



超导直线加速器包络不稳定性模拟研究

易蔓 刘淑会 王志军 褚易梦 孙坤祥 贾端阳

Envelope Instability Analysis of Superconducting Linear Accelerators

YI Man, LIU Shuhui, WANG Zhijun, CHU Yimeng, SUN Kunxiang, JIA Duanyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022105>

引用格式:

易蔓, 刘淑会, 王志军, 褚易梦, 孙坤祥, 贾端阳. 超导直线加速器包络不稳定性模拟研究[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(3):370–376. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022105

YI Man, LIU Shuhui, WANG Zhijun, CHU Yimeng, SUN Kunxiang, JIA Duanyang. Envelope Instability Analysis of Superconducting Linear Accelerators[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(3):370–376. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022105

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

托卡马克高约束模边缘等离子体不稳定性研究

Investigation of Edge Plasma Instabilities in High Confinement Plasmas of Tokamak

原子核物理评论. 2020, 37(3): 462–469 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC05>

CiADS超导直线加速器超导腔失效的分段补偿与冗余设计

Piecewise Compensation and Redundancy Design for Superconducting Cavity Failure of CiADS Linac

原子核物理评论. 2019, 36(1): 62–70 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.062>

IH型漂移管直线加速器的束流动力学研究 (英文)

Beam Dynamics Study of the IH-DTL New Injector for HIRFL-CSR

原子核物理评论. 2017, 34(2): 170–176 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.170>

电子束在 α -磁铁模型中传输模拟与优化

Simulation and Optimization of Electron Bunches Transport in an Alpha Magnet Model

原子核物理评论. 2019, 36(3): 329–335 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.329>

处于力学不稳定条件下的受激有限核的动力学演化与确定论混沌

Dynamic Evolution of Excited Finite Nuclei under Mechanical Instability and Deterministic Chaos

原子核物理评论. 2020, 37(1): 34–39 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019053>

带有质量分析系统的强流质子束低能传输线研究

Low Energy Beam Transport of High Current Proton Beam with Quality Analysis System

原子核物理评论. 2018, 35(1): 40–45 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.040>

文章编号: 1007-4627(2023)03-0370-07

超导直线加速器包络不稳定性模拟研究

易蔓^{1,2}, 刘淑会^{1,†}, 王志军^{1,†}, 褚易梦^{1,2}, 孙坤祥^{1,2}, 贾端阳^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 空间电荷驱动的包络不稳定性是引起强流超导质子直线加速器束流损失的重要因素, 零流强下的周期相移小于90度是目前国际普遍遵循的强流超导质子直线加速器设计原则, 这一设计原则是在不考虑加速的情况下提出的。本论文通过动力学仿真模拟, 对加速条件下的周期性不稳定性进行了分析, 结果表明, 合理选择聚焦变化速度和加速梯度可以减弱包络不稳定的影响, 从而可以突破物理设计周期相移小于90度的严格限制, 提高加速器的加速效率。

关键词: 超导直线加速器; 强流; 空间电荷效应; 包络不稳定性

中图分类号: O572.21⁺¹

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022105

0 引言

周期性的强流超导质子直线加速器系统中, 若入口束流存在失配, 零流强的周期相移超过90度时可能发生包络振荡的不稳定性, 这种由空间电荷驱动的包络不稳定性会引起束流尺寸成倍增大, 进而增加束流损失几率^[1-2]。为避免束流包络不稳定性, 国际上直线加速器设计普遍遵循零流强下周期相移小于90度的原则^[3-5]。包络不稳定性的激发条件是完全周期结构, 直线加速器并不是完美的周期系统, 高梯度射频腔体的加速效应打破了加速器的纵向周期性。本论文通过动力学模拟分析方法, 研究加速效应对包络不稳定性的耦合影响。

1 考虑加速效应的束流传输

考虑加速的情况, 直线加速器的三维包络方程可表述为^[6-7]

$$\frac{d^2X}{ds^2} + \left(\frac{p'_0}{p_0}\right) \frac{dX}{ds} + k_x^2(s)X - \frac{Ku_0\pi\lambda_3}{l^2} G_{311}(X, Y, u_0T)X - \left(\frac{\delta}{lp_0}\right)^2 \frac{\varepsilon_x^2}{X^3} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2Y}{ds^2} + \left(\frac{p'_0}{p_0}\right) \frac{dY}{ds} + k_y^2(s)Y - \frac{Ku_0\pi\lambda_3}{l^2} G_{311}(X, Y, u_0T)Y - \left(\frac{\delta}{lp_0}\right)^2 \frac{\varepsilon_y^2}{Y^3} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2T}{ds^2} + 3\left(\frac{p'_0}{p_0}\right) \frac{dT}{ds} + k_t^2(s)T - \frac{Ku_0\pi\lambda_3}{l^2} G_{311}(X, Y, u_0T)T - \left(\frac{\delta}{lp_0u_0^2}\right)^2 \frac{\varepsilon_t^2}{T^3} = 0, \quad (3)$$

$$G_{lmn}(X, Y, Z) = \frac{3}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(x^2+s)^{l/2}(y^2+s)^{m/2}(z^2+s)^{n/2}}, \quad (4)$$

