

共振引出系统的布局研究和模拟计算

丁小平

康文

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871) (中国科学院高能物理研究所 北京 100057)

摘要 在介绍 1/3 整数共振引出基本理论和相关技术的同时,通过简明的解析公式,详细研究和分析了共振引出系统的布局原理. 以一台小型医用质子同步加速器的磁铁聚焦结构为基础,给出了设计实例,并与计算机模拟结果进行了比较.

关键词 1/3 整数共振引出 布局 质子同步加速器

共振引出技术是在核物理和粒子物理计数实验慢引出要求的基础上发展起来的,近十年来,由于癌症治疗的需要,在应用质子和重离子同步加速器的治疗装置中,共振引出的技术受到了更大的重视. 它不仅影响到同步加速器主环磁铁聚焦结构和束流运输系统的设计,并决定着慢引出束流的品质^[1,2]. 衡量治疗装置中共振引出设计的成功与否,主要看引出效率是否高,引出束流强度的时间分布是否均匀和引出束流的发射度是否小等. 本文将通过一些简明的解析公式,来说明如何考虑 1/3 整数共振引出系统的合理布局. 接着,给出了基于北京质子同步加速器磁铁聚焦结构方案的设计实例和计算机模拟结果.

1 1/3 整数共振引出的基本原理和相关技术

1.1 基本原理

在文献中,普遍引入下面的哈密顿量^[3]

$$H = \frac{\epsilon}{2}(X^2 + X'^2) + \frac{S}{4}(3XX'^2 - X^3), \quad (1)$$

式中 (X, X') 是归一化坐标, S 为六极子归一化强度,代表六极子的非线性扰动作用, $S = (1/2) \beta_{x, \text{sext}}^{3/2} (d^2 B_y / dx^2) l_{\text{sext}} / (B \rho)$, 在环上有多块六极子的分布时, 则 $S e^{3j\psi_s}$

$= \sum_{m=1}^M S_m \beta_m^{3/2} e^{3j\psi_m}$, ψ_s 为方位角; $\epsilon = 6\pi \Delta Q_x$, ΔQ_x 是水平方向自由振荡频率相对于 $Q_x = n$ 的相对偏离.

由此,得到了一个稳定的固定点(中心点)和 3 个非稳定的固定点(鞍点). 过鞍点的 3 条直线被称作分界线. 分界线所围成的三角形外的区域为非稳定区. 三角形内的区域为

稳定区,其面积等于 $(\pi/\sqrt{3})(12\Delta Q_x/S)^2$,它对应于循环束的发射度.在非稳定区内,粒子的自由振荡振幅在引出分界线方向不断增长,在到达薄静电切割器(ES)的切割丝时,一般每三圈因振幅增长形成的螺旋形跨距达数毫米,远大于切割丝的厚度,因而可以基本无损失地进入ES的作用区域,并进一步经过其下游的磁切割器(MS)的作用而加以引出.这就是1/3整数共振引出的基本原理.

1.2 相关技术

为使稳定区内不同振幅和动量分布的初始循环束不断进入非稳定区和共振引出,目前经常采用3种技术方案,即移动共振的振幅选择机制、高频横向扰动方式的振幅选择机制和动量-振幅选择机制.比较而言,动量-振幅选择机制的主要优点是机器的参数不变化,引出束的动量分散窄、发射度小,另外,对引出束流中因磁铁电源引起的低频纹波和因粒子的旋转频率结构产生的1kHz以上的中频纹波均有抑制作用,引出束流的均匀性相对最佳.在讨论下面的共振引出系统布局时,将以动量-振幅选择机制为设计前提.

