

文章编号: 1001-4322(2005)12-1888-05

强流电子束束心横向运动调谐技术研究*

章文卫, 蒋 薇, 张开志, 戴志勇, 石金水, 邓建军, 丁伯南

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了为抑制“神龙一号”加速器束流束心螺旋运动而开展的强流电子束束心轨迹的调谐技术研究和实验结果。通过束质心轨迹校正调谐,使“神龙一号”输出束流脉冲 50ns 平顶部分螺旋模的振幅由大于 4 mm 减小到小于 1 mm。同时介绍了调谐原理和方法,相关的数值模拟结果与实验结果比较以及正在进行的计算机智能调谐研究。

关键词: 强流电子束; 束螺旋模; 束质心轨迹; 直线感应加速器; 调谐
中图分类号: TL53 **文献标识码:** A

强流脉冲电子束在被加速或长距离传输过程中,由于聚焦磁场的磁轴准直误差,入射倾角和束流的能散,使束质心产生螺旋运动,因而导致束流品质变坏。与 BBU 不同,束心螺旋运动是束脉冲行进中束心的低频振荡。当脉冲电子束入射到一个沿 $x-z$ 平面有倾角的螺线管磁场或以一小角度 α 沿 $x-z$ 平面倾斜入射时,束流脉冲质心产生横向运动。束质心的这种横向运动可以通过二极场偏转线圈进行校正。由于在强流直线感应加速器中束流存在能散,束流内部能量有差异的部分其横向运动的相移不同,使相移成为时间的函数。束脉冲期间束流各部分的这种横向运动就是束心的螺旋运动,束心螺旋运动形成后很难进行校正^[2]。

抑制束螺旋运动的主要方法为:尽量减小束流脉冲期间加速电压顶部波动,避免引起能散加大;准直磁场轴使各聚焦线圈的磁场轴与束线机械轴之间的偏差最小;采用偏转线圈修正聚焦磁场自身误差和抑制束质心横向运动振幅,以减小束螺旋模振幅。由于能散和磁轴准直误差只能控制到一定的程度,而束流注入加速器时也存在一定的倾角,因此在加速器末端要获得高品质的束流,采用偏转线圈对束质心轨迹进行调谐是必不可少的。为提高强流脉冲电子束流的输运水平,结合“神龙一号”加速器的研制和建造,对强流电子束束心轨迹的调谐技术进行了研究,对抑制束流脉冲期间螺旋模振幅取得明显的效果。

1 “神龙一号”^[1]束流输运系统简介

“神龙一号”束流输运系统由注入器、加速器、聚焦漂移段三大部分组成。“神龙一号”注入器输出束流参数为 2.5 kA, 3.5 MeV^[3]。加速器部分由 72 个加速腔(每经过一个加速腔电子束能量增加约 2.2 keV)和 18 个用于真空和测试装置的多功能腔组成。每个加速腔或多功能腔中均装有磁场元件^[4]。每 4 个加速腔和 1 个多功能腔组成一个加速段。沿束线安装的电阻环四象限束流参数探测器(BPM)共 21 个,检测在注入器出口、每个加速段、聚焦漂移段中部及聚焦透镜后(即输出)束流脉冲的流强和束质心位置。

