

文章编号: 1007-4627(2019)01-0062-09

CiADS 超导直线加速器超导腔失效的分段补偿与冗余设计

贾永智^{1,2}, 何源^{1,†}, 王志军¹, 高鹏辉^{1,2}, 刘淑会^{1,2}, 姜培勇¹, 秦元帅^{1,2}, 黄贵荣¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 加速器驱动次临界装置(ADS)对加速器运行稳定性和失束指标提出了前所未有的要求。对于超导直线加速器的研究发现, 超导腔失效是失束的一个较大的来源, 故针对超导腔的失效情况, 本文提出分段补偿新方法, 以提高高功率超导直线加速器的运行稳定性。提出的分段补偿方法与已有的全局补偿和局部补偿的方法相比, 在保证加速器出口束流品质与无束损束流传输的同时, 分段补偿束流能量, 优化了参与能量补偿的超导腔数量, 降低超导腔的备份功率源需求。论文最后针对 CiADS 的超导直线加速器的物理设计, 做了分段补偿的多粒子模拟。结果表明, 采用了分段补偿方法实现超导腔失效补偿的前提下, 参与补偿过程中改变腔压的超导腔数量比例为 48%, 对功率源总的功率备份冗余需求小于 20%。

关键词: CiADS; 控制束流损失; 超导腔失效补偿; 分段补偿; 可用性; 低冗余需求

中图分类号: O572.21⁺1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.01.062

1 引言

中国加速器驱动嬗变研究装置(China Initiative Accelerator Driven System, 以下简称 CiADS)是国际上首个 ADS 高功率实验装置, 其包含超导质子直线加速器系统、重金属散裂靶系统和次临界反应堆系统三大关键系统^[1]。CiADS 超导直线加速器产生 500 MeV/5 mA/2.5 MW 的束流, 其布局如图 1 所示^[2-3]。质子束流电子回旋共振离子源(ECRIS)产生, 引出能量为 35 keV, 经过低能传输线(LEBT)^[4]注入到射频四极加速器(RFQ)完成横纵向束流的成形和预加速将能量加速

到 2.12 MeV, 进而通过中能传输线(MEBT)将束流匹配到超导加速段, 进入超导段后, 经过一系列的超导腔体将强流质子束流加速到 500 MeV。下一步, 束流经过高能传输线(HEBT)以及束流收集终端的调制匹配和均匀化入射到重金属散裂靶, 产生高通量中子, 进入反应堆^[5]。对应参数如表 1 所列。本文主要研究超导腔失效后的束流恢复补偿方法。

根据束流能量和超导腔体类型的不同, CiADS 超导加速器划分为超导 HWR010 段、HWR019 段、Spoke042 段、Ellip062 段以及 Ellip082 段^[6-9]。超导腔体参数及数量如表 2 所列。

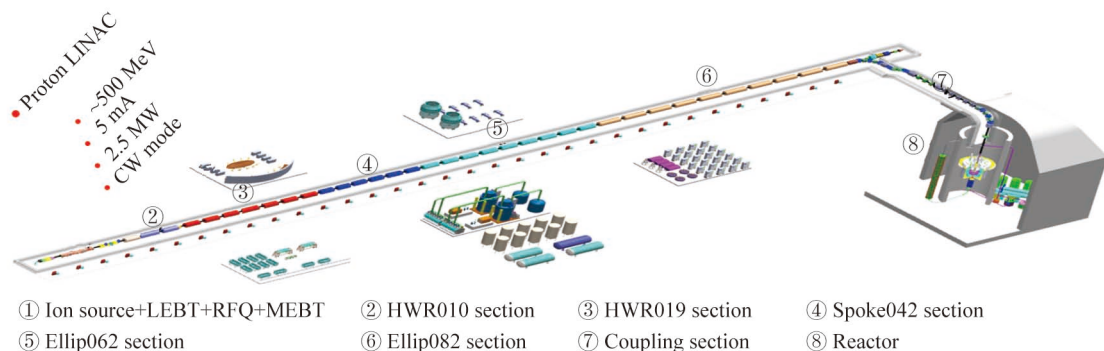


图 1 (在线彩图) CiADS 布局示意图

收稿日期: 2018-07-14; 修改日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Y636030GJ0)

作者简介: 贾永智(1991-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: jyz@impcas.ac.cn

† 通信作者: 何源, E-mail: hey@impcas.ac.cn.

表 1 CiADS 加速器总体参数

参数	值
加速离子	质子
能量	500 MeV
流强	5 mA
功率	2.5 MW
总长	367.52 m

表 2 CiADS 直线加速器各类超导腔一览表

腔型	频率 /MHz	腔体几何 β	能段 /MeV	腔体数/低温恒温器数
HWR010	162.5	0.10	2.1~8.0	14/2
HWR019	162.5	0.19	8.0~44	28/4
Spok042	325	0.42	44~180	54/9
Ellip062	650	0.62	180~375	44/11
Ellip082	650	0.82	375~500	15/3

2 研究现状

2.1 丢束要求(Beam trip)

在 CiADS 中, 加速器、散裂靶以及反应堆三大核

心系统间有着紧密的联系。当加速器出现故障触发机器保护系统切断束流时, 运行中的反应堆无法接收到持续且稳定的束流而感受到束流丢失, 此时会造成反应堆热应力过大以及堆疲劳等不希望出现的状况。为了避免由于丢束造成的反应堆的损坏, 加速器的高稳定性与高鲁棒性的运行对整个 CiADS 系统的安全与稳定至关重要。美国能源部在 ADS 白皮书对加速器的丢失束流次数和失束时间提出了严格的要求^[10], 而 CiADS 系统由于颗粒流靶的特性, 对此提出适合本系统的要求, 如表 3、表 4 所列。

