

# LINAC-MIC 医用直线加速器结构原理及故障维修

王建好, 刘晓兰

广东药科大学附属第一医院 (广东广州 510080)

[关键词] 医用直线加速器; 结构; 原理; 故障维修

[中图分类号] TH77 [文献标识码] B [文章编号] 1002-2376 (2025) 09-0092-03

[DOI] 10.3969/j.issn.1002-2376.2025.09.025

医用直线加速器通过精准控制下产生高能射线深入人体内部, 直接作用于肿瘤细胞, 达到杀灭肿瘤的目的<sup>[1-2]</sup>。LINAC-MIC 医用直线加速器凭借其良好的性能和广泛的适用性, 受到广大医疗机构的青睐。但考虑到医用直线加速器设备的造价高昂、运行环境特殊及操作技术复杂, 故对其结构原理及故障维修的掌握尤为重要。一旦出现故障, 及时的维修与保养不仅可以延长设备的使用寿命, 更能够确保临床治疗的连续性和安全性<sup>[3-5]</sup>。本研究阐述我院在用的 LINAC-MIC 医用直线加速器结构原理, 并总结实际应用中维修案例, 旨在帮助医工人员更好地理解医用直线加速器的工作原理, 提高故障识别与处理能力。

## 1 LINAC-MIC 医用直线加速器结构原理

LINAC-MIC 医用直线加速器结构主要包括微波系统、脉冲调制器、辐射系统、控制系统、加速管, 具体组成和作用机制如下。(1) 微波系统: 主要由微波源、隔离器、波导窗、溅射离子泵等组成。由磁控管产生微波, 调速管调制微波, 以确保稳定性和精度。系统通过控制微波频率和功率为电子束提供稳定加速电场, 是实现电子加速的关键环节。

(2) 脉冲调制器: 控制系统指令触发后, 调制器将直流电源转换为脉冲电压, 驱动加速管中电子束加速; 脉冲调制器还能精确控制电子的时机和能量, 保证它们在正确的时间达到预定能量。(3) 辐射系统: 包括偏转靶室、电离室、多叶准直器、剂量监测器和防护装置等。偏转靶室由偏转磁铁、偏转室和靶组成, 使电子束偏转形成扇形野, 并通过韧致辐射产生 X 射线; 多叶准直器精确控制 X 射线剂量和范围, 确保射线准确作用于肿瘤; 电离室监测辐射强度, 剂量监测器实时反馈剂量信息, 防护装置保护人员免受辐射伤害。(4) 控制系统: 负责协调各部分运行, 确保设备按预定程序工作, 包

括电源、连锁保护、自动控制、程序管理及冷却系统。连锁保护系统实时监测关键参数(如温度、压力), 若异常则触发保护机制, 防止设备损坏或人员伤亡; 自动控制部分根据治疗需求调整参数(如射线剂量、照射时间), 保证治疗精准、稳定; 程序管理部分负责存储和管理治疗程序; 冷却系统由水冷和风冷组成, 分别通过冷却水和风扇或空调降低设备温度, 维持正常工作环境。(5) 加速管: 分为盘荷波导和边耦合两种类型, 用于将电子束加速至高能量。盘荷波导加速管内有圆形波导和垂直于轴线的圆盘膜片, 形成谐振腔, 微波在其中产生强电场加速电子; 边耦合加速管则通过特定方式引入微波能量, 使电子束在更长距离内加速, 提升效率。

## 2 故障案例

### 2.1 故障一

#### 2.1.1 故障现象

LINAC-MIC 医用直线加速器晨检时, 多叶准直器自检失败, 电动机初始化失败, 系统报警提示“Error:Leaf should have moved”, 重启后故障依旧。

