

束晕-混沌的复杂性、控制方法及应用

方锦清

中国原子能科学研究院核技术应用研究所, 北京 102413

摘要 粒子加速器中束流传输系统是由许多电磁聚焦单元为节点组成的复杂网络, 强流粒子束在其束流传输网络系统中产生特有的束晕-混沌现象, 是一种奇特的复杂性问题, 是一个令人关注的、极其重要的课题。本文概述混沌王国里这个特殊的束晕-混沌的复杂性、物理机理、控制方法和实际应用。

关键词 强流粒子束; 束流传输网络系统; 束晕-混沌的复杂性; 物理机制; 控制方法

自然界及人类社会, 网络无处不在、无时不在, 探索网络复杂性已经成为国内外关注的一个重要课题, 对于诸如互联网、万维网、交通网、经济网、社会网、新陈代谢网等网络已经有很多研究。而一种特殊的复杂网络——束晕-混沌现象并不被人熟知。

自1963年罗伦茨发现了“蝴蝶效应”以来, 堪称揭开了非线性系统的一个复杂性王国。迄今发现, 混沌有经典混沌和量子混沌两大类。经典混沌又分为5种: 1) 时间混沌, 动力学行为随时间而变化的混沌运动; 2) 空间混沌, 随空间而变化的混沌运动; 3) 时空混沌, 随时间和空间同时变化的混沌运动; 表征前3类混沌的一个最重要的混沌特征量——李雅普诺夫指数至少有1个必大于0; 4) 超混沌, 动力学系统至少有2个大于0的李雅普诺夫指数; 5) 束晕-混沌, 在高密度粒子束核的外围弥散着混沌运动粒子, 具有复杂的时空混沌运动, 这是混沌家族的一种特殊成员。

束晕-混沌现象是强流粒子束在加速器传输网络 (beam transport network, BTN) 中产生的特殊现象。加

速器中BTN基本上分为直线形和环形两大类型(图1)。

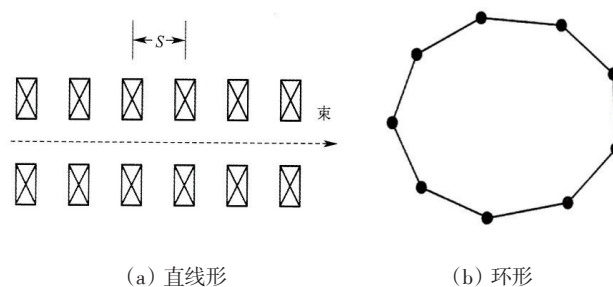


图1 2种加速器束流传输网络(BTN)的结构类型
Fig. 1 Two main structure types of accelerator BTN

BTN由许多电磁聚焦单元组成。目前世界上最大的加速器是欧洲日内瓦的大型强子对撞机(LHC), 其精确周长达6659 m, 共有9300个磁体, 它们是由许多周期交变的电磁聚焦元件组成的BTN环形周期聚焦通道, 粒子在巨大的环形轨道中运动。图2是强流粒子束产生的横向和纵向的束晕-混沌运动。

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(70431002); 国家自然科学基金面上项目(61174151, 60874087)

作者简介: 方锦清, 研究员, 研究方向为网络科学和非线性-复杂性科学及其应用, 电子信箱: fjq96@126.com

引用格式: 方锦清. 束晕-混沌的复杂性、控制方法及应用[J]. 科技导报, 2018, 36(8): 8-21; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.08.001

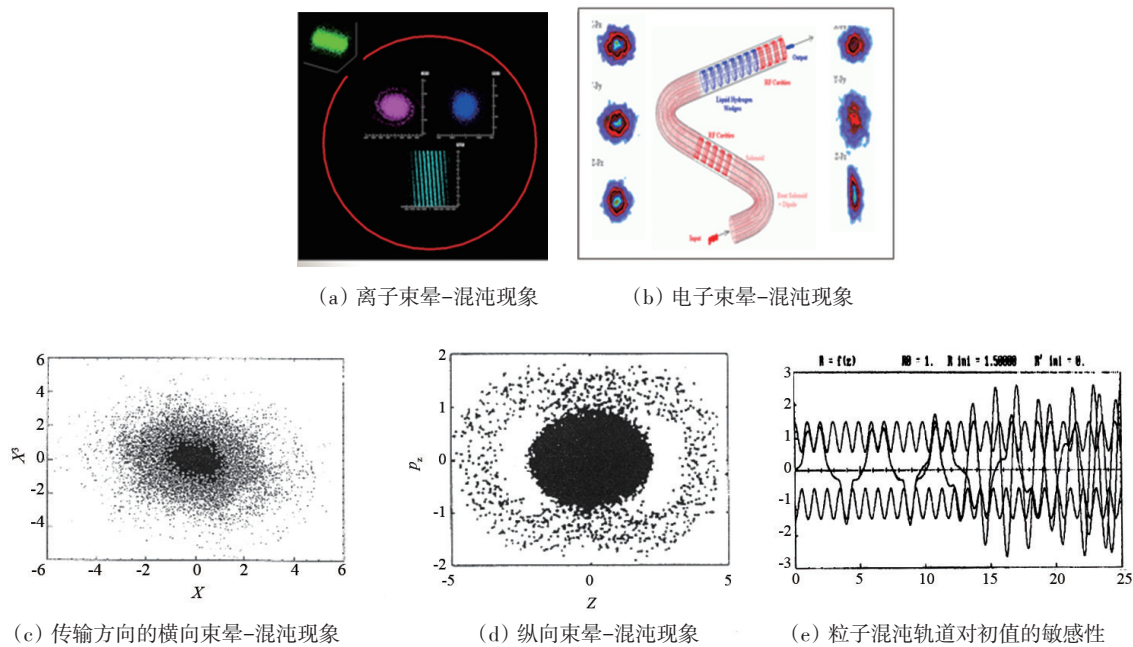


图2 强流粒子束产生的横向和纵向的束晕-混沌运动

Fig. 2 Horizontal and longitudinal beam halo-chaotic motions produced by strong stream particle beam

1972年, Sessler发现了粒子加速器中混沌现象, 而1994年, 才由Langniel从实验中首次观察到了空间电荷主导束中产生的束晕-混沌现象^[1-2]。随后, 国内外从理论和实验两方面对于束晕-混沌现象产生的物理机制及其控制方法均作了广泛研究。文献[3]~[5]比较系统总结了国内外该领域的主要成果。

强流粒子束不仅在原子能科技与国防领域中战功辉煌, 并且在国民经济领域强流束应用极其广泛, 如新核能、材料改性、治癌和食物保鲜等。本文概述束晕-混沌的复杂性、控制方法及应用和发展前景。

1 带电粒子基本动力学及其特性

大量带电粒子束动力学行为具有统计性质。数学物理上描述它们的完整的理论是求解符拉索夫(Vlasov)方程, 并且把统计力学的刘维尔定理、麦克斯韦方程与粒子运动动力学方程联立, 构成一个自恰的粒子理论模型框架。这一理论体系在小束流下证明是离子束动力学理论分析的有力工具, 处理得比较成功。但是在强流下束流运输的动力学理论还很不完善, 因为大量离子组成的强流束使问题的严格求解变得十分困难。目前, 国内外提出一些理论模型, 例如基于粒子-束核相互作用模型, 满足卡宾斯基-符拉迪米尔斯基(K-V)分布的束包络方程分析, 同时联立电磁场下麦克

斯韦方程、粒子运动方程和电流连续性方程, 进行数值模拟研究, 这样6D数值模拟程序编写和计算量非常庞大, 因此, 无论理论上, 还是数值模拟方面, 强流束都是需要深入研究的前沿课题之一。

1.1 基本强流质子粒子动力学方程

在理想情形下, 质子在加速器圆轨道上作简谐运动, 当一束质子偏离理想轨道时, 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 $BF(x)$, 则该质子束运动遵循二阶微分方程。为了发生足够多的质子碰撞, 要求质子在存储环内能回旋 6×10^{11} 次。其中质子运动的稳定性是极其重要的问题。利用适当的变量替代后, 可以将二阶微分方程转化为著名的埃农映象研究

