

紧凑型中高能同步加速器的物理设计

黄良生, 王 生

(中国科学院 高能物理研究所 东莞分部, 广东 东莞 523803)

摘要: 本文采用束流光学匹配软件优化组合磁铁布局得到一种紧凑型的同步加速器。该加速器具有周长短、磁铁孔径小、束流品质高等优点。注入和引出设计是此同步加速器的关键点, 基于 Matlab/AT 开发了模拟软件, 模拟研究注入和引出相关束流动力学问题。研究结果表明, 该同步加速器束流品质优、注入效率高、引出束流损失低。该同步加速器可满足航天、材料和生物等多方面研究。

关键词: 同步加速器; 物理设计; 注入; 引出; 模拟

中图分类号: TL54; O572

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)10-1887-05

doi: 10. 7538/yzk. 2016. 50. 10. 1887

Physics Design of Compact Middle and High Energy Synchrotron

HUANG Liang-sheng, WANG Sheng

(China Spallation Neutron Source, Institute of High Energy Physics,
Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523803, China)

Abstract: A compact synchrotron was designed based on beam optical software. The advantages of the synchrotron are small circumference, small aperture of magnet and high beam quality. The design of injection and extraction is very important for the synchrotron. Based on Matlab/AT, a simulation code of injection and extraction was developed, and the dynamic of injection and extraction process was studied. The result shows that the beam in the synchrotron has high quality, high injection rate and low beam loss in extraction process. The synchrotron can be used to study of spaceflight, material and biology.

Key words: synchrotron; physics design; injection; extraction; simulation

同步加速器因可提供高能、连续、稳定脉冲等高品质的粒子束流而在航天、生物、材料及粒子治疗等领域广泛使用^[1-6]。我国此类专用同步加速器的研究建设开展较晚, 目前仅有少数几台在建设中^[7-8]。此类同步加速器的建设通常受限于经费和场地, 因此, 其设计要求高性能的同时需满足小型化布局, 以尽可能地降低成

本、节省空间, 本文称其为紧凑型同步加速器。为满足多个领域的研究需求, 应全面开展紧凑型同步加速器设计研究。随着我国航天科技事业的快速发展, 建设紧凑型同步加速器模拟太空宇宙射线用于航天材料、生物细胞、电子学器件等方面的研究成为当前的紧迫任务。因此, 哈尔滨工业大学主持设计建设一台中高能同步

加速器装置用于航天材料、航空器件和航空生物学研究。目前正在申请立项,而工程的核心同步加速器设计研究已开展,本文介绍一种可用于此项目的同步加速器建设方案。

紧凑型同步加速器物理设计主要指磁聚焦结构(Lattice)设计^[9-10],注入和引出设计是同步加速器物理设计的关键点。物理设计中要求实现的基本物理目标为:磁铁强度合适、孔径小,工作点易调,空间布局合理而紧凑,简易快速并高效率地实现注入和引出,引出束流连续、无抖动。本文基于此设计目标,设计一种可实际应用的紧凑型同步加速器,加速质子束流能量为7~300 MeV,同步加速器采用凸轨注入方案和基于三阶共振法的慢引出方案。基于此同步加速器,采用 Matlab/AT 程序^[11]开发注入和引出模拟软件,模拟研究注入和引出过程的束流动力学关键问题,证明同步加速器物理设计的合理性。

1 同步加速器 Lattice 设计

用 MADX 软件^[12]设计紧凑型同步加速器。设计的同步加速器由3个超周期单元组成,3个长2.1 m的长直线节用于安放注入、引出和高频等设备。图1为同步加速器以注入点为起点的光学参数。同步加速器的设计参数列于表1,设计名义工作点为(1.73, 1.35),引出时工作点调整为(1.67, 1.37)。全环由12台组合弯转磁铁、6台四极磁铁、3台六极磁铁、注入和引出设备组成。两种组合二极磁铁实现束流弯转和聚焦,二极磁铁长0.95 m,最大场强小于1.5 T,最大化地利用二极磁铁的边缘场。6台四极磁铁都是水平方向的聚焦铁,同步加

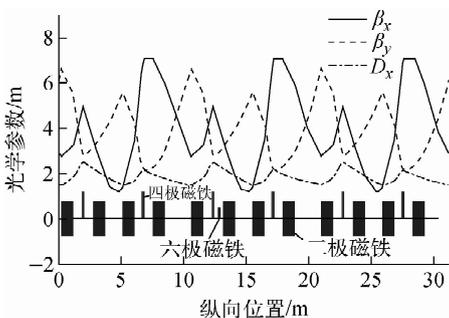


图1 同步加速器光学参数

Fig. 1 Optic parameter of synchrotron

速器工作点在1.67~1.73之间连续可调。临界能量 γ 为1.72,加速粒子始终工作在临界能量以下。在强六极磁铁作用下动力学孔径大于物理孔径。本同步加速器具有如下优点:1)同步加速器周长短;2)水平和垂直最大 β 小于7 m,色散函数 D_x 最大值为2.4 m,可实现磁铁较小孔径;3)所需磁铁数量少。