表 3 CiADS 加速器系统的丢束次数与时长要求

丢束时间	丢束次数
($t < 10$ s)	无要求
($10 \text{ s} < t < 5 \text{ min}$)	$< 2500/\text{a}$
($t > 5 \text{ min}$)	$< 300/\text{a}$
可用性	$> 80\%$

表 4 美国能源部 ADS 加速器系统不同发展阶段的丢束次数与时长要求

阶段	束流功率 /MW	束流能量 /GeV	束流时间结构	丢束次数 ($t < 1$ s)	丢束次数 ($1 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$)	丢束次数 ($10 \text{ s} < t < 5 \text{ min}$)	丢束次数 ($t > 5 \text{ min}$)	可用性 /%
嬗变示范	1~2	0.5~3	CW/Pulsed	N/A	$< 2500/\text{a}$	$< 2500/\text{a}$	$< 50/\text{a}$	> 50
工业级嬗变	10~75	1~2	CW	$< 25000/\text{a}$	$< 2500/\text{a}$	$< 2500/\text{a}$	$< 50/\text{a}$	> 70
工业级储能发电	10~75	1~2	CW	$< 25000/\text{a}$	$< 2500/\text{a}$	$< 2500/\text{a}$	$< 50/\text{a}$	> 80
工业级非储能发电	10~75	1~2	CW	$< 25000/\text{a}$	$< 2500/\text{a}$	$< 250/\text{a}$	$< 3/\text{a}$	> 85

2.2 全局补偿与局部补偿

目前国内及国际上常见的补偿方式分为局部补偿和全局补偿两种方式。

2.2.1 全局补偿

全局补偿方法是当加速器某处高频腔失效后, 利用失效腔体下游处的全部加速元件和横纵向聚焦元件进行补偿, 使得最终出口处的束流品质和能量相比较于加速器正常运行时的值尽可能保持一致。美国散裂中子源(SNS)在运行的加速器上做了全局补偿的实验, 如图 2 所示。针对超导腔失效, 全局补偿目前需要分钟量级的停束时间^[11-13]。全局补偿的优势在于参与补偿的元件数量多, 故此对每个元件所需要做出的调整较小, 所需功率余量较小。其劣势也是由于参与补偿的元件数

目众多, 导致计算难度大, 耗时长并容易出现误差的累计效应。由于其补偿的复杂性, 难以对原件提出一个合适的冗余标准。

2.2.2 局部补偿

局部补偿方法是当加速器某个高频腔失效后, 只利用失效腔体附近有限的几个元件进行补偿, 影响范围较小, 如图 3 所示。通常情况下, 选择邻近的 4 个高频腔(前 2 个与后 2 个高频腔)和邻近的磁铁进行补偿, 在所选择补偿元件的下游某处选择一个合理的补偿监测点, 在该点对束流进行检测, 以使得束流在补偿监测点的束流参数与正常运行时的值基本保持一致。X-ADS 与 C-ADS 做过相关的研究^[14-15]。局部补偿相比于全局补偿, 其优势在参与补偿的元件数量较少, 计算相对简单, 耗时短, 停束的时间短。局部补偿的劣势亦在于参与局部补偿的超导腔只有邻近的 4 个超导腔, 这必然导致邻近的腔体必须有极高的冗余才能完成补偿, 目前提出邻近的腔体要求 E_{peak} 的冗余为 30%, 此时功率的冗余为 69%, 极大地提高了工程造价。此外在能量较低时, 考虑到纵向相移和低能段加速效率的制约, 局部补偿方法无法达到理想效果。

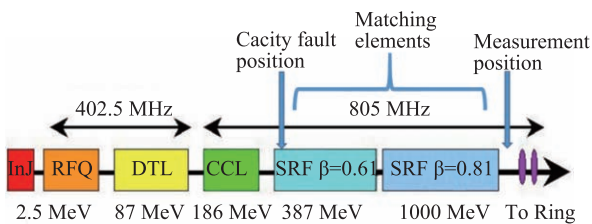


图 2 (在线彩图) 全局补偿示意图

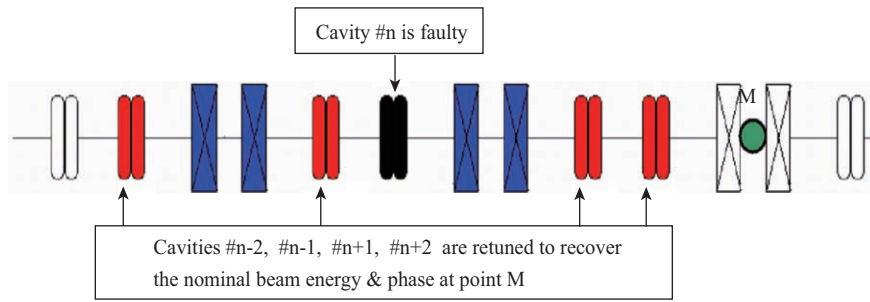


图 3 (在线彩图)局部补偿示意图

3 分段补偿

在前人研究的基础上，结合 CiADS 的需求，根据超导直线加速器分段的内禀特点，提出了分段式补偿的方法。由于加速器自身的特点，后端超导腔的加速能力更强，如图 4 所示，所以使用高能段的腔体进行能量补偿更具经济性，但是考虑到能量接收度与各段超导腔的加速效率，进入各段不同腔型超导腔的能量存在一个阈值，该阈值即为分段补偿的物理标准。分段补偿要求在失效处附近对束流进行重新匹配，而能量的补偿与全局补偿相同，使用后端全部超导腔补偿能量。在各段末端设置束诊元件，要求各段出口能量补偿超过阈值要求，并且保证束流品质，此时各段独立，匹配后元件参数计算由整个加速器变为各段独立，如图 5 所示。分段补偿