2 影响1/3整数共振引出系统布局的分析公式

2.1 引出分界线普遍方程

在上采一观察方位(相对于等效六极子方位的顺时针相移为 $\Delta\mu$),分界线的普遍方程为

$$\left(X - D_{\infty} \frac{\Delta P}{P}\right) \cos(\alpha - \Delta\mu) + \left(X' - D'_{\infty} \frac{\Delta P}{P}\right) \sin(\alpha - \Delta\mu) = h, \quad (2)$$

式中 h 表示从稳定区三角形的中心到分界线的垂直距离, $h = 2\epsilon/3S = 4\pi\Delta Q_x/S = (4\pi Q'_x/S)\Delta P/P$; α 为在等效六极子方位逆时针方向测量 h 离开正 X 轴的角度; D_{∞} 和 D'_{∞} 为观察方位的归一化色散函数及其导数.

2.2 在静电切割器处的束流光学^[4]

根据式(2),若观察方位在ES处(相对于等效六极子方位的顺时针相移是 $\Delta\mu_1$),当满足Hardt条件,即

$$4\pi Q'_x/S + D_{\text{nES}} \cos(\alpha - \Delta\mu_1) + D'_{\text{nES}} \sin(\alpha - \Delta\mu_1) = 0, \quad (3)$$

引出分界线方程将与动量无关.此时,因不同动量和振幅的引出分界线发生重叠,减少了引出束流的积分发射度和在ES切割丝上的损失.

2.3 束流在静电切割器上的损失和引出前在主环中的最大孔径^[5]

在ES的切割丝上,损失的粒子占引出束流的百分比 e 近似为

$$e = w(x_{\text{ES}} + \Delta x_{\text{ES}})/(x_{\text{ES}} \Delta x_{\text{ES}}), \quad (4)$$

式中 w 和 x_{ES} 分别为ES的切割丝厚度和水平位移, Δx_{ES} 为螺旋形跨距.

设 β_{ES} 和 β_0 分别是在 ES 和在环中最大孔径 x_{max} 方位的水平方向振荡振幅函数,则有

$$x_{ES} + \Delta x_{ES} = x_{max} (\beta_{ES}/\beta_0)^{1/2} \sin(\alpha - \Delta\mu). \quad (5)$$

从式(4)和(5)可看出,在 x_{ES} , x_{max} 和 β_0 一定时,提高 ES 处的 β_{ES} 是降低束流在 ES 切割丝上损失的有效途径.

2.4 在静电切割器处束流引出时刻的螺旋形跨距

依据式(1)得出的粒子运动正则方程,可以推导出 $\epsilon = 0$ 时,在 ES 处沿引出分界线方向束流引出时刻的螺旋形跨距近似式为

$$1/R_{ES} - 1/(R_{ES} + \Delta R) \approx (3/4)S, \quad (6)$$

式中 R_{ES} 和 ΔR 分别为在 ES 处沿着分界线的振荡振幅和螺旋形跨距.

3 医用质子同步加速器 1/3 整数共振引出系统的布局研究

对于采用动量振幅选择机制的医用质子同步加速器 1/3 整数共振引出系统来说,在进行布局设计时,主要有以下一些原则要求:

(1) 医用质子同步加速器一般工作于临界能量以下,根据加速器物理,为保证循环等待束的横向稳定,其色品应取负值;

(2) 为降低对真空盒的水平孔径要求,循环等待束最大发射度对应的稳定区中心应基本位于真空盒的中心轴线上;

(3) 在小环下,色散函数一般为正值, $D_{ES} > 0$. 由于 $\Delta Q_x = Q'_x (\Delta P/P)$, $(\Delta P/P)$ 为引出束流的动量分散宽度,等于稳定区面积最大和为零时两者之间的动量分散差异. 若 $\Delta Q_x > 0$, 则 $(\Delta P/P) < 0$, $D_{ES} (\Delta P/P) < 0$, 即要求循环等待束位于真空盒内侧和 ES 的切割丝位于真空盒外侧. 若 $\Delta Q_x < 0$, 结论则相反;

