

# 宽电子束聚焦与成像

——周立伟电子光学学术论文选

## Focusing and Imaging of Wide Electron Beams

——Selected Papers on Electron Optics  
by Zhou Liwei

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

## 内 容 简 介

本书是北京理工大学周立伟教授关于宽电子束聚焦成像理论与设计的学术论文选集,共 34 篇文章,是从著者 1978 年以来发表的八十余篇电子光学学术论文中选出来的。内容涉及宽束电子光学的基本理论、数学方法、系统设计以及技术应用等。共分为七个专题,即同心球系统与倾斜型系统的电子光学,电磁聚焦移像系统的电子光学,曲轴宽电子束聚焦理论,成像系统的电子光学传递函数,阴极透镜与曲轴宽电子束聚焦的像差理论,电子光学系统计算与设计,电子光学成像系统的逆设计。在导言中著者就文章的研究背景,问题提出和解决以及所取得的进展作了扼要的说明。

本论文选集可供从事电子光学、电子物理、光电子成像器件等专业的科学工作者、大学教师和研究生参考。

The present volume is a collection of selected papers on theory and design of wide electron beam focusing and imaging, being a compilation of 34 papers chosen from more than 80 papers on electron optics published and presented by the author since 1978. The collection covers basic theory, mathematical methods, system design and technical applications, and is divided into 7 special subjects; viz: electron optics of concentric spherical systems and oblique systems, electron optics of electromagnetic focusing systems for image transference, theory of wide electron beam focusing having curvilinear axes, electron-optical transfer function of imaging systems, aberration theory of cathode lenses and systems with wide electron beam focusing, design and computations of electron-optical systems, and inverse design of electron-optical imaging systems. In the introductory part, the author gives a brief explanation to the selected works regarding the background of research, questions to be put forward and solved, and developments achieved.

The selected papers would be a suitable background reference for teachers and graduate students at colleges and universities, as well as the scientific and technological researchers working in the field of electron optics, electron physics and photoelectronic image devices.

## 宽 电 子 束 聚 焦 与 成 像

——周立伟电子光学学术论文选

\*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

北京外文印刷厂印刷

\*

787×1092 毫米 16 开本 26.5 印张 663 千字

1994 年 10 月第一版 1994 年 10 月第一次印刷

ISBN 7-81013-991-6/TN·54

印数:1—500 册 定价:30.00 元

# 目 录

|                                                                                                                                                                                                                |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 导言                                                                                                                                                                                                             | (1)   |
| 一、同心球系统和倾斜型系统的电子光学                                                                                                                                                                                             | (9)   |
| 1.1 两电极同心球系统的电子光学                                                                                                                                                                                              | (11)  |
| 1.2 Electron optics of concentric spherical electromagnetic focusing systems<br>(同心球电磁聚焦系统的电子光学)                                                                                                               | (30)  |
| 1.3 电磁聚焦同心球系统的精确解                                                                                                                                                                                              | (42)  |
| 1.4 Electron optics of oblique electromagnetic focusing systems<br>(倾斜型电磁聚焦系统的电子光学)                                                                                                                            | (46)  |
| 二、电磁聚焦移像系统的电子光学                                                                                                                                                                                                | (59)  |
| 2.1 电磁聚焦移像系统理论的研究                                                                                                                                                                                              | (61)  |
| 2.2 Electrostatic and magnetic imaging without image rotation<br>(图像无旋转的电磁聚焦移像)                                                                                                                                | (72)  |
| 2.3 一种新型的放大率 $M \neq 1$ 电磁聚焦移像系统                                                                                                                                                                               | (83)  |
| 2.4 图像无旋转的曲轴电磁聚焦移像                                                                                                                                                                                             | (94)  |
| 三、曲轴宽电子束聚焦理论                                                                                                                                                                                                   | (101) |
| 3.1 Tensor analysis of electron motion in curvilinear coordinate systems ( I )<br>(曲线坐标系中电子运动的张量分析( I ))                                                                                                       | (103) |
| 3.2 Tensor analysis of electron motion in curvilinear coordinate systems ( II )<br>(曲线坐标系中电子运动的张量分析( II ))                                                                                                     | (124) |
| 3.3 曲轴宽电子束聚焦的普遍理论                                                                                                                                                                                              | (135) |
| 3.4 A generalized theory of wide electron beam focusing.<br>(宽电子束聚焦的普遍理论)                                                                                                                                      | (151) |
| 3.5 曲轴宽电子束聚焦理论的研究                                                                                                                                                                                              | (164) |
| 3.6 宽电子束聚焦的变分理论                                                                                                                                                                                                | (177) |
| 3.7 相对论修正下宽电子束聚焦的普遍理论                                                                                                                                                                                          | (185) |
| 3.8 曲近轴方程组确定大物面静电聚焦成像系统的场曲和像散的研究                                                                                                                                                                               | (194) |
| 四、成像系统的电子光学传递函数                                                                                                                                                                                                | (205) |
| 4.1 成像系统的电子光学调制传递函数与均方根半径的研究                                                                                                                                                                                   | (207) |
| 4.2 On the determination of polyenergetic point spread function and modulation transfer<br>function in electron-optical imaging systems using three dimensional coordinates<br>(用三维坐标对电子光学成像系统点扩散函数和调制传递函数的研究) | (220) |

