中能段电子束离子阱真空控制系统研制

曾超^{1,2} 赵宇红^{1*} 张洪明^{2*} 杨洋^{3*} 吕波^{2,4*} 符佳² 王福地² 宾斌¹ 黄世涵³ 计华健^{2,4} 林子超^{2,4} 毛立宇² 范玉² 孙波² 胡奎⁵

(1. 南华大学电气工程学院 衡阳 421001; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所 合肥 230031;
3. 复旦大学现代物理研究所 上海 200433; 4. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院 合肥 230026;
5. 安徽大学物质科学与信息技术研究院 合肥 230601)

Development of a Vacuum Control System for Intermediate-Energy Electron Beam Ion Trap

ZENG Chao^{1,2}, ZHAO Yuhong^{1*}, ZHANG Hongming^{2*}, YANG Yang^{3*}, LYU Bo^{2,4*}, FU Jia², WANG Fudi², BIN Bin¹, HUANG Shihan³, JI Huajian^{2,4}, LIN Zichao^{2,4}, MAO Liyu², FAN Yu², SUN Bo², HU Kui⁵

(1. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese

Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

4. Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

5. Institute of Material Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract The Electron Beam Ion Trap (EBIT) is an experimental device used to study the physics of highly ionized ions. The intermediate-energy compact EBIT experimental platform can generate an electron beam energy of 30 keV with an electron beam current of up to 20 mA. It is of great importance to study the impurity spectra in future fusion reactors. To produce a single high charge state ion, the trapping area of the intermediate energy EBIT device needs to be kept under an ultra-high vacuum $(10^{-8} Pa)$ condition. Besides, the low-temperature superconducting magnet also needs to operate under a vacuum environment of 10^{-5} Pa to maintain a sufficiently high heat resistance. Therefore, the vacuum condition directly affects the performance of the intermediate energy EBIT device. It is necessary to develop a stable and efficient vacuum control system to improve the stability and reliability of the device. In this study, an intermediate energy EBIT vacuum control system is developed on the basis of the RS485 bus structure and the Python programming language, which realizes remote control, data acquisition, and interlock protection for the EBIT vacuum system. Currently, this vacuum control system has been running reliably on the intermediate energy EBIT system for several months. The development of the vacuum control system for the EBIT can meet experimental requirements, providing a reliable ultra-high vacuum experimental environment for the intermediate energy EBIT system. This study is of great significance for the steady-state operation of the intermediate energy EBIT system.

Keywords Electron beam ion trap, Vacuum control system, RS485, Python

摘要 电子束离子阱(Electron Beam Ion Trap, EBIT)是一种用于研究高电离态离子物理过程的实验装置。中能段紧凑型 EBIT 实验平台能够产生 30 keV 的电子束能量,电子束流达到 20 mA,对于研究未来聚变堆杂质离子输运行为研究具有重要 意义。为了产生单一高电荷态离子,中能段 EBIT 装置阱区需要工作在超高真空(10^s Pa)环境下。低温超导磁体需工作在

收稿日期:2023-09-01

基金项目:中国科学院科研仪器设备研制项目(NO.YJKYYO20180013);安徽省重点研究与开发计划项目(No.202104a06020021);国家重 点研发计划磁约束聚变能源研究专项项目(2019YFE03030002);国家自然科学基金项目(No.12175278);安徽省自然科学基金项目 (No.1908085J01);安徽高校协同创新项目(GXXT-2021-029)

^{*}联系人: E-mail: 1668446315@qq.com; hmzhang@ipp.ac.cn; yangyang@fudan.edu.cn; blu@ipp.ac.cn

控制系统,实现了对中能段 EBIT 真空系统的远程控制、数据采集和系统联锁保护。可为中能段 EBIT 装置提供稳定可靠的

10⁻⁵ Pa 真空环境下以维持超导状态,因此真空度直接影响着中能段 EBIT 的工作性能,有必要研制一套稳定高效的真空控制 系统以提升中能段 EBIT 装置稳定性与可靠性。文章基于 RS485 总线结构和 Python 编程语言开发了一套中能段 EBIT 真空

超高真空的实验环境,对中能段 EBIT 装置的稳态运行具有重要意义。 关键词 电子束离子阱 真空控制系统 RS485 Python 中图分类号:TL62+8 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202309002

