

磁共振成像设备维护保养标准化流程研究

邱华杨

(泰安市妇幼保健院, 山东 泰安 271000)

摘要 磁共振成像设备的性能直接关系到医学影像诊断的质量, 本文以本市三甲医院近三年磁共振设备运行数据为基础, 深入分析设备性能退化的关键影响因素, 聚焦主磁体液氮蒸发量、梯度系统温升、射频系统驻波比等量化指标, 刻画设备性能退化趋势。在此基础上构建了一套涵盖设备性能实时监测、磁场均匀度动态评估、冷却系统节能优化、射频稳定性诊断等环节的精准维护策略, 并通过6台磁共振设备的应用实践, 验证了精准维护对于提升成像质量、降低故障率、延长使用寿命的积极效果, 旨在为推动医院磁共振设备的精细化管理提供新思路。

关键词 磁共振成像; 设备维护; 性能监测; 数据分析; 精准诊断

中图分类号: TH77

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.01.034

0 引言

医学影像在疾病诊疗中的地位日益凸显, 磁共振成像已成为现代医院的核心设备, 但在实际应用中, 设备性能参数的波动、关键部件的老化磨损、故障问题的频发, 已成为制约磁共振成像技术发挥效用的瓶颈。国内医院在磁共振设备维护中还普遍存在数据积累不足、性能监测滞后、维护措施粗放等问题, 本文拟在大样本磁共振设备运行数据挖掘的基础上, 厘清设备性能退化的关键影响因素, 构建面向全生命周期的精准维护策略, 以期优化磁共振设备管理模式、提升医疗服务品质提供新的视角。

1 研究意义

随着我国医疗卫生事业的快速发展, 磁共振成像设备在医院的配备数量和使用强度不断攀升, 据统计, 截至2020年底, 我国医疗机构中在用磁共振设备已达7 200余台, 占全球保有量的20%以上。设备故障率居高不下, 相关医疗纠纷时有发生, 已成为提升医疗质量安全的重大隐患, 据不完全统计, 我国三级医院磁共振设备年均故障率高达15%, 平均无故障运行时间不足2 000小时, 远低于国际先进水平。设备日常维护不到位是重要诱因, 传统的磁共振设备维护模式重被动修复、轻主动预防, 缺乏对设备性能实时动态的跟踪分析, 难以及早发现和消除设备安全隐患。维护措施的针对性不强, 忽视了不同类型故障的成因差异, 基于海量运行监测数据, 系统厘清影响设备性能的关键参数, 刻画设备退化演变规律, 建立量化评估体系, 形成设备全生命周期的精准维护策略, 对于保障磁共

振成像质量, 降低医疗风险, 提高医疗服务效率具有重要意义, 本研究的开展, 有望为新时期医院大型医疗设备精细化管理提供可资借鉴的经验^[1]。

2 设备性能衰退的数据分析

2.1 主磁体液氮蒸发量变化趋势

主磁体性能的稳定性是保障磁共振成像质量的根本, 为精准把握主磁体性能演变规律, 本研究选取液氮液位下降速率作为衡量磁体性能的关键指标, 对本市医院6台超导型磁共振设备近一年的日常加液量进行持续监测和统计分析, 通过在设备加液口安装高精度液位传感器, 实时记录每次加注前后的液位变化, 并通过无线传输模块将数据上传至中心服务器。通过人工填写加液日志, 记录每次加注的时间、液氮使用量等关键信息, 研究团队进一步编写了数据分析程序, 实现加液量数据与时间信息的自动匹配, 并按月汇总分析。设备使用初期, 日均液氮损耗量为 22.4 ± 1.7 升, 而经过30个月的高强度使用后, 这一数值上升至 47.5 ± 6.2 升, 平均上升幅度达112%, 进一步统计发现, 设备月加液量由最初的674.2升增长至1 425.7升, 增幅高达111.6%, 研究团队随机抽取了3台设备, 绘制了其月加液量随时间变化的散点图, 发现3台设备的液氮损耗量变化趋势高度一致, 加液量都呈现出明显的阶梯式上升特征, 进一步比对安装时间不同的10台设备发现, 设备使用时间与日均液氮损耗量呈显著正相关($r=0.92$, $P<0.01$), 拟合出液氮蒸发速率关于使用时长(月)的函数模型为: $y=0.65x+22.13$, 对该模型进行显著性检验, 发现 $P<0.01$, 表明拟合函

数能够很好地反映液氮蒸发速率随时间的变化规律,研究团队还对 10 台设备的液氮加注周期进行了统计,结果显示设备投入使用 1 年内的平均加注周期为 45 ± 5 天,而使用 2 年后缩短至 30 ± 4 天,3 年后进一步缩短至 22 ± 3 天。随着设备使用年限的增加,主磁体绝热性能逐步退化,导致液氮蒸发加剧是引发主磁体故障的重要诱因,为进一步探究绝热性能退化的机理,研究团队采用红外热成像技术,对高低使用年限的两台设备进行了对比分析。使用时间较长的设备在磁体匝间绝缘处存在明显的热斑,表明该处存在绝热层破损导致的漏热,及时监测主磁体性能参数,合理制定液氮补充周期,对于降低熄灭风险至关重要^[2]。

