小型化磁质谱仪离子源的模拟及优化设计

张礼朋1,董 猛2,成永军2,吴海燕1,钱 洁1,张曙光1,张英军1,葛赛金1,李晓旭1

(1.苏州大学机电工程学院,江苏 苏州 215021; 2.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘 要:电子轰击离子源(Electron Impact Ion Source, EI 源)作为小型化磁质谱仪的核心部件之一,其性能指标直接影响质谱仪器的质量分辨率与灵敏度。本文对小型化 EI 源的结构和电压驱动方式进行了改进和优化,旨在提升 EI 源的综合性能。采用离子光学模拟软件 simion-8.0 构建了小型化 EI 源的三维模型,重点研究几何参数、离子推斥极结构以及驱动 EI 源的电压参数对离子聚焦性能和离子传输效率的影响。通过模拟离子的运动轨迹,得到离子的运动参数,同时利用相空间法,分析 EI 源的离子聚焦效果和离子传输效率。理论模拟结果表明:当聚焦极与电离室距离 S₁为 1.2mm,主狭缝与聚焦极距离 S₂ 与 S₁ 的比值为 1.6,主狭缝缝宽 S₃为 2mm,推斥极为圆弧结构,且聚焦透镜和主狭缝透镜通过扫描高压恒压跟踪驱动方式时,离子的位置聚焦半径小于 0.08mm,离子传输效率可达到 99%以上。研究表明:经过几何参数、推斥极结构优化和电压驱动方式改进后的 EI 源,可大幅提高离子传输效率,提升聚焦效果,并能在全质量范围内保持离子聚焦性能稳定,上述特性使其在小型化磁质谱仪开发中具有显著优势。
关 键 词:电子轰击离子源;离子推斥极;恒压跟踪;聚焦性能;离子传输效率

中图分类号:TB773 文献标识码:A 文章编号:1002-0322(2019)02-0051-06 doi;10.13385/j.enki.vacuum.2019.02.10

Simulation and optimization of electron impact ion source for miniaturized magnetic mass spectrometer

ZHANG Li-peng¹, DONG Meng², CHENG Yong-jun², WU Hai-yan¹, QIAN Jie¹, ZHANG Shu-guang¹, ZHANG Ying-jun¹, GE Sai-jin¹, LI Xiao-xu¹

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China; 2.Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract : Electron Impact(EI) ion source is a core component for the miniaturized magnetic mass spectrometer, and its performance has a great impact on the mass resolution and sensitivity of the instrument. In this study, the structure of ion repeller electrode was optimized and the voltage driving method was improved to enhance the overall performance of the EI source. Three – dimensional model of the miniaturized EI source was constructed using the ion simulation software simion – 8.0, and the simulation was focused on investigating the influence of geometric parameters, ion repeller shape and the electric parameters on the ion focusing performance and ion transfer efficiency. By simulating the trajectory of ions, the ion motion parameters were obtained. At the same time, the ion focusing effect and ion transfer efficiency of the EI source were analyzed using the phase space method. The theoretical simulation results show that the ion's position focusing radius was less than 0.08 mm and ion transfer efficiency of over 99% were achieved when $S_1=1.2$ mm, $S_2/S_1=1.6$, $S_3=2$ mm, ion repeller was are shape and the ion focusing lens and the main slit were driven by the high voltage and constant voltage tracking method. The ion transfer efficiency and the ion focusing performance could be greatly improved when the ion repeller structure and the voltage driving method were improved. Furthermore, high ion focusing performance could be maintained during the whole mass range. The optimized EI source could greatly improve the sensitivity and mass resolution of miniaturized magnetic mass spectrometer. Although we only investigated the performance of geometric parameters and repeller structure and electric parameters by simulation, the achievements would be helpful and instructional for further experiments and study.

