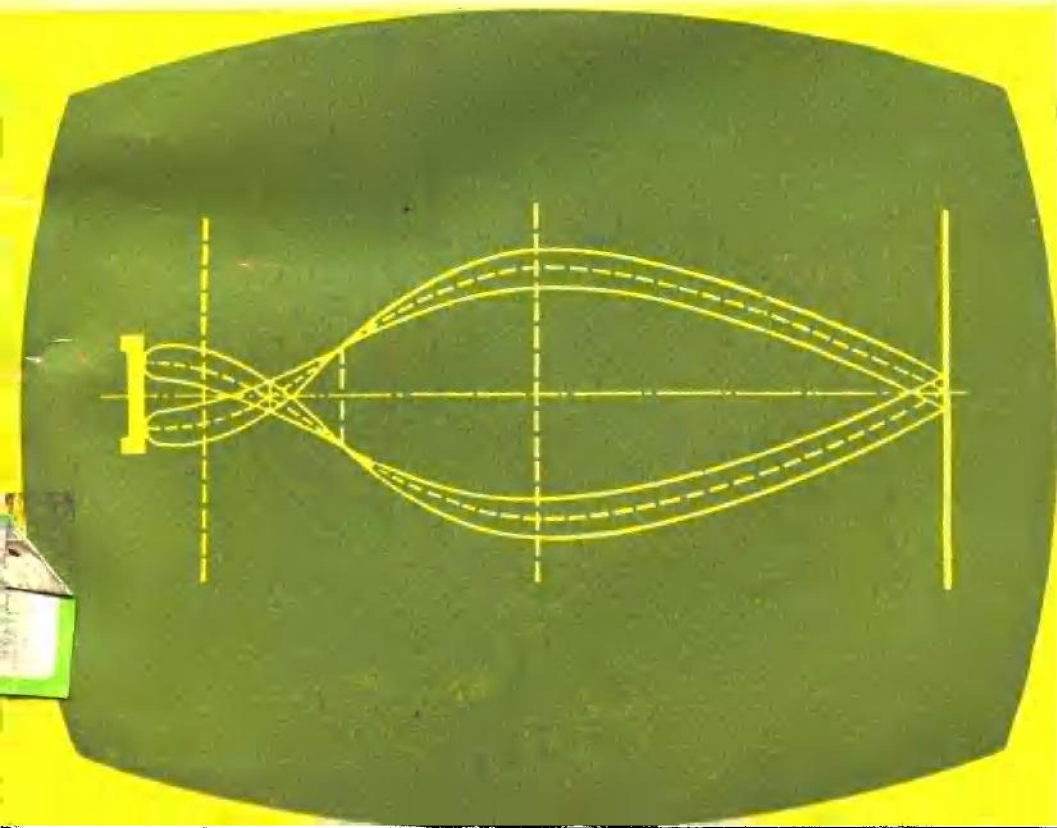
电子束管丛书

电子光学计算机

辅助设计

童林夙 西门纪业

丁守谦 等编著



内 容 简 介

近年来,利用电子计算机设计电子束器件、电子光学仪器装置的方法获得了广泛应用,并且使电子光学设计计算工作有了很大发展。它日益成为科学研究生产设计的强有力的工具。

本书比较全面、系统地阐述了电子光学电磁场、电子轨迹、电子透镜、电磁偏转系统和电子枪的计算机辅助设计方法,详细讨论了上述各种计算问题的计算公式与方法,编制程序的原则和步骤。本书包括电子束器件、电子光学仪器装置中各种计算实例及数据、图表曲线,并包括一些新的研究成果。这些结果是国内有关单位从事实际计算设计工作的经验总结。