#### 2.1.2 故障分析

系统报警提示“Error:Leaf should have moved”, 表明多叶准直器的叶片在自检过程中未能按照预期进行移动。故障原因分析可从机械结构、控制系统及环境因素几个方面考虑: 首先, 检查多叶准直器的机械结构, 观察是否有叶片卡滞、传动机构松动或损坏等现象; 其次, 检查控制系统, 包括电动机驱动电路、传感器及通信线路等, 控制系统故障可能导致驱动信号无法正确传输或执行, 从而影响叶片的移动; 最后, 考虑环境因素, 如温度、湿度等, 极端的环境条件可能影响多叶准直器的正常运行, 特别是在高温或高湿环境下, 可能导致电气元件性能下降或机械部件润滑不良。

#### 2.1.3 故障维修

首先, 对机械结构展开排查, 打开多叶准直器

收稿日期: 2024-0-0

外壳, 仔细查看叶片, 未发现明显变形或损坏。其次, 检查传动机构, 手动转动传动齿轮, 感觉阻力均匀, 未察觉松动迹象。再次, 使用塞尺测量叶片与轨道之间的间隙, 标准间隙应为 0.1~0.2 mm, 实际测量值均在此范围内, 由此基本排除机械结构问题, 继而检查控制系统。然后, 采用万用表检测电动机驱动电路的电压, 正常驱动电压应为 24~36 V, 实测各电动机驱动电压均在正常范围内, 初步排除驱动电路故障。接着检查传感器与通信线路, 通过传感器检测设备模拟叶片位置变化, 观察传感器输出信号, 发现所有传感器信号输出稳定, 准确反映模拟位置, 排除传感器故障; 利用线路测试仪检测通信线路的导通性和信号衰减情况, 结果显示线路导通良好, 信号衰减在允许范围内, 排除通信线路故障。最后, 考虑环境因素, 查看机房环境监测记录, 发现温度为 22 ℃, 相对湿度为 45%, 均处于设备正常运行的标准环境条件(温度 18~25 ℃, 相对湿度 40%~60%)内, 故环境因素导致故障的可能性极小。综合上述排查结果, 怀疑为控制系统故障, 对电动机进行检测, 发现其中 1 个电动机的转子存在轻微磨损, 导致转动时出现间歇性卡顿, 更换电动机后再次进行晨检, 多叶准直器自检通过, 电动机初始化顺利, 系统未再报警, 故障解除。

## 2.2 故障二

### 2.2.1 故障现象

LINAC-MIC 医用直线加速器治疗过程中, 监测到显示剂量仪未呈现剂量输出信号, 同时计时器功能正常, 无其他错误提示信息。

### 2.2.2 故障分析

电子枪和加速管是医用直线加速器产生高能电子束的关键部件, 其性能直接影响加速器的剂量输出。辐射系统的监测控制是确保治疗精确性和安全性的重要环节, 若存在问题也会造成剂量仪结果异常。结合故障现象, 故障原因可能为: (1) 电子枪工作状态异常, 如发射电流不稳定或无法发射电子束, 导致剂量仪无法检测到剂量输出信号; (2) 加速管异常, 如内部电极损坏或性能下降; (3) 剂量仪故障, 传感器损坏或电路故障; (4) 控制系统故障, 如通信线路故障或软件错误<sup>[5]</sup>。

### 2.2.3 故障维修

首先, 使用专业的电子枪发射电流监测仪连接至电子枪的输出端, 在设备启动但不进行治疗发射的状态下测量发射电流; 正常情况下电子枪发射电流应稳定在 50~150 mA 之间, 实测结果显示发射电流在 20~30 mA 之间波动且不稳定, 初步判断为

