



## 基于PACS的直流/脉冲双模式工作点调节软件开发与验证

马桂梅 刘杰 杨建成 柴伟平 朱云鹏 阮爽

### Development and Validation of Lattice Adjustment Application Based on PACS under DC/Pulse Dual-mode

MA Guimei, LIU Jie, YANG Jiancheng, CHAI Weiping, ZHU Yunpeng, RUAN shuang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019057>

#### 引用格式:

马桂梅, 刘杰, 杨建成, 柴伟平, 朱云鹏, 阮爽. 基于PACS的直流/脉冲双模式工作点调节软件开发与验证[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(4):842–847. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019057

MA Guimei, LIU Jie, YANG Jiancheng, CHAI Weiping, ZHU Yunpeng, RUAN shuang. Development and Validation of Lattice Adjustment Application Based on PACS under DC/Pulse Dual-mode[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(4):842–847. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019057

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 一种测量重核素的小型高压型加速器控制系统的研制

Development of a Control System for a Small High-pressure Accelerator for Measuring Heavy Nuclide

*原子核物理评论*. 2019, 36(4): 426–432 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.426>

#### 重离子治疗装置同步加速器高频控制系统研制

Development of RF Control System for Heavy Ion Medical Machine

*原子核物理评论*. 2019, 36(1): 55–61 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.055>

#### 重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

*原子核物理评论*. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

#### 医用加速器装置的离子源进气系统控制

Design of Ion Source Gas Control Used in Heavy Ion Medical Machine

*原子核物理评论*. 2019, 36(4): 441–446 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.441>

#### 基于EPICS的颗粒传热实验测控系统应用研究

Application Research on Measurement and Control System of Particles Heat Transfer Experiment Based on EPICS

*原子核物理评论*. 2019, 36(3): 388–393 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.388>

#### 加速器驱动次临界系统中堆外中子注量率监测方法 (英文)

Excore Neutron Flux Monitoring Method for an Accelerator Driven Sub-critical System

*原子核物理评论*. 2017, 34(2): 263–269 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.263>

文章编号: 1007-4627(2020)04-0842-06

## 基于 PACS 的直流/脉冲双模式工作点调节软件开发与验证

马桂梅<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 杨建成<sup>1,†</sup>, 柴伟平<sup>1</sup>, 朱云鹏<sup>1,2</sup>, 阮爽<sup>1,3</sup>

(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;

3. 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516003)

**摘要:** 目前, 中国科学院近代物理研究所设计、建造和运维了多台结构指标各异的重离子加速器装置, 现有的物理控制系统已无法满足这些装置对于稳定、可靠、高效运行的需求。为了提高调试、运行效率, 简化系统操作, 达到更高的流强和更好的束流品质, 中国科学院近代物理研究所自主设计了一套基于 EPICS 的面向物理的加速器控制系统 PACS。为了验证 PACS 框架的可行性和嵌入任意物理控制软件的可行性, 采用 Python 语言开发了基于 PACS 的直流/脉冲双模式工作点调节软件及其界面, 并且搭建了 HIRFL-CSR 的 MySQL 测试数据库和 EPICS 软 IOC 测试环境, 在该虚拟测试环境下对软件的直流模式下工作点调节功能进行了测试; 然后在 HIRFL-CSR 真实环境对该软件在直流/脉冲模式下的工作点调节功能进行测试。结果表明, 该软件能够通过 PACS 提供的接口嵌入系统的物理过程模块, 实现与数据库和底层控制系统的交互, 从而完成直流/脉冲模式下的工作点调节和光学参数计算, 以此验证 PACS 框架的可行性和嵌入任意物理控制软件的可行性。