本书可作为从事电子束器件及电子光学仪器装置的科研人员和工程技术人员的设计参考书,也可作高等学校有关专业的教师、学生和研究生的教学参考书。

电子束管丛书

电子光学计算机辅助设计

童林凤 西门纪业 丁守谦 等编著

责任编辑 何曼庆 马征宇

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张19¹/₈ 501千字

1990年3月第一版 1990年3月第一次印刷 印数: 0,001—1,165册

ISBN 7-118-00323-9/TN62 定价: 12.40元

编委会名单

主 编：吴祖培

副主编：沈庆垓 陈遥舟

编 委：(以姓氏笔划为序)

王士杰 西门纪业 孙伯尧

张树钧 周生珣 龚兆祺

郑步京 黄东昌 童林夙

序

电子束管也称阴极射线管，是电真空器件中的一大门类。虽然电真空器件中不少门类已全部或局部为固体器件或其它器件所替代，而电子束管由于它具有独特的性能，除个别管种外，还在继续发展。

我国对电子束管的研究开发工作起始于本世纪五十年代，而大量生产则在六十年代初期。其中示波管、雷达指示管、黑白显像管在六十年代初期已大量生产，彩色管、储存管、摄像管的科研工作则要追溯到五十年代的末期。现在彩色管已经大量生产，储存管和摄像管仍处于批量生产阶段。总的来说，我国对电子束管科研开发及大量生产已有三十多年的历史。

为了适应四化的要求，电子工业部中国电子器件工业总公司要求我们将已取得的成就加以理论分析和系统的总结，编写成电子束管丛书，以供从事电子束管的教育工作者，企业、事业和工厂的技术人员和管理人员以及器件应用的工程技术人员参考并作为知识更新之用，也可作为大专院校、中技校学生课本的补充。

我们聘请了有关专家、教授和工程师共同商讨编写丛书的内容，其中包括器件工作的原理，设计的方法，工艺的陈述，器件的应用，然后分别执笔和审稿，现已编写成一套丛书，计

示波管

黑白显像管和显示管

摄像管

彩色显像管

电子光学计算机辅助设计

等五卷，由国防工业出版社陆续出版。

由于编写人员的分散，执笔人员众多而且他们的工作都在课

余或业余进行，因此在逻辑性和系统性上还存在一些问题，希望读者们指正，以便在再版时予以补充和修正。

吴祖垵

前 言

在电子束器件中，电子光学系统的设计在很大程度上决定了器件的性能和参数。但是，电子光学系统的设计十分复杂，因为种类繁多，要求又各不相同，而且在设计中必须考虑一些复杂因素，例如热速度效应、空间电荷效应、像差以及在某些情况下还必须考虑 Boersch 效应等。此外，电子运动方程或轨迹方程实际上是不可能用解析形式解出来的，所以，要设计一个符合要求、性能优良的电子光学系统并非是轻而易举的事。

电子计算机的使用，从根本上改变了过去电子光学系统设计常常采用的模拟法、诺模图和实验逼近法的局面，大大缩短了设计和试制周期，计算的准确程度也是过去用其它方法办不到的。现在已可对电子光学系统进行最优化设计，并根据计算结果提出加工精度要求。在一些电子束器件、仪器和装置设计中，理论和实验之间已能符合一致，计算结果无需做实验验证就可以直接进行加工、试制。因此，目前国外较大工厂生产的电子束器件已几乎全部使用了计算机辅助设计或解算的电子光学系统。我国自 70 年代以来就已开展了计算机辅助设计工作，对一些电子束器件进行计算机计算。本书力求反映国内、外学者特别是国内学者在计算机辅助设计电子束器件、仪器和装置方面的主要工作和成就。为了适应读者各方面的要求，本书对一些基本概念、基本公式和基本方法作了必要的阐述，各章并附有数据、曲线、图表和计算实例以供参考。由于本书着重于从普遍原理出发来分析计算一般的电子光学系统，因此，内容不仅适用于电子束器件的计算机辅助设计，而且对于电子光学仪器、装置等方面的计算机辅助设计也有很大的参考价值。国外目前很少见到有关系统介绍电子光学系统计算机辅助设计的书籍和资料。