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 1 - ax_n^2 + by_n \\ y_{n+1} &= x_n \end{aligned} \quad (1)$$

式中, a, b 为常数。

这个著名的映象已经被研究得很详细, 它具有典型的混沌行为特性。这样, 粒子加速器(对撞机)中同样发现埃农映象产生的混沌复杂性。进一步发现: 一个带电粒子在一均匀磁场中运动与电磁波相互作用时, 不论相对论情形, 还是非相对论情形, 均产生混沌现象。混沌现象是加速器应用中的重要问题之一。

为了更好地探索强流加速器中的束晕-混沌现象,研究者提出了一些更具体动力学模型^[2-16],其中代表模型之一是粒子-束核模型^[16],它考虑一束具有圆形的质子束在直线加速器回旋管产生的周期性聚焦磁场通道(PFCs)中的运动,当质子束满足K-V分布时,质子束水平方向运动的无量纲包络方程满足以下条件:

$$\frac{d^2 r_b}{ds^2} + k_z(S)r_b - \frac{k}{r_b} - \frac{\varepsilon^2}{r_b^3} = 0 \quad (2)$$

式中, k 为归一化广义导流系数, ε 为束流发射度(这里讨论的情形满足 $\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y$); r_b 为束包络的无量纲半径; $s = z/\beta_b ct = z/S$,为轴向 z 的无量纲坐标; S 为一个聚焦场PFC的周期长度; β_b 为束粒子的平均轴向运动速度; c 为光速; $k_z(S)$ 为一个周期函数,它表征周期磁场聚焦通道对质子的磁聚焦强度,即

$$k_z(z) = k_z(z+S) = q^2 B_z^2(z) / 4\gamma_b^2 \beta_b^2 m^2 c^2$$

应用时定义 $k_z(z) = k_0^2$, k_0 为外聚焦力; $\gamma_b = (2-\beta_b)^{-1/2}$; $B_z(z)$ 为 z 轴向磁场强度; $B_z(z) = B_z(0, S)$; q 和 m 分别为粒子的电量和静止质量。在这种周期场中一个轴向周期内的真空相移为 $\sigma_0 = [\eta S^2 k_z(0)]^{1/2}$, η 为谐衰减系数。

另一个代表性的模型是,应用单粒子运动方程描述束内外的试验粒子,以研究大量试验粒子如何形成束晕-混沌的过程。这时需要考虑单粒子在束核内外2种运动情形^[2]

$$\frac{d^2 r}{ds^2} + k_z(S)r - Kr/R^2 = 0 \quad r < R \quad (3)$$

$$\frac{d^2 r}{ds^2} + k_z(S)r - K/r = 0 \quad r \geq R \quad (4)$$

式中, r 为试验粒子运动半径, R 为核束半径。

只要选择适当的数量试验粒子,由于试验粒子具有不同的初值条件,它们在包络方程描述的束核集体运动的外场背景中输运,单粒子运动提供空间电荷作用,可以跟踪它们在外场和束核空间电荷场共同作用下输运的整个运动过程,因此可以应用数值方法详细研究束晕-混沌的产生机制。

1.2 强流粒子动力学基本特性

强流质子束在加速器中被加速到一定能量后进入周期磁场的聚焦通道(PFC),或者磁四极周期聚焦通道,或者均匀聚焦通道。研究揭示了束晕-混沌主要具有以下复杂性。

1) 质子轨道对初值具有高度的敏感性,在束相空间里两条相邻轨道对初值具有高度敏感性,它们的长

期行为具有不可预测性,符合混沌的最基本特性。实际上,束晕-混沌既有混沌的所有特性,又有自己的独特性质。

2) 所谓束晕系指在高密度束核的外围弥漫着许多粒子,形成束的晕轮(斑点),同时存在粒子(例如离子或质子)的混沌运动。不论横向,还是纵向,强流粒子都产生了复杂的束晕-混沌现象,这就是一个最大的特殊性。而且它们的行为都与失匹配因子和谐衰减系数及其非线性效应密切相关。

3) 横向束晕的范围随流强增加而增大,即随空间电荷的增加而有所扩大,而且随着失匹配因子的增加束晕对谐衰减系数一直存在依赖性,特别是束晕的最初发展主要受失匹配因子控制。

4) 在相同的失匹配因子下比较,纵向束晕的强度比横向束晕的发展得更早、发展的速率也更快,即使在很小失匹配因子(小于10%)都能产生纵向束晕,因此,控制纵向束晕更具挑战性,因为纵向束晕被机械抑制后还具有“再生性”。

5) 粒子横向和纵向运动之间存在明显的耦合效应,这也是产生束晕-混沌的极为重要原因之一。

6) 束晕-混沌是一种很复杂的时空混沌运动,它与粒子运动中不断进行着再分布有关。对于均匀聚焦通道,三维空间($\mu, \delta r_m/r_0, r_m/r_0$)内的相图表明,束粒子的相对最大半径 r_m/r_0 与相对失匹配幅度 $\delta r_m/r_0$ 及空间电荷参数 μ 之间存在复杂的函数关系。实际上存在更复杂的相图。

2 束晕-混沌复杂性的统计物理机制

2.1 物理机制之一:空间电荷的非线性效应

由于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,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,出现发射度依赖于参数而增长。在横向相空间内,存在2种效应:1) 空间电荷耦合效应,导致束在传播1/4的等离子体周期之后,束等离子体周期与等效均匀束大小成正比,饱和发射度增长与束大小成正比。2) 空间电荷导致发射度增长从本质上是一个非相对论效应,特别是在一个初始均方根失匹配束发生发射度增长时,从束流在相空间的混沌行为可说明束晕形成的动力学机制。

2.2 物理机制之二:丝化过程

常把发射度增长机制与经典的丝化过程相比较。

在丝化过程中一个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^[12-14]。其中束晕现象与经典丝化过程相关。3D模拟研究表明,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,正是 x 向和 y 向耦合的结果。因此,束晕的形成机制之一是基本的丝化过程。由于粒子横向和纵向运动存在明显的耦合效应导致扩散缘故,比经典的丝化过程更为复杂,诸多因素相关效应导致了束晕-混沌相图的复杂性(图3)。

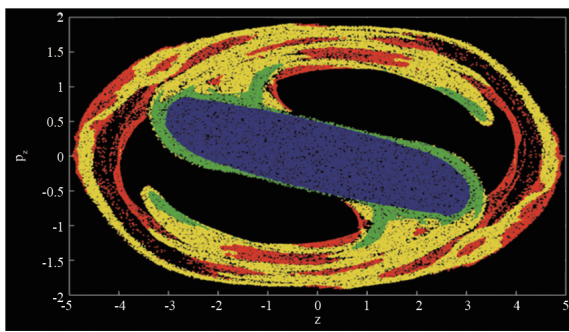


图3 束晕-混沌相图的复杂性

Fig. 3 Complexity of the beam halo-chaos phase diagram

2.3 物理机制之三:粒子-束核相互作用

迄今研究较多的是粒子-束核模型^[16-19],它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。Gluckstern首先提出粒子与束核模型^[16],形象化称作呼吸模型。它考虑一个在均匀聚焦通道中的连续粒子流的运动。由于该束核核心失去匹配,导致核心半径发生振动,该模型揭示了束晕产生的某种机制。从2D呼吸束的包络方程出发,可以分析在呼吸模式与幅度比核半径大的离子的非线性运动之间的参数共振。最终的相空间有包含核心的内分离线和外分离线,后者在焦点附近束晕粒子进来后成为一斑状。对“呼吸”的K-V束,数值模拟确认了分析的预言,即4D相空间的束晕形状如同“花生壳形”(图4^[18]),清楚地表明参数共振占主导的行为。

