



·粒子束及加速器技术·

HLS-II 直线加速器能量调节及应用*

倪汪彪, 于永波, 宣科, 徐卫, 李川, 刘功发

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘要: 为了高效地对直线加速器输出束流能量进行调节, 设计了合肥光源 (HLS-II) 直线加速器束流能量调节方案。该方案在调试阶段通过能谱分析系统观察束团状态并测量束流能量, 储存环注入阶段使用 3 个束流位置探测器 (BPM) 对束流能量进行在线测量; 使用自动相位扫描程序对速调管输出相位进行扫描, 获得各加速段的能量增益公式; 定量调节速调管的输出相位和高压, 实现直线加速器输出束流能量的快速调节。在线应用结果表明, 该方案能快速实现束流能量调节, 调节后的束流具有良好品质, 束流横向能散小于 0.22%, 注入速率明显改善。

关键词: 直线加速器; 能谱分析系统; 束流位置探测器; 自动相位扫描; 能量调节

中图分类号: TL503.6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230144

Energy adjustment and application of the HLS-II linac

Ni Wangbiao, Yu Yongbo, Xuan Ke, Xu Wei, Li Chuan, Liu Gongfa

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To efficiently adjust the output beam energy of the Hefei Light Source II (HLS-II) linac, this study presents a beam energy adjustment scheme. During the debugging stage, the beam bunch state is observed, and the beam energy is measured using an energy spectrum analysis system. In the storage ring injection stage, three Beam Position Monitors (BPMs) are employed for online beam energy measurement. An automatic phase scanning program is utilized to scan the output phase of the klystrons, deriving the energy gain formula for each acceleration section. By quantitatively adjusting the output phase and high voltage of the klystrons, rapid adjustment of the output beam energy of the linac is achieved. The online application results demonstrate that the proposed scheme can swiftly adjust the beam energy, with the adjusted beam exhibiting excellent quality and a transverse energy spread of less than 0.22%. Furthermore, the implementation of this scheme significantly improves the injection rate.

Key words: linac, energy spectrum analysis system, beam position monitor, automatic phase scanning, energy adjustment

合肥光源 (HLS-II) 是我国第一台以真空紫外和软 X 射线为主的专用同步辐射光源^[1-3]。作为 HLS-II 储存环的注入器, 直线加速器需要提供束流品质良好且稳定的束流。然而, 在直线加速器的长期运行中, 束流中心能量的漂移是不可避免的^[4]。凭借运行人员的经验来调节束流能量不仅效率低, 而且效果难以保证。因此, 设计一种高效的束流能量调节方案至关重要。目前, 国内外已有一些束流能量调节方案正在运行。有些方案仅调节一个速调管的输出相位, 但这会以增加束流能散为代价^[5-7]; 有些方案调节两个速调管的输出相位^[8-9], 这可以抑制束流能散的增加, 但是可调节的束流能量范围有限。这些方案都无法完全适用 HLS-II 直线加速器的运行现状。为了能够在调试阶段和储存环注入阶段快速有效地对束流能量进行调节, 本文设计了 HLS-II 直线加速器束流能量调节方案, 依据能量增益公式定量调节速调管的输出相位和高压, 使束流局部能量增益发生改变, 从而实现调试阶段的束流能量快速调节以及储存环注入阶段的束流能量稳定。

* 收稿日期: 2023-05-24; 修订日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11975227) 中国科学院合肥大科学中心项目 (2019HSC-KPRD003)

联系方式: 倪汪彪, niwangb@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 宣科, xuanke@ustc.edu.cn。

1 束流能量测量

HLS-II 直线加速器是一台常规的行波直线加速器, 主要用作 800 MeV 电子储存环的注入器。图 1 为 HLS-II 直线加速器及开关磁铁(SM)后部分元件布局图, 直线加速段由电子枪、预聚束器、聚束器和 9 个 6 m 加速段及相关系统组成^[10]。6 台 50 MW 和 3 台 80 MW 的速调管提供微波功率(第 3 台 80 MW 速调管为热备份), 建立束流加速所需的电场, 将束流加速到所需能量。调节速调管输出相位和高压可以改变束流获得的局部能量增益, 从而改变最终束流能量。直线加速器末端的开关磁铁可以将束流偏转到不同方向用作不同用途。调试阶段, 将束流偏转到束流能谱分析系统观察光斑状态, 并能测量束流能量; 储存环注入阶段, 将束流偏转到输运线为储存环供束。