本书共分七章。第一章比较详细的介绍了电子光学系统中电场、磁场的一些常用计算方法,并给出一些计算实例。第二章给出了电子轨迹的主要计算方法,并讨论了这些方法的计算精度。第三章讨论了静电透镜、磁透镜和多极透镜的光学性质与参量计算方法,介绍了几种常用的静电透镜和磁透镜,给出了曲线、数据和表格,此外,还介绍了几种多极透镜。第四章比较详细和系统的给出了电子透镜的各种像差系数计算公式,介绍了四极透镜,六极透镜和八极透镜校正像差的原理、计算方法和实例。第五章讨论了电子枪的各种参量和计算方法,从光路设计的角度介绍了发射系统、预聚焦系统、主透镜和漂移空间电子束的计算方法,对电子枪优化等还给出了设计实例。第六章介绍了静电偏转和磁偏转系统的设计计算方法,给出了偏转系统像差系数的计算公式和一些计算实例以供参考。第七章介绍了电子光学系统计算机辅助设计的其它方法。例如电子光学元件和系统的最优化设计、蒙特卡洛法在电子光学系统中的应用等。这些方法在设计微光点电子光学系统时是十分有用的。各章最后都附有参考资料。全书采用国家标准局发布并实施的 GB3100~3102-82 关于《量和单位》的国家标准。但是,为了方便和简洁,第六章中有关磁偏转系统的一些算式采用了特殊的单位,其中,磁感应强度单位为高斯,电流单位为安培,长度单位为毫米等。

全书各章编写分工如下:第一章由北京大学西门纪业负责,参加人员为北京大学刘志雄、陈文雄,复旦大学顾昌鑫;第二章由华东电子管厂张惠聪负责;第三章由南京工学院童林凤负责,参加人员为北京大学西门纪业、陈文雄,南京工学院丘木兰;第四章由北京大学西门纪业负责,参加人员为北京大学晏继文;第五章由南京工学院童林凤负责,参加人员为华东电子管厂张惠聪、南京工学院奚卫国;第六章由南开大学丁守谦负责,参加人员为南京工学院丘木兰;第七章由南京工学院童林凤负责,参加人员为复旦大学顾昌鑫。全书由童林凤负责统编,最后由浙江大学沈庆垓教授审核定稿。

由于宽电子束成像器件和摄像管已有专著出版，读者可参阅沈庆垓编著的《摄像管理论基础》（科学出版社出版）和周立伟编著的《宽束电子光学》（机械工业出版社出版）。本书限于篇幅，未能在内容上反映这方面的成果。由于电子束管玻壳的计算机辅助设计内容已分别编入《电子束管丛书》有关书籍，为了保持一定的系统性和避免不必要的重复，本书也未将这部分内容包括在内。此外，由于参加本书编写工作的单位和人员较多，内容涉及面很广且各具特点，加之近年来国内、外电子光学系统计算机辅助设计工作发展迅速，我们虽然尽可能全面地反映最新成果，力求将各章统编成书，但由于编者学识水平有限，错误之处在所难免，希读者批评指正。

