

核聚变高功率直流测试平台实时控制系统设计

何诗英¹, 黄连生^{1,2*}, 陈晓娇¹, 张秀青¹, 王泽京¹, 左英¹, 张稀楠³

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽省 合肥市 230026; 2. 中国科学技术大学物理系, 安徽省 合肥市 230026; 3. 西澳大学工程学院, 澳大利亚 珀斯市 6009)

Design of Real-Time Control System for Nuclear Fusion High-Power DC Test Platform

HE Shiyang¹, HUANG Liansheng^{1,2*}, CHEN Xiaojiao¹, ZHANG Xiuqing¹, WANG Zejing¹, ZUO Ying¹, ZHANG Xinan³

(1. Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, Anhui Province, China; 2. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui Province, China; 3. School of Engineering, The University of Western Australia, Perth 6009, Australia)

摘要:【目的】为支持国际热核实验堆交流/直流变流器系统的测试需求, 并适用于未来聚变磁体电源的高精度控制标准, 研发了一套适用于高功率直流测试平台的实时控制系统。【方法】选择QNX实时操作系统作为核心平台, 并结合美国GE公司提供的反射内存技术, 构建了一个实时高速数据交换的网络架构。该系统设计了多种运行模式以应对不同的测试场景, 同时实施了不同等级的安全连锁机制来保障设备的安全性。此系统具备变流器运行参数的设定、故障识别、设备状态监测及毫秒级别的实时控制与安全保护功能。【结果】经由实验验证, 该系统展示了其在高功率环境下的稳定性和可靠性, 实现了对120 kA稳态电流和500 kA脉冲电流的精确控制。此外, 该系统不仅满足了实时控制的基本要求, 而且在多模式操作中确保了设备的安全连锁和持续稳定运行。【结论】所设计的高功率直流测试平台实时控制系统实现了高效的多模块同步控制, 完全符合严苛的毫秒级控制周期要求。

关键词: 国际热核实验堆; 核聚变; 聚变磁体电源; 实时控制; 反射内存; 变流器; 连锁保护

ABSTRACT: [Objectives] In order to support the testing requirements of the international thermonuclear experimental reactor AC/DC converter system and apply to high-precision control standards for future fusion magnet power supplies, a real-time control system suitable for high-power DC test

platforms was developed. [Methods] Choosing the QNX real-time operating system as the core platform and combining it with reflective memory technology provided by GE company in the United States, a network architecture for real-time high-speed data exchange was built. The system was designed with multiple operation modes to cope with different testing scenarios, while implementing different levels of safety interlocking mechanisms to ensure equipment safety. This system possessed the capabilities of setting converter operating parameters, fault identification, equipment status monitoring, and millisecond-level real-time control and safety protection functions. [Results] Experimental validation has demonstrated the system's stability and reliability in high-power environments, achieving precise control of 120 kA steady-state current and 500 kA pulse current. Furthermore, the system not only meets the basic requirements of real-time control but also ensures safe interlocking and continuous stable operation of the equipment during multi-mode operation. [Conclusions] The designed real-time control system for the high-power DC test platform achieves efficient multi-module synchronous management and fully complies with strict millisecond-level control cycle requirements.

KEY WORDS: international thermonuclear experimental reactor; nuclear fusion; fusion magnet power supplies; real-time control; reflective memory; converter; interlock protection

基金项目: 国家自然科学基金项目(52207034); 安徽省自然科学基金项目(2208085UD08); 合肥市自然科学基金项目(202313)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52207034); Natural Science Foundation of Anhui Province (2208085UD08); Hefei Natural Science Foundation (202313).