**关键词:** PACS; 加速器物理控制系统; 工作点调节; 面向对象

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2019057

### 1 引言

目前, 由中国科学院近代物理研究所(下文简称近物所)设计、承建和运维了多台离子加速器装置, 包括: 已建成运行的兰州重离子冷却储存环(HIRFL-CSR), 正在建设的强流重离子加速器装置(High-intensity Heavy Ion Accelerator Facility, HIAF)、哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置(Space Environment Simulation and Research Infrastructure, SESRI)和中国科学院新疆理化技术所质子位移损伤效应模拟试验装置(Proton Radiation Effects Facility, PREF)。HIRFL-CSR 是一个集束流累积、冷却、加速于一体的多功能重离子研究平台, 由重离子冷却储存环-主环(CSRm)和实验环(CSRe)组成。其中 CSRm 注入束能量范围为 8 ~ 30 MeV/u, 束流注入和累积总时间约为 10s, 在脉冲模式下(周期约 30s)可将束流加速到 100 ~ 900 MeV/u(<sup>238</sup>U<sup>72+</sup>, 400 MeV/u; <sup>12</sup>C<sup>6+</sup>, 900 MeV/u)。CSRm 也可以运行在直流模式下, 进行能量要求恒定的束流实验研究。CSRe 运行在直流模式, 接收由 CSRm 快引出并在放射性次级束线打靶后的束流, 束流的最高

能量为 400 MeV/u(<sup>238</sup>U<sup>90+</sup>)和 600 MeV/u(<sup>12</sup>C<sup>6+</sup>)<sup>[1]</sup>。HIAF 是强流重离子加速器装置, 可以实现将 <sup>238</sup>U<sup>35+</sup> 加速到 830 MeV/u, 束流流强达到  $1.0 \times 10^{11}$ 。SESRI 设计提供 100 ~ 300 MeV 的质子束和 7 ~ 80 MeV 的重离子束。PREF 设计提供 10 ~ 60 MeV 的稳定、连续的质子束。由于目前国际上并没有一个成熟的、可移植到离子加速器装置的物理控制系统, 所以迫切需要自行开发一个适用于离子加速器装置的物理控制系统。

PACS(Physics-oriented Accelerator Control System)是由近物所自主设计研发的面向物理的加速器控制系统, 旨在为不同物理过程、不同规模、不同硬件系统、不同底层控制的加速器装置快速生成统一、可靠、高性能、智能化的加速器物理控制软件。PACS 整体框架包括应用层、物理层和控制层三层。在控制层中封装了 EPICS 系统接口、MySQL 数据库接口, 对底层控制系统和数据库进行了隔离, 并提供统一、简洁、易用的高层接口, 减小需要链接到底层控制系统的物理应用的开发难度及工作量<sup>[2]</sup>。所有的物理控制过程软件都是通过统一的接口嵌入系统, 虚拟加速器会智能化地调度这

收稿日期: 2019-11-01; 修改日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11825505)

作者简介: 马桂梅(1987-), 女, 青海西宁人, 硕士, 从事加速器控制研究; E-mail: maguimei@impcas.ac.cn

† 通信作者: 杨建成, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.

些软件按序执行, 并将计算得到的结果发送到对应的硬件, 从而实现对加速器装置的操作。

PACS 设计框架的合理性、可行性, 关系着整个系统的成败, 所以在 PACS 设计开发之初, 先行验证其设计框架的合理性和可靠性十分必要, 为此开发了基于 PACS 的直流/脉冲双模式工作点调节软件。本文将介绍基于 PACS 的直流/脉冲双模式工作点调节软件(下文简称工作点调节软件或该软件)的设计思想、数据流程和功能实现, 其次开展对该软件的功能测试。在进行功能测试时, 首先搭建 HIRFL-CSR<sub>e</sub> 的 EPICS 虚拟测试环境和 MySQL 测试数据库, 对该软件的工作点调节功能在虚拟环境进行测试; 然后在 HIRFL-CSR 真实环境对该软件在直流和脉冲模式下的工作点调节情况进行测试。通过得到的测试结果来验证工作点调节软件设计的正确性, 更重要的是验证 PACS 设计框架的可靠性和可行性。

## 2 工作点调节软件的设计和实现

### 2.1 软件设计思想

Python 是非常灵活的计算机程序语言, 提供了许多现成可用的第三方软件包, PACS 设计框架采用面向对象技术 (Object-oriented Programming, OOP) 和 Python 语言编程实现, 该工作点调节软件也采用了 Python 语言和面向对象的技术进行编程实现 [3]。