其中: X 和 Y 分别代表水平和垂直的RMS束流尺寸; T 代表RMS纵向相宽; p_0 代表参考粒子的动量; p'_0 代表距离的微分; k_x^2, k_y^2, k_t^2 代表横纵向外聚焦力; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_t$ 代表三个方向的归一化RMS发射度。 $l=c/\omega$, $\delta=mc$, 其中 c 代表真空中的光速; ω 代表高频角频率; $u_0=\gamma_0\beta_0$; K 是与空间电荷力相关的导流系数:

$$K = \frac{qI}{2\pi\varepsilon_0 p_0 u_0^2 \gamma_0^2},$$

其中: I 代表平均电流; q 代表粒子的电荷态; ε_0 是真空介电常数; u_0 表示参考粒子速度; γ_0 代表参考粒子的相对论因子。 k_t^2 代表纵向聚焦^[8]; E_s 代表同步粒子的电场; T 代表渡越时间因子, 表征腔体的加速效率; φ_s 代表同步相位; γ_s 代表同步粒子的相对论因子; σ_0 代表纵向相移:

$$k_t^2 = \frac{2\pi q E_s T \sin(-\varphi_s)}{mc^2 \beta_s^3 \gamma_s^3 \lambda}$$

收稿日期: 2022-10-13; 修改日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11875197)

作者简介: 易蔓(1998-), 女, 湖北孝感人, 硕士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: yiman@impcas.ac.cn

† 通信作者: 刘淑会, Email: liushu@impcas.ac.cn; 王志军, Email: wangzj@impcas.ac.cn

$$\sigma_0 = k_r L = \sqrt{\frac{2\pi q E_s T \sin(-\varphi_s)}{mc^2 \beta_s^3 \gamma_s^3 \lambda}} L,$$

由上述公式可以看出，对一个确定的加速结构，纵向相移与加速梯度和同步相位呈正比，即腔体加速梯度越高，相移变化速度越快。

2 模拟仿真分析

以单个螺线管和单个腔体组成的聚焦结构为研究对象，在不考虑加速和考虑加速两种情况下，针对不同周期相移情况进行动力学模拟仿真。图 1 为聚焦结构示意图，一个周期单元包括一个 200 mm 的螺线管和 240 mm 高频腔体，腔体与螺线管之间为 180 mm 漂移段。动力学模拟是通过 TraceWin 程序 [9] 实现的。束流的入口能量为 2 MeV，流强为 10 mA，三个方向的初始束流发射度均为 0.2 πmm·mrad。包络不稳定性的影响不是一个瞬变的过程，包络共振的激发过程通常需要较多的周期数。我们在模拟研究过程中发现，横纵向束流尺寸和发射度会一直迅速增长到 25 个周期，为了使得对比结果更明显，本文在模拟时采用 50 个周期结构。

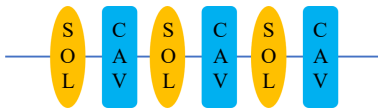


图 1 聚焦结构示意图(在线彩图)

不考虑加速情况下，由于没有加速的阻尼作用，50 个结构周期的周期相移保持恒定，逐步改变周期相移，对每种情况进行束流传输模拟，图 2 为不同周期相移情况下的 RMS 发射度增长情况。当周期相移达到 110 度时，束流发射度增长达到最大，此发射度变化对应的相移宽度约 20 度，类似结论在相关的文献中也有报道过 [10]。早期的理论分析文献结果表明，周期相移

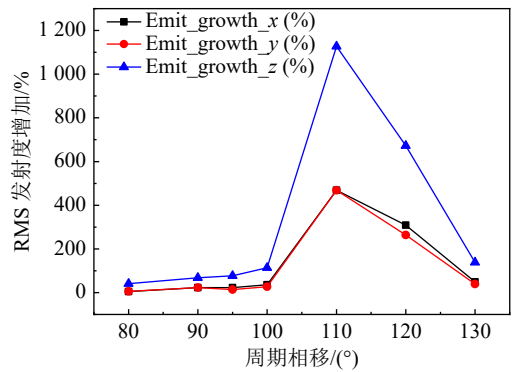


图 2 不考虑加速情况下，束流发射度增长随周期相移的演化(在线彩图)