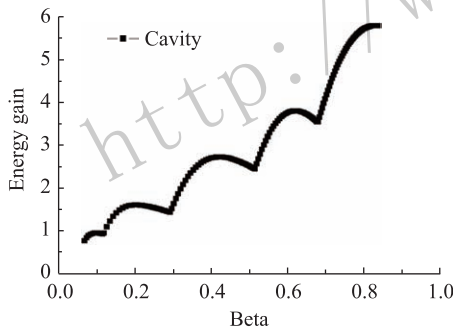


图 4 超导腔单腔增能

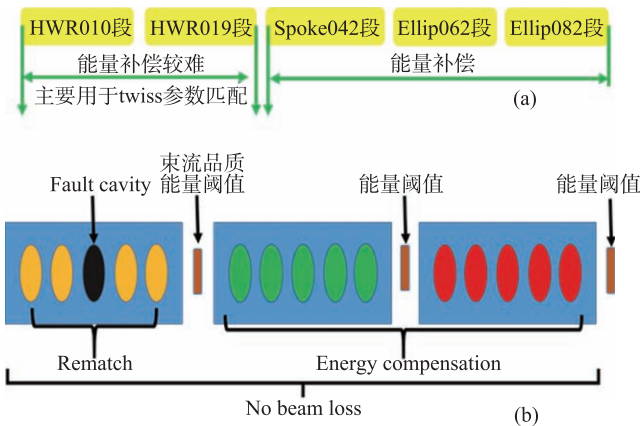


图 5 (在线彩图)分段补偿说明

(a) CiADS 各段超导腔失效补偿主要作用; (b) 分段补偿示意图。

方法保证加速器出口束流能量稳定，以满足靶、堆要求，并且保证束流品质，传播过程中控制束损。该方法充分结合了局部补偿和全局补偿的优点，具有快速补偿的可行性和低冗余需求的特性。

3.1 能量阈值的确定

超导加速器的不同类型超导腔的加速效率对于 β 值十分敏感，通过超导腔的粒子所具有的能量应保证在合适的范围以内。

设长度为 L 的高频腔，腔内 z 方向场分布为 $E_z(s)$ ， s 为位置参数，带电量为 q 的粒子经过腔获得的能量增益为

$$\Delta W = \left[q \int_{S_0}^{S_0+L} |E_z(s)| \cdot ds \right] T \cos \phi_s, \quad (1)$$

其中渡越时间因子

$$T = \frac{\int_{S_0}^{S_0+L} q E_z(s) \cos[\phi(s) - \phi_s] \cdot ds}{\int_{S_0}^{S_0+L} q |E_z(s)| \cdot ds}, \quad (2)$$

同步相位

$$\phi_s = \arctan \left[\frac{\int_{S_0}^{S_0+L} q E_z(s) \sin[\phi(s)] \cdot ds}{\int_{S_0}^{S_0+L} q E_z(s) \cos[\phi(s)] \cdot ds} \right]. \quad (3)$$

由以上公式可知，渡越时间因子 T 是超导腔加速效率的表征量，如图 6 所示。CiADS 要求超导腔必须要保证在渡越时间因子 T 值最大值 (即 $\beta \approx \beta_g$) 附近运行，才

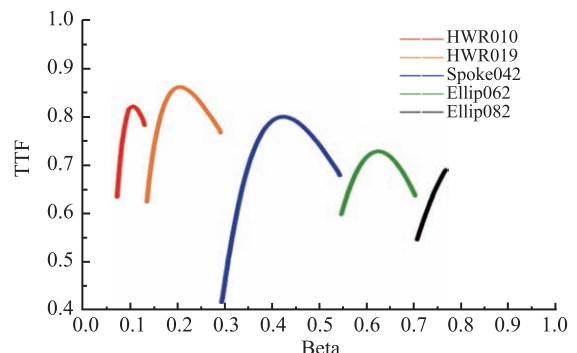


图 6 (在线彩图)各类型超导对应渡越时间因子曲线

能保证加速效率。各段出口能量对后端超导腔的加速效率有一定影响,如图7所示,当出口能量与下一段超导腔的 β_g 不匹配时,对应的渡越时间因子较小,后端超导腔加速能力下降明显,故此意味着粒子进入超导腔时必须保证能量超过一个阈值,此阈值满足后端各段加速器仍具有较高的加速效率。通过图7可以看出各段出口能量对后端超导腔加速能力的影

响,起始HWR010段与结尾Ellip082段有其特殊性,由于RFQ出口能量恒定,因此HWR010段的入口能量恒为2.1 MeV。而Ellip062段出口能量对应 β 为0.7,进入Ellip082是TTF曲线上升部分,入口处TTF取值较低,因此Ellip062段出口对Ellip082段出口影响明显。通过曲线一阶导数变化率 $<5\%$ 作为阈值,各段阈值能量的要求如下表5所列。