Key words : electron impact ion source; ion repeller electrode; constant voltage tracking; ion focusing performance; ion transfer efficiency

收稿日期:2018-07-03

作者简介:张礼朋(1993-),男,江苏省盐城市滨海县人,硕士。 通 基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFF0203704)

通讯作者:李晓旭,副教授。

随着航天科技的发展,太空探险活动逐渐频 繁,运用空间质谱仪的场合越来越多。空间质谱 仪可以实现对月球、金星、火星等星球表面气体 成分的探测[1-2];可以用于卫星飞行轨道气体成份 精细化原位分析;载人航天器舱内空气监控、舱 内污染物及有毒气体监控,保障宇航员的生命安 全和身心健康及工作效率[3]。为满足现场原位实 时检测分析、便于携带的需求,空间质谱仪小型 化已成为分析仪器发展的重要趋势^[4]。小型化磁 质谱仪具有设计简单、体积小,功耗低、稳定性 好、定量性好和灵敏度高等优势[5],被广泛应用于 航天器环境分析、星球探测、医学检测分析、食品 安全质量检测等领域。电子轰击离子源[6-7] (Electron Impact Ion Source, 简称 EI 源)是对气体 样品进行质谱分析时常用的离子源之一,由于其 结构简单、可靠性好,常被小型化磁质谱仪采用 作其离子源。EI源的主要功能为:1、将待分析的 物质电离成离子;2、把离子加速、聚焦后传输到 质量分析器。离子聚焦性能和离子传输效率是 EI 源的重要性能指标,其中离子源的聚焦性能直接 影响磁质谱仪的质量分辨率,离子传输效率直接 影响质谱仪的分析灵敏度[8-9]。高性能的质谱仪要 求EI源具备离子束流强度大、散角小、能量分散 小且東流稳定等^[10-11]特点。因此,提高 EI 源的离子 聚焦性能和离子传输效率对提高小型化磁质谱仪 的灵敏度和质量分辨率具有十分重要的意义。

扇形磁偏转质谱仪[12-13]进行离子质量分析的 主要方法有电压扫描和磁场扫描。由于电磁场体 积笨重[14-15],不利于仪器小型化,故小型化磁质谱 仪一般采用电压扫描的方式。V.T. Kogan 和 Zhang 等采用扫描高压比例控制方法驱动 EI 源 各电极[11、16],这种控制方法的主要优点是电路设 计简单,利用电阻分压即可实现,但在上述电压 驱动方式下,扫描电压从低压至高压变化的过程 中,离子源聚焦点跟随扫描高压变化而变化,进 而影响小型化磁质谱仪在全质量范围内的离子 传输效率和聚焦性能,降低仪器性能的稳定性。 本文利用 simion-8.0 离子光学仿真软件建模,提 出扫描高压恒压跟踪方法,在结构上重点改进推 斥极形状,同时优化 EI 源各极电压参数,采用相 空间方法,分析 EI 源各电极参数和推斥极结构 对离子束聚焦性能及离子传输效率的影响。

1 理论模拟部分

1.1 EI 源几何建模

本研究在 Zhang^[2,11]等设计的 EI 源的基础 上,重点改进了离子推斥极的电极形状,并利用 软件 SIMION8.0 对不同几何结构的 EI 源进行了 三维建模,以研究和比较其性能。小型化磁质谱 仪的 EI 源主要由聚焦磁铁、灯丝 F、电离室 B、电 子收集极、推斥极 R、电离室出口狭缝、聚焦极 H、主狭缝 S 和 α 狭缝组成。如图 1 所示,图 1 (a)为推斥极的原始平板结构,图 1(b)为改进后 的梯形结构,图 1(c)为改进后的半圆弧结构。



注:1- 电子聚焦磁铁;2- 灯丝 F;3- 电离室 B;4- 电子收集极; 5- 聚焦极 H;6- 主狭缝 S;7-α 狭缝;8- 推斥极 图 1 具有不同推斥极的 EI 源结构示意图: (a)平板形;(b)梯形;(c)半圆形

Fig.1 EI source with different ion repeller electrode shape: (a) flat plate; (b) ladder shaple and; (c) arc shape

本文利用 SIMION8.0 编写几何文件(.gem 格 式)定义离子源三维静电点阵列,如图 2 所示,图 2(a)为离子源的三维示意图,图 2(b)为剖视图。 其具体参数:出口狭缝的尺寸为 5mm×1mm,聚 焦极 H_1 与 H_2 间距为 2mm,主狭缝 S 为 0.2mm,α 狭缝为 0.6mm,飞行管道为 2mm × 14mm,电离室与聚焦极的间距为 1.2mm,聚焦极 与主狭缝 S 的距离为 2mm,主狭缝 S 与 α 狭缝 的距离为 8mm,α 狭缝与飞行管道的距离为 16mm。由于模拟过程中未加入磁场,故飞行管道 采用直线形式,主要用于分析离子在飞行过程中 是否会撞在上下极板而损失,从而分析离子的传 输效率。

