

# 强流加速器驱动的洁净核能系统中的一个关键问题——束晕-混沌的物理机制及控制对策\*

方锦清

研究员,中国原子能科学研究院,北京 102413

\* 国家自然科学基金资助项目(No.19875080)

关键词 强流加速器 放射性洁净核能系统 束晕-混沌现象 物理机制 控制策略

强流加速器具有极其重要的应用发展前景.强流加速器驱动的放射性洁净核能系统,比常规核电更安全、更干净、更便宜,但是它对加速器的要求比现有的加速器超过数十至上百倍.实验和理论都发现束晕-混沌现象,这成为强流离子束应用中,特别是放射性洁净核能系统的关键问题之一.为了提出一套有效设计新型强流加速器的方法,不仅必须深入研究这类束晕-混沌的特性及其产生的物理机制,而且需要研究如何实现对束晕-混沌的控制策略及技术.本文讨论了迄今国内外在研究产生束晕-混沌的若干物理机制方面的进展和可能的控制策略,并提出我们探索的新思路及控制对策.这是正在研究中的一个极富挑战性的新课题.

## 一、引言

加速器是将带电粒子加速到一定能量,以产生轰击原子核的各种核炮弹,实现各种核反应的人工装置.迄今,国内外已经发展和建造了各种类型的加速器.它在原子能科学技术、国防和国民经济等领域获得了各种应用,其中包括常规核电的应用.

值得注意的是,近年来,国内外学者并不满足于常规核电现状,正在设计新一代更安全、更干净的核能系统——强流加速器驱动的次临界堆,即放射性洁净核能系统,如图1所示.它可以克服常规核电产生武器级的核燃料、铀资源利用率低(1%)及可能导致超临界事故所产生的放射性泄漏等严重的缺点.它的最大特色是将20世纪最重要的两大核科学装置加速器和反应堆两者巧妙而紧密地结合起来,可以克服常规核电的弊端,

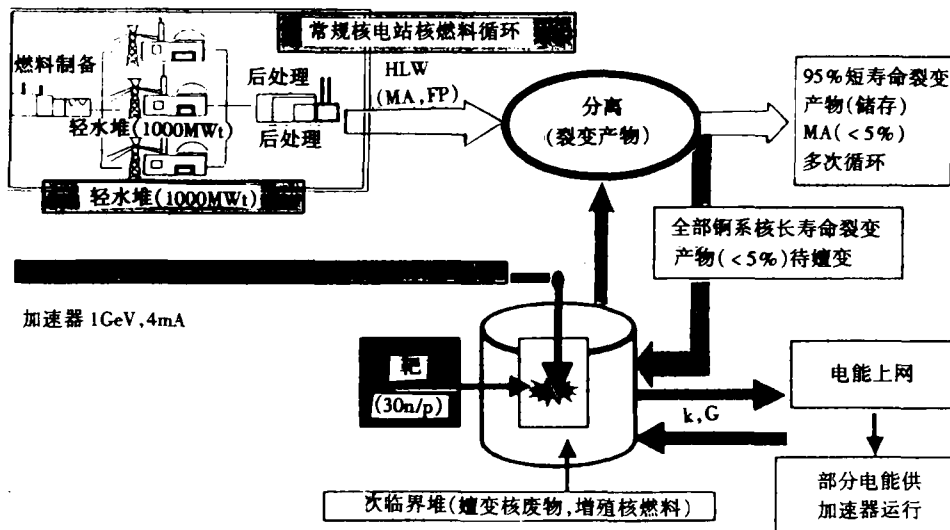
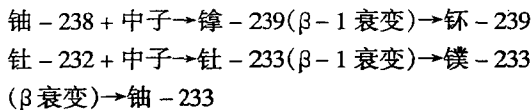


图1 加速器驱动洁净核能系统<sup>[1]</sup>

构成了新的更安全、更干净、更便宜的核能系统.但是,它对于加速器的要求比现有的加速器超过数十至上百倍.例如,它要求采用强流中能质子加速器,质子流高达  $10 \sim 250$  mA,能量在  $0.8 \sim 1.6$  GeV,束损率必须小于  $10^{-5} \sim 10^{-8}/m$ .