在未来聚变反应堆设计中,采用了能承受高热 负荷的金属钨(W)作为面向等离子体的材料。然而 等离子体与壁之间的相互作用会不可避免地使 W 杂质进入到主等离子体。当等离子体中 W 杂质浓 度超过一定程度后,会降低等离子体约束性能、稀 释主离子密度,甚至引起等离子体破裂,危害装置 安全。因此,有效控制等离子体 W 杂质含量是未来 聚变堆稳定运行的必要前提之一。基于 W 杂质辐 射的输运研究是为杂质控制提供物理基础的一种 方法,当前聚变装置通常能够产生大约在 10 keV 量 级的电子温度,只能将 W 电离到较低的价态,无法 模拟未来聚变堆等离子体(Te~20~30 keV)的钨光 谱。因此如何找到适用于未来聚变堆上 W 杂质行 为研究的最佳原子谱线并进行谱线识别和实验验 证是目前聚变等离子体领域关注的热点问题^[1]。

电子束离子阱(Electron Beam Ion Trap, EBIT) 是利用高能电子束与原子碰撞使原子外层电子不 断被剥离从而产生高电荷态离子的实验装置,通过 控制电子束和离子之间的相互作用,能够对离子的 结构、性质及其与外部环境的相互作用等进行极其 精细的研究^[2-3]。现在广泛应用于原子和分子光谱 学研究、核物理研究以及高能物理实验等领域^[4-7]。 鉴于此,中科院等离子体物理研究所跟复旦大学合 作研制了一套中能段(能量范围在 20~30 keV)紧凑 型 EBIT,可为未来聚变堆上高电荷态杂质离子光谱 研究提供数据支持。

在 EBIT 装置中, 漂移管阱区电子束和离子之间的作用需要在超高真空环境下实现, 以避免背景残余气体对实验的影响^[8]。因此, 真空系统作为EBIT 装置的辅助系统, 对 EBIT 装置的工作性能起着至关重要的作用。低真空状态下电子束流、高电荷态离子与残留气体分子之间发生碰撞并使气体分子电离, 不仅会导致离子束流质量下降, 还会影响实验结果的精度和可靠性。此外, 较低的真空度也会加速 EBIT 装置零件的磨损和氧化, 降低其使用寿命, 增加设备维护成本^[9-10]。因此, EBIT 中的超

高真空环境对于实验的可重复性、准确性和稳定性 非常重要,EBIT 装置阱区需要长时间维持超高真空 环境。此外,EBIT 装置采用的低温超导磁体也需要 较高真空来降低磁体与外界环境中的热传导率,以 使得超导磁体能长期稳定工作在超导状态。因此 稳定的超高真空环境对维持磁体超导状态和磁体 安全同样至关重要。当前系统的真空数据和温度 数据只能通过现场真空计和温度传感器读出,数据 无法进行集中管理和监控,只能依靠笔记本或者电 脑手动记录数据。同时,当系统设备出现故障或者 实验人员误操作导致系统真空出现问题时,无法自 动关闭真空阀门和真空泵。因此有必要研制一套 稳定高效的真空控制系统以实现对中能段 EBIT 真 空系统的远程控制、数据采集和联锁保护。

本文基于 RS485 总线结构和 Python 编程语言 开发的中能段 EBIT 真空控制系统,利用一台工控 机(IPC)作为主设备通过 RS485 总线与其他真空设 备进行数据传输,同时基于 Python 编程语言编写可 视化图形界面对真空系统进行集成控制。该系统 主要包括以下三个模块:(1)远程控制模块:通过计 算机远程控制真空设备,可以对中能段 EBIT 真空 系统进行远程操作,提高了操作的便捷性和灵活性。 (2)数据采集和处理模块:实现对中能段 EBIT 真空 系统数据的采集、分析与处理,为实验提供数据支 持。(3)系统联锁保护模块:通过连锁反应保证中能 段 EBIT 装置处于安全状态, 当系统出现故障能使 其自动切换到安全状态下,实现了中能段 EBIT 装 置的安全管理,确保人员和设备的安全。EBIT 真空 控制系统的难点在于如何实现真空度的精确控制、 数据采集与处理的准确性、系统的安全性与稳定性、 远程控制与可视化界面的便捷性以及系统设计与 集成的复杂性。本文采用 Python 编程语言编写可 视化图形界面,具有代码简洁易读、开发速度快、跨 平台兼容性好、可定制性强和成本低等优势。本文 第一部分介绍了 EBIT 装置真空系统总体布局,第 二部分介绍了控制系统结构设计,第三部分介绍了