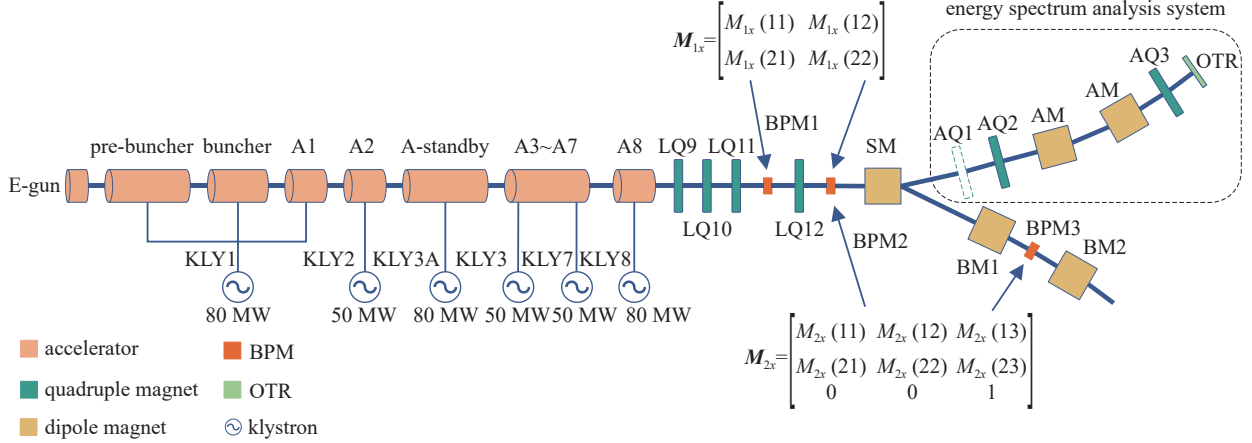


Fig. 1 Layout of the HLS-II linac and some components behind the switch magnet

图 1 HLS-II 直线加速器及开关磁铁后部分元件布局图

1.1 能谱分析系统测量

调试阶段的束流能量通过直线加速器末端的能谱分析系统测量。如图 1 所示, 能谱分析系统由分析磁铁 (AM)、光学渡越辐射靶 (OTR 靶)^[11]、聚焦磁铁 (AQ1、AQ2、AQ3, AQ1 位置目前暂没有安装磁铁) 等组成。不同能量的束流在 OTR 靶上成像的位置不同, 在束流能量和成像位置进行了标定之后, 观察 OTR 靶上光斑位置就可以确定直线加速器的输出能量。

1.2 BPM 法测量

储存环注入阶段的束流能量使用 3 个 BPM 进行测量^[12]。如图 1 所示, LQ9、LQ10、LQ11、LQ12 是直线加速器末端的聚焦磁铁, BM1、BM2 为弯转磁铁, BPM1 和 BPM2 位于直线加速器末端, BPM3 位于 BM1 后的大色散处。BPM1 和 BPM2 之间的色散函数值为零, 它们之间各种元件的水平相空间作用矩阵可以化简为一个二阶方阵, 用 M_{1x} 表示。BPM2 到 BPM3 之间的色散函数值不全为零, 它们之间各种元件的水平相空间作用矩阵可以化简为一个三阶方阵, 用 M_{2x} 表示。

根据带电束流传输理论, 利用传输矩阵建立方程并求解出相对能量偏差为

$$\begin{cases} \frac{\Delta E}{E_0} = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \\ k_1 = \frac{M_{2x}(12)M_{1x}(11)M_{1x}(22)}{M_{2x}(13)M_{1x}(12)} - \frac{M_{2x}(12)M_{1x}(21)}{M_{2x}(13)} \\ k_2 = -\frac{M_{2x}(12)M_{1x}(22)}{M_{2x}(13)M_{1x}(12)} - \frac{M_{2x}(11)}{M_{2x}(13)} \\ k_3 = \frac{1}{M_{2x}(13)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 分别为相应 BPM 的测量值, ΔE 为相对能量偏差, E_0 为目标能量。

根据式(1)计算束流中心能量偏差 $\Delta E/E_0$, 从而可以求得束流中心能量 $E = E_0 + \Delta E$ 。该方法有利于提高能量测量的准确性, 避免直线加速器末端束流轨道波动对束流能量测量的影响。

2 相位扫描

在加速段中, 当束流到达某一位置时, 其从电场获得的能量增益

$$dE = U_{\max} \cos \varphi_0 dl \quad (2)$$

式中: U_{\max} 表示电场的幅度, φ_0 表示电子束流在电场中所处的加速相位, dl 表示束流经过的距离微元。对式(2)进行积分, 可以得到每个加速段对束流的能量增益计算公式如下

$$E_i = A_i \cos \varphi_{i0} = A_i \cos(\varphi_i - \varphi_{i\max}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: E_i 表示束流通过第 i 加速段获得的能量增益, A_i 表示第 i 加速段能提供的最大能量增益, $\varphi_{i0} = \varphi_i - \varphi_{i\max}$ 表示电子束流在第 i 加速段电场中的加速相位, φ_i 表示第 i 加速段速调管的输出相位, $\varphi_{i\max}$ 表示该加速段速调管的峰值加速相位, N 表示加速段个数, 在 HLS-II 中 N 为 8。由式(3)可知, 改变速调管的输出相位, 可以使局部束流能量增益发生变化, 当 $\varphi_i = \varphi_{i\max}$ 时 (即加速相位 $\varphi_{i0} = 0^\circ$), 束流在该加速段将获得最大能量增益。

