文章编号： 1007-4627(2014) 04-0511-05

LPT 的 RF 分相偏置电路的研制

王均英[1]，王永生[1]，孙宇梁[1, 2]，赵建民[1]，田玉林[1]，黄文学[1]

(1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 湖州师范学院，浙江 湖州 313000)

摘要： 为了对兰州彭宁离子阱LPT 内的离子运动进行偶极和四极共振激发，采用变压器原理，设计制作了两套分相器：一套工作频率为200 kHz～4 MHz，适用于四极激发模式；另一套工作频率为1700～1750 Hz，适用于偶极激发模式。详细测试了它们在空载和负载情况下的幅频曲线与相频曲线。测试结果表明：RF 分相偏置电路的输出幅度与相位均达到了设计要求。

关键词： 彭宁离子阱；共振激发；分相器

中图分类号： O571.1　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.511

1 引言

质量是物质的一个最重要的基本属性。在原子核物理领域，对每个新核素或者新元素的研究，质量是必须研究的性质之一。而彭宁离子阱作为迄今为止测量精度最高的原子核质量测量设备，已成为当今国际上核物理研究必不可少的设备，如欧洲核子研究中心 (CERN) 的ISOLTRAP[1]，德国重离子研究中心 (GSI) 的SHIPTRAP[2]，美国密歇根州立大学 (MSU) 的LEBIT[3]，美国阿贡国家实验室 (ANL) 的CPT[4]，芬兰JYFL 实验室的JYFLTRAP[5]等。在未来相当长的时间内，利用彭宁离子阱进行质量测量将越来越重要[6]。中国科学院近代物理研究所的兰州彭宁离子阱 (Lanzhou Penning Trap，LPT)[7]，目前已进入实际调试阶段。

兰州彭宁离子阱建造的主要目的，是测量由熔合蒸发反应产生的放射性核素的质量，并在可能的条件下对超重核的质量进行直接的精确测量[8]。熔合蒸发反应的产物经RFQ冷却聚束器冷却聚束后，经过一系列束流调节，首先输送到LPT的纯化彭宁阱中，去除杂质离子，然后输送到测量彭宁阱中，对离子进行质量的高精度测量。

彭宁阱是电磁阱，由磁场和电场的共同作用实现对离子的约束。在理想彭宁阱中，离子的运动由三个本征运动叠加而成：轴向上频率为ω_z的简谐振动及径向平面内频率分别为ω_+和ω_-的reduced cyclotron运动、magnetron运动。它们的关系为

$$\omega_\pm = \frac{\omega_c \pm \sqrt{\omega_c^2 - 2\omega_z^2}}{2} 。 \tag{1}$$

其中：ω_c为离子在阱中运动的回旋频率，当磁场强度为B，离子质量为m，电荷数为q时，其表达式为

$$\omega_c = \frac{qB}{m} 。 \tag{2}$$

对离子进行高精度的质量测量，最常用的一种方法是对阱内的离子进行偶极与四极共振激发[9]，通过对其飞行时间进行测量来确定离子的回旋频率ω_c。由于$\omega_c = qB/m$，在已知离子的电荷态q以及磁场强度B的情况下，即可得出离子的质量m[10]。所以，要实现质量测量的目的，首先要在阱中产生一个偶极激发场与四极激发场。

与国际上所有彭宁离子阱类似，LPT 核心部分中心环电极平均分为四部分，如图1所示，相对电极加

收稿日期： 2013-10-31；　**修改日期：** 2014-01-08

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(10627504, 11075188, 11405243, 11405054)；国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2013CB834400)

作者简介： 王均英(1984–)，女，山东日照人，助理研究员，硕士，从事粒子物理与原子核物理研究；
E-mail：wangjunying@impcas.ac.cn

通信作者： 黄文学，E-mail：huangwx@impcas.ac.cn。

http://www.npr.ac.cn

相同的射频电压，同时相邻电极加振幅和频率相等、相位相差180° 的射频电压，将分别产生偶极激发场和四极激发场。RF 分相偏置电路即作为射频信号源，用于LPT 核心部分中心环电极的馈电。它由RF (射频) 分相器和RF-DC (射频-直流) 混合电路组成，RF 分相器将输出两路振幅相等、相位相差180° 的射频信号，RF-DC 混合电路则为这两路输出加一个直流偏置。