(4) ES 处应满足 Hardt 条件. 在 ES 处归一化相空间中,为使粒子受 ES 作用后远离切割丝,引出分界线只能在第一和第三象限内. 而且,在 ES 和 MS 间夹角为 90° 或 270° 的理想条件下,为使除引出分界线外的其余两条分界线不打到切割丝或板上,在 ES 处的引出分界线与 X 轴的夹角只能为 $45^\circ \pm 15^\circ$ 或 $225^\circ \pm 15^\circ$, 亦即要求 D_{nES} 和 D'_{nES} 反号. 以第一象限为例,由式(1)描述的粒子沿分界线的运动图,可以得出 Hardt 条件的下列简化式^[6]:

在 $\Delta Q > 0$ 和 $S < 0$ 或 $\Delta Q < 0$ 和 $S < 0$ 时,有

$$\varphi_1 = -\pi/6 + \psi_s - \psi_{ES} + 2\pi N/3, \quad D'_{nES} \cos \varphi_1 - D_{nES} \sin \varphi_1 = -4\pi Q'_x / S. \quad (7)$$

在 $\Delta Q > 0$ 和 $S > 0$ 或 $\Delta Q < 0$ 和 $S > 0$ 时,有

$$\varphi_1 = -\pi/6 + \psi_s - \psi_{ES} + \pi + 2\pi N/3, \quad D'_{nES} \cos \varphi_1 - D_{nES} \sin \varphi_1 = 4\pi Q'_x / S. \quad (8)$$

式中 N 在 0, 1 和 2 中选取;沿顺时针方向,ES 位于等效六极子的下游时, $\psi_{ES} > \psi_s$; φ_1 为 ES 处位于第一象限内的引出分界线与 X 轴的夹角,其选取范围为 $0^\circ < \varphi_1 < 60^\circ$.

在 $\Delta Q > 0$ 和 $S < 0$ 以及 $\Delta Q < 0$ 和 $S > 0$ 时,在 ES 处,引出分界线的方程和在满足 Hardt 条件下稳定区面积为零时的坐标分别为^[6]

$$X' = \frac{\cos(\varphi_1 - \pi/6) + \sqrt{3}\sin(\varphi_1 - \pi/6)}{\sqrt{3}\cos(\varphi_1 - \pi/6) - \sin(\varphi_1 - \pi/6)} X - \frac{2h}{\sqrt{3}\cos(\varphi_1 - \pi/6) - \sin(\varphi_1 - \pi/6)}, \quad (9)$$

$$X = \frac{2h}{(1 - \sqrt{3}D'_{\text{nes}}/D_{\text{nes}})\cos(\varphi_1 - \pi/6) + (\sqrt{3} + D'_{\text{nes}}/D_{\text{nes}})\sin(\varphi_1 - \pi/6)}. \quad (10)$$

在 $\Delta Q > 0$ 和 $S > 0$ 以及 $\Delta Q < 0$ 和 $S < 0$ 时,式(9)和(10)中的 $(\varphi_1 - \pi/6)$ 应被 $(\varphi_1 + \pi/6)$ 所取代;

(5) 色品调整和共振驱动用六极子的作用应互不影响. 从降低六极子的强度出发,色品调整和共振驱动用六极子所在位置的自由振荡振幅函数应尽可能大,色品调整六极子所在位置的色散函数也应尽可能大;

(6) 设 ES 的场强、纵向长度和给予粒子的冲击角分别为 E, L 和 φ , 则有 $\varphi[\text{rad}] = \arctan(EL/p\beta)[10^9 \text{ V}/(\text{GeV}/c)]$, p 和 β 分别为粒子的动量与速度. 在实相空间中,粒子从 ES 转至 MS 时,引出束和循环束之间的分离(未计入色散影响)为 $\Delta x_{\text{MS}} = \varphi(\beta_{\text{ES}}\beta_{\text{MS}})^{1/2} \sin\Delta\mu$. 该分离决定了可插入的 MS 切割板厚度. 显然,ES 和 MS 处的水平自由振荡振幅函数大时有利于降低 ES 的强度. 另外,从式(4)和(5)可知,ES 处的水平自由振荡振幅函数大还有利于提高束流的引出效率和降低主环的最大孔径.