编著者

目 录

绪论

第一章 电子光学场的计算方法	5
§ 1.1 电子光学静电、磁场的基本方程及其边值问题	6
1.1.1 静电、磁场的麦克斯韦方程	6
1.1.2 静电场方程的求解及其唯一性	8
1.1.3 稳恒磁场方程的求解及其唯一性	9
§ 1.2 有限差分法	11
1.2.1 基本原理与五点差分公式	11
1.2.2 逐次超张弛方法	16
1.2.3 一些具体问题	18
1.2.4 轴上电位分布、等位线和场强的计算	20
1.2.5 计算程序与计算实例	23
§ 1.3 三维空间场的计算	26
1.3.1 普遍形式下三维空间场的差分方程	26
1.3.2 直角坐标系中的差分方程和超张弛方法	42
1.3.3 计算程序和实例——示波管盒式透镜中电场的分布	44
§ 1.4 有限单元法	51
1.4.1 基本原理和计算方法	52
1.4.2 有限单元法计算程序编制方法	66
1.4.3 有限单元法计算电场强度和电子轨迹	74
§ 1.5 磁场的计算	81
1.5.1 用磁标位计算磁场分布	82
1.5.2 用磁矢位计算磁场分布	89
1.5.3 用磁矢位计算磁导率变化时的磁场分布	95
§ 1.6 电子光学场的积分计算方法	99
1.6.1 面电荷方法计算静电场	99
1.6.2 面磁荷方法计算静磁场	108
§ 1.7 傅立叶展开方法	117
1.7.1 计算原理和计算公式	117
1.7.2 多极场的边界类型和边界条件	120
1.7.3 逐次超张弛法	124
1.7.4 计算程序和计算实例	127

小结	134
附录 I 变分问题的证明	135
附录 II 有限单元法中刚度矩阵 K 的特点分析	138
附录 III 矩阵作一维表示的消去法	140
参考资料	145
第二章 电子光学轨迹包络的计算方法	147
§ 2.1 电子在电场和磁场中的运动	149
2.1.1 静电场中电子的运动方程	149
2.1.2 静电场中电子的轨迹方程	150
2.1.3 电磁复合场中电子的运动方程	153
§ 2.2 运动方程的求解方法	155
2.2.1 用单步法求解运动方程	155
2.2.2 用多步法求解运动方程	168
2.2.3 几个具体问题的讨论	175
§ 2.3 轨迹方程的求解方法	177
2.3.1 用单步法求解轨迹方程	177
2.3.2 用多步法求解轨迹方程	182
§ 2.4 计算方法的比较	186
参考资料	187
第三章 电子透镜的计算机辅助设计	188
§ 3.1 静电透镜	188
3.1.1 引言	188
3.1.2 静电透镜的参量及其基本关系式	190
3.1.3 静电透镜焦距	193
3.1.4 静电透镜主平面位置	196
3.1.5 多级透镜组合	198
3.1.6 静电透镜的类型	200
§ 3.2 静电透镜的计算机计算	202
3.2.1 静电透镜场分布的确定	203
3.2.2 高斯轨迹的求解	205
3.2.3 静电透镜光学参量的确定	206
§ 3.3 典型的静电透镜的计算结果	208
3.3.1 等径双圆筒透镜的计算	208
3.3.2 不等径双圆筒透镜的计算	215
3.3.3 双膜片透镜的计算	219
3.3.4 三膜片对称单电位透镜的计算	220
3.3.5 具有厚中间电极的对称三膜片单透镜的计算	226

3.3.6	等径三圆筒对称单透镜的计算	231
3.3.7	不等径三圆筒对称单透镜的计算	235
§ 3.4	数据附录	238
§ 3.5	磁透镜	239
3.5.1	磁透镜的定义与概念	240
3.5.2	在非饱和磁透镜内的磁场分布	245
3.5.3	解析场模型	247
3.5.4	磁透镜的旁轴性质	255
3.5.5	磁透镜的设计原则	260
3.5.6	用有限单元法设计的两种磁透镜的实例	268
§ 3.6	多极透镜	276
3.6.1	四极透镜的光学性质及其应用	277
3.6.2	四极透镜光学性质的计算实例	283
	参考资料	285
第四章	电子光学聚焦系统像差的计算	286
§ 4.1	几何像差	287
4.1.1	几何像差的概念和像差系数公式	287
4.1.2	几何像差的散射图形	292
4.1.3	几何像差的计算	295
4.1.4	球差系数的公式法计算实例	305
§ 4.2	色差	306
4.2.1	色差的概念、色差系数公式和散射图形	306
4.2.2	色差的计算	310
§ 4.3	非旋转对称像差	311
4.3.1	椭圆畸变和端面倾斜	311
4.3.2	轴线不同轴	316
§ 4.4	渐近像差的概念	320
4.4.1	渐近像差的概念	320
4.4.2	像差的传递原理	325
§ 4.5	电子光学系统像差的校正	329
4.5.1	八极透镜校正球差	330
4.5.2	八极透镜消像散器	331
4.5.3	四极透镜校正色差	332
4.5.4	四极、六极透镜作为彩色显像管的静态会聚元件	334
	参考资料	336

