

人工智能在心脏起搏器应用中的研究进展

左红娅

宁夏医科大学总医院 宁夏 银川 750000

摘要: 心脏起搏器的信号处理、节律识别、远程监测和术后管理,人工智能技术已经融到了整个链条里。机器学习、深度学习、强化学习各有侧重,心律分类靠机器学习,参数优化和自适应调控分别由深度学习和强化学习来支撑。智能算法能把房性、室性心律失常分清楚,房扑和房颤也能辨出来,远场R波滤波同样能搞定。远程监测这块,AI能识别电极阻抗异常、预测电池能用多久、检测导线有没有故障,还能评估信号传输质量。

关键词: 心脏起搏器;人工智能;故障预警

引言: 心脏起搏器是治疗心律失常的核心植入设备,功能安全性和长期管理效率直接关系到患者预后。嵌入式计算能力提升之后,人工智能正在从信号处理、节律识别、远程监测到术后管理,一步一步渗进起搏器的应用体系。机器学习、深度学习和强化学习的引入,让设备有了自适应调控和智能决策的能力,起搏器也在从被动执行逐步往主动优化的方向走。

1 人工智能技术在心脏起搏器领域的技术框架

1.1 机器学习算法在起搏器信号处理中的分类

按学习策略和数据处理方式来分,起搏器信号处理中用到的机器学习算法大致可以划成三类:判别式分类、生成式聚类 and 边界检测。判别式分类靠已标注的心电样本,把信号特征和心律类别之间的映射关系建起来,规律节律和各种异常波动都能区分。生成式聚类不依赖预先标注,从信号幅度、间期和形态的统计分布入手,把相似心拍自动归到一起,一些罕见的变异模式也能发现。边界检测以正常节律的特征范围为参照,新信号偏离这个范围到一定程度就发出提示,用来快速感知未知异常比较管用。三类方法在计算复杂度、存储需求和实时响应能力上各有长短,根据植入设备的具体资源条件灵活选就行。

1.2 深度学习模型在起搏器参数优化中的架构

深度学习模型用在起搏器参数优化上,架构的核心是时序信号的深度变换,分三个模块:输入变换、特征抽象和参数映射。输入变换模块把多导联心电信号和辅助传感序列做时间窗口对齐和归一化,生成标准化的张量输入。特征抽象模块靠多层非线性变换,一层一层把波形的局部形态和全局节律演变规律抽出来,形成高层次的生理状态表征^[1]。参数映射模块再把表征解码成具体的调整指令,包括起搏频率、输出幅度、感知阈值这些关键变量该调到多少。架构里用了权重共享和维度压缩

来减少计算量,还设了冗余路径,部分节点有扰动的时候输出也能稳住,保证优化过程能满足植入场景对时间的严苛要求。

2 人工智能辅助起搏器节律识别

2.1 房性心律失常与室性心律失常的智能分类

房性和室性心律失常要区分开来,智能分类得从心电信号的起源部位和传导路径入手,找判别性的特征。房性心律失常主要体现在心房除极波的形态有变化、节律不整齐,室性心律失常则表现为心室除极波宽大畸形,还有代偿间歇。智能分类系统把心室除极波的宽度、极性以及它跟心房除极波的时间关系拎出来,作为区分两类心律失常的核心参数。系统还会分析心房除极波频率规不规整、心室除极波的出现时序有什么规律,辅助判断异常激动到底从哪来的。分类决策是多特征融合起来综合评定,特征有重叠或者模糊的时候,按预设的优先判别规则来处理,误分风险能降下来。

2.2 心房颤动的实时检测与波形特征提取

心房颤动实时检测的重点,是捕捉心房活动信号的完全无序性,以及它对心室节律那种不规则传导的影响。特征提取主要看心房除极波是消失了还是变成碎裂波了、心室除极波间期随机波动得怎么样、整体节律有没有不可预测性。系统用滑动时间窗口连续分析心电信号,每个窗口里统计心室间期变异有多大、心房活动能量的频谱分布什么样。实时检测算法把特征值的变化趋势跟基线水平动态对比,无序性指标持续超阈值就判定为房颤发作。检测过程中还会盯着房颤终止后的短暂恢复特征,别把窦性节律重建过程中的正常变异误判成异常。