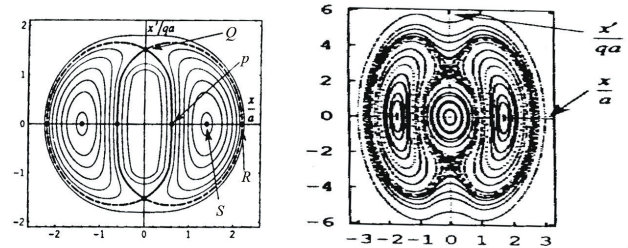


图4 “呼吸”的K-V束模型模拟得到的相图

Fig. 4 Phase diagram of the K-V beam model of "breathing"

粒子轨道受参数共振影响相当厉害,当粒子振荡频率近似为核振荡的一半时发生了参数共振。该模型预测的一个重要结果是,存在最大幅度,它等于离开分离线的距离,并且对应于当在核心具有最小尺寸时得到的闪频相位。

由于共振缘故,在共振占主导区域内的粒子来回游荡。然而,由于它们对频率的依赖性,发生了严重的相混合,而且经常在粒子振荡幅度最大值附近。研究发现,这些结果对束核心空间电荷分布并不敏感,用高斯分布代替均匀核心空间电荷分布研究确认该结果的正确性。在分离线附近,允许粒子越过分离线,初始粒子是沿着外分离线运动。在比较低的谐因子比率时,观察到有关分离线破坏而导致混沌的证据。该模型可以估计在共振占主导区域内的束晕增长时间,而这个束晕增长随时间变化。

参数共振模型能成功地预测束晕出现的区域,但是它还没有解析粒子越过核心边界的扩散问题,而且它也不能预测导致混沌运动的条件。但该模拟研究已经提供了充分的证据,即变成束晕的粒子分数对谐因子比率不敏感,而对失匹配因子则很敏感:当失匹配因子更严重时束晕的粒子分数就大大增加了。从呼吸的K-V束出发的数值模拟已经确认,这些不稳定性导致振荡幅度的增加,粒子经常进入分离线外侧区域,对应于充分大的失匹配因子下形成了束晕。

研究粒子动力学的数值模拟方法,已经发展了particles in cell (PIC)模拟计算程序(4D和6D)。应用这类程序可通过大量的试验粒子模拟了解束晕-混沌的形成过程。由于试验粒子受到外部线性聚焦力和束核的非线性空间电荷场的影响,由束包络方程和单粒运动方程联立求解,可以通过数值模拟研究试验粒子的动力学行为特性。应用PIC数值模拟研究中试验的束晕粒子往往超过总束的10%,用多达30%~50%甚至更多

的束晕粒子。因此,严格来讲,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。应该考虑到单粒子与束包络动力学的相互作用。值得指出的是,6D的相空间模拟表明^[2,12-15]:离子束在径向与纵向两平面之间的耦合对束晕-混沌的形成有重要的影响。

2.4 非线性共振引起混沌

应用Poincare截面法研究满足K-V分布的束包络方程时已经发现强流离子束的自生场效应引起的非线性共振和混沌现象^[16-20],另一种微扰方法同样揭示了非线性共振导致混沌现象。单粒子与一个振荡束核的相互作用可引起共振。研究表明:试验粒子在束核附近的非线性共振仅依赖于表示空间电荷效应强弱的谐衰减系数 η ,或者说,是空间电荷效应引起了束核附近的非线性共振。对上述2个共振范围表达式进行数值计算,可得到分别表示束核包络振荡的2个本征模随谐衰减系数 η 的变化情况。一个共振区的范围是由偶数模共振范围的下边界和奇数模共振范围的上边界构成的。从偶数模共振范围的下边界可得 $\eta \leq \sqrt{2\nu_e^2/1-2\nu_e^2}$,从奇数模共振范围的上边界可得 $\eta \leq \sqrt{1-\nu_e^2/3\nu_e^2}$,脚标e和o分别表示偶数本征模和奇数本征模。利用这2个不等式,可算出相应的偶数模共振和奇数模共振的起始谐衰减系数 η 。例如,当出现2/3的偶数模共振时,计算得 $\eta \leq 0.6455$;当出现1/3的奇数模共振时,计算得 $\eta \leq 0.5345$;当出现1/10的奇数模共振时,计算得 $\eta \leq 0.1429$ 等。从混沌学可知,共振必然引起混沌。例如,当谐因子 $\eta \leq 0.7$ 时,在某些初始条件下,可能激发起各种共振的同时出现,这些共振的相互叠加产生共振覆盖,形成混沌区。在混沌区里,粒子运动轨道对初始条件有极敏感的依赖性。这可以在对基本方程组的数值模拟计算后,利用Poincare截面法,得到粒子运动在相空间的Poincare截面图中清楚看到。例如看到1/2、1/9、1/4、1/6、1/7等共振,由于这些共振的相互叠加产生共振覆盖,使粒子运动轨道出现了混沌。

只要改变各种粒子的初态分布,利用闪频法深入数值研究粒子-束核模型的结果表明:存在一条分离线把相空间划分为3种不同的轨迹(图5):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。如上述,其形状就像花生外壳形状一样。在小谐因子情形还可以把相空间更详细划分为4个区域(图6),即在上述核心区域与共振占主导的区域之间增加一个区域,靠近核心的II区,这里粒子受到的谐衰减系数比核心区的粒子要小。在第III区的粒子以接近核心区粒子振荡频率的50%进行振荡,所以它们能够与核心区粒子发生共振变成束晕粒子。在第IV区的粒子以比较大的幅度振荡,它们不与核心区的粒子发生共振。

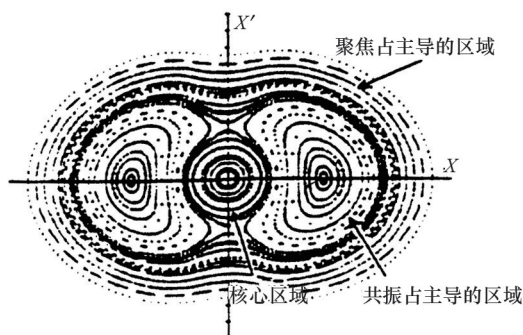


图5 粒子相空间轨迹的Poincare截面示意

Fig. 5 Poincaré section of particle phase trajectory under different initial conditions

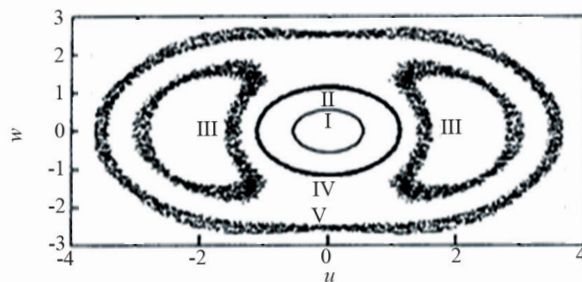


图6 对于小谐因子情形粒子运动的5种类型所在的区域

Fig. 6 Regions of the five types of particle motions in the small harmonic factor case

参数共振大约发生在粒子振动频率等于50%核心的振动频率处。共振占主导区域内的轨迹受参数共振影响相当强烈,它能引起束晕振幅增大。这是由于最初靠近核心的粒子和在共振占主导的区域内的粒子受到该共振的驱动,获得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,共振占主导的粒子多次迂回循环。因为粒子振幅对振动频率的

依赖性,产生了严重的“相位”混合,并经常存在一些具有最大振幅的粒子。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,束晕大大增强。这可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混沌区域内的粒子扩散(例如 Arnold 扩散)。如果能避免共振覆盖,则可能避免或减少束晕形成。但是已发现束晕再生现象:仅用如限束器的机械控制方法,当束流经过限束器一定距离之后,束晕又再生了。因此,必须采取物理上有效的束晕-混沌控制方法。