第五章 电子枪的计算机辅助设计	337
§ 5.1 引言	337
5.1.1 电子枪的工作原理	338
5.1.2 电子枪的主要参量	343
5.1.3 对电子枪的要求	344
5.1.4 电子枪的电子光学系统分析	348
§ 5.2 发射系统的计算	356
5.2.1 阴极电流的调制	356
5.2.2 计算截止电压的经验公式	358
5.2.3 阴极电流的计算	360
5.2.4 空间电荷限制下的发射电流密度	361
5.2.5 考虑热初速分布时的阴极电流	363
5.2.6 电子枪发射特性的近似计算公式	367
5.2.7 发射系统中电子束的计算	368
5.2.8 计算电子束的步骤与曲轴包络方程的求解	375
5.2.9 交叉截面和束张角的计算	380
5.2.10 虚交叉截面的计算	381
§ 5.3 预聚焦透镜场的分析计算及其对束形成区的影响	383
5.3.1 预透镜场分析与参量计算	383
5.3.2 预透镜的膜孔效应及其对束形成区的影响	390
5.3.3 考虑预透镜场渗透以后的束形成区计算	393
§ 5.4 主聚焦透镜的分析与计算	395
5.4.1 A型主聚焦透镜的分析计算	396
5.4.2 与其它结构的单透镜比较	402
§ 5.5 漂移区电子束的计算	407
5.5.1 均匀同心束的扩散	407
5.5.2 电子束器件漂移区中的束扩散	411
§ 5.6 电子枪的优化	412
5.6.1 影响上屏束径大小诸因素分析	412
5.6.2 上屏束径表达式与最佳束张角	414
5.6.3 束形成区与主透镜的匹配, 最佳匹配与电子枪最优设计	418
§ 5.7 显像管电子枪的优化设计方法与设计实例	419
参考资料	425
第六章 电磁偏转系统的计算机辅助设计	426
§ 6.1 静电偏转系统的基本形式	427
§ 6.2 偏转电场的级数展开及场参数的物理概念	430
§ 6.3 静电场的普遍轨迹方程及理想高斯偏转	434

6.3.1	静电场的普遍轨迹方程	434
6.3.2	理想高斯偏转	434
6.3.3	三级偏转像差	437
6.3.4	三级偏转像差系数与光栅图的关系	441
§ 6.4	实际的静电偏转板的设计计算	450
6.4.1	静电偏转后的加速系统	457
6.4.2	偏转后加速系统的计算机计算	460
6.4.3	数据与图表	477
§ 6.5	磁偏转系统的三种基本形式	488
§ 6.6	偏转磁场场参数的解析表达式	489
6.6.1	偏转磁场的级数展开	489
6.6.2	偏转磁场场参数的求法	491
6.6.3	具有某种连续分布时场参数的求法	503
§ 6.7	求场参数的程序设计及框图	509
6.7.1	CDCA FORTRAN 程序说明和框图	509
6.7.2	MFPD 求场参数 FORTRAN 程序说明和框图	510
6.7.3	程序的适用范围	511
§ 6.8	磁偏转三级像差系数	513
6.8.1	电子在磁场中的普遍轨迹方程	513
6.8.2	钟形场的高斯偏转及偏转中心	514
6.8.3	三级像差系数公式	516
6.8.4	自会聚彩色显像管的设计原理	518
§ 6.9	电磁偏转三级像差系数计算机程序的框图	523
§ 6.10	大偏转角时的偏转像差	525
6.10.1	大偏转角偏转磁场的级数展开式	526
6.10.2	钟形场拟合及其各级微商公式	527
6.10.3	H_2 、 H_4 、 V_2 、 V_4 的四点插值公式及其一、二级微商公式	528
6.10.4	轨迹方程的龙格-库塔法求解	529
6.10.5	大偏转角轨迹计算框图	530
	参考资料	532
第七章	电子光学计算机辅助设计的其它方法	534
§ 7.1	电子光学系统的最优化设计	534
7.1.1	单纯形法最优化设计	536
7.1.2	复合形法最优化设计	554
7.1.3	变分方法求最佳的场分布	561
§ 7.2	蒙特卡洛法在电子光学系统中的应用	565
7.2.1	蒙特卡洛法概述	565
7.2.2	计算方法	574
7.2.3	计算实例	582
7.2.4	小结	589
	参考资料	597

