

一种磁聚焦型带电粒子三维动量信息映射技术

康轶凡, 刘静, 朱冠芳

(空军工程大学理学院, 西安, 710051)

摘要 提出了一种高收集效率带电粒子三维动量映射分析技术,其特点在于:引入轴向均匀磁场以约束抑制带电粒子在系统横向的发散,使得分析仪具有较大的粒子收集角;采用位置敏感探测器记录带电粒子撞击探测器的位置信息和时间信息,用以反演重建带电粒子的初始动量。文中根据带电粒子在磁场的运动方程,阐述了该技术的工作技术原理,给出了带电粒子初始三维动量与位置及时间信息的映射重建关系;同时也说明该技术相对无磁场映射技术在粒子收集率方面的优越性。另外,文中也从该技术后续工程应用的角度,给出了磁场的优化设置问题。

关键词 带电粒子;位置敏感探测器;磁节点;重建

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.020

中图分类号 O463 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0103-04

A Technique of Magnetic Focusing Type Charged-particle Three-dimensional Momentum Mapping

KANG Yifan, LIU Jing, ZHU Guanfang

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A charged-particle three-dimensional momentum mapping analyzer is proposed in this paper. The characteristics are as follows: An axial uniform magnetic field is introduced to constraint the lateral divergence of the charged particles in the system, thus making an analyzer have a comparatively larger angle of particles collection. Position-sensitive detector (PSD) serves as the charged particle receiver, recording both the position and time information of the charged particles. Based on the motion equation of electron in magnetic field, the operating principle is analyzed, and the mapping reconstruction relation among the initial three-dimensional momentum information and the position and time information of the charged particles on the detector is given. The superiority over the magnetic-field-free technique is also discussed, and simultaneously the optimum setting of the introduced axial magnetic field is given.

Key words: charged-particle, position-sensitive detector, magnetic nodes, reconstruction

在带电粒子光学中,常采用具有时间或空间色散作用的电子光学系统构成带电粒子分析器,如质谱仪、同位素分离装置以及光电子谱仪等。这其中最常用同时亦最典型的分析器当属飞行时间谱仪,

它利用飞行时间与不同参量(如质量、能量)的色散关系来甄别相应的带电粒子^[1-7]。对于常用的能量分析器,探测器仅仅记录粒子的飞行时间,进而反演出粒子的初始能量分布。而近年来研制成功的位置

收稿日期:2015-09-23

基金项目:国家自然科学基金(11505289)

作者简介:康轶凡(1980-),女,陕西宝鸡人,讲师,主要从事带电粒子精细调制技术研究,E-mail:yifan440@126.com

引用格式:康轶凡,刘静,朱冠芳.一种磁聚焦型带电粒子三维动量信息映射技术[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):103-106. KANG Yifan, LIU Jing, ZHU Guanfang. A Technique of Magnetic Focusing Type Charged-particle Three-dimensional Momentum Mapping[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 103-106.

敏感探测器(Position-Sensitive Detector, PSD)可以同时记录粒子飞行时间信息以及其撞击探测器的位置信息,由此不仅可以得到粒子的初始能量,而且也能给出其初始动量^[8-9]。目前较为典型的应用系统中,同一时刻只能测量某一固定方位角的带电粒子能量分布,在测量多角度下的能量或动量分布时,则每次先要移动(转动)电子光学系统然后再进行测量,严重地影响了测量精度和效率。近年来,电子动量谱学的发展亟需能够同时测量多角度动量分布的动量分析技术^[10-18]。

本文提出了一种基于位置敏感探测器的高收集效率带电粒子三维动量映射分析技术。轴向均匀磁场用以抑制带电粒子的横向发散,而使得系统具有较大的粒子收集效率;位置敏感探测器作为粒子接收元件,以记录带电粒子撞击探测器时的位置信息和时间信息。由此位置信息和时间信息即可重建出带电粒子初始三维动量信息。

1 技术原理

本文提出的带电粒子三维动量映射分析技术原理见图1。系统整体采用圆柱对称型结构设计,对称轴为 OO' 。亥姆霍兹线圈用以形成沿系统轴向的均匀磁场区;位置敏感探测器用以接收带电粒子,记录带电粒子的飞行时间 t 和粒子撞击探测器的位置 (x, y) 。

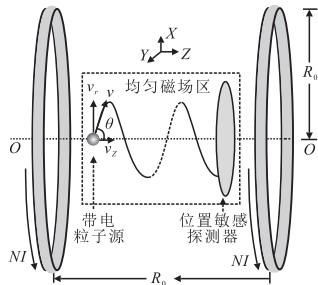


图1 带电粒子三维动量映射分析技术原理示意

Fig.1 Schematic diagram of magnetic focusing type charged-particle three-dimensional momentum mapping

