

质子重离子加速器冷却水多回路恒压系统设计与应用

李万宏^{1,2,3}, 叶翔^{1,2,3}, 赵秀龙^{1,2,3}, 葛永胜^{1,2,3}, 朱春杰^{1,2,3}

(1. 上海市质子重离子医院, 上海 201321; 2. 上海市放射肿瘤学重点实验室(20dz2261000), 上海 201321;
3. 上海质子重离子放射治疗工程技术研究中心, 上海 201321)

摘要: 质子重离子加速器是应用于肿瘤放射治疗的大型医学装备, 系统初始设计中没有为各分支循环水回路设置备用定压装置, 一旦任何一个循环水回路的在线定压装置(online constant pressure devices, OCPD)故障, 将造成质子重离子加速器停机, 系统可靠性较差。已有应对措施虽然提高了故障处理的效率, 却不能从根本上解决因 OCPD 故障造成的停机问题。为提高重离子加速器运行可靠性, 设计多回路恒压系统, 解决在线定压装置故障造成的停机问题。所采用方法包括设置应急定压装置(emergency constant pressure device, ECPD)、PLC、通讯模块等部件, 自动检测各循环水回路在线定压装置的实时工作状态。应急定压装置能与故障的在线定压装置参数匹配, 实现故障状态时自动切换。结果表明, 应急切换时, 各系统压强波动均控制在容许值以内, 实现无停机切换。多回路恒压系统减少了质子重离子加速器循环冷却水系统的故障停机时间, 具有实用性, 对于多回路循环冷却水系统的设计与运行可靠性提升具有参考价值。

关键词: 定压装置; 质子重离子; 加速器; 冷却水; 应急装备

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0042-05

Design and application of proton and heavy ion accelerator cooling water's multi-loop constant pressure system

LI Wanhong^{1,2,3}, YE Xiang^{1,2,3}, ZHAO Xiulong^{1,2,3}, GE Yongsheng^{1,2,3}, ZHU Chunjie^{1,2,3}

(1. Shanghai Proton and Heavy Ion Center, Shanghai 201321, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Radiation Oncology (20dz2261000), Shanghai 201321, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Proton and Heavy Ion Radiation Therapy, Shanghai 201321, China)

Abstract: Proton heavy ion accelerator is a large-scale medical equipment used in tumor radiotherapy. The initial design of the system not includes backup constant pressure devices for each branch circulating water circuit. Once any online constant pressure devices (OCPDs) failure occurs in the circulating water circuit, it causes the proton heavy ion accelerator to shut down, resulting in poor system reliability. Although existing measures improve the efficiency of fault handling, they cannot fundamentally solve the shutdown problem caused by OCPD faults. A multi-loop constant water pressure system is designed to improve the operation reliability of proton and heavy ion accelerator, and solve the shutdown issues caused by online constant pressure devices (OCPDs). The methods include setting emergency constant pressure device(ECPD), PLC, communication modules and other components to detect the real-time working status of the OCPDs automatically. The ECPD matches the parameters of the failure OCPD to realize automatic switching. The results show that switching pressure fluctuation of all system are controlled within the allowable value, thereby realizing non-stop switching. Multi-loop constant water pressure system reduces the downtime and improves the reliability of proton and heavy ion accelerator, it is practical and has reference value for improving the design and operational reliability of multi loop circulating cooling water systems.

Keywords: constant pressure device; proton and heavy ion; accelerator; cooling water; emergency equipment

0 引言

质子重离子加速器是应用于肿瘤放射治疗的大型医学装备, 循环冷却水系统是其重要辅助设施, 通过多层循环冷却水, 将运行过程中产生的热量带走。质子重离子加速器对循环冷却水可靠性有严格要求, 循环水温度波动控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内^[1], 压强波动控制在 $\pm 0.02\text{ MPa}$ 以内^[2]。冷却水系统各回路的在线定压装置 OCPD 采用高精度隔