大于 90 度导致的包络不稳定性具有约 15 度的带宽 [11]，当周期相移不在这一带宽范围内时，包络不稳定性的影响减弱。2009 年德国亥姆霍兹重离子研究中心 GSI 直线加速器上进行的包络不稳定性实验结果与上述理论分析结果基本一致，实验结果表明包络共振的带宽约为 20 度。

对于以增能为目标的高梯度加速器，由于加速的存在，周期相移不是恒定的，随着能量的提高，纵向的周期相移会减小。为了避免束核一束核共振导致的不同平面发射度的交换，均温设计是强流直线加速器的设计原则之一，即保持横向与纵向聚焦强度的比值恒定。因此，纵向周期相移随能量增加而减小，横向周期相移也会相应地减小。

在初始周期相移为 110 度的条件下，分别对无加速影响(恒定相移)情况和有加速效应(变化相移)情况进行多粒子模拟分析，两种情况下的螺线管参数及相应的相移曲线如图 3 所示。无加速情况下，周期相移保持 110 度恒定不变；考虑加速阻尼情况，周期相移由初始 110 度逐渐降低至 80 度。

图 4 和图 5 为基于图 3 相移(聚焦)设置情况下的模拟结果。发射度演化的对比结果表明，考虑加速效应的

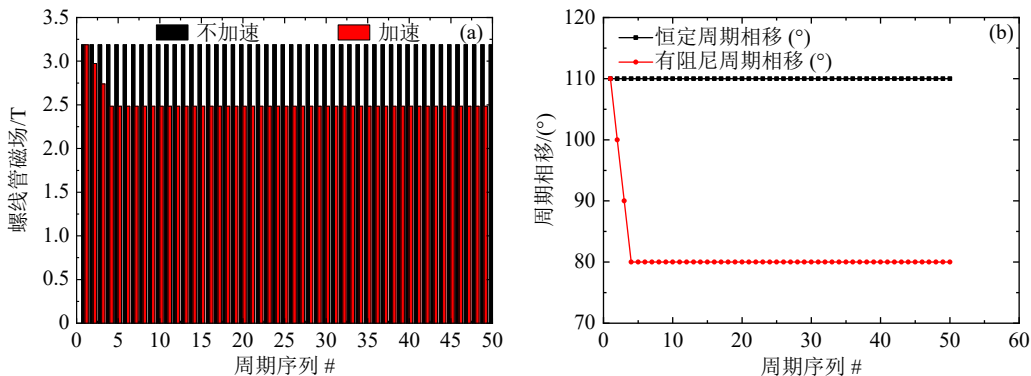


图 3 无加速效应和有加速效应两种情况的螺线管磁场强度及周期相移曲线(在线彩图)

(a)螺线管磁场强度；(b)周期相移。

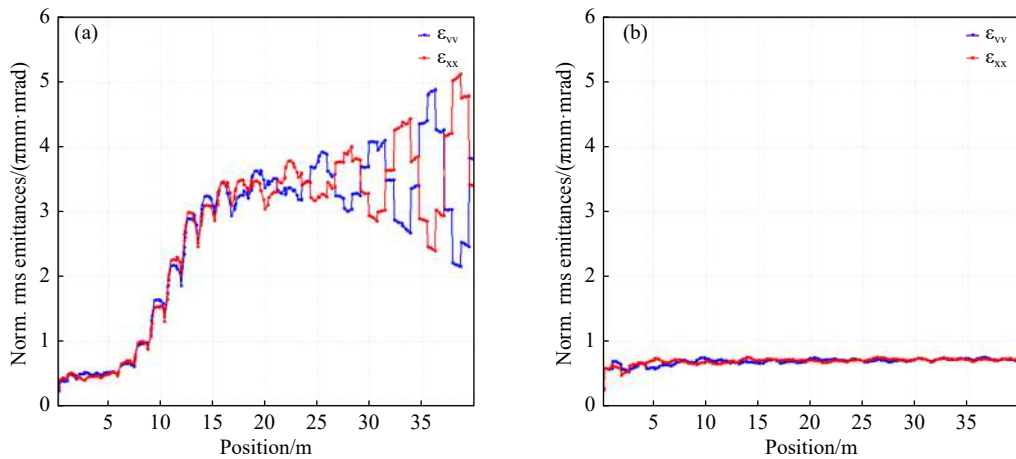


图 4 束流发射度演化@周期聚焦情况 (a) 和@考虑加速效应情况 (b) (在线彩图)