次临界堆的基本工作原理在于<sup>[1]</sup>:利用核反应嬗变废物中的高放射性核素,以达到低放射性与洁净核能输出.利用加速器驱动的嬗变是主要原理与关键技术.如果加速器的流强为 20 mA,每个质子可产生 30 个中子,则外源中子由加速器产生的中能质子轰击靶得到  $3.6 \times 10^{18}$  中子/s.假设次临界装置的效率  $K_{eff} = 0.98$ (该堆特点是  $K_{eff} < 1$ ),这部分外中子将被放大  $1/(1 - K_{eff})$  倍,即放大 30 倍,在次临界装置内形成约  $10^{15}$  中子/cm·s 的稳定中子通量.若以铀-238 或钍-232 作为燃料,在次临界装置中会发生下列过程:



这样,即将热中子几乎不能引起裂变的铀-238 或钍-233 分别转变为裂变截面较大的钚-239 或铀-233,然后通过钚-239 或铀-233 的不断再生裂变,源源不断地输出附加的能量.与常规核电站不同的是,次临界装置不必满足  $K_{eff} = 1$  的苛刻条件,对准芯参数变化不敏感,因而可以在芯芯添长寿命放射性废物,利用装置内强中子场将其嬗变,即将长寿命放射性废物转变为短寿命的.由上可见:驱动堆具有能量放大的功能,对于以钍为燃料的快中子堆,能量放大倍数可达 150,这意味着:一个功率 10MW 的加速器可以驱动功率为 1 500 MW 的驱动堆式核电站,因此驱动堆式核电站比常规核电站有明显的优点,已成为国际上的研究热点.

下面讨论迄今国内外研究产生束晕-混沌的物理机制进展,和可能的控制策略的现状,并提出我们探索的新思路及控制对策.

## 二、束晕-混沌的危害性

很显然,驱动堆的关键部分之一是强流中能加速器.现有实验表明:在强流质子流下产生了束晕(Halo)现象<sup>[2-9]</sup>,即在高密度束核的外围弥漫着许多粒子,这是一种复杂的时空混沌运动,它们最容易打到加速器壁上,足以产生超标的放射性剂量和损坏结构元件等.

事实上,在粒子加速器中早就发现了混沌现象.例如在 高能质子同步加速器中,质子在交叉储存环中运动,在理想情形下,质子在圆轨道上作简谐运动,当质子偏离理

想轨道时,它受到与其对撞的另一束质子流的电磁作用,于是在简谐运动方程的右边加入一项描述质子束之间相互作用的电磁项.进一步可以将该质子所遵循的微分运动方程转化为著名的 Henon 映象来研究. Henon 映象具有众所周知的混沌行为特性.因此,质子对撞机等许多加速器中的混沌现象是普遍存在的.图 2 显示了强流质子加速器中无控时的束晕-混沌现象.

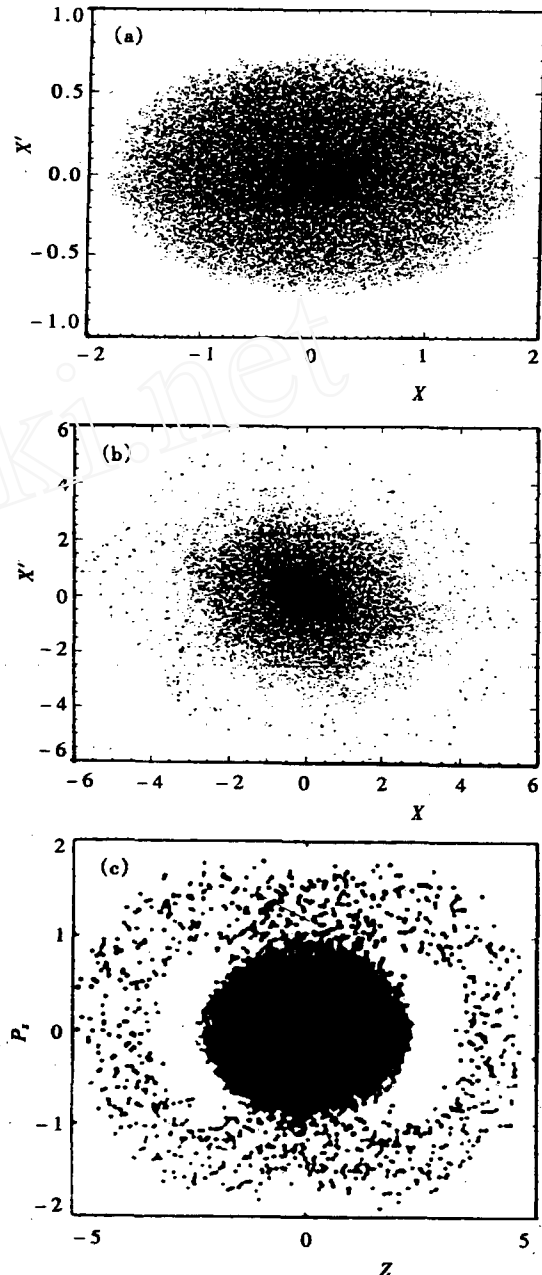


图 2 强流质子加速器中无控时的束晕-混沌现象  
(a) 横向情形:失匹配因子  $M = 2.0$ , 真空相移  $\sigma_0 = 115^\circ$ ;  
(b) 纵横向情形:失匹配因子  $M = 1.5$ , 真空相移  $\sigma_0 = 85^\circ$