设带电粒子初速度 v 与 z 方向的夹角为 θ ,则带电粒子在均匀磁场中的螺旋运动见图1。如果设带电粒子源与位置敏感探测器的轴向距离为 s ,则带电粒子的飞行时间 t 与轴向速度 v_z 的定量关系为:

$$v_z = s/t \tag{1}$$

这说明:由系统参数 s 和位置敏感探测器记录的飞行时间 t 即可求得带电粒子初始轴向动量 mv_z 。

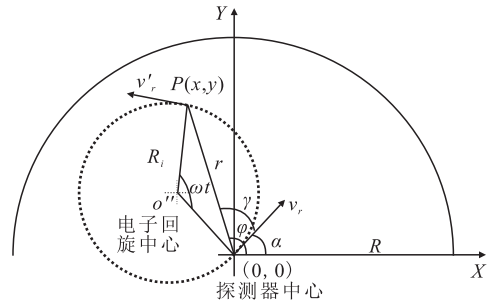


图2 带电粒子径向运动描述

Fig.2 Charged-particle radial motion

带电粒子径向运动见图2。其中, $O(0,0)$ 为位置敏感探测器的中心,它位于系统对称轴 OO' 上; O' 为带电粒子径向回旋运动的中心; $P(x, y)$ 为带电粒子撞击位置敏感探测器平面的位置; R 为位置敏感探测器的半径;带电粒子径向速度 v_r 与 X 的夹角为 α 。设轴向均匀磁场磁感应强度为 B ,带电粒子的静止质量与电荷量分别为 m 和 q 。则其回旋运动频率如下:

$$\omega = Bq/m \tag{2}$$

$$R_i = mv_r/Bq \tag{3}$$

由图2所述参数关系可知,

$$\left| \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right) \right| = \frac{r/2}{R_i} \tag{4}$$

则带电粒子的径向动量为:

$$p_r = mv_r = Bqr/2 \left| \sin(\omega t/2) \right| \tag{5}$$

则带电粒子 X 与 Y 方向的分动量分别为:

$$p_x = p_r \cos(\alpha) \tag{6}$$

$$p_y = p_r \sin(\alpha) \tag{7}$$

由图2可知:

$$\angle \gamma = \omega t/2 \tag{8}$$

所以,

$$\angle \alpha = \angle \phi - \omega t/2 \tag{9}$$

联立式(6)、(7)和(9)可得:

$$p_x = p_r \cos(\alpha) =$$

$$\frac{Bq}{2 \left| \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right) \right|} \left[r \cos(\phi) \cos\left(\frac{\omega t}{2}\right) + r \sin(\phi) \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right) \right] =$$

$$\frac{Bq}{2} \left[x \cot\left(\frac{\omega t}{2}\right) + y \right] \tag{10}$$

$$p_y = p_r \sin(\alpha) =$$

$$\frac{Bq}{2 \left| \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right) \right|} \left[r \sin(\phi) \cos\left(\frac{\omega t}{2}\right) - r \cos(\phi) \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right) \right] =$$

$$\frac{Bq}{2} \left[y \cot\left(\frac{\omega t}{2}\right) - x \right] \tag{11}$$

综合式(1)、式(10)和式(11)可知,根据位置敏感探测器记录的时间信息 t 和位置信息 (x, y) ,即可确定带电粒子的初始分动量 p_x 、 p_y 和 p_z ,并

进而可得电子的最终动量大小为:

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (12)$$

2 参数优化设置

2.1 均匀磁场区磁场量值 B 的选择

由式(4)可得动量分析仪中带电粒子径向运动的摇摆轨迹,见图 3;每经过一个回旋周期的时间,带电粒子将再次回到系统的对称轴上。 $r=0$ 的时间称为磁场的磁节点(Magnetic Nodes),2 个节点之间的时间称为磁节点域(Nodes Scope)。根据带电粒子径向动量与探测器所记录的时间信息及位置信息的映射关系式(10)和式(11)知,对于由探测器中心($x=y=0$)所探测接收的带电粒子而言,其径向动量将完全不能够由探测器给出的时间及位置信息得以反演重建。因而在应用轴向磁场以约束带电粒子的分析谱仪中,磁场的选择是极其重要的^[7]。其基本的原则是:应使待测带电粒子的飞行时间落在 2 个磁场节点之间,也即单个磁节点域内。