1.2 离子轨迹计算和模拟分析方法

Simion-8.0 软件主要用于计算带电粒子在特定电极产生的电场中运动轨迹,通过程序提供强大的计算功能,并且可使运动轨迹可视化。每个电极都是独立的电势点阵列,利用超松弛迭代有

限元差分方法计算 Laplace 方程(3),求得三维空间阵列中任意点的电势分布^[17]:



 $\nabla^2 = 0$ (3)

在电势分布的基础上再求解电势梯度得到 空间电场分布,利用四阶 - 龙格库塔法计算离子 在电场中的离子轨迹^[18]。在一个由许多粒子构成 的体系中,某一粒子在某一瞬间的运动状态可用 它的位置 p 和速度 v 来描述,它在直角坐标系中 的分量分别是 X,Y,Z;v_x,v_y,v_z,该六个物理量定 义的六维空间,称为相空间^[19]。若离子的 p 和 v 值已确定,那么它在相空间的位置也随之确定, 且随着粒子的运动状态变化而变化。相空间分析 方法便是利用粒子束的相空间图形变化来研究 电磁场内粒子束运动状态的变化。

此次模拟离子初始状态的参数设置贴切小型化磁质谱仪工作实际状态,离子以球形分布在离子源中。在 SIMION-8.0 内设定离子在 X,Y,Z 的初始位置为(7.8,6,12.6),扫描电压 V_B 加在电离室上,推斥极电压 V_R ,聚焦极电压 V_H ,主狭缝 S 电压 V_s ,α狭缝电压 V_α ,离子初始动能为 0 eV,按高斯分布随机产生 200 个离子,沿 X,Y,Z 方向分别分散 0.3mm。 $V_R=V_B+6V, V_\alpha=0V$,保证模拟情况的完整性分析,扫描电压 V_B 在全扫描电压范 围 内 分 别 取 250V,500V,1000V,1500V, 2000V,2500V。

2 结果与讨论

2.1 电压驱动方式对离子聚焦性能的影响

EI 源的传统驱动方式通常为扫描高压比例 控制方法,其控制电压与实践的关系如图 3(a)所示,主狭缝接地,聚焦极的电压通过加载在电离 室上的扫描高压的分压得到。该方法的优点是电路非常简单,通过简单的电阻分压就可实现。但 该方法存在较大的缺点,随着扫描高压的变化, 离子的聚焦效果发生明显的变化。为解决上述问题,本文提出采用扫描高压恒压跟踪方法驱动 EI 源。该驱动方式下,EI 源的聚焦极和主狭缝电极 的电压始终与扫描高压维持一个固定的电压差, 如图 3(b)所示。本文通过理论模拟,对 2 种电压 控制方式进行了性能评估和对比,并分别给出了 3 组优化后的电参数得到的模拟结果。传统扫描 高压比例控制的电参数分别选取为: $V_{H}=0.5V_{B}$, $V_{H}=0.7V_{B}$, $V_{H}=0.93V_{B}$,主狭缝接地 $V_{S}=0V$;扫描高压 恒压控制方式的电参数分别选取为: $V_{H}=V_{B}-40V$, $V_{H}=V_{B}-90V$, $V_{H}=V_{B}-140V$,主狭缝 $V_{S}=V_{B}-2000V$,图 4(a)为传统扫描高压比例控制离子聚焦性能曲 线图,图 4(b)为扫描高压恒压跟踪控制离子聚 焦性能曲线图。



图 3 电压与扫描时间工作曲线图:(a)传统扫描高压比例控制; (b)扫描高压恒压跟踪控制。

Fig.3 Voltage and scan time working curve: (a) conventional proportional voltage control of scan high voltage and (b) constant voltage tracking of scan high voltage