|                                            |                                                                                                                                                                                 |              |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.3                                        | 电子光学成像系统全色点扩散函数的研究 .....                                                                                                                                                        | (233)        |
| 4.4                                        | On modulation transfer function of cathode lenses in image tubes<br>(关于像管阴极透镜的调制传递函数) .....                                                                                     | (243)        |
| 4.5                                        | 一种用曲轴轨迹确定轴外点扩散分布的方法 .....                                                                                                                                                       | (257)        |
| <b>五、阴极透镜与宽电子束聚焦的像差理论 .....</b>            |                                                                                                                                                                                 | <b>(261)</b> |
| 5.1                                        | 关于电磁复合聚焦阴极透镜的像差理论 .....                                                                                                                                                         | (263)        |
| 5.2                                        | Variational theory of aberrations in cathode lenses<br>(阴极透镜像差的变分理论) .....                                                                                                      | (280)        |
| 5.3                                        | On the aberration theory for wide and narrow electron beams in a combined electro-<br>magnetic focusing system possessing a spherical cathode<br>(宽束和细束电磁复合聚焦球面阴极透镜的像差理论) ..... | (294)        |
| 5.4                                        | 面对称静电场中曲轴宽电子束聚焦的像差理论 .....                                                                                                                                                      | (308)        |
| <b>六、电子光学系统的计算与设计 .....</b>                |                                                                                                                                                                                 | <b>(319)</b> |
| 6.1                                        | 变像管及像增强器电子光学系统的计算机分析与设计 .....                                                                                                                                                   | (321)        |
| 6.2                                        | A multigrid method for the computation of rotational symmetrical electrostatic field<br>(多重网格法计算轴对称电场的研究) .....                                                                 | (331)        |
| 6.3                                        | 一种计算轴对称磁场的边界元-有限元混合法的研究 .....                                                                                                                                                   | (338)        |
| 6.4                                        | A study of electron-optical systems for conical immersion lenses<br>(圆锥浸没透镜电子光学系统的研究) .....                                                                                     | (345)        |
| 6.5                                        | Optimization design of image tubes with electrostatic focusing<br>(静电聚焦像管的优化设计) .....                                                                                           | (357)        |
| <b>七、电子光学成像系统的逆设计 .....</b>                |                                                                                                                                                                                 | <b>(365)</b> |
| 7.1                                        | 静电聚焦成像系统电子光学逆设计的研究 .....                                                                                                                                                        | (367)        |
| 7.2                                        | An inverse design of magnetic focusing coil for electrostatic and magnetic imaging<br>(电磁聚焦移像系统中聚焦磁场的逆设计) .....                                                                 | (381)        |
| 7.3                                        | An inverse design of electrostatic focusing field for electrostatic and magnetic imag-<br>ing (电磁聚焦移像系统中静电聚焦场的逆设计) .....                                                        | (390)        |
| 7.4                                        | 电磁聚焦成像系统中带不饱和磁铁聚焦磁场的约束逆设计 .....                                                                                                                                                 | (401)        |
| <b>附 录: 周立伟等电子光学学术论文、学术著作与会议报告目录 .....</b> |                                                                                                                                                                                 | <b>(409)</b> |

# 导 言

如所周知,控制电子在电场的磁场作用下在真空中的运动藉以聚焦、成像、偏转以及形成电子束是带电粒子光学(电子光学)的基本问题。只有掌握电子在电场和磁场中运动的规律才能设计、制造直到创造新的电子光学器件与仪器。

自 1926 年 B. Busch (布许)研究旋转对称磁场中电子运动以来,经过六十余年的发展,电子光学,作为技术物理的一门分支学科,所研究的对象及其内涵已与当年大有差异。例如,出现了与电子显微镜相联系的电子显微学,与摄像管、显像管相联系的电视中的电子光学,与变像管、像增强器相联系的宽束电子光学,与微波器件相联系的强流电子光学,考虑电子波动性的波动电子光学,与高能加速器、回旋管相联系的相对论电子光学和束流传输理论,与行波管相联系的超高频电子光学,与质谱仪、能谱仪相联系的离子束光学等等。尽管就其出发点与基本原理来说有许多是共同的,但不少的物理概念,研究途径,设计方法与处理手段却是很不相同的。

本论文选集所涉及的内容主要是研究真空光电子成像器件中的宽电子束聚焦与成像,或称宽电子束成像系统的电子光学,即宽束电子光学。

宽电子束成像系统的电子光学主要特点是:利用系统本身的光阴极所发射的光电子流,由电子光学系统在电子接收器(屏靶)上形成图像或一定形状的电子讯号。由于阴极面本身就是物面,并且直接处于场中,电子以不同的初角度和初速度自阴极面各点处射出,逸出电子的初速度很小但其斜率可趋无穷。束电流很小,通常空间电荷效应可不予考虑。这一类系统在电子光学术语中通常称为阴极透镜。

作为聚焦成像的电子光学系统,一般要求有大的视场,小的几何失真,高的鉴别率和良好的调制传递特性;也就是说,越来越要求系统能形成足够清晰(高分辨本领和高对比传递)和畸变极小的图像。

由此可见,成像系统电子光学的基本问题乃是研究在各种聚焦方式下大物面宽电子束成像的问题。即如何使光阴极上的电子像尽可能不走样地转移到接收器(屏靶)上,并满足其它要求(如高速摄影中分幅的要求等)。电子光学工作者研究的任务不但要探讨成像系统的基本理论问题,如近轴光学、像差理论、曲轴光学、电子光学传递函数与成像质量评定,而且要对计算场与轨迹的方法进行探讨,设计各种类型适应不同需要的像管,进而探讨电子光学最优化设计与电子光学逆设计等问题。

自 70 年代以来,本着发展我国光电子成像技术的需要,我领导了一个科研组从事研究宽电子束聚焦成像理论与设计,得到了我校与兵器工业总公司以及国防科工委、国家教委、兵器科学研究院、国家自然科学基金会等各项基金的支持与资助。在这一领域中,我们开展了多方面的探索与研究,发表了八十余篇学术论文。兹选出其中的 34 篇文章以飨读者。现分七个专题就文章的研究背景、问题的提出和解决以及所取得的进展进行扼要说明。

## 一、同心球系统和倾斜型系统的电子光学

收入在这一专题的论文有:

[1.1] 两电极同心球系统的电子光学

[1.2] Electron optics of concentric spherical electromagnetic focusing systems

[1.3] 电磁聚焦同心球系统的精确解

[1.4] Electron optics of oblique electromagnetic focusing systems

研究简单的理想模型如同心球系统、倾斜型系统、双曲场所构成的成像系统从电子光学观点来看是颇有意义的。这是因为,系统的电位分布和电子轨迹都可写成解析形式,可以定量地研究系统的电子光学性质和像差。在静电或电磁复合聚焦的像管中,无论是严格精确或近似实现的同心球系统,都能得到好的像质。由于系统本身具有一系列宝贵的性质,不少像管设计采用了类似同心球系统的结构。

将同心球系统等作为阴极透镜的理想模型,分析的探讨这类系统聚焦成像所包含的具体的矛盾,解剖它作为阴极透镜所具有的矛盾的特殊性,从中找出一些对于阴极透镜具有普遍意义和规律性的线索,这不但对于研究同心球型像管的电子光学提供理论基础;而且,由于理想模型成像的矛盾的特殊性中正包含着阴极透镜宽电子束聚焦成像的矛盾的普遍性,故对于进一步研究轴对称阴极透镜具有实际意义。