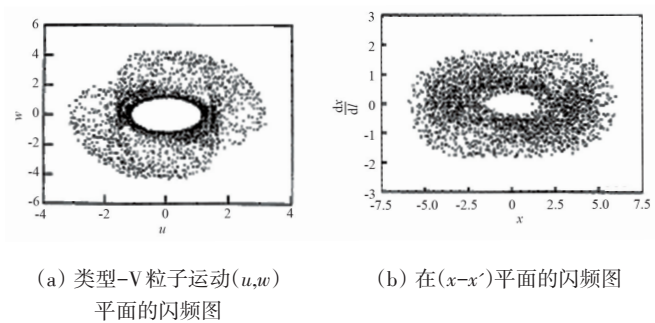
总之,束晕-混沌的形成归结为如下的物理过程:由于束核的包络振荡与束核附近单粒子运动之间的非相干作用,可激发起不同阶的非线性共振。在某些初始条件下,这些非线性共振的相互叠加产生共振覆盖,形成混沌区。在混沌区里运动的粒子,其运动轨迹强烈地依赖于运动的初始条件,因而单粒子运动轨迹出现随机性,并最终产生粒子的混沌运动,而混沌则导致束晕的形成。基于此,将加速器设计在合适参数下工作,则可避免非线性共振的最大束流强度,使得加速器稳定运行在小于最大束流强度。

3 束晕-混沌的正则变换方法

正则变换方法能更精确地确定粒子在 BTN 周期聚焦通道中传输时因失匹配产生束晕粒子的比例,该理论基于粒子在电磁场中的动力学方程模拟。结果发现:不用该法处理时少算了束晕粒子的比例,结论是由于粒子束在 PFC 的传输网络中出现失匹配导致了更多的束晕粒子的产生。正则变换法应用闪频采样画图方法,研究发现 PFC 失匹配是离子形成束晕粒子的一种机制,原来在 PFC 非束晕中的一些粒子也进入了束核共振区域内,由此产生了新的束晕粒子,导致束晕粒子的比例增加。理论表明:对于小谐因子情形,可以把粒子运动在相空间内大体划分为 5 种类型(图 6)。这是正则变换方法的优点之一,即让人们看到比前面更详细的粒子运动类型,类型-I 仍然在束核核心内,类型-II 在束核核心椭圆相图外侧但是不在与核心共振的区域内,因为这些的粒子受到比在核心内粒子更小的谐因子作用。类型-III 的粒子在以核振荡频率的 50% 附近振荡着。因此它们可以与核心粒子发生共振变成束晕粒子。

类型-IV 粒子以较大的幅度振荡,但较小依赖于谐因子,所以它们不与核心粒子发生共振。类型-V 的粒子落入分离线附近,由于周期场的作用和涨落的缘故使类型-V 粒子能够被驱动进入共振区域,也可以跑出共振区域。这个效应在均匀场系统中没有出现过,只有在周期场中才被发现,其实际意义在于:因为实际的离子束分布不可避免有些尾巴,而不是在传输方向粒子密度分布有尖锐的边缘外形,在失匹配的离子束中原来一些粒子初始不在与核心共振区域因为失匹配能够被驱动进入束晕区域。这就是为什么用正则变换方法研究时能够看到更多的束晕粒子的原因。

对于大谐因子和强聚焦情形时,类型-V 粒子运动的闪频图如图 7 所示。除了类型-I 以外,5 种粒子类型已经难以区别,它们之间的界限已经很模糊,相空间差不多连成了一片。



(a) 类型-V 粒子运动(u, w) 平面的闪频图 (b) 在 $(x-x', x'-x'')$ 平面的闪频图

图 7 对于大谐因子和强聚焦情形

Fig. 7 Large harmonic factor and strong focusing case

从图 7(b) 看到更大、更多的束晕粒子,主要是由于在闪频与包络振荡之间的相移以及投影的缘故。正则变换方法的优点,除了能计入精确的束晕粒子外,还可利用闪频图分段去研究束晕粒子的动力学,而不用任何光滑近似,研究参数范围也扩大了,可加深理解束晕粒子形成的机制。观察到,由于周期场的波动,原来不在束晕区域的一些初始振荡幅度稍大于核心半径的粒子也能进入与核心振荡共振区域。闪频图应用于研究均匀聚焦和四极聚焦系统发现:出现粒子包络振荡或者与呼吸模式共振,或者与四级模式共振,或者 2 个模式结合的共振形式,如此共振运动都导致粒子进入束晕区域。

4 三维离子束形成束晕-混沌的理论

前面研究仅限于 2D 离子束及 4D 相空间内的近似

结果。实际上,束晕-混沌问题属于3D离子束及6D相空间的复杂性问题^[11-27]。为此,美国已研制了3D多离子模拟程序 HAL03D,理论分析与多粒子6D的相空间模拟研究定性相一致,发现纵向束晕现象也是一个重要现象,必须同时研究横向和纵向的束晕现象。假定横向和纵向的恢复力梯度 k_x, k_y 和 k_z 是光滑的,一般选择束分布近似为椭圆分布。假定轴向对称,即 $k_x=k_y$,就可以近似把离子束看作是球状的,然后研究向对称的6D相空间分布,主要研究结果如下。

1) 横向束晕的范围随空间电荷增大而有所扩大,类似于在2D模拟所得到的结果。定义第*i*相空间内的晕度强度参数: $H_i = \sqrt{3I_4^i/2I_2^i} - 2$, 其中 $I_4^i = \langle q_i^4 \rangle \langle p_i^4 \rangle + 3$

$\langle q_i^2 p_i^2 \rangle - 4 \langle q_i p_i^3 \rangle$, $I_2^i = \langle q_i^2 \rangle \langle p_i^2 \rangle - \langle q_i p_i \rangle^2$, 其中 q_i 和 p_i 分别为广义坐标和广义动量。图8示出晕度强度对失配因子的依赖性。随着失配因子的增加,对谐因子的依赖性依然存在。就像纵向束晕情形,发现横向束晕强度最初被失配因子所控制。在2个可呼吸周期之后趋于饱和。一般3D下横向束晕与2D下非线性稳态分布所看到的束晕的所有特征基本一样。2D和3D的模拟结果吻合得很好。唯一观察到2D和3D之间很大的区别都与束晕的发展速率有关。在3D模拟中束晕强度明显地依赖于失配因子和谐因子。另一个不同是在2个可比较的失配因子和谐因子下,3D模拟中横向束晕的发展速率比2D情形快很多。

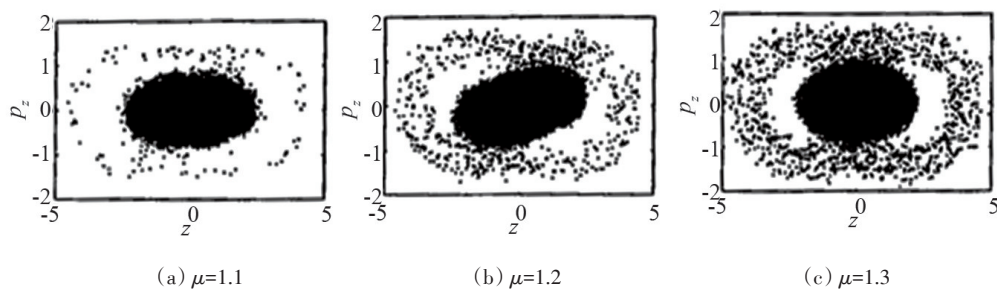


图8 束晕强度对失配因子的依赖性($C/a=3, \eta_x=0.65, \eta_z=0.49$)
Fig. 8 Dependence of beam halo intensity on mismatch factors

2) 当径向存在失匹配时,纵向束晕依赖于失配因子,在束晕中损失的粒子数目随 μ_z 大大增加。耦合效应很大时有所改变。

3) 纵向 z 和横向 r 运动之间存在耦合效应,甚至在很小失匹配(10%)下,只要在其他平面存在很大的失匹配,都能观察到横向和纵向的束晕现象,对于中等失匹配情形,也可看到耦合效应。当横向匹配而纵向失匹配20%时就产生纵向束晕。不过,当所有方向存在失匹配(10%失匹配)时,即使在 $\mu_x=\mu_y=\mu_z=1.1$,也观察到束