相位扫描是对速调管的输出相位进行扫描, 获得与输出相位对应的束流能量, 并对数据进行非线性拟合得到对应加速段的能量增益公式。手动相位扫描操作较为复杂, 扫描时间较长, 并要求操作人员具有一定的束流调试经验。因此, 设计自动相位扫描很有必要。

2.1 自动相位扫描

根据相位扫描理论设计自动相位扫描程序, 该程序可自动完成相位扫描工作, 得到对应加速段的能量增益公式^[13]。由于调试阶段的能谱分析系统只能测量一定范围内的束流能量, 所以在相位扫描的过程中还需要扫描能谱分析系统的能量, 以不断改变能测量的束流能量范围。

自动相位扫描程序流程图如图 2 所示。程序开始执行后, 首先设置扫描所需的初始值, 包括初始相位、终止相

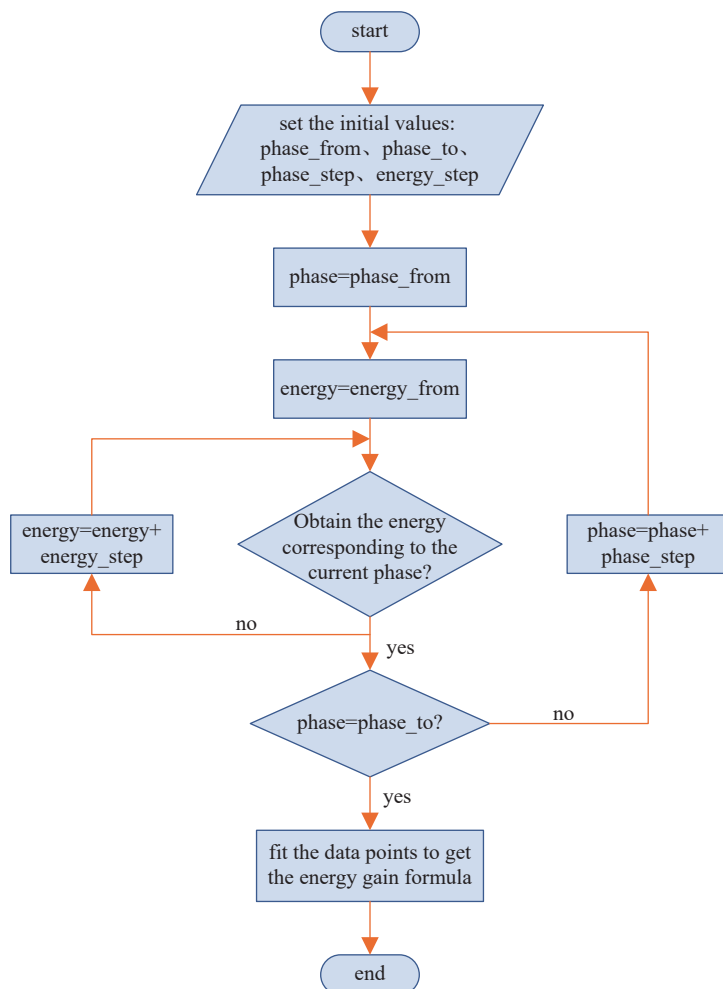


Fig. 2 Flowchart of the automatic phase scanning program

图 2 自动相位扫描程序流程图

位、相位步长和能量步长。设置完成后,程序从初始相位开始扫描,测量该相位对应的束流能量,得到一个数据点,然后测量下一相位对应的能量,直到获得终止相位对应的束流能量,扫描结束。最后,将所有的扫描数据点进行非线性拟合,得到能量增益公式。

2.2 自动相位扫描结果

自动相位扫描是在 HLS-II 控制系统基础上实现的, HLS-II 控制系统在 EPICS 框架下实现对前端设备的有效监控,同时又在 EPICS 框架下实现对加速器元件物理量的控制^[14]。

我们采用 Python 开发自动相位扫描程序,通过 PyEpics 接口软件以 Channel Access 协议访问 IOC 中的 Process Variables(PVs)实现对速调管相位和高压的修改。利用 HLS-II 控制系统中“物理量记录间的同步”功能很方便确定每个相位对应的束流能量值。

