

文章编号: 100124322(2004)1121493204

强流直线感应加速器束流智能调谐系统设计^X

章文卫, 蒋 薇, 张开志, 代志勇, 石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了正在研究设计的调谐强流电子束束心轨迹的计算机智能系统。根据目前正在设计建造的“神龙一号”加速器束流运输环境,为抑制束心螺旋运动,适应束运输磁元件无散热装置,调谐过程中应尽量减少实验次数,智能调谐方法主要采用数值模拟和计算机克隆调谐和人工调谐相结合。以束心轨迹的数值模拟为基础,对束心位置调谐过程中的核心部分二极场调谐磁元件的调谐特性曲线进行了数值模拟,并与实验获得的调谐特性曲线进行了比较。获得了数值模拟和实验的初步结果。

关键词: 强流电子束; 束螺旋模; 束质心轨迹; 人工智能

中图分类号: TL53 **文献标识码:** A

“神龙一号”加速器有 18 个加速段,拟产生 20MeV, 2.5kA, 60ns 的强流脉冲电子束^[1],其束源是一台 315MeV 的注入器^[2]。每个加速段由四个加速腔和一个包含真空接口、测试接口的多功能腔组成。每个加速段的末尾安装了一个 BPM(束流位置探测器)。加速腔内装有螺线管线圈,形成加速器的束流运输系统^[3]。束流运输系统中螺线管的设计采用了较先进的方法,典型的是在每个螺线管线圈中均加入了水平和垂直方向的二极场调谐磁元件,用于校正加速腔内聚焦磁场由加工工艺等问题带来的磁场轴偏差和抑制由于倾斜入射引起的束质心轨迹振荡。束质心轨迹的调谐是根据 BPM 的测试结果,馈入合适的电流到水平或垂直二极场调谐磁元件,产生偏转磁场使偏离束管道中心轴线的束流返回到束管道中心轴线附近。强流脉冲电子束的束质心轨迹是多个束流物理参数,及磁场参数的函数,轨迹的形成包含着复杂的物理过程。要做到完全的精心的调谐不仅仅是需要时间和实验次数,还需要对其物理过程有较深入的了解,因此数值模拟与调谐实验同样重要。为了提高强流直线感应加速器束流运输水平,获得高品质的脉冲强流电子束,同时提高效率缩短调谐周期,有必要研制一套强流直线感应加速器束流智能调谐系统。

1 束螺旋模的形成和抑制

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。与束崩溃(BBU)不同,束心螺旋运动是在束脉冲期间束心的低频震荡。当脉冲电子束入射到一个沿 x_2z 平面有倾角的螺线管磁场或以一小角度沿 x_2z 平面倾斜入射时,在其下游电子束的轨迹可按下式计算^[4]

$$x(z) = (\sin \theta / k_c) \sin(k_c z) \quad (1)$$

$$y(z) = (\sin \theta / k_c) (1 - \cos(k_c z)) \quad (2)$$

式中: $k_c = eB / (m c^2)$, 从(1),(2)式可以计算出在这种情况下束流质心横向运动的振幅,以及束质心横向运动的相移 $\theta \leq k_c z$ 。束质心的这种横向运动可以通过二极场调谐磁元件进行校正。在强流直线感应加速器中束流的能散是不可避免的,由于能散的存在,束流内部能量有差异的部分将产生不同的相移,使相移成为时间的函数。如束流脉冲期间能散为 $\Delta E(t)$, 则 $\theta(z, t) = -k_{c0} z - \Delta E(t) / \dots$ 。此时(1),(2)式所表示的束流脉冲其各部分横向运动的轨迹为

$$x(z, t) = (\sin \theta / k_c) \sin(k_{c0} z - k_{c0} z - \Delta E(t) / \dots) \quad (3)$$

$$y(z, t) = (\sin \theta / k_c) [1 - \cos(k_{c0} z - k_{c0} z - \Delta E(t) / \dots)] \quad (4)$$

可见束脉冲期间能量不同部分的束流的束质心横向运动振幅也不同,因而导致束脉冲期间质心的螺旋运动。

抑制束螺旋运动的主要方法为:尽量减小束流脉冲期间的能散;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;采用调谐磁元件修正聚焦磁场加工误差和抑制束质心横向运动振幅,以减小束螺旋运

X 收稿日期:2004206207; 修订日期:2004208207

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—),女,硕士,副研,从事加速器物理、束流运输研究;绵阳 9192106 信箱。

动振幅的增长。由于束流脉冲期间的能散和磁轴准直误差只能减小到一定的程度,而束流注入加速器时存在一个小倾角也是不可避免的,因此在加速器末端要获得高品质的束流,采用二极磁元件对束心位置进行调谐是必不可少的。对于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,采用计算机智能调谐系统可缩短调谐时间和减少实验次数。美国利弗莫尔实验室建立了一套人工智能调谐专家系统 MAE2 STRO,应用于 ATA,ETA 两台较大型加速器,并沿用至今^[5]。

