

# 智能化麻醉决策支持系统：从多模态数据融合到围术期闭环管理

杜文波

菏泽医学专科学校临床技能实训中心 山东 菏泽 274000

**摘要：**现代临床麻醉学已超越单纯提供无痛与肌松的范畴，演变为一门涵盖围术期生命功能精准调控、器官保护与远期预后改善的关键学科。面对患者个体差异性与手术应激反应的复杂性，传统的、依赖固定阈值与麻醉医师个人经验的反应式管理模式，在预见性、精准性与一致性方面存在显著局限。“智能化麻醉决策支持系统（I-ADSS）”系统以围术期精准医学与加速康复外科（ERAS）理念为理论基石，深度融合多模态生命体征监测数据、药物动力学/药效学模型、电子病历信息及动态超声影像学评估，通过先进的机器学习算法构建从风险评估、实时预警到干预建议的完整闭环。

**关键词：**人工智能；围术期医学；决策支持系统；多模态监测；机器学习；精准麻醉

## 引言

临床麻醉学的终极目标是在保障患者绝对安全与无痛的前提下，创造理想的手术条件，并积极促进术后快速康复。传统麻醉管理主要基于间断性或连续性的生命体征监测，依据预设的报警阈值（如血压低于90/60 mmHg）进行事后响应。这种模式存在两大核心缺陷：一是预警滞后性，生理代偿机制可能掩盖早期紊乱，当阈值报警触发时，病理生理改变已然发生；二是决策碎片化，麻醉医师需在高压环境下，整合来自不同设备、不同维度的海量信息，并依赖个人知识与经验进行瞬时判断，认知负荷巨大，易导致信息过载与判断偏差。

当前，围术期医学正朝着“精准化”与“全程化”方向迅猛发展。精准麻醉要求根据患者的基因型、表型、合并症及实时药效反应，“量体裁衣”地实施麻醉干预。

ERAS理念则要求将麻醉管理的视角从术中延伸至术前预康复与术后长期转归。这些先进理念的落地，亟需能够处理高维、异构、实时大数据并输出精准洞察的技术工具。

构建智能化麻醉决策支持系统（Intelligent Anesthesia Decision Support System, I-ADSS）是临床实践的迫切需求。I-ADSS并非替代麻醉医师，而是作为其“超级智能助理”，通过将多模态数据转化为可操作的临床洞见，实现从“被动监测-反应”到“主动预测-预防”的根本性转变。

## 1 I-ADSS的理论框架：构建围术期管理的“数字

## 孪生”

I-ADSS的设计核心在于为每位患者构建一个动态更新的“围术期数字孪生体”。该数字孪生体是患者生理、病理及药理学状态在虚拟空间的高保真映射，能够实时模拟、预测并优化现实世界中的麻醉管理过程<sup>[1]</sup>。

### 1.1 核心理论支柱

围术期精准医学。强调干预措施的个体化。I-ADSS通过整合基因组学（如阿片类药物代谢相关CYP450酶多态性）、蛋白质组学（如炎症标志物）及表型数据（如心脏超声动态参数），为制定个体化麻醉方案提供定量依据。

药代动力学/药效学（PK/PD）模型引导的靶控输注。将传统的基于体重的给药模式，升级为以效应部位靶浓度为目标的闭环控制。I-ADSS内置群体及个体化PK/PD模型，结合实时药效监测反馈（如脑电指数），实现麻醉药物输注的自动化与最优化。

系统生理学与控制论。将人体循环、呼吸、神经等系统视为一个由多重反馈环路构成的复杂控制系统。I-ADSS通过分析心率变异性（HRV）、血压波形等信号，评估自主神经张力与系统储备功能，提前洞察失代偿风险。

### 1.2 系统层级架构

I-ADSS采用分层解耦的设计思想，确保系统的稳定性、可扩展性与可维护性，具体分为四层：

数据感知与融合层（底层）。作为系统的“感官”，负责从异构数据源中实时、无损地采集数据。包括：（1）高频率波形数据（ECG、动脉血压波形、PPG、EEG、EtCO<sub>2</sub>波形）；（2）离散监测数据（体温、有创压力值、BIS值）；（3）药物输注数据（输注泵的实时速率与累计量）；

中图分类号：R614；TP18文献标识码：A

(4) 手术事件标记 (从麻醉信息系统或与手术室设备交互中获取的关键步骤时间点); (5) 患者背景数据 (从EMR中提取的病史、实验室结果、影像报告); (6) 床旁超声/超声心动图的定量测量结果。

