

均匀质量分布的双聚焦离子光学系统

胡肇恒 松田 久

(中国科学院科学仪器厂) (日本大阪大学)

〔摘要〕 本文介绍由一个园柱电场和两个均匀磁场组成的离子光学系统, 它可以在质量比4:1范围内达到双聚焦。

前 言

在一个园柱电场和一个均匀磁场组成的质谱计中, 双聚焦一般只能在一个点上实现。但是 Mattauch-Herzog 型⁽¹⁾双聚焦质谱仪可以在全质量数范围内获得双聚焦。质谱仪的灵敏度可以比质谱计提高几个数量级, 然而双聚焦质谱仪的质量分布总是非线性的, 这就造成了质量定标的困难。

为了改进质量分布特性, 本文讨论了一个新型双聚焦离子光学系统。此系统由一个园柱电场和两个均匀磁场组成, 三个场对离子束的偏转方向相同。二磁场中, 前者是一扇形磁场, 后者是一专用磁场。离子光学系统的计算是将“Mass-Scaling”程序结合到“TRIO”程序⁽²⁾中进行的, 获得了质量比4:1范围内具有线性质量定标和双聚焦的特性。

双 聚 焦 离 子 光 学 系 统

系统如图1所示, 取离子进入扇形磁场的入口点作为直角座标系统的原点。在此系统中, 不同质量离子的轨道用该质量离子束的中心轨道参数来代表, 并且只计算离子束的径向聚焦特性。图1表明了离子光学系统中各几何参数的物理意义, 所有长度参数都以扇形磁场中最小质量 M_1 离子的轨道半径 R_1 规一化。

在这个双聚焦离子光学系统中, 电场的方向聚焦点在扇形磁场入口边界后面。扇形磁场的作用是按照 m/z (取 $z=1$) 将各个不同质量的离子相互分开, 并引导它们分别在不同位置以各自入射角进入专用磁场。各个质量的离子在专用磁场中以各自确定的园周半径旋转一个角度后离开磁场向接收平面运动。专用磁场的作用在于减小低质量离子的质量色散和增加高质量离子的质量色散, 采用这个方法使离子在接收平面上按照质量的大小均匀分布。另外, 三个场的方向聚焦的共同作用使不同质量的离子束分别都聚焦在接收平面附近。与此同时, 两个磁场对能量大于或小于离子束中心轨道能量的离子的偏离正好与电场作用于该离子相反的偏离相抵消。这样, 某一质量离子束的能量聚焦点就能与方向聚焦点处在同一位置或

1985年12月11日收

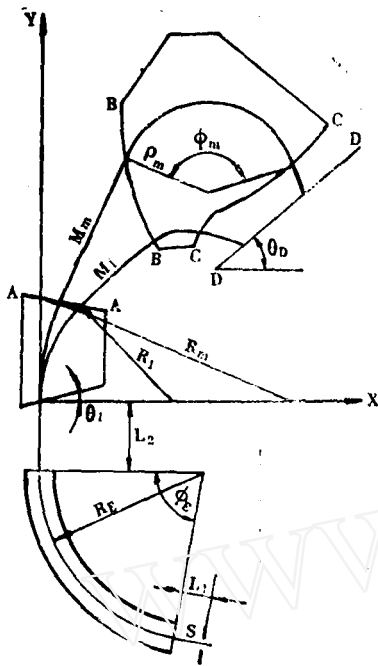


图1 均匀质量分布的双聚焦离子光学系统

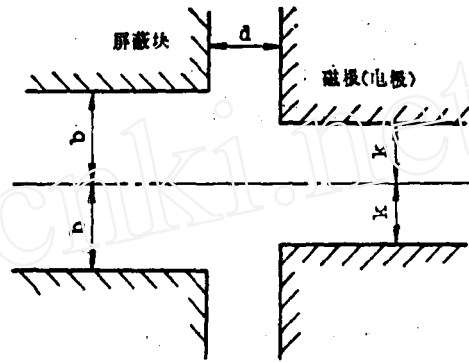


图2 电场和磁场入口和出口处的结构

几乎在同一位置，因而达到了双聚焦。

程序“Mass-Scaling”用来计算每个质量离子束的中心轨道，而程序“TRIO”是用来计算整个离子束的聚焦。计算中考虑了边缘场的影响。

质量为 M_m 的离子在扇形磁场中的轨道半径 R_m 和专用磁场中的轨道半径 ρ_m 可由下式求出：

$$\begin{aligned} R_m &= \sqrt{M_m/M_1} \\ \rho_m &= K_r \times R_m \end{aligned} \quad (1)$$