绪 论^[1~3]

电子光学已有 50 多年历史了。近 20 年来，由于高性能、高速电子计算机的发展，使得计算机辅助设计、光学传递函数以及透镜最优化等技术被引入电子光学领域中，推动了电子光学向深度和广度发展。随着科学技术和生产实践的进展，特别是材料科学、能源、超大规模集成电路等带头学科的发展以及广播电视的社会需要，使电子光学很快渗透到许多科学技术领域中，例如，无线电电子学、电子显微学、质谱学、表面物理学、材料科学、高能物理学和等离子体物理学等；同时，电子光学这门学科本身也有很大发展。

一、旋转对称弱流细束电子光学

由于电子计算机辅助设计的广泛使用，在计算以下有关电子光学系统设计的问题时取得了很大进展。

- (1) 电场和磁场的计算；
- (2) 在考虑和不考虑空间电荷情况下电子轨迹的计算；
- (3) 电子发射系统各参量的计算；
- (4) 电子透镜各参量的计算；
- (5) 电子透镜、偏转系统的像差计算；
- (6) 像质计算（传递函数、分辨率、像衬度、衍射衬度、相位、振幅、强度等）。

目前，高性能透镜式电子显微镜的点分辨率优于 $0.2\sim 0.3\text{nm}$ 、晶格条纹分辨率可达 0.1nm 左右，能观察重金属原子和大分子的像，扫描电子显微镜分辨率已达 $0.3\sim 0.5\text{nm}$ ，可以直接观察试样表面形貌。用于超大规模集成电路制造中的电子束曝光机可产生微米级和亚微米级的光斑。现代单枪三束彩色显像管采用高精度一列式电子枪和自会聚磁偏转线圈实现磁场分布最佳化，偏转

角可达 110° 。用于计算机终端的显示管，静电聚焦电子枪在细管颈管子内的分辨率可达1500(TVL)等等。

二、电子光学系统的最优化技术

70年代以来，利用电子计算机对电子光学系统进行最优化设计已有较大进展。最优化设计是给定各个透镜参量，在一定的约束条件下，寻求最佳的透镜场分布或结构参量，使某个像差或像差总和最小，或者使之不超过某一限值来改善图像质量。为此，采用了变分法、动态规划法、单纯形法或复形法等对电子光学系统进行最优化计算。在大量方案中，按一定的评价标准进行对比，从而迅速选出最佳方案，加速了电子光学系统的设计试验过程。

三、非旋转对称的电子光学系统

由于旋转对称场具有像差不可消除的性质，大大限制了旋转对称电子透镜的性能，而非旋转对称场则不受这种限制。目前主要运用非旋转对称多极电子光学系统来尽可能地减小像差，已成功地利用多极系统组合消除了旋转对称系统中不可能消除的球差和色差。

