

质子治疗系统 FLASH 照射模式及控制系统分析

郑六江 张宏亮 刘一凡

中广核数字科技有限公司, 上海 200241

[摘要]质子治疗系统运用 FLASH 照射模式, 其高剂量率可有效提升肿瘤治疗效率, 控制系统起着关键作用, 其中保护系统对确保治疗安全尤为重要。文章分析现有控制系统架构与功能后, 还探究了现有的 PLC 构建的安全系统在紧急状况下的表现和保护机制, 鉴于现有的部分系列 PLC 已停产, 提出硬件平台替代与升级方案, 这有助于提升系统稳定性和可维护性, 既能增强系统治疗安全性, 又能为质子治疗设备长期运行提供保障。

[关键词]质子治疗; FLASH 照射模式; 控制系统; 安全保护; 硬件升级

DOI: 10.33142/cmn.v3i2.18171 中图分类号: R814 文献标识码: A

Analysis of FLASH Irradiation Mode and Control System of Proton Therapy System

ZHENG Liujiang, ZHANG Hongliang, LIU Yifan
CGN Digital Technology Co., Ltd., Shanghai, 200241, China

Abstract: Proton therapy system uses FLASH irradiation mode, and its high dose rate can effectively improve the efficiency of tumor treatment. The control system plays a key role, and the protection system is particularly important to ensure treatment safety. After analyzing the existing control system architecture and functions, the article also explores the performance and protection mechanism of the safety system constructed by existing PLCs in emergency situations. Considering that some series of PLCs have been discontinued, a hardware platform replacement and upgrade plan is proposed, which can help improve system stability and maintainability, enhance system treatment safety, and provide guarantees for the long-term operation of proton therapy equipment.

Keywords: proton therapy; FLASH illumination mode; control system; safeguard; hardware upgrade

引言

质子治疗是一种靠着独特的高剂量率 FLASH 照射模式的精准放射治疗方式, 在肿瘤治疗里优势很显著, 不过随着治疗技术不断进步, 如何保证治疗过程中的安全性与稳定性成为关键问题, 控制系统是保障治疗安全的核心, 而保护系统更是重中之重且与患者及工作人员的生命安全直接相关, 探讨质子治疗控制系统的设计与实施既能给技术创新以技术支持也能为设备长期安全运行提供解决办法。

1 质子治疗系统概述

1.1 质子治疗的原理

质子治疗是以质子束为射线源的一种放射治疗技术, 和传统 X 射线治疗不同, 质子质量和电荷较大, 能量传递过程有差异, 质子进入人体与周边组织相互作用, 到一定深度就释放最大辐射剂量, 质子治疗能在肿瘤处高精度照射, 对周围健康组织损伤小就得益于这种剂量释放特点, 医生控制质子能量和入射角度就能把治疗剂量精准集中在肿瘤位置, 取得最优治疗效果。

质子治疗有个特殊的剂量分布即“布拉格峰”效应的优势, 质子穿透人体深度增加时能量逐步释放, 到最大释放点(布拉格峰)后迅速下降, 这让质子治疗成为深部肿瘤理想选择, 而传统 X 射线治疗向组织均匀释放辐射, 健康组织也会被照射一定剂量。

1.2 FLASH 照射模式的基本概念

FLASH 照射模式是一种革命性的放射治疗方法, 其在极短时间内以极高剂量率给患者提供辐射治疗, 能在毫秒级时间就把辐射剂量传递完是其关键特点, 与常规放射治疗方式相比治疗时间大幅缩短, 传统放射治疗一般长时间缓慢释放剂量而 FLASH 模式却把辐射释放速度提到很高, 短短几毫秒就能提供高剂量治疗从而治疗效率显著提高, 对于生长迅速的肿瘤, FLASH 照射模式能更快对其有效照射并且还能减少患者治疗时的辐射积累以减轻治疗时的不适感。