“神龙一号”加速器沿束线共有 105 对偏转线圈(注入器 8 对,加速器 90 对,聚焦段 7 对)。加速器束输运聚焦磁场由置于加速腔内的螺线管线圈产生。为调谐束流质心位置,两对印制线路 $\sin \rho \cos$ 偏转线圈相互垂直置于螺线管线圈内壁上,用于对束流进行垂直、水平方向上的偏转调谐。螺线管线圈允许通过的最大电流为 500 A,可产生约 0.25 T 的磁场。用分辨率 10^{-5} T 的霍尔探测器逐点测得聚焦磁场在馈入电流 275 A 时,产生的磁场峰值约为 0.16 T。半径 $R=0$ cm $R=1$ cm $R=2$ cm 处测得的加速腔内沿 z 轴方向的磁场分布表明:以束管道为中心、半径 2 cm 的范围内,磁场沿半径方向基本均匀,磁场波动小于 0.3%。 $\sin \rho \cos$ 偏转线圈在输入电流 3 A 时,在束管道中心轴上产生磁场峰值约为 0.001 2 T,霍尔探测器逐点测得的加速腔内沿 z 轴的偏转(steering)磁场分布以及沿 z 轴的聚焦磁场分布表明,偏转磁场在 z 方向的宽度略小于聚焦磁场的宽度。在加速器的组建阶段,脉冲悬丝技术被用于加速段磁场轴的准直测试,并馈入偏转电流对倾斜偏差进行了静态校正。使每一个加速段的磁场轴,均位于以加速段束流管道机械轴为中心的半径 0.25 mm 的范围内,静

* 收稿日期 2005-06-27; 修订日期 2005-09-27

基金项目 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介 章文卫(1955—),副研究员,硕士,主要从事加速器物理及应用研究。

态校正后每个加速腔磁轴倾斜的绝对值小于 0.15 mrad。

2 数值模拟

强流电子束束心轨迹的调谐涉及到多个磁场参数的设置,束心轨迹调谐的基本原理就是根据 BPM 的测试值通过逐个调谐偏转线圈加载电流的大小,控制偏转磁场的大小,进而控制束心轨迹的一个复杂的循环过程。数值模拟在这一过程中是必不可少的。

2.1 束质心轨迹

束质心轨迹的数值模拟采用传输矩阵的方法,根据“神龙一号”加速段准直误差数据对束流质心轨迹和横向运动振幅进行了估算^[5]。束流初始数据为:3.5 MeV, 2.5 kA, 60 ns。所采用的物理模型如下:将束流近似为一系列的刚体束片,束片之间没有耦合,因此所有的束片可以同时运输。束心空间坐标参数由垂直的 y 和 y' ,以及水平的 x 和 x' 表示,这两个方向之间不存在耦合。将加速间隙的作用近似为电子能量的增量,每经过一个加速间隙电子的能量就增加 ΔE 。螺线管聚焦线圈磁场近似为一系列不同幅值的小螺线管线圈。一个加速腔内的磁场等效为 15 个小螺线管线圈的磁场。每个腔内的 x, y 偏转线圈磁场等效为小螺线管线圈间的薄透镜。束流的初始参数 x 和 y 采用注入器出口处的 BPM 探测的数值。由于 BPM 无法给出 x' 和 y' 的值,选用了几组不同的值进行计算和比较。将前一个透镜的输出束流参数作为下一个透镜的输入束流参数,以此类推,直至计算到加速器出口处。图 1 所示为根据 5633# 实验(未进行束心轨迹调谐)测得的注入器输出束流参数进行计算的束心轨迹和在各 BPM 上实测的结果比较,纵坐标为束质心位置的径向坐标 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。计算中取 $x' = 0.001, y' = -0.001$ 。图中三角形是测试结果,圆点是计算结果。由于 x', y' 无法确定,计算中曾选择了多种情况, $x' = 0.001, y' = -0.001$ 是与实验结果较接近的一组。

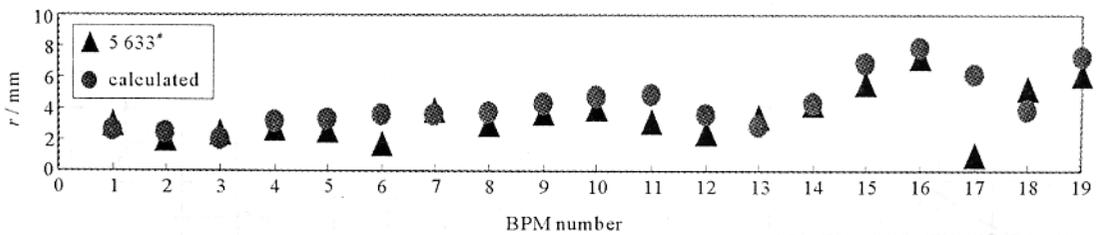


Fig. 1 Calculated and measured beam centroid trajectories

图 1 束心轨迹的计算值和测试值

由于参数 x', y' 和其他参数的近似,各加速段磁轴间存在偏差,不考虑加速间隙的横向电场分量作用等因素,计算结果与测试结果之间存在一定的误差,其中 BPM17 处的差别较大,参考前后两个 BPM 的结果,分析认为 BPM17 的系统误差较大是主要原因。从本次实验的结果来看计算结果仍具有较大的参考意义。