0 引言

为了满足未来工业电力系统及科学研究的可持续发展需求, 以及完成国际热核实验堆

(international thermonuclear experimental reactor, ITER) AC/DC 变流器系统的测试试验, 中国科学院合肥物质科学研究院于2011年建成了国内最大的高功率直流测试平台^[1-2]。4套基于晶闸管的AC/DC变流器模块采用灵活可调的串并联控制方式实现了额定稳态直流电流120 kA输出和500 kA脉冲电流输出的能力^[3]。直流测试平台主要由2台整流变压器、4台变流器模块和4台直流平衡电抗器组成, 每台变流器的额定电压为500 V, 额定电流为30 kA, 脉冲直流电流可达100 kA/s。4台变流器模块可根据试验参数需要采取不同的串并联连接方式^[4-5]。

测试平台测控系统包括实时控制系统、数据采集及存储系统、设备状态检测及监控系统^[6]。具体如下:

1) 实时控制系统。该系统用于设定整流器运行参数如波形预设、整流器运行模式设置、整流器控制模式设置、整流器启动及停止等功能, 完成整流器开环、闭环控制运行, 根据整流器运行参数实时改变整流器运行模式, 整流器故障的快速检测及保护。在设备故障而电子保护失效时, 对变压器、整流器进行故障联锁保护; 在紧急情况下对人及设备安全进行保护。

2) 数据采集及存储系统。该系统用于测量变压器、整流器及主回路的电压、电流等信号, 将所测量数据集中存储, 通过专用数据浏览器查看。此系统为满足数据浏览需要, 采样速率不可以低于信号频率10倍, 且要尽可能高, 目前每通道采样频率为10 kHz。

3) 设备状态检测及监控系统。该系统用于周期性检测变压器、整流器及开关设备状态, 并在监控计算机内集中显示, 同时完成开关、变压器设备的远程操作。

为了满足高功率测试平台严苛的实时响应需求, 本文选择QNX实时操作系统作为开发平台, 利用其自带的微图形软件开发人机交互界面, 采用反射内存网络实现实时数据高速交互, 完成实时控制系统的设计, 实现对测试平台电源系统的实时控制和保护。实时控制系统各个部分通过网络互联, 根据对网络数据通信实时性要求差异及

功能差异, 将实时控制系统数据网络分为反射内存实时网络、以太网2种不同作用的网络, 各个网络彼此独立, 所有设备均在所属网络的同一层, 不形成分层递阶系统, 以保证数据传输效率。

1 实时控制系统构建

1.1 系统平台组成

如图1所示, 实时控制系统由控制操作器、主控制器、本地控制器以及联锁控制器组成。控制操作及实时控制部分由于数据通信周期短, 要求数据交互具备严格实时性, 因此选择采用低延时高速传输的实时网络。而设备状态检查及报警数据通信周期为20~100 ms, 采用宽带以太网完成慢速信号通信。

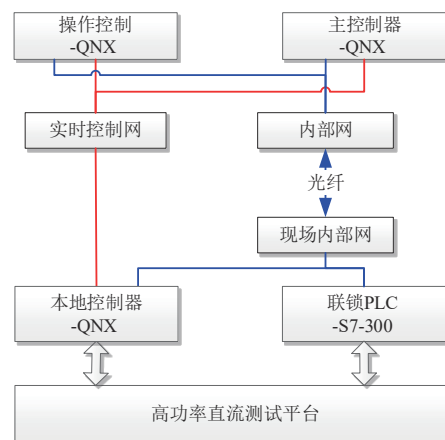


图1 实时控制系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of real-time control system

1) 控制操作。采用3U cPCI高性能计算机为硬件平台, 配备反射内存(RFM)卡一块、千兆以太网卡一块, 完成波形预设、运行模式设置、控制模式设置及简单的实时数据显示功能。

2) 主控制器。采用3U cPCI高性能计算机为硬件平台, 配备RFM卡一块、输入输出(DI/DO)卡一块。对操作节点发送的操作命令响应, 在开环运行模式下对预设波形进行解析, 按照程序运行周期给本地控制器(local controller, LC)发送控制电压数据; 在闭环运行模式下根据反馈电流进行比例积分(proportional integral, PI)反馈运算, 每个程序周期给LC控制电压数据。反馈的电流数据通过RFM网络读取, 反馈电流采集由LC完成。