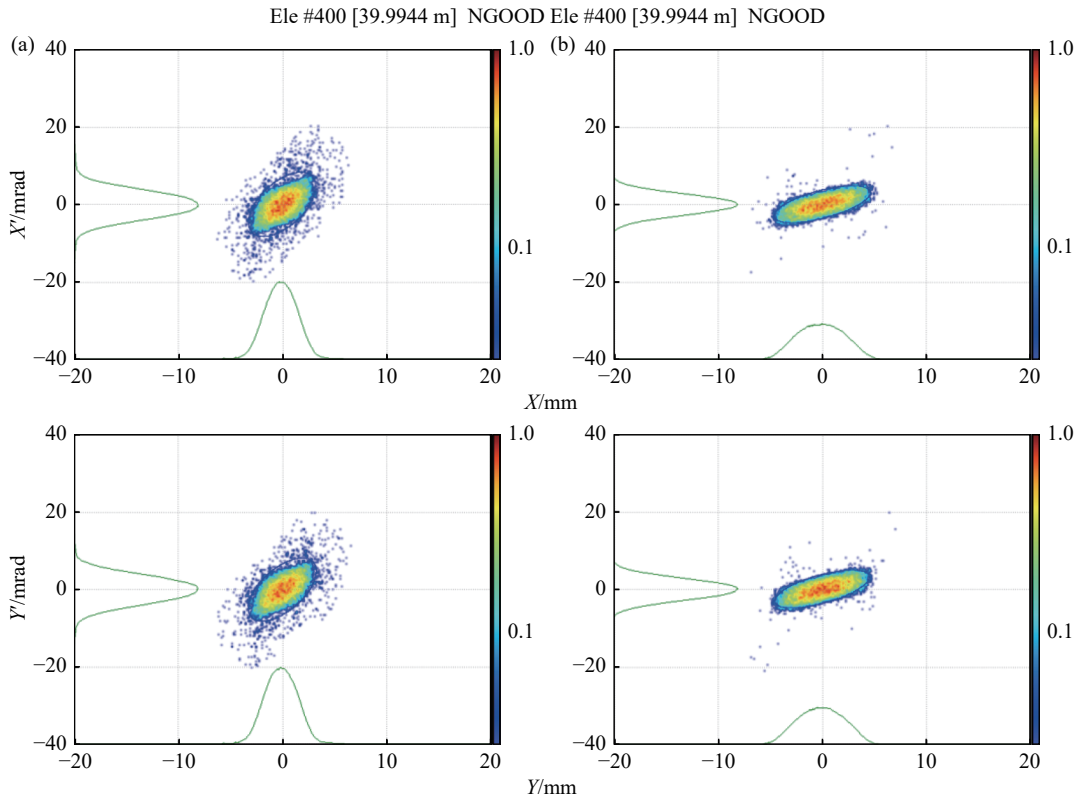


图 5 出口束流相空间分布周期聚焦情况 (a) 和考虑加速效应情况 (b) (在线彩图)

情况下，周期相移会不断减小，停留在 90 度周期相移以上的工作点数量减少，包络不稳定性引起的束流发射度增长明显减小，约为不考虑加速效应情况下发射度的 1/6。从出口相空间分布也可以看出，相比不加速的恒定周期相移情况，考虑加速效应情况下，束流相空间畸变明显减弱，包络不稳定性引起的外部束晕粒子明显减少。

从以上的对比分析可知，停留在 90 度周期相移以上的工作点的数量与包络不稳定性影响大小有关，为了得到二者的具体关系，我们针对周期相移大于 90 度的

不同相移分布情况进行多粒子模拟分析。图 6 为周期相移曲线，四种相移曲线的区别在于大于 90 度周期相移的工作点数量不同。图 7 为四种周期相移下的发射度演化情况。

图 8 为多粒子模拟的相空间分布对比，(a) 中有 5 个工作点停留在 90 度相移以上，(b) 中有 3 个工作点停留在 90 度相移以上，显然，初始周期相移相同，当大于 90 度的工作点减少时，相空间畸变减弱，相空间外围的束晕粒子减少，从图 8(b)~(d)，大于 90 度周期相移工作点数量继续减少，但是相邻工作点之间的相移变化量

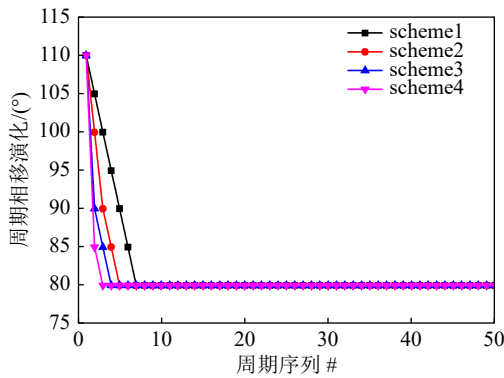


图 6 不同的周期相移曲线分布 (在线彩图)

