“复合电磁同心球系统的成像电子光学”系列文章后记

周立伟

我很高兴,《光学学报》于 2019 年 39 卷第 4 期发表了我撰写的“复合电磁同心球系统的成像电子光学”系列文章。中国激光杂志社的同仁们希望我写一篇后记谈谈这些文章的思考、酝酿、诞生过程及其意义。

早在 40 年前,随着“文化大革命”的结束,人们热情迸发,欢呼新时代的到来。我和那时大多数知识分子一样,在思考如何更加努力,把失去的时光追回来。当时,我就想把我在苏联研究的静电聚焦同心球系统电子光学的一套理论扩展到电磁聚焦领域。在成像电子光学领域,静电近贴聚焦系统、静电聚焦同心球系统、均匀平行复合电磁聚焦系统,以及复合电磁聚焦同心球系统的电子光学是分别进行研究的,而这些成像系统具有一些共同的属性——相同的几何结构和简单的电磁配置。很显然,若磁场消失或球面半径变成无穷大时,复合电磁聚焦同心球系统就变成静电聚焦同心球系统或平行均匀电磁聚焦系统,静电聚焦同心球系统就变成近贴静电聚焦系统。我在想,复合电磁聚焦同心球系统的电子轨迹能否用统一的、普适的解析解来表达。只要求出近轴方程的两个特解,系统的成像特性和像差等问题就能迎刃而解。但微分方程中既有电参量,又有磁参量,还有几何参量及轴向初速度参量,求解析解谈何容易。这一棘手的问题,自然成为人们关心的焦点,但一直没有得到满意的结果。当然,电子光学近轴方程是一个二阶线性齐次微分方程,人们不难通过数值方法由计算机进行求解,然其缺点是难于分析其结果以研讨其蕴含的物理特性。幸运的是,20 世纪 60 年代初我在留学苏联期间,对两电极静电聚焦同心球系统和平行均匀电磁聚焦系统的电子光学有过较为深入的研究。于是,我用类比的方法,并不直接求解微分方程,而是将它与已知的平行均匀电磁聚焦系统的特解进行类比,引入几何参量 $n=R_c/R_a$(R_c 和 R_a 分别为同心球系统球面阴极和球面阳极的曲率半径),利用朗斯基行列式,导出了复合电磁聚焦同心球系统的两个特解及其电子转角解的表达式。当球面半径趋于无穷大即 $n=1$ 时,它就变成均匀平行电磁聚焦系统的解,当磁场消失即磁感应强度 $B=0$ 时,它就变成两电极静电聚焦同心球系统的解。我在 1978 年“伦敦国际光电子成像器件会议”上宣读了这一研究结果,论文收入 1979 年 *Advances in Electronics and Electron Physics* 第 64B 卷。虽然论文中的轨迹解析解并不是由微分方程严格导出,但它是正确的,因为它满足电子光学近轴方程。顺便指出,几乎在同一时间,美、苏两国的电子光学科学家也在研究这一问题,但都没有获得描述复合电磁聚焦同心球系统中电子行进轨迹的精确解析解。

当今日考察研究这一问题时,我是直接由求解二阶线性齐次微分方程出发,严密地推导了电子光学近轴方程两个特解的解析解。我所做的工作说明由二阶齐次线性微分方程出发可以直接获得复合电磁聚焦同心球系统的轨迹的解析解。但更主要的是,我的文章证实了以下两个重要结论。

首先,首次回答了电子光学研究者长期以来一直没有弄清楚的问题。若近轴电子 $v(z,\varepsilon_z)$ 自阴极面物

点逸出时，其轴向初能为 $\varepsilon_z=\varepsilon_{z1}$，令它到达像面 z_i 处的轴上点定义为理想像点，即 $v(z_i,\varepsilon_{z1})=0$。那么，自同一物点逸出的另一相邻的近轴电子 $v(z,\varepsilon_z)$，其 $\varepsilon_z\neq\varepsilon_{z1}$，它将到达理想像点的近旁，即 $v(z_i,\varepsilon_z)\neq 0$。问题是，此 $v(z,\varepsilon_z)$ 形成的偏离将有多大，它是什么量级，主要受什么因素影响？我的研究明确说明了此 $v(z_i,\varepsilon_z)$ 乃是一个一级小量，仅与阴极面的电场强度 E_c、线放大率 M 和像面处的电位 φ_{ac} 相关，与磁感应强度 B 无关。因此，当研究成像电子光学的三级几何横向像差时，积分号前出现的与 $v(z_i,\varepsilon_z)$ 相关的项都应该略去，否则它将构成四级小量。这就解决了长期以来研究成像电子光学三级几何横向像差表达式中与 $v(z_i,\varepsilon_z)$ 相关的积分要否取舍的问题。此外，由推导得到的特解 $v(z_i,\varepsilon_z)$ 表达式，可直接推导出成像系统普遍成立的、决定系统极限分辨率的 Recknagel-Artimovich（R-A）公式。这样，我们为 R-A 公式的溯源找到了理论依据。

其次，严格证明了在成像电子光学中，无论是静电聚焦或是复合电磁聚焦成像系统，其横向像差应由近轴横向像差与几何横向像差构成。近轴横向像差通常由（二级 + 三级）近轴色球差、近轴放大率色差与近轴各向异性彗差构成。当然，对静电系统，近轴横向像差则由（二级 + 三级）近轴色球差与三级近轴放大率色差构成；几何横向像差与通常电子光学的三级几何横向像差相仿，如球差、像散（场曲）、彗差、畸变等。这样，就把成像电子光学系统横向像差的构成说清楚了。