晕现象。可见,两向耦合效应是产生束晕的重要原因。

关于束晕结构,在低空间电荷限制下,纵向相图很像丝状结构,因而相空间椭圆相图畸变为依赖于失配因子的类似螺型结构。由于粒子从核心被排斥,所以产生新的尾巴形状(图9)。虽然新尾巴连续地被束核所排斥,但它们还是保留在原来尾巴的内部。这为束晕现象形成提供了一种简单机制。当很大部分粒子从核心被排斥时,在核心内部的粒子所受的电荷减少,这样就导致粒子新分布,该分布遵循相空间的分离线而

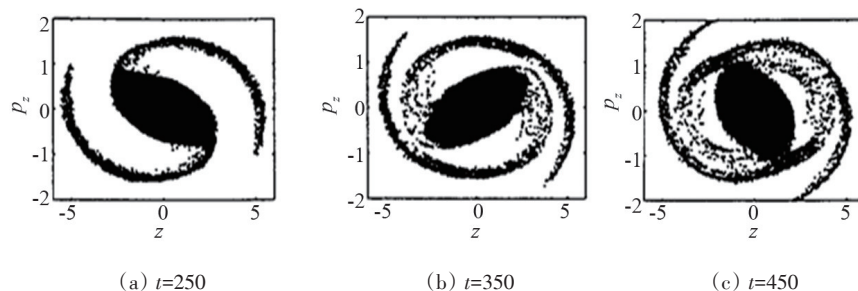


图9 纵向束晕的丝状及螺型结构随时间演化示意($C/a=3, x\eta_x=0.87, \mu=1.6$)
Fig. 9 Evolution of the filamentous and helical structures of longitudinal beam halo over time

且更靠近核心。

对于较高空间电荷情形,离子束密度再分布更复杂,变化更严重,束晕结构更加向外扩散。纵向相空间中的相图类似花生的形状,而无明显的丝状结构。此时看不到丝状的原因是所画的粒子的大多数都在核心内。为了得到高分辨率的束晕区域以降低密度相空间,这时选择一个阈值相密度正好在该束晕密度之上,以显示所有束晕粒子,在高密度区域,只画相应于阈值相密度的部分粒子(图10),以这种方式,对于比较长的束形($Cl/a=3$),看到在纵向相图螺旋结构发展成更类似花生形状。对于短的束形,在低空间电荷极限下束核与束晕之间粒子形状被畸变了,这个效应可能与短束形下横向和纵向运动之间的强耦合有关,而它对形成丝状过程产生影响。

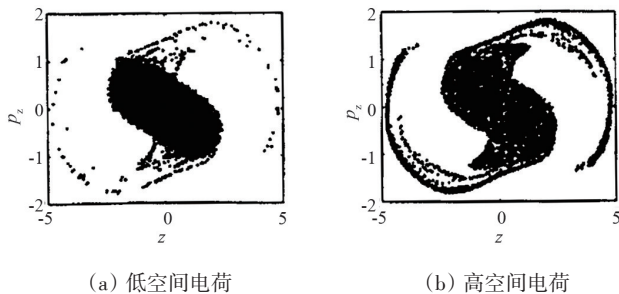


图10 纵向束晕相图

Fig. 10 Longitudinal beam halo phase diagram

以前大多研究关心长束的束晕形成。上述强调短束形下离子束中束晕形成的问题,这是加速器生产氚中特别感兴趣的,它需要相对比较短的束形。由于 r 和 z 平面的耦合作用,导致如果在其他平面上失匹配较大,即使失匹配小于10%也能观察到横向束晕或纵向束晕现象。

研究3D和6D相空图的主要结论是:1)束流传输网络中离子束形成纵向束晕是一个极为重要问题,纵向束晕发展较早于横向束晕,甚至在失匹配小于10%时也能产生纵向束晕。2)束晕形成取决于粒子分布。特别需要研究6D相空间的粒子再分布范围及由此对整个束晕形成的贡献。

2002年,Allen等在美国Los Alamos国家实验所的低能演示加速器(LED A)上实验研究束晕产生机制的结果与上述理论结果相一致^[14]。实验验证了束晕产生及理论上提出的2种产生束晕的物理机制:自由能模型和粒子-束核相互作用模型,理论预言了强流质子在

BTN中传输时发射度增长和束晕幅度增长的上限值,可用在设计加速器时估计所需要的磁场聚焦强度和通道的孔径大小,对同类实验有参考意义。因此,要求不仅需要改进实验装置,而且更需要研究如何有效控制束晕-混沌。

5 束晕-混沌的控制方法

控制束晕-混沌已经成为强流粒子束应用中的一个重要课题。对于一束圆形的质子束在直线加速器回旋管或四极磁极子产生的周期性聚焦磁场组成的束流传输网络通道中运动,当质子束初始满足K-V分布时,假设周期外场和质子束都是轴对称的,且在周期聚焦磁场网络通道中质子速度和周期长度保持不变,则质子运动的无量纲包络方程为非线性二阶常微分方程(2),它的受控动力学微分方程组可以变换为

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -(a + b \cos(x_3))^2 x_1 + \frac{Q}{x_1} + \frac{1}{x_1^3} + G \\ \frac{dx_3}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (5)$$

式中, G 为控制函数(控制器)。

对于BTN束晕混沌传输网络系统,则需要求解多维联立方程组

$$\frac{dx_i}{dt} = f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} F \quad (6)$$

式中, $f(x_i)$ 为束晕-混沌方程, c 为网络的耦合强度, F 为各个网络节点状态变量之间的内耦合矩阵, a_{ij} 为网络的外耦合矩阵。

为了控制BTN中束晕-混沌,经笔者课题组与合作者长期研究,已提出了多种控制方法^[3-4, 8-9, 21-26],如图11和表1所示。

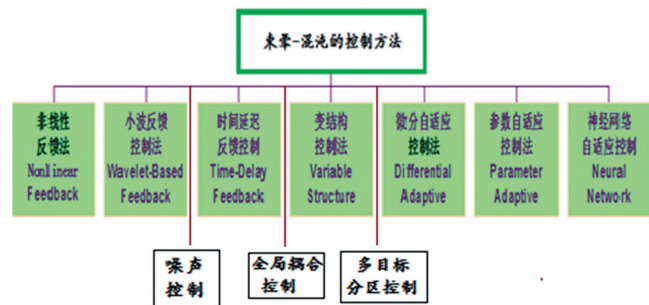


图11 束晕-混沌主要控制方法

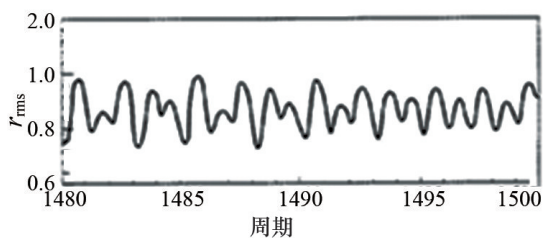
Fig. 11 Main control methods of beam halo-chaos

表1 若干控制方法对于K-V粒子初始分布下控制前后发射度 $\epsilon_{x,y}$ 比较

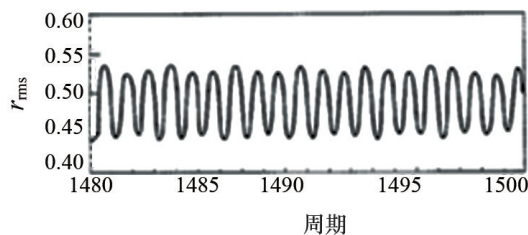
Table 1 Main control methods before and after the control of the initial distribution of K-V particles with the main control methods for beam halo-chaos