对于静电聚焦两电极同心球系统,以往的工作如: E. Ruska、P. Schagen 曾先后进行了研究,导出了轨迹方程,讨论了系统的成像。但是,他们的工作主要停留在成像的零级近似上。虽然 P. Schagen 以及 Г. М. Крынин 曾经讨论了某些特定位置上的像差,但这些研究对于系统的理想成像,电子光学色球差以及理想模型的特殊性与成像系统的普遍性之间的相互联结,并没有深入探讨。

论文[1.1]发展了前人关于两电极静电聚焦同心球系统电子光学的研究工作,导出了自阴极物面的初速度  $v_0$ 、初角度  $\alpha_0$  射出的电子轨迹的交轴位置及其倾角的精确表达式,研究了同心球系统的成像性质及色球差,从而为全面分析大物面宽电子束聚焦系统的成像与像差奠定基础。

若在两电极静电聚焦同心球系统中,加上同心的辐射磁场使它与电场的方向处处平行,则构成两电极电磁聚焦同心球系统。这种系统作为成像系统虽曾被叙述过,但是,电子轨迹是用计算机求解的,对系统的聚焦性质与像差并没有充分讨论过。

在论文[1.2]中,我们应用以主轨迹为曲光轴的电子光学的理论,研究最普遍的情况——电磁聚焦同心球系统,对近贴聚焦系统、静电聚焦同心球系统、均匀平行电磁复合聚焦系统以及电磁聚焦同心球系统,用符号规则统一起来进行考察,导出了主轨迹为光轴的相邻轨迹解析表达式,证明了电磁聚焦同心球系统中电子运动是一条圆锥螺线,并给出了系统的电子光学色球差,而且所给出的表达式可以向各种特殊情况下的系统过渡。在论文[1.3]中,我们对电磁聚焦(包括静电聚焦)同心球系统进一步进行研究,由球坐标系下电子光学广义拉格朗日函数出发,求得了电子轨迹的精确解。

对静电聚焦和电磁聚焦同心球系统的研究表明,我们由具体的系统中证实了阴极透镜的一阶纵向和横向像差,即 Recknagel-Арцимович 公式普遍成立。这一公式表明成像系统的轴上点的纵向像差和横向像差在一阶近似下与电极结构或电位分布无关,而与逸出电子的初电位和初角度、阴极面上的场强以及系统的放大率有关。

倾斜型电磁聚焦系统首先由 J. P. Picat 等提出,并给出了电子运动的表达式, C. B. Johnson 等人讨论了逸出初速度为零的电子轨迹的成像。此后 J. L. Lowrance 等直接由运动方程出发,研究了此系统中电子在屏靶上的点列图,并利用了 CCD 器件作为系统的电子接收

器。但以上这些工作对轨迹的性状,系统的像差并未进行深入的分析。

在论文[1.4]中,我们由交叉的均匀复合场下的运动方程出发,引进随动坐标系,导出了电子轨迹乃是在抛物线上作圆柱螺线运动的表达式,给出了像差方程与均方根半径解析表达式,研究了系统的点像调制传递函数与相位传递函数。这一工作的一大收获是均方根半径的大小与调制传递函数的优劣在各像面上是一一对应的。这一结论已为我们研究传递函数的理论严格证明。

## 二、电磁聚焦移像系统的电子光学

收入在这一专题的论文有:

[2.1] 电磁聚焦移像系统理论的研究

[2.2] Electrostatic and magnetic imaging without image rotation

[2.3] 一种新型的放大率  $M \neq 1$  电磁聚焦移像系统

[2.4] 图像无旋转的曲轴电磁聚焦移像

均匀平行复合电磁聚焦系统(放大率  $M=1$ )作为移像系统广泛应用于像管与摄像器件中,特别是近年来,由于它在半导体集成电路电子制版技术的应用受到格外的重视,其研究是比较充分的。

但是,对于放大率  $M \neq 1$  的电磁聚焦移像系统的研究是很不够的。到70年代末,从理论上还没有找到合适的电位分布与磁感应分布,它能实现  $M > 1$  或  $M < 1$  且图像无旋转的要求。

И. И. Цуккерман 于50年代提出研究复合电磁聚焦系统的聚焦特性的新方法:它的实质是由同一物点逸出的某一主轨迹相邻的近轴轨迹可以用主轨迹  $r_{\pm}(z)$  及某一平面  $z = \text{常数}$  处连接主轨迹与相邻轨迹的矢量  $p$  来表示。由此出发,可以探讨系统的聚焦成像性质。

应该指出,И. И. Цуккерман 的理论尚有值得商榷与补正之处:一是对于所提出的非线性方程形式表示的主轨迹方程的求解并没有进行深入的探讨,且其系统的图像转角与放大率的表达式并不适用于成像系统;二是 И. И. Цуккерман 提出的移像系统实现无旋转图像的条件极为苛刻,以至满足该条件的实际只有放大率  $M=1$  的均匀平行复合电磁聚焦系统。

在论文[2.1]中我们证明了由矢量形式的主轨迹方程与相邻轨迹方程出发求解将较 И. И. Цуккерман 标量形式的非线性方程来得简便。文中给出了以特解  $v, w$  表示的主轨迹与相邻轨迹表示式,从理论上考察了电磁聚焦移像系统。论文[2.2]研究了系统实现无旋转图像的条件,指出只要所给出的电位与磁感应沿轴分布满足二个充要条件,便能构成无旋转图像且放大率  $M \neq 1$  的电磁聚焦移像系统。文中提出了设计图像无转角且放大率可变的移像系统的新途径,并给出了解析实例与数值计算实例。

在论文[2.3]中,研究了某一  $M \neq 1$  移像系统色球差与当场有微扰时的轨迹以及获得不失真图像的途径。论文[2.4]在曲轴宽电子束聚焦理论和移像系统理论的基础上,进一步发展了图像无旋转的电磁聚焦移像的理论,给出了曲轴系统中获得图像无旋转的充要条件。图像无旋转的电磁聚焦移像的研究为成像系统的逆设计奠定了理论基础。

## 三、曲轴宽电子束聚焦理论

收入在这一专题的论文有:

[3.1] Tensor analysis of electron motion in curvilinear coordinate systems(1)

[3.2] Tensor analysis of electron motion in curvilinear coordinate systems (Ⅱ)