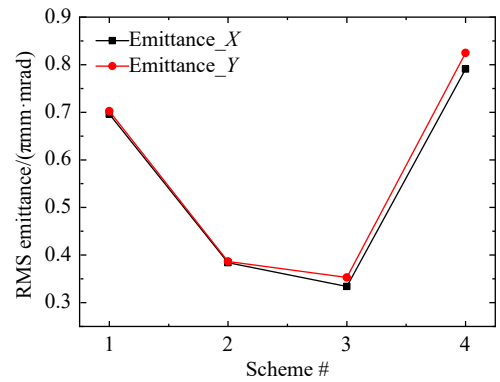


图 7 不同相移演化情况下的发射度对比 (在线彩图)

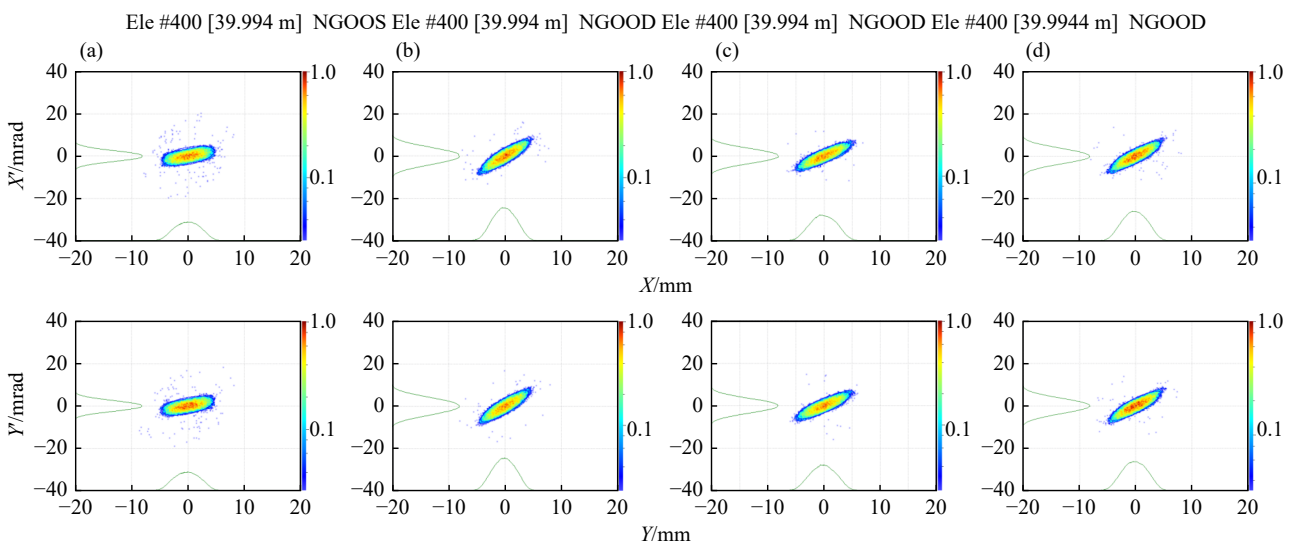


图 8 不同阻尼相移曲线情况下的相图 (在线彩图)

(a) Scheme1: 5 个工作点停留在 90 度相移以上；(b) Scheme2: 3 个工作点停留在 90 度相移以上；(c) Scheme3: 2 个工作点停留在 90 度相移以上；(d) Scheme4: 1 个工作点停留在 90 度相移以上。

增大，此时相空间畸变发生逆转，外部束晕粒子增多，这是相移平滑程度引起的影响，即聚焦力变化幅度的影响，但是相比周期聚焦结构(恒定相移)情况，加速对应的变化相移情况下的发射度增长及相空间畸变均明显减弱，加速作用对周期相移超过 90 度的包络不稳定性影响起到了一定的抑制作用。

针对图 1 所示的加速聚焦结构，我们对加速情况进行了模拟。在加速情况下，纵向周期相移的变化与腔体的加速梯度直接相关。随着加速梯度增大，周期相移穿越 90 度的速度越快。除了与加速梯度直接相关外，纵向周期相移还受到同步相位选取的影响，同步相位与纵向接受度成正比关系，由于高频非线性的影响，不同的同步相位情况下的纵向束流发射度等参数也会不同。对于一个确定的超导加速器结构，同步相位的选取范围基本是确定的，因此，影响纵向周期相移的主要因素是腔体的加速梯度。我们排除相位接受度对模拟结果的影响，