工作点调节软件开发和测试工作是在兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 上完成。由于 PACS 具有良好的封装性, 开发人员通过 PACS 提供的接口将物理软件嵌入系统中, 然后通过虚拟加速器的调度实现不同的物理功能, 而不必关心软件与 EPICS 和数据库以及系统的其他模块之间的交互细节。PACS 的核心关键是虚拟加速器, 其能够汇聚、分析所有设备 IOC (Input-Output Controller) 发布的 PV 变量 (Process Variables), 针对这些 PV 变量进行自动操作, 也能够通过其发布的 PV 响应用户操作、进行物理计算并将数据下发到设备 IOC。

光学参数是同步加速器最重要的物理参数, 所以工作点调节和光学参数的计算、设定是加速器物理控制系统需要具备的最基本的物理功能。MADX 是由 CERN 开发的用于带电粒子光学设计及交变梯度加速器和束线研究的计算软件 [4], 是国际上通用的光学计算软件, 结果稳定、可靠。经过调研, 决定采用在程序里封装 MADX 的方式, 为该软件提供工作点计算的功能。工作点调节软件通过 PACS 提供的接口嵌入系统后, 再通

过点击该软件界面的按钮实现对软件的操作, 继而完成对相应 PV 变量的操作, 实现对装置的模式切换、工作点的调节, 从而达到对装置束流调节的目的。在该工作点调节软件中, 根据用户的输入, 读取不同模式下的光学文件, 作为 MADX 的输入文件, 再对 MADX 的计算结果进行加工和提取, 将结果发送到虚拟加速器, 由虚拟加速器进行后续操作, 并完成与 EPICS 系统和数据库的数据交换, 将最终得到的包含电流值的 PV 变量发送到对应的电源, 完成对电源的电流调节。

### 2.2 数据流程

工作点调节软件数据流程如图 1 所示。首先, 软件通过与界面的通信, 读取用户选择的运行模式和输入的目标工作点、束流种类和能量等参数, 将这些参数写入到各模式对应的 MADX 输入文件中; 其次, 软件调用 MADX 进行物理计算, 将计算得到的 twiss 参数和磁铁强度  $K_1$  值返回到虚拟加速器进行下一步的工作, 并在界面进行 Beta 函数和工作点的显示; 然后将  $K_1$  值发送到对应的磁铁, 并与数据库进行通信, 读取该磁铁的测磁曲线, 将  $K_1$  值转换成电流值, 并对该电流值添加一个固定的偏移量 (零漂); 最后, 通过与 EPICS 系统的通信, 将包含此电流值的 PV 发送到磁铁对应的电源, 修改电源的电流值, 完成对电源的控制。该软件实现了通过改变工作点实现对电源电流的修改, 最终实现对束流的控制。

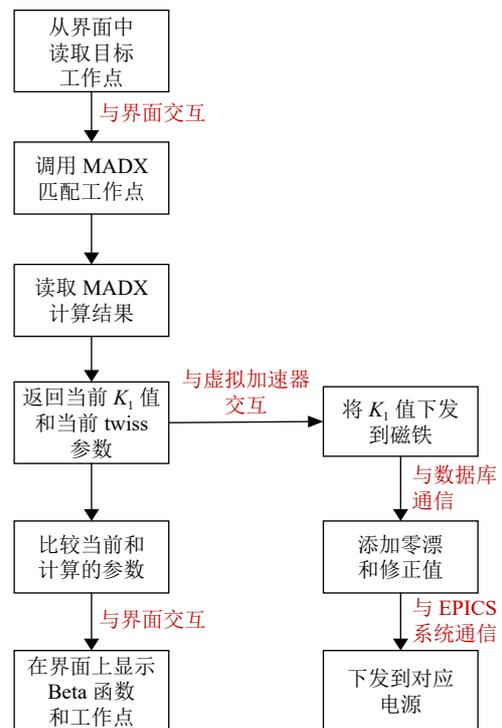


图 1 (在线彩图) 工作点调节软件流程图

### 3 软件界面

PACS的界面层与中下层完全隔离，通过统一的接口进行通信。PACS将系统所有的参数和操作以PV变量的形式提供给界面端，界面端的软件只需操作PV变量就能实现与中下层的交互。开发人员对界面端的任何修改不会影响到中下层的模块，而对中下层的修改不会影响到界面端的使用。工作点调节软件的测试界面(图2)采用Python语言的第三方软件包PyQt和Matplotlib编程实现<sup>[3, 5-6]</sup>，包括菜单区、用户操作区、工作点显示区和光学显示区。用户通过单击菜单区的Setting按钮实现登陆与注销功能。在用户操作区，用户可以在操作区域中输入注入束流相关的参数，包括注入时