2.2 输出束流积分束斑的计算

契伦科夫辐射法测量输出束流时间分辨的能散显示,注入器输出束流有一定的能散,高能电子基本位于束脉冲的中部,能量较低电子分布在脉冲的头部和尾部。由于束流入射倾角和磁场误差存在于各个加速段中,因此束流经过若干加速段后将产生螺旋运动。将处于束脉冲不同部位束片的能量差别考虑在束心轨迹的计算中,可得出束脉冲期间沿束线任意点束流螺旋运动的幅度。假设束流在传输过程中能散没有发生变化,将束流分为不同能量的若干束片,能量分布在 3.5 (1 ± 3%) MeV 之间。分别计算各个束片沿束线的束心轨迹,在某个 BPM 处束片之间径向位置的最大偏差即为该处束心螺旋运动的最大幅度。计算结果显示束心螺旋运动在较下游的地方开始形成,在加速器出口处幅度为约 2 mm。螺旋运动的形成使束流的积分束斑加大,图 2 所示为加速器出口处的积分束斑计算结果,由于不同能量的束片具有不同的束心位置,因此积分束斑成为将所有束片包

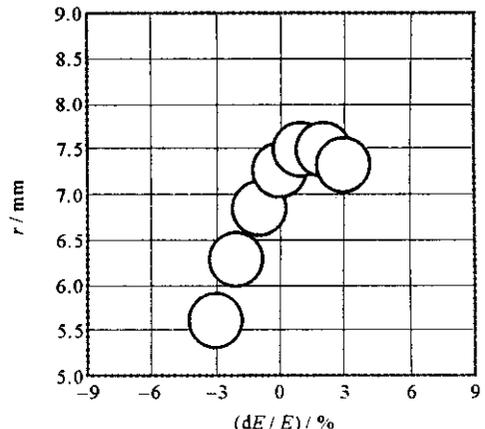


Fig. 2 Beam spot expanded by corkscrew motion

图 2 螺旋模产生引起输出束流束斑变大

含在内的一个较大束斑,同时有可能为不规则形状。

2.3 调谐特性曲线

调谐特性曲线是馈入偏转线圈的励磁电流与在该线圈下游的各个 BPM 处的束心位置 r 的关系曲线。如果调谐磁场范围足够大,在每条调谐特性曲线上都可以找到一个拐点。处于束线上游的偏转线圈所对应的特性曲线个数多于处于其下游的偏转线圈。如果改变处于束线上游的偏转线圈的参数将导致其下游束心轨迹的改变,使下游的每一个 BPM 处的束心位置 r 都发生变化。对应于一对偏转线圈,在其下游的每一个 BPM 处均可获得一组两条特性曲线,一条对应于垂直方向的偏转线圈,另一条对应于水平方向的偏转线圈。调谐特性曲线是各偏转线圈参数选择的依据。调谐特性曲线可以用实验的方法取得,也可以用数值计算的方法取得。对于重复频率不高的加速器,实验获得调谐特性曲线需要较长的时间。数值模拟的方法由于计算中模型的近似,会产生一定的误差。当然,实验测试也有一定的误差。图 3 所示为数值计算得到的第一个加速组元调谐特性曲线中最前面的三组和最后面的三组,其中实线对应于水平方向,虚线对应于垂直方向。

