

EI 源的离子光学数字模拟系统开发与研究

杨丽娜^{1,2}, 熊行创^{1,2}, 刘子龙^{1,2}, 方向^{1,2}

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029;

2. 国家市场监督管理总局重点实验室(计量数字化与数字计量), 北京 100029)

摘要: 离子光学系统是电子电离(EI)源的重要组件, 利用静电透镜提取离子室中的离子并进行聚焦、加速和整形, 调控离子束的速度和能量。离子光学系统的性能直接影响质谱仪的灵敏度和稳定性。基于数字模拟手段的 EI 源离子光学系统能够追踪离子从产生到进入质量分析器前的运动轨迹, 有助于深入理解和认识离子在系统中的动力学行为, 研究离子运动的关键影响因素。本研究建立了 EI 源离子光学数字模拟系统 Sim-EI-Lens-COM-V1.0, 基于该系统构建了柱状和片状 2 种透镜的离子光学系统, 探究离子光学系统的几何结构对离子传输效率的影响。通过电压粗调、细调和精调, 获得最大离子通过率时的优化电压组合, 柱状透镜离子光学系统的通过率可达到 97%, 片状透镜可达到 99% 以上。不同离子的传输时间随质荷比的增加而延长, 相同离子通过柱状透镜的传输时间短于片状透镜。离子在 2 种离子光学系统出口处的径向能量分布具有相似性, 片状透镜的轴向能量分布一致性高于柱状透镜。

关键词: 电子电离(EI)源; 离子光学; 静电透镜; 传输效率

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2025)01-0088-09

DOI: 10.7538/zpxb.2024.0067

CSTR: 32365.14.zpxb.2024.0067

Development and Research of Ion Optics Digital Simulation System for EI Source

YANG Li-na^{1,2}, XIONG Xing-chuang^{1,2}, LIU Zi-long^{1,2}, FANG Xiang^{1,2}

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of Metrology Digitalization and Digital Metrology, State Administration for Market Regulation, Beijing 100029, China)

Abstract: The ion optical system is an important component of electron impact (EI) ion source, which uses electrostatic lens to extract ions in the ion chamber, further focus, accelerate and shape, and regulate the speed and energy of the ion beam. The performance of the ion optical system will directly affect the sensitivity and stability of the mass spectrometer. Based on the digital simulation, the ion optical system of EI source can be used to track the movement trajectory of ions from generation to the moment before entering the mass analyzer, which is helpful to deeply understand and recognize the dynamic behavior of ions in the system, and study the key influencing factors of ion movement. In this paper, the ion optical digital simulation system of EI source named Sim-EI-Lens-COM-V1.0 was developed. The geometric structure of each component in the simulation system can

be uniformly configured and modified, which is suitable for the simulation of different types of ion optical systems. Based on the developed simulation system, two kinds of typical ion optics with cylindrical and sheet lenses were constructed. The key factors affecting the ion transport efficiency, such as geometric size and voltage parameter of each component in the simulation system, the species and total number of ions produced, and the time of the ion to pass through the system, were studied. Firstly, the influences of the electrostatic lens thickness on the ion dynamic behavior and transport efficiency were investigated. Then appropriate number and initial distribution of ions were selected, and the parametric scanning calculations of the voltage parameters were carried out. Through coarse, fine and precise adjustment of different voltage step values, the optimal voltage combinations of two typical ion optics systems were achieved. The performances of the two ion optical systems were compared under the optimal voltage combination. The result showed that the ion transmission in cylindrical lens ion optical system can reach to 97%, and it can reach more than 99% in sheet lens. The time for ions to pass through the system increases with the increasing of ion mass-charge ratio. The time to pass through the cylindrical lens is shorter than that of the sheet lens under the same ion mass-charge ratio. The radial energy distributions of ions at the outlet of the two ions optical systems are similar, and the axial energy distribution at the outlet of the sheet lens is more concentrated with higher consistency.

Key words: electron impact (EI) ion source; ion optics; electrostatic lens; transmission efficiency

电子电离源(electron impact ion source, EI)是最早开发并至今仍被广泛应用的离子源之一,一般由电离室、灯丝、离子聚焦透镜和1对磁极组成。EI源的工作原理为灯丝发射电子,经聚焦并在磁场作用下穿过电离室到达收集极,与进入电离室的样品分子碰撞,在一定能量电子的作用下,样品分子发生电离,离子被导出、加速、聚焦成离子束进入质量分析器。EI源具有结构简单、稳定性好、离子化效率高优点,但存在碎片离子多、灵敏度低等缺点^[1]。优化和改进EI源的装置参数,例如电压、组件的几何形状和尺寸等,提高离子传输效率和离子聚焦性能,增加待测离子的信号强度,对于提高仪器的整体性能和应用价值具有重要意义^[2-7]。