膜空气压缩式定压装置, 然而, 系统初始设计中没有为各分支循环水回路设置备用定压装置, 一旦任何一个循环水回路的 OCPD 故障, 将造成质子重离子加速器停机, 系统可靠性较差。针对这一问题, 基础应对方法包括在现场配备足够的备件, 出现故障时及时维修; 定期对设备进行拆卸检查, 处理故障隐患; 使用一台移动的应急设备, 在 OCPD 故障时作整体更换^[3]。这些应对措施虽然提高了故障处理的效率, 却不能从根本上解决因 OCPD 故障造成的停机问题。对此, 设计循环冷却水多回路恒压系统, 实现各循环水回路 OCPD 故障时无停机切换, 提高质子重离

* 基金项目: 上海市科学技术委员会生物医药领域定向项目(22DX1900200)

收稿日期: 2024-03-05

子加速器运行可靠性。

1 系统设计

1.1 系统结构

质子重离子加速器冷却水多回路恒压系统包括应急定压装置 ECPD、压强传感器、开关阀门、定压罐、通讯控制器、主通讯控制器、主控制系统、人机界面。通过管道、通讯线路与原冷却水系统各回路 OCPD 连接。系统的结构如图 1 所示。各模块编号、中英文名称与功能说明见表 1。

纯水系统 (pure water system, PWS) 与 OCPD1 至 OCPD5, 以及 ECPD 连接。当 OCPD 均正常运行时, ECPD 处于待机状态, 各冷却水子系统由 OCPD 进行恒压控制, 运行状态信号通过通信控制器 CC1 至 CC5 与主通信控制器 MCC 连接, 由 MCC 将信号送入主控制系统 MCS。MCS 实时监控各 OCPD 的状态。定压罐 CPT 安装在距离应急定压装置最远的位置, 在罐内充氮气保持管道内的基础压强, 可减少因管道距离过长造成的补水压强波动。

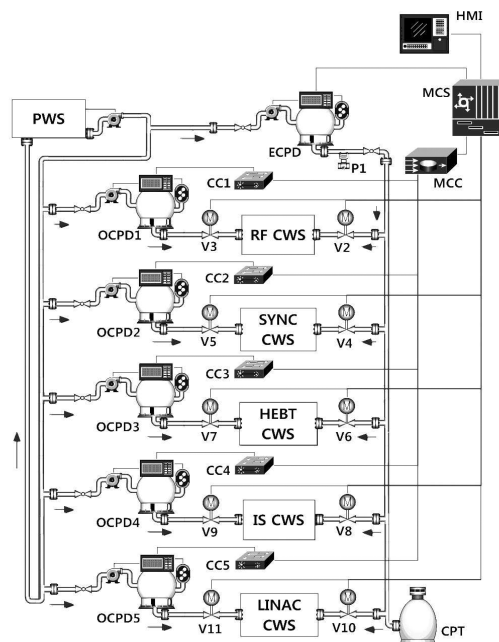


图 1 系统原理图

表 1 模块功能说明

编号	英文名称	中文名称	功能
PWS	Pure water system	纯水系统	生产纯水, 通过定压装置与各循环水系统连接。
OCPD1 ~ OCPD5	Online constant pressure device	在线定压装置	提供各循环水系统在线恒压补水功能, 包括 OCPD1 ~ OCPD5
RF CWS	Radio frequency cooling water system	射频冷却水系统	射频部分的冷却功能
SYNC CWS	Synchrotron cooling water system	同步加速器冷却水系统	同步加速器部分的冷却功能
HEBT CWS	High energy beam transport cooling water system	高能束流传输线冷却水系统	高能束流传输部分的冷却功能
IS CWS	Ion source cooling water system	离子源冷却水系统	离子源部分的冷却功能
LINAC CWS	Linac cooling water system	直线加速器冷却水系统	直线加速器部分的冷却功能
ECPD	Emergency constant pressure device	应急定压装置	提供 OCPD1 ~ OCPD5 中任一设备故障时的替代恒压补水功能
CC1 ~ CC5	Communication controller	通讯控制器	用于采集各在线定压装置工作状态的通讯模块
MCC	Main communication controller	主通讯控制器	用于连接 CC1 ~ CC5 和应急恒压系统的通讯模块
MCS	Main control system	主控制系统	应急恒压系统的控制中心
HMI	Human-machine interface	人机界面	用于监控和操作应急恒压系统的触摸屏
V2 ~ V11	Valve	电动开关阀门	用于切换在线定压装置和应急定压装置的不同补水回路
P1	Pressure sensor	应急定压装置出口压强传感器	用于探测应急定压装置工作时的压强
CPT	Constant pressure tank	定压罐	减少因管道距离过长造成的补水压强波动