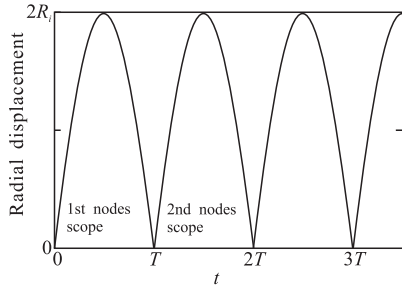


图 3 带电粒子在纵向均匀磁场约束下的摇摆运动
Fig.3 Wiggle motion of charged-particle in an axial uniform magnetic field

令 t_{\max} 、 t_{\min} 分别代表待测电子的最大及最小飞行时间,倘若待测电子落在第 k 个节点时限内,则必须满足如下的条件:

$$t_{\max} \leq kT \quad (13)$$

$$t_{\min} \geq (k-1)T \quad (14)$$

$T = 2\pi m / (qB)$ 是带电粒子回旋运动周期。在实际应用中位置灵敏探测器总是置于封闭的圆柱形管子中,管子半径略大于探测器。对于具有初始能量 ϵ_i 及初始发射角 θ 的电子,其在磁场中所作圆周运动的半径为:

$$R_i = \frac{\sin\theta}{Bq} \sqrt{2m\epsilon_i} \quad (15)$$

假设探测器的半径为 R 。由于探测器尺寸的有限性,根据图 2 可知只有满足 $2R_i \leq R$ 条件的电子才可能被探测器接收。由式(15)知,不同能量的电子具有不同的最大发射角,称为临界角 θ_{ca} 。

$$\sin\theta_{ca} = \frac{qRB}{2\sqrt{2m\epsilon_i}} \quad (16)$$

对给定的轴向磁场,初始动能较小的电子具有较大的临界角。倘若待测带电粒子初动能在 ϵ_{\min} 与 ϵ_{\max} 之间,即 $\epsilon_{\min} \leq \epsilon_i \leq \epsilon_{\max}$,则由图 1 及式(1)知,这同时意味着初始状态为 $\epsilon_i = \epsilon_{\max}$ 、 $\theta = 0$ 的电子具有最小的飞行时间 t_{\min} ,初始状态为 $\epsilon_i = \epsilon_{\min}$ 、 $\theta = \theta_{ca}$ 的电子具有最大的飞行时间 t_{\max} ,即:

$$t_{\min} = s \sqrt{\frac{m}{2\epsilon_{\max}}} \quad (17)$$

$$t_{\max} = s \sqrt{\frac{m}{2\epsilon_{\min} \cos^2\theta_{ca}}} \quad (18)$$

联合式(13~18)即可求得对应于 m 的磁场 B 范围。

当然, k 的取值范围可进一步得到限定。考虑初始状态为 $\epsilon_i = \epsilon_{\min}$ 、 $\theta = 0$ 的电子,其飞行时间为:

$$t_0 = s \sqrt{m/2\epsilon_{\min}} \quad (19)$$

显然, t_0 应满足如下关系:

$$t_0 < kT \quad (20)$$

联合式(14)与式(20)可得:

$$k < t_0/t_0 - (t_{\min}) \quad (21)$$

这里特别强调的是,由式(16)可知,较大的磁场意味着系统具有较大的接收角,也即较高的带电粒子收集效率。因而在磁场量值的选择上,在满足上述约束条件的情况下,常取尽可能大的磁场。

2.2 粒子收集效率

以图 1 所示结构为参考。在无轴向磁场的情况下,带电粒子将在径向作匀速直线运动,其相对系统对称轴的位移可作如下表示:

$$r_1(t) = v_r t \quad (22)$$

而对本文提出的动量映射分析技术,带电粒子的径向运动由式(4)描述,也即:

$$r_2(t) = 2 \frac{v_r}{\omega} \sin(\omega t/2) \quad (23)$$

2 种情况对比见图 4。

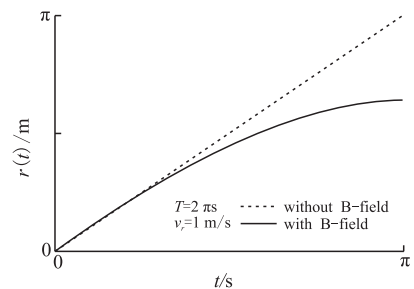


图 4 有无约束磁场情况下带电粒子径向运动对比
Fig.4 Comparison of charged-particle radial motion between with and without constraint magnetic field

由图4可知,引入轴向磁场的情形总具有相对较小的径向位移,也即较弱的带电粒子横向发散。联系前述讨论易知,这正是由于轴向磁场对带电粒子横向发散的约束抑制作用。因此,相对无磁场的动量分析仪结构设置,这个约束作用必然使得本文提出的动量分析仪具有相对较大的粒子收集效率。