2 强流脉冲电子束智能调谐系统设计

强流脉冲电子束调谐系统的主框架由用户图形界面、数据库、数值模拟器、数据采集和调谐方法五个部分组成。调谐方法包括人工调谐;基于数据库的计算机克隆型自动调谐;计算机基于数值模拟器和数据库的智能调谐。图 1 所示为调谐系统原理框图。

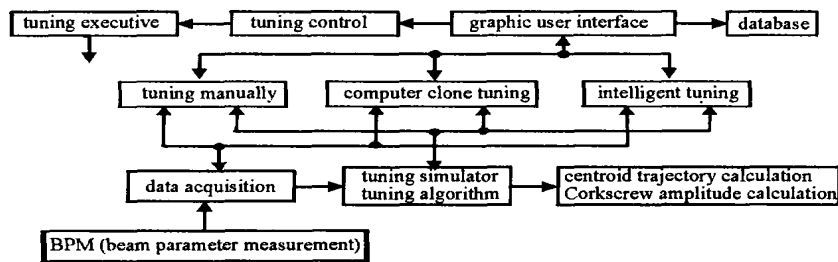


Fig. 1 Schematic of the tuning system

图 1 束流智能调谐系统方框图

由于“神龙一号”束流输运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,因此在相邻的两个 BPM 之间有 15 个可选参数。束流智能调谐系统设计的最终目标是根据束流、磁场、能量等参数通过数值模拟计算选择出各磁场元件的优化参数,实现束流参数特别是束心轨迹的快速调谐。实现图 1 所示的束流智能调谐系统,需较长的研究周期,和分阶段进行,因此软件设计成可扩展的,目前用户图形界面(GUI)和数据库组织部分已基本完成。计算机克隆调谐的研究正在进行中,并得到了初步的结果。

出于物理实验和加速器工程两方面的需要,参考利弗莫尔实验室研制的人工智能调谐系统,将调谐系统设计成智能与人工技术相结合,在闭环调谐过程中保持最大的灵活性。由于强流直线感应加速器输出的为单次脉冲电子束流,脉宽多为几十 ns 量级。所谓闭环是根据前一脉冲的测试结果通过计算设定调谐参数应用于下一个脉冲。图 1 所示的三种调谐方法中,在“神龙一号”注入器调试实验中已进行了人工调谐方法的实验研究,并取得了成功。注入器的调谐经验和数值模拟结果显示,要做到了解每一个加速段中每一个调谐元件的参数选择是否最优,靠人工调谐是不可能实现的。

而完全的计算机智能调谐,即整个调谐过程由计算机根据 BPM 测试参数,采用调谐模拟器在线模拟以及参考数据库提供的数据,自动决定调谐参数,完成束心轨迹的调谐,这种方式可节省调谐时间,在最短的时间内找到一组最优化的机器参数,但对调谐模拟器的计算执行时间,计算与实验的符合性要求极高,在短期内很难实现这一目标。

采用完全的计算机克隆调谐,即在一定范围内由计算机控制执行逐个元件调谐参数逐点扫描的实验,做出每个元件的调谐特性曲线,并根据调谐特性曲线确定元件调谐参数,从第一个加速腔开始到最后一个加速腔结束,虽然最终能确定一组优化的调谐参数,但需要非常多的实验次数。对于“神龙一号”类束流输运磁元件无冷却系统的加速器来说,过多的试验次数是无法实现的。

为尽可能的减少实验次数,目前克隆调谐方法设计成数值模拟与计算机克隆调谐相结合。计算机克隆调谐的过程中,获得二极场调谐磁元件的调谐特性曲线是调谐过程的基础,完成这一过程需要大量的实验次数。如果将获得各调谐元件的调谐特性曲线的过程改变为采用数值模拟的方法,并模拟束心轨迹调谐的全过程,确定初步的调谐参数。应用这些参数作为调谐的初始参数设置,采用计算机克隆调谐方式通过实验修正调谐参数,完成束心轨迹的调谐,可以有效地减少调谐过程中需要的实验次数。