自动相位扫描界面基于 Python Display Manager(PyDM)设计。界面如图 3 所示,完成初始值的设定以后,点击“Start”按钮开始自动扫描;右上部分图像实时显示能谱分析系统 OTR 靶上的光斑图、束流能量偏移及束团的半高宽(FWHM);右下部分图像实时显示扫描到的数据点,并在扫描完成后对所有数据点进行非线性拟合,得到该加速段的能量增益公式。扫描过程完全自动,简化了操作难度,实时显示的扫描结果便于使用者观察扫描过程。经实验对比,在扫描参数相同的情况下,手动相位扫描一次需 6 min 左右,而自动相位扫描只需 1~2 min,大大减少了扫描时间。

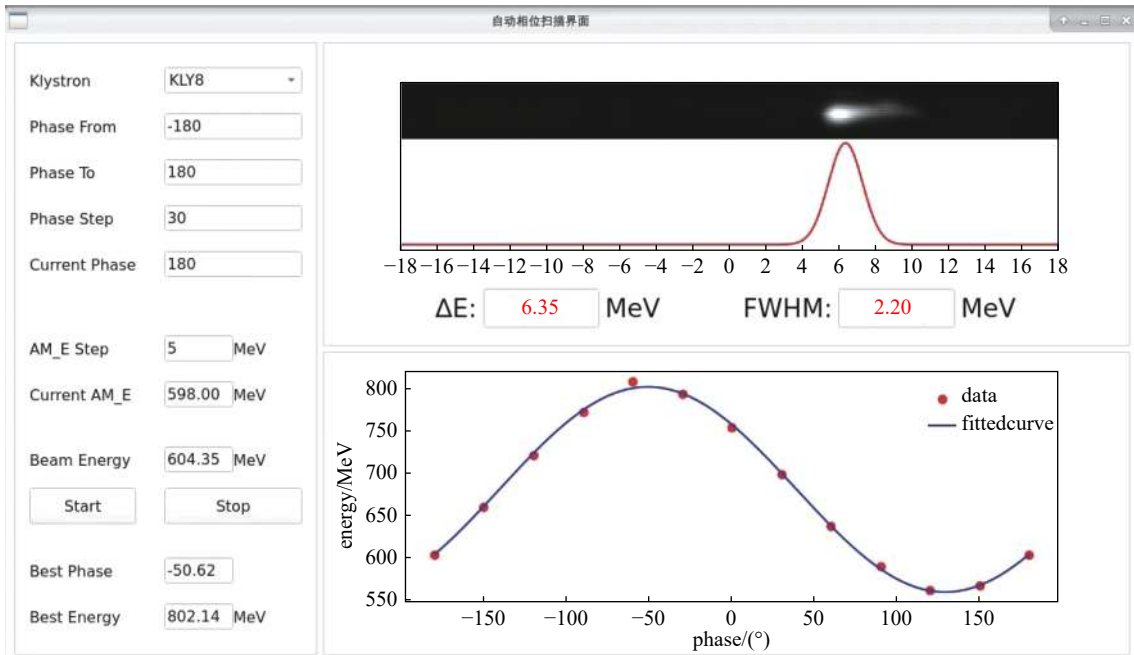


Fig. 3 Automatic phase scanning interface

图 3 自动相位扫描图形界面

对 3 号~8 号速调管(KLY3~KLY8)进行了全相位范围(-180°~180°)的自动相位扫描实验,扫描结果如表 1 所示。由于 1 号和 2 号速调管离电子枪较近,不能在全相位范围进行扫描,故采用手动扫描。

为探究速调管高压对能量增益公式中峰值加速相位与最大能量增益的影响,对 KLY7 与 KLY8 进行了不同高

表 1 KLY3~KLY8 自动相位扫描结果

Table 1 Automatic phase scanning results of KLY3~KLY8

klystron	peak output power/MW	operating high voltage/kV	energy gain formula
KLY3	50	44	$E_3 = 97.78 \cos(\varphi_3 + 179.38^\circ)$
KLY4	50	44	$E_4 = 93.64 \cos(\varphi_4 - 173.98^\circ)$
KLY5	50	44	$E_5 = 90.66 \cos(\varphi_5 + 79.58^\circ)$
KLY6	50	44	$E_6 = 95.16 \cos(\varphi_6 + 31.04^\circ)$
KLY7	50	44	$E_7 = 96.16 \cos(\varphi_7 + 148.82^\circ)$
KLY8	80	44	$E_8 = 124.01 \cos(\varphi_8 + 38.11^\circ)$

压下的自动相位扫描, 获得不同高压下的峰值加速相位与最大能量增益。KLY7、KLY8 的高压 U_7 、 U_8 与峰值加速相位 $\varphi_{7\max}$ 、 $\varphi_{8\max}$ 的关系以及 U_7 、 U_8 与最大能量增益 A_7 、 A_8 的关系如图 4 所示, 图中蓝色圆点为自动相位扫描所得数据, 红色直线为数据点线性拟合结果。可以发现, 速调管高压与最大能量增益基本满足线性关系, 速调管高压与峰值加速相位也基本满足线性关系, 线性拟合结果如表 2 所示。