4 北京医用质子同步加速器 1/3 整数共振引出系统的设计和模拟计算

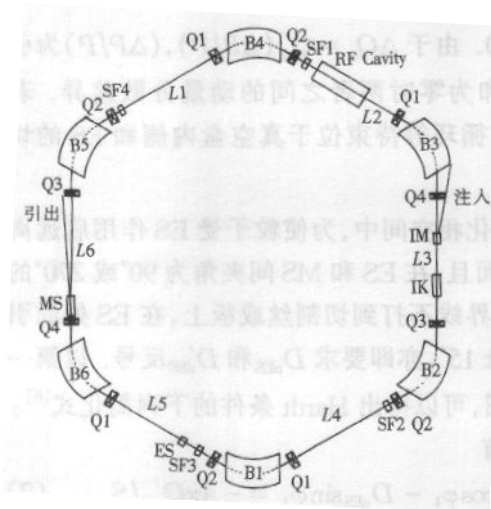


图 1 北京医用质子同步加速器的磁铁聚焦结构和共振引出系统布局

4.1 磁铁聚焦结构

北京质子治疗装置(简称 BPTS)的主体方案之一是一台强聚焦、分离型同步加速器¹⁾(见图 1). 它有两个超周期,在每个超周期中,有三块边缘角为 30° 的弯转磁铁、三块聚焦四极磁铁、三块散焦四极磁铁、一个 3.7m 的长直线节和两个 3m 的短直线节. 注入用切割铁(IM)和冲击铁(IK)占据一个 3.7m 的长直线节. 高频腔占据一个 3m 的短直线节. 该方案的主要参数见表 1.

4.2 共振引出系统的布局 and 理论设计

因 $\Delta Q_x > 0$, 要求 $Q'_x < 0$, ES 位于真空盒的外侧和 ES 处的引出分界线在第一象限内.

此外,为满足 Hardt 条件, D_{nes} 和 D'_{nes} 必须反号. 假定 ES 的切割丝位置离真空盒中心为 30mm, 经优化设计, 得到了以下的 1/3 整数共振引出系统的可能布局及理论计算结果:

1) Conceptual Design of Beijing Proton Therapy Synchrotron, Internal Report, 1996

表 1 北京医用质子同步加速器的主要参数

注入能量(MeV)	3.5	空间电荷限	8.7×10^{10}
注入时每圈旋转时间(μs)	1.33	引出能量(MeV)	70—200
主环周长(m)	34.4	磁铁聚焦结构	DOFB
水平振荡频率/垂直振荡频率	1.719/1.756	水平自然色品/垂直自然色品	-0.268/-2.694
水平振幅函数/垂直振幅函数(m)	6.5/7.4	动量分散函数(m)	2.84
注入束归一化发射度($\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$)	2.5	注入束动量分散宽度	3×10^{-3}

(1) 依据磁铁聚焦结构,只有将 ES 置于 L5 和 MS 置于 L6 直线节中的适当位置,才可以同时满足 ES 处的 Hardt 条件、ES 处的 β_{ES} 大、ES 下游 MS 的 β_{MS} 大和 MS 下游有较长的漂移直线节等原则要求;

(2) 在环上沿对角线安放一对强度相等、极性相反的六极子,总效果是作共振驱动,不影响机器的色品.而在环上沿对角线安放一对强度相等、极性相同的六极子,总效果是仅调整机器的色品,不影响共振驱动.而且,只有将共振驱动用的正极性六极子(SF3)置于 L5 直线节和负极性六极子(SF1)置于 L2 直线节中,以及将调整水平方向色品以满足 Hardt 条件的一对极性相同的六极子(SF2/SF4)安放于 L1 和 L4 直线节的始端,才能实现六极子处的水平方向自由振荡振幅函数较大,ES 处的引出分界线位于第一象限,以及在 ES 与 MS 间不存在六极子(可能会改变引出束流的几何位置)等要求.