在运行过程中通过DI/DO卡读取以下信息：手动安全连锁、故障急停。当检测到上述故障时，即刻运行故障处理程序，DI读取外部程序退出命令，通过DI/DO卡输出声光报警信号。

3) 本地控制器。采用6U cPCI高性能计算机为硬件平台，配备RFM内存卡1块、DI/DO卡1块、A/D卡1块、alpha控制卡8块。通过A/D卡实时检测桥电流及主回路电流，根据桥电流及主回路电流自动切换整流桥工作状态，并根据主控节点发送的控制电压信号转换成整流桥触发脉冲信号，完成整流器控制。通过DI/DO卡实时检测手动安全连锁、故障急停、短路硬件连锁，整流器熔断器状态量、水温、水压等信号，在上述故障之一出现后即刻运行故障处理程序。

4) 联锁保护控制器。采用西门子S7-300系列PLC，配备DI/DO等模块。DI模块巡检过流硬件保护节点、现场急停按钮节点、操作室急停按钮节点，通过DO模块输出控制信号，快速分段变电所空气绝缘开关。

1.2 系统平台选择

实时操作系统(real-time operating system, RTOS)又称即时操作系统，它会按照排序运行、管理系统资源，并为开发应用程序提供一致的基础。当外界事件或数据产生时，能够接受并以足够快的速度予以处理，其处理的结果又能在规定的时间之内来控制生产过程或对处理系统作出快速响应，并控制所有实时任务协调一致运行的操作系统。实时操作系统是保证在一定时间限制内完成特定功能的操作系统^[7-9]。

QNX(Quick Unix)是由加拿大QSSL公司开发的分布式实时操作系统，该系统采用独特的微内核实时平台，相比于Windows、Linux等大型操作系统，QNX内核极小且运行速度极快^[10]，并且有专有的轻量级网络通信协议Qnet，使得整个网络中安装有QNX操作系统的控制器类似于一台大型的电脑。整个QNX操作系统是由微内核调度管理的一组进程的集合，主要有线程、消息传递、信号、时钟、定时器、中断处理、信号灯、互斥锁、屏障^[11]。整个操作系统都建立在这些调用之上，支持完全抢占式的调度。因此本文选择了

QNX6.5.0作为实时控制系统内控制器的系统开发运行平台。

1.3 实时通信网络

由于严苛的1 ms实时控制周期的要求，因此构建一个高速、高带宽的实时网络，实现与4套控制整流器的本地控制器之间进行数据交换。经过对实时以太网、现场总线、反射内存网络等工业网络实验测试后，选择了反射内存网络作为实时网络，网络硬件设备采用美国GE公司的反射内存设备。反射内存实时控制网络是实时控制系统的核心网络。

GE公司的VMIC反射内存是支持环形、星形，基于内存的高速复制实时网络的设备，其所有的数据传输都是由硬件完成的，没有额外的软件开销。并且采用的传输介质是光纤，因此其数据传输率可以达到数十兆字节，传输延迟在百纳秒级以内，其传输延迟是确定和可以预期的^[12]。在操作控制器、主控制器和本地控制器上分别插入VMIC反射内存卡，通过局部内存映射将数据映射到主机内存，用户读写的数据就如同在主机内存上读写数据一样快速方便。另外，通过网络内存映射到一个虚拟的全局内存，而这个全局内存是所有分布节点都可共享的，从而实现了分布节点间的实时数据通信。

1.4 联锁及保护

根据保护原则，设置不同等级的联锁及保护，与之对应的保护措施如表1所示。系统检测测试平台设备状态，根据表1所列状态描述，控制器执行相应的动作进行联锁保护，保证变流器及设备的安全。

1.5 运行控制模式

高功率直流测试平台的变流器在不同的工作模式下工作，以满足不同的测试要求。如表2所示，工作模式包括单变流器工作模式、变流器并联工作模式和变流器串联工作模式。直流隔离器阵列可以根据不同的试验要求，改变电路连接方式，实现多种工作模式。根据所需要的最大电压纹波和电流纹波，在不同的位置设置自耦变压器，有助于在某些情况下减小电流纹波。