四、聚焦——偏转复合系统

一般的电子束器件、仪器和装置中，聚焦场和扫描场在空间上是相互分开不重叠的。但是，在加工超大规模集成电路的电子束曝光机中，要求电子束具有大扫描范围（几个平方毫米）、高分辨率（亚微米线宽）和低像差等性能。需要采用电磁透镜场与电磁偏转场在空间上重叠在一起的聚焦——偏转复合系统。在这种复合系统中，将磁偏转线圈放在磁透镜场中，使某些磁偏转像差适当地补偿磁透镜的轴外像差，因而总的像差可以急剧地减小，特别是扫描束电子光学系统可以采用动态方法来校正像差，在原则上可以消除扫描束电子光学系统所有的三级像差，采用多极电磁聚焦——复合系统，在一定条件下可以消除大多数的三级偏转像差。

五、宽束电子光学系统

由于红外与夜视光电成像等技术发展的需要，对变像管、像

增强管等电子束管的设计要求也越来越高。在这类电子束器件中，阴极浸没在电场(或磁场)中，阴极本身就是成像的物面，这时，电子束初速很小，不满足斜率很小的初始条件，但仍满足近轴条件，称宽电子束电子光学系统。宽束电子光学已有 50 年历史。近 20 年来，宽束电子光学在下列方面有所进展，如静电聚焦同心球系统电子光学，电磁聚焦同心球系统电子光学，电磁聚焦移像系统电子光学，超导强磁场电磁聚焦系统电子光学，倾斜型电磁聚焦系统电子光学，电磁复合聚焦阴极透镜的像差理论，成像系统中的曲轴电子光学系统，电子光学传递函数与均方半径以及成像系统电子光学计算与设计等。目前，已可用计算机辅助设计，效果很好，大大缩短了研制周期。

六、曲轴电子光学

曲轴电子光学系统主要用于各种带电粒子(电子和离子)谱仪、束导引系统和加速器中，因为曲轴系统需要有偏转元件，而这些元件的对称性很差，同时又具有色散特性，偏转量与带电粒子的质量、电荷和能量有关，所以在谱仪中用得比较广泛。为了在像平面中达到高强度粒子以提高灵敏度，就需要大的孔径角；同时为得到小的聚焦光斑，必须消除色散和二级孔径像差。当谱仪要求十分精密时，还需要消除全部的三级孔径像差。此外，一级色差往往也限制了仪器的质量。所有这些曲轴系统中的像差，都可用一些非旋转对称的电子光学元件来校正，设计这种系统需要电子计算机辅助设计技术。随着曲轴电子光学理论的发展，使高性能、多功能的质谱仪不断出现。目前，已有精度为 1 ppm 的同位素质谱仪，分辨为 150000 的有机质谱仪，测量微量杂质为 10^{-10} 的固体微量质谱仪，分析固体微区 ($1\mu\text{m}$) 杂质分布和深度(几个毫微米)分布的离子探针质谱分析仪等。

七、波动电子光学

波动电子光学已由格拉泽 (Glaser) 等人在 50 年代奠定了基础。它主要研究电子束在宏观电磁场(例如电子显微镜的透镜场)和微观电磁场(例如晶体中内电位的电场)中传播的波动性

质（干涉、衍射等）。由于电子显微镜和电子计算机的发展，波动电子光学在最近20年有了很大发展。特别是在电子显微镜中，根据波动光学原理发展了电子计算机数字图像处理技术，改善了电子显微镜图像的衬度和清晰度，并提高了分辨率。

如上所述，一些新技术，特别是计算机计算技术引入电子光学中，使电子光学在广度和深度上都有很大发展；同时，由于一些带头学科的发展需要，电子光学又渗透到许多科学技术领域，推动了这些学科的发展。现在，电子光学计算机辅助设计已广泛用于电子光学的各个方面，可以预计，它必将发挥越来越重要的作用。

参 考 资 料

- 〔1〕 西门纪业，电子学报，12卷第2期，1984。
- 〔2〕 P. W. Hawkes et al, Image Processing and Computer Aided Design in Electron Optics, 1973.
- 〔3〕 A. B. EL-Kareh et al, Electron Beams, Lenses and Optics, Vol. I, I, 1970.