**智能分析与挖掘层 (核心层)。**作为系统的“大脑”，负责从原始数据中提取特征、识别模式、运行预测模型。关键技术包括：针对波形数据的时频域分析 (如小波变换)、非线性动力学分析 (如多尺度熵); 利用自然语言处理 (NLP) 技术从非结构化病历文本中提取关键实体与关系; 运行多种机器学习模型，包括用于时间序列预测的长短期记忆网络 (LSTM)、用于风险分层的梯度提升机 (XGBoost) 以及用于图像辅助分析的卷积神经网络 (CNN)。

**决策支持与交互层 (应用层)。**作为系统的“交互界面”，将分析结果转化为临床可理解的洞察。以“麻醉驾驶舱”的形式进行可视化呈现，包括全局风险仪表盘、生理趋势的集成视图、药物浓度-效应关系曲线、以及基于循证医学知识库生成的层级化干预建议 (如“一级建议快速输注晶体液250ml; 二级建议考虑启动去甲肾上腺素0.03-0.05  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ ”)。

**反馈执行与优化层 (闭环层)。**作为系统的“执行与学习”环节。在高级模式下，系统可在医师授权后，通过应用程序接口 (API) 控制输注泵，实现特定靶标的闭环控制 (如闭环靶控输注丙泊酚维持BIS值于40-60)。同时，系统持续收集干预反馈与最终患者结局，利用在线学习或周期性的模型再训练，实现性能的持续迭代优化。

## 2 I-ADSS的关键技术模块与创新应用场景

### 2.1 基于AI的术中低血压预测与根源分析

术中低血压与心肌损伤、急性肾损伤等不良结局密切相关。传统监测仅显示当前血压值。I-ADSS的低血压预测模块，通过连续分析动脉血压波形特征 (如波形形态、收缩压变异度SPV、舒张期面积)、前负荷指标 (如每搏量变异度SVV，由微创心排量监测提供) 以及血管张力相关指标 (如脉搏波传导时间)，利用时间序列预测模型 (如TCN或Transformer) 可实现提前5-15分钟预测低血压事件，准确率 (AUC) 可达0.85-0.95[2, P.110]。系统能结合当时药物输注情况 (如瑞芬太尼浓度骤升) 和手术刺激强度 (如腹腔探查)，对低血压的可能根源 (如血容量不足、血管扩张、心肌抑制) 进行推断，为精准干预提供方向。

### 2.2 多模态意识深度监测与伤害性刺激反应评估

理想的麻醉深度是意识消失与伤害性刺激反应抑制的平衡。单一的脑电指数 (如BIS) 存在局限性。I-ADSS

的意识深度模块融合了前额脑电图 (分析BIS、SEF等)、额肌电图 (反映伤害性刺激引起的面部肌肉活动) 以及源自PPG的伤害性刺激指数 (Nociception Level Index, NOL) 等多模态信号。通过深度学习模型，系统能更准确地区分“镇静充分但镇痛不足”与“镇静过深”的状态，从而指导镇静药与阿片类药物的个性化配比，在避免术中知晓的同时，减少术后呼吸抑制、恶心呕吐及阿片类药物用量，直接契合ERAS目标。

### 2.3 围术期器官功能保护与并发症预警

I-ADSS将管理视野从术中扩展到整个围术期。其并发症预警模块利用术前、术中、术后早期的多维数据流，预测远期不良结局。

**术后认知功能障碍 (POCD) 预警。**整合患者年龄、教育水平、术前认知评估、术中脑氧饱和度 (rSO<sub>2</sub>) 下降幅度与持续时间、低血压发生谱、炎症标志物趋势等，构建风险预测模型。高危预警可触发术中脑保护策略 (如优化血压、维持正常二氧化碳分压、使用右美托咪定) 和术后早期认知康复介入。

**急性肾损伤 (AKI) 风险分层。**结合术前肾功能基线、术中平均动脉压低于个体化耐受阈值的时间与幅度、使用肾毒性药物情况等，实时计算AKI风险评分，指导目标导向的液体治疗与血管活性药使用。

**术后疼痛轨迹预测。**基于手术类型、术前疼痛敏感度 (如定量感觉测试结果)、术中阿片用量及基因型，预测患者术后疼痛强度与阿片需求，实现超前、个性化的多模式镇痛方案制定。

### 2.4 面向临床科研与质控的数据中台

I-ADSS在临床服务之外，天然构建了一个高质量的麻醉大数据平台。所有经过清洗、标注、时间对齐的围术期数据被安全地存储于数据中台。这为开展真实世界研究、建立专科疾病 (如嗜铬细胞瘤、肺动脉高压) 的麻醉管理知识图谱、以及进行麻醉质量持续改进 (如分析低血压事件相关的系统因素) 提供了前所未有的资源<sup>[2]</sup>。