从图 4(a)中分析比较可知,当采用扫描高压 比例控制,电压比例系数低时,扫描电压在全电 压范围内扫描变化时,离子聚焦半径较大,聚焦 性能差;当电压比例系数增大时,离子聚焦性能 在高压扫描的过程中变化明显,低压段聚焦效果 很差,高压部分聚焦效果逐渐变好。也就是说,无 论如何优化电压比例系数,都无法使 EI 源在全 质量范围内取得较好的聚焦效果。从图 4(b)可 知,当采用扫描高压恒压跟踪方式控制,扫描电 压在全电压范围内扫描变化时,离子聚焦半径明 显改善,稳定性能提升;当 $V_{H}=V_{B}-90V$ 时,离子聚 焦性能较稳定,位置聚焦半径在0.1mm 左右。上 述模拟结果说明:扫描高压恒压跟踪控制较传统 扫描高压比例控制,聚焦半径明显变小,且稳定 性增强;采取扫描高压恒压跟踪方法控制时,当 扫描电压增加时,各电极之间压差保持恒定,因 此改善了离子源的稳定性。当压差由小变大时, 离子源聚焦点从左到右移动,当 $V_{H}=V_{B}-90V$ 时, 离子聚焦点在α狭缝附近,聚焦半径 M 较小且 稳定。

2.2 电参数对离子聚焦性能和离子传输效率的 影响

采用传统的扫描高压比例控制时,主狭缝一般接地 $V_s=0V$ 。但在仿真研究时发现,主狭缝电压与扫描电压同时采取扫描高压恒压跟踪控制方式时,离子聚焦性能可得到进一步提高。模拟过程中选取了5组恒压跟踪参数,探究主狭缝电压对 EI 源性能的影响。采用图 1(a)所示的 EI 源结构,将离子聚焦电极的电压固定,为 $V_{H}=V_{B}-90V$,选取5组不同电压差用于驱动主狭缝电极,分别为 $V_{S}=V_{B}-500V, V_{S}=V_{B}-1500V, V_{S}=V_{B}-2500V$ 。图 5为5组恒定压差在扫描电压下聚焦半径和传输效率曲线图。



Fig.5 The effect of main slit voltage on performance of EI source: (a) ion position focusing radius and (b) ion transfer efficiency

从图 5(a)中分析比较可知,当采用扫描高压 恒压控制,压差较小时,随着扫描电压的变化,离 子聚焦性能较差,压差为 1500V 以后,聚焦稳定 性能提高。当 $V_s=V_B-2000V$ 时,离子聚焦性能较 稳定,位置聚焦半径 M 很小,在 0.1mm 左右。从 图 5(b)中可知,采用扫描高压恒压跟踪控制,压 差较小时,离子传输效率跟随扫描电压变化。当 压差为 1500V 以后,离子传输效率稳定性好,且 当 压 差 变 大 时,传输效率可达 93%,说明主狭缝 采取扫描高压恒压跟踪方法控制时,改变压差, 对离子源性能影响较大。压差由小变大时,离子 在主狭缝 S和α狭缝湮灭的离子数逐渐变少,传 输效率逐步提高,且离子源聚焦点从右向左移 动。当V_s=V_B-2000V时,离子聚焦点在α狭缝附 近,聚焦半径 M较小且稳定,分辨率较好。

上述对电压控制方式的探究和电参数优化 的模拟结果表明:当改变电压驱动方式,选择合 适的压差,扫描电压在全电压范围内扫描变化 时,离子聚焦点保持在α狭缝附近,离子源聚焦 性能显著提升且稳定,但从上述数据分析可知, 改变电压驱动方式时,仅能改变离子源 X-Z 平面 聚焦性能,离子在 X-Y 平面聚焦性能没有明显 改善,离子在飞行管道上下壁仍有湮灭。故下文 将继续探究推斥极形状对离子传输效率的影响。

2.3 几何结构参数对离子传输效率的影响

离子源几何参数是影响离子聚焦性能的重要因素,本文分别探究聚焦极与电离室距离 S_1 , 主狭缝与聚焦极距离 S_2 以及聚焦极 H_1 与 H_2 狭缝 S_3 等几何参数对离子位置聚焦性能与离子 传输效率的影响。模拟过程中,采取扫描高压恒 压跟踪控制方法 $V_{H}=V_B-90V$, $V_S=V_B-2000V$ 。图 6 的模拟条件:其他几何参数如 1.1 节所示, S_1 选取 了 3 组几何参数: $S_1=06$ mm、 $S_1=1.2$ mm 和 $S_1=2.4$ mm, 探究 S_1 对 EI 源性能的影响。图 7 的模拟条件:其 他几何参数如 1.1 节所示, S_2 选取了 4 组几何参 数: $S_2/S_1=0.8$ 、 $S_2/S_1=1$ 、 $S_2/S_1=1.6$ 和 $S_2/S_1=2.4$,探究 S_2/S_1 对 EI 源性能的影响。图 8 的模拟条件:其他 几何参数如 1.1 节所示,聚焦极狭缝 S_3 选取了 3 组几何参数: $S_3=1$ mm、 $S_3=2$ mm 和 $S_3=3$ mm,探究聚 焦极狭缝 S_3 对 EI 源性能的影响。