对相同同步相位不同加速梯度(对应不同周期相移)情况进行了周期相移影响的多粒子模拟。图 9 为相同同步相位不同加速梯度情况下的周期相移曲线及腔体有效加速梯度。随着加速梯度增大，初始周期相移逐渐增大，相移变化速度变快。

图 10 为不同周期相移曲线对应的 RMS 发射度演化情况。随着初始周期相移增大，束流 RMS 发射度整体呈现不断增大的趋势，相比于周期相移小于 90 度的情况，当初始周期相移为 100 度，腔体有效加速梯度为 3 MV/m 时，整个加速结构有 2 个周期相移大于 90 度的工作点，且相邻工作点之间的相移差小于 10 度，此时，束流 RMS 发射度演化趋势基本一致；当周期相移大于 110 度，RMS 发射度增长大于 20%，这是加速梯度增大带来的双面影响造成的，一方面加速梯度增大，起始周期相移增大，虽然周期相移变化速度加快，但停留在 90 度以上周期相移的工作点仍然增多，另一方面，由

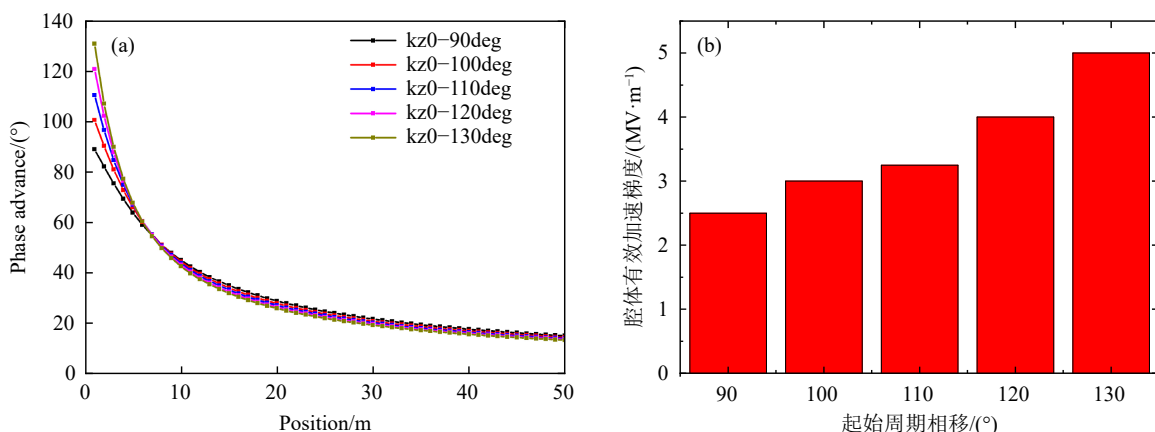


图 9 相同同步相位(-40°)不同加速梯度情况下的周期相移曲线及腔体有效加速梯度(在线彩图)

(a) 周期相移; (b) 腔体有效加速梯度。

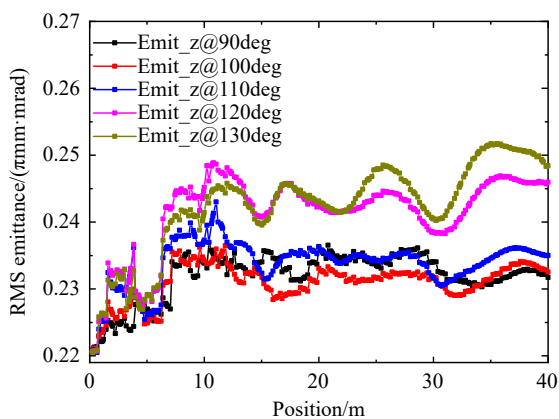


图 10 不同周期相移(相同同步相位(-40°)和不同加速梯度情况)情况下束流 RMS 发射度演化(在线彩图)

于相移变化速度增长快, 相邻两个工作点之间的相移差变大, 导致束流传输过程中聚焦变化更剧烈, 两方面因素共同作用导致起始周期相移大于 110 的情况下束流发射度呈现逐步增大趋势。基于不同加速梯度(不同周期相移)情况下的模拟结果, 图 11 给出了周期相移、腔体加速梯度及 RMS 发射度增长三者的对应关系。