3 结语

本文提出了一种带电粒子三维动量映射分析技术。带电粒子源、位置敏感探测器以及两者之间的带电粒子渡越区均位于亥姆霍兹线圈形成的均匀磁场区内,轴向均匀磁场用以约束抑制带电粒子的横向发散,使得分析仪系统具有较大的粒子收集角;位置敏感探测器作为粒子接收元件,以记录带电粒子撞击探测器时的位置信息和时间信息。由此位置信息和时间信息即可反演出带电粒子初始三维动量信息。同时,文中也阐述了分析仪相关关键参数,如亥姆霍兹线圈均匀磁场区和均匀磁场区磁场量值的选择问题。相信随着原子分子中电子动量谱学的发展和深入,此带电粒子三维动量分析仪会得到广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] FRANKLIN J L, HIERL P M, WHAN D A. Measurement of the Translational Energy with a Time-of-Flight Mass Spectrometer[J]. J chem Phys, 1967, 47(9): 3148-3153.
- [2] CAMERON A E, EGGERS D F. An Ion Velocitron[J]. Rev Sci Instrum, 1948, 19 (9): 605-607.
- [3] WOIFF M M, STEPHENS W E. A Pulsed Mass Spectrometer with Time Dispersion[J]. Rev Sci Instrum, 1953, 24 (8): 616-617.
- [4] ABDALLAH M A, WOLFFW, WOLF H E, et al. Cold-target Recoil-Ion-Momentum Spectroscopy Study of Single Electron Capture from He by Slow Ar $8+$ Ions[J]. Phys Rev A, 1998, 57 (6): 4373-4378.
- [5] READ F H. The Parallel Cylindrical Mirror Electron Energy Analyzer[J]. Rev Sci Instrum, 2002, 73(3): 1129-1139.
- [6] GAGNON E, SANDHU A S, PAUL A, et al. Time-Resolved Momentum Imaging System for Molecular Dynamics Studies Using A Tabletop Ultrafast Extreme - Ultraviolet Light Source[J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(6): 063102-1-063102-14.
- [7] GISSLBRECHT M, HUETZ A, LAVOLLÉE M, et al. Optimization of Momentum Imaging Systems Using Electric and

Magnetic Fields[J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76 (1): 013105-1-013105-8.

- [8] MACARTHY I E, WEIGOLD E. Electron Momentum Spectroscopy of Atoms and Molecules [J]. Reports on Progress in Physics, 1991, 54(6): 789-879.
- [9] DÖRNER R, MERGEL V, JAGUTZKI O, et al. Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy: A Momentum Microscope to View Atomic Collision Dynamics[J]. Aip Conference, 1998, 443(1): 95-192 .
- [10] STRAHLMAN C, SANKARI R, LUNDQVIST M, et al. Angle-Resolved Time-of-Flight Spectrometer Applied to Multi-bunch Operation at MAX-Lab; A Design Study[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 425: 092001/1-092001/9.
- [11] VCLAIRE V, MARK B, ALEXANDRA L, et al. Fast Sensors for Time-of-Flight Imaging Applications[J]. Phys Chem Chem Phys, 2013, 16(2): 383-395.
- [12] WANG C, KANG Y F, TANG T T. Probe-Type Time-of-Flight Momentum and Energy Mapping System [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2011, 122 (6): 544-548
- [13] HILBERT S A, BARWICK B, FABRIKANT M, et al. A High Repetition Rate Time-of-Flight Electron Energy Analyzer[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(17): 173506/1-173506/3
- [14] WANG C, KANG Y F, TANG T T. Reflection-Type High-Resolution Time-of-Flight Momentum and Energy Mapping Analyzer [J]. Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 2011, 122 (13): 1207-1211.
- [15] STRAHLMAN C, SANKARI R, LUNDQVIST M, et al. Angle-resolved Time-of-Flight Spectroscopy Applied to Multi-bunch Operation at MAX-Lab; A Design Study[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 425 (9) : 092011/1-092011/4
- [16] WANG C, KANG Y F, TIAN J S. Double-Mode Refraction-Type Time-of-Flight Momentum (Energy) Mapping Analyzer: Generalized theory [J]. Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123 (24): 2241-2246.
- [17] ILCHEN M, GLASER L, SCHOLZ F, et al. Angular Momentum Sensitive Two-Center Interference[J]. Phys Rev Lett, 2014, 112(2): 023001/1-023001/5.
- [18] WANG C, TANG T T, KANG Y F. Parameters Choosing for a Time-of-Flight Momentum Mapping System with Truncated Cone-Shaped Head[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2011, 122 (3): 220-224.

(编辑:徐楠楠)