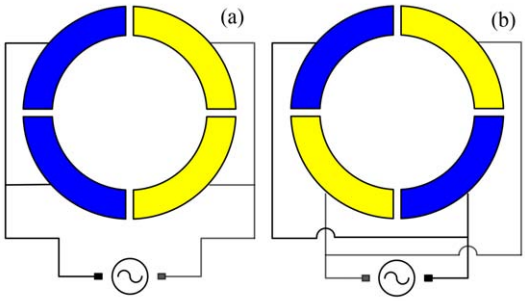

图 1 (在线彩图) 产生偶极激发场 (a) 与四极激发场的连线示意图 (b)

2 设计

根据LPT 的技术要求，对应于质量数为30～400 amu，电荷态为1^+的目标核，在磁场强度$B=6.95$ T 的情况下，由公式 (1) 和 (2)，对于四极激发模式，激发频率$\omega_{\rm rf}$等于$\omega_{\rm c}$，为200 kHz～4 MHz RF；对于偶极激发模式，激发频率$\omega_{\rm rf}$ 等于ω_-，为1700～1750 Hz。所以，适用于四极激发模式的RF 分相器，工作频率设定为200 kHz～4 MHz，适用于偶极激发模式的RF 分相器，工作频率设定为1700～1750 Hz。

对于激发电场电压幅度$V_{\rm rf}$，根据理论推导，有如下关系[11]：

$$V_{\rm rf}=\frac{4\pi a^2 B}{T_{\rm conv}}\ 。\tag{3}$$

$T_{\rm conv}$ 在实际操作中等于激发时间$T_{\rm rf}$ ，激发时间受限于目标核的寿命及测量精度[10]。a是势阱的几何因子，在理想情况下，可以近似为势阱中心环电极的半径。综合国际上众多的彭宁离子阱设备，几个参数的典型值为：$T_{\rm conv}$=1 s，$B=9$ T，a=1 cm，则激发电压幅度$V_{\rm rf}$ 约为10 mV。对于LPT，其参数为$B=6.95$ T，$a=1.6$ cm，在激发时间为1 s时，其$V_{\rm rf}$ 约为20 mV。对寿命较短的离子，激发时间仅为几百或者几十ms，则此时激发幅度应为几百mV。所以，RF 分相器的输出电压幅度设定在几至几百mV。

在以上工作参数的基础上，要求两路输出到环电极的射频正弦波电压振幅和频率相同，而相位相差180° ，并要求频率和电压调节方便，设备运行可靠。据此，采用了变压器原理来设计此RF 分相器。

变压器的铁芯主要有铁氧体磁性材料与金属或合金材料两种，软磁铁氧体由于具有较高的磁导率与电阻率，有利于降低涡流损耗，从而被广泛应用于高频变压器的制作[12]。

软质铁氧体材料大多数用到镍锌和锰锌，表1给出了常见铁芯材料的特性[13]。根据RF 分相器的工作频率，我们选择适用在该频率范围的镍锌铁氧体作为RF 分相器的变压器铁芯。

表 1 常见铁芯材料特性

材料	商品名称	导磁率$\mu_{\rm i}$	磁通密度$B_{\rm s}$/T	典型的工作频率/Hz
硅钢	3～97 SiFe	1 500	1.5～1.8	2～50 k
镍铁磁性合金	50～50 NiFe	2 000	1.42～1.58	2～50 k
玻莫合金	80～20 NiFe	25 000	0.66-0.82	1～25 k
非晶材料	2 605 SC	1 500	1.5～1.6	250 k
非晶材料	2714 A	20 000	0.5～6.5	250 k
非晶材料	Nanorrystalline	30 000	1.0～1.2	250 k
铁氧体	MnZn	0.75～15 k	0.3～0.5	2～10 k
铁氧体	NiZn	0.20～1.5 k	0.3～0.4	0.2 ～100 M

磁环的内外径差越大，轴向越长，阻抗越大。因此，要获得大的衰减，在铁氧体磁环内径包紧导线的前提下，应尽量使用体积较大的磁环。从价格、占用空间和性能参数等方面综合考虑，我们选用了EPCOS 公司型号为B64290L0082×N30 的镍锌铁氧体，其内径为30 mm，外径50 mm，高度20 mm。

对于变压器的线圈，考虑到电流大小和对磁环的支撑能力，我们采用了直径为1.2 mm 的漆包线进行

http://www.npr.ac.cn

绕制，并用聚丙烯薄膜缠绕磁环作为绝缘层。

增加线圈匝数可以增加低频阻抗，但是由于寄生电容增加，高频阻抗会减小，所以不能盲目增加匝数来增加衰减量。当需要抑制的干扰频带较宽时，可分别在几个磁环上绕不同的匝数以适用于不同的频带。