[3.3] 曲轴宽电子束聚焦的普遍理论

[3.4] A generalized theory of wide electron beam focusing

[3.5] 曲轴宽电子束聚焦理论的研究

[3.6] 宽电子束聚焦的变分理论

[3.7] 相对论修正下宽电子束聚焦的普遍理论

[3.8] 曲近轴方程组确定大物面静电聚焦成像系统的场曲与像散的研究

在解决大物面、电子束聚焦与成像的问题时,用张量分析方法研究以主轨迹为曲光轴电子在曲线坐标系中的运动已被证明是一条十分有效的途径。论文[3.1,3.2]用张量分析方法,采用沿主轨迹运动的 Frenet—Sereet 局部坐标系 $(s, p_2, p_3)$ 和转动局部坐标系 $(s, u, v)$ ,由电子运动方程的逆变和协变形式来探讨广义坐标系中以静电电位、磁标位或磁矢位表示的静电、磁场中的电子运动的轨迹。所获得的广义坐标系中电子运动方程的轨迹方程的普遍形式正是研究曲轴电子光学(包括细束、宽束,而平面曲轴和直轴电子光学是其特例)的聚焦特性及其像差等问题的出发点。

论文[3.3,3.4]由曲线坐标系下的普遍轨迹方程出发探讨了大物面曲轴宽电子束聚焦的普遍理论,文中引入曲近轴条件,推导了主轨迹方程和曲近轴轨迹方程,研究了曲近轴系统的正交条件,并讨论了一些正交系统的实例。论文[3.5]将空间静电电位和磁感应强度矢量沿曲轴展开的场系数以实验室坐标系下场系数表达,利用上述各种曲线坐标系,进一步研究宽电子束聚焦理论。论文[3.6]将变分原理下的细电子束聚焦推广到宽电子束聚焦,证明了变分方法的结果与用电动力学方法研究宽电子束聚焦的一致性。论文[3.7]进一步研究了相对论修正下的宽电子束聚焦的普遍理论。论文[3.8]研究了轴对称静电成像系统中以主轨迹为曲轴的随动局部笛卡尔直角坐标系 $(x, y, z)$ 和正交局部曲线坐标系 $(s, p, q)$ 表示的曲近轴运动方程和轨迹方程,给出了当采用这些方程计算时的初条件表示式及此两个坐标系下曲轴方程之间的相互过渡。

曲近轴光学不但对于确定成像系统的场曲与像散,而且对于研究系统的电子光学传递函数具有实际意义。

#### 四、成像系统的电子光学传递函数

收入在这一专题的论文有:

[4.1] 成像系统的电子光学调制传递函数与均方根半径的研究

[4.2] On the determination of polyenergetic point spread function and modulation transfer function in electron optical imaging systems using three dimensional coordinates

[4.3] 电子光学成像系统全色点扩散函数的研究

[4.4] On modulation transfer function of cathode lenses in image tubes

[4.5] 一种用曲轴轨迹确定轴外点扩散分布的方法

成像系统的电子光学传递函数(简称 *ETF*)一直是人们注意的焦点,已发表了不少理论分析文章,这些文章大多是由静电聚焦和弱磁聚焦成像系统普遍成立的一阶横向像差公式出发进行研究的。

由一阶横向像差求阴极透镜的调制传递函数(*MTF*)通常可以有二条途径:一是对圆对称

的点扩散函数进行傅立叶-贝塞尔变换求单色  $MTF$ , 然后通过求某一初能分布下初电位相对值的统计平均值研究全色  $MTF$ ; 另一是直接求某一初能下的全色点扩散函数( $PSF$ )。然后通过傅立叶-贝塞尔变换求全色  $MTF$ , 或是通过线扩散函数求全色  $MTF$ 。

论文[4. 1]中, 我们研究了逸出光电子的初能量分别为余弦分布, 麦克斯韦分布和贝塔分布下近贴聚焦与锐聚焦系统的电子光学调制传递函数( $MTF$ )与均方根半径, 证明了以指数函数形式表示的调制传递函数解析式  $T(f) = \exp[-(\pi\rho f)^2]$  足以精确地表达成像系统的  $MTF$ , 这里  $\rho$  乃是成像系统在某一像面上的均方根半径, 具有明确的物理意义。

在论文[4. 2, 4. 3]中, 我们在两套坐标系中分别建立一阶横向像差半径的三维曲面图, 用形象的手段讨论了成像系统的  $PSF$ 、 $MTF$  和均方根半径的确定, 从理论上论证了在考虑初角度分布和初能分布下由对全色点扩散函数进行傅立叶-贝塞尔变换和对单色  $MTF$  求概率平均这两种方法求全色  $MTF$  的一致性, 严格证明了  $MTF$  近似指数表达式中的  $\rho$  就是像差的均方根半径, 文中还给出了全色点扩散函数的积分限、表达式和求解方法, 并示出了若干计算实例。

论文[4. 4]给出了评价近贴聚焦和锐聚焦像管透镜调制传递函数的简明表达式。由像管各元件及电子透镜的调制传递函数, 可对整管调制传递特性进行评价。论文[4. 5]中根据曲轴宽电子束聚焦理论, 研究了一种用曲轴轨迹确定轴外点扩散分布的方法, 它与传统方法相比较, 在相同的精度要求下, 可减小计算工作量, 大大提高计算速度。

应该指出, 在计算像管电子光学传递函数时, 一般须算出在该像面上的点列图(点扩散函数)。此时, 便不难求出表征系统鉴别率特性的均方根半径值, 它是电子落点离理想像点的距离的平方乘以该电子携带的权数(设总权数归化为 1)之和的开方。

对阴极透镜  $MTF$  与均方根半径的理论分析和实际计算表明, 均方根半径的大小与传递函数的优劣在各个像面上是一一对应的。因之, 均方根半径可以用来表征系统鉴别率的特性, 而且, 它作为辅助  $MTF$  的一个评价指标比较直观与方便。从物理意义上来说, 均方根半径的大小正反映了逸出电子束在像面上落点密集的程度, 而密集的电子落点必将使调制传递函数改善, 此两者协调一致是很自然的。

## 五、阴极透镜与宽电子束聚焦的像差理论

收入在这一专题的论文有:

[5. 1] 关于电磁复合聚焦阴极透镜的像差理论

[5. 2] Variational theory of aberrations in cathode lenses

[5. 3] On the aberration theory for wide and narrow electron beams in a combined electromagnetic focusing system possessing a spherical cathode