控制系统软件流程和控制界面设计,第四部分介绍 了系统测试结果,第五部分为本研究总结。

1 中能段 EBIT 装置真空系统总体布局

真空系统作为 EBIT 装置的重要组成部分,其 设计要满足以下几点要求:(1)性能稳定可靠且故障 率低,以确保真空系统能够实现长时间的稳定运行。 (2)能够实现 EBIT 装置阱区达到 10⁻⁸ Pa 量级的超 高真空状态,以保证电子束和目标离子相互碰撞时 的稳定性和精确性。(3)优化系统的整体布局,系统 要留有一定的接口和余地,合理安排装置各窗口方 便后期对系统进行改造升级^[11]。

基于以上原则,中能段 EBIT 真空系统由多个 相对独立的真空室构成,真空系统总体布局如图 1 所示,真空系统主要包括四个部分:第一部分是电 子束离子阱主体所在的内真空室。第二部分是制 冷机冷头和超导磁体所在的外真空室。内外真空 室之间通过圆形隔板进行真空隔绝,内外真空相互 独立。此外还有差分微量气体注入系统真空单元 以及各诊断系统构成的真空单元,以便于从 X 射线 到可见光波段杂质谱线的观测。系统通过在圆形 隔板上开设了多个观测窗口与外部各光谱仪平台 以及差分微量气体注入系统进行连接,实现杂质元 素的注入以及光谱观察,并通过真空阀门与内真空 室进行隔绝。

由于离子泵工作时会产生干扰磁场,这个干扰 磁场会影响紧凑型 EBIT 本身磁场,所以在本系统 中未使用离子泵。为了获得所需的超高真空环境, 参照上海 SH-PermEBIT 和 SH-HtscEBIT 超高真空 腔体的设计经验[12],本系统采用两套复合分子泵组 对内真空腔室进行抽气,选择的是抽速为650 L·S⁻¹ 国产的久泰 JTFB-650ZF 脂润滑复合分子泵,对于 超导磁体所在的外真空室用一套分子泵机组即可 满足要求,并通过6 组普发 PKR361 全量程真空规 管测量各点的真空度,测量范围 10⁻⁷~10⁵ Pa。由于 内真空室中心阱区的测量规管是安装在观测窗口 上的,所以实际上规管测量处的真空度要比中心阱 区低,当规管测得真空为10⁻⁷ Pa时,中心阱区极限 真空可达 10⁻⁸ Pa 量级, 事实上当真空度高于 4×10⁻⁷ Pa 时就达到了产生高电荷态离子的实验条件[13]。中能 段 EBIT 系统配备的弯晶谱仪(XCS)、极紫外光谱 仪(EUV spectrometer)、真空紫外光谱仪(VUV spectrometer)和可见光光谱仪(Visible light spectrometer) 的观测波段分别覆盖 0.2~0.4 nm、1~50 nm、30~ 360 nm 和 300~700 nm。中能段 EBIT 真空系统的 各真空设备和数量如表1所示。

为了保障中能段 EBIT 系统的正常运行,真空 控制系统需要满足以下要求:(1)实现对中能段



Fig. 1 Vacuum system layout of the intermediate energy EBIT

23

表 1 中能段 EBIT 装置主要真空设备统计

Tab. 1 Major devices of the intermediate energy EBIT vacuum system

设备名称 Denominations of device	设备数量 Number of devices
复合分子泵 Composite Molecular Pump	3
机械泵 Mechanical Pump	3
复合真空规管 Composite Vacuum Gauge	6
阀门 Gate Valve	7
玻璃观察窗 Glass view port	1

EBIT 装置各点真空度的实时监测与显示,并且能够 实时保存装置运行过程中的真空数据,以便实验人 员后期进行故障排查和处理。(2)实现对各真空设 备的远程控制,包括启动停止分子泵和机械泵以及 各个真空阀门的开合控制。(3)实现系统联锁开发, 当真空系统出现故障或误操作导致真空度低于正 常工作范围时,系统能够发出报警信号并迅速自动 关闭各真空阀门和分子泵,最大限度降低突发故障 带来的不良后果,保护实验人员和设备的安全^[14]。 (4)实现对超导磁体温度的监控,由于超导磁体对温 度变化十分敏感,当温度超过超导的临界温度磁体 会失超,所以有必要在实验过程中监控超导磁体温 度变化情况。