我们所设计的分相器分为两类，一类适用于四极激发模式，一类适用于偶极激发模式，区别仅在于次级线圈的绕线匝数。由于适用于偶极激发模式的分相器工作在 1 ～ 2 kHz 的低频段，所以次级线圈的匝数较适用于四极激发模式的分相器多。

以适用于四极激发模式的分相器为例，我们所设计的变压器绕线如图 2(a) 所示。AB 为变压器初级，匝数为 5 匝。变压器次级分为两个绕组，CD 端输出 1 绕组和 DE 端输出 2 绕组，同向各绕 3 匝 (适用于偶极激发模式的分相器次级绕组为 9 匝)，D 点为参考点。制作完成的变压器被装入一金属屏蔽盒内，以屏蔽其他电磁波干扰，减小噪声。

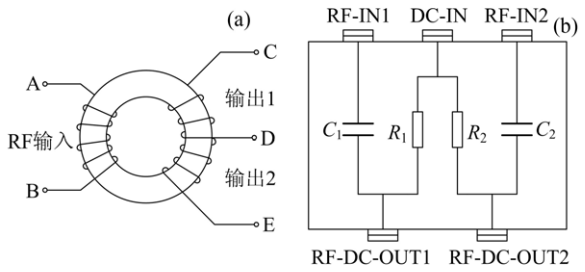

图 2　适用于四极激发模式的分相变压器绕线图 (a) 及 RF-DC 混合电路原理图 (b)

为了简化 LPT 使用的电源，核心区所有电极都置于正电位上。因此，提供偶极激发和四极激发的射频信号源需要有一个正向偏压，这就需要用到 RF-DC (射频-直流) 混合电路。

图 2(b) 为 DC-RF 混合电路原理图，RF-IN1 与 RF-IN2 为射频信号输入端，接 RF 分相器的两路输出，DC-IN 为直流电平输入端，RF+DC-OUT1 和 RF+DC-OUT2 为输出口，与彭宁离子阱的环电极相接。电容量 4 700 pF 的 C_1、C_2 为耦合电容，其阻抗大小可由下列公式算出：

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f c} 。 \tag{4}$$

其中：f 为频率；c 为电容大小。电阻值 10 kΩ 傅 R_1、R_2 为防止负载短路的限流电阻。该电路的作用是把交流和直流耦合输出，从而实现抬高或降低交流电电位的目的。

3　性能测试

为检测所研制的 RF 分相偏置电路的性能，我们对其输出信号分别进行了测试，以得到 RF 分相偏置电路工作的幅度随频率变化的幅频曲线，和相位差随频率变化的相频曲线。测试方式如图 3 所示：Agilent 3320A 信号源的输出信号通过衰减器后输入到 RF 分相偏置电路，负载测试时，分别以图 1 所示的四极激发、偶极激发模式连接到 LPT 核心部分环电极上，空载测试时不连接任何电极，同时用 Tektronix TDS-3054C 数字示波器监测输出信号。RF 分相器的参考点接地，RF-DC 混合电路的直流电平信号不输入。

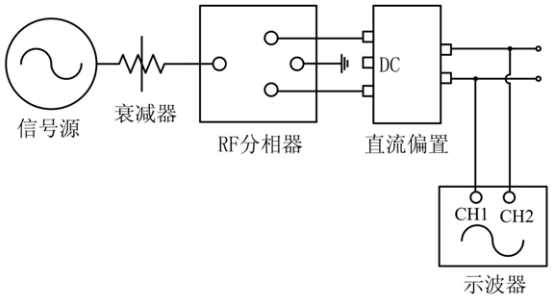

图 3　RF 分相器测试方式示意图

测试时，从 Tektronix TDS3054C 数字示波器上直接读出两路输出的幅度与相位差。对于示波器显示跳跃较频繁的相位差示数，采取了每个相位差读取多组数据，最后将多组数据取平均，并将其标准偏差作为测量误差的处理方式。