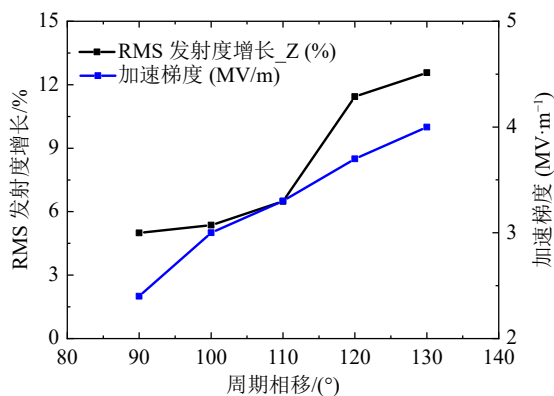


图 11 周期相移、腔体加速梯度及 RMS 发射度增长的对对应关系(在线彩图)

以上的模拟分析均是在 10 mA 流强下进行的, 包络不稳定性是空间电荷效应驱动的束核与周期聚焦结构共振的结果, 因此, 我们对初始周期相移为 100 度, 流强分别为 20, 30, 40, 50 mA 情况进行了动力学模拟对比分析。图 12 和图 13 分别为 RMS 发射度和相空间随着流强的演化情况。由图可知, 随着流强不断升高, 空间电荷效应增强, 束流 RMS 发射度线性增大, 相空间外围的束晕粒子也明显增多。

基于以上模拟结果, 随着加速梯度的增加, 经过几个周期后, 周期相移迅速降低到 90 度以下, 这使得质子束流穿越了包络不稳定性所在的禁带区间, 消除了包络共振的影响来源, 从而降低了束晕粒子的形成和发射度的增长。因此, 明显的加速效应具有抑制包络不稳定性的作用。对于具有明显加速效应且流强小于 20 mA 的超导质子直线加速器设计, 可以考虑突破物理设计周期相移小于 90 度的严格限制, 提高腔体的腔压利用率, 进而提高加速器的整体加速效率, 缩短加速器的长度, 达到降低加速器整体造价的目的。

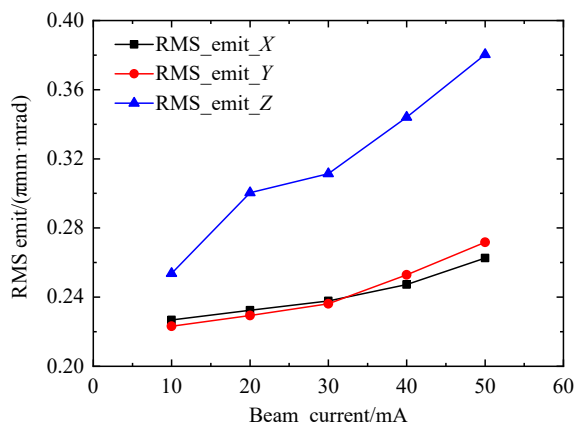


图 12 RMS 发射度随着流强变化的演化情况(在线彩图)