FLASH 照射模式尚处于临床研究阶段且其潜在优势初步得到验证, 研究显示 FLASH 模式可有效减轻正常组织的辐射损伤且在脑部、肺部等脆弱敏感区域治疗时优势更明显, 相较于传统放射治疗, FLASH 照射对肿瘤细胞杀伤效果更好且对健康细胞损伤相对更小、在减少副作用和提升治疗效果方面有着独特潜力, FLASH 照射模式应用前景宽广且或许会成为日后治疗各类肿瘤的标准方法之一。

1.3 质子治疗系统的组成结构

质子治疗系统主要构成如上图, 包含加速器、束流传输系统、治疗设备与控制系统, 其中加速器在质子治疗系统里处于核心地位, 高频电场能把质子加速到极高能量, 从而让质子克服自身质量与电荷, 精确打击肿瘤深处, 而

束流传输系统把加速器产生的质子束引向患者治疗区域，保证质子束准确到达肿瘤所在之处。

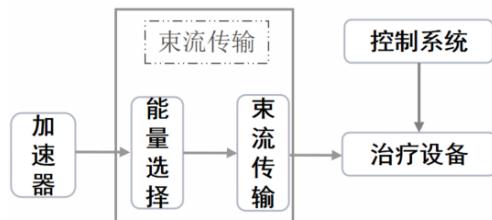


图 1 质子治疗的系统结构

治疗室内的各种放射治疗仪器和辅助手段构成的治疗设备，其作用是确保照射精度和患者准确定位，控制系统会全程监控治疗过程中的束流强度、照射角度以及治疗时间等各类参数，凭借实时数据反馈对治疗过程予以调节以使治疗安全与效果达到最大程度，质子治疗系统成功实施的关键在于整个系统的协作配合。

2 控制系统的基本构成与功能

2.1 控制系统的概念与重要性

在质子治疗里，控制系统非常重要，各个设备的有效运行均靠它控制且治疗过程的精确性和安全性也由它确保，加速器、束流传输系统以及治疗室设备都要被控制系统精确控制以便治疗过程中的各项操作能按预定计划进行。由于质子治疗对精准度要求极高，控制系统要有极高的稳定性和实时反应能力才能在治疗时快速准确地调整各项参数以保证照射精度，控制系统还能实时监控治疗数据、及时发现潜在问题来防止设备故障和人为错误从而尽可能降低治疗过程中的风险以保障患者的治疗效果和安全。

2.2 控制系统的硬件平台

计算机、PLC（可编程逻辑控制器）、传感器和其他监控设备通常被包含在质子治疗的控制系统硬件平台之中，PLC 常被传统质子治疗控制系统用作核心控制部件，在医疗设备里该系列 PLC 凭借高可靠性与高安全性得以广泛应用。随着现有型号 PLC 停产和技术进步，控制系统的硬件设备就面临着替代或升级这一挑战，未来控制系统硬件设备为适应治疗技术不断进步需要具备更高的计算能力、灵活性和可扩展性，采用基于云计算的分布式系统或者更智能的控制平台有助于提高系统自动化程度和可维护性，质子治疗的整体性能也能进一步提升。

2.3 控制系统的主要功能

2.3.1 治疗过程中的实时控制

治疗过程中，控制系统得保证治疗设备实时协调、精确调度，精确控制加速器能量输出、束流传输路径、治疗室病人定位，让治疗每个步骤都在非常精细的条件下完成，并且可根据治疗计划实时调整辐射剂量和照射角度，保证精准覆盖治疗区域，而且设备状态的动态监控也在实时控制范围内，确保系统随时正常运作。

2.3.2 紧急情况下的保护功能

在紧急状况下，控制系统的保护功能相当关键，设备

故障或者外部环境不正常时，控制系统马上能启动紧急停止程序，快速关掉加速器或者中断束流传输，从而使患者和操作人员不会受到伤害，而且控制系统还有紧急安全停机按钮和自动故障检测机制，意外发生时，患者、工作人员以及设备的安全靠它保护。

2.3.3 数据监控与传输

控制系统也有数据监控与传输功能，它既能准确记录治疗过程里所有设备的状态、治疗数据并实时传输，又能通过数据传输模块将实时采集的辐射剂量、治疗时间、设备运行状态等治疗数据发送到中心控制平台，让远程技术支持和维护人员实时查看，从而及时发现设备潜在问题并调整，这对设备维护、故障预测很重要，能最大限度减少治疗中断。