(3) 在引出开始时,微调 Q4 使水平方向自由振荡频率从 1.719 移至循环束发射度下稳定区所相应的频率值.此时,各元件所在处的水平 Twiss 参数和相位见表 2.由此,ES 处的 D_{xES} 和 D'_{xES} 分别为 0.953m 和 -0.915m.通过前面介绍的分析性公式,得到 ES 处引出分界线与 X 轴的夹角 φ_1 为 56.2° ,引出分界线方程为 $X' = 1.491X - 0.00266$,实相空间和归一化相空间中粒子到达 ES 切割丝时的坐标分别为 (30mm, 11.7mrad) 和 (16.9mm, 22.5mrad),在实相空间下稳定区面积为零时的坐标为 (1.9mm, -0.63mrad) 另外,对应于螺旋形跨距 Δx_{ES} 为 8mm 时,共振驱动等效六极子归一化强度 γ 为 $0.0114\text{m}^{-1/2}$,引出束流的动量分散宽度为 0.114%,水平方向的相对色品为 -0.7,引出效率为 98.4%(假定 ES 切割丝厚度为 0.1mm).根据式(7)还可确定在主环中水平方向的最大孔径 x_{max} 为 70mm.

表 2 引出系统的水平 Twiss 参数和相位

	Q4/Q4	SF1/SF3	SF2/SF4	ES	MS
α_x	-0.065	1.747	1.747	0.1	0.727
D_x/m	1.324	2.985	3.180	1.694	1.396
D'_x	0.403	-0.566	-0.255	-0.568	0.133
$\mu/2\pi$	0.576/1.411	0.362/1.196	0.020/0.854	1.29	1.432

4.3 BPTS 1/3 整数共振引出系统的模拟计算

为了检验分析公式给出的设计结果,编制了计算机程序.经计算,得到引出束流的动量分散为 0.114%,等效六极子的归一化强度为 $0.0108\text{m}^{-1/2}$,水平方向的相对色品为

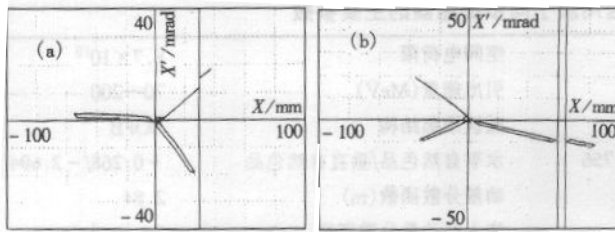


图 2 水平面上的实相空间示意图
(a) 在静电切割器出口, (b) 在磁切割器入口.

-0.67. 在 ES 处, 与最大稳定区和零稳定区相对应的两种引出分界线的水平方向螺旋形跨距分别为 8.11mm 和 7.64mm. 共振驱动和色品调整用六极子强度分别为 12.8944T/m² 和 4.44T/m². 在 ES 为 0.2m 长时, 需要的电场为 45.1kV/cm, 在 MS 为 0.6m 长时, 需要的磁场为 3.3kG. 在图 2 中,

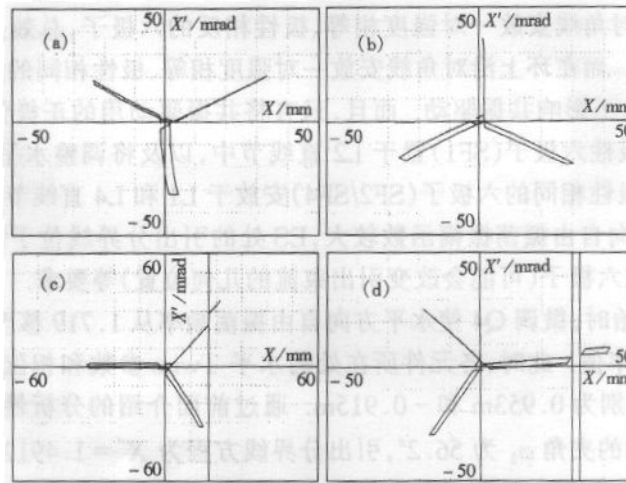


图 3 水平面上的归一化相空间示意图
(a) 在极性为负的六极子处; (b) 在极性为正的六极子处;
(c) 在静电切割器出口; (d) 在磁切割器入口.