[5. 4] 面对称静电场中曲轴宽电子束聚焦的像差理论

在电子光学蓬勃发展的过程中, 像差理论的研究一度占有重要地位, 它对于提高系统的像质, 减小像的失真与缺陷起着理论指导作用。一些电子光学学者都曾致力于像差理论的研究, 取得了不少的成就。A. Recknagel, Л. А. Арцимович 以及 О. И. Семан 都曾对静电阴极透镜的成像及其像差作了深入的研究, 为静电阴极透镜像差的研究作出了贡献。北京大学西门纪业于 1957 年首先系统地建立了电磁复合聚焦阴极透镜的像差理论, 推导了电磁复合聚焦成像系统的线性方程和三级横向像差方程, 导出了各个特殊类型的像差系数, 为阴极透镜的研究奠定

了理论基础。随后 Б. Э. Бонштедт 于 1964 年在西门纪业研究的基础上,用相同的方法推导了像差方程与像差系数,但他却批评西门纪业一文中的像差方程和自由项  $F$  的推导有错误,从而导致所得的像差系数也是不正确的。论文[5.1]对这两篇文章作了较深入的探讨,详细地推导了两文所有的公式。其结论是尽管从表面上看起来两文的自由项  $F$  和像差系数表达式似乎迥然不同,差异很大,但实质上完全一致的。经过繁复的推演与整理,两者是可以互相转化的,从而证明了 Б. Э. Бонштедт 的批评是没有根据的。实际恰恰相反,Б. Э. Бонштедт 文中所推导的公式却有一些遗漏与错误之处。是需要补正的。

考察已有的像差理论的文章,不难发现,有关电磁复合聚焦阴极透镜的像差表达式是以逸出电子本身的轴向初能  $\epsilon_z$  所对应的像面上来衡量横向像差,即认为在像面处,  $v(z_i, \epsilon_z) = 0$ , 这是值得进一步商榷的。从我们所研究的一些典型成像系统的电子光学像差来看,这样的表达是不够完整的,所得到的仅是像差的部分表达式。我们认为,成像系统的像差应在  $v(z_i, \epsilon_{z1}) = 0$ , 即对应于由  $\epsilon_{z1}$  而非  $\epsilon_z$  决定的像面上来衡量。论文[5.1]导出了电磁复合聚焦阴极透镜包括一级像差与三级像差在内的全部横向像差表达式,这样将更为接近实际。

论文[5.2]运用变分原理研究了电磁复合聚焦阴极透镜的像差理论,文中采用矩阵形式表示像差,形式简洁,所得结果与论文[5.1]的轨迹法一致。

论文[5.3]进一步发展上述理论,研究了在球面阴极情况下对宽束和细束阴极透镜普遍适用的电磁复合聚焦阴极透镜的像差理论,导出了任意理想像面上的一级近轴横向像差和包括三级像差在内的全部三级横向像差矩阵的公式,所得结果较为完整与普遍。

论文[5.4]在宽电子束聚焦普遍理论的基础上,研究了面对称静电场中曲轴宽电子束聚焦像差理论,讨论了曲轴横向像差的定义,给出了像差表达式,并将此应用于轴对称静电阴极透镜。

## 六、电子光学系统计算与设计

收入在这一专题的论文有:

[6.1] 变像管及像增强器电子光学系统的计算机分析与设计

[6.2] A multigrid method for the computation of rotational symmetrical electrostatic field

[6.3] 一种计算轴对称磁场的边界元-有限元混合法的研究

[6.4] A study of electron-optical systems for conical immersion lenses

[6.5] Optimization design of image tubes with electrostatic focusing

电子光学系统的设计方法通常可分为三类:

直接法(正设计),最优化法(优化设计)与反算法(逆设计)。关于逆设计将在下面叙述,现简要叙述直接法与最优化法。

直接法的实质在于在已给系统场的所有结构与电磁参数(如电极精确的形状与位置 and 所施加的电压,电磁线圈绕组的形状以及通过线圈的电流,铁磁体的磁化性质)下,求系统的电子光学成像特性、像差与电子光学传递函数。因此,直接法求解归结为

(1) 选择物理系统的抽象数学模型以及此模型相应的电子光学理论问题;

(2) 选择数学问题的求解方法以及研究求解电场和磁场的计算方法;

(3) 确定在已给场下的系统的聚焦成像性质。一般,它归结于求电子轨迹方程或运动方程

在不同初条件下的解。

直接法计算和设计电子光学系统时,设计者根据自己的设计经验和水平人为地调整结构参量与电参量,采用逐次试算的方法,来逼近所期望的设计结果。

最优化法是指在给定电子光学系统的结构参量与电参量取值范围和初值下,由程序自动寻求一组参数值,使之在满足一定的(约束)条件下,某些电子光学参量如像面位置、放大率达到所需值时,系统的像差达到最小值或电子光学传递函数以及均方根半径等指标达到最佳值。由于优化设计在设计过程中不需要人工干预,不受设计者的经验和水平的限制,不仅大大地提高了设计的效率和质量,而且充分发挥了系统的潜力。因此电子光学系统优化设计一直是众所关心的课题。

论文[6.1]叙述了70年代我所领导的研究组在变像管和像增强器电子光学系统的计算与设计工作。那时我们采用填“边界数据表”将不同的电极形状与电位等边界条件与电子束初条件数据输入,计算电位场采用有限差分法与逐次超松弛迭代法。这一工作近期已发展用C语言编制电子光学系统计算程序,采用菜单方式输入,能绘制像管结构图以及等电位线与电子轨线,计算电位场已采用速度更快的多重网格法。

论文[6.2]将多重网格法(Multigrid method)用于区域形状任意和有“内电极”的实际电子光学系统轴对称电场的电位计算。通过若干实例验证了多重网格法在复杂边界条件下的收敛速度和计算效率,大大优于传统用逐次超松弛迭代的有限差分法。这一方法为电子光学系统优化设计打下了良好的基础。

论文[6.3]由静磁场的基本方程和有限元的原理出发,研究了一种新的计算带非饱和磁介质轴对称磁场的边界元-有限元混合法,解决了单纯使用有限元法的边界封闭的问题,为电磁聚焦成像系统以及其它磁透镜的工程设计提供了一种有效的方法。

论文[6.4]研究利用边界元素法计算圆锥透镜场分布,用曲傍轴方程组,实际轨迹方程组计算带电粒子轨迹,确定电子光学参量,对简单双圆筒型圆锥浸没透镜实际计算的结果与采用渐近解析方法的结果相符合。