2 系统结构设计

中能段 EBIT 真空控制系统实现了装置各真空 单元真空集成控制与实时检测,根据不同的实验需 求控制相应的真空阀门和真空泵组动作,同时要进 行联锁开发实现装置安全联锁功能。为了实现可 靠的数据传输,本系统采用RS485总线结构。RS485 总线结构是一种串行通信总线,它包含一个主设备 和最多128个从设备,数据通过总线在节点之间传 输,不同节点之间通过不同的地址进行区分,通讯 数据可以被所有节点共享,达到快速传输的目的。 RS485总线结构在工业环境中具有很高的鲁棒性, 能够抵抗电磁干扰、噪声等问题。同时,它的通信 距离可以长达数千米,具有广阔的应用范围^[15-16]。

控制系统的结构如图 2 所示,由一台工控机 (IPC)作为主设备通过 485 总线来控制其他真空设 备,同时对超导磁体的温度进行实时监测,为了了 解系统温度变化情况,本研究用了 5 路传感器分别 监测冷屏、磁体上下端以及电流引线上下端的温度, 制冷机一级冷头和冷屏直接连接,二级冷头通过导 冷结构与磁体连接,超导磁体系统结构示意图如 图 3 所示。由于温度传感器只提供了 RS232 通讯 接口,所以温度传感器通过串口线直接和 IPC 通信。

真空获得设备主要包括 3 台复合分子泵和 3 台 机械泵,每台分子泵拥有独立的电源控制器(CMP controller),提供了 RS485 通讯接口,机械泵没有独 立的控制器,本文采用带有 RS485 通讯接口的继电 器控制器(Relay controller)进行控制,此外为了方便 对真空阀门进行控制以及实现真空系统的联锁开 发,真空阀门也通过继电器控制器进行控制。将所 有的真空设备的控制器挂载到 RS485 总线上,并给 每个节点分配唯一的地址, IPC 经过 RS485/232 转



Fig. 2 Structure diagram of the intermediate energy EBIT vacuum control system



Fig. 3 Schematic diagram of superconducting magnet system structure

换器(RS485/RS232 converter)即可通过地址号对指 定的真空设备进行远程控制,设备间通讯协议采用 Modbus协议。

真空测量设备主要由 6 只复合真空规管和控制器(Gauge controllers)组成。真空规管通过电缆与控制器连接,真空规管实时检测各点真空并把测得的数据发送给控制器,控制器通过 RS485 通讯接口 挂载在 RS485 总线上,当 IPC 通过总线向控制器发送读取真空的指令时,控制器通过总线把系统真空 值发送给 IPC, IPC 通过上位机程序对真空数据进行处理,如此便实现了系统真空度的读取。

3 系统软件设计

系统软件部分采用 Python 编程语言进行编写。 PyQt 是 Python 编程语言的图形用户界面(Graphical User Interface, GUI)开发工具包,使用 Qt 软件库来 实现。它可以帮助开发人员使用 Python 语言来轻 松创建桌面应用程序,由于 Qt 本身已经是一个跨平 台的 GUI 工具包,因此使用 PyQt 也可以方便地实 现跨平台的应用程序开发^[17]。

本系统的操作界面使用 PyQt 工具包进行创建, 具体流程包括以下两个步骤:首先利用 Qt Designer 或 PyQt 自带的 Qt Creator 设计 UI 界面,将所需的部 件布置到主窗口上,例如按钮、标签、文本框等,并设 置其属性和布局。其次是编写主程序,在主程序中 编写完整的业务逻辑代码实现真空数据读取与显 示,开关分子泵和真空阀以及系统联锁保护等功能。

信号与槽机制(Signal and Slot)是 Qt 框架中一 种常见的事件处理机制,通过信号和槽实现组件之 间的通信,当一个对象发出信号时,槽函数会自动 被执行,完成相关操作。在这种机制下,可以方便 的完成开关分子泵和真空阀门的操作,例如把点击 分子泵的启动按钮作为一个信号发送出去,那么与之 关联的槽函数将会被自动的调用,所以只需要在槽 函数中编写启动分子泵的业务逻辑代码,当点击启 动按钮时系统就会自动完成启动分子泵的操作。 这种机制使应用程序中各个部分之间可以解耦合, 从而实现更加灵活、高效、可维护的代码的设计^[18]。

系统软件的主程序工作流程如图 4 所示。利 用 Python 的多线程技术同时读取各点真空度以及 磁体温度值,从而提高程序的效率和并发性。通过 串口向真空设备发送读取数据的指令,然后比较回 读的真空度是否低于正常工作范围,如果低于正常 范围则采取必要的联锁措施,发出报警信号并关闭 所有的真空阀门和分子泵。同时系统还考虑了采 样时间的设定,利用 Python 的定时器功能绑定数据 保存事件,只有当定时器溢出的时候才把数据保存 为文件,这样方便实验人员灵活选取采样时间。