3 质子治疗 安全系统分析

3.1 安全系统的作用与目标

患者、工作人员和治疗设备的安全保护是质子治疗安全系统的核心任务，在高能粒子辐射的治疗环境下，系统故障或者操作失误都可能造成不可逆的伤害，质子治疗系统得有高度的安全保障措施，安全系统的目标是通过多重冗余设计加上实时监控，让系统在正常和紧急情况都稳定运行以把风险减到最小，既能保护设备不被损坏，故障发生时又能快速采取措施防止人员安全受威胁。

3.1.1 保护治疗设备

质子治疗设备价格昂贵且技术复杂，对其保护极为关键，安全系统实时监控设备运行状态且有精确的控制机制，设备有异常或故障就能立即动作以防止设备过载或损坏，像加速器或者束流传输系统出故障时，安全系统会自动开启保护机制让辐射束流停止输出，保护设备安全，有效确保了治疗设备的使用寿命和稳定性。

3.1.2 保障患者与工作人员的安全

质子治疗时患者受影响最直接，治疗人员负责操作和监督，质子治疗安全系统直接关系患者和工作人员安全，在高剂量辐射环境下更是如此，系统设置紧急停止按钮、自动故障诊断和报警系统就能对任何异常情况迅速应对，患者位置偏移或者治疗设备故障时，系统立即停止照射报警，避免患者遭受不必要辐射损伤，而且工作人员的安全通过物理隔离和警告机制保障，使他们远离辐射源。

3.2 现有安全控制系统分析

3.2.1 常用的质子治疗安全系统的架构

常用的质子治疗安全系统现采用安全 PLC 架构，该系列 PLC 确保了治疗时的高可靠性和安全性。PLC 作为核心控制单元能实时处理各个治疗环节的反馈信息且在异常发生时做出及时响应。该控制系统由两个控制器组成，一个控制器保护束流产生和传输，另一个控制器针对各个治疗室，二者能确保治疗设备精确操作并提供异常保护。

3.2.2 采用安全 PLC 的优势与挑战

安全系列 PLC 有着很强的处理能力与安全性高，且在复杂治疗环境下能确保系统的响应时间和控制精度，但随着现有型号 PLC 停产和技术进步，给现有质子治疗系

统的长期运维带来挑战。部分 PLC 停产后，后续设备维护、备件供应和技术支持会面临困难，设备管理方要保障系统持续稳定运行就需要制定替代或升级方案。

3.3 系统的替代与升级需求

3.3.1 PLC 停产对运维的影响

质子治疗系统的运维会受到 PLC 停产的影响，一方面系统定期需更换的备件和纠正性维修设备更换会变困难，致使维护成本增加；另一方面现有的硬件和当前控制技术有差距，可能存在系统兼容性问题，运维人员需要考虑解决技术更新滞后这一挑战以保证系统在治疗过程中仍能符合高精度要求。

3.3.2 替代硬件的建议

PLC 停产了会带来系统安全稳定运行问题，建议逐步替换现有的硬件，可考虑对现有的系列 PLC 进行升级，也可考虑采用国内安全等级及性能符合要求的 PLC 进行国产化改造，以及其他符合医疗设备标准的 PLC 等进行改造替代，替代的 PLC 要考虑技术先进性、稳定性且易于维护性，使用这样的 PLC 能保证在高负荷时系统稳定又安全，把云计算和物联网技术相结合后也能提高远程监控和故障诊断效率，系统更智能且便于维护，进一步增强质子治疗系统的可靠性和可持续性。

4 质子治疗控制系统的核心技术

4.1 基本控制流程与操作逻辑

质子治疗控制系统的基本控制流程一般从输入治疗计划起步，预设的辐射剂量、照射角度等治疗参数被系统用于细致规划和控制治疗过程，治疗之前系统会精确校准加速器、束流传输系统、患者定位等以保证各环节依计划行事，治疗开始后控制系统借助实时监测设备状态协调各环节运行以保证质子束精确照射，若检测出异常或偏差控制系统便依据设定的逻辑判断修正或触发保护机制避免治疗误差产生，控制系统采用分布式架构操作逻辑，各环节的反馈信息经处理后统一传至中心控制系统以确保整体的协调与高效性。