2.3 心房扑动与心房颤动的自动鉴别

心房扑动和心房颤动要鉴别开,关键是看心房活动是规律的还是随机的。心房扑动的心房除极波序列非常规整,频率相对固定,波与波之间的等电位线也清晰可

见；心房颤动则不一样，高频波动完全随机，等电位线也不见了。自动鉴别系统先把心房活动的主频成分和稳定性系数提取出来，再看波间期的一致性怎么样、波形形态的重复性如何。主频集中、间期变异特别小的就判定为心房扑动，频谱弥散、间期高度不整的就是心房颤动。系统还会评估心室传导比例的变化模式，心房扑动通常是固定的房室传导比例，心房颤动没有这个规律，这个特征可以辅助判断。

2.4 远场R波感知信号的智能滤波与识别

远场R波感知信号，就是起搏器在心房通道上捕捉到的远距离心室除极波。形态上接近心室的远场电位，幅度一般偏低，上升沿也比较缓。智能滤波和识别系统先根据心室通道的时间标记，划出远场R波可能出现的时间区间，再到心房通道对应的区间里，搜索符合远场形态特征的波形成分。滤波环节用自适应模板扣除和空间滤波组合的方法，在把心房自身信号保留下来的同时，削弱远场R波的能量贡献^[2]。识别环节对滤波后残余的心室成分再复核一遍，残余量要是还超阈值，就重新调一下滤波参数。系统还会把远场R波的幅度和宽度记下来，后面感知阈值自动调节的时候可以参考，保证心房通道检测够干净。

3 人工智能在起搏器远程监测与故障预警中的应用

3.1 起搏器电极阻抗异常的智能识别

电极阻抗异常识别是起搏器系统完整性监测里一个挺重要的环节。智能方法会从多个尺度去看阻抗测量值的时序变化，把生理性波动、电极界面变化和硬件故障区分开。系统定期采集阻抗数据，包括起搏回路和感知回路的阻抗，算出短期变异度和长期趋势斜率。正常情况下阻抗应该在一定范围内相对稳定，异常的话，渐进性升高多半是电极绝缘破损，渐进性降低多半是电极接触面有变化，突然大幅跳变多半是导线断了或者连接出了问题。智能识别算法把起搏输出后的电压衰减特征和电流波形形态也结合进来，综合判断阻抗变化到底是怎么回事。疑似异常的情况，系统自动增加测量频次，多拿点证据，再根据变化速度定预警优先级。

3.2 电池耗竭的预测模型与寿命评估

电池耗竭预测模型根据历史放电数据和当前负载特性，估算从当前时刻到电池耗尽还有多久。模型动态追踪电池电压怎么下降的、内阻上升速度有多快、每次起搏消耗多少电荷量，再把这几项跟预期放电曲线放一起对比。智能预测方法用状态空间建模来处理，把电池退化当成不可逆的累积过程，把起搏频率、输出幅度、感知功耗这些负载因素也考虑进来。模型输出的寿命评估

以置信区间的形式给出，显示预测的不确定性有多大，再根据近期功耗变化趋势动态调整评估结果^[3]。预测剩余时间低于预设阈值的时候，系统就发预警，给临床安排更换手术留够时间，避免换得太早造成资源浪费。

3.3 导线断裂与脱位的自动检测算法

导线断裂和脱位要早点发现，检测算法得综合看起搏系统的电学特性和信号稳定性，在故障刚冒头或者间歇性出现的时候就把隐患揪出来。算法持续盯着起搏阻抗的瞬时跳变幅度、起搏阈值的异常漂移、感知信号幅度的突然衰减，这三类参数不同的组合模式能把断裂和脱位区分开。断裂往往是阻抗间歇性大幅升高，同时起搏失夺获；脱位则是阻抗正常或者偏低，同时感知幅度骤降、起搏阈值明显升高。算法还分析起搏脉冲之后诱发的局部电位响应形态，断裂的时候诱发电位完全消失，脱位的时候诱发电位可能还保留一部分。检测结果按可信度分级输出，可信度低就先标记为可疑，多积累一些数据再确认。

3.4 远程数据传输中的信号质量评估与异常筛选

远程传过来的数据，信号质量怎么样，得先评估了才能拿来用。智能筛选系统对每次上传的数据包做三重检查，完整性、噪声水平、临床相关性，都得过一遍。质量评估先看数据传输丢了多少、误码率多高，有受损的数据包要么标记出来，要么请求重传。然后评估心电信号和阻抗信号的噪声含量，区分一下是肌电干扰、电磁耦合还是基线漂移。噪声超了可接受范围，那个时段的数据就标为不可用^[4]。异常筛选环节按临床意义给高质量数据排个优先级，跟起搏功能安全有关的事件数据优先传，常规运行数据往后放。筛选完的数据按紧急程度排好序，再交给远程随访人员，别让大量正常数据把重要信息淹了，同时远程传输的总数据量也能明显压下来。