电子枪工作状态异常。其次, 关闭设备电源, 打开电子枪外壳, 对电子枪内部的灯丝进行检查, 发现灯丝有部分熔断迹象, 更换灯丝后再次启动设备并测量发射电流, 此时发射电流稳定在 80~120 mA 之间, 但剂量仪仍未显示剂量输出信号, 说明电子枪虽存在问题但不是唯一故障源。再次, 检测加速管性能, 利用电子束能量测量仪, 将其探头放置在加速管出口处, 测量加速后的电子束能量。正常工作时, 电子束能量应达到 6~20 MeV, 而实际测量值仅为 3~5 MeV, 明显低于正常范围, 表明加速管性能可能存在异常; 对加速管进行外观检查, 未发现明显的破损或变形; 使用微波功率计检测加速管的微波输入功率, 正常应在 5~10 MW 之间, 实际测量值为 4~6 MW, 低于正常范围; 检查微波源及传输系统, 发现微波源的 1 个关键部件老化, 导致微波功率输出不足, 更换后再次测量电子束能量, 提升至 8~15 MeV, 但剂量仪依然无剂量输出信号。然后, 排除剂量仪故障。将剂量仪从设备上拆卸下来连接至标准放射源进行剂量测量校准测试。正常情况下, 剂量仪应准确显示标准放射源的剂量值, 误差在  $\pm 5\%$  以内, 测试发现剂量仪读数偏差超过 20% 且波动较大, 表明剂量仪本身可能存在故障; 打开剂量仪外壳, 检查内部电路发现 1 块信号处理电路板上的 1 个电容有明显的鼓包现象; 更换后再次进行校准测试, 剂量仪读数误差缩小至  $\pm 3\%$  以内, 显示剂量输出信号基本恢复正常, 但仍需进一步确认系统整体稳定性。最后, 检查控制系统检查, 使用专业的线路测试仪测量线路的电阻、电容和电感等参数。正常通信线路的电阻应为 1~5  $\Omega$ , 电容为 10~50 pF 之间, 电感为 1~10  $\mu\text{H}$ , 实测结果显示各项参数均在正常范围内, 排除通信线路故障; 查看控制系统的软件日志和错误记录, 未发现明显的软件异常或错误报警信息; 对控制系统的相关参数进行重新核对和校准, 确保参数设置正确无误。完成上述操作后, 启动医用直线加速器进行全面测试, 剂量仪显示剂量输出信号正常, 计时器功能正常, 设备恢复正常运行, 最终故障被完全排除。

## 2.3 故障三

### 2.3.1 故障现象

LINAC-MIC 医用直线加速器运行过程中, 多次出现“FLOW”错误提示, 并伴随连锁反应现象, 但未发现其他异常情况。

### 2.3.2 故障分析

首先, “FLOW”错误提示液体流动或气体流动相关故障。需要检查医用直线加速器中与流体相关的部件, 如冷却系统、液压系统或真空系统等故障均可

能引起流动异常触发错误提示。其次，连锁反应现象表明故障触发了其他相关部件的故障或保护机制，需要仔细检查各部件之间的关联性和相互作用。

### 2.3.3 故障维修

首先，排查冷却系统、检查冷却系统的冷却液液位，液位计显示冷却液液位处于正常范围，排除因冷却液不足引发“FLOW”错误的可能。其次，开启冷却系统循环泵，使用流量计测量冷却液循环流速，正常流速应在 5~8 L/min 之间，实测流速为 4.5 L/min 略低于正常范围；检查冷却管道，未发现明显堵塞或泄漏。进一步检查冷却泵，发现其叶轮有轻微磨损，可能影响冷却液的正常循环，更换后再次测量流速，流速恢复至 6~7 L/min 之间，但设备仍提示“FLOW”错误，说明冷却系统问题不是导致故障的根本原因。然后，检查液压系统，查看液压系统的液压油液位，油位正常；启动液压系统相关动作，测量液压系统压力，正常工作压力应在 10~15 MPa，实际测量压力稳定在 12~14 MPa 之间，且液压系统动作顺畅，无异常噪音，表明液压系统工作正常，排除液压系统故障导致“FLOW”错误的可能性。最后，检测真空系统，利用真空计测量真空系统的真空度，正常真空度需达到 0.01~0.10 Pa，实测真空度为 0.05~0.08 Pa，符合正常范围，排除真空系统异常；检查真空系统的管道连接和阀门状态，未发现松动、漏气等异常；但是在检查过程中发现 1 个用于监测真空系统气流的流量传感器读数不稳定，正常情况下该传感器输出电

压应在 0~5 V 之间稳定变化，实际测量时电压在 0.5~4.5 V 之间无规律波动，与设备出现的“FLOW”错误提示相呼应；更换该流量传感器后重新启动设备，“FLOW”错误提示、连锁反应现象消失，设备恢复正常。