表1 联锁保护

Tab. 1 Interlock protection

联锁级别	描述	动作
I 级	PLC 检测熔断器信号,任何熔断器损坏都会触发保护	整流器逆变
	PLC 检测水冷却系统,缺水或水温过高将触发保护	整流器逆变
	PLC 检测母排,母排温度过高将触发保护	整流器逆变
	检测安全钥匙状态,安全钥匙拔出将触发保护	整流器逆变
	电流传感器信号异常,将触发保护	整流器逆变
II 级	主回路或桥电流过流,将触发保护	整流器逆变
	66 kV 掉电	禁止启动
	如果主回路电流或桥接电流触发硬件过流保护,联锁 PLC 快速触发保护信号并断开高压	断开高压
	当监控人员在现场检测到危险情况时,紧急按钮信号将被激活,该信号将触发来联锁 PLC,以快速断开高压	断开高压

表2 运行模式

Tab. 2 Operation modes

运行模式	整流器模块	参数
单桥运行	CU1/CU2/CU3/CU4	30 kA/0.5 kV
两桥并联	CU1&CU2/CU3&CU4	60 kA/0.5 kV
四桥并联	CU1&CU2&CU3&CU4	120 kA/0.5 kV
两桥串联	CU1&CU2/CU3&CU4	30 kA/1.0 kV
四桥串联	CU1&CU2&CU3&CU4	30 kA/2.0 kV

1.6 人机交互界面

控制操作引入图形化、友好、集中的操作监控界面作为控制系统的人机交互界面。采用 QNX 系统自带的 Photon micro GUI(Photon 微图形用户接口)开发出与 Windows 操作风格相似的操作监控平台。

Photon 最重要的特点在于表现图形应用程序

的方法^[13]。它使用了一系列的区域,并且这些区域按一定的顺序依次排列,形成了一个抽象的三维事件空间(event space)。每一个矩形被称作区域(region)。这些区域能够发生和接收特定的对象,这些对象被称为事件(events),如图2中箭头所示,它们像光子(photon)一样,穿梭在事件空间中的区域之间,当与空间中的区域发生碰撞时,对该事件类型敏感的区域就会在拥有该区域的应用程序界面上调用相应的程序,实现与用户的交互。

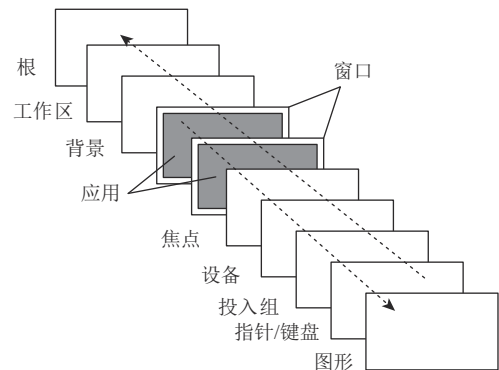


图2 事件空间结构

Fig. 2 Event space structure

图3为人机交互界面设计框架,如图3所示,操控系统通过反射内存网络定时读取主控制系统上传的数据,通过用户数据报(user datagram protocol, UDP)协议下发控制命令,波形预设,配置设置,通过 Telnet 协议远程启动和终止实时控制系统的进程,实时显示直流测试平台的状态和电源主回路的电流波形。操控系统使用 PtTty 控