控制方法	控制器形式	控制前/后发射度 $\epsilon_{x,y}$ (周期1200处)	简评
非线性控制法	$G = -g \sin(r_{rms} - a_m)$	2.87/1.08	好
	$G = -g(r_{rms} - a_m)^2$	2.87/1.06	好
小波反馈法	$G = gu = g[f_{ab}(r_{rms}) - f_{ab}(a_m)]$	2.84/1.00	相当好
	$f_{ab}(x) = \exp[-(x-b)^2/a]$	2.84/1.00	
延迟反馈法	$G(t, \tau) = g[r_{rms}(t-S) - r_{rms}(S)]$	3.03/0.93	相当好
参数自适应法	$\kappa(s) = \frac{1}{r_b} \left[\kappa(s)r_{b0} + K \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_{b0}} + \left(\frac{1}{r_b^3} - \frac{1}{r_{b0}^3} \right) \right]$	2.64/1.10	需要改进
正比微分自适应法	$G = kr_{rms}$	2.64/0.9983 ($\eta=0.5$)	很好
变结构控制法	$u_{eq} = r_b^{-1} \left(\frac{k}{r_b} + \frac{k}{r_b^3} - \lambda \frac{dr_b}{dt} \right)$	没有计算	需要改进
孤立波控制法	$G = \frac{17}{8} \left(\text{sech}^2 \frac{5}{4} r_{rms} - \text{sech}^2 \frac{5}{4} a_m \right)$	没有计算, 其他性能都好	可行
LEBT/RFQ(模拟计算)	无任何控制	1.35 ($P=52$ 处)	不行 必须控制
LEBT/RFQ(实验测量)	无任何控制	1.51 ($P=52$ 处)	很差 必须控制

图12、图13分别比较了束晕-混沌控制前后粒子统计均方根半径 r_{rms} 随传输聚焦周期数变化, 及粒子分布相图的变化, 由图13可见: 控制后粒子运动变成比较规则准周期运动, 粒子分布被很好地压缩集中到束核中心处。



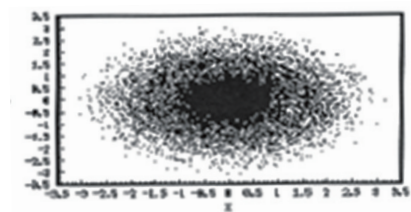
(a) 控制前



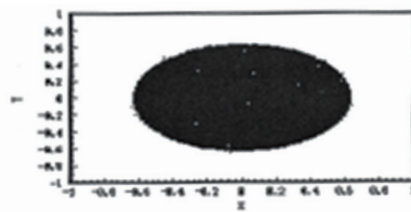
(b) 控制后

图12 离子运动轨迹

Fig. 12 Ion motion trajectory



(a) 控制前



(b) 控制后

图13 同一聚焦周期600处小波反馈控制控制前后的束晕混沌粒子相图比较

Fig. 13 Emissivity comparison of beam halo chaotic particles before and after the wavelet feedback control in the same focus period of 600

表1给出主要控制方法对于K-V初始分布下粒子控制前后重要束特性发射度 $\epsilon_{x,y}$ 比较。作为典型例子, 表2给出小波反馈控制法对束晕-混沌特性控制前后的

比较。

表2中符号 P_{AV}^2 表示横向截面上的动量平方和的平均值。由于对称性 x 向和 y 向的相对平均发射度(指

与初始发射度的比值) ϵ_x 和 ϵ_y 两者基本相同,只取其一。从图13和表1可见:这些控制方法能够使得束流性能全面变得很好,达到了对束晕-混沌的有效控制。

表2 不同小波函数反馈控制前后束晕特性的变化

Table 2 Changes of beam-halo characteristics before and after feedback control with different wavelet functions

初始质子分布形式	小波函数的参数	H 控制前/后	r_{max}/a_m 控制前/后	ϵ_x 或 ϵ_y 控制前/后	P_{AV}^2 控制前/后	简单评论
KV分布	2.8	0.290/0	5.20/2.00	2.84/1.00	3.63/1.31	很好
	2.0~2.6	0.430/0	5.20/2.10	2.88/1.00	3.62/1.31	更好
2-sigma高斯	2.0	0.280/0	4.32/1.31	2.89/1.11	3.09/1.61	很好
完全高斯	0.7	0.310/0	4.95/1.40	2.91/1.04	3.68/2.94	很好
水袋分布	2.0~2.6	0.298/0	4.24/2.00	2.87/1.25	2.58/1.40	很好

注:一般晕度 H 定义为: $H = H_g = \frac{\Delta N}{N} < 1$, ΔN 是散开在束核外围的束晕粒子数; N 为束流总粒子数。

6 应用前景

强流离子束传输网络是国内外关注的一个极其重要课题,也是网络科学应用于原子能科学领域相互交叉研究的一个范例。由于束流粒子强度高、注入和引出容易及能量可调等突出优点,在科研、国防和国民经济领域有着广泛而重要的用途^[26-34]。图14为世界主要高功率质子加速器分布及其应用概况示意图。

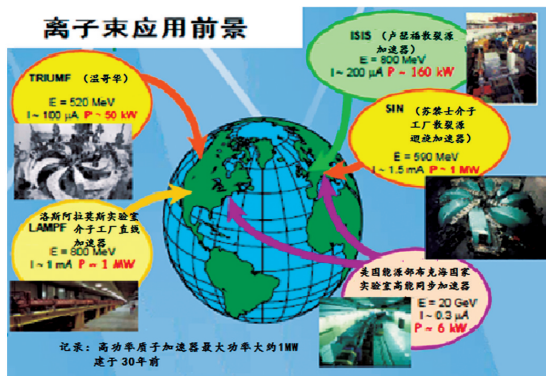


图14 世界主要质子加速器及其主要应用概况示意

Fig. 14 Main proton accelerators in the world and their main applications

由图14可见,离子束具有极其广泛的应用前景,迄今已应用于多方面,诸如:新核能——加速器驱动的放射性洁净核能系统(ADS)、散裂中子源、用于生产军用核材料(如钷和钷)、嬗变核废物、作为中微子工厂、 μ 子对撞机等应用于高能物理、工业、医疗以及网络保密通信等领域。

1) 加速器驱动的放射性洁净核能系统(图15)。

它是新一代更安全、更干净的核能系统,代表了21世纪极富诱惑力的核能发展方向^[2,28-32]。它把20世纪最重要的两大核科学装置——加速器和反应堆巧妙地结合起来,克服了常规核电的弊端。但它同时面临着诸多高新技术挑战,其中包括两大关键技术,一是次临界反应堆,二是强流中能加速器,其中关注如何控制束晕-混沌。因为强流束晕混沌如不加控制,则离子束极易打到加速器管壁等结构上,导致放射性剂量大大超标,距离加速器30 cm处,就有高达0.2 mSv/h放射性剂量,将给环境和人身安全造成严重危害。因此提出多种束晕-混沌控制方法,为确保安全高效地利用ADS洁净核能,解决这个关键问题提供了新方法和新技术。

2005年,在中国原子能科学研究院建成了ADS研究的次临界实验系统,中国科学院高能物理研究所参与合作,ADS属于第4代先进核能系统之一,命名为“启明星1号”,它被国际原子能机构确定为ADS研究基准实验装置,同属于第4代核能系统的还有快堆与高温气冷堆。ADS与传统反应堆最大的区别就是它在次临界条件下运行,可以保证反应堆的安全性。它的最大功能为嬗变铀系核素与超铀元素。核电站在运行过程中会不断产生这些无法进一步利用的核素,ADS扮演的角色就是将这些核素变成可以进一步分离利用的核素。它的嬗变原理为利用加速器产生的高能粒子轰击核素,发生一系列反应使铀系核素及超铀元素变成可以利用的核素。2016年12月23日中国首座铅基核反应堆零功率装置“启明星II号”首次实现临界,该装置在中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能”