的粒子种类、能量，以及水平工作点和垂直工作点，然后单击Cal按钮计算工作点，就会在工作点显示区的共振图上绘制出通过软件计算得到的工作点，在光学显示区中绘制出软件计算得到的Beta函数。通过单击按钮区的Send按钮就会将计算得到的光学参数发送到虚拟加速器中进行系统下一步的操作。用户操作区的引出参数区可设置束流的引出能量、水平工作点和垂直工作点，该功能仅在脉冲模式下可用。用户可以通过单击按钮区的Op.Mode按钮来实现直流模式和脉冲模式之间的切换，还可以在运行模式及工作点检测区的Op.Mode框中确认当前的运行模式。该界面支持局部放大、平移和抓图功能。

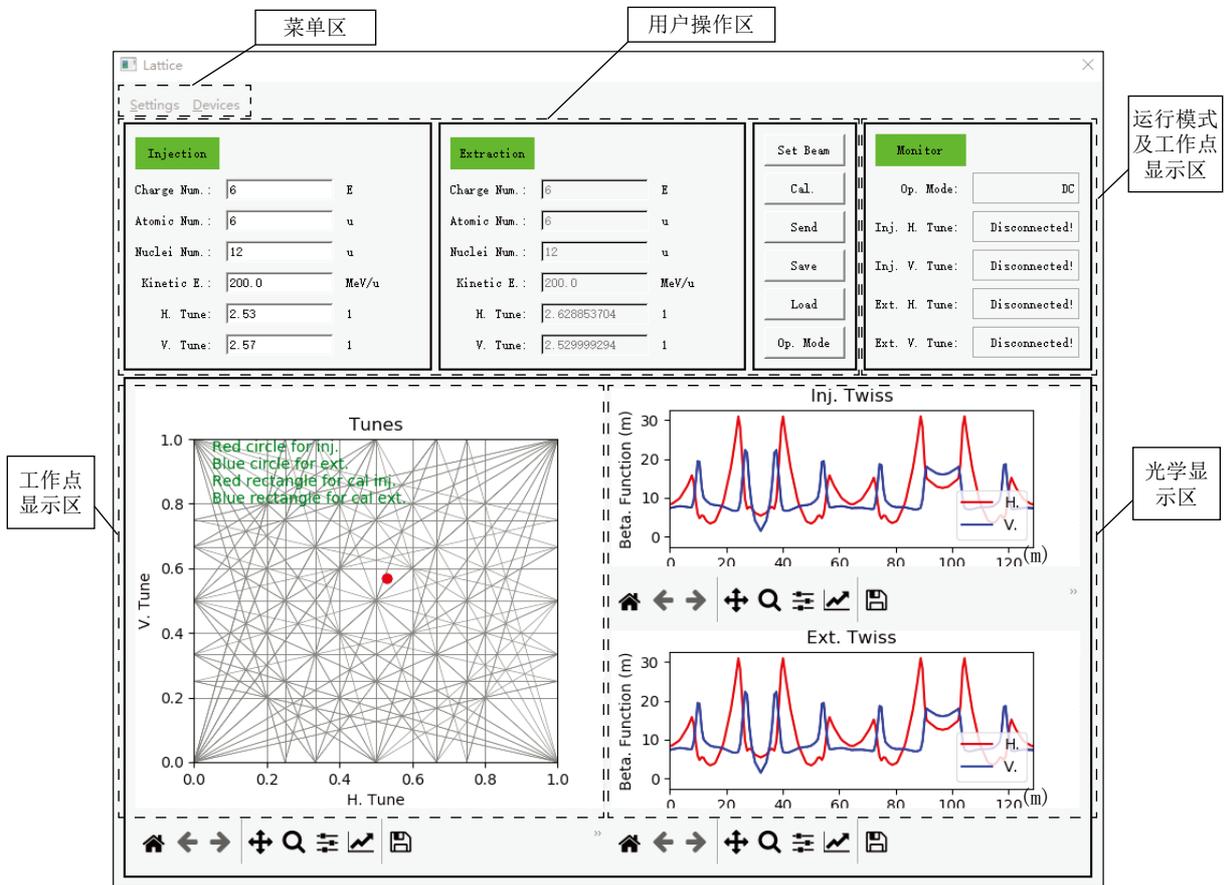


图 2 (在线彩图) 工作点调节软件界面

工作点调节软件编写完成后，将其添加到PACS的物理过程模块中。图3所示为将PACS布署在CSR上的光学界面，用户通过在该光学界面的工作点软件作用区域输入工作点来实现对工作点和光学参数的调节。用户点击界面上的波形查看按钮和光学查看按钮来查看当前状态下的工作点和光学参数。

### 4 软件测试结果

为了测试工作点调节软件的可用性和PACS设计框架的可行性，首先搭建了测试用的MySQL数据库<sup>[7]</sup>，该测试数据库包括12个表，记录了CSR包含的磁铁和电源设备的参数以及磁铁和电源的对应关系(CSR



图 3 (在线彩图) PACS-CSR 光学界面