系统的数据采集和显示界面如图 5 所示。它 的主要功能包括:

(1)真空设备的远程控制。当启动主程序打开 系统界面之后,就可以点击启动停止按钮来远程控 制真空泵组和真空阀门的开启和关闭。

(2)真空数据和温度数据实时采集和显示。开 启多线程持续向各真空规管和温度传感器访问数 据,各线程之间相互独立,互不干扰,能同时获取多 路真空数据和温度数据并实时显示在窗口界面上, 在右下角同时显示内真空腔室和注气系统的真空



图5 中能段 EBIT 真空控制系统界面 Fig. 5 Interface of the intermediate energy EBIT vacuum control system

曲线,能够更加直观的掌握真空的变化趋势,当通 过差分气体注入系统向阱区注入 Ar、Kr、Xe等稀 有气体时,通过观察系统真空的实时变化可以估算 出注入的气体量,方便通过调节注气阀门以控制目 标气体的注入量。

(3)自动保存数据并生成历史曲线。为了了解整轮实验或者某一段时间内真空的整体变化趋势, 或者在系统故障时为实验人员提供分析依据,系统 还应自动把真空数据保存到文件里面并存储在指 定的系统目录下面,生成历史曲线,形象直观的反 映出系统运行的历史趋势。

(4)实现系统安全联锁。系统界面上的指示灯 会以不同颜色实时显示各个真空阀门和真空泵的 工作状态,能更加直观地掌握各真空设备的运行状 态,同时可以通过设定真空阈值,当真空度低于真 空阈值时产生报警信号,并关闭各真空阀门和分子 泵,保护装置和实验人员的安全。

4 真空控制系统测试

根据系统的布局完成中能段 EBIT 真空系统的 安装,连接好各设备的电源电缆线并挂载到 RS485 总线网络上,由 IPC 作为主设备,其余的真空设备 作为从设备,为每个设备分配唯一的地址,开始进 行测试。真空系统测试平台如图6所示。

首先打开真空控制系统操作界面,先后打开机 械泵和真空阀门,从真空实时显示界面可以看到系 统的真空慢慢降低,当真空显示界面显示真空度优 于1Pa时,点击分子泵启动按钮打开各分子泵对中 能段 EBIT 真空系统进行抽气,系统真空迅速下降。 经过大约5天的抽真空时间,系统的真空度达到 7.6×10⁻⁶Pa,设定系统真空联锁阈值为1×10⁻⁴Pa,打 开微量气体注入系统的阀门向离子阱区注入少量



图6 真空系统测试平台 Fig. 6 Test platform for vacuum system

. . .

Ar, 观测到系统真空迅速上升, 图 7 表示的是注入 Ar 前后一段时间内真空的变化趋势。

图 8 表示的是系统内真空超过真空阈值时系 统变化情况,如图可知当持续向离子阱区注入 Ar, 当系统真空度低于 1×10⁻⁴ Pa 时,联锁系统触发关闭 了所有的真空阀门和分子泵,真空控制界面上的真 空指示灯亮红灯,提醒实验人员真空出现异常。整 个测试过程中磁体的温度变化趋势如图 9 所示。制 冷机开机以后经过 20 个小时制冷,磁体温度降到 6.5 K 并保持稳定,超导的临界温度为 9 K,说明磁 体已进入并可以保持超导状态。



图7 注入 Ar 后内真空变化趋势

Fig. 7 Internal vacuum variation trend after Ar injection



图8 系统内真空超过阈值时系统的状态





Fig. 9 Temperature variation trend of magnets

5 结论

为了实现中能段 EBIT 实验平台各真空单元真 空度地实时监测与控制,为中能段 EBIT 装置营造 稳定可靠的超高真空的实验环境,本文基于 RS485 总线结构和 Python 编程语言设计的中能段 EBIT 真 空控制系统,实现了各单元真空数据的实时采集显 示,真空设备的远程控制和系统真空联锁保护功能。 系统采用集成控制方式方便对多个真空设备的监 控和管理,极大地改善了系统工作效率,提高了数 据的可靠性。经过系统测试,真空系统可以长期稳 定的运行,磁体温度和各测量点的真空均满足实验 要求,系统具有完备的联锁保护功能,可以保障 人员和设备的安全,缩短了故障恢复时间,提高了 工作效率,增强了整套系统的可靠性。在测试及 实验过程中,真空获得设备和真空测量设备均稳定 可靠无故障,这表明真空控制系统能够长时间稳定 工作。