通常, 闭式循环水定压方式包括定频水泵式定压^[4]、气压罐定压、变频水泵式定压和隔膜空压式定压。定频水泵定压方式结构简单^[5], 适应精度要求低的空调、锅炉等设备^[6]。气压罐定压方式能够适应相对复杂的冷却水系统, 但需在系统设计时进行定压值的准确计算并预先灌注氮气来设定压强, 压强调整过程烦琐^[7]; 变频水泵式定压方式一般采用 PLC 作为中心控制单元^[8], 控制变频器调节水泵转速, 达到恒压供水目的^[9-11]。变频水泵式定压方式应用大型循环供水系统, 但对于小容量系统不适用^[12]; 隔膜空压式定压方式采用气囊增压补水, 恒压效果好, 适用于小容量且对精度要求高的密闭式循环水系统^[13]。质

子重离子加速器的各闭式循环冷却水容量分别为: 射频冷却水系统 1.3 m³, 直线加速器冷却水系统 2.2 m³, 离子源冷却水系统 2.2 m³, 同步加速器冷却水系统 9.3 m³, 高能束流传输冷却水系统 12.6 m³, 均属于小容量密闭式循环水系统, 所以, 采用隔膜空气压缩式定压装置最佳。

值得注意的是, 隔膜空气压缩式定压装置不但具有稳定的增压补水功能, 当系统压强超过设定范围, 装置能够通过隔膜自动泄压或通过泄压阀排水, 以维持系统压强稳定性。图 1 中的 RF CWS、SYNC CWS、HEBT CWS、IS CWS、LINAC CWS 均为独立密闭式循环水系统, 当系统压强升高, 需要泄压时, 由各 OCPD 自动完成。

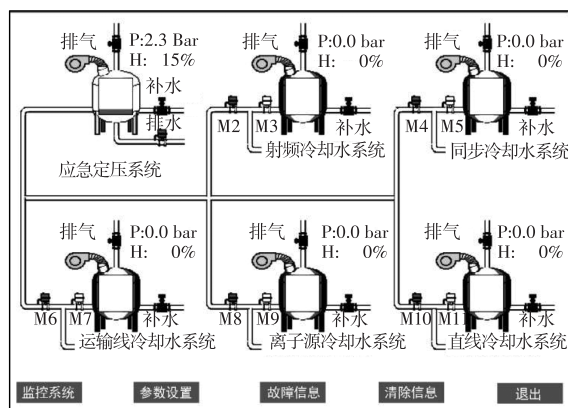
ECPD 安装在地下一层,通过补偿设备位置落差所产生的 0.07 MPa 压差来实现与在线定压装置的压强一致。应急定压参数设定如表 2 所示。定压装置位置落差补偿设定通过 PLC 的参数设定程序实现。

表 2 定压参数设定

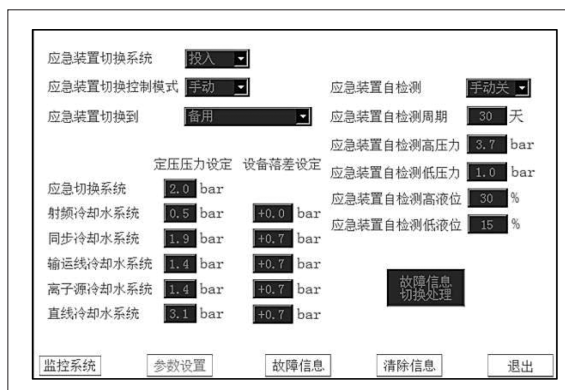
OCPD 编号	OCPD 定压值/MPa	ECPD 定压值/MPa	备注
OCPD1	0.05	0.05	无落差补偿
OCPD2	0.19	0.26	补偿落差 0.07 MPa
OCPD3	0.14	0.2	补偿落差 0.07 MPa
OCPD4	0.14	0.2	补偿落差 0.07 MPa
OCPD5	0.31	0.38	补偿落差 0.07 MPa