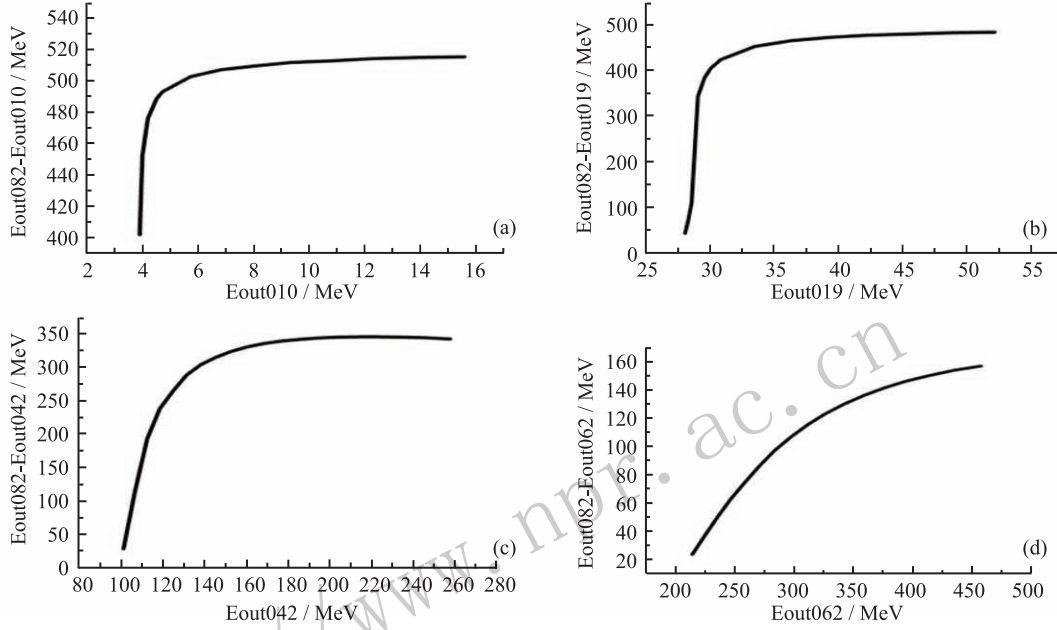


图7 各段出口能量对后端加速能力影响

(a) HWR010段出口能量对后端加速能力影响; (b) HWR019段出口能量对后端加速能力影响; (c) Spoke042段出口能量对后端加速能力影响; (d) Ellip062段出口能量对后端加速能力影响。

表5 考虑能量补偿时各段的能量阈值

Type	正常状态出口能量/MeV	出口能量阈值/MeV
HWR010	7.87	5.73
HWR019	42	33.4
SPOKE 042	177	168.2
ELLIP062	375	362
ELLIP082	517	517

3.2 失效重新匹配

当发生超导腔失效的情况下,周期聚焦结构被破坏,会造成束流不匹配导致束流损失的产生,需要在超导腔失效的位置附近重新进行束流匹配,以避免束流损失的发生。束流匹配进一步提出更严格的阈值。

根据相运动二阶方程:

$$\phi'' + k_{l0}^2 \cdot \left[(\phi - \phi_s) - \frac{(\phi - \phi_s)^2}{2 \tan(-\phi_s)} \right] = 0, \quad (4)$$

其中

$$k_{l0}^2 = \frac{2\pi q E_0 T \sin(-\phi_s)}{m c^2 \beta^3 \gamma^3 \lambda}. \quad (5)$$

这里: E_0 为电场幅值; m 为粒子质量; c 为光速; $\beta = v/c$ 为粒子速度与光速的比值; γ 为相对论因子; λ 为波长。

在平滑近似下,设单位周期相移为 σ_{l0} :

$$k_{l0} = \frac{\sigma_{l0}}{l_{rf}}, \quad (6)$$

l_{rf} 为周期长度。

k_{l0}^2 是加速器纵向聚焦能力的表征量,保证束流品质需要保证补偿后保证周期相移变化 5° 以内。

定义失配因子 $M^{[16]}$:

$$M = \sqrt{1 + \frac{\Delta + \sqrt{\Delta(\Delta + 4)}}{2}} - 1, \quad (7)$$

$$\Delta = (\Delta\alpha)^2 - \Delta\beta_{twiss}\Delta\gamma, \quad (8)$$

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_m, \quad \Delta\beta_{twiss} = \beta_{twiss} - \beta_{twiss,m},$$

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma_m. \quad (9)$$

$\alpha, \beta_{\text{twiss}}, \gamma$ 为束流的 Twiss 参数, 下角标 m 代表完全匹配的束流状态。

发射度增长可表示为

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\text{rms,mis}}}{\varepsilon_{\text{rms,m}}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_{\text{twiss,m}}}{\beta_{\text{twiss}}} + \frac{\beta_{\text{twiss}}}{\beta_{\text{twiss,m}}} + \frac{\beta_{\text{twiss,m}}}{\beta_{\text{twiss}}} \left(\alpha - \frac{\beta_{\text{twiss}}}{\beta_{\text{twiss,m}}} \alpha_m \right)^2 \right], \quad (10)$$