对于适用于四极激发模式的分相器，选择频率范围为 200 ～ 4 000 kHz，信号源输出的正弦波信号大小固定为 1 V，衰减器衰减倍数为 20 dB。

四极激发模式测试得出的幅频与相频曲线如图 4 所示。V_1，V_2 为两路输出的幅度，$V_1 - V_2$ 为两路输出幅度之差，$\Delta\phi$ 为两路输出的相位差，f 为信号源输出频率。镍锌铁氧体磁环是一个非线性元件，其与频率的相关性曲线呈高斯分布，可以看出，我们所测试到的幅频曲线整体趋势随频率的升高而增大，处于高斯分布的初始上升阶段。同时，空载时 (图 4(a)，(b)) 两路输出幅度相差总体小于 1%；负载时 (图 4(c)，(d))，在频率 < 3000 kHz 时，两路输出幅度相差约为 1%，频率为 3 000 ～ 4 000 kHz 时，两路输出相差

http://www.npr.ac.cn

较大，约为3%，幅度差别的原因在于负载具有一定大小的电容，由于安装时难以避免的位置偏差导致两路输出的耦合电容值存在差异，从而使两路输出幅度差别增大。四极激发在空载与负载模式下的两路输出相位差分别为 $(179.8\pm0.6)^\circ$ 与 $(180.1\pm0.8)^\circ$。

对于适用于偶极激发模式的分相器，选择频率范围为1700 ~ 1750 Hz。测试时信号源输出幅度设为9 V，信号同样经20 dB衰减器衰减。

与四极激发一样，偶极激发时所测量到的幅频曲线和相频曲线也会受到镍锌铁氧体磁环的非线性因素及负载电容差的影响，如图5所示，空载时(图5(a)，(b))两路输出幅度相差总体小于1%，负载时(图5(c)，(d))两路输出幅度相差3%左右，两路输出相位差分别为 $(182.6\pm2.5)^\circ$ 与 $(180.0\pm3.2)^\circ$。