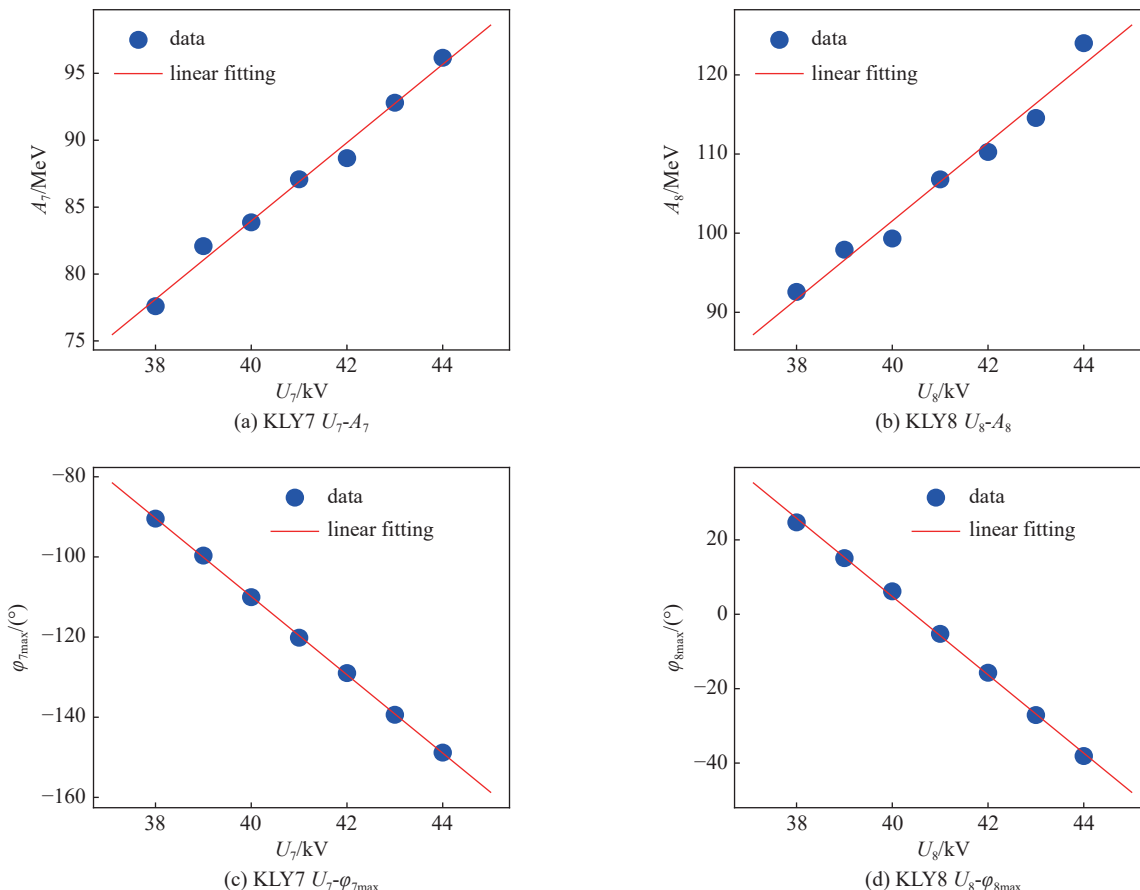


Fig. 4 Relationship between high voltage and peak acceleration phase and relationship between high voltage and maximum energy gain for KLY7 and KLY8

图 4 KLY7、KLY8 高压与峰值加速相位的关系以及高压与最大能量增益的关系

表 2 KLY7、KLY8 高压与峰值加速相位以及高压与最大能量增益拟合结果

Table 2 Fitting results of the high voltage with peak acceleration phase and the high voltage with maximum energy gain for KLY7 and KLY8

klystron	fitting results of klystron high voltage and maximum energy gain	fitting results of klystron high voltage and peak acceleration phase
KLY7	$A_7 = 2.93U_7 - 33.06$	$\varphi_{7\max} = -9.77U_7 + 280.9$
KLY8	$A_8 = 4.95U_8 - 96.35$	$\varphi_{8\max} = -10.52U_8 + 425.8$

3 束流能量调节

调节束流能量, 最直接的方法就是调节速调管的输出功率, 可通过调节速调管高压实现, 但这会同时引起式 (3) 中 A_i 与 $\varphi_{i\max}$ 变化, 调节起来相对麻烦。根据式 (3) 可知, 还可以通过调节速调管输出相位 φ_i 使束流的加速相位发生变化, 从而改变束流局部能量增益, 但这可能会带来束流能散的增长。当有速调管输出相位并不位于峰值加速相位时, 束流的能散计算公式如下^[15]