针对EI源的优化研究可以分为2个方面:1)通过研究电离室的各项参数和背景环境对电离效率的影响,增加电离室内生成的离子数量。例如,Amirav等^[8]通过在离子室外增加腔室屏蔽电离区从而得到更窄的离子能量分布,提高了离子束质量;Sreekumar等^[9]研究了电子碰撞截面的变化和离子源的压力依赖性;Kawashima等^[10]通过改进灯丝材质提高了电离效率;2)通过研究排斥极和静电透镜组成离子光学系统的各项参数

对电离室中生成离子的影响,提高导出效率和传输效率。例如,Brkić等^[11]通过改变离子源透镜系统的几何参数(透镜的间距及中心圆孔的孔径),研究注入质量分析器的离子数量、聚焦方式以及对仪器灵敏度的影响;Ren等^[12]利用SIMION 8.1建模,并从相位空间角度研究离子的初始位置和电极电压参数对聚焦性能、离子传输效率以及离子从聚焦电极流出时速度分布的影响。

当前,研究EI源离子光学系统面临的问题是:1)适用范围有限,大多数只可用于特定场景和用途的模拟计算,如,研究分析几何结构和特定几个几何参数的影响,或者重点关注特定电极电压参数的影响;2)参数配置分散,如,几何参数需要在几何构建过程中调整,物理场参数需要在物理建模时确定,难以实现仪器设计和优化过程中不同类型参数的批量调整,无法满足仪器在各种运行状态下的测试条件和验证要求;3)优化方向具有主观性,参数筛选过程中多依靠经验积累,可能导致在优化结果上出现误判的现象。

本文基于数字模拟技术拟构建EI源离子光学数字模拟系统Sim-EI-Lens-COM-V1.0(以下简称“模拟系统”),模拟系统中电离室、透镜几何结构、透镜电压等参数均可以统一配置及修改,

适用于不同类型离子光学系统的模拟。基于该模型,本研究构建柱状和片状2种离子光学系统,分析离子从产生到进入质量分析器前的运动轨迹,探究离子光学系统的几何结构对离子传输效率的影响;基于多参数组合扫描方式,通过粗调、细调和精调的电压调优实验确定最优电压组合;统计并分析离子光学系统的离子通过率、通过时间和出口能量分布,研究系统的传输效率

和聚焦效果。通过以上研究,深入理解和认识离子光学系统中离子运动行为及其影响因素,为EI源离子光学系统的设计研发提供数据支持。

1 模拟设计与实现

1.1 系统设计

模拟系统由几何模型、物理模型和计算模型这3个子模型融合而成,其基本框架示于图1。

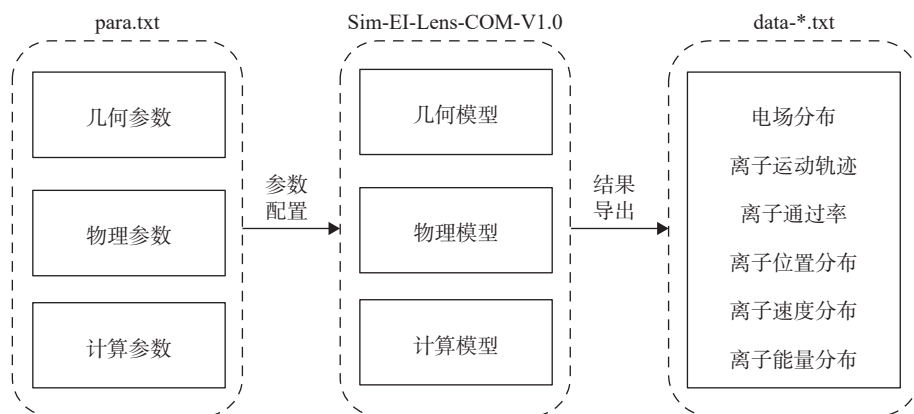


图1 模拟系统基本框架图

Fig. 1 Frame diagram of the simulation system

几何模型定义模拟系统的几何结构,包括电离室、推斥极、引出、加速、聚焦和入口透镜,并定义离子光学系统各个关键组件的位置、尺寸等采用自主设计的离子光学系统通用几何模型,参数均可统一配置。通过修改几何参数配置,即可生成不同几何结构的离子光学系统,适用范围较广。