2.2 梯度系统温升变化特征

梯度线圈的温升特性对于成像质量和设备安全至关重要,为精准评估梯度系统退化状况,本研究对 6 台磁共振设备 XYZ 三个方向线圈在高强度扫描 1 小时后的平均温升进行了连续 180 天的监测,通过布设无线温度传感器,采集线圈表面 3 个不同位置的温度数据,每 5 秒自动记录一次,获得了超过 25 万个温度数据样本,同时,通过梯度系统日志文件获取设备每天的工作时长数据,研究团队进一步编写数据处理脚本,计算每天线圈温度的最大值、最小值和平均值指标。随着累计扫描时长的增加,梯度线圈的峰值温升呈现逐日上升趋势,由使用初期的 $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增长至 $22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升幅度高达 160%,进一步绘制峰值温升的时间序列曲线发现,在连续工作日温升趋势尤为明显,但在周末等设备空闲期出现回落,研究团队统计了设备高峰期和空闲期的温升均值,发现工作日的均值高达 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而周末仅为 $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,进一步分析表明,相较于每天工作时长,当日扫描时长与次日温升初始值呈更强的正相关($r=0.88$, $P<0.01$),表明梯度线圈在连续高强度工作下的冷却不充分已成为设备使用的主要限制因素,基于监测数据,研究团队还拟合出峰值温升(T)关于日扫描时长(t)的数学模型: $T=0.12t+8.73$,针对该模型进行了统计检验,回归系数 P 值均小于 0.01,表明模型拟合优度良好,能够定量反映温升与扫描强度的内在联系。当日扫描时长控制在 6 小时以内时,梯度线圈峰值温升能够控制在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,高于此阈值时,线圈温升开始急剧攀升,研究表明,通过对梯度系统实施温度实时监控,优化扫描时长与冷却时间的配比,可有效控制梯度线圈温升幅度,降低设备故障风险。课题组提出了梯度线圈温升预警模型,当连续 3 天日均扫描时长超过 5 小时,且峰值温升超过 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

系统将自动发出预警,提示及时开展梯度系统检修,避免疲劳损伤的发生。

2.3 射频系统稳定性演变趋势

射频系统是磁共振成像的核心,其性能直接决定信号采集质量,本研究选取驻波比作为评价指标,对 6 台磁共振设备射频系统的稳定性进行了为期 1 年的跟踪监测,通过探头实时采集驻波比数据,每分钟记录一次,同时通过与设备工程日志的比对,剔除射频线圈更换等人为因素的干扰,课题组编写了数据分析算法,实现驻波比原始数据的自动筛选、清洗、聚类,获得月度驻波比均值、标准差等统计指标,结果显示,新设备投入使用的前 3 个月,驻波比均值稳定在 1.08 ± 0.02 ,而随着时间的延长,驻波比均值和波动范围逐步扩大,使用 6 个月后,驻波比均值升至 1.52 ± 0.18 ,使用 12 个月后的峰值进一步恶化至 1.92 ± 0.35 ,为建议值(1.5)的 1.28 倍,课题组进一步对 6 台设备的驻波比变化趋势进行了聚类分析,根据升高速率和波动特征可明显分为稳定组(2 台)、缓升组(3 台)、急升组(1 台)三种类型,表明射频系统稳定性退化存在一定的个体差异,通过对比分析发现,射频功率放大器工作电压与驻波比变化趋势高度一致($r=0.85$, $P<0.01$),表明功放老化是导致驻波比升高的主因,课题组进一步分析了导致功放老化加速的因素,发现设备日均开机时长、线圈插拔频次与功放电压漂移速率呈正相关,而定期进行驻波比校准的设备,其功放电压漂移速率则显著降低,基于上述发现,课题组建立了基于驻波比的射频部件故障预警模型,即当驻波比值连续 5 天超过 1.6 时,需要开展射频稳定性诊断并及时处置,针对该预警阈值进行了灵敏度和特异度分析,结果表明预警灵敏度为 85%,特异度为 82%,能够较好地平衡漏报和误报风险,研究还对射频系统故障的影响因素展开了调查分析。在射频系统故障中,前置放大器故障占 36%,线圈故障占 28%,接插件故障占 22%,而定期对放大器进行调校、对线圈进行预防性检测的设备,其射频系统故障发生率平均可降低 58%,研究表明,持续监测射频性能参数,可精准预警功放等关键部件的故障风险。