由于强流加速器中束晕-混沌的离子束极易打到加速器管壁或其他结构上,因此会造成严重的危害.例如,在加速器中具有1 GeV的1 nA/m质子束打到管壁上,在加速器关闭1 h之后,则可产生大大超标的放射性剂量,即使距离加速器30 cm处,也有高达0.2 mSv/h放射性剂量,这给环境和人身安全造成极大的危害.如果在核能系统中出现这种放射性剂量超标现象,则周围环境和核能系统的安全将受到威胁.因此,实现洁净核能系统的关键问题之一就是:必须提出一套有效设计新型强流加速器的方法,不仅必须深入研究这类束晕-混沌的特性及其产生的物理机制,而且需要研究如何实现束晕-混沌的有效控制.这样,才能确保加速器周围环境与人身的安全,真正达到安全高效地利用洁净核能.这就向加速器物理提出了一系列极富挑战性的新课题.

### 三、束晕产生的机制之一:空间电荷的非线性效应

从计算机数值模拟已较多地了解到<sup>[2-6]</sup>:强流带电粒子束的空间电荷的非线性效应导致发射度增长.这个问题的理论分析相当复杂,但是现有的一些简单的模型分析有助于从物理上了解束晕的形成.在该模型中考虑了一个抛物线形电荷密度分布和椭圆横面及零发射度的连续流.在该物理模型中,假设束在一个很短距离 $z$ 内运动时,该束的空间电荷的脉动并不改变粒子的位置而只改变粒子的横向动量;同时,假设抛物线型密度形状也不变.该物理模型描述了电荷再分配过程的初始阶段,预言了发射度增长如何依赖于参数.在 $x-x'$ 相空间内,存在两种效应:一是丝化效应:在相空间内将代表零发射度的一条直线改变为一条曲线;二是空间电荷耦合效应:导致束在传播四分之一等离子体周期之后,束等离子体周期与等效均匀束大小 $a$ 成正比关系.

假设束均方根(rms)发射度增长与束大小成线性增长,则对于一个圆束,发射度增长与广义导流系数及束大小成正比增长.发射度增长在四分之一等离子体周期处达到饱和.由于该空间电荷再分配的缘故,发射度增长与束大小及广义导流系数平方根成正比.该理论结果与数值模拟结果是一致的.这表明:饱和发射度增长与束大小成正比增长.这是空间电荷的非线性效应给出的一个惊人的结果.而空间电荷力则随束大小而减小.这可以解释为:较大尺寸的束增加了等离子体周期,而等离子体周期意味着在饱和之前发射度增长需要较长时间,而增加速度与束尺寸大小无关.其关系式中的广义导流系数 $K$ 表明:空间电荷导致发射度增长从本质上是一个非相对论

效应.该物理模型也适于圆柱束的发射度增长.由上可见:由于空间电荷的非线性效应导致发射度增长,特别是在一个初始均方根失匹配束发生发射度增长时,出现了束晕现象.

我们应用矩阵传输理论及数值模拟研究表明<sup>[17,18]</sup>,若用一系列非线性薄透镜来描述质子束的空间电荷效应,则薄透镜的作用导致质子的径向半径 $r$ 对轴向坐标的导数 $r'$ 的增加 $\Delta r'$ 为: $\Delta r' = wr/R^2$ ,对于 $r < R$ ;  $\Delta r' = wr/R$ ,对于 $r > R$ .其中 $R$ 是束半径, $w$ 为与质子速度和束流强度有关的量.最后可以得到:

$$w = 2\epsilon [\cos(\sigma/2) - \cos(\sigma_0/2)] / \sin(\sigma/2)$$

此处 $\sigma$ 为考虑质子束的空间电荷效应时一个周期 $r < R$ 处的真空相移, $\sigma$ 为质子束的发射度.显然,由于空间电荷的非线性效应,如果 $\sigma_0 > 90^\circ$ ,而 $\sigma < 90^\circ$ ,必出现 $w > 0$ 情形,于是质子束产生径向发散,从而导致束晕现象.由于 $\sigma_0 > \sigma$ ,而相移 $\sigma$ 为 $90^\circ$ 时产生了共振,导致质子束高度不稳定性.下面进一步研究表明:如果发生共振覆盖,则导致混沌,混沌加剧了束晕现象.