表1 同步加速器主要参数

Table 1 Main parameter of synchrotron

参数	量值
周长, m	31.2
注入能量, MeV	7
引出能量, MeV	300
长直线节, m	2.1×3
接受度(水平/垂直), $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$	200/50
重复频率, Hz	0.5
工作点(水平/垂直)	1.73/1.35
平均 β 函数(水平/垂直), m	3.9/4.1
色散, m	2.4
色品(水平/垂直)	-0.57/-2.6
临界能量 γ	1.72
高频频率, MHz	1.16~6.4
累积粒子数	2×10^{11}

2 注入设计及模拟

同步加速器采用多圈注入方式将来自直线加速器的质子束流注入到同步加速器中,实际注入在约10圈内完成,其中设计注入圈数为20。利用同步加速器2.1 m的长直线节和相位相距为 180° 的两台凸轨磁铁(bump)实现注入。为减小空间电荷效应和累积更多束流,同步加速器采用涂抹注入方式,缓慢降低两台水平凸轨磁铁强度以改变注入区循环束轨道,从而使直线束流进入同步加速器循环束稳定相空间的不同位置实现涂抹注入。注入束流能量为7 MeV,在2.1 m长直线节安装1台静电切割器(IES)即可将直线束流注入到同步加速器的接受度中。注入相关参数列于表2,IES电场强度为3.72 kV/mm。

根据设置参数,基于 Matlab/AT 软件开发注入模拟程序,模拟跟踪注入过程。假设每圈

注入 1 000 个粒子,模拟跟踪 20 圈。注入点的束流水平相空间分布如图 2a 所示,直线为 IES 的位置,IES 右边为注入束流,左边为累积循环束流。注入束流高度约 42 mm,凸轨由初始 36 mm 缓慢下降到 27 mm,注入完成后循环束流发射度约为 $120 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。注入结束跟踪 80 圈,在总 100 圈内循环束累积和加速过程如图 2b 所示,注入开始几圈凸轨较高,循环束流打到切割器上损失较多,从而累积粒子数少。20 圈注入完成后凸轨磁铁强度迅速下降到零,模拟跟踪 80 圈,循环束流无损失。注入效率大

于 60%,带电粒子主要损失在切割器上。

表 2 注入相关参数
Table 2 Parameter of injection

参数	量值
凸轨磁铁长度, m	0.1
凸轨磁铁 1/2 最大强度, mrad	21/18
IES 长度, m	0.8
IES 水平孔径, mm	10
IES 电场强度, kV/mm	3.72
IES 偏转角度, rad	0.226 5
IES 放置高度, mm	37.1

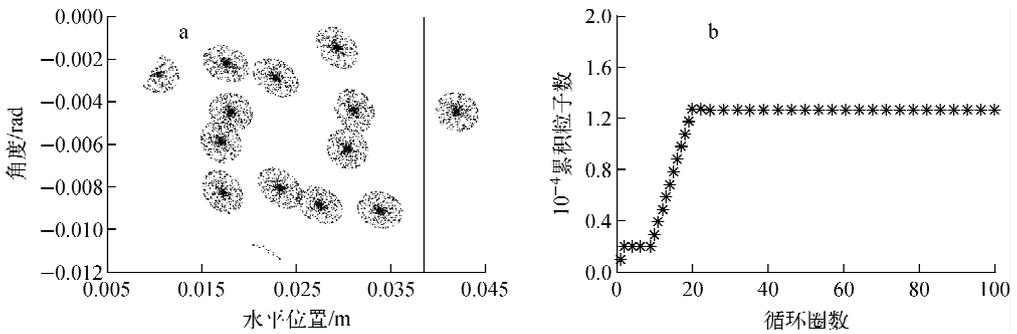


图 2 注入点的循环束流分布(a)和循环束累积过程(b)

Fig. 2 Cycling beam distribution at injection point (a) and accumulate process (b)

3 引出设计及模拟

同步加速器采用多圈慢引出的方式将能量为 300 MeV 的质子束流在水平方向长时间连续均匀地引出,引出时间约为 2 s。引出系统采用静电切割器(EES)和磁切割板(EMS)的设计方案,EES 和 EMS 均是快上升并有足够平顶宽的特殊磁铁,均在水平面内偏转束流。引出时首先调节同步加速器水平工作点到三阶共振线附近,循环束流受到共振六极磁铁的作用后水平相空间收缩为三角形。射频 kicker(RFK)是幅度不变、频率在一定带宽内按一定规律变化的高频冲击磁铁,当其频率与相稳定区内具有一定动量分散的粒子横向振荡频率相同时使这些粒子共振,粒子的横向振荡振幅增加进而粒子不断向稳定三角形的边界(分界线)靠近,束流跳出稳定区进入 EES 受到 ESS 的电场作用偏转,而后进入 EMS 受到 EMS 的磁场偏转而引出。