其中 $\varepsilon_{\text{rms,mis}}$ 为失配时的 rms 发射度; $\varepsilon_{\text{rms,m}}$ 为匹配时的 rms 发射度。

$$\eta = \frac{\varepsilon_{\text{mis}}}{\varepsilon_m} = \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} = \frac{\Delta + \sqrt{\Delta^2 - 4}}{2} = (1 + M)^2, \quad (11)$$

其中: ε_{mis} 为失配时的发射度; ε_m 为匹配时的发射度。

为了保证束流品质, 限制条件为 99% 发射度增长 < 10%。

将作为变量的 β, ϕ_s, E_z 以及作为限制条件的周期相移变化 5° 以内和 99% 发射度增长 < 10% 一起写入 python 优化程序, 此时可以进一步求出更严格的阈值。逻辑如图 8 所示。

据此, 可以求得, 考虑重新匹配后束流品质时的新阈值, 如表 6 所列。

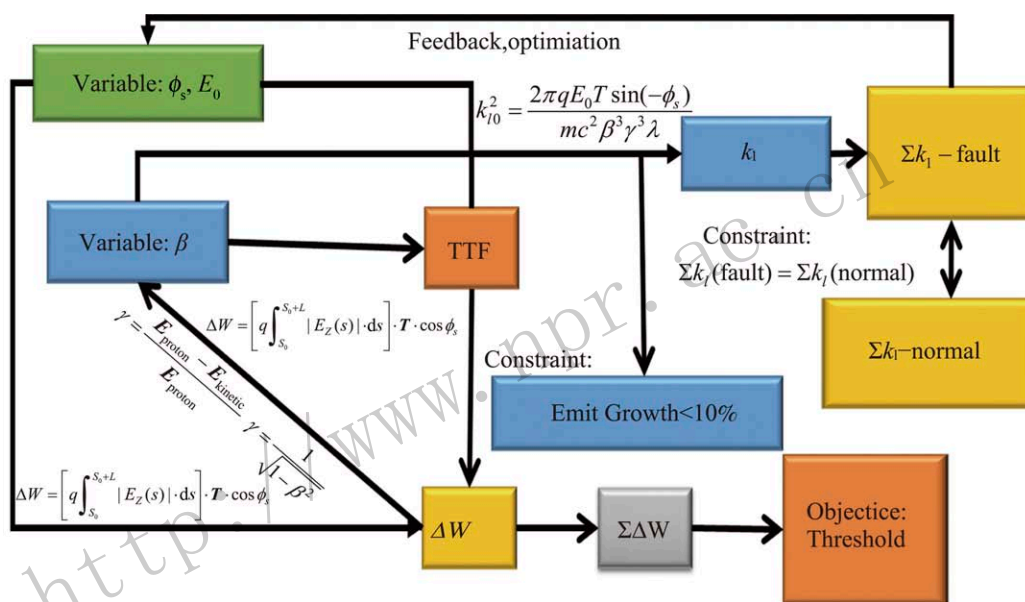


图 8 (在线彩图) python 程序算法图

表 6 考虑束流品质时各段的能量阈值

Type	正常状态出口能量/MeV	只考虑能量补偿时出口能量阈值/MeV	考虑束流品质时出口能量阈值/MeV
HWR010	7.87	5.73	6.83
HWR019	42	33.4	39.1
SPOKE 042	177	168.2	171
ELLIP062	375	362	362
ELLIP082	517	517	517

3.3 冗余要求

功率源系统造价在整个射频加速器造价中占比重最大, 在实现补偿的基础上, 应使得功率源备份冗余最小。对于分段补偿, 功率源备份冗余

$$R_{\text{power}} = \frac{P_{\text{redundancy}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\sum_n P_n \cdot (r_n^2 + 2r_n)}{P_{\text{total}}} = 20\% . \quad (12)$$

其中: $P_{\text{redundancy}}$ 为功率源所需冗余功率; P_{total}

为正常运行时功率源总功率; r_n 为各段超导腔的腔压冗余; P_n 为各段超导腔的总功率; n 取值为 1, 2, 3, 4 和 5 分别对应 HWR010, HWR019, SPOKE042, ELLIP062 和 ELLIP082 共五种腔型, 以 R_{power} 最小为优化目标, 对 r_n 的取值进行优化得到取值如表 7 所列。

此时, 所需的总功率源备份冗余为 20%, 相对于局部补偿提出的 69% 的功率冗余, 更具有经济性与工程可实现性。

表 7 CiADS 腔压及功率源冗余需求

Type	每个功率源功率/kW	功率源数量	总功率/kW	腔压冗余需求/%	功率源备份冗余需求/%
HWR010	10	14	140	20	44
HWR019	20	28	560	15	33.25
SPOKE 042	20	54	1080	10.7	22.55
ELLIP062	40	44	1760	6	12.36
ELLIP082	50	15	750	10	21

4 多粒子模拟验证

4.1 超导腔失效影响

在 CiADS 系统运行过程中, 超导腔的失效会对束流失配产生严重影响。鉴于粒子通过各段第一个超导腔时具有的能量相对最低, 对应渡越时间因子的值最小, 对后端束流的影响最大, 论文模拟假设加速器超导段中各腔型第一个超导腔失效。在未采取任何补偿措施时, 如图 9 所示的束流情况, 在失效腔体处, 束流无法正常获得能量, 使得束流的失去同步性, 在后续腔体传输中获得的能量与设计值进一步出现差距, 发生严重束流失