### 四、束晕产生的机制之二:丝化过程(filamentation process)

文献中常把发射度增长机制与经典的丝化过程相比较.在丝化过程中,连续非线性力产生一些不同频率的振动,它们依赖于粒子振动幅度.由此导致发射度弯曲,即由初始相空间内一个椭圆形变成了S形,最终导致在相空间内产生螺旋结构.不过,计算机数值模拟结果表明:经过几个等离子体周期之后,在 $x-x'$ 相空间内由一个初始圆形的rms失匹配束发展成一个内核和一个外斑,即束晕现象,而并非经典的螺旋结构.为此,必需研究经典的丝化过程与束晕现象的联系,即研究一个初始0发射度的圆形的径向失匹配束的演化.已经在相空间内观察到丝化结构,而且丝化结构比简单螺旋结构更复杂.这是因为非线性空间电荷力随时间变化的缘故.在相空间内一初始的直线迅速地演化为来回弯曲多次的丝化结构,并形成了一个稠密的内核和一个类似螺旋的外结构.在 $r-r'$ 相空间内观察到的类似螺旋的灯丝在 $x-x'$ 相空间内的投影变成一个扩散的束晕,这是由于 $x$ 和 $y$ 间的耦合的结果.因此也可以说,束晕的形成机制之一是由于基本的丝化过程所致,但是由于耦合导致扩散效应,因此它比经典的丝化过程更为复杂.

### 五、束晕产生的机制之三:粒子-束核相互作用

迄今研究较多的是,近年来提出的粒子-束核模

型<sup>[2-9,20-22,25]</sup>,其研究结果提供了粒子与束核相互作用导致能量交换形成束晕-混沌现象的机制.粒子与束核模型有一个称作呼吸模型<sup>[2-9]</sup>,它是考虑一个在均匀聚焦通道中的连续流的运动,即一个圆形的均匀分布的连续束,由于该束核核心失匹配,导致核心半径发生振动.采用 PIC (particles in cell) 数值模拟方法,由大量的试验粒子来模拟束晕现象的形成.由于试验粒子受到外部线性聚焦力和束核的非线性的空间电荷场的影响,这样,由束的包络方程和单粒运动方程联立求解,通过数值模拟研究试验粒子的动力学行为特性.该粒子与束核模型中,单粒运动依赖于归一化的束核半径,束包络动力学方程中则只包含一个与周期场有关的无量纲参数,而与单粒运动无关,这一点仅仅是一种近似,只有当束晕粒子占总束的很少部分( $<10\%$ )时,这个近似假设才成立.事实上,应用 PIC 数值模拟研究中试验的束晕粒子都超过总束的  $10\%$ ,甚至多达  $50\%$  或更多.因此,粒子-束核模型并不能完全反映粒子与束核相互作用的全过程的实际情况.应该考虑单粒子与束包络动力学的相互作用.由于该模型的不足,至今尚无突出进展.最近有人认为主要障碍在于<sup>[25]</sup>,聚焦引入导致束包络及粒子轨道的颤动.这样实际庞加莱截面的维数高于二,但是处理时不得不将高维庞加莱“相图”投影到二维平面去研究粒子动力学.为了克服这一问题,提出应用正则变换后再用闪频法,从而在新的相空间变量中由于聚焦引入所导致的束包络及粒子轨道的颤动被减至最小,因而能把粒子与束核之间的主要共振反映出来.应用此法已发现:初始不在束晕区域的一些粒子也进入了与束核振动的共振区域中而变成了束晕粒子.于是认为周期聚焦可以在失匹配束中束晕-混沌形成的一种可能的机制.此外,六维相空间模拟表明:离子束在径向与纵向两平面之间的耦合对束晕-混沌的形成是特别重要的<sup>[5,8,21]</sup>.

## 六、束晕产生机制之四:共振覆盖导致混沌

改变各种粒子的初态粒子分布,利用闪频法深入研究粒子-束核模型的结果表明:一条分离线把相空间划分为三种不同的轨迹,如图 3 所示,(1)核心占主导的区域:处在闪频图中分离线的最内部的轨迹;(2)共振占主导的区域:在闪频图中靠近分离线的中间部分轨迹;(3)聚焦占主导的区域:在闪频图中处在分离线最外围的轨迹,其形状就像花生的外壳形状一样.