3 调谐特性曲线的数值模拟和实验

强流电子束输运过程的数值模拟是智能调谐的基础和核心,图 1 中的数值模拟器就是一个计算束流输运

的编码。目前广泛应用于电子束流传输的数值模拟方法主要有:求解束包络方程,求解束心轨迹方程,PIC 以及求解束流传输矩阵等。各种方法和编码都有其优点和侧重面。要使数值模拟结果与实验结果很好的符合是非常困难的。需要多次反复的计算并在实验中验证。大多数数值模拟软件需要的执行时间较长,例如采用 PIC 要完成一台中规模的加速器的模拟计算需要几十个或上百 h,虽然矩阵法的执行时间较短,完成束心轨迹的一次计算只要 1~2min,计算一个加速段内五个腔的调谐特性曲线约需 8~10min,因此在调谐实验中进行调谐全过程的数值模拟显然是不合适的。如果数值模拟与实验结果能较好的符合,采用预先数值模拟调谐特性曲线代替大部分实验测试的调谐特性曲线无疑是解决减少调谐实验次数、提高效率的最好途径。

所谓调谐特性曲线是馈入调谐磁元件的励磁电流与在该磁元件下游的各个 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。处于束线上游的磁元件所对应的特性曲线个数多于处于其下游的磁元件。图 2 所示为计算预估的“神龙一号”的束心轨迹,连续曲线是沿束线的束质心轨迹,十字标记对应于各 BPM 沿束线的位置,如果改变处于束线上游的调谐磁元件的参数将导致其下游束心轨迹的改变,因而下游的每一个 BPM 处束心位置 r 都将产生变化。每组特性曲线包含两条,一条对应于垂直方向的磁元件,另一条对应于水平方向的磁元件。调谐曲线是各磁元件参数选择的依据,初步的调谐参数一般选择在调谐曲线上最小值的附近,经过进一步的反复计算和优化后确定最终的值。

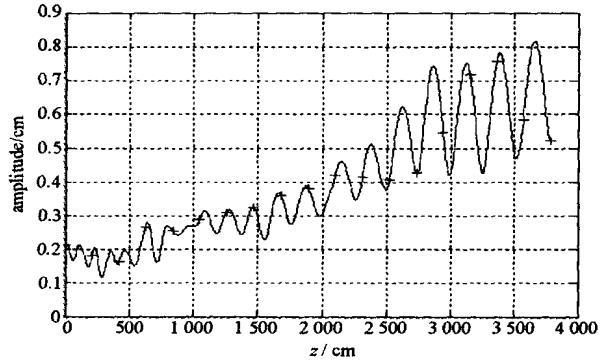


Fig. 2 Calculated centroid trajectory

图 2 计算得到的束质心轨迹

根据“神龙一号”注入器输出参数和束流运输系统的设计参数,对未来沿束线的束质心轨迹和第一个加速腔内磁元件在各 BPM 处的调谐特性曲线进行了数值模拟,同时在一台注入器和后续的两个加速段上对部分计算结果进行了实验对比。由于实验设备只有两个加速段因此只能获得第一个加速腔对应于第 2 和第 3 个 BPM 的调谐特性曲线。数值模拟采用传输矩阵的方法^[6],在以螺线管线圈为束运输主磁场的模型中加入调谐磁元件。数值模拟中被输运并加速的电子束流为 2.5kA,3.5MeV,束流的初始参数矩阵为 $[x, x', y, y'] = [0.186, 0.001, -0.103, 0.001]$,长度与角度单位为 cm 和 rad。调谐磁元件输入电流范围从 -5~5A,以 0.5A 为步进单位。得到一个加速腔内调谐磁元件在水平和垂直两个方向的调谐特性曲线要进行 42 次计算。

与数值模拟相同,获得一个方向的调谐特性曲线需要进行多次实验,由于给调谐磁元件提供励磁电流的恒流电源最大电流值为 2A,因此馈入调谐磁场元件电流的范围为 -2~2A。获得水平与垂直两个方向的调谐特性曲线共做了 14 次实验。图 3 和图 4 分别是第一个加速腔内调谐磁元件对应于第 2 和第 3 个 BPM 处的调谐特性曲线。图中圆点标记是计算结果,三角形标记是实验测试结果。图 3 和图 4 中左边和右边的曲线分别是水平方向和垂直方向的调谐特性曲线,即水平方向调谐磁元件或垂直方向调谐磁元件馈入不同电流值时,馈入电流值与 BPM 处束质心径向位置的关系曲线。图 3 和图 4 中可以看出大多数计算结果与测试结果的偏差在 0.5mm 以内,只有个别点的偏差接近 2mm,这意味着采用数值模拟替代部分实验是有可能的。误差产生的原因有计算模型中的近似,实验中冷阴极发射引起的束流参数的差别,BPM 的测试误差等。