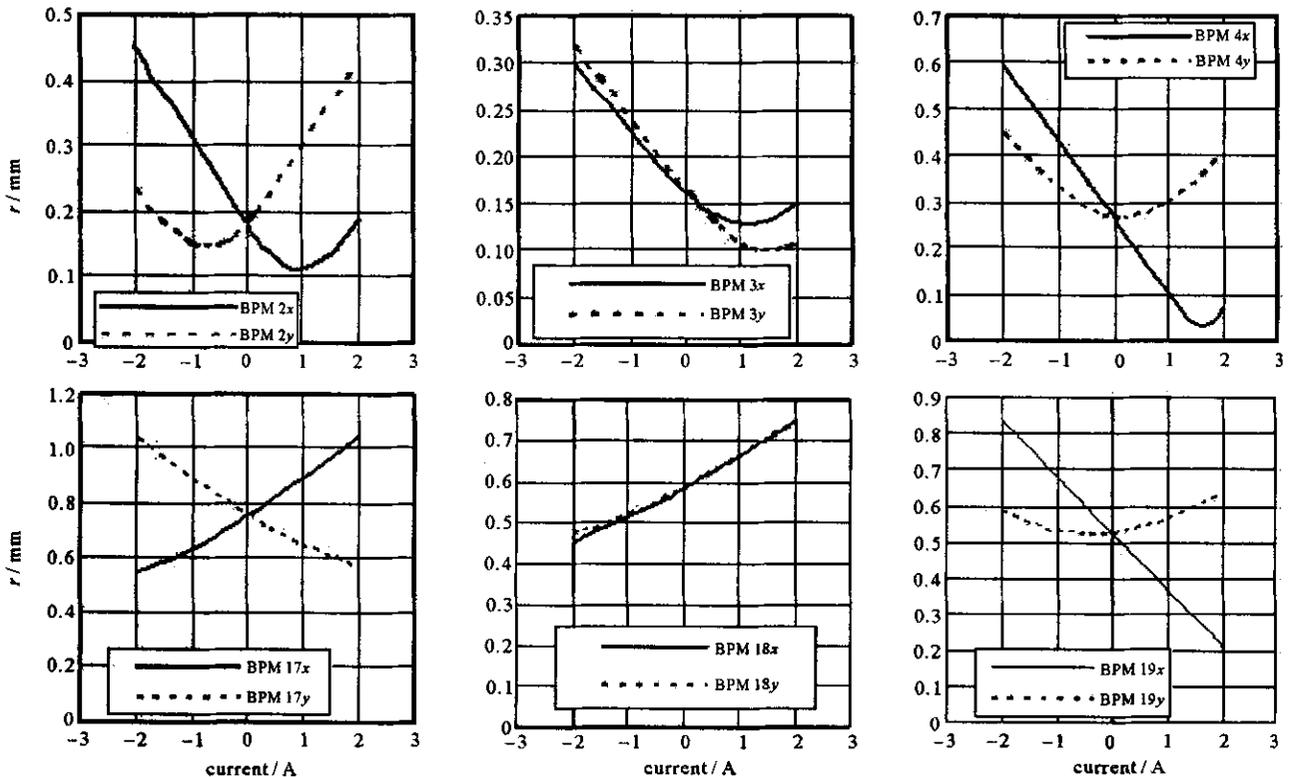


Fig. 3 Calculated tuning curves of the first pair steering coil

图 3 计算所得第一个加速腔的部分调谐特性曲线

3 束心轨迹调谐实验及结果

“神龙一号”束流运输系统由多个磁元件组成,每一个磁元件有 3 个可选择的参数:聚焦主磁场强度,水平和垂直方向偏转磁场强度,因此在相邻的两个 BPM 之间至少有大于 15 个可选择的参数。束流传输的物理过程是非常复杂的,而这个复杂的物理过程与上述磁元件参数选择密切相关。“神龙一号”强流脉冲直线感应加速器束流质心轨迹的调谐主要是通过多次实验完成的。实验中根据沿束线的 BPM 所测得的束心位置轨迹,输出束流脉冲顶部螺旋模的振幅,从束线上游开始,逐个改变束运输聚焦磁场中校正磁场的大小,通过实验验证其效果,并在下一次实验中再修改再验证。如果束心轨迹的横向运动振幅和各 BPM 上束流脉冲期间的螺旋模振幅皆在减小,说明调谐方向是正确的,如此循环往复,直至得到较满意的结果。一般情况下确定一个磁场单元中两对偏转线圈的设置,至少进行 4 次以上的出束实验。调谐过程中一个偏转线圈的设置有可能使整个束心轨迹发生大的变化,导致其他多个线圈的设置必须做相应的改变,因此调谐过程中需要反复实验。

“神龙一号”束心调谐实验是在束包络调谐已经完成,每一个聚焦主磁场螺线管线圈的参数已经设定的前提下进行的。束心位置的测试采用沿束线安装的电环四象限束心位置探测器,当束流经过时数字示波器记

录探测器上的四个波形 经处理后得到束心位置的信息。在调谐的开始阶段,调谐的目的和注意力均集中在减小各 BPM 处束心位置的偏移量上。从注入器开始,以最近的一个 BPM 为参考点,逐段调谐。