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha}{2} + \frac{\sum (\varphi_i - \varphi_{i\max})}{N} \right]^2 \quad (4)$$

式中 α 为束团的相宽度。由式 (4) 可知, 只要满足条件 $\sum (\varphi_i - \varphi_{i\max}) = 0$, 束流的能散最小, 这个最小的能散由束团相宽度决定。HLS-II 直线加速器速调管的输出相位日常都设定在峰值加速相位附近, 近似满足 $\sum (\varphi_i - \varphi_{i\max}) = 0$,

若只通过调节最后一个速调管相位改变束流能量,将会使 $\sum(\varphi_i - \varphi_{i\max})$ 不再近似等于0,束流能散将会增大。因此,只有同时对最后两台速调管进行输出相位调节,且这两台速调管的输出相位关于峰值加速相位对称,即满足

$$\varphi_7 - \varphi_{7\max} + \varphi_8 - \varphi_{8\max} = 0 \quad (5)$$

相位调节示意图如图5所示,最后两台速调管(KLY7与KLY8)的最大能量增益分别为 A_7 、 A_8 ,调节后的相位分别为 φ_7' 、 φ_8' ,峰值加速相位分别为 $\varphi_{7\max}$ 、 $\varphi_{8\max}$ 。

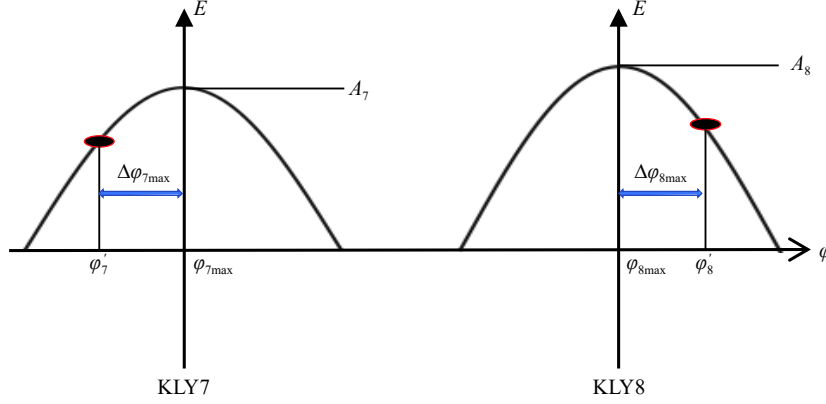


Fig. 5 Schematic diagram of phase adjustment

图5 相位调节示意图

将KLY7与KLY8从峰值加速相位处开始调节,使束流能量恢复到设定值,能量调节量为

$$\Delta E_{\max} = E_{\max} - E_0 \quad (6)$$

式中: E_{\max} 为仅调节相位情况下,束流能量能达到的最大值。

根据分析,实现能量调节,需满足

$$A_7 - A_7 \cos \Delta\varphi_{7\max} + A_8 - A_8 \cos \Delta\varphi_{8\max} = \Delta E_{\max} \quad (7)$$

式中: $\Delta\varphi_{7\max} = \varphi_7' - \varphi_{7\max}$, $\Delta\varphi_{8\max} = \varphi_8' - \varphi_{8\max}$ 。

为满足能散最小条件,需满足式(5),即

$$\Delta\varphi_{7\max} + \Delta\varphi_{8\max} = 0 \quad (8)$$

联立式(7)、(8)及相关参数求解,取 $\Delta\varphi_{7\max} > 0$,可得

$$\varphi_7' = \left| \arccos \left(1 - \frac{\Delta E_{\max}}{A_7 + A_8} \right) \right| + \varphi_{7\max} \quad (9)$$

$$\varphi_8' = - \left| \arccos \left(1 - \frac{\Delta E_{\max}}{A_7 + A_8} \right) \right| + \varphi_{8\max} \quad (10)$$

根据式(9)、(10)可以计算出为调节束流能量需要调节的KLY7与KLY8相位值 φ_7' 、 φ_8' 。观察式(9)、(10)可以发现,当 $\Delta E_{\max} < 0$ 时,方程将无解,这是因为目标能量 E_0 已经超过束流能达到的最高能量 E_{\max} 。说明在仅调节速调管输出相位的情况下,向上调节能量的范围受到限制,可能无法满足调节的要求。因此,必须调节速调管的高压,以扩大可调节的能量范围,使式(9)、(10)有解。由于KLY8的输出功率为80 MW,而KLY7的输出功率仅为50 MW,调节KLY8的高压可以更有效地增大可调节的能量范围。调节KLY8的高压后,需要重新按照以上步骤计算速调管相位的调节量,最终达到束流能量调节的要求。