同步加速器的引出是同步加速器物理设计的关键点。引出系统分布在全环。EMS 安放

在一长直线节中,EES 占用弧区 0.7 m 的短直线节,EES 和 EMS 间的相移为 90° ,可将 EES 电场的全部作用量转化为 EMS 处粒子的幅度。设置一台共振引出六极磁铁(Sex 3),它与 EES 的相移为 44° ,位于非消散区的共振六极磁铁工作时同步加速器色品有一定变化,但仍能维持工作在临界能量以下的质子束流稳定运行。EES 也处于非消散区,为此设置两台色品校正六极磁铁(Sex 1 和 Sex 2)校正色品以使引出束流满足 Hardt 条件^[13],减小在 EES 处束流损失。

基于 Matlab/AT 开发模拟软件^[11],模拟同步加速器的引出过程。模拟中设置的加速束流由 2 万个宏粒子组成,当仅有共振六极磁铁引出时每圈引出粒子数服从瑞利分布^[14],循环和引出束流非正则相空间和正则相空间分布如图 3 所示,EES 处接受度大于 $200 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$,即 EES 水平位置为 25 mm,图 3a 中超出 0.025 m 的束流将受到 EES 电场作用而引出。

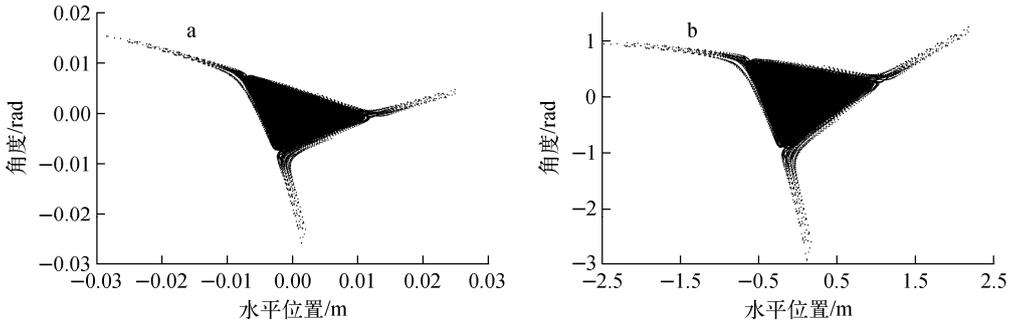


图3 质子束流水平非正则相空间(a)和正则相空间(b)

Fig. 3 Horizontal phase space (a) and normalized phase space (b) of proton beam

当六极磁铁工作时,加速粒子的水平椭圆相空间收缩为三角形,处于三角形外部的粒子横向振荡振幅增长较快,易引出,而处于稳定三角形内部的质子束流难以引出,造成引出不均匀,难以满足生物和治疗研究需要。为此,设置RFK连续、选择性地驱动部分粒子共振引出,在RFK作用下每圈引出粒子数变得均匀,这是材料辐照、生物和治疗所需要粒子束流具有的重要特性。基于模拟软件,模拟20万圈束流在六极磁铁和RFK作用下的引出,每圈引出粒子数如图4所示。可看出,每圈引出粒子数差别较小,引出束流抖动较小。模拟中部分粒子打在EES上而损失,损失率约为5%。引出束流相空间分布如图5所示,引出束流的螺旋形跨距为3.5 mm,螺旋形角度为3 mrad,引出束流发射度约为 $3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

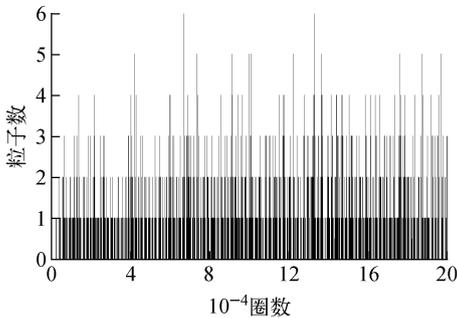


图4 六极磁铁和RFK作用下20万圈引出

Fig. 4 Extraction of 0.2 million turns with sextupole and RFK

二极磁铁和四极磁铁电源纹波将会引起工作点的微小变化,而引出工作点靠近三阶共振线,工作点的微小变化均将造成稳定相空间的

急剧变化,进而每圈引出粒子数差别较大。引出效率差定义为有纹波时引出粒子数和无纹波时引出粒子数的差值与无纹波时引出粒子数的比值。基于模拟软件模拟了5万个宏粒子不同纹波引出时工作点的变化和效率差。模拟中六极磁铁和RFK强度不变。表3列出同步加速器四极磁铁在不同纹波时的引出效率差。当四极磁铁纹波为50 ppm时,工作点变化为 $\pm 3 \times 10^{-5}$,引出效率差可控制在5%以内。当二极磁铁纹波为20 ppm时,工作点漂移约为 $\pm 3 \times$