4 人工智能在起搏器植入术后管理中的应用

4.1 植入参数的术后智能随访与调整建议

术后智能随访靠的是高频次远程数据采集，把当前起搏参数跟术后初期的基线值做对比，再结合近期变化趋势一起看，判断参数漂移在不在可接受范围里。系统重点盯着起搏阈值往哪个方向变、变化速度怎么样。阈值慢慢升高，可能得增加输出电压才能稳住夺获；阈值慢慢降了，就建议降低输出省电。感知幅度也得随访，明显衰减的时候要调高感知灵敏度，免得漏感知；明显增大就得把灵敏度降下来，别过感知。随访系统还看参数之间的相互约束关系，出联合调整建议，比如电压调了之后对电池寿命有什么影响，一并评估。

4.2 起搏器综合征的早期智能筛查

起搏器综合征要早点发现,主要看房室收缩不同步带来的血流动力学改变,在心电信号上有什么特征。智能筛查系统分析植入后的心电图,看房室传导时间怎么样、心室起搏比例多高、自身心室节律出现频率如何。心室起搏占主导、房室间期又设得不合适的时候,异常风险就明显上去了。系统还看一些能间接反映心房压力的指标,比如心房除极波形态变异大不大,还有心室起搏逆传导致心房收缩对抗心室充盈时出现的特征性表现。筛查算法把这些多维度的指标综合起来,建一个风险评分体系,评分持续走高就触发早期关注信号。系统还能根据评分变化速度快慢,把急性适应期的良性表现和需要干预的病理性趋势区分开。

4.3 患者个体化治疗方案的数据驱动生成

个体化治疗方案怎么定,得靠对患者术后长期随访数据的深度挖掘,给每个植入者量身配置起搏参数和随访计划。系统把患者的静息心率分布、活动后心率反应模式、夜间心率变异特征、每日心室起搏比例这些指标整合成个体特征向量,再跟同类人群的典型模式做对比,把患者自己独特的响应特性找出来。在此基础上出的个体化方案,包括最适下限频率设多少、频率自适应功能的敏感度系数怎么定、房室延迟时间选哪个值^[5]。方案里还包含随访间隔怎么动态调整,参数稳定、没有异常事件的,随访周期拉长一些;参数在边界上或者有波动的,复查间隔缩短一些。

4.4 起搏器依赖状态的智能评估与识别

起搏器依赖状态的评估,要判断患者自己的节律到底多大程度上靠起搏器撑着,后面参数怎么调、什么时候换,都靠这个打底。智能评估系统长期跟踪心室起搏比例多高、自身节律什么时候冒出来、能撑多久,把依赖程度量化成一个连续的分值,不是简单的二分类。系

统会看最低起搏频率下自身节律能不能稳住,起搏频率临时降下来的时候自身节律恢复得有多快、能不能恢复得起来。评估还考虑不同生理状态下依赖程度不一样,静息时依赖少、活动时依赖多的,风险特征比较特殊。识别结果按轻重程度分级,完全依赖的得设好安全的备用频率,不要做不必要的参数激进调整;非依赖的就尽量把自身传导留着,维持生理性节律。

结束语:人工智能正在改变心脏起搏器的功能边界,从信号处理、节律识别到远程监测和术后管理,AI已经覆盖了设备从装进去到用到底的整个过程。机器学习、深度学习和强化学习配合着用,起搏器有了自适应调控和智能决策的能力,逐步从被动执行往主动优化的方向走。往后看,算法效率再提一提、硬件算力再往上走一走,AI还能把技术框架和临床需求之间的空隙进一步填上,给心律失常患者提供更精准、更安全的长期管理方案。

参考文献

- [1]范建华,顾翔.人工智能在心脏起搏器应用中的研究进展[J].中国心脏起搏与心电生理杂志,2025,39(2):84-88.
- [2]吴春生,赵云迪,袁嘉娴,等.面向低功耗的心脏起搏器信号感知自适应算法及集成电路实现[J].西北大学学报(自然科学版),2025,55(6):1220-1243.
- [3]赵军,赵毅航,武志军,等.电动汽车无线充电系统对心脏起搏器的电磁兼容与热效应影响[J].电工技术学报,2022,37(z1):1-10.
- [4]郭彬彬,黄彦淇,鄢盛杰,等.体域网通信技术在心脏起搏器程控/遥测中的应用进展[J].中国生物医学工程学报,2025,44(5):591-603.
- [5]王通.基于人工智能的医用电子仪器预测性维护策略[J].数字技术与应用,2025,43(2):35-37.