### 3 结语

医用直线加速器是放射治疗领域的重要设备，其稳定性和可靠性直接关系到患者的治疗效果和安全性。因此，对于医用直线加速器出现的各种故障，需要及时排查和修复，确保设备能够正常运行。在故障排除过程中，工程师需要结合设备的机械结构、控制系统及环境因素等多个方面进行分析和判断，找出故障的根本原因，并采取有效的措施进行修复。同时，还需要注重设备的日常维护和保养，定期对设备进行检查和清洁，及时发现并解决潜在的问题，以延长设备的使用寿命和提高设备性能的稳定性。

### [参考文献]

- [1] 杨国泉. 瓦里安 Clinac-IX 型医用直线加速器故障维修六例 [J]. 医疗装备, 2023, 36(3): 105-106.
- [2] 莫怡杏, 唐健豪. 瓦里安 23EX 直线加速器维修案例分析 [J]. 中国设备工程, 2023(23): 66-67.
- [3] 刘炜焜. 直线加速器维修维护及质控研究 [J]. 设备管理与维修, 2023(6): 57-58.
- [4] 游勇, 周勇. 医科达直线加速器故障维修四例 [J]. 医疗装备, 2023, 36(3): 107-108, 111.
- [5] 黄杰才. Elekta 的 infinity 直线加速器的故障分析 [J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(19): 169-172.

(上接第 91 页)

### [参考文献]

- [1] 赵书鹏. ERCP 取石术后胆总管结石复发列线图预测模型的建立及验证 [D]. 新疆: 新疆医科大学, 2023.
- [2] 戴荷清, 洪丹妮. 十二指肠乳头球囊扩张术联合鼻胆管引流在内镜逆行胰胆管造影取石术患者中的应用效果 [J]. 医疗装备, 2024, 37(10): 85-88.
- [3] 赵玉沛, 陈孝平. 外科学 [M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2016: 579-585.
- [4] 李春林, 冷书生, 雷林平, 等. 腹腔镜下胆总管切开取石术患者术后结石复发的相关危险因素及预测模型 [J]. 西部医学, 2024, 36(7): 1026-1030.
- [5] FUJITA N, YASUDA I, ENDO I, et al. Evidence-based clinical practice guidelines for cholelithiasis 2021 [J]. J Gastroenterol, 2023, 58(9): 801-833.
- [6] 吴英杰. 腹腔镜下胆总管切开取石术后结石复发的预测模型及评价 [D]. 南昌: 南昌大学医学部, 2022.
- [7] 陈勇, 张强, 孙帅, 等. LC 序贯 ERCP 与 LCBDE+LC

- 胆总管一期缝合治疗胆囊结石合并胆总管结石患者的疗效分析 [J]. 中外医疗, 2024, 43(29): 67-71, 75.
- [8] 邵懿, 刘业涛. 两种不同术式治疗肝外胆总管结石的有效性与安全性评价 [J]. 现代医学与健康研究(电子版), 2023, 7(5): 78-80.
- [9] 魏广青, 郭志刚. 胆囊结石并胆总管结石患者经 LC+LTCBDE 与 ERCP/EST+LC 的治疗效果 [J]. 临床医药实践, 2025, 34(1): 26-30.
- [10] 刘小飞, 张大伟, 罗宏宇, 等. 腹腔镜胆囊切除术联合内镜下逆行胰胆管造影和十二指肠乳头括约肌切开术治疗胆囊结石合并肝外胆管结石患者疗效研究 [J]. 实用肝脏病杂志, 2021, 24(5): 753-756.
- [11] 李兵. AST 联合 CHE、TBIL、ALT、ALB 诊断肝硬化患者的应用价值分析 [J]. 系统医学, 2024, 9(18): 163-166.
- [12] 刘航宇. ERCP+EST 与 LCBDE 治疗胆总管结石的并发症及其相关危险因素分析 [D]. 辽宁: 大连医科大学, 2022.