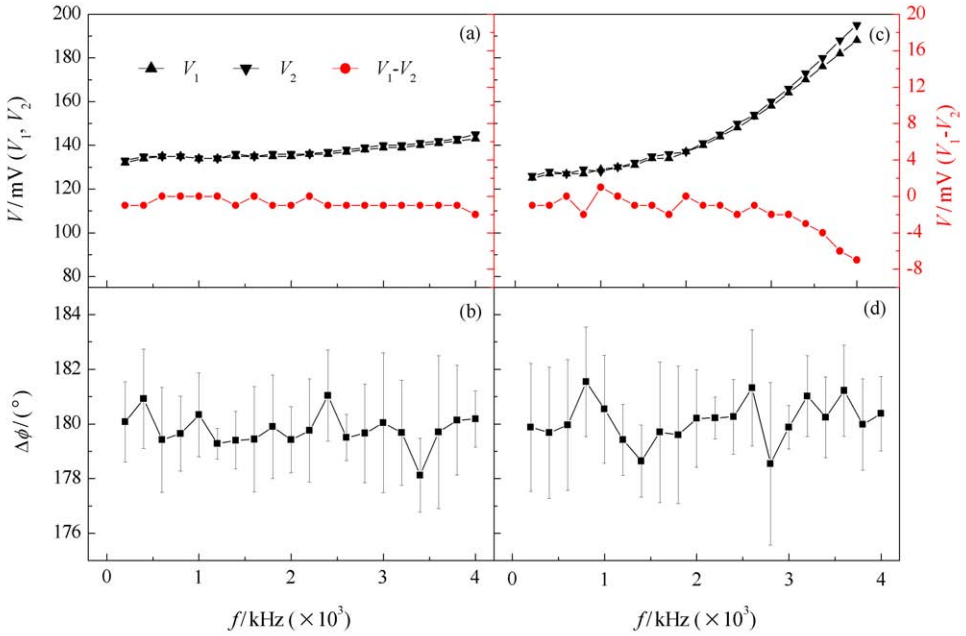

图 4 (在线彩图) 四极激发模式下测量得到的幅频和相频曲线

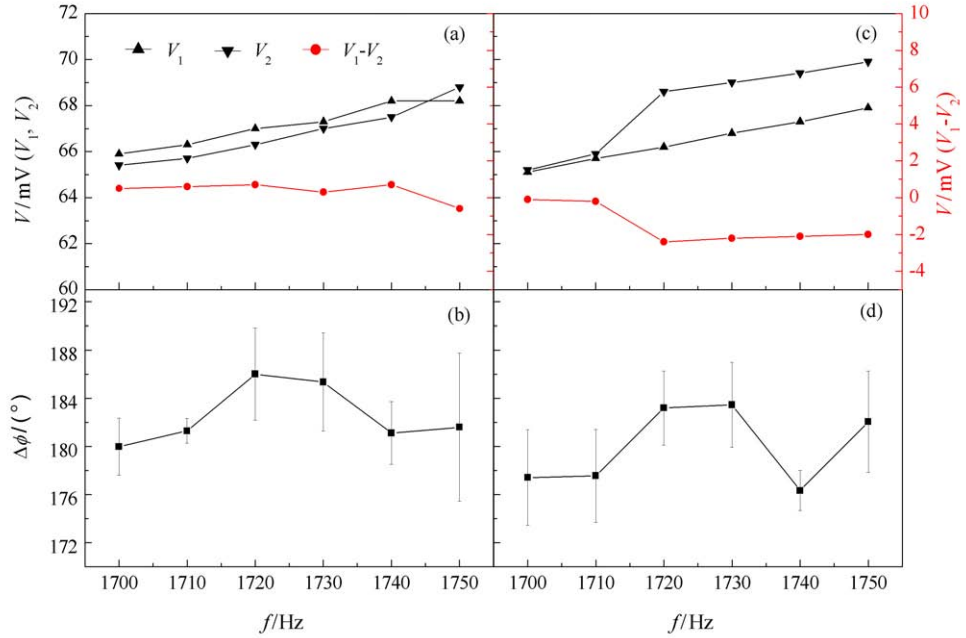

图 5 (在线彩图) 偶极激发模式下测量得到的幅频和相频曲线

http://www.npr.ac.cn

4　结论

由以上测试结果可以看出，RF 分相器两路输出幅度之差，在空载模式下很小，为 1% 左右，接负载后，相差略增大，但仍在 LPT 可接受的误差范围内。两路输出的相位差，四极激发模式下测试结果良好，偶极激发模式下较差，考虑到偶极激发的作用，此相差仍在可接受的范围内。因此，考虑上测量误差和噪声干扰等因素，RF 分相偏置电路已达到设计要求。

参考文献：

[1] BOLLEN G., BECKER S, KLUGE H J, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1996, **368**: 675.

[2] SIKLER G, ACKERMANN D, ATTALLAH F, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2003, **204**: 482.

[3] BOLLEN G, SCHWARZ S, DAVIES D, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **532**: 203.

[4] WANG J C, SAVARD G, SHARMA K S, *et al.* Nuclear Physics A, 2004, **746**: 651.

[5] KOLHINEN V S, KOPECKY S, ERONEN T, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **528**: 776.

[6] BOLLEN G. Nature, 2010, **463**: 740.

[7] HUANG Wenxue, XIAO Guoqing, WANG Yue, *et al.* Chin Phys C, 2008, **32**: 197.

[8] HUANG Wenxue, TIAN Yulin, WANG Junying, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2013, **317**: 528.

[9] SUN Yuliang, TIAN Yulin, HUANG Wenxue, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2013, **724**: 83.

[10] KLAUS B. Physics Reports, 2006, **425**: 1.

[11] BOLLEN G. Lecture Notes in Physics, 2004, **651**: 169.

[12] REN Li, ZHANG Huaiwu, SU Hua. Magnetic Materials and the devices, 2006, **37**(1): 42. (in Chinese)
(任利, 张怀武, 苏桦. 磁性材料及器件, 2006, **37**(1): 42.)

[13] TANG Qingsong, WU Qiang, CAO Huaizhi, *et al.* Converting Technique and Electric Traction, 2007，**6**: 36. (in Chinese)
(唐青松, 吴强, 曹怀志, 等. 变流技术与电力牵引, 2007, **6**: 36.)

Development of RF Phase Splitters for the LPT

WANG Junying[1]，WANG Yongsheng[1]，SUN Yuliang[1,2]，ZHAO Jianmin[1]，TIAN Yulin[1]，HUANG Wenxue[1]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. Huzhou Normal College, Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to excite the ions in the Lanzhou Penning Trap (LPT), two sets of RF phase splitters by using the principle of transformer have been developed, one of which is applied for the quadruple excitation and works at a frequency of 200 kHz ∼ 4 MHz and the other is for the dipole excitation and works at a frequency of 1700 ∼1750 Hz. Their amplitude-frequency and phase-frequency characteristic curves in the condition of without-load and with-load have been tested in detail. The results showed that the amplitudes and the phases of both RF phase splitters have met their design requirements.

Key words: Penning trap；resonance excitation；phase splitter

Received date: 31 Oct. 2013；　**Revised date:** 8 Jan. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10627504, 11075188, 11405243, 11405054); National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB834400)

Corresponding author: HUANG Wenxue, E-mail: huangwx@impcas.ac.cn.

http://www.npr.ac.cn