配。图中还包括束流传输过程中损失信息, 相比较于正常运行时, 腔体失效后, 束流损失严重, 其中 HWR010 段第一个腔体失效, 在 HWR010 段束损为 11672 W; HWR019 段第一个腔体失效, 在 HWR019 段束损为 40075 W; Spoke042 段第一个腔体失效, 在 Spoke042 段, Ellip062 段和 Ellip082 段共损失 415877 W; Ellip062 段第一个腔体失效, 在 Spoke042 段, Ellip062 段和 Ellip082 段共损失 304871 W; Ellip082 段第一个腔体失效不存在束损, 但能量失配。高功率束流不可控的损失在超导加速器内, 会导致加速器无法工作, 不及时切束甚至会击穿腔壁。

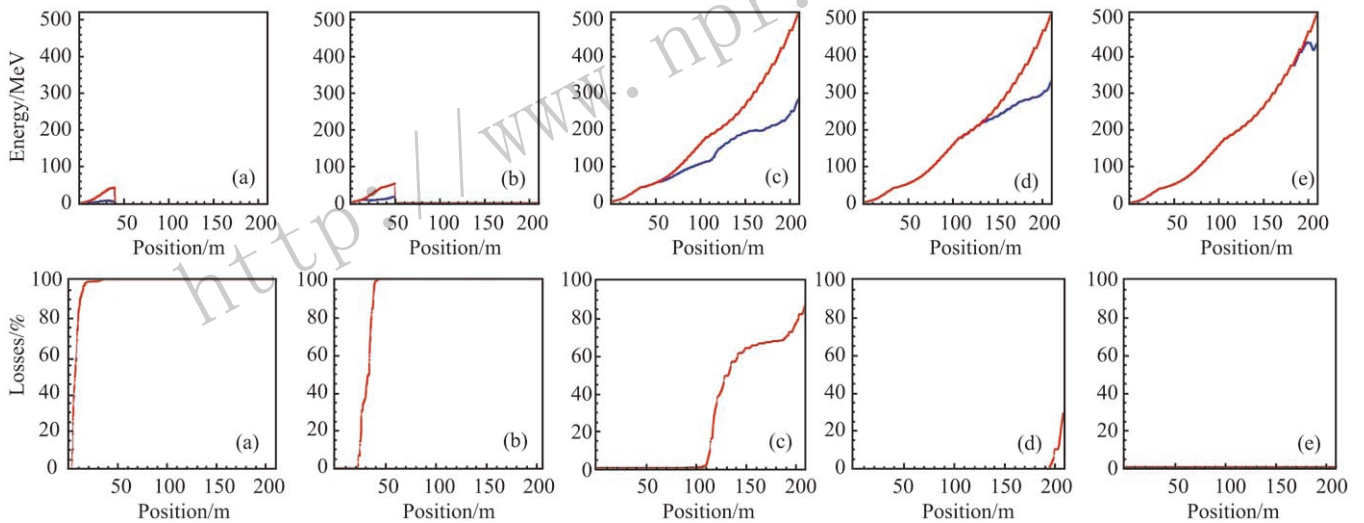


图 9 (在线彩图) CiADS 各段第一个超导腔失效对束流能量的影响及束流在传输过程中的损失情况
(a) HWR010 段; (b) HWR019 段; (c) Spoke042 段; (d) Ellip062 段; (e) Ellip082 段。

4.2 超导腔失效补偿

通过失效模拟可以发现, 超导腔失效位置的能量越低, 对束流的影响越大。考虑到低能段重新匹配难度大且低能段超导腔加速效率较低, 所以考虑分段补偿的方式, 重新保证束流品质的情况下, 将能量补偿到阈值即可, 其余能量由后端高能段超导腔补偿。通过 Tracewin 软件中的多粒子模拟进一步验证得到结果能否在加速器实现。在 4.1 节中给出了加速器 5 种腔型入口处第一个腔失效的情况。对各个情况进行了补偿模拟。图 10

为 CiADS 超导段各段补偿后的束流能量情况, 目标是束流传输过程中束损为零, 超导段出口能量与腔体失效前变化不超过 0.5%。通过分段补偿方法对超导腔失效情况进行重新匹配与分段补偿能量, 保证补偿后加速器超导段出口处能量稳定, 并实现了束流在传输过程中无束流损失。如图 11 所示, 99% 发射度最大增长 4.8%, 99.9% 发射度最大增长 18.4%, 99.99% 发射度最大增长 12.4%, 在可控范围。以匹配难度最大的 HWR010 段超导腔失效的情况为例, 束流纵向的密度分布如图 12 所示, 补偿后束流传输过程稳定。补偿

涉及到 5 种腔型共 155 个超导腔，参与补偿并改变超导腔腔压的腔体数目占总数的 48%，在表 8 中给出了每段设计时腔压的冗余，参与补偿过程中改变腔压的超导腔