给出了 ES 出口处和 MS 入口处实相空间中最大稳定区和零稳定区的两种能量下的引出分界线及被引出束流的粒子运动的相空间轨迹. 图 2(a) 中 30mm 处的垂线代表 ES 的切割丝, 图 2(b) 中 60 和 65mm 两垂线之间的区域代表 MS 的切割板, 切割丝或板右边的束流表示正在引出的束流. 在图 3 中, 给出了归一化相空间中极性为负和正的共振驱动六极子处、ES 出口处和 MS 入口处粒子运动的相空间轨迹. 在图 4 中给出了引出前 3 圈中每一圈的循环束流和最后引出的束流从 ES 起沿主环的水平方向位置偏离. 可见所需最大水平孔径为 69.1mm.

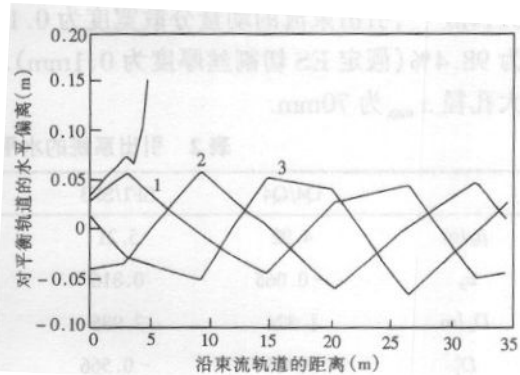


图 4 引出前 3 圈的循环束流和最后引出的束流沿主环的水平方向位置偏离

将上面的计算机模拟计算结果与用分析性公式给出的理论计算结果相比较, 可以看

到两者基本一致,说明分析性公式对共振引出系统设计有指导意义.

参考文献(References)

- 1 YU Qing-Chang, LUO Zheng-Ming. The Foundation of Proton Therapy Technology Beijing: Atomic Energy Press, 1999 (in Chinese)
(郁庆长,罗正明. 质子治疗技术基础. 北京:原子能出版社,1999)
- 2 Alexander Wu Chao, Maury Tigner Handbook of Accelerator Physics And Engineering, World Scientific, 1999, 289
- 3 Steinbach Ch. Beam Optics at Resonant Extraction Septa, CERN/PS 99-22(OP)
- 4 Barton M. Beam Extraction from Synchrotron. Proc. 8th Int. Conf. On High Energy Accelerators, CERN, Geneva, 1971. 85
- 5 Edwards D A. Syphers M J Resonance and Non Linear Motion, AIP Conference Proceedings 184 - Physics of Particle Accelerators, Fermilab Summer School, 1987. 2009
- 6 DING Xiao-Ping. The Study and Design of Injection and Extraction System for a Small Proton Therapy Synchrotron. Ph. D. thesis, Institute of High Energy Physics, Beijing, 1998
(丁小平. 小型医用质子同步加速器的注入和引出系统的研究及设计. 中国科学院高能物理研究所博士生论文. 1998)

Study of Layout Principle and Simulated Calculation for a Resonant Extraction System

DING Xiao-Ping

(*Institute for Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

KANG Wen

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract Based on the general theory and related technique of $1/3$ integer resonant extraction, main principle of layout for momentum-amplitude selection method is studied in detail and some simple analytic formulae are given. The design of slow extraction system for Beijing Proton Therapy Synchrotron (BPTS) is then given as an example by considering its lattice. The results are also compared with simulated calculation. Study shows that an extraction beam for BPTS with extraction efficiency above 98% and momentum spread of 0.11% can be obtained.

Key words $1/3$ integer resonant extraction, layout, proton synchrotron