## 3 临床实施路径、价值与面临的挑战

### 3.1 分阶段临床实施路径

I-ADSS的落地应采取循序渐进、人机协同的原则：

**辅助预警阶段。**系统作为“监测增强”工具，提供风险预警和趋势分析，所有决策与操作由麻醉医师完成。此阶段旨在建立临床信任并优化报警机制，减少报警疲劳。

**决策支持阶段。**系统提供分级、循证的干预建议，医师参考建议后执行。系统开始记录“决策-反馈”闭环数据，用于模型优化。

**半闭环控制阶段。**在严格限定的场景下 (如维持BIS

于目标范围的丙泊酚输注),经医师授权后,系统可自动控制单一设备。医师负责监督和全局管理。

高级闭环管理与集成阶段。实现多变量、多目标的智能化闭环管理(如同时调控血压与麻醉深度),并与医院信息系统、术后康复平台无缝集成,实现围术期全程数据链管理与智能随访。

### 3.2 核心临床价值

提升患者安全与预后。通过主动风险防御,减少严重不良事件的发生率、持续时间与严重程度,直接改善患者远期生存质量。

实现麻醉精准化与同质化。将最佳实践和专家经验编码入系统,减少不同医师、不同医疗机构间的管理差异,提升整体医疗质量基线。

赋能医学教育与培训。I-ADSS记录的全维度数据是进行病例复盘、模拟训练和 competency-based 评估的绝佳教材,可加速年轻医师的培养。

### 3.3 面临的主要挑战与对策

数据壁垒与标准化困境。医疗设备数据接口不开放、格式不统一是最大障碍。需要行业、学术机构与监管部门共同推动建立围术期数据标准(如HL7 FHIR在麻醉领域的扩展)。

算法可靠性、偏见与可解释性。模型可能在特定人群(如老年人、罕见病患者)上表现不佳,或隐含数据偏见。必须采用严格的外部验证、持续的性能监测,并大力发展可解释人工智能(XAI)技术,使算法决策过程透明化。

法律、伦理与责任界定。当系统建议出现错误或自动执行导致损害时,责任如何划分?这需要更新现有的医疗责任法规,明确“人机协同”模式下的权责边界,并建立系统的审计追踪机制。

临床接受度与 workflow 重塑。新系统可能改变既有的工作习惯。成功的实施依赖于深入的临床培训、人性化的交互设计以及将系统无缝嵌入现有工作流程,而非增加额外负担。

## 4 结束语

智能化麻醉决策支持系统(I-ADSS)是临床麻醉学与信息科学深度交叉融合的必然产物,它标志着该学科正从一个主要依赖技艺的经验学科,迈向一个基于数据与模型的精准科学。通过构建患者的“围术期数字孪生”,I-ADSS实现对麻醉过程从宏观到微观、从当前到近未来的全方位感知、理解与优化。其价值不仅在于预警单个风险事件,也在于通过对围术期全链条数据的智能分析,重塑以患者结局为导向的麻醉管理范式。

I-ADSS的发展趋势:一是“云边端”协同计算。二是多组学数据融合,将基因组、代谢组等微观数据与宏观生理信号结合,实现真正意义上的“生物数字孪生”。三是跨场景延伸,将管理场景从手术室内拓展至术前门诊评估、术后重症监护与普通病房康复,形成真正的围术期智能管理连续体。

### 参考文献:

- [1] Hatib F, Jian Z, Buddi S, et al. Machine-learning Algorithm to Predict Hypotension Based on High-fidelity Arterial Pressure Waveform Analysis[J]. Anesthesiology, 2018, 129(4): 663-674.
- [2] Wijnberge M, Geerts BF, Hol L, et al. Effect of a Machine Learning-Derived Early Warning System for Intraoperative Hypotension vs Standard Care on Depth and Duration of Intraoperative Hypotension During Elective Noncardiac Surgery: The HYPE Randomized Clinical Trial[J]. JAMA, 2020, 323(11): 1052-1060.