式中 K_r 是常数。扇形磁场的入口和出口边界都是直线，入口边界与 X 轴的夹角为 θ_1 。扇形磁场出口边界 AA 的方程式是

$$Y_A = -\frac{V_A}{U_A} \times X_A + V_A \quad (2)$$

U_A 和 V_A 是直线 AA 与 X 和 Y 轴交点处的坐标。专用磁场入口边界方程式是

$$Y_B = G_B / \sin(K_B(X_B - J_B)) \quad (3)$$

G_B 、 J_B 和 K_B 是决定专用磁场入口边界 BB 在此系统中的位置和形状的常数。接收平面 DD 处质量 M_m 离子的座标是

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{K_D(M_m - M_1)}{\sqrt{1 + P_D}} + U_D \\ Y_m &= P_D(X_m - U_D) + V_D \end{aligned} \quad (4)$$

U_D 和 V_D 是质量 M_1 离子在接收平面 DD 上的座标。 K_D 是两个相邻质量在接收平面上的距离。 P_D 是 DD 的斜率。将 DD 等分成20或更多质量段，然后从各个质量定标点向专用磁场中对应质量离子的轨道作切线，连接各切点构成的平滑曲线 CC 就是专用磁场的出口边界。

边缘场的几何结构示于图 2。2k 是一对电极或磁极之间的距离，2b 是屏蔽块狭缝宽度，d 是屏蔽块与电极或磁极之间的间距。在程序“TRIO”中，电场或磁场的边缘场分别只有三个不同的结构尺寸。它们分别用三个整数 1，2 和 3 来代表。取圆柱形电场的入口和出口处结构的形状为 1，它表示 $b/k = 0.3$ 和 $b/k = 0.485$ 。对于两个磁场，除了专用磁场的出口边界外，其它的入口和出口处结构形状皆取数字 3，它表示 $b/k = 3$ 和 $b/k = 5$ 。由于这两个比值是如此之大，可以忽略屏蔽块的存在。另一方面，由于离子从专用磁场中出来到达接收平面之间的距离在 0.05~0.2 之间，边缘场对离子运动轨道的影响可以忽略，可以近似地认为屏蔽块不存在。这样对于两个磁场来说，入口和出口边界处的四个屏蔽块皆可取消。

在这个离子光学系统中，不同质量数离子的运动和各个几何参数之间的关系如此复杂，以致于对电场、两个磁场以及接收平面的位置和几何形状的不同选择都会极大地影响离子的运动轨道，从而可能严重地影响某个质量范围内离子束的方向聚焦或能量聚焦特性。对质量数 4:1 范围内的各个质量离子束的双聚焦特性进行综合考虑后，选择了下面一组数据作为均匀质量分布的双聚焦离子光学系统的参数：

$$\begin{array}{llll}
 L_1 = 0.2 & \phi_E = 85^\circ & R_E = 1.5 & L_2 = 0.5 \\
 \theta_1 = -10^\circ & U_A = 7 & V_A = 0.7 & G_B = 1.1 \\
 J_B = 0.2 & K_B = 1.848 & K_r = 0.333 & U_D = 1.3617 \\
 V_D = 1.2285 & \theta_D = 40^\circ & K_D = 0.1066 &
 \end{array}$$

表 1 给出了此离子光学系统某些质量比值的离子在接收平面 DD 上的双聚焦特性。从表 1 可以清楚看到方向聚焦系数 A_α 和能量聚焦系数 A_β 都几乎等于零。

表 1 A_α 和 A_β 与质量比 M_m/M_1 的关系

M_m/M_1	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
A_α	0.048	0.003	0.033	0.100	0.145	0.138	0.079
A_β	-0.052	0.042	0.015	-0.037	0.040	0.056	0.254

结 论

这种离子光学系统与 EOID^[3] 相结合用于一个大质量范围内同时检测多个质量离子是非常有用的。它不但可以提高仪器的灵敏度和测量精度，也能用来成功地研究瞬态反应过程。如果这个系统与法拉第筒相结合，将特别适用于检测预先选择的某些质谱峰的专用质谱计。

参 考 文 献

1. J. Mattauch and R. Herzog, Z. Phys, 89, 786(1934)
2. T. Matsuo, H. Matsuda, Y. Fujita and H. Wollnik, Mass Spectroscopy (Japan), 24, 19(1976)
3. B. Hedjäll and R. Ryhage, Anal. Chem., 51, 1687(1979)

A Double Focusing Ion-Optical System With Uniform Mass Distribution

Hu Zhaoheng

(Scientific Instrument Factory, Academia Sinica,
P. O. Box 2724, Beijing, China)

H. Matsuda

(Osaka University, Toyonaka, Japan)

Received 11, Dec. 1985

Abstract

A double focusing ion-optical system consisting of one cylinder electric field and two magnetic fields is proposed in order to get uniform mass distribution in a mass ratio 4:1.