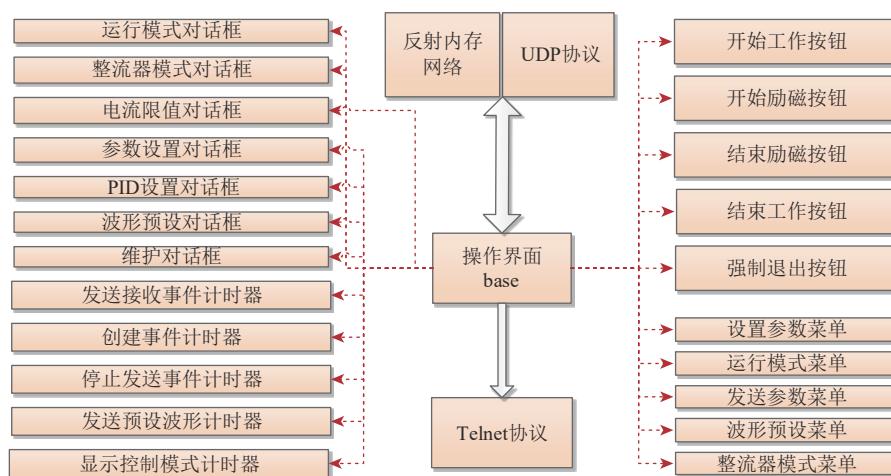


图3 人机交互界面设计框架

Fig. 3 Design framework of man-machine interface

件实现由 Telnet 协议远程登录实时控制系统并启动其各自的进程。PtTty 控件是 PhAB 图形界面程序开发环境提供的一个终端控件，打开一个伪终端执行 shell 命令，类似一个真正的终端，并且能够进行模拟键盘输入。

图4为操控系统的人机交互界面，实现了启停控制器程序、控制器程序运行信息显示、整流器运行模式选择、配置信息设置及发送、时序操作以及状态信息显示等功能。

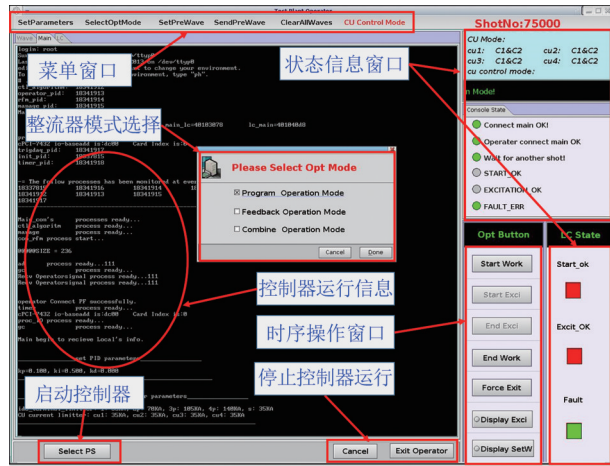


图4 人机交互界面示意图

Fig. 4 Diagram of human-computer interaction interface

1.7 本地控制设计

本地控制器实时采集桥电流及主回路电流，根据桥电流和主回路电流自动切换整流桥的工作状态，并从反射内存实时控制网读取来自主控制系统的控制信号后，对其进行整流器实时控制运算，实现对直流测试平台整流器的脉冲封锁以及移相控制。同时把各个极向场电源状态信息通过反射内存实时控制网络返送给主控制系统；通过数字量输入输出卡实时检测手动安全连锁、故障急停、短路硬件连锁，以及整流器熔断器状态量、水温、水压等信号，在上述故障之一出现后即刻运行故障处理程序。实时控制周期为 1 ms。

基于 cPCI 的数字 alpha 控制卡是本地控制的核心模块，采用所设计的 alpha 控制卡组建控制。在一个 cPCI 标准控制计算机内可通过不同配置满足整流器的不同控制需求。根据实时参考电压，由 CPU 计算触发角度，通过 alpha 控制器实现变

流器控制，并触发脉冲的产生^[14-15]。Alpha 控制卡将触发信号通过光纤将相应时间的触发脉冲发送到晶闸管。每个变流器模块由一个独立的 alpha 控制卡控制。本地控制器的配置如图5所示。模拟量输入控制器用于采集电流电压等模拟量信号输入进行多变量反馈控制，数字量输入输出控制器用于数字信号输入和输出，进行连锁保护。