在实验中发现,这种调谐方式有其局限性,尤其是对束线上游部分偏转磁场的调谐,调谐某一个线圈使其最近的 BPM 上测得的束心位移减小,但却引起束线下游某些 BPM 处测得的束心位移加大,有时临近 BPM 上束心横向位移减小而未一个 BPM 上螺旋模幅度增加,有的加速段中只需调节一个点,而另一个加速段要调节多个线圈,无一定规律可循,只有经过一定次数的实验才能选择到一组较好的设置。如同前述的数值计算结果所显示的那样,未经调谐的束流在接近加速器出口的部分束心螺旋运动开始形成,振幅大于计算值,约为 4 mm。

图 4 所示为调谐之前测得的第 21 个 BPM 处束流(即加速器输出束流)脉冲顶部 50 ns 内的束心位置波形。随后的调谐试验中对束螺旋模振幅的抑制投入的精力较多,仍从束线的上游开始,调谐的依据仍是下游各 BPM 测试的束心位置、螺旋模幅度的变化,尤其注重的是输出束流脉冲顶部螺旋模的幅度。

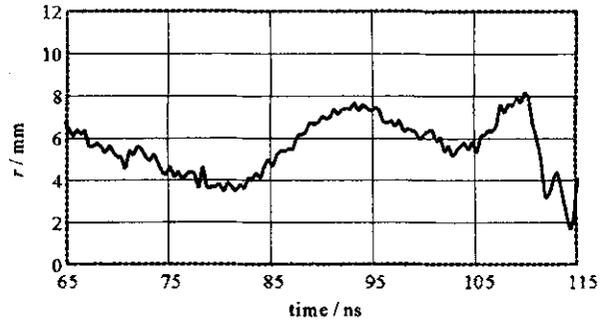


Fig. 4 Corkscrew amplitude before tuning (beam top 50 ns)

图 4 调谐前输出束流顶部 50 ns 内束质心位置波形

图 5 是调谐后输出束流(第 21 个 BPM 上测试)脉冲顶部 50 ns 内的束质心位置波形。表明加入调谐磁场的确起到了抑制束螺旋模的作用。根据束螺旋模形成的理论,束心位置的偏移和束脉冲期间的能散共同作用产生束脉冲期间的束螺旋模运动,因此调谐束心位置使每一个 BPM 处束心的偏移量尽可能小无疑是正确的方法。实验中仅以临近的 BPM 为调谐目标的局限性在于 BPM 仅能给出其所在点的束心位置偏移,而无法给出束流的倾角。如果束流从注入器以某一倾角进入加速器,经过某一个 BPM 时可能处于波峰、波谷或零点附近。这种情况下调谐的主要目标是减小束流进入每个加速腔的倾角,调谐的观察目标为输出束流的螺旋模振幅和下游多个 BPM 处的束心横向运动趋势,只有按照这一原则进行调谐才能达到减小束心横向运动振幅即束心偏移量、抑制束螺旋模产生的目的。