参数共振大约发生在粒子振动频率等于一半核心的振动频率,共振占主导的轨迹受参数共振相当强烈.该参

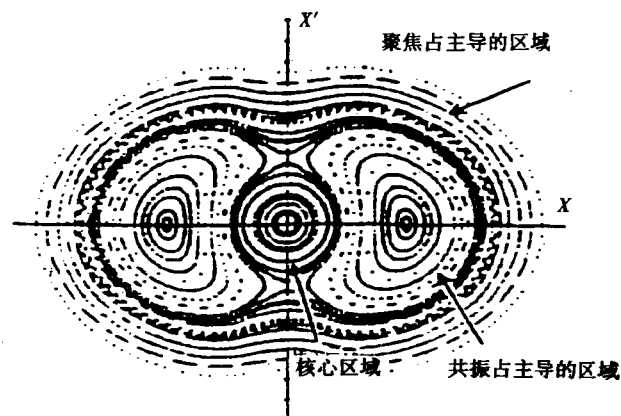


图 3 相空间的闪频图

数共振能够引起束晕振幅增大.这是最初靠近核心的粒子,以及在共振占主导的区域内的粒子受到该共振的驱动,获得了较大能量而增大振幅.但是振幅的增大却受到自身的限制,因为在核心外部的空间电荷力是按非线性减少的.该模型预言了一个重要的结果:存在一个最大振幅,它等于当核心具有最小尺寸时与分离线的最小位移.由于共振的结果,共振占主导的粒子则多次迂回循环.但是,因为粒子振幅对振动频率的依赖性,产生了严重的“相”混合,并经常存在一些具有最大振幅的粒子.已经发现:非线性共振能够导致核心的粒子散射,进一步导致混沌,混沌一旦发生,束晕便大大增强.这可以用共振覆盖机制来解释束晕,即随机区域的形成,以及在随机区域的扩散(如 Arnold 网等)增加粒子的再分布,从而形成了束晕.这说明束晕主要来自在混沌区域内的粒子扩散(例如阿诺德扩散).如果能避免共振覆盖,则可能避免或减少束晕形成.但是也已发现:采用一些机械的限束器并经过一定距离之后,束晕又再生了.这一事实说明束晕的形成应该有更内在的物理机制,很值得进一步探讨,我们将在下节讨论.

## 七、产生束晕-混沌的机制之五(微观层次):量子混沌

上述关于束晕-混沌产生的物理机制仅仅从宏观层次考察问题,是一种经典分析,它把问题的症结完全归结为束流失匹配的缘故,并冠以一个抽象的失匹配因子  $M$  所造成的影响,而实际上束流失匹配的因素很多,例如,产生周期场的螺线管的结构精度,电磁场微扰及环境噪声等等因素,不能笼统地反映在一个综合因子  $M$  上,并且在模型方程中也没有考虑粒子与束核相互作用的全过

程的实际影响.最近美国马里兰大学有人从微观上考虑带电粒子束内的库仑碰撞(散射)效应的影响<sup>[20]</sup>,目前尚未得出明确的结论,一般从概念上说库仑碰撞(散射)效应并不重要,需要进一步研究.

从束晕-混沌再生性启迪我们:束晕-混沌产生可能有更内在的根源.我们经过调研分析认为,应该进一步从微观层次考察物理机制问题,其中量子混沌很值得关注.加速器中带电粒子在外部磁场下的运动可能导致量子混沌.例如,如果我们把外部电磁场干扰视为一个单色波,这样在上述加速器中研究的问题可用一带电粒子在外部横向磁场下与单色波相互作用的运动来描述,完全类似于研究一个被微扰的简并系统中的弱混沌问题.于是,在共振条件下,即在波频率等于粒子回旋频率时,根据准能量本征态的分析,在一定条件下可以出现经典的弱混沌区域;同时发现通过量子分离线出现新的扩散现象以及量子混沌对扩散的影响,以及与经典相空间中混沌的对应.从随机网上也看到纯量子扩散与经典扩散的交换(crossover)现象.因此,我们有理由推断:在非线性共振下量子混沌和随机网的出现很可能是导致束晕-混沌产生的一个新的物理机制,这可能是束晕-混沌产生的一个更内在更本质的物理根源.我们正在对束晕-混沌产生的物理机制进行研究,从宏观层次推进到微观层次,研究更多影响因素,进一步深入探索新机制,从而制定新的控制对策和技术路线.这样,以期从根本上揭示强流中能加速器中的粒子动力学特性,有利于解决放射性洁净核能系统中的一个关键问题.

### 八、束晕-混沌的控制对策之一:非线性反馈控制

如何控制束晕-混沌是另一个重要课题.我们从混沌控制的策略出发,提出了控制束晕-混沌的新方法<sup>[12-17,23,24]</sup>,并进一步从数值模拟来分析上述在无控下束晕-混沌形成的机制及控制策略.

应用 PIC 程序,进行计算机数值模拟,在模拟中采用 50 000 粒子,其起始条件遵循高斯分布规律,主要的参数如下: $\eta = 0.8$ ,失匹配因子  $M = 2$ , $\sigma_0 = 115$ ,于是可算得束匹配半径  $a_m = 0.7891642$  及导流系数  $k = 0.903079$ .数值模拟结果表明:经过一段加速器后出现了束晕-混沌现象,而且随着轴向周期数目  $P$  的增加,束晕-混沌越来越严重,越来越多的束核内的粒子逃逸到核心外围,从而形成了明显的晕圈(斑),而且粒子散射的范围(半径)越来越大,当束流在周期数  $P = 1200$  处,其最大半径与初始最大半径之比已超过三倍之多了.如此行进,束流最

终必然地打到加速器的管壁上面,从而导致严重的放射性剂量超标,这是强流粒子束应用中,特别是在加速器驱动的洁净核能系统中所不允许的.因为它会对加速器环境和人身造成严重的危害,正是这种突出的原因,向人们提出了必须设法抑制和控制束晕-混沌现象,以确保强流加速器安全而高效地运行和人身安全.在实验中,虽然国外采用束流限制板来挡掉外圈的粒子,而且目前采取的许多限束的措施并不有效,随着束的继续行进,束流经过一段之后,束晕现象会再生出来.束晕的再生性要求和启发我们要有新的思路,需要新的控制方法及新策略.