1.5 监控软件

监控软件采用西门子 WINCC 系统开发,通过触摸屏实现人机交互。触摸屏软件功能包括监控界面、参数设置界面和故障信息界面三个部分。监控界面的功能包括应急定压装置状态监控、在线定压装置状态监控、定压值监控、液位监控、阀门状态监控;参数设置部分的功能包括切换设置、定压设定、设备落差设定、自检测设定等;故障信息界面包括故障信息查询和故障信息清除。图 4 为触摸屏软件截图,其中,图 4(a)为监控界面,该界面显示 ECPD 与各 OCPD 的连接状态、阀门的开关状态等。图 4(b)所示为参数设置界面。图 4(c)为故障信息界面,当系统有故障产生时,自动弹出报警窗口显示报警内容,使用“故障信息”按键可查询历史故障记录。



(a) 监控界面



(b) 参数设置界面



(c) 故障信息界面

图 4 触摸屏软件截图

2 应用

2.1 控制精度和应用效果

系统安装完成后,通过实验确认 ECPD 向 RF CWS、SYNC CWS、HEBT CWS、IS CWS、LINAC CWS 切换的压强波动均控制在 ± 0.02 MPa 以内。图 5 所示为 ECPD 向 RF CWS 切换时压强波动曲线,压强波动在 0.045 ~ 0.053 MPa 之间,自动切换过程不会造成质子重离子加速器运行中断。

系统于 2017 年 10 月份投入使用,已多次应用于 OCPD 故障状态下的应急。应用效果包括:

- 1) 该系统实现了 OCPD 故障状态下的自动切换,减少停机时间;
- 2) 该系统使得定压装置相关备件的储存量和种类减少,使运行成本降低;
- 3) 该系统缓解了技术人员故障维修压力,维修工作可在不影响临床治疗的状态下进行,维修质量得到充分保证。

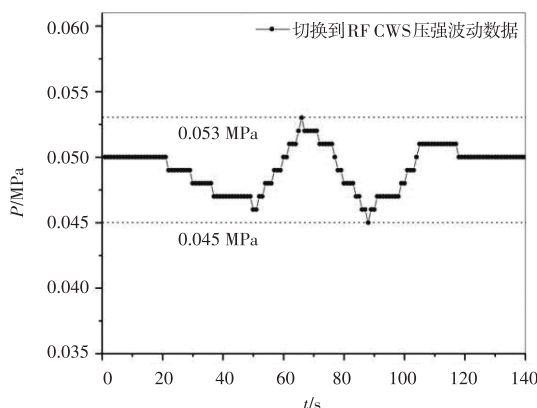


图 5 ECPD 向 RF CWS 切换时压强波动曲线

2.2 应用中的问题讨论

质子和重离子加速器技术复杂,在国内的应用时间较短,辅助技术也处于探索阶段^[14]。冷却水作为重要辅助系统,可靠性十分重要^[15]。多回路恒压系统压强控制精度满足运行要求,实现故障应急,降低了故障停机的风险。

然而,在实际应用中仍然需注意以下问题:

1) 系统设计的核心方法在于使用一台 ECPD 满足多台 OCPD 的故障时应急需要,所以,ECPD 的精度不能低于 OCPD。

2) 在实际应用中,OCPD 可能位于不同的楼层,而设备的落差会造成定压参数的变化,所以,ECPD 的安装位置需要考虑落差。

3) ECPD 可能处于长期不运行的状态,系统应设计自动检测程序,定期自动进行自检,以确保处于可用状态。也可由操作人员完成检查,进行手动切换以确认 ECPD 和系统的可用性。

4) 多回路恒压系统在安装时会增设大量的管道,管道布局需考虑最优的路线。需在长距离管道的末端增加定压罐以减少压强波动。在管道高处安装排气阀门,维护保养时开启排气阀门将管道内的空气排出,以减少压强波动。

3 结束语

冷却水多回路应急定压系统有效提高了质子重离子加速器的运行可靠性。此设计也可作为其他对于系统运行稳定性要求高的多回路循环冷却水系统参考。但是,对于旧系统改造,需要重新铺设大量管道、控制线路等,有一定的施工难度,所以,需做好计划以应对施工过程中存在的不确定性风险。对于新建的多回路的冷却水系统,建议在初始设计中采用这种应急恒压的设计方式,提升系统可靠性。总之,这一设计具有实用性,对于多回路循环冷却水系统的设计与运行可靠性提升具有参考价值。

参考文献

[1] 李万宏,朱建民. 医用重离子同步加速器冷却水系统控制优化方法与实践[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(6): 33-35.