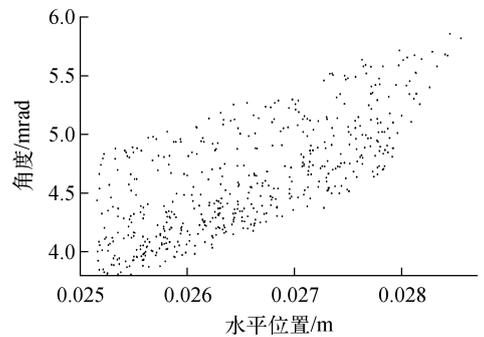


图5 引出束流相空间分布

Fig. 5 Phase space of extraction beam

表3 四极磁铁电源纹波引起的工作点漂移及引出效率差

Table 3 Tune spread and difference of extraction rate by ripple of quadrupole power supply

纹波/ppm	10^5 工作点漂移	引出效率差/%
50	3	5
-50	-3	5
100	5	9
-100	-6	24

10^{-5} 。因此,引出效率差控制在5%以内的二极磁铁纹波小于20 ppm,四极磁铁纹波小于50 ppm。表4列出了EES和EMS参数,在此参数下引出束流无损失地通过引出通道。

表4 EES和EMS参数

Table 4 Parameter of EES and EMS

参数	量值
EES长度,m	0.6
EES孔径,mm	10
EES电场强度,kV/m	4.7
EES偏转角度,mrad	7
EMS长度,m	0.8
EMS孔径,mm	20
EMS磁场强度,T	0.82
EMS偏转角度,(°)	13.75

4 结论

基于航天科学研究中同步加速器的广泛应用,本文介绍了哈尔滨工业大学设计的一种小型紧凑型同步加速器,同步加速器采用的磁铁少、周长短、所需空间小;注入和引出元件布局合理。基于Matlab/AT开发模拟软件,通过模拟研究表明该同步加速器能实现高效率注入和高效率引出。该同步加速器可投入实际工程建设并用于相关科学研究。

感谢中国科学院高能物理研究所的黄楠及加速器技术部物理组给予的指导和帮助。

参考文献:

[1] SCHIMMERLING W. Space and radiation protection scientific requirements for space research [J]. Radiation and Environmental Biophysics, 1995, 34(3): 133-137.

[2] FOURNIER C, BECKER D, WINTER M, et al. Cell cycle-related bystander responses are not

increased with LET after heavy-ion irradiation [J]. Radiation Research, 2007, 167(2): 194-206.

- [3] KAMIYA T, SAKAI T, HIRAO T, et al. Observation of radiation damage induced by single-ion hits at the heavy ion microbeam system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2001, 181(1): 280-285.
- [4] KOBAYASHI Y, FUNAYAMA T, WADA S, et al. Microbeams of heavy charged particles [J]. Biological Sciences in Space, 2004, 18(4): 235-240.
- [5] KANG H, SUH H. Proceeding of European Particles Accelerator Conference [C]. Genoa: EPS-AG Press, 2008.
- [6] WANG S. Concept design of the aerospace irradiation accelerator [R]. Beijing: IHEP, 2012.
- [7] LUO X, GUO Z, HAN Q, et al. The lattice design of a proposed Beijing Therapy Proton Synchrotron [R]. Beijing: IHEP, 2002.
- [8] 姚红娟,李光瑞. 西安200 MeV质子装置环布局和注入引出系统初步设计 [R]. 北京:清华大学, 2015.
- [9] LEE I, MARTIN J, McGRORY J, et al. Proceeding of Particles Accelerator Conference [C]. Washington, D. C.: IEEE, 1987.
- [10] NODA F, EBINA F, NISHIUCHI H, et al. Proceeding of Particles Accelerator Conference [C]. Columbia: IEEE, 2009.
- [11] TEREBILO A. Accelerator toolbox for MATLAB [R]. Stanford, USA: SLAC, 2001.
- [12] GROTE H, SCHMIDT F, DENIAU L, et al. The MAD-X program [R]. Genoa, Switzerland: CERN, 2016.
- [13] HARDT W. Ultraslow extraction out of LEAR [R]. Genoa, Switzerland: CERN, 1981.
- [14] FURUKAWA T, NODAB K, MURAMATSU M, et al. Global spill control in RF-knockout slow-extraction [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 522: 196-204.