物理模型由电场模块和离子模块组成。电场模块定义由系统中各个组件施加电压所形成的复合静电场,确保电场分布和特性与实验条件一致。离子模块定义离子的物理属性和生成方式。离子的物理属性包括离子的质量和电荷等。离子的生成方式有2种,即数据文件导入和自定义密度分布函数,可设置离子的初始位置、速度和生成时间等。同样,物理参数也可统一配置,方便用户进行批量测试实验。

计算模型包括网格生成和数值计算。网格生成采用自主设计的通用网格剖分模型,通过将几何模型进行分区,重点区域的网格精细化,非重点区域的网格粗糙化,减少总体网格数量,快速生成高精度网格。数值计算包括设置系统的

计算时间、步长和算法等。默认算法采用GMRES迭代求解法(Generalized Minimum RESidual)、雅可比预处理方法和龙格-库塔算法精确时间步进方式,确保计算的精度。

模拟系统的几何参数、物理参数和计算参数是通过导入参数文件para.txt进行统一配置和修改。计算时,通过更新参数文件,即可修改目标研究对象,节省建模时间;完成参数配置后,可直接执行计算,计算结果以数据文件data-*.txt导出,供用户进一步统计与分析。

在EI源的仿真领域,传统模型,如基于Simion软件构建的离子光学系统仿真模型^[1-3],尽管也能实现对EI源特性的模拟,但在关键参数调整方面仍存在局限性。当涉及到几何参数和网格参数变动时,这些模型通常要求用户手动重新建模,这一过程不仅耗时且无法实现批量计算。此外,面对多参数优化问题,由于计算成本的制约,现有模型往往只能按照预设顺序依次针对单个参数进行优化,而无法实现全面的参数遍历。本文所提出的模拟系统通过集成参数化扫描技术,显著提升了模型的自动化程度和计算效率:1)能

够自动更新模型参数,从而避免了手动重建模型的繁琐工作,并成功实现了批量计算;2)在计算效率和精度方面均有显著提升,能够执行全参数扫描,有效克服了现有模型在多参数优化方面的局限性。

综上所述,本文所提出的模拟系统的优点和创新性有以下几点:1)内置自主设计的通用几何模型和网格生成方法,可用于模拟仿真各种几何结构的离子光学系统,节省用户设计建模的时间;2)全局参数可配置,使用 para.txt 文件即可批量调整系统参数,缩短实验周期;3)充分利用 COMSOL 多核和集群计算功能,可同时处理大量的离子计算,提高计算效率。本实验所使用的计算服务器规格为 Intel(R) Xeon(R) Gold 5218 CPU@2.30 GHz,构建的2种离子光学系统网格数量约30万,时间步长 5×10^{-9} s,计算静电场用时不超过10 s,计算10 000个离子运动轨迹的用时约7 min,单次仿真的计算时间在可控范围内。

1.2 系统实现

基于模拟系统,通过对几何参数、物理参数以及计算参数进行合理配置和调整,能够实现对特定离子光学系统的构建。

本文构建了2种不同几何结构的离子光学系统:一种主要由厚透镜组成,透镜中心开孔,整体呈圆柱状,简称“柱状透镜”;另一种由薄透镜组成,透镜中心开孔,整体呈薄片状,简称“片状透镜”。这2种离子光学系统的几何结构示于图2,每个透镜上均施加不同的电压,在电场作用下,离子从电离室中被导出、聚焦和整形形成离

子束,最终到达离子光学系统出口,供下一步的质量分析。

几何模型中各个组件的尺寸列于表1。2种离子光学系统中透镜中心位置相同、厚度不同,另外,柱状透镜组中透镜1的中心开孔参照实验室中实际EI源设备中透镜1的几何结构设计,采用圆锥孔与圆柱孔相连的方式。

表1 几何模型参数

Table 1 Parameters of geometric modeling

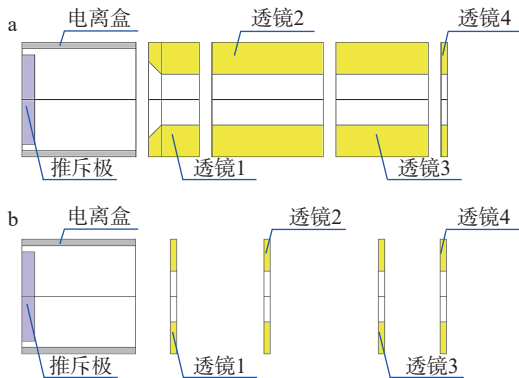
名称 Name	柱状透镜 Cylindrical lens	片状透镜 Sheet lens
排斥极厚度 d_0/mm	1	1
排斥极中心位置 z_0/mm	0.5	0.5
透镜1厚度 d_1/mm	4	0.5
透镜1中心位置 z_1/mm	12	12
透镜2厚度 d_2/mm	8.8	0.5
透镜2中心位置 z_2/mm	19.4	19.4
透镜3厚度 d_3/mm	7.3	0.5
透镜3中心位置 z_3/mm	28.45	28.45
透镜4厚度 d_4/mm	0.5	0.5
透镜4中心位置 z_4/mm	33.35	33.35
透镜中心开孔半径 r/mm	2	2