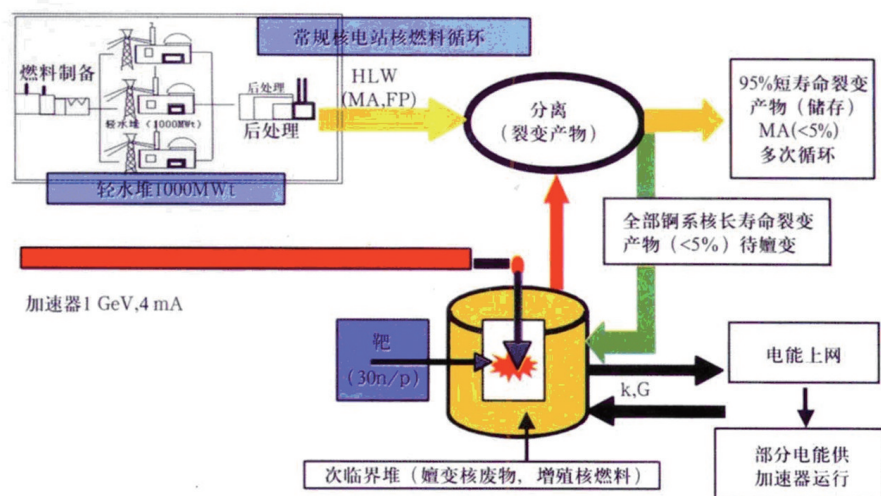


图15 加速器驱动的放射性洁净核能系统(ADS)示意

Fig. 15 Accelerator driven radioactive clean nuclear energy system(ADS)

专项的支持下,由中国原子能科学研究所和中国科学院近代物理研究所历时4年联合研制成功。这是ADS先导专项研究的又一个重大阶段进展,也是中国在铅基重金属冷却快中子反应堆的创新研发方面取得的关键技术突破,标志着中国在核反应堆新一代零功率装置研发领域达到国际先进水平。“启明星II号”是世界首座专门针对ADS系统中子物理特性研究的“双堆芯”临界装置,创新性地采用水堆和铅堆“双堆芯”结构,其中铅基堆芯中子物理特性最接近于ADS工程应用系统。该装置将为铅冷和铅铋冷却快堆的研发发挥三大平台作用:准确可靠的测量系统测试平台、设计程序及数据库的实验验证平台和科研及操纵人员教育培训平台,将为中国ADS系统的研发及铅基快中子反应堆的研发奠定重要基础。ADS系统可大幅降低核废料的放射性危害,实现核废料的最少化处置,同时还能用于发电,提高核资源的利用率,被国际公认为核废料处理的最有效手段。而中国是世界上第一个开展ADS嬗变系统大工程项目研制的国家,这一系统对于中国核电发展具有极为重大的意义。

2) 散裂中子源。2018年中国科学院高能物理研究所与广东省合作,在东莞市建成了世界第4台、中国首台脉冲型散裂中子源(CSNS)(图16),其基本原理是应用中能强流质子加速器产生1 GeV左右的中能质子(束功率为兆瓦量级)轰击重元素靶(如铅、钨、汞或者铀、钍重靶),在靶中产生散裂反应,导致重核的不稳定

而“蒸发”出20~30个中子,这样重核“裂开”并向各个方向“发散”出相当多的中子,大大提高了中子的产生效率,具有中子通量高和无放射性核废料等优点,它成为探索微观世界的“国之重器”。

CSNS也是发展中国家拥有的第一台散裂中子源,其脉冲中子通量将位居世界前列。在加速器、靶站和谱仪等各方面采用了一系列世界先进的设计和技术,束流功率为100 kW的CSNS其有效中子通量将与英国卢瑟福实验室的散裂中子源ISIS所达到的水平相当,可以满足中国多学科领域、国家重大战略需求和解决前沿科学问题对 neutron 源的强劲需求,为中国新能源、材料科技、生命科学、资源环境等基础研究和高新技术开发提供强有力的研究手段,意义重大,应用前景广阔。

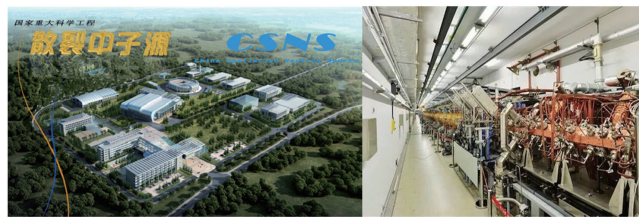


图16 中国散裂中子源(CSNS)基地及其负氢离子直线加速器

Fig. 16 China spallation neutron sourcebase and negative hydrogen ion linear accelerator

3) 中国自主研发的医疗重离子加速器,成为治癌“利器”。运用质子或重离子射线治疗肿瘤,是当今国际公认的最尖端的放射治疗技术,以杀癌效果好、毒副

作用小而被誉为“治癌利器”。2016年11月9日,中国研发成功重离子射线治癌(肿瘤)的重离子加速器,成为继日本、德国和美国之后,第4个具备重离子治疗肿瘤能力的国家。2017年,兰州重离子加速器国家实验室肿瘤治疗中心已启用,医用重离子加速器每年可运行230 d,约为5500 h,每台每年可治疗2000多名患者,具有传统方法无可比拟的优点(图17)。



图17 兰州重离子加速器国家实验室

Fig. 17 Lanzhou Heavy Ion Accelerator National Laboratory

4) 网络安全。网络空间安全令人关注,多年来中国原子能科学研究院网络小组开展了一些探索工作。特别是近年基于强流束晕-混沌的网络安全通信,根据加速器中束晕-混沌基本方程组,设计和研制出相应的电路,以电路芯片为节点,首次构建具有束晕-混沌、小世界(SW)和无标度(SF)的多特性的网络保密通信系统,提出和设计了3种保密通信的实验方案,初步研制了多特性的网络保密通信系统,在互联网局域上实现了网上多种信息保密通信(图18),今后进一步研究开发,与其他网络安全手段配合,具有良好应用前景。

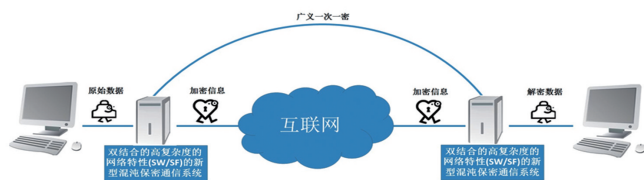


图18 多特性保密通信系统在互联网通信示意

Fig. 18 Schematic diagram of a dual-characteristic secure communication system in the Internet

7 结论及建议

束晕-混沌运动是强流粒子加速器系统产生的一种奇特现象,是一个令人关注的重要课题。对它的基础和应用研究,已经取得了一定的成果。然而从强流加速器粒子束及其应用的课题来考察,研究面临着一

些挑战性问题。

首先,理论上需要进一步深入研究强流带电粒子束在外加电磁场的束流传输网络中的运动规律,目的是改进和完善非线性问题的相关理论方法,以便求出精确的运动解析解或高阶逼近解。

第二,深入探讨由大量带电粒子组成的粒子束群体运动。一般用自治的宏观电磁场(空间电荷场)力来描述它们的集体动力学行为,并应用统计力学理论方法。为了更好地描述离子束或电子束的性状,需要研究在外电磁场及空间电荷场共同作用下形成的统计分布及其强流粒子束输运问题与演化规律,研究六维相空间动力学束流传输、聚焦仍然是一个难题。

第三,加速器中离子束或电子束运动经常出现不稳定现象和辐射现象,并与电磁波场发生相互作用,需要考虑它们自身之间的相互作用的波动性质。与自由电子激光器和同步辐射源等类似,与许多重要的现代技术密切相关。

第四,理论和实验证明强流粒子束产生的束晕-混沌现象具有不稳定性,涉及到非线性科学、复杂性科学和网络科学等新兴交叉科学,需要深入开展新兴交叉科学的综合研究。

今后需要继续多方开拓创新,大力拓广强流加速器束流各种应用研究和技术服务,以促进中国科研、国防、工农业、能源、医疗、高科技等国民经济各个领域的发展,为加快科技强国新长征和造福于人类和平可持续发展做出应有的贡献。

致谢:中国原子能科学研究院刘强、李永和广西师范大学罗晓曙等课题组成员参与本研究。

参考文献(References)

- [1] Reiser M, Lee E P. Theory and design of charged particle beams[J]. Physics Today, 1995, 48(6): 59-59.
- [2] Sessler A M. Collective phenomena in accelerators[C/OL]. [2018-01-31]. <http://lss.fnal.gov/conf/C721010/p291.pdf>.
- [3] 方锦清. 驾驭强流束晕与探索网络科学[M]. 北京: 原子能出版社, 2008.
Fang Jinqing. Harnessing high halo and explore network science [M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2008.
- [4] 毕桥, 方锦清. 网络科学与统计物理方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
Bi Qiao, Fang Jinqing. Network science and statistical physics methods[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.

