

DOI: 10.12287/j.issn.2096-8965.20260304

·综述·

视频喉镜技术迭代及 AI 融合转化研究进展

王辰雨^{1#}, 朱成龙^{1,2#}, 邹最^{1*}

(1. 海军军医大学麻醉系, 上海 200433;

2. 南京大学医学院附属金陵医院麻醉科, 江苏 南京 210002)

【摘要】当前气道可视化设备已完成多代更新, 但现有文献缺少对三代产品完整演进梳理, 国内外机型横向对比的整合分析不足; 同时, 气道人工智能 (AI) 相关研究快速增多, 但多种落地限制的讨论分散见于各类单篇文献, 尚未形成系统性归纳。基于此, 本文以视频喉镜技术演进与人工智能临床转化两大主线为切入点, 整合现有模拟插管试验、真实病房队列、气道深度学习、内镜行业共识等中英文研究资料, 系统梳理三代喉镜的技术优势与国内外机型适用场景差异, 集中梳理想能气道设备规模化推广的现实瓶颈, 并针对性提出配套改进思路, 为临床气道器械选择、国产智能喉镜研发、行业标准化管理提供完整文献依据。本文检索近5年国内外气道管理、视频喉镜、人工智能气道预测相关中英文文献, 结合早期文献完善视频喉镜发展历程, 系统梳理直视喉镜至可视化、智能喉镜完整迭代脉络, 总结国产与进口视频喉镜临床性能及转化现状。结果表明视频喉镜已成为气道管理主流器械之一, 但产业化与标准化仍存在短板; AI 深度融合是核心升级方向, 未来需完善多中心临床验证, 统一设备评价规范, 同步优化硬件适配与基层成本控制方案, 全方位实现气道诊疗的精准化和标准化。

【关键词】视频喉镜; 气道管理; 技术迭代; 人工智能; 临床转化

中图分类号: R614

文献标识码: A

文章编号: 2096-8965 (2026) 03-0029-11

Research progress on technological evolution of video laryngoscopes and AI-integrated clinical translation

Wang Chenyu^{1#}, Zhu Chenglong^{1,2#}, Zou Zui^{1*}

(1. School of Anesthesiology, Naval Medical University, Shanghai 200433, China;

2. Department of Anesthesiology, Nanjing Jinling Hospital, Affiliated Hospital of Medical School,

Nanjing University, Nanjing 210002, Jiangsu, China)

【Abstract】Airway visualization devices have undergone multiple technological iterations, but the existing literature lacks a comprehensive review of the complete evolution of three generations of devices, and integrated comparative analyses of domestic and international models remain insufficient. Meanwhile, research on artificial intelligence (AI) applications in airway management is expanding rapidly, but discussions of the various barriers to real-world implementation remain scattered across individual publications and have not yet been systematically synthesized. Accordingly, this review focuses on two main themes: Video laryngoscope evolution and the clinical translation