上共有 22 块四极磁铁和 22 块电源)、磁铁的测磁曲线、物理量与控制量的映射关系、束流参数等数据；其次，在 EPICS 系统中搭建了软 IOC，用于模拟 CSR 上的磁铁和电源设备 [8]；最后，将 CSR 的 lattice 文件作为工作点调节软件的输入文件，进行直流模式下的工作点匹配和光学参数计算。依次将工作点设置为 (2.54, 2.56)、(2.53, 2.58)、(2.52, 2.57)、(2.52, 2.56)、(2.53, 2.57) 等多组数据来进行该软件在直流模式下工作点调节功能的测试，图 2 所示为将工作点设置为 (2.53, 2.57) 之后的匹配结果，从图中可以看出该软件在直流模式下运行正常，达到了设计预期的效果。值得一提的是，该虚拟测试环境的提出和搭建，为全系统的虚拟测试环境搭建

提供了宝贵的经验；测试数据库的搭建也为系统正式版本的数据库搭建提供了参考。

为了测试该软件在真实环境中的运行情况，在 HIRFL-CSR 上对该软件进行测试。该实验是在 CSR 的直流模式和 CSRm 的脉冲模式下开展的。在实验 1 中，对 CSR 的工作点进行调节，测试得到的结果如图 4 所示，结果表明将工作点从 (2.530, 2.570) 调整到 (2.535, 2.575) 时，以磁铁 41Q01 为例，磁铁电源的电流会从 267.956 A 变到 267.935 A。在实验 2 中对 CSRm 脉冲模式下的注入段工作点进行了调整，测试得到的结果如图 5 所示，由图 5 可知，将 CSRm 的注入工作点从 (2.610, 2.610) 调到 (2.615, 2.615) 时，以磁铁 21Q01 为