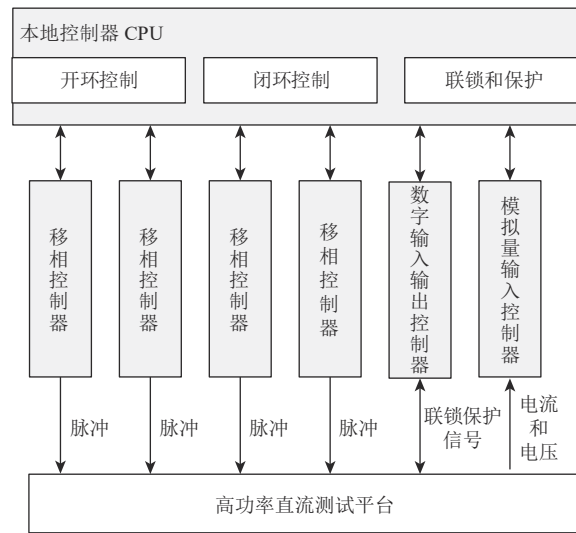


图5 本地控制框图

Fig. 5 Control block of local controller

2 实验测试

实验测试平台如图6所示，直流实验装置由4个30 kA /0.5 kV变流器组成，根据参数设置可以在不同的模式下运行，以实现不同的输出要求。

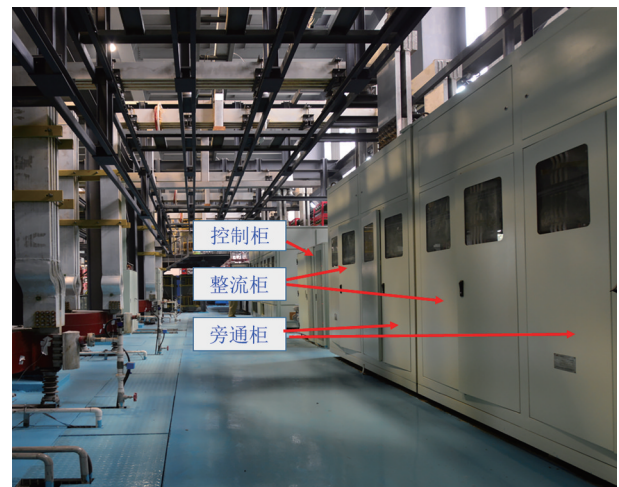


图6 高功率直流测试平台

Fig. 6 High power DC test platform

当4个变流器模块并联时，稳态输出额定电流为120 kA，输出直流持续大电流，用于超导线圈测试、高温引线测试、直流断开测试等。

在稳态运行时，采用电流闭环控制。额定电流为120 kA时的典型实验结果如图7所示。

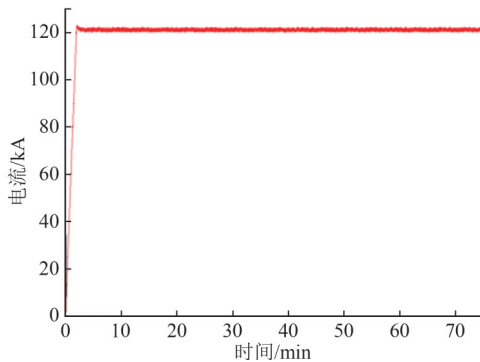


图7 120 kA 稳态电流测试波形

Fig. 7 120 kA steady state current waveform

3 结论

设计了高功率直流测试平台实时控制系统，其拓扑结构和设计方法经过严格的实验验证，得出以下结论：

1) 该系统成功实现了对多模块的高效精准实时控制，满足了毫秒级控制周期的严格要求，并已经顺利通过CNAS认证，证明了其稳定性与可靠性。

2) 该系统在工业、轨道交通、电力等多个领域的高功率测试任务中将展现出巨大的应用潜力。

3) 该系统为高功率电气设备的性能评估提供了坚实的技术基础与高效的测试平台。

参考文献

[1] LUCHETTA A, MANDUCHI G, TALIERCIO C, et al. Overview of instrumentation and control in the neutral beam test facility[C]//European Conference on Circuit Theory and Design. Catania, Italy: ECCTD, 2017: 1-4.