从图 6 分析比较可知, 当 S_1 =0.6mm, 随着扫 描电压的变化,离子传输效率达到 97%,离子聚 焦半径在 0.25mm 左右; 当 S_1 =1.2mm 时,离子传 输效率达到 91%,离子聚焦半径在 0.08mm 左右; 当 S_1 =2.4mm 时,离子传输效率达到 67%,离子聚 焦半径在 0.42mm 左右;上述探究 S_1 模拟结果表 明:聚焦极与电离室的距离 S_1 对 EI 源聚焦性能 影响很大,当 S_1 =1.2mm, 扫描电压在全电压范围 内扫描变化时,离子聚焦点保持在 α 狭缝附近, 离子源聚焦半径较小且传输效率较高。

从图 7 分析比较可知,当固定 S₁=1.2mm,改 变 S₂/S₁ 的比值时,对离子聚焦性能和传输效率有 一定的影响。当 S₂/S₁=1.6 时,离子聚焦半径最小, 为 0.08mm 左右,离子源聚焦性能稳定且传输效 率较高,高于或低于这个比值时,EI 源的聚焦性 能逐渐变差。



(a) ion position focusing radius and (b) ion transfer efficiency

从图 8 分析比较可知,当改变聚焦极狭缝宽 度 S_3 时,对 EI 源聚焦性能影响很大,当 S_3 =2mm 时,离子源聚焦半径较小且传输效率较高, S_3 高 于或低于 2mm 时,EI 源的聚焦性能逐渐较差。



2.4 推斥极形状对离子传输效率的影响

为提升离子传输效率,本文将推斥极改为梯 形和圆弧形两种不同的结构,其中梯形推斥极 β 角选取了 30 度、45 度和 60 度三种情况;模拟过 程中,采取扫描高压恒压跟踪控制方法 *V_H=V_B-90V*,*V_S=V_B-2000V*。如图 9(a,b)显示了不 同推斥极时离子在 X-Z 平面上的聚焦性能和离 子传输效率。

从图 9(a)中分析比较可知,当采用改进后的



扫描高压恒压跟踪方法控制时,扫描电压在全电 压范围内变化时,原始平板推斥极、梯形推斥极 和半圆弧形推斥极在离子聚焦性能上基本保持 一致,聚焦半径较小且稳定。但是,上述离子聚焦 性能仅限于 X-Z 平面,但在 X-Y 平面上,离子存 在较大的发散,从而造成离子撞击飞行轨道的上 下平面而湮灭,降低离子的有效传输效率。从图 9(b)中可知,原始平板推斥极的离子传输效率最 低;梯形推斥极离子传输效率较平板推斥极提升 5% 左右, 当 B 为 45 度时, 传输效率最好; 半圆 弧形推斥极离子传输效率最高,较平板推斥极提 升10%左右。说明推斥极形状能改变离子源内部 电场分布,优化后的离子推斥极可使离子在 X-Y 平面的聚焦能力增强,减小了离子在飞行管道 上、下壁的湮灭,从而使离子传输效率明显提高, 有助于提高小型化磁质谱仪器的最终检测灵敏 度。本文进一步选取了半圆弧形推斥极进行了优 化,并与扫描高压恒压跟踪控制方法相结合,分 析和评估了EI源的离子聚焦性能和离子传输效 率,并将最终优化结果与传统电压比例控制方式 下的经典 EI 源结构作对比。对比分析过程中所 使用的电参数均为优化后的结果,图 10 (a)和 (b)为 EI 源优化前后在高压扫描过程中离子聚 焦半径和离子传输效率曲线图。