物理模型中,需要配置系统各个组件上所施加的电压值以及离子的初始状态。不同的电压组合影响整个系统最终的电场分布,而离子的初始状态关系到离子运动的初始条件。离子光学系统中,设置的电压参数列于表2。其中,排斥极电压 U_r 和静电透镜1~3上所施加的电压 $U_1 \sim U_3$ 只选定取值范围,以供后续电压调优。

表2 电压参数

Table 2 Parameters of voltage

名称 Name	电压值 Voltage/V
排斥极	0~40
电离室	0
透镜1	0~-100
透镜2	0~-200
透镜3	0~-100
透镜4	0



注: a. 柱状透镜; b. 片状透镜

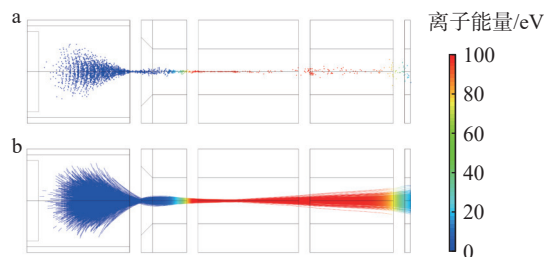
图2 2种离子光学系统的几何结构示意图

Fig. 2 Geometric structure diagrams of two ion optical system

通过设置离子的物理属性和产生方式来确定离子的初始状态。EI源电离过程包括电子的产生、加速、对气体分子的轰击以及离子的形

成。加速电子进入EI源电离室与待分析的气体分子发生碰撞,电子会将气体分子中的1个或多个电子抽离出来,使分子变成正离子和电子,这些正离子具有一定的能量分布和位置分布,是离子光学系统仿真计算的必要初始条件。本文对离子的初始条件做了简化处理,设定离子的初始能量为0 eV,离子的初始位置为以电离室为中心的正态分布(分布函数参见 Supporting Information 文档,请登录《质谱学报》网站 <https://zpxb.xml-journal.net> 下载,以下同)。

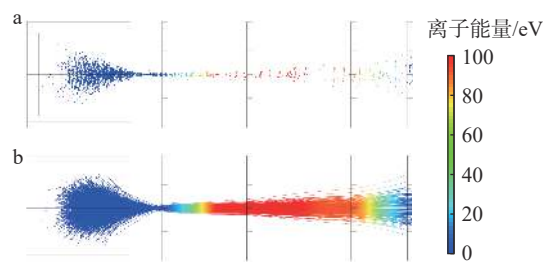
基于该模拟系统,计算2种离子光学系统中离子的位置和能量变化,示于图3、4。从图中可以直观地了解离子的运动行为,研究离子被提取、聚焦和整形的过程。



注: a. 瞬态位置; b. 运动轨迹

图3 柱状透镜离子光学系统中位置和能量变化

Fig. 3 Ion position and energy change in ion optics system of cylindrical lens



注: a. 瞬态位置; b. 运动轨迹

图4 片状透镜离子光学系统中位置和能量变化

Fig. 4 Ion position and energy change in ion optics system of sheet lens

2 测试实验与结果分析

基于2种不同几何结构的离子光学系统研究影响离子传输效率的关键因素,通过统计离子光学系统的最大离子通过率、离子通过光学系统的时间(通过时间)以及出口离子能量的轴向和径向分布来评估系统的传输效率。在这4个

评估指标中,最大离子通过率与单次实验通过离子光学系统的离子数量密切相关,是决定仪器灵敏度的核心参数;通过时间关系到单位时间通过系统的离子数量,反映了仪器的检测灵敏度;出口离子能量的轴向分布关系到单位时间内通过质量分析器的离子数量,也反映了仪器的检测灵敏度;出口离子能量的径向分布与离子束的发散性有关,决定了后续通过质量分析器的离子数量,反映了仪器的稳定性。

本实验设定电离室中初始生成10 000个离子(原因分析参见 Supporting Information 文档),初始速度为零,计算并统计不同电压组合下离子光学系统的离子通过率、通过时间和出口能量分布。