(上接第31页)

[2] 朱星州. 新型船舶全电推进系统的航路规划及能量管理策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.

[3] 张丽春. 基于 PI-PLL 的船舶电力推进 SVM-DTC 系统仿真研究[J]. 电子设计工程, 2016, 24(4): 148-151.

[4] 邹明雷,何季平,尹凯,等. 内河锂电推进船舶电站管理系统控制策略[J]. 船电技术, 2019, 39(8): 51-54.

[5] 楚玉华,黄巧亮. 基于双粒子群算法的船舶电力系统网络重构[J]. 电子设计工程, 2017, 25(5): 37-41.

[6] 蔡文轩. 电动船舶电力系统的谐波抑制[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(4): 25-27.

[7] 王伟,张瀚宸. 纯电动船舶直流并网短路保护功能设计及仿真分析[J]. 控制与信息技术, 2021(6): 71-76.

[8] ISLAM M M. VFD challenges for shipboard electrical power system design: propulsion system adjustable speed drive[M]. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2019: 21-28.

[9] WANG Z, WANG S, LIU Q. Influence analysis of current limiting reactor on pole-to-pole short circuit fault in DC distribution system [C]. 2021 International Conference on Power System and Energy Internet. Chengdu, China, 2021: 1-6.

[2] 李万宏,朱春杰. 质子重离子加速器设备冷却水系统停机故障预防与应急优化[J]. 中国医学装备, 2017, 14(10): 19-22.

[3] 李万宏,刘鹏,史伟忠,等. 一种质子重离子加速器快速应急恒压装置: ZL201510269648.3[P]. 2015-05-25.

[4] 郭馨,赵广播,魏国华,等. 530 MW T 型锅炉机组水冷壁系统定压改滑压技术[J]. 节能技术, 2023, 41(3): 229-232.

[5] 马亚俊. 供热和空调系统定压方式与设备选型分析[J]. 图书情报导刊, 2011, 21(12): 193-196.

[6] 张玮. 关于定压装置位置的讨论[J]. 暖通空调, 2002, 32(1): 109-109.

[7] 丛山日,许文华. 气压罐定压装置计算方法和设计原则[J]. 建筑科学, 2000, 16(5): 57-61.

[8] 赵玉平. 恒压变频供水系统技术设计笔记[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(11): 47-49,68.

[9] 陈晴,胡海龙. 基于 PLC 的供水管网漏水检测系统设计与应用[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(7): 77-79.

[10] 张文彬,邓亮,刘萍. 基于 S7-300PLC 的变频调速恒压供水系统设计[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(6): 535-540.

[11] 徐玲玉. 长距离输水系统泵站供电设备自启动优化方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5): 48-51,84.

[12] 高浩. 气囊罐定压空调水管网瞬态特性模拟与试验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.

[13] 张杰. 高压换流站空调系统变工况冷却特性研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(12): 25-28.

[14] 赵木,常晟,尚自强. 质子治疗相关设备技术特点分析[J]. 医疗卫生装备, 2019, 40(3): 81-84.

[15] 王岚. 质子重离子系统应用技术解析及运维管理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2021.

作者简介:李万宏(1981—),男,博士,高级工程师,研究方向:质子重离子系统运行可靠性与技术保障。

[10] HOU J. Operation strategy of shore to ship power based on improved droop control [C]. 2017 IEEE ITC Asia-Pacific. Harbin, China: IEEE 2017: 1-6

[11] 刘刚. 调压式电网无功自动补偿装置的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.

[12] 杨金成,徐正喜. 舰船交流岸电电源剖析[J]. 中国造船, 2005(1): 52-57.

[13] 郜克存,毕大强,戴瑜兴. 基于虚拟同步发电机的船舶岸电电源控制策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 45-52.

[14] 滕磊. 船舶岸电无间隙转换系统建模与控制策略研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.

[15] 侯珏. 船舶与岸电并网控制策略研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 86-90.

作者简介:钱宇轩(1990—),男,工程师,研究方向:电力系统及其自动化。