[2] FU P, GAO G, XU L W, et al. Review and analysis of the AC/DC converter of ITER coil power supply[C]//2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference. Palm Springs, USA: APEC, 2010: 1810-1816.

[3] FU P, GAO G, SONG Z Q, et al. Preliminary

design of the poloidal field AC/DC converter system for the ITER coil power supply[J]. Fusion and Technology, 2013, 64(5): 741-747.

- [4] TAO J, BENFATTO I, GOFF J K, et al. ITER coil power supply and distribution system[C]//2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. Chicago, USA: IEEE, 2011: 6052201.
- [5] CHEN X J, HUANG L S, FU P, et al. Overview of CASHIPS high-power electrical equipment test facility[C]//2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference. Singapore: IEEE, 2018: 8635843.
- [6] CHEN X J, HUANG L S, FU P, et al. System realization of CASHIPS DC high power test facility[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(2): 101-108.
- [7] 张俊霖, 王世好. 实时操作系统综述[J]. 电脑知识与技术, 2011, 7(18): 4491-4494.
- ZHANG J L, WANG S H. Summary of real-time operating system[J]. Computer Knowledge and Technology, 2011, 7(18): 4491-4494.
- [8] 何诗英, 黄连生, 高格, 等. 基于实时Linux的极向场电源主控制系统的设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2018, 38(1): 93-98.
- HE S Y, HUANG L S, GAO G, et al. Design of master control system for poloidal field power supply based on real-time Linux[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2018, 38(1): 93-98.
- [9] 窦维维, 李萌, 马志刚, 等. 核电仪控实时操作系统软件需求研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(11): 97-101.
- DOU W W, LI M, MA Z G, et al. Requirements research on nuclear power instrumentation and control real-time operating system software[J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44(11): 97-101.
- [10] 许学芳. 一种嵌入式QNX系统的安装方法[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(2): 31-33.
- XU X F. Installation method of embedded QNX system[J]. Integrated Circuits and Embedded Systems, 2020, 20(2): 31-33.
- [11] 何诗英, 傅鹏, 杨亚龙. 基于QNX的EAST极向场电源现场层实时控制的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表, 2012(1): 44-47.
- HE S Y, FU P, YANG Y L. QNX-based real-time control system design for EAST pf power supply site equipments[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012(1): 44-47.
- [12] ZHENG R, HE S Y. Research and realization of reflective memory network based on QNX[C]//

International Conference on Computer & Automation Engineering. Singapore: IEEE, 2010: 5451935.

- [13] 段菖蒲, 傅鹏. 基于QNX的操作监控平台的设计与实现[J]. 计算机工程, 2006, 32(22): 218-221.

DUAN C P, FU P. Design and implementation of operation monitor platform based on QNX OS[J]. Computer Engineering, 2006, 32(22): 218-221.

- [14] 黄连生, 傅鹏. ITER高压大功率整流器控制系统的优化设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1785-1791.

HUANG L S, FU P. Optimization design of control system of ITER high-voltage power converter[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1785-1791.

- [15] 陈婕, 姜建国. 升压型PWM整流器-逆变器多级串联仿真[J]. 电源学报, 2011, 9(6): 25-28.

CHEN J, JIANG J G. Simulation of multi-level cascade boost PWM rectifier-inverter[J]. Journal of Power Supply, 2011, 9(6): 25-28.

收稿日期: 2024-08-05。

修回日期: 2024-09-08。

作者简介:



何诗英

何诗英(1972), 女, 高级工程师, 研究方向为磁体电源控制, shyinghe@ipp.ac.cn;



黄连生

黄连生(1983), 男, 博士, 研究员, 主要从事聚变磁体电源研究, 本文通信作者, huangls@ipp.ac.cn。

(责任编辑 辛培裕)