2.1 电压组合调优

当静电透镜上所施加的电压发生变化时,离子光学系统的电场分布也会发生变化,离子束的传输效率随之改变。针对排斥极电压 U_r 和静电透镜1~3上所施加的电压 $U_1 \sim U_3$ 进行电压组合扫描,并统计离子光学系统出口处的离子通过率 p ,电压调优的实验结果列于表3(详细的调优过程参见 Supporting Information)。

表3 电压调优实验的步进值

Table 3 Step values of voltage adjustment experiments

步进值 Step value	排斥极 Repeller/V	透镜1 Lens 1/V	透镜2 Lens 2/V	透镜3 Lens 3/V
电压粗调	10	-25	-50	-25
电压细调	2	-5	-10	-5
电压精调	1	-1	-2	-1

2.1.1 电压粗调 在电压粗调实验中,设定离子质荷比为 m/z 69,参考表2中的电压取值范围,计算不同电压组合下的离子通过率 p ,筛选最大离子通过率时的最优电压组合。计算服务器规格 Intel(R) Xeon(R) Gold 5218 CPU@2.30 GHz,电压粗调实验的总耗时约18 h。汇总实验结果得到一系列离子通过率云图(参见 Supporting Information 图1~12),2种几何结构离子光学系统的最优电压组合列于表4。总结不同电压组合下2种离子光学系统的离子通过率变化规律,得到的粗调后电压优化取值范围列于表5。

2.1.2 电压细调 基于电压粗调实验的结论,进一步对电压细调,保持 m/z 69不变,参考表5中

表4 2种离子光学系统粗调最优电压组合

Table 4 Optimal values of coarse voltage adjustment for two ion optical systems

透镜 Lens	U_r/V	U_1/V	U_2/V	U_3/V	离子通过率 Ion transmission
柱状	0	-25	-200	-50	0.9519
片状	0	0	-200	-100	0.9651

表5 2种离子光学系统粗调电压优化取值范围

Table 5 Optimal values of coarse voltage adjustment range for two ion optical systems

透镜 Lens	U_r/V	U_1/V	U_2/V	U_3/V
柱状	0~10	-25~-50	-150~-200	-25~-50
片状	0~10	0~-25	-150~-200	-75~-100

粗调后的电压优化取值范围,继续筛选最优的电压组合。计算服务器规格不变,电压细调实验的总耗时约 21 h。汇总实验结果得到一系列离子通过率云图(参见 Supporting Information 中图 13~24),2 种几何结构离子光学系统的最优电压组合列于表 6。总结不同电压组合下 2 种离子光学系统的离子通过率变化规律,得到的细调后电压优化取值范围列于表 7。

2.1.3 电压精调 基于细调实验结论继续进行电压精调。保持 m/z 69 不变,参考表 7 中细调后的电压优化取值范围,分析不同电压组合下的离子通过率 p ,筛选最优电压组合。计算服务器规格不变,电压精调实验的总耗时约 21 h。汇总实验结果得到一系列离子通过率云图(参见 Supporting Information 中图 25~30),总结不同电压组合下 2 种离子光学系统的离子通过率变化规律,得到的精调后电压优化取值范围列于表 8。

保持离子初始分布相同,改变离子质荷比,研究 m/z 2 和 m/z 1 002 在上述条件下的电压精调

表6 2种离子光学系统细调最优电压组合

Table 6 Optimal values of fine voltage adjustment for two ion optical systems

透镜 Lens	U_r/V	U_1/V	U_2/V	U_3/V	离子通过率 Ion transmission
柱状	0	-25	-200	-40	0.9694
片状	0	0	-150	-100	0.9909

表7 2种离子光学系统细调电压优化取值范围

Table 7 Optimal values of fine voltage adjustment range for two ion optical systems

透镜 Lens	U_r/V	U_1/V	U_2/V	U_3/V
柱状	0~2	-25~-30	-190~-200	-30~-45
片状	0~2	0~-5	-150~-160	-95~-100

表8 2种离子光学系统精调电压优化取值范围

Table 8 Optimal values of precise voltage adjustment range for two ion optical systems

透镜 Lens	U_r/V	U_1/V	U_2/V	U_3/V	离子通过率 Ion transmission
柱状	0~2	-25~-30	-190~-200	-30~-45	0.9085~0.9701
片状	0	0~-5	-150~-160	-95~-100	0.9511~0.9910

实验,得到一系列离子通过率云图(参见 Supporting Information 中图 31~42)。3 种不同质荷比离子 m/z 2、69、1 002 经过精调实验得到的最优电压组合列于表 9。