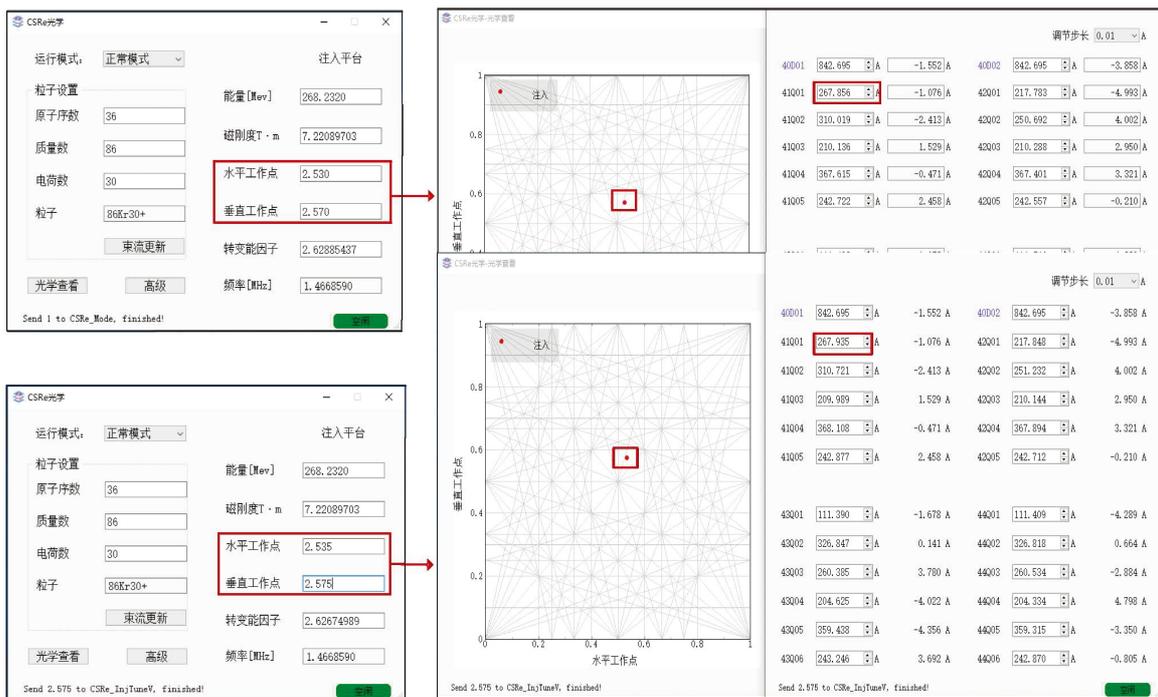


图 4 (在线彩图) CSR 直流模式工作点调节结果

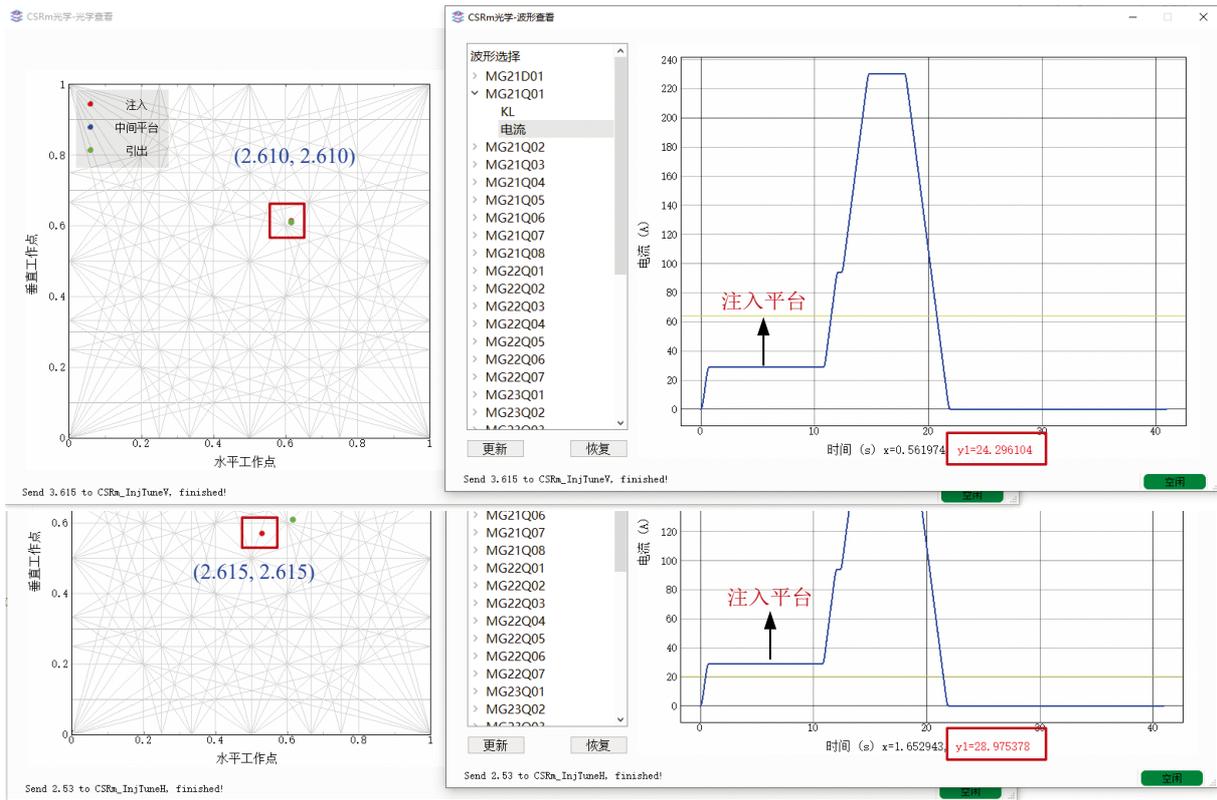


图 5 (在线彩图) CSRm 脉冲模式工作点调节结果

例，其注入平台的电流值从 24.296 104 A 变到 28.975 3 A。由实验结果可知该软件能够实现直流模式和脉冲模式下的工作点调节，为 PACS 系统提供光学计算的功能。

### 5 结论

基于 PACS 的直流/脉冲双模式工作点调节软件是以近物所设计和承建的大科学装置为对象进行开发的，目的是为了实现在一个可以嵌入 PACS 框架的工作点和光学参数计算和设定的软件，并且提供一个可调节工作点、显示工作点和光学参数的图形界面。对该软件在 HIR-FL-CSR 的虚拟环境和真实环境进行功能测试，结果表明：该软件能够很好地完成直流/脉冲双模式下工作点和光学参数的设置、计算。充分验证了 PACS 设计框架的可行性，特别是验证了嵌入任意加速器物理计算软件的可行性，为 PACS 在 CSR 上的正式部署打下了坚实基础。同时，研究中搭建的虚拟测试环境和 MySQL 测试数据库也为 PACS 的全系统测试环境的搭建和正式数

据库的搭建提供了宝贵经验。

### 参考文献：

- [1] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 488: 11.
- [2] MA G M, LIU J, YANG J C, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2020, 953: 163170.
- [3] Guido van Rossum. Python[EB/OL]. [2019-09-01]. <https://www.python.org/>.
- [4] CERN-BE/ABP Accelerator Beam Physics Group. MADX [EB/OL]. [2019-09-01]. <http://madx.web.cern.ch/madx>.
- [5] The Qt Company[EB/OL]. [2019-09-01]. <https://www.riverbankcomputing.com/PyQt5/>.
- [6] HUNTER J, DALE D, FIRING E, et al. Matplotlib[EB/OL]. [2019-09-01]. <https://matplotlib.org/>.
- [7] MySQL AB Company. MySQL[EB/OL]. [2019-09-01]. <https://www.mysql.com/>.
- [8] Argonne National laboratory. Experimental Physics and Industrial Control System[EB/OL]. [2019-09-01]. <https://epics.anl.gov/>.

## Development and Validation of Lattice Adjustment Application Based on PACS under DC/Pulse Dual-mode

MA Guimei<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, YANG Jiancheng<sup>1,†</sup>, CHAI Weiping<sup>1</sup>, ZHU Yunpeng<sup>1,2</sup>, RUAN shuang<sup>1,3</sup>

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

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

3. *Huizhou Research Center of Ion Sciences, Huizhou 516003, Guangdong, China)*

**Abstract:** To reduce the amount of duplication efforts of physical and program developers, a portable, extensible and maintainable PACS (Physics-oriented Accelerator Control System) is proposed and implemented for heavy ion accelerator facilities by IMP (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences). For testing the feasibility of the PACS, a lattice adjustment application and its new GUI for both DC and pulse modes is programmed by Python language. The DC mode, built with the SQL database and soft IOC of the EPICS, is performed in the HIRFL-CSR. In addition, the pulse mode is tested in the HIRFL-CSRm. The testing results show that the tune adjustment and optics calculation in the two modes are implemented successfully, and the PACS can provide the interfaces between the modules and layers. Therefore, the framework of the PACS is feasible.

**Key words:** PACS; accelerator physics control system; lattice adjustment; OOP

---

**Received date:** 01 Nov. 2019; **Revised date:** 15 Dec. 2020

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11825505)

† **Corresponding author:** YANG Jiancheng, E-mail: [yangjch@impcas.ac.cn](mailto:yangjch@impcas.ac.cn).