从图 10 分析比较可知,优化前离子源聚焦 性能与离子传输效率跟随扫描电压变化趋势明 显,离子源稳定性差,扫描电压增加时,聚焦性能 与离子传输效率逐渐变好;优化后,离子聚焦性 能稳定,位置聚焦半径在 0.08mm 左右,离子传输 效率可达 99%左右。说明优化后的离子源结构和 扫描高压恒压跟踪控制组合得到良好的离子传 输效率和稳定的聚焦性能。

3 小结

本文通过优化离子源几何参数、离子推斥极 结构和采用改进的扫描高压恒压跟踪方法驱动 EI源的电极,实现提高离子源聚焦性能和离子源 传输效率的目的。本文通过模拟和参数优化,得 出其最佳的几何结构参数和电参数。模拟结果显 示,当*S*₁=1.2mm,*S*₂/*S*₁=1.6,*S*₃=2mm,推斥极为半 圆弧形,*V*_{*H*}=*V*_{*B*}-90V,*V*_{*S*}=*V*_{*B*}-2000V时,EI源的位 置聚焦半径在0.08mm左右,离子引出效率可达 到99%以上。该模拟结果表明:通过优化离子源 几何参数、推斥极结构和电参数,可大幅提高离 子传输效率和离子源的聚焦性能,对仪器灵敏 度、分辨率及稳定性的提升具有重要意义。经过 优化后离子源将在小型化质谱仪应用中具有显 著优势,本文的模拟结果将对进一步的实验提供 重要的参考。

参考文献

- Boynton W V, Shinohara C. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: evidence for subsurface ice deposits[J]. Science, 2002, 297(5578):81~85.
- [2] 郭美如,张伟文,李得天,等.空间小型磁偏转质谱 计的研制[J].真空科学与技术学报,2015,35(4):381-385.
- [3] 王桂友, 臧斌, 顾昭. 质谱仪技术发展与应用[J]. 现 代科学仪器, 2009(6):124-128.
- [4] Diaz J A, Vargas A E M, Diaz F C, et al. Test of a miniature double-focusing mass spectrometer for real-time plasma monitoring [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2002, 21(8):515–525.
- [5] Ahn J R, Chang J P. Computer simulation of electron and ion trajectories in electron–impact ion sources of a quadrupole mass spectrometer [J]. Nuclear Instruments &

Methods in Physics Research, 2011, 645(1):345-349.

- [6] 黄超,赵学玒,张建超,等.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.
- [7] 刘燕文,田宏,韩勇,等.利用飞行时间质谱研究热 阴极蒸发特性 [J].真空科学与技术学报,2007,27
 (5):437-441.
- [8] 刘淑娟,周跃明,张燮,等.第57届匹兹堡会议及分析仪器发展趋势评述[J].分析仪器,2006(4):4-9.
- [9] 卞则樑. 有机质谱仪器的现状及发展趋势 [J]. 分析 仪器, 1997(2):2-5.
- [10] 季欧,李玉桂.质谱分析法[M].第一版,北京:原子 能出版社, 1978:17.
- [11] 张文台,郭美如,肖玉华,等.小型磁偏转质谱计离 子源性能参数的模拟研究[J]. 真空与低温, 2013, 19 (1):40-45.
- [12] Kiser R W. Introduction to mass spectrometry and its applications [J]. Journal of the American Chemical Society, 1965, 88(9):2081–2082.
- [13] Ishihara M, Kammei Y, Matsuda H. A high-performance mass spectrometer for very small size [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1995, 363 (1 - 2):440-444.
- [14] Nier A O. Small General Purpose Double Focusing Mass Spectrometer [J]. Review of Scientific Instruments, 1960, 31(10):1127–1132.
- [15] Hoffmann H J, Pelka K, Zahn U V, et al. The Pioneer Venus Bus Neutral Gas Mass Spectrometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, GE-18(1):122-126.
- [16] Kogan V T, Lebedev D S, Chichagov Y V, et al. Ion source with electron ionization for a portable mass spectrometer [J]. Technical Physics, 2009, 54 (11): 1714–1720.
- [17] David J Manura. SIMION 3D Version 8.0.4 User's Manual[A]. Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2008:2.
- [18] Jiye X, Zhenlin X, Zhixiong L, et al. Design and calculation of an electron impact storage ion source for time-of-flight mass spectrometers [J]. International Journal of Mass Spectrometry & Ion Processes, 1997, 161(1):91–96.
- [19] 储璇雯. 电磁场及电离子光学系统数值分析[M]. 浙 江大学出版社, 1991:353.