论文[6.5]叙述了以多重网格法计算场与以约束变尺度法作为优化算法进行静电像管优化设计的工作。在优化算法中采用约束变尺度法不仅算法先进,解题效率高,收敛快,数值稳定性好,而且其平均求值次数少,特别适合于像管电子光学系统这一类函数求值困难的优化问题。文中研究了带有权因子最小拟合形式的目标函数,对实际的两电极像管,三电极像管,变倍管与校畸变像管等进行优化设计,证明所提出的优化设计方法是一种既实际又有效的方法。

## 七、电子光学成像系统逆设计

收入在这一专题中的论文有:

[7.1] 静电聚焦成像系统电子光学逆设计的研究

[7.2] An inverse design of magnetic focusing coil for electrostatic and magnetic imaging

[7.3] An inverse design of electrostatic focusing field for electrostatic and magnetic imaging

[7.4] 电磁聚焦成像系统中带不饱和和磁铁聚焦磁场的约束逆设计

电子光学逆设计(反算法)的实质是:按所给定的成像特性,由满足此特性的电子轨迹出

发,反算电极系统的形状和所施加的电压,线圈绕组的形状位置以及通过线圈的电流等。

论文[7.1]提出了静电聚焦成像系统逆设计的方法与途径。由近轴方程的简正形式出发,可给出简正轨迹与轴上电位分布以及放大率之间关系式,当考虑实际成像系统所应满足的电位分布特点与相应的轨迹要求后,可提出对简正轨迹的限制条件。利用多项式数学模型模拟电子轨迹,通过对多项式内各系数的适当选择,可以求出满足已给成像参量要求的电子轨迹。由此电子轨迹便可反求轴上电位分布。实践表明,从轴上电位分布出发来重构电极(电极形状与配置及施加的电压),比之从给定的电子光学特性来求场分布要复杂得多。

论文[7.2,7.3]利用图像无旋转电磁聚焦移像的理论由满足图像无旋转的两个条件出发,对已给出的轴上磁感应分布或轴上电位分布来确定线圈绕组或电极的结构参量与电参量。这通常归结为寻求均方根函数(泛函)的最小值,用最优化方法对系统的聚焦磁场和静电聚焦场进行设计。计算结果表明,对磁场(裸露线圈)的设计以及用多电极系统电位迭加原理对静电场进行设计是比较成功的。

论文[7.4]对电磁聚焦移像系统中带不饱和磁铁的聚焦磁场的逆设计进行了探讨,用约束优化方法,一内罚函数法来设计能实现给定磁场分布的实际磁聚焦线圈。

本学术论文选在编辑时所收入的文章一般不作变动,但文章的作者、标题与摘要均用中英两种文字刊出。对原文中某些印刷错误或个别不妥之处作了一些修正和删改。

## 1.1 两电极同心球系统的电子光学<sup>\*</sup>

### Electron Optics of a Concentric Spherical System Composed of Two Electrodes

**摘要** 本文由两电极同心球系统的轨迹解导出了自阴极物面射出的电子轨迹的交轴位置及其倾角的精确与近似表达式,由此出发讨论了系统的电子光学性质,并确定了以阶次分类的各阶电子光学色球差,最后研究了由同心球系统向近贴聚焦系统过渡的一种特殊情况。

**Abstract** In this paper, the exact and approximate formulae of axial intersection position and angle of inclination at this position for the electron trajectory emitted from the photocathode surface have been deduced from the new solution of trajectory for a concentric spherical electrostatic focusing system composed of two electrodes. Electron optical properties of the system are then discussed, electron optical sphero-chromatic aberrations with different orders are defined, that are classified by the order of  $(\epsilon_0/\Phi_m)^{1/2}$ , and a special case of transit of proximity focusing system from the concentric spherical system composed of two electrodes studied.

## 引 言

由两个共同曲率中心的球面电极所组成的球形电容器系统简称两电极同心球系统。研究同心球系统作为静电聚焦像管的成像系统从电子光学观点来看是颇有意义的。这是因为,系统的电位分布和电子轨迹都可写成解析形式,可以定量地研究系统的电子光学性质和像差;无论是严格精确的或是近似实现的同心球系统,都能得到好的像质。由于系统本身具有一系列宝贵的性质:对于凹面阴极-栅状阳极系统,如果接受像的萤光屏制成球面形状,其曲率半径等于成像位置到系统中心的距离,则除了色球差外,场曲与屏面曲率一致,其它类型的像差——彗差、畸变和像散不复存在。因此,不少像管设计都采用接近于同心球系统的结构。六十年代开始发展的第一代级联像增强器的电子光学系统就其本质来说正是属于同心球系统的一种变型。

按照辩证唯物主义观点,在考察事物时,我们必须从本质上认识世界上不存在纯粹的普遍性,要使普遍性广泛得到承认,必须有特殊性来加以证实。因之,由静电阴极透镜的理想模型——同心球系统出发,分析和探讨这类系统聚焦成像所包含的具体的矛盾,解剖它作为阴极透镜所具有的矛盾的特殊性,从中找出一些对于阴极透镜具有普遍意义和规律性的线索,这不但对于研究同心球型像管的电子光学提供理论基础;而且,由于理想模型成像的矛盾的特殊性中正包含静电阴极透镜宽电子束成像的矛盾的普遍性,故对于进一步研究轴对称阴极透镜具有实际意义。

对于两电极同心球系统,以往的工作如 E. Ruska (1933)<sup>[1]</sup>、P. Schagen 等(1952)<sup>[2]</sup>、O.

---

\* 周立伟(Zhou Liwei), 工程光学(Engineering Optics) No. 1 (1978) 71—87

И. Семан(1946,1957)<sup>[3][4]</sup>等先后曾进行了研究,导出了轨迹方程,讨论了系统的成像。但是,他们的工作主要停留在成像的另级近似上。虽然 P. Schagen 等<sup>[2]</sup>以及后来的 Г. М. Кривин(1963)<sup>[5]</sup>曾经讨论了某些特定的成像位置上的球差,可是对于系统的理想成像性质以及任一像面上的电子光学色球差并没有深入探讨,更谈不上研究理想模型的特殊性与阴极透镜的普遍性之间的相互联结。此外,下面我们将指出,在以上的某些著述中还包含着若干概念不明确和原则性错误的地方。

在 E. Ruska 和 P. Schagen 等工作的基础上,作者<sup>[6][7]</sup>导出了自阴极物面以初速度  $v_0$ , 初角度  $\alpha_0$  射出的电子轨迹的交轴位置及其倾角的精确表达式,从而为全面分析两电极和多电极同心系统的成像性质和像差提供基础;在<sup>[8][9]</sup>中,我们曾进一步就此系统作了论述。