从数值分析上述在无控下束晕-混沌形成的机制,如图 4(a~b)分别给出从周期  $P$  为 0,600,900 相应的周

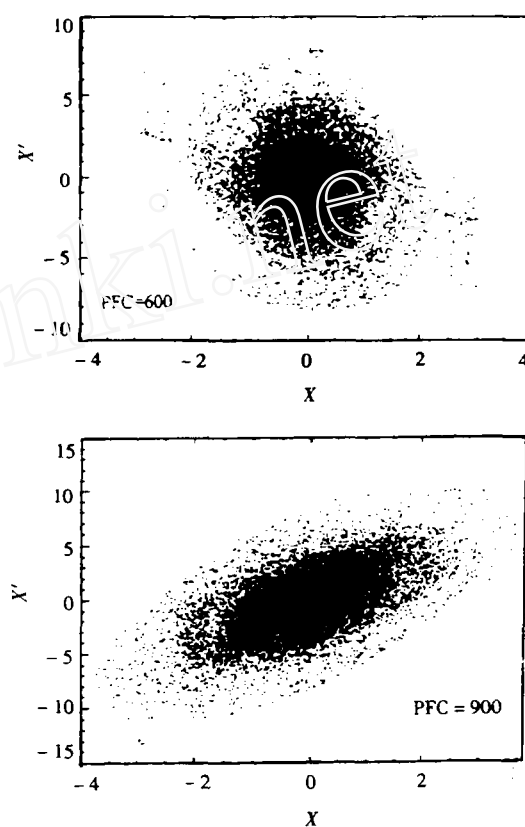


图 4 无控制时质子相图分布:周期数目  $P$  分别为 600 和 900 处横向空间内的束晕-混沌现象

期截面上的粒子相图,我们从图 4 可见:初始粒子的横向速度很小(不超过 1),但是随着轴向周期数目的增加,粒子横向的散射速度越来越大,在  $P = 600$  以后已超过 5 而接近于 10.这个事实表明:粒子与束核之间的相互作用导致能量的横向交换越来越显著,核内粒子数目逃逸到核心之外激烈地增加,形成束晕-混沌的范围必然随之增大.在周期数  $P = 600$  的截面上,相图出现两翼翅膀突出向外旋转的姿势,当运动到  $P = 900$  处相图上束晕-混

混沌的范围更加严重了.这种十分有趣的复杂的旋转结构,说明形成束晕-混沌是一个复杂的运动过程,它与其内部粒子同束核的能量交换紧密相关,那些横向速度较大的粒子从核心内逃逸出去,这显然与场对粒子的作用力及失匹配等因素直接联系在一起,由此启迪我们必须通过一条有效的途径来抑制和控制那些向外逃逸粒子的受力方向或扩散速率,必须设法尽量减少横向的粒子速度和能量,从而才能达到抑制和控制束晕-混沌的目的.

我们已应用矩阵传输理论与多粒子 PIC (particles in cell) 模拟方法<sup>[7]</sup>, 研究表明: 在 PFC 中质子束本身产生的空间电荷效应, 如上所述, 导致质子的径向半径  $r$  对轴向坐标的导数  $r'$  的增加  $\Delta r'$ , 质子束产生径向发散, 从而导致束晕现象. 既然引起束发散主要是与  $\sin(\sigma/2)$  和  $\cos(\sigma/2)$  两项相关, 因此我们可以构造一种具有类似于正弦或余弦的非线性反馈函数去控制和抵消掉空间电荷效应, 使得  $\sigma_0 < 0$ , 而  $\sigma > 0$ , 出现  $w < 0$  情形. 这一判断被特征值方法的分析所证实.

根据我们对离子束包络运动方程的特征值分析, 线性反馈控制不了束晕-混沌, 于是我们提出了非线性反馈控制方法. 将反馈控制器加到粒子径向运动方程的右边, 则有  $G$  为非线性反馈函数,  $\phi$  为空间电荷电位. 分析和数值模拟都表明<sup>[24]</sup>,  $G$  必须应用非线性反馈函数. 若应用线性反馈函数, 则无法实现对束晕-混沌的控制.