应该指出，无论是在俄罗斯还是西方其他国家学术界，他们的成像电子光学研究并不严格区分近轴横向像差与几何横向像差。例如，俄罗斯电子光学同仁通常关心的仅是 $\varepsilon_{z1}=0$ 即极限像面上形成的横向像差，其横向像差表达式并不严格区分何者是近轴横向像差，何者是几何横向像差。而我们的成像电子光学研究给出的是在 $\varepsilon_{z1}=0$ 与 $\varepsilon_{z1}=\varepsilon_{max}$ 之间任一像面上的横向像差，并把横向像差严格区分为近轴横向像差和几何横向像差。

将横向像差定义为近轴横向像差和几何横向像差，是我在考察静电聚焦同心球系统的近轴轨迹与实际轨迹的差异严密论证后下的结论，是经得起考验的。几十年来，我的论断没有受到成像电子光学学术界的任何质疑，甚至我的关于成像电子光学的一些学术观点被俄罗斯联邦工程科学院认为“创建了自己的学派”。21 世纪初，我与俄罗斯科学院普通物理研究所成像电子光学的一些高级研究员们合作，共同发表了关于动态电子光学时间像差的论文，文中也是按照我的观点，将时间像差划分为近轴时间像差与几何时间像差。

下面谈谈关于复合电磁成像系统的近轴方程渐近解的问题。渐近解求解电子光学近轴方程的方法与步骤是由俄罗斯学者提出的，但是，他们仅用一个非常简单的均匀平行电磁聚焦系统作为例子来证明，这是远远不够的。无论静电聚焦还是复合电磁聚焦系统，渐近解求解近轴方程二特解的途径的有效性和正确性，俄罗斯学者的文献并没有给予严格的证明。我的工作就是利用已知的静电聚焦同心球系统和复合电磁聚焦同心球系统的解析解，证明渐近解途径是否切实可行。研究结果证明了该途径是可行的，为渐近解求解电子光学近轴方程的特解开辟了道路。

其次，我关心渐近解求解近轴方程还有一个更重要的原因。渐近解求解电子光学近轴方程的途径提出虽然有 40 年之久，但并没有受到电子光学学术界的重视。俄罗斯学者提出的渐近解方法给出了求解近轴方

程二特解的具体途径和表达式，尽管每个渐近解系数的获得需要求解多个二阶线性齐次微分方程，其过程和步骤似乎十分繁琐和复杂，但是，它给出了一条求解电子光学近轴方程二特解的明确的途径。这是成像电子光学以前的研究没有做到的。由于没有相应的理论与方法指引，国内外成像电子光学逆设计的研究收效甚微。渐近解途径也许是值得从事成像电子光学逆设计人员尝试和思考的。

下面我简单谈一下自己从事科学研究的体会。我认为，对于从事基础研究的科学工作者来说，其重要使命是探索隐藏在黑暗中的自然规律。在成像电子光学的科学研究中，我实际是遵循物理学大师们常用的科学方法，并没有什么新颖之处。

我通常的做法如下：探索和研究一种简单明了的模型，通过所选取的模型弄清楚相应的物理现象的特点，看它是否能够相符地描述所研究的物理现象的基本特征，并揭示其中蕴涵的主要规律（研究特殊性，普遍性寓于特殊性之中）。

然后将这一模型作为出发点，并进行演示，对所勾勒和推进的理论进行详细的包括数学推演在内的研究，构筑新理论的框架（模型推演）。研究时从简单明了的模型演进出一套完备的理论，由简单的情形推演到复杂的情形，然后由特殊的理论过渡到构筑普遍的理论，使之成为一套比较成熟完备的理论（由特殊性演进到普遍性）。当然，理论的验证需要进行严密的逻辑推演与实践考验，也需要考察其适用情况。写到这里，读者会觉得我讲的头头是道，以为我的科学研究特别顺利。实际上，我不知道走了多少弯路，以致我经常怀疑自己能否在科学研究的道路上继续走下去。

我深深地体会到，在科学研究中，最重要的是提出问题和思考问题。思考存在的问题常给我指引研究的方向。例如，在研究同心球系统的问题时，我能不能给这四种类型的电子光学成像以统一的物理解释，并尝试求解呢？再如，影响成像系统电子光学分辨率的 R－A 公式是前人概括总结得到的，我能否推导其原理并给出科学解释呢？又如，关于求解电子光学近轴方程的二特解，作者提出渐近解途径，但仅给出了一个极为简单的实例——均匀平行电磁聚焦。这并不能充分说明该方法之可行和有效，能否找一些更复杂的实例——静电聚焦和电磁聚焦，对渐近解的方法进行更有效的考察？

我认为，在科学研究的每一环节中一定要使自己的论证合乎逻辑，要反复审视自己的观点和论点，避免逻辑上的矛盾。例如，对一个科学问题，如果我按照这样的步骤和方法做下去，逻辑上一定会有什么样的结果。若得不到预期的结果，那可能是理论本身有误，或是方法有误，或假设环节有误，一定要仔细分析原因。因此，对科学工作者来说，养成思考周全、逻辑严密的习惯是十分重要的。