分析不同电压组合下 2 种离子光学系统的离子通过率变化规律。可知,当离子质荷比减小(m/z 2)时,2 种离子光学系统中电压优化结果与 m/z 69 时基本一致;离子质荷比增大(m/z 1 002)时,在片状透镜离子光学系统中电压优化取值范围均有不同程度的缩小,离子通过率降低。

2.2 离子通过时间

在精调的最优电压组合下,计算并统计 2 种离子光学系统中离子通过光学系统到达出口的

表9 2种离子光学系统精调的最优电压组合

Table 9 Optimal values of precise adjustment for two ion optical systems

透镜 Lens	质荷比(m/z)	U_r/V	U_1/V	U_2/V	U_3/V	计算时间 Computation time/s	离子通过率 Ion transmission
柱状	2	0	-25	-200	-39	5×10^{-5}	0.9690
	69	1	-25	-200	-39	5×10^{-5}	0.9700
	1002	1	-25	-200	-39	5×10^{-5}	0.9695
片状	2	0	0	-152	-100	5×10^{-5}	0.9924
	69	0	0	-152	-100	5×10^{-5}	0.9923
	1002	0	-5	-160	-100	5×10^{-5}	0.9374

时间。为减少模拟系统的计算时间对离子通过率的影响,将计算时间由 $50\ \mu\text{s}$ 增加至 $100\ \mu\text{s}$,通过的离子数目随时间的变化示于图 5。

从图 5 可知,对于这 2 种几何结构的离子光学系统,离子通过系统的时间随着质荷比的增加而延长,相同离子通过柱状透镜离子光学系统的时间短于片状透镜。当离子质荷比为 $m/z\ 1\ 002$ 时,片状透镜离子光学系统中离子通过率降低,一部分原因是由于离子质荷比增加,另一部分原因是由于电压调优实验中出口处离子通过率的采样时间相同,而离子通过系统的时间会随着质荷比的增大而延长,导致在相同的实验时间内系统内还有部分能够通过离子未到达出口,使得最终统计的离子通过率偏低。

2.3 出口离子能量分布

统计离子质荷比为 $m/z\ 69$ 时,粗调、细调和

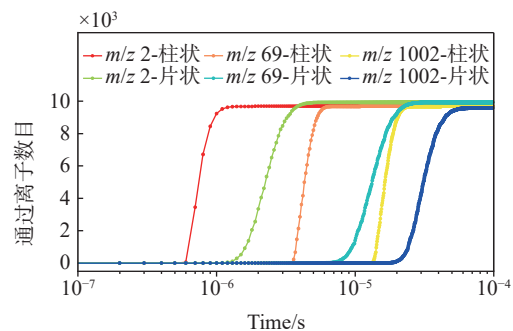
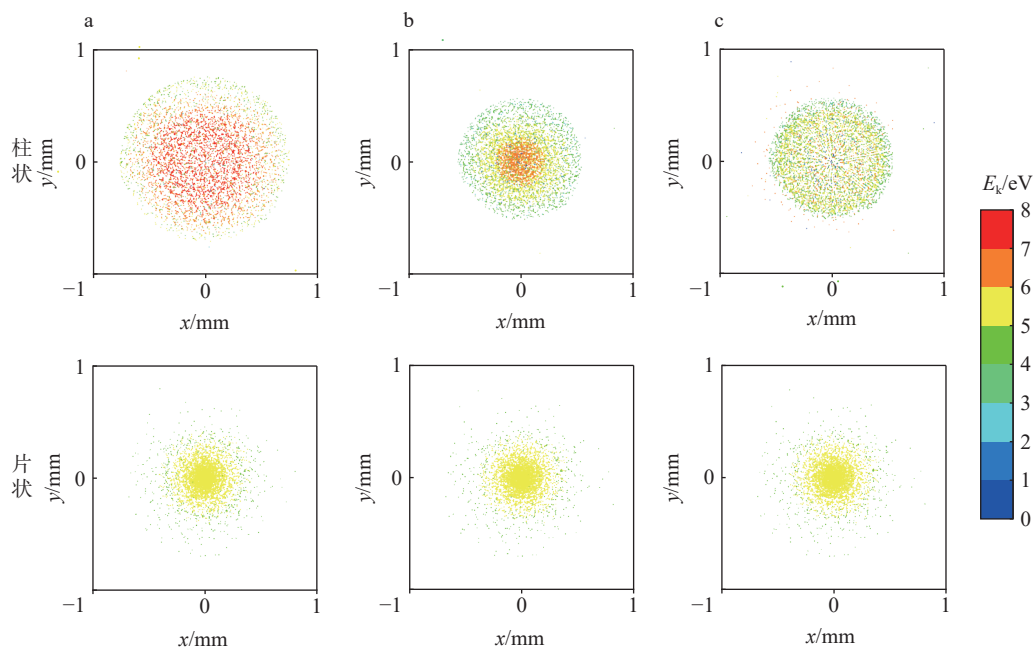