数量以及各段补偿时，每段超导腔使用冗余的最大值。由表可知，补偿时各段需要的冗余小于设计冗余需求，补偿可以实现。

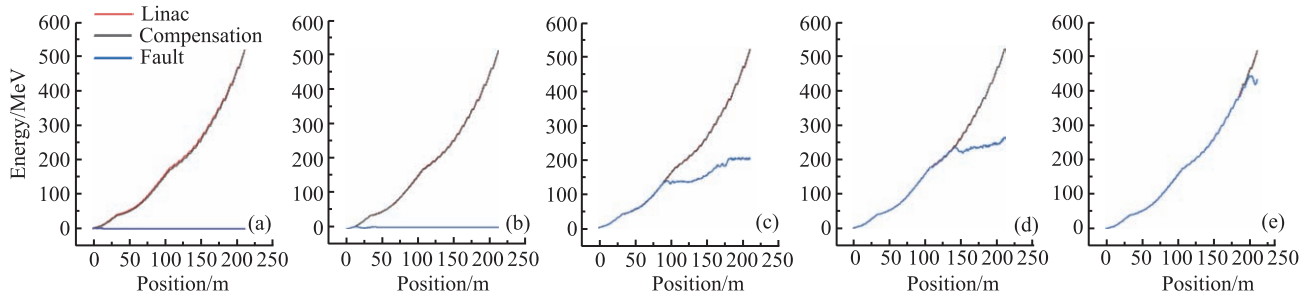


图 10 (在线彩图) CiADS 超导腔失效与补偿后能量图

(a) HWR010 段补偿前后能量; (b) HWR019 段补偿前后能量; (c) Spoke042 段补偿前后能量; (d) Ellip062 段补偿前后能量; (e) Ellip082 段补偿前后能量。

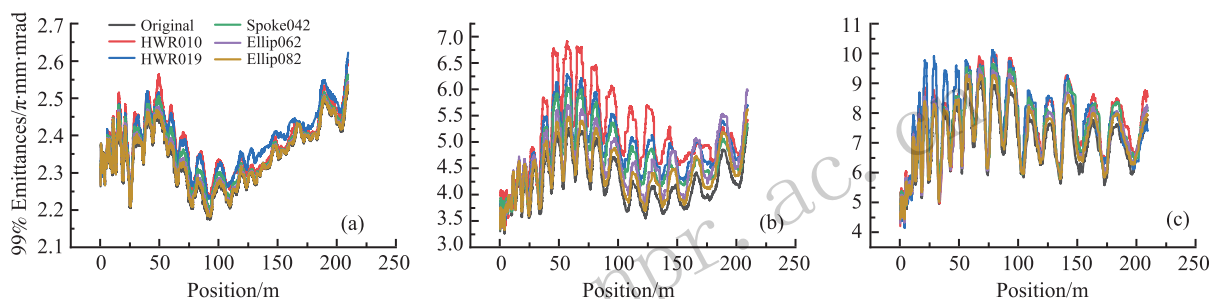


图 11 (在线彩图) CiADS 超导段各段补偿后发射度的变化情况

(a) CiADS 加速器 99% 发射度; (b) CiADS 加速器 99.9% 发射度; (c) CiADS 加速器 99.99% 发射度。

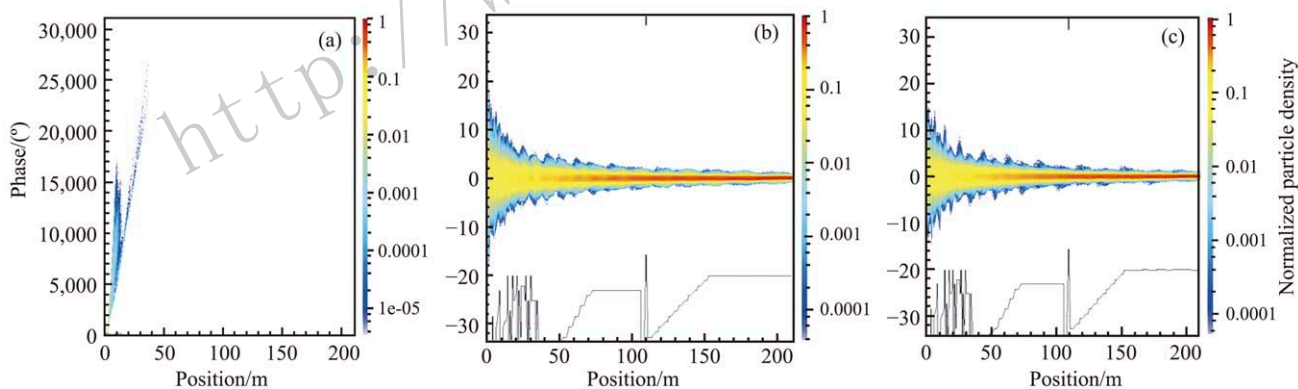


图 12 (在线彩图) HWR010 段超导腔失效补偿的纵向密度分布图
(a) 超导腔失效未补偿情况; (b) 超导腔失效补偿后情况; (c) 正常运行时情况。

表 8 腔压冗余需求与补偿时各段使用的最大腔压冗余

Type	腔体总数	各段最大腔压冗余需求/%	改变腔压的腔体数/%	补偿 HWR010 时各段最大冗余/%	补偿 HWR019 时各段最大冗余/%	补偿 Spoke042 时各段最大冗余/%	补偿 Ellip062 时各段最大冗余/%	补偿 Ellip082 时各段最大冗余/%
HWR 010	14	20	6	20	0	0	0	0
HWR 019	28	15	13	7	15	0	0	0
SPOKE 042	54	10.7	17	5	5	10.1	0	0
ELLIP 062	44	6	23	1	3	4	6	0
ELLIP 082	15	10	15	0	0	2	3	10