本文进一步发展先前的工作。为了揭示规律性,我们借助于几何光学通常采用的符号规则导出同心球系统的轨迹方程另一种形式解,由此可极方便地确定轨迹的交轴位置及其倾角。由它们的展开式出发可讨论系统的成像性质和各阶电子光学色球差,最后研究由同心球系统向平面电容器系统过渡的一种特殊情况。

## (一) 轨迹方程

### 1—1 符号规则

图 1 上所示的是二种不同的同心球系统:凹面阴极-阳极系统和凸面阴极-阳极系统。设球面阴极  $C$  和栅状球面阳极  $A$  的曲率半径为  $R_c$  和  $R_a$ , 系统的共同曲率中心为  $O$ 。

由于系统的球对称性,故可用极坐标  $(\rho, \varphi)$  来描述电子轨迹。令极坐标的原点位于系统的曲率中心  $O$ , 并设阴极  $C$  的电位  $\Phi_c = 0$ , 栅状阳极  $A$  对于阴极  $C$  的电位为  $\Phi_a$ , 电子以初速度  $v_0$ , 初角度  $\alpha_0$  自阴极上某点  $C$  射出。

为了推导适合于上述二种不同的同心球系统的普遍公式,兹规定符号规则:

(1) 线段 设射线行进方向自左至右,故规定线段由左向右为正,由下向上为正,反之为负。为了定出某一线段参量的符号,还需规定线段的计算起点。例如图 1 中各线段参量的计算起点规定如下:

$R_c, R_a, \rho, R_{i\infty}, R_{i\delta_0}$  均以曲率中心  $O$  算起到相应球面的顶点;

$\Delta z$  自理想像面位置  $I_{\infty}^*$  点算起;  $\Delta r$  由  $\varphi=0$  轴线算起。

(2) 角度 一律以锐角来度量,规定逆时针转为正,顺时针转为负。和线段参量要规定计算起点一样,角度也要规定起始轴。图 1 中各角度参量的起始轴为:

$\alpha_0, \delta_0, \varphi, \gamma, \alpha_i$  均以  $\varphi=0$  轴线为起始轴;

$\zeta, \tau$  均以过该点与中心  $O$  的连线为起始轴。

图面上所标注的全部是绝对值。因之,在负的角度或线段前加一负号,使它变为正值。

### 1—2 轨迹方程的推导

同心球系统两电极间的场等效于集中的球心的点电荷所产生的场。故不难求得矢径坐标  $\rho$  处相对于阴极  $C$  的电位  $\Phi_\kappa$  的表达式

$$\Phi_\kappa = E_c R_c \left( \frac{R_c}{\rho} - 1 \right) \quad (1)$$

式中  $E_c$ ——阴极面上的电场强度。当  $\rho = R_c$  时, 则有

$$E_c = \frac{\Phi_{ac}}{R_c(n-1)} \quad (2)$$

这里  $n = \frac{R_c}{R_a}$ , 对于凹面阴极—阳极系统,  $n > 1$ ; 对于凸面阴极—阳极系统,  $n < 1$ 。由此可见, 无论  $n > 1$  或  $n < 1$ ,  $E_c$  永为负值。

在同心球系统中, 电子在初速度  $v_0$ , 初角度  $\alpha_0$  的逸出方向与轴线  $O_c$  所构成的平面内的运动遵循能量守恒定律和有心力场角动量守恒定律:

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{1}{2} m_0 v_0^2 + e \Phi_\kappa \quad (3)$$

$$\rho^2 \dot{\varphi} = R_c^2 \dot{\varphi}_0 = \text{常数} \quad (4)$$

式中,  $m_0, e$  为电子的质量和电荷,  $e$  取绝对值,  $v$  为电子在极坐标  $(\rho, \varphi)$  处的速度;  $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ 。

方程(4)中的常数决定于初条件

$$R_c \dot{\varphi}_0 = v_0 \sin \alpha_0 \quad (5)$$

于是有

$$\rho^2 \dot{\varphi} = R_c v_0 \sin \alpha_0$$

在极坐标  $(\rho, \varphi)$  中, 电子速度  $v$  可表为

$$v^2 = \dot{\rho}^2 + (\rho \dot{\varphi})^2 \quad (6)$$

$$\text{令 } \mu = \frac{R_c}{\rho}, \quad d\mu = -\frac{R_c}{\rho^2} d\rho$$

利用关系式  $\frac{d\varphi}{d\rho} = \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\rho}}$ , 由(3)(5)(6)式并考虑(1)(2)式, 便得到

$$d\varphi = \frac{-\sin \alpha_0 d\mu}{[1 + p(\mu - 1) - \mu^2 \sin^2 \alpha_0]^{1/2}} \quad (7)$$

式中  $p(n-1) = \frac{\Phi_{ac}}{\epsilon_0}$ ,  $\epsilon_0 = \frac{1}{2} \frac{m_0}{e} v_0^2$ 。  $\epsilon_0$  为静止的光电子为获得其发射能量所要求的加速电位, 称为初电位; 参量  $p$  虽只仅是一个数学符号, 但它与  $(n-1)$  的乘积具有明显的物理意义; 表示系统的加速电位与初电位的比值。通常  $p(n-1)$  的值是很大的, 在一般的像管中,  $p(n-1) = 10^4 \sim 10^5$ 。

积分(7)式, 考虑到初始条件  $\rho = R_c$  时,  $\mu = 1, \varphi = 0$ ; 便有

$$\mu = \frac{R_c}{\rho} = \left( 1 - \frac{p}{\sin^2 \alpha_0} \right) \cos \varphi - \text{ctg} \alpha_0 \sin \varphi + \frac{p}{2 \sin^2 \alpha_0} \quad (8)$$

(8)式实际上是 E. Ruska 方程<sup>[1]</sup>。

由图 1, 可求得在座标  $(\rho, \varphi)$  处轨迹的切线与过该点与中心  $O$  之联线间的夹角  $\zeta$ , 因为  $\tan \zeta$  等于  $(\rho, \varphi)$  处垂直于矢径方向的速度  $\rho \dot{\varphi}$  与沿着矢径方向的速度  $\dot{\rho}$  的比值