参考文献

- [1] Bin B, Zhang H M, Yang Y, et al. Conceptual design of impurity spectrum research platform based on intermediate energy electron beam ion trap[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(03): 16-22 (宾斌, 张洪明, 杨洋, 等. 基于中能 段电子束离子阱的杂质光谱研究平台的概念设计 [J]. 核技术, 2021, 44(03): 16-22(in chinese))
- [2] Levine M A, Marrs R E, Henderson J R, et al. The electron beam ion trap: a new instrument for atomic physics measurements[J]. Physica Scripta, 1988, T22: 157–163
- [3] Steven R E. Studies of highly charged ions with EBIT and super-EBIT[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B, 1995, 98(1): 114–121
- [4] Utter S B, Beiersdorfer P, Träbert E. Electron-beam iontrap spectra of tungsten in the EUV[J]. Canadian Journal of Physics, 2002, 80(12): 1503–1515
- [5] Knapp, Beiersdorfer, Chen, et al. Observation of interference between dielectronic recombination and radiative recombination in highly charged uranium ions.[J]. Physical review letters, 1995, 74(1): 54–57
- [6] Neill P, Harris C, Safronova A S, et al. The study of Xray M-shell spectra of W ions from the Lawrence Livermore National Laboratory Electron Beam Ion Trap[J]. Canadian Journal of Physics, 2004, 82(11): 1503–1515
- [7] Li W X, Shi Z, Yang Y, et al. Tungsten spectroscopy in the EUV range observed at a high-temperature superconducting electron-beam ion trap[J]. Physical Review A, 2015, 91(6): 62501
- [8] Lu D. Optimization and renovation of Shanghai EBIT[D]. Shanghai: Fudan University, 2013 (路迪. 上海 EBIT 装 置优化改造 [D]. 上海: 复旦大学, 2013(in chinese))
- [9] Frederick J C, Junji A, Koichi I, et al. A new versatile electron-beam ion trap[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1996, 65(10): 3186–3192
- [10] Congretel G, Rouvière N, Visentin B. Ultra high vacuum technology applied for the design of warm EBIS or EBIT

ion sources[J]. Vacuum, 1995, 46(8): 777-780

- [11] Li X P, Peng X H, Zhang T, et al. Lab-Built reactor for fabrication of 500 kV Ga As photocathode used in DC electron gun of energy recovery linac[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(11): 1155–1159 (李小平, 彭晓华, 张铜, 等. GaAs 光阴极制 备装置的超高真空系统研制 [J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(11): 1155–1159(in chinese))
- [12] Xiao J. Construction of research methods based on EBIT spectroscopy and development of ultra-low energy EBIT[D]. Shanghai: Fudan University, 2011(肖君. 基于 EBIT 光谱学研究手段建设及超低能 EBIT 的研制 [D]. 上海: 复旦大学, 2011)
- [13] Bin B. Development of a platform forthe study of impurity spectrum based on medium energyelectron beam ion trap[D]. Hifei: University of Science and Technology of China, 2022 (宾斌. 中能段电子束离子阱杂质光谱研究 平台研制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022)
- [14] An S L, Jiang D K, Guo P L. Vacuum control system for the Shanghai Electron Beam Ion Trap Facility[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(2): 109–113 (安双利, 蒋迪奎, 郭 盘林. 上海电子束离子阱装置真空控制系统 [J]. 核技术, 2007, 30(2): 109–113(in chinese))
- [15] Wang F D, Wang Z F, Chang K, et al. New Multifunctional Industrial Wireless Network Adapter[J]. Energy Procedia, 2017, 118: 95–103
- [16] Chen H, Yan S, Liu S, et al. Distributed high-precision data acquisition system based on RS485 bus[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(2): 71-74,79 (陈航, 严帅, 刘胜, 等. 基于 RS485 总线的分布式高精度数据 采集系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(2): 71-74,79(in chinese))
- [17] Wu C B, Chen W, Zhao Z H, et al. Development of SH-PB experimental data processing program based on PyQt[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(12): 11-13,80 (吴春波,陈伟,赵振华,等. 基于 PyQt 的 SHPB 试验数据处理程序开发 [J]. 计算机应用 与软件, 2021, 38(12): 11-13,80(in chinese))
- [18] Jin F, Cui P L. Study on the signal and slot mechanism in embedded Qt[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(24):168–170 (金繁, 崔培雷. 嵌入式 Qt 中信号与槽 机制的研究 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(24):168–170 (in chinese))