我们采用了一些典型的非线性反馈函数对束晕-混沌进行了有效的控制. 模拟中采用具有高斯分布的初始束流与无控情形相同条件. 在适当的增益下, 所用的非线性反馈控制均能较好地达到对束晕-混沌的有效控制, 从而使束流损失和放射性剂量明显地减少至最小程度. 作为一个典型的实例, 我们采用  $G = -0.15 \sin(r_{\max} - a_m)$ , 其中  $r_{\max}$  和  $a_m$  分别为最大粒子半径和束流的匹配半径, 每隔 5 个周期分散地反馈作用到粒子轴向. 模拟中采用具有高斯分布的初始束与无控情形相同条件. 在适当的增益下, 我们设计的非线性反馈控制均能较好地达到对束晕-混沌的有效控制, 从而使束流损失和放射性剂量明显地减少至最小程度. 从图 5 与图 4 相比较看到: 由于有了非线性控制, 束晕-混沌得到了有效的抑制和控制, 最明显的效果是束晕-混沌的范围大大缩小了, 粒子分布也变得比较均匀了. 从图 5(a) 看到: 在  $P = 600$  处的相图经控制后原来两臂旋转的翅膀明显地被压缩了或大部分被“切除”了, 随着质子行进的聚焦周期数目  $P$  的增加, 没有出现束晕-混沌的再生现象, 束晕-混沌的范围得到有效的控制, 例如在  $P = 900$  处比无控制时的面积范围减少近一半, 粒子分布的均匀性得到了明显的改善. 可见: 非线性反馈离散控制方法能使束晕-混沌得

到明显的控制, 其原因就在于质子在径向所受的空间电荷力被外部非线性控制力大大地抵消了, 随着质子行进的聚焦周期数目  $P$  的增加, 没有出现束晕-混沌的再生现象. 这表明该法对抑制束晕-混沌是可行的. 只要寻求最佳的增益因子和分散控制的周期数目, 就可能获得对束晕-混沌获得较佳抑制或最佳的控制效果.

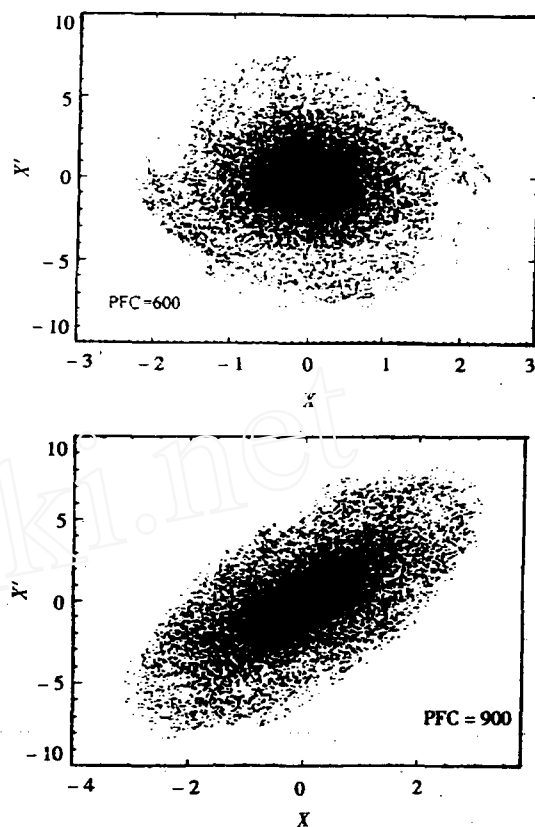


图5 非线性控制后与图4对应的质子相图分布. 横向空间内的束晕-混沌受到了明显的抑制

以上我们仅仅应用一种控制方法已达到初步抑制束晕-混沌, 人们可以探索更多更有效的控制新方法, 发展新技术. 我们也建议过采用类似混沌同步的思想与方法<sup>[14, 24]</sup>, 去实现一系列周期通道中的离子束与满足性能要求的离子束同步. 显然, 本文提出了一个大有发展前景的新课题, 需要进一步深入研究束晕-混沌产生的物理机制及其控制的新原理、新方法、新技术, 从而推动强流离子束在国防领域和国民经济中的广泛应用.

(2000年1月3日收到)

- 1 丁大钊. 放射性洁净核能系统. 科技导报, 1997; 3: 32
- 2 Lee S. Y. Space charge dominated beams and applications of high brightness beams, Woodbury, New York: AIP Press, 1996
- 3 Gluckstern R. L. Phys. Rev. Lett., 1994; (73): 1247
- 4 Gluckstern R. L., Cheng R. H., Ye H. Phys. Rev. E, 1996; (54): 6788
- 5 Gluckstern R. L., Fedotov A. V., Kurennoy S. S., Ryne R. D. Phys.