图 5 基于精调最优电压组合时,离子光学系统出口处通过的离子数目随时间的变化

Fig. 5 Ion numbers passing through over time at the outlet of ion optical systems based on the optimal voltage combination from precise adjustment

精调最优电压组合下出口处离子的能量分布情况,结果示于图 6。



注: a. 粗调; b. 细调; c. 精调

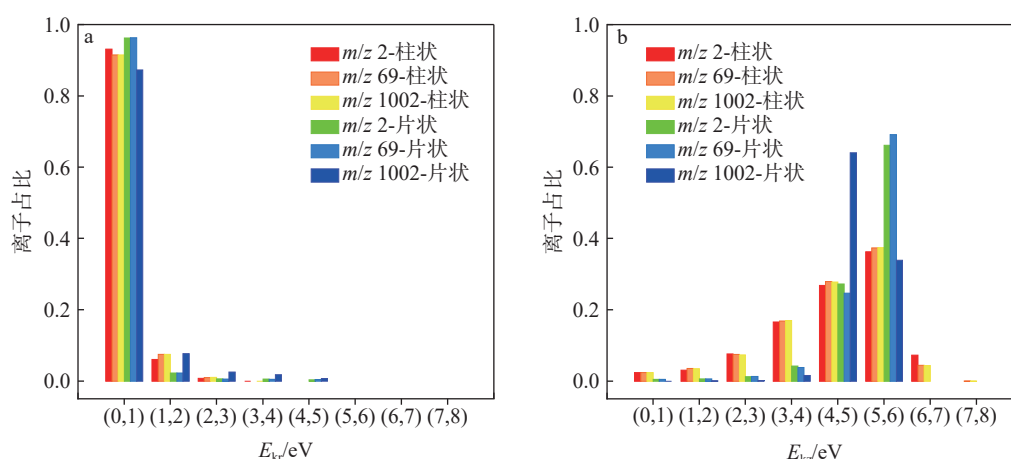
图 6 2 种离子光学系统出口处离子位置和动能分布

Fig. 6 Ion position and kinetic energy distribution at the outlet in two ion optical systems

从图 6 可知,对于这 2 种几何结构的离子光学系统,随着粗调、细调和精调,片状透镜出口处离子分布情况无明显变化,而柱状透镜出口处离子束半径减小,能量分布一致性提高,但片状透镜对离子束的聚焦效果仍优于柱状透镜,位置和总动能分布更为集中。

统计 2 种离子光学系统出口处离子动能的

轴向分量和径向分量的分布情况,示于图 7。可知,对于这 2 种几何结构的离子光学系统,柱状透镜中不同质荷比离子轴向能量分布具有相似性,而在片状透镜中,大质荷比离子 ($m/z\ 1\ 002$) 的轴向能量明显偏低;在 2 种离子光学系统中,离子质荷比大小对离子径向能量分布的影响较小。



注: a. 径向能量; b. 轴向能量

图7 基于精调最优电压参数时离子的动能分量分布

Fig. 7 Kinetic energy component distribution based on the optimal voltage parameters from precise adjustment in two ion optical systems

3 结论

本文提出的模拟系统具有较强的适用性,能够通过修改几何参数、物理参数和计算参数配置的方式快速建模,进行不同离子光学系统的实验测试,节约了研究成本,缩短了研究周期。模拟系统具有高效的计算速度和强大的数据处理能力,可用于大批量参数的优化扫描计算,分析影响离子光学系统的多重因素,为仪器研发、设计和优化提供数据支撑。

基于模拟系统,本文构建了2种典型的离子光学系统,并进行电压调优实验,得到2种离子光学系统的最优电压组合,并针对不同几何结构、不同电压组合以及不同质荷比离子,分析离子通过率、通过时间以及能量分布,得到以下结论:1)利用电压调优实验能够筛选出离子通过率最大时的最优电压组合,确定电压优化范围,柱状离子光学系统的离子通过率最高可达97%,片状透镜离子光学系统的离子通过率达99%以上;2)在最优电压组合下,离子通过系统的时间会随着离子质荷比的增加而延长,相同离子通过柱状透镜离子光学系统的时间短于片状透镜;3)相比于柱状透镜,经片状透镜离子光学系统传输离子的轴向能量分布更为集中,具有较高的一致性。