4.2 控制系统中的安全保护机制

4.2.1 手动紧急停止按钮

质子治疗控制系统里，手动紧急停止按钮是一项重要的安全功能，治疗中一旦出现设备故障、患者意外移动等紧急状况，工作人员能马上按下该按钮，使加速器的运行被系统立刻停止且束流传输被切断，该功能能快速切断治疗过程，避免患者或工作人员受到伤害，紧急停止按钮一般装在治疗室内外显眼之处，确保紧急情况发生时操作人员迅速作出反应。

4.2.2 控制器内部逻辑判断与自动化保护

质子治疗安全系统的另一关键组成部分是控制器内部逻辑判断与自动化保护机制，在治疗过程中，设备状态、环境监控数据以及患者位置等信息不断被系统采集并由内部逻辑判断模块分析，当发现患者位置偏差或者束流传输异常时，控制系统会自动启动保护程序，立即停止治疗并发出警报，而且系统能自我诊断检测设备运行状况，提

前发现潜在故障，自动调整或者切换到备用设备，从而使治疗不中断且一直在安全条件下进行。

4.3 控制系统的实时性与精确性

4.3.1 数据传输与反馈

高效的数据传输与反馈机制对控制系统的实时性与精确性不可或缺，治疗时各种设备状态、治疗参数还有环境信息都需实时传输到中心控制系统以保证数据准确又及时，高带宽、低延迟的通信网络负责传输这些数据从而保证治疗设备的操作与调度情况马上反馈给控制系统以便其进行必要调整，系统处理和快速反馈数据的能力决定治疗精确度进而保证每次辐射都依治疗计划进行而不会有误差。

4.3.2 实时监控与报警机制

确保质子治疗安全性，实时监控与报警机制很重要，集成的监控设备被系统用来实时跟踪治疗设备运行状态，像加速器功率、束流输出强度、患者定位等都在跟踪范围内，设备如有偏差或者系统检测到危险信号，警报立刻会发出且定位故障位置，提醒工作人员及时处理，报警机制既能保障治疗过程安全，在设备故障时又能迅速干预，从而避免错误治疗或者设备损坏，实时监控和报警能让系统在整个治疗过程中保证高精度和高安全性。

5 结语

肿瘤治疗里，质子治疗系统在高精度照射和 FLASH 照射模式的运用上优势明显，不过要保障治疗效果，提高系统的安全性与可靠性尤为重要。质子治疗中，控制系统是重要部分，靠着精确实时控制、严密安全保护机制和高效数据监控，治疗过程才得以顺利开展，且随着硬件不断更新升级、技术持续发展，未来质子治疗控制系统会更智能高效。不断优化控制系统设计和实施，治疗安全性、稳定性会进一步提升，患者治疗体验也会更好，能给质子治疗技术的普及快速发展打牢基础。

[参考文献]

- [1]魏江华.质子治疗装置机器人治疗床设计与关键技术研究[D].安徽:中国科学技术大学,2024.
- [2]卢卫卫.质子治疗系统电磁兼容抗扰度检验方法的研究[J].中国医疗器械杂志,2024,48(4):396-400.
- [3]高楠,陆一鸣,顾先宝,等.超导回旋质子治疗系统 FLASH 照射模式下的辐射屏蔽安全评估[J].核电子学与探测技术,2024,44(6):963-973.
- [4]吴韦清,卢晓光,郑仁超,等.国内首台迈胜 PBS 质子治疗系统的束流特性分析 [J].中国医学物理学杂志,2024,41(3):282-288.
- [5]丁廷洋.质子治疗旋转机架控制系统关键技术研究[D].湖北:华中科技大学,2024.
- [6]谢荣,邓建春,马海,等.质子治疗系统的治疗床路径规划 [J].中国医疗器械杂志,2024,48(6):595-602.

作者简介：郑六江（1985.10—），男，汉族，硕士研究生，毕业院校：北京科技大学，专业：控制科学与工程。