- [5] 方锦清. 科技浪花与追梦随笔——新兴科学交叉集[M]. 北京: 原子能出版社, 2015.
Fang Jinqing. Science and technology flowers and dreams: A cross collection of emerging science[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2015.
- [6] Lee S Y. Space charge dominated beams and applications of high brightness beams[C]//AIP Conference Proceedings, No.377. New York: AIP Press, 1996.
- [7] Jameson R A. Frontiers of accelerator technology[C]//Proceeding of Joint US-CERN-Japan International School in 1994. Singapore: World Scientific, 1996: 430-560.
- [8] Lagniel J M. Chaotic behaviour and halo formation from 2D space-charge dominated beams[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1994, 345(3): 405-410.
- [9] 方锦清, 陈关荣. 非线性反馈控制强流加速器中的束晕-混沌现象[J]. 强激光与粒子束, 2000, 2(5): 647-651.
Fang Jinqing, Chen Guanrong. Nonlinear feedback control of beam halo-chaos in high current accelerator[Intense][J]. Laser and Particle Beam, 2000, 2(5): 647-651.
- [10] 方锦清, 赵耿, 周刘来, 等. 束晕-混沌的非线性反馈离散控制[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 933-937.
Fang Jinqing, Zhao Geng, Zhou Liulai, et al. Nonlinear feedback discrete control of beam-halo_2 chaos[J]. Intense Laser and Particle Beam, 2002, 14(6): 933-937.
- [11] Gluckstern R L. Analytic model for halo formation in high current ion linacs[J]. Physical Review Letters, 1994, 73: 9(9): 1247-1250.
- [12] Gluckstern R L, Fedotov A V, Kurennoy S, et al. Halo formation in three-dimensional bunches[J]. Physical Review E, 1998, 58(58): 4977-4990.
- [13] Fedotov A V, Gluckstern R L, Kurennoy S S, et al. Halo formation in three-dimensional bunches with various phase space distributions[J]. Review of Modern Physics, 1999, 2(1): 014201.
- [14] Allen C K, Chan K C, Colestock P L, et al. Beam-halo measurements in high-current proton beams[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(21): 214802-214804.
- [15] Qiang J, Colestock P L, Gilpatrick D, et al. Macroparticle simulation studies of a proton beam halo experiment[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002, 5(12): 124201.
- [16] Wangler T P, Crandall K R, Ryne R, et al. Particle-core model for transverse dynamics of beam halo[J]. Review of Modern Physics, 1999, 1(8): 084201.
- [17] Chen C, Davidson R C. Nonlinear resonances and chaotic behavior in a periodically focused intense charged-particle beam [J]. 1994, 72(14): 2195-2198.
- [18] Wangler T P, Crandall K R, Ryne R, et al. Particle-core model for transverse dynamics of beam halo[J]. Review of Modern Physics, 1999, 1(8): 084201.
- [19] Wang T S F. Particle-core study of halo dynamics in periodic-focusing channels[J]. Physical Review E: Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 2000, 61(1): 855-861.
- [20] Allen C K, Wangler T P. Beam halo definitions based upon moments of the particle distribution[J]. Review of Modern Physics, 2008, 5(12): 441-451.
- [21] 方锦清. 驾驭混沌与发展高新技术[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2002.
Fang Jinqing. Control chaos and develop high and new technology[M]. Beijing: China Atomic Energy Publishing House, 2002.
- [22] 方锦清, 陈关荣. 束晕-混沌的复杂性理论与控制方法及其应用前景[J]. 物理学进展, 2003, 23(3): 321-388.
Fang Jinqing, Chen Guanrong. Complexity theory and control method of beam halo-chaos and its application prospect[J]. Progress in Physics, 2003, 23(3): 321-388.
- [23] 刘强, 方锦清, 李永. 束流传输网络中多目标的分区耦合牵引控制[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2007, 4(1): 13-19.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Li Yong. The multi-objective coupled control of the partition in a beam transmission network [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2007,4(1): 13-19.
- [24] 刘强, 方锦清, 李永. 具有小世界和无标度拓扑的束流传输网络中束晕-混沌的同步与控制[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1418-1427.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Li Yong. beam halo in a beam transport network with small world and scale-free topology Synchronization and control of chaos[J]. Advances in Natural Science, 2007, 17(10): 1418-1427.
- [25] Liu Q, Fang J Q, Li Y. Synchronization and control of halo-chaos in beam transport network with small world topology[J]. Communications in Theoretical Physics, 2007, 47(4): 752-758.
- [26] 方锦清. 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[J]. 自然杂志, 2000, 22(2): 62-69.
Fang Jinqing. A key problem in the clean nuclear power system driven by high current accelerator: The physical mechanism and control strategy of halo chaos[J]. Chinese Journal of Nature, 2000, 22(2): 62-69.
- [27] Gelès C, Lindecker G, Mandrillon P, et al. An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator : Complement on cost analysis[C]//8th Journées Saturne: Accelerators Applied to the Nuclear Waste Problem. Saclay, France: CERN, 1993:

- CERN-AT-93-47-ET.
- [28] 丁大钊. 放射性洁净核能系统[J]. 科技导报, 1997, 15(3): 32-34.
- Ding Dazhao. Radioactive clean nuclear energy system[J]. Science and Technology Review, 1997, 15(3): 32-34.
- [29] 傅世年. 强流质子直线加速器低能端物理问题的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 1999.
- Fu Shiyan. A research on the low-energy end physics problem of a strong-flow proton linear accelerator[D]. Beijing: China Atomic Energy Science Research Institute, 1999.
- [30] 丁大钊, 赵志祥. “加速器驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究”项目总结报告[R]. 北京: 中国原子能科学研究院和中国科学院高能物理研究所, 2005.
- Ding Dazhao, Zhao Zhixiang. Summary report on physics and technology basic research of accelerator driven clean nuclear power system project[R]. Beijing: Institute of High Energy Physics, China Institute of Atomic Energy and Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [31] 方锦清. 特殊的束晕-混沌网络保密通信系统[C]//2016年全国混沌保密通信会议大会. 北京: 中国密码学会, 2016.
- Fang Jinqing. Special beam halo-chaotic network secure communication system[C]//The National Conference on Chaotic Secure Communication in 2016. Beijing: Chinese Association for Cryptologic Research, 2016.
- [32] 方锦清. 多特性结合的网络保密通信系统[C]//2017第13届中国网络科学论坛大会. 北京: 中国工业与应用数学学会, 2017: 4-22.
- Fang Jinqing. multi-characteristic network confidential communication system[C]//The 13th China Web Science Forum. Beijing: China Institute of industrial and Applied Mathematics, 2017: 4-22.
- [33] Fang J Q, Luo X S. Control of halo-chaos in beam transport network via neural network adaptation with time-delayed feedback[J]. Communications in Theoretical Physics, 2006, 45(1): 117-120.
- [34] 刘强, 方锦清, 赵耿, 等. 束晕混沌同步控制及若干加密方法研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(1): 23-40.
- Liu Qiang, Fang Wei, Zhao Geng, et al. Halo synchronization control and some encryption methods[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(1): 23-40.

Complexity of beam-halo chaos, the control methods and applications

FANG Jinqing

Department of Nuclear Technology Applications, Institute of Atomic Energy Science, Beijing 102413, China

Abstract The beam transmission system in a particle accelerator is a complex network composed of many electromagnetic focusing units as nodes. The intense current particle beam in the beam transmission network system(BTN) can produce its own special halo chaos, as a unique flower in the complexity science garden. It is an extremely important subject of concern. The complexity, the physical mechanism, the control methods and the practical applications of this special beam-halo in the chaos kingdom are reviewed in this paper.

Keywords strong particle beam; beam transport network; complexity of beam halo-chaos; physical mechanism; control methods ●



(责任编辑 刘志远)