基于模拟系统的扩展性,在后续工作中,除考虑装置参数外,还需考虑环境因素对仪器性能的影响,例如背景气体、压力等,这些因素都会对系统中的离子传输产生不同程度的影响。在

优化参数时,针对这些环境因素,在已有的基础上可以新增定制功能,根据仪器的具体使用场景和性能要求,针对性地进行装置参数优化,提高仪器的实用价值。

参考文献:

- [1] AMIRAV A, FIALKOV A B, GORDIN A, ELKABETS O, MARGOLIN EREN K J. Cold electron ionization (EI) is not a supplementary ion source to standard EI. It is a highly superior replacement ion source[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2021, 32(11): 2 631-2 635.
- [2] 郭文, 成永军, 陈联, 冯天佑, 王星辉, 邱云海. 电子轰击离子源离子传输效率的数值模拟与实验研究[J]. 真空与低温, 2023, 29(1): 67-71.
GUO Wen, CHENG Yongjun, CHEN Lian, FENG Tianyou, WANG Xinghui, QIU Yuntao. Numerical simulations and experiments of ion transfer rate of electron impact ion source[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(1): 67-71(in Chinese).
- [3] 王伟民, 靳留雨, 钱炳君, 徐福兴, 丁传凡. 电子轰击电离源-离子阱质谱的质量范围优化程序研究[J]. 分析化学, 2022, 50(2): 198-205.
WANG Weimin, JIN Liuyu, QIAN Bingjun, XU Fuxing, DING Chuanfan. Optimization procedure of mass range for electron impact ion source ion trap mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(2): 198-205(in Chinese).
- [4] 黄超, 赵学, 张建超, 汪曦. 基于相空间方法的电子轰击

- 离子源参数对其性能影响的研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2011, 31(2): 169-173.
- HUANG Chao, ZHAO Xue, ZHANG Jianchao, WANG Yan. Characteristics analysis of electron impact ion source in phase space[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2011, 31(2): 169-173(in Chinese).
- [5] 韦冠一, 李志明, 翟利华, 徐江, 沈小攀, 张子斌. 磁-电-四极杆级联质谱中的离子光学设计[J]. *质谱学报*, 2014, 35(3): 238-243.
- WEI Guanyi, LI Zhiming, ZHAI Lihua, XU Jiang, SHEN Xiaopan, ZHANG Zibin. Ion optics design in magnet-electric-quadrupole tandem mass spectrometer[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2014, 35(3): 238-243(in Chinese).
- [6] 王亮, 徐福兴, 丁传凡. 二次离子质谱的一次离子光学系统[J]. *质谱学报*, 2012, 33(1): 1-6.
- WANG Liang, XU Fuxing, DING Chuanfan. Primary ion optics system for secondary ion mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2012, 33(1): 1-6(in Chinese).
- [7] 张浩, 窦仁超, 刘坤, 孟冬辉, 巴德纯, 杜广煜, 巴要帅, 孙立臣, 闫荣鑫. 微尺度质谱仪离子源结构设计及离子光学系统仿真[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(1): 83-90.
- ZHANG Hao, DOU Renchao, LIU Kun, MENG Donghui, BA Dechun, DU Guangyu, BA Yaoshuai, SUN Lichen, YAN Rongxin. Structural design and optical system simulation of ion source for microscale mass spectrometer[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(1): 83-90(in Chinese).
- [8] AMIRAV A, FIALKOV A, GORDIN A. Improved electron ionization ion source for the detection of supersonic molecular beams[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(8): 2 872-2 876.
- [9] SREEKUMAR J, HOGAN T J, TAYLOR S. Simulation of a QMS including the effects of pressure in the electron-impact ion source[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(11): 3 024-3 030.
- [10] KAWASHIMA O, YANASE N, OKITSU Y, HIRAHARA M, SAITO Y, KAROUJI Y, YAMAMOTO N, YOKOTA S, KASAHARA S. Development of an electron impact ion source with high ionization efficiency for future planetary missions[J]. *Planetary and Space Science*, 2022, 220: 105 547.
- [11] BRKIĆ B, GIANNOUKOS S, FRANCE N, JANULYTE A, ZEREGA Y, TAYLOR S. Modeling of an ion source lens system for sensitivity enhancement in a non-scanning linear ion trap[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, 353: 36-41.
- [12] REN Z, GUO M, CHENG Y, SUN W, DONG M, LI G, PEI X, WU C. Simulated and developed an electron impact ionization source for space miniature time-of-flight mass spectrometer[J]. *Vacuum*, 2020, 174: 109 207.
- (收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-06-05)