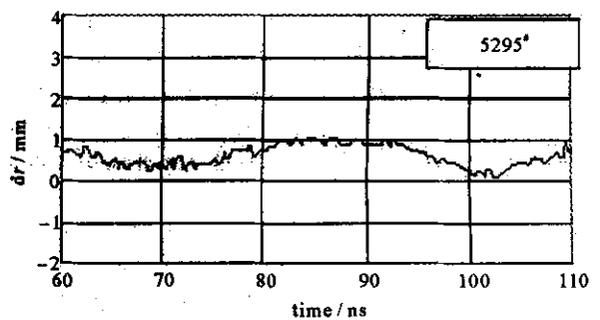
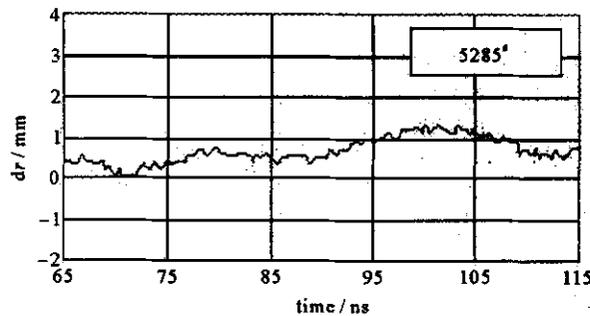


Fig. 5 Corkscrew amplitude after tuning (beam top 50 ns)

图 5 调谐后输出束流顶部 50 ns 内束质心位置波形

图 6 所示为调谐前后沿束线束质心轨迹的对比。方形标志为调谐前束质心轨迹,圆形标记为调谐后束心轨迹。可以看出调谐后沿束线束心横向运动振幅的减小。

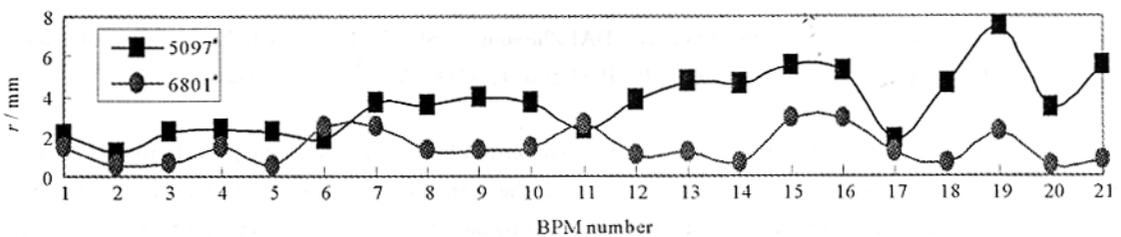


Fig. 6 Beam centroid trajectories before and after tuning

图 6 调谐前后沿束线束心轨迹的比较

4 束质心位置智能调谐系统

较大型的直线感应加速器完成束心位置调谐需要大量的时间和实验次数,对于类似“神龙一号”的强流单

脉冲加速器,由于束流输运系统无散热装置,实验重复频率非常低。在调谐实验次数有限的情况下,要取得最优化的调谐参数和最佳的调谐效果是不现实的。解决调谐参数设置优化问题,同时缩短调谐周期的唯一途径是采用计算机技术进行智能调谐^[6]。计算机智能调谐的重要基础之一是数值模拟,对于强流单脉冲加速器数值模拟尤其重要。我们正在尝试建立一套计算机调谐系统^[7],作为智能调谐的起步。通过数值模拟获得调谐特性曲线和选择一组初始的调谐参数,再通过延时闭环调谐实验和计算逐步修正,最终选定一组设置参数。这一方法在理论上是可行的,强流电子束的输运是一个复杂的物理过程,计算中的近似、输入参数中的误差、探测器的误差等都会在调谐过程中带来困扰,真正实现起来无疑是一种挑战,目前,初步的计算机延时闭环调谐实验正在准备之中。