3 精准设备维护策略构建

3.1 设备性能实时监测与趋势预警方案

针对医院磁共振设备性能退化规律和影响因素,本文构建了一套覆盖磁体系统、梯度系统、射频系统的性能参数实时监测方案。明确监测指标,选取液氮

液位、中心频率、梯度温度、驻波比等对成像性能和设备安全影响最大的关键参数,建立监测指标体系。优化数据采集,综合运用设备自带功能、外置高精度传感器等非接触式方式,实现性能参数的自动采集、实时传输、集中管控,消除人工记录误差。开发远程监测系统,基于工业互联网架构,研发磁共振设备远程运维平台,实现对分散在不同科室的设备的统一监控,便于问题的集中诊断、统筹调度。建立趋势预警模型,基于百万量级的性能参数历史数据,通过相关分析、逻辑回归等统计学方法,构建设备退化趋势预警模型,量化退化加速度,预估剩余使用寿命,指导设备检修或报废。

3.2 磁场均匀度动态评估与智能匀场方案

针对主磁体磁场均匀度随时间推移出现退化的问题,本文构建了一套磁场动态评估与智能匀场优化方案。建立磁场均匀度量化评价指标体系,综合磁场方向分量、体素内磁场差、径向均匀度等指标,多角度、全方位评估磁场均匀性。研制自动化磁场测量系统,利用高灵敏度霍尔探头阵列和机器人精确定位技术,实现对感兴趣区域的快速、高密度磁场采样,自动生成磁场均匀度分布图。优化匀场策略,针对长期使用导致的主磁体匀场线圈老化问题,量化其对均匀度的影响权重,预判其退化趋势,提前制定匀场方案。开发智能匀场算法,引入模拟退火、遗传算法等启发式搜索策略,在海量匀场方案中筛选最优参数组合,实现匀场方案的自动生成和快速迭代,提高匀场效率^[3]。

3.3 冷却系统节能优化与氦资源高效利用策略

针对医院液氦消耗量大、冷却系统能耗高等痛点,本文从提高制冷效率、优化氦气利用等方面,构建了冷却系统节能优化策略。一是开展压缩机能效评估,定期监测制冷压缩机 COP、氦气回收率、放空率等性能指标,建立能效水平评价体系,及时发现和处置低效压缩机;二是优化冷水系统控制,基于冷水进出口温差和流量大数据,分析冷却负荷特点,建立温差与流量动态匹配模型,通过优化冷冻水温度设定、水泵变频控制等,实现冷水机组的节能运行;三是提高氦气利用率,优化液氦补充规程,根据磁体绝热性能,确定液氦使用极限,在保证安全的前提下,尽可能最大限度地使用氦气资源。加强备用氦气库存管理,降低液氦贮存和运输损耗^[4]。

4 精准维护策略的应用实践

为检验所构建的磁共振设备精准维护策略的有效性,本研究选取本市医院6台磁共振设备开展了连续

12个月的应用实践,实践过程中,严格执行主磁体、梯度系统、射频系统、冷却系统等关键子系统的性能参数实时监测方案,据此优化液氦补充、匀场操作、压缩机能效管理等日常维护策略,对照分析精准维护前后的设备运行数据。实施精准维护后,10台设备的平均故障率由1.8次/月下降至0.6次/月,同比降低67%;平均故障修复时间由4.6小时/次缩短至1.2小时/次,降幅达74%;平均无故障运行时间则由2 412小时/年提升至7 596小时/年,增幅高达215%,远超常规维护水平,进一步统计发现,精准维护使主磁体液氦日均蒸发量降低32%,梯度线圈峰值温升幅度降低58%,射频系统平均驻波比降低23%,设备整体故障率与关键性能参数的退化速率均呈显著负相关($P<0.01$),以上结果充分表明,以性能实时监测为基础,针对退化规律、故障模式制定的精准维护策略,能够显著提升关键部件性能,延缓设备老化进程,为医院节省大量维修成本,保障医疗服务质量^[5]。

5 结束语

磁共振成像设备的精准维护是一项复杂的系统工程,需要在海量真实运行数据挖掘的基础上,从时间和空间两个维度刻画设备退化演变规律,厘清影响设备性能的关键参数,预判设备剩余寿命,并据此制定针对性的检修策略,本文基于大样本磁共振设备运行数据的实证分析,揭示了主磁体、梯度系统、射频系统等关键部件性能退化的一般趋势和特征规律,在此基础上,从实时监测、均匀度评估、节能优化、稳定性诊断等方面构建了一整套精准维护策略,医院的应用实践表明,该策略能够显著降低设备故障率,延长使用寿命,在提升医疗服务品质的同时,为医院节省大量维护成本,创造了显著的社会和经济效益。

参考文献:

- [1] 吕佩颖,邵晓宁,刘良,等.医用磁共振成像系统附属设备的日常维护与保养研究[J].中国设备工程,2022(20):80-82.
- [2] 冯思浩.磁共振成像设备安全操作与维护保养策略[J].中国设备工程,2020(07):66-68.
- [3] 廖智麒.浅谈磁共振成像设备的质量控制与计量检测[J].计量与测试技术,2024,51(05):125-126,130.
- [4] 王威,张元勋.磁共振成像设备日常维修与维护的实践研究[J].中国医疗器械信息,2023,29(09):170-173.
- [5] 同[1].