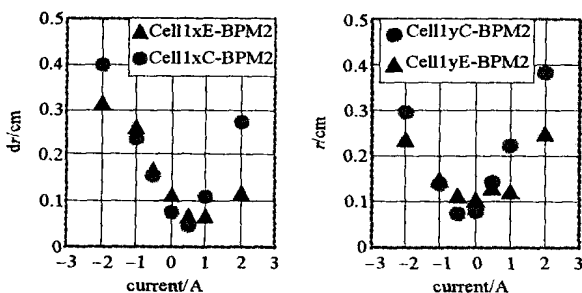


Fig. 3 Tuning curve of the first cell on BPM2

图 3 第 1 个加速腔内调谐磁元件在 BPM2 处的调谐特性曲线

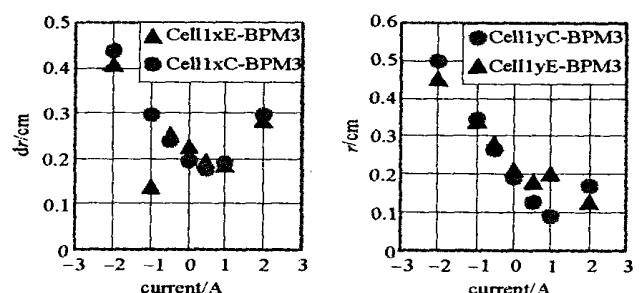


Fig. 4 Tuning curve of the first cell on BPM3

图 4 第 1 个加速腔内调谐磁元件在 BPM3 处的调谐特性曲线

4 结 论

利弗莫尔实验室的人工智能直线感应加速器调谐系统建于 20 世纪 90 年代初期,首先应用于 ATA 和 ETA 两台加速器,在 ETA 上应用的结果将 40ns 脉冲期间的束心偏移最大值,即束螺旋运动振幅由 6mm 减至 0.6mm^[7]。美国新近投入运行的加速器 DARHT2I 和正在调试的长脉冲加速器 DARTH2II 也都使用这套系统。以往我们在强流脉冲电子加速器方面的研究显示每台加速器在长期运行检修过后,都需要再次调谐。进行束质心轨迹智能调谐研究是非常必要的。考虑磁元件没有散热装置对实验次数的限制问题,无法采用利弗莫尔系统中完全计算机克隆人工的调谐方法,上述初步研究结果显示采用数值模拟与计算机克隆相结合的方法,只要适当的提高数值模拟的水平,以调谐数值模拟代替部分的调谐实验,可有效地减少调谐实验次数,实现数值模拟和计算机克隆调谐相结合是很有希望的。目前正在进行调谐全过程数值模拟的深入探索,并逐步通过实验检验和修正。

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].强激光和粒子束,2003,15(5):502—504。(Deng J J, Ding B N, Wang H C, et al. Physical design of the Dragon2I linear induction accelerator. *High Power Laser and Partical Beams*, 2003, 15(5):502—504.
- [2] Zhang K Z, Wen L, Li H, et al. 3.5MeV Injector for an induction LINAC[A]. Proceedings of LINAC Conference[C]. 2002. 402—405.
- [3] 代志勇,章林文,邓建军,等。“神龙2I”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 “SL2I”LIA. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6):781—784)
- [4] William C T. Control of energy sweep and transverse beam motion in induction linacs[A]. Proceedings of 1991 PAC Conference[C]. 1991. 581—585.
- [5] Larger D L, Brand H R, Maurer W M, et al. Artificial intelligence techniques for tuning linear accelerators[A]. Proceedings of 1999 PAC Conference[C]. 1990. 3082—3084.
- [6] 章文卫,张开志,刘承俊.强流直线感应加速器中束流质心横向运动初步计算[J].强激光与粒子束,2003,15(6):617—620。(Zhang W W, Zhang K Z, Liu C J. Beam centroid motion estimate for a high current LIA. *High Power Laser and Partical Beams*, 2003, 15(6):617—620.
- [7] Allen S L, Brand H R, Chambers F W, et al. Measurements of reduced corkscrew motion on the ETA2II linear induction accelerator[A]. Proceedings of PAC Conference[C]. 1991. 3094—3096.

Design of intelligent tuning system for a high current induction accelerator

ZHANG Wen2wei, JIANG Wei, ZHANG Kai2zhi, DAI Zhi2yong, SHI Jin2shui
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 9192106, Mianyang 621900, China)

Abstract: An intelligent tuning system for the high current LIA is being designed at Laboratory of Accelerator Physics and Application, Institute of Fluid Physics. The goal to build the system is to adjust the beam centroid trajectory automatically for “Dragon 2 I”, which is a 20MeV, 2.5kA, 60ns pulsed electron LIA under construction. The simulation results show that to obtain pulsed electron beams with good quality and to reduce corkscrew amplitude, beam trajectory tuning is necessary. Three tuning methods adopted in the system are tuning manually, computer clone tuning and intelligent tuning. Both simulation and experiments have been performed to obtain the tuning curve of the first steering coil in the first cell. Details of the design, the tuning strategy and some of the tuning simulation and experimental results are presented in this paper.

Key words: High current electron beam; Corkscrew; Beam centroid trajectory; Artificial intelligent