图 7 所示为水平方向束流调谐过程数值模拟的中间结果和最终结果。图中三角形标记曲线为调谐之前的束流质心轨迹,方形标记为仅调谐束线上游的束心轨迹,圆形标记为调谐的最终结果。

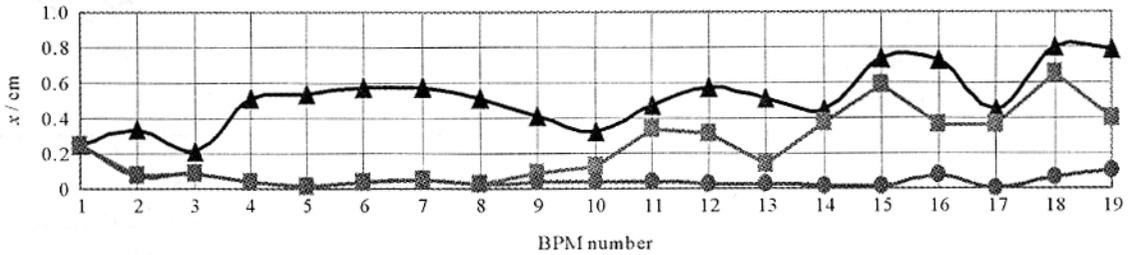


Fig. 7 Tuning simulation results of the beam centroid trajectory in horizontal plane

图 7 水平方向束流调谐数值模拟的中间结果和最终结果

参考文献:

- [1] 邓建军,丁伯南,王华岑,等.“神龙一号”直线感应加速器物理设计[J].强激光与粒子束,2003,15(5):502—504.(Deng J J, Ding B N, Wang H C, et al. Physical design of the Dragon-I linear induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5) 502—504)
- [2] William C T. Control of energy sweep and transverse beam motion in induction linacs[A]. Proceeding of 1991 PAC Conference[C]. USA, 1991.
- [3] Zhang K Z, Wen L, Li H, et al. 3.5 MeV injector for an induction linac[A]. Proceeding of Linac 2002 Conference[C]. Korea, 2002.
- [4] 代志勇,章林文,邓建军,等.“神龙-I”直线感应加速器束流输运系统设计[J].强激光与粒子束,2001,13(6):781—784.(Dai Z Y, Zhang L W, Deng J J, et al. Design of beam transport system for “SL-I” LIA. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6) 781—784)
- [5] Zhang W W, Zhang K Z, Liu C J. Beam centroid motion estimate for a high current LIA[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(6): 617—620.
- [6] Allen S L, Brand H R, Chambers F W, et al. Measurements of reduced corkscrew motion on the ETA-II linear induction accelerator[A]. Proceeding of 1991 PAC Conference[C]. USA, 1991.
- [7] 章文卫,蒋薇,张开志,等.强流直线感应加速器束流智能调谐系统设计[J].强激光与粒子束,2004,16(11):1493—1496.(Zhang W W, Jiang W, Zhang K Z, et al. Design of intelligent tuning system for a high current induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11) :1493—1496)

Beam centroid trajectory control for a high current LIA

ZHANG Wen-wei, JIANG Wei, ZHANG Kai-zhi, DAI Zhi-yong, SHI Jin-shui, DENG Jian-jun, DING Bo-nan
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to reduce the amplitude of corkscrew motion to obtain a high current pulsed electron beam with good quality, both simulation and experimental work were done based on the beam transport system of “Dragon-I”, which is a pulsed high current electron LIA. The beam centroid motion was controlled by adjusting the current fed into two pairs of steering coils located inside the accelerator cavities. The two pairs of steering coils are perpendicular to each other. The principle of the adjustments, simulations and experiments are introduced in this paper. Corkscrew amplitude of the output electron beam with 50 ns pulse flattop is reduced from 4 mm to less than 1 mm.

Key words: High current electron beam; Corkscrew; Beam centroid trajectory; LIA; Tuning