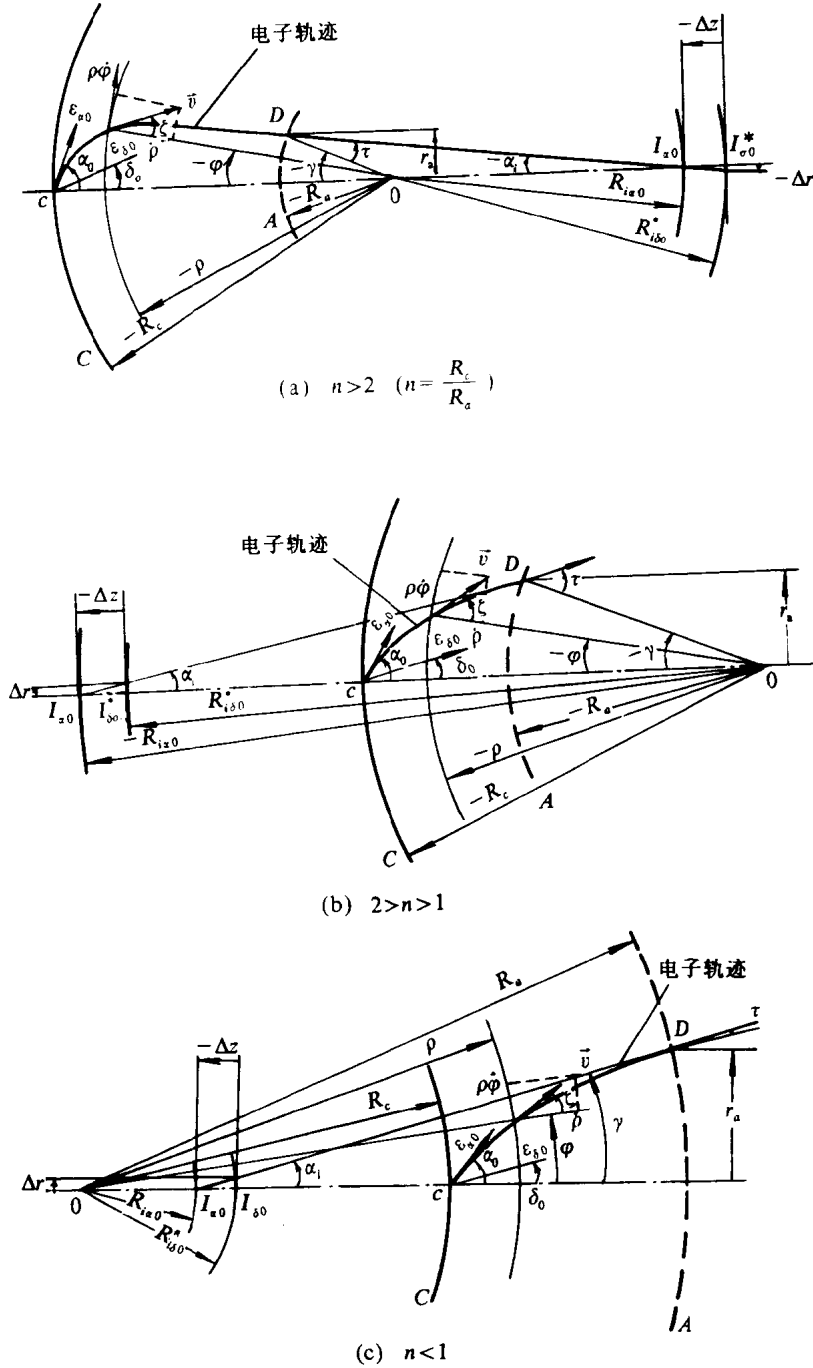


图 1 两电极同心球系统的电子轨迹

§

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{\rho \dot{\varphi}}{\dot{\rho}} = \rho \frac{d\varphi}{d\rho} = -\mu \frac{d\varphi}{d\mu}$$

因之,由(7)式可得到

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{\mu \sin \alpha_0}{[1 + p(\mu - 1) - \mu^2 \sin^2 \alpha_0]^{1/2}} \quad (10)$$

而由(8)式,得

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{\mu}{(1 - \frac{p}{2 \sin^2 \alpha_0}) \sin \varphi + \operatorname{ctg} \alpha_0 \cos \varphi} \quad (11)$$

联立(10)(11)和(8)式,则可解出  $\sin \varphi, \cos \varphi$  的表达式:

$$\sin \varphi = -\frac{(\mu - 1)(c + d_0)}{bd_0 + b_0 c} \sin \alpha_0 \quad (12)$$

$$\cos \varphi = \frac{bc + b_0 d_0}{bd_0 + b_0 c} \quad (13)$$

式中

$$b_0 = \cos \alpha_0,$$

$$b = [1 + \frac{\Phi_{ac}}{\epsilon_0} \frac{(\mu - 1)}{(n - 1)} - \mu^2 \sin^2 \alpha_0]^{1/2} \quad (14)$$

$$c = 1 - 2\mu(n - 1) \frac{\epsilon_0}{\Phi_{ac}} \sin^2 \alpha_0$$

$$d_0 = 1 - 2(n - 1) \frac{\epsilon_0}{\Phi_{ac}} \sin^2 \alpha_0$$

方程(12)(13)实质上与 E. Ruska 的公式(8)和 P. Schagen 等<sup>[2]</sup>推导的公式是一致的\*。但是,我们在下面可以发现,(12)(13)式在使用上更为简捷方便,而且无论对于  $n > 1$  或  $n < 1$  的系统都是普遍适用的。应该强调的是,在使用以上公式时,线段和角度都必须遵循上述的符号规则。

## (二) 实际轨迹交轴位置 $R_{ia0}$ 及其斜率 $\operatorname{tg} \alpha_i$ 的确定

### 2—1 $R_{ia0}$ 和 $\operatorname{tg} \alpha_i$ 的精确表达式

按照(10)(12)和(13)式,不难求得自阴极上  $c$  点以初电位  $\epsilon_0$ , 初角度  $\alpha_0$  射出到达阳极  $A$  上  $D$  点的电子轨迹,因此可以定出轨迹在  $D$  点的切线与矢径  $OD$  间之夹角  $\tau$  和  $D$  点的角度坐

\* 按(12)和(13)式,可求得 P. Schagen 方程<sup>[2]</sup>

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{-\cos \alpha_0 + [1 + p(\mu - 1) - \mu^2 \sin^2 \alpha_0]^{1/2}}{-\frac{p}{\sin \alpha_0} + (\mu + 1) \sin \alpha_0}$$