4 能量调节方案在线应用

束流能量调节方案已经应用到HLS-II直线加速器,实现调试阶段的能量调节以及注入阶段的束流能量稳定。

4.1 调试阶段的能量快速调节

调试阶段运行人员经常需要根据能谱分析系统来调节直线加速器束流能量,以往这一工作需要工作人员按经验调节相关参数,耗时长且精度较差。利用本能量调节方案实现HLS-II直线加速器束流能量一键调节,简化了调节过程,人工调节大概需要几分钟时间,程序调节只需要点击调节按钮,调节过程在几秒内完成,大大缩短了调节

时间。

根据能谱分析系统观察束团光斑状态,通过光斑位置信息测量束流能量。当光斑状态显示束流能散较大,或者需要将束流调节到特定能量时,通过能量调节程序设定目标能量,点击调节按钮,程序将根据目标能量自动调节 KLY7 与 KLY8 的输出相位,必要时调节 KLY8 的高压,将束流能量调节到目标能量,并使束流具有较小能散。

图 6 显示了调试阶段使用束流能量调节前后 1 h 内束流能散的对比。图中红色填充圆和蓝色空心圆分别表示使用束流能量调节前和调节后的束流能散。从图中可以看出,调节前束流的横向能散在 0.12%~0.28% 之间,调节后束流的横向能散在 0.12%~0.22% 之间,束流能量调节后,束流的横向能散明显减小,纵向能散基本不变。

4.2 注入阶段的能量稳定

注入阶段,直线加速器需要向储存环提供满足注入要求的束流。当束流能量偏离注入能量,或者束流品质不好时,注入速率将会降低,甚至不能注入到储存环中。

HLS-II 储存环的注入能量为 800 MeV,注入过程中,根据 3 个 BPM 的测量值计算注入过程中的束流能量,当束流能量偏差超过 ± 0.5 MeV 时(在不影响注入的情况下,为了避免能量调节系统频繁工作损坏设备,设置 ± 0.5 MeV 阈值),应用能量调节方案自动调节 KLY7 与 KLY8 的输出相位,能量偏差较大时调节 KLY8 的高压,将束流能量调节到 800 MeV,提高注入速率。

图 7 展示了注入阶段开启能量调节前后一段时间束流能量与注入速率对比,图中红线为束流能量与 800 MeV 之间的偏差 ΔE ,蓝色点为输入速率,黑线左边为开启能量调节前,黑线右边为开启能量调节后。从图中可以发现,开启能量调节前,束流能量偏差在 1 MeV 附近波动,注入速率小于 0.3 mA/s,说明此时的能量偏差较大,束流状态较差,使得束流难以注入到储存环中;开启能量调节后,束流能量快速回到目标能量,能量偏差基本维持在 ± 0.5 MeV 之间,注入速率大多在 0.8~1.2 mA/s 之间波动,束流能量调节使注入速率明显提高。

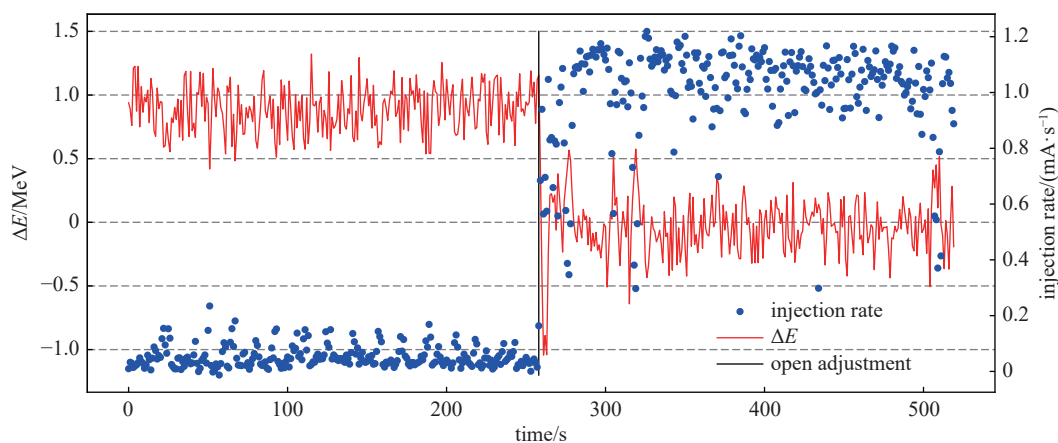


Fig. 7 Comparison of beam energy and injection rate before and after opening energy adjustment during injection stage