- Rev. E. 1998; (58): 49
- 6 Chen C., Davidson R. C. Phys. Rev. Lett., 1994; (72): 2195
  - 7 Lagniel J. - M. Nucl. Instrum. & Methods Phys. Rev. A 1994; (345): 46 - 53
  - 8 Barnard J. J., Lund S. M. In: Proceedings of ICAP98 Conference, Chicago, IL, USA, 1998
  - 9 Fedotov A. V., Gluckstern R. L. In: Proceedings of ICAP98 Conference, Chicago, IL, USA, 1998
  - 10 Ott E., Grebogi C., Yorke J. Phys. Rev. Lett., 1990; (64): 1196
  - 11 Chen G., Dong X. From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications, Singapore: World Scientific Pub. Co., 1998
  - 12 方锦清. 物理学进展, 1996; (16): 1 - 74; 137 - 202
  - 13 方锦清. 科技导报, 1996; 4: 8
  - 14 Fang J. - Q., Ali M. K. Control and synchronization of spatiotemporal chaos. In: Chen G. ed. Control of Bifurcation and Chaos in Engineering Systems, CRC Press, 1999
  - 15 Fang J. - Q., Hong Y. J., Chen G. Phys. Rev. E., 1999; (59): R2523
  - 16 Ali M. K., Fang J. - Q. Phys. Rev. E, 1997; (55): 5285
  - 17 方锦清. 科学通报, 待发表, 2000
  - 18 郁庆长. 高能物理与核物理, 1993; 17(4): 305 - 309
  - 19 Reiser M. Theory and Design of Charged Particle Beams. John Wiley and Sons, 1994
  - 20 Gluckstern R. L., Fedotov A. V. Phys. Rev. ST Accel. Beam 2, 054201, May 1999
  - 21 Fedotov A. V., Gluckstern R. L. Phys. Rev. ST Accel. Beam 2, 014201, Jan. 1999
  - 22 Wangler T. P., et al. Phys. Rev. ST Accel. Beam 1, 084201, December 1998
  - 23 方锦清. 自然科学进展, 待发表, 2000
  - 24 Jin - Qing Fang, Guangron Chen, Yigoung Hong. Intern. J. of Chaos theory and Application, 2000(accepted)
  - 25 Wang T. - S. F. Phys. Rev. E, 2000; (61): 855 - 861

### A Key Problem of Radioactive Clean Nuclear Power Apparatus Driven by High-Intensity Accelerator — Formation Mechanisms of Beam Halo-Chaos and Its Control Strategy

Fang Jin-qing

Professor, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413

**Key words** high-intensity accelerator, radioactive clean nuclear power apparatus clean radioactivity nuclear energy system, halo-chaos, physical mechanisms, control strategy

## 高拱坝坝肩抗震稳定问题的研究\*

张伯艳

硕士,高级工程师,中国水利水电科学研究院,北京 100044, E-mail: zhangby @ iwhr.com

\* 国家九五攻关(96 - 221 - 03 - 02 - 05)和国家自然科学基金重点项目(59739180)

**关键词** 高拱坝 坝肩抗震稳定 地震

本文简述了我国的高拱坝建设,以及抗震问题在拱坝设计、施工和运行管理过程的重要性.简单介绍了地震对拱坝的影响,论述了高拱坝坝肩抗震稳定分析的重要性和复杂性,介绍了用于高拱坝坝肩抗震稳定分析的离散元方法、不连续变形分析方法、数值流形法、界面元方法、非线性有限元和刚体极限平衡方法,指出了这些方法的特点和工程应用前景.

### 一、高拱坝坝肩抗震稳定分析的重要性

拱坝,因为它的经济性和安全性,而被世界各国广泛采用.中国是建造拱坝最多的国家,约占世界拱坝总量的一半,现已建成高拱坝 37 座,其中坝高超过 100 m 的有 10 座<sup>[1,2]</sup>.如坝高 112.5 m 的风滩空腹重力拱坝,坝高分别为 102 m、157 m 的紧水滩、东江双曲拱坝以及坝

高分别为 157 m、165 m、178 m 的隔河岩、乌江渡、龙羊峡重力拱坝;已建、在建的坝高分别为 165 m、173 m 和 240 m 的李家峡、东风和二滩双曲拱坝.随着国民经济的发展和电力建设的需要,我国还有许多拱坝在设计中,其中不少工程的坝高、工程量和难度都达到了新的水平.例如,黄河上游的拉西瓦双曲拱坝,坝高 250 m;乌江上的构皮滩拱坝,坝高 225 m;而澜沧江上的小湾双曲拱坝,高度为 292 m,将超过当今世界最高的英古里拱坝(坝高 271.5 m),它标志着我国拱坝建设技术将攀登世