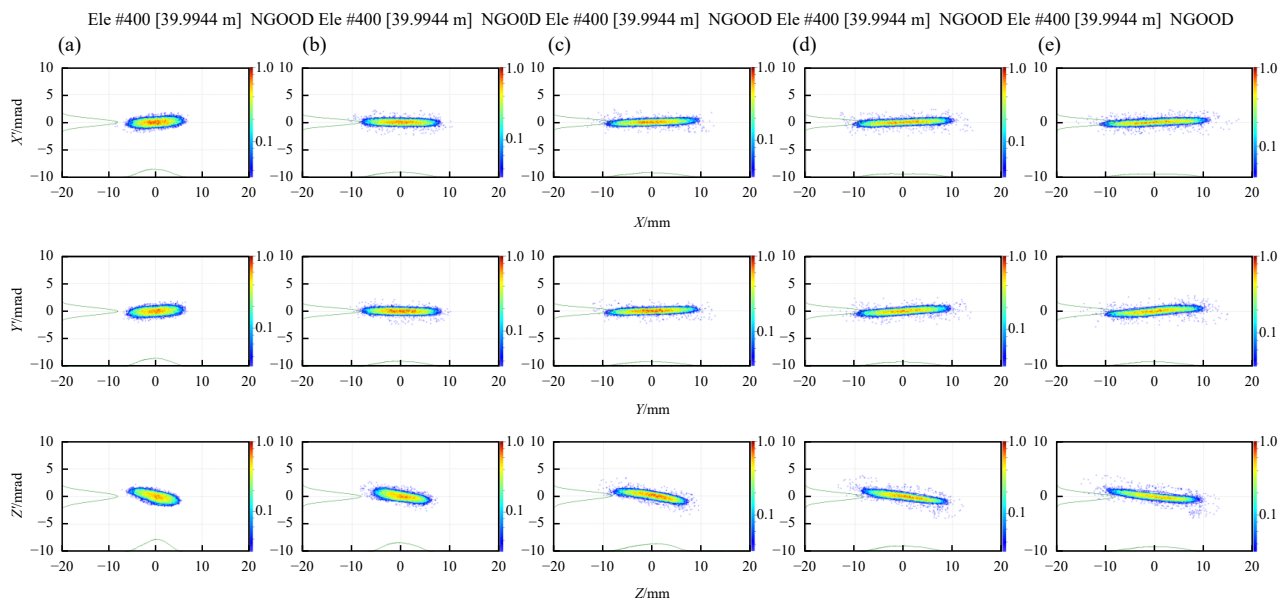


图 13 相空间随着流强变化的演化情况(在线彩图)

(a) 流强为 10 mA 的情况; (b) 流强为 20 mA 的情况; (c) 流强为 30 mA 的情况; (d) 流强为 40 mA 的情况; (e) 流强为 50 mA 的情况。

3 结论

本论文通过模拟仿真方法, 分析了强流加速器普遍遵循的周期相移小于 90 度设计原则的适用性。加速情况下不同周期相移方案对束流传输影响的动力学模拟结果表明, 加速引起的聚焦参数变化对强流直线加速器中空间电荷驱动的包络不稳定性具有一定的抑制作用, 加速梯度越大, 束流的周期相移变化速度越快, 越容易尽快穿越周期相移大于 90 度的工作点, 破坏引起包络共振的激发条件, 从而达到抑制包络不稳定性影响的目的。该研究结果对强流直线加速器的工程设计具有一定的指导意义。

致谢 作者在此特别感谢中国科学院近代物理研究所直线加速器中心总体室全体老师, 同事和同学提供的大力支持。同时, 这项工作得到了加速器驱动嬗变研究装置项目(2017-000052-75-01-000590)的支持和国家自然科学基金“基于 25 MeV CADS 强流超导质子直线加速器样机的束流物理研究”(11875197)的资助。

参考文献:

[1] HOFMANN I, LASLETT L J, SMITH L, et al. *Part Accel*, 1983,

13: 145.

- [2] STRUCKMEIER J, REISER M. *Part Accel*, 1984, 14: 227.
- [3] BIARROTTE J L. High Power CW Superconducting Linacs for EURISOL and XADS[C]//International Linear Accelerator Conference, August 16-20, 2004, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Lübeck, Germany, 275.
- [4] ESHRAQI M, DANARED H, MIYAMOTO R. Beam Dynamics of the Ess Superconducting LINAC[C]//52nd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, September 17-21, 2012, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 2012: 278.
- [5] GROENING L, BARTH W, BAYER W, et al. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 234801.
- [6] SACHERER F J. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1971, 18(3): 1101.
- [7] ROBERT D R. Los Alamos Report No. LA-UR-95-391. arXiv: acc-physics/9502001. doi:10.48550/arXiv.acc-physics/9502001.
- [8] THOMAS P W. *RF Linear Accelerators[M]*. 2nd ed. New York: WileyVCH, 2008: 175.
- [9] URIOT D, PICHOFF N. TraceWin CEA Saclay[EB/OL]. [2022-12-15]. <http://irfu.cea.fr/dacm/en/logiciels/>.
- [10] LI Chao, ZHAO Yaliang. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2014, 17: 124202.
- [11] JEON D, GROENING L, FRANCHETTI G. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2009, 12: 054204.

Envelope Instability Analysis of Superconducting Linear Accelerators

YI Man^{1,2}, LIU Shuhui^{1,†}, WANG Zhijun^{1,†}, CHU Yimeng^{1,2}, SUN Kunxiang^{1,2}, JIA Duanyang^{1,2}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Beam envelope instability driven by space charge is an important factor causing the beam loss of intense beam superconducting linear accelerator. Zero-current period phase advance less than 90 degrees is the design principle of strong current superconducting linear accelerator generally followed in the world, and this design principle is proposed without considering acceleration. In this paper, the periodic instability under the condition of acceleration effect is analyzed by dynamic simulation. The results show that reasonable choice of focus change rate and acceleration gradient can reduce the influence of envelope instability, so that the strict limit of physical design period phase advance of less than 90 degrees can be broken and the acceleration efficiency of the accelerator can be improved.

Key words: superconducting linear accelerator; high current; space charge; envelope instability

Received date: 13 Oct. 2022; **Revised date:** 10 Nov. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11875197)

† **Corresponding author:** LIU Shuhui, E-mail: liush@impcas.ac.cn; WANG Zhijun, E-mail: wangzj@impcas.ac.cn