5 结论与展望

本文提出了 ADS 超导直线加速器超导腔失效情况下分段补偿的新方法。依据 CiADS 的物理设计, 本文通过数学计算与程序编写得到了加速器超导腔各段分段的能量阈值, 根据分段补偿的方法, 对 CiADS 直线加速器提出了冗余要求。论文通过多粒子模拟, 验证了分段补偿方法对 CiADS 超导直线加速器发生的单个超导腔失效情况的重新匹配和能量补偿可行性, 补偿结果满足加速器超导段出口能量稳定, 传输过程无束损的要求。对总功率源备份冗余 < 20%, 极大的降低了造价, 提高了工程可实现性。论文暂时只考虑了失效前后的情况, 加速器低电平系统在失效时存在一段响应过程, 在今后的研究中会对加速器运行时失效的瞬态情况进行考虑, 进一步验证在线补偿的可行性。并计划在真实加速器上进行实验验证。

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室全体老师, 同事和同学提供的大力支持。

参考文献:

- [1] IMPCAS. China Initiative Accelerator Driven System (CiADS) of the National Major Science and Technology Infrastructure Approved[EB/OL]. [2016-01-15]. http://www.impcas.ac.cn/xwzx/snxw/201601/t20160115_4518642.html.
- [2] XU Hushan, HE Yuan, PAN Weimin, *et al.* Design Report of China Initiative Accelerator Driven System[R]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. (in Chinese) (徐珊珊, 何源, 潘卫民, 等. 加速器驱动嬗变研究装置可行性研究报告[R]. 北京: 中国科学院, 2017.)
- [3] WANG ZHIJUN, HE YUAN, LIU YONG, *et al.* *Chinese Physics C*.
- [4] HUANG Tao, WU Qi, YANG Yao, *et al.* *Nucl Phys Rev*, **2018**, **35**: 040. (in Chinese) (黄韬, 武启, 杨尧, 等. *原子核物理评论*, **2018**, **35**: 040.)
- [5] ZHAN Wenlong, XU Hushan. *Bull Chin Acad Sci*, 2012, **3**: 375. (in Chinese) (詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊, 2012, **3**: 375.)
- [6] YANG Yuzhang, HE Yuan, ZHANG Shenghu, *et al.* *Nucl Phys Rev*, **2014**, **31**: 037. (in Chinese) (杨玉章, 何源, 张生虎, 等. *原子核物理评论*, **2014**, **31**: 037.)
- [7] CHANG Wei. Research on Low Beta Superconducting Cavity Testing[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese) (常玮. 低beta超导腔体的测试研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2014.)
- [8] LI Wei, WANG Zhijun, HE Yuan, *et al.* *Nucl Phys Rev*, **2014**, **31**: 482. (in Chinese) (李伟, 王志军, 何源, 等. *原子核物理评论*, **2014**, **31**: 482.)
- [9] WEN Liangjian. Study of Medium Beta High-Current Superconducting Accelerating Cavities for ADS[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese) (温良剑. ADS中Beta强流超导加速腔物理研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2016.)
- [10] ABDERRAHIM HAIT, GALAMBOS J, GOHAR Y, *et al.* Accelerator and Target Technology for Accelerator Driven Transmutation and Energy Production[R]. America: United States Department of Energy, 2010.
- [11] BIARROTTE JEAN-LUC, URIOT DIDIER. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, **2008**, **11**: 072803.
- [12] BIARROTTE J L, NOVATI M, PEIRINI P, *et al.* Beam Dynamics Studies for the Fault Tolerance Assessment of the PDS-XADS linac[R]. Proceeding of EPAC2004, 2004: 1282.
- [13] Spallation Neutron Source Accumulator Ring and Transport: Design Manual[R]. SNS, USA, 2003.
- [14] SUN Biao. Compensation-rematch for Major Element Failure of the C-ADS Linac[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese) (孙彪. C-ADS加速器关键元件失效补偿及匹配研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2015.)
- [15] SUN Biao, TANG Jingyu, YAN Fang, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, **2015**, **2**: 51.
- [16] URIOT D. TraceWin Documentation, CEA/SACLAY-DSM/Irfu/SACM, 2014.

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

JIA Yongzhi^{1,2}, HE Yuan^{1,†}, WANG Zhijun¹, GAO Penghui^{1,2}, LIU Shuhui¹, JIANG Peiyong¹,
QIN Yuanshuai^{1,2}, HUANG Guirong¹

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The accelerator driven subcritical system (ADS) has put forward unprecedented demands on the stability and beam trip of the accelerator operation. Depending on analysis, failure of the superconducting cavities is a major cause for beam trip of the superconducting cavity. Therefore, a new method of piecewise compensation is proposed to improve the stability of high power superconductivity linac. The piecewise compensation scheme proposed in this paper is compared with the existing global compensation and local compensation technology. While guaranteeing the beam quality of the accelerator and without beam loss transmission, the piecewise compensation method can optimize the number of superconducting cavities involved in energy compensation and reduce the demand for the backup redundancy of power sources of the superconducting cavities. At the end of the paper, the multi-particle simulation of piecewise compensation aims at the physical design of CiADS superconducting linac. The result shows that 48% of superconducting cavities modify the cavity's E_{peak} during the compensation process and the demanded redundancy of total power sources is less than 20% under the premise of successful compensation for the failure of superconducting cavities through the piecewise compensation method.

Key words: CiADS; beam loss controlling; SC cavity failures compensation; piecewise compensation; reliability; low redundancy

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 14 Jul. 2018; Revised date: 9 Dec. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Y636030GJ0)

† Corresponding author: HE Yuan, E-mail: hey@impcas.ac.cn.