图 7 注入阶段开启能量调节前后束流能量与注入速率对比

5 结论

本文讨论了 HLS-II 调试阶段与注入阶段的束流能量测量方法及特点;开发了自动相位扫描程序,获得各加速段的能量增益公式,在扫描参数相同的情况下,手动相位扫描一次需要 6 min 左右,自动相位扫描仅需 1~2 min,扫描时间减少一半以上;设计了具体的能量调节方案。将能量调节方案应用到调试阶段,实现束流能量快速调节,调节后的束流横向能散明显减小,横向能散小于 0.22%;将能量调节方案应用到储存环注入阶段,使注入时的束流能量偏差稳定在 ± 0.5 MeV 以内,满足储存环注入需求,提高了注入速率,减少了束流损耗。该方案能高效地对 HLS-

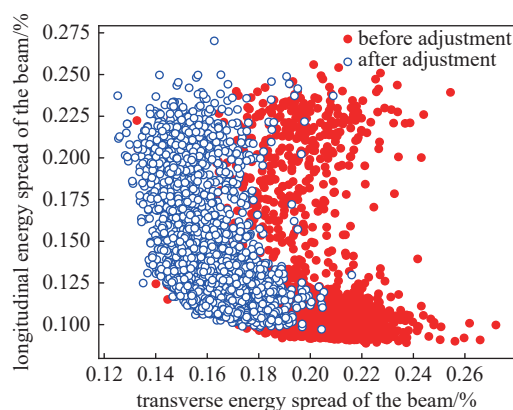


Fig. 6 Comparison of energy spread before and after beam energy adjustment

图 6 束流能量调节前后能散对比

II 直线加速器输出束流能量进行调节, 并且调节后的束流较调节前具有更小的横向能散。

参考文献:

- [1] Cheng Chaocai, Sun Baogen, Yang Yongliang, et al. Beam size and position measurement based on logarithm processing algorithm in HLS II[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40: 047004.
- [2] Bai Zhenghe, Wang Lin, Jia Qika, et al. Lattice optimization for the HLS-II storage ring[J]. *Chinese Physics C*, 2013, 37: 017001.
- [3] Zheng Jiajun, Yang Yongliang, Sun Baogen, et al. Central RF frequency measurement of the HLS-II storage ring[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40: 047005.
- [4] 王雪涛, 黄贵荣, 林宏翔, 等. HLS 800 MeV 直线加速器相位控制系统的研制[J]. 核技术, 2012, 35(8): 578-582. (Wang Xuetao, Huang Guirong, Lin Hongxiang, et al. Development of HLS 800 MeV Linac phase control system[J]. *Nuclear Techniques*, 2012, 35(8): 578-582)
- [5] 肖淑英, 赵明华. SSRF 150 MeV 直线加速器的能量稳定系统设计及仿真[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(5): 606-609. (Xiao Shuying, Zhao Minghua. Research on the energy stability of 150 MeV LINAC in SSRF and system simulation[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2010, 30(5): 606-609)
- [6] Kim C, Kim M, Hwang I, et al. Energy feedback system for the PLS-II Linac[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2017, 71(11): 775-779.
- [7] Meier E, Biedron S G, LeBlanc G, et al. Development of a combined feed forward-feedback system for an electron Linac[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 609(2/3): 79-88.
- [8] Furukawa K, Enomoto A, Kamikubota N, et al. Energy feedback systems at the KEKB injector linac[C]//*Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*. 1999: 248-250.
- [9] 王少哲, 池云龙, 刘榕, 等. BEPC II 直线加速器束流能量反馈系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(11): 1152-1155, 1159. (Wang Shaozhe, Chi Yunlong, Liu Rong, et al. Design of the beam energy feedback system in BEPCII Linac[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2016, 36(11): 1152-1155, 1159)
- [10] 任天祺, 唐雷雷, 周泽然. 基于MTCA的HLS-II直线加速器低电平系统改造[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 084006. (Ren Tianqi, Tang Leilei, Zhou Zeran. Upgrade of low level RF system based on micro telecom computing architecture (MTCA) for HLS-II LINAC[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 084006)
- [11] 江孝国, 董晓娜, 王远, 等. 瞬态光学渡越辐射测量系统的设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2147-2150. (Jiang Xiaoguo, Dong Xiaona, Wang Yuan, et al. Design of instantaneous measurement system based on optical transition radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 2147-2150)
- [12] Wang S, Iqbal M, Liu R, et al. Online beam energy measurement of Beijing electron positron collider II linear accelerator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 023301.
- [13] Barofsky D, Henriques A, Crisp D, et al. Automation of the ReAccelerator linac phasing[C]//*Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference*. 2021: 2170-2172.
- [14] 李承羲, 罗箐, 刘功发, 等. 基于Lattice Server中间件的束流光学参数测量[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 084004. (Li Chengxi, Luo Qing, Liu Gongfa, et al. Beam optical parameter measurement based on Lattice Server middlelayer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 084004)
- [15] Gu Pengda, Gen Zheqiao, Cui Yanyan, et al. Design studies of RF phasing system for BEPCII Linac[J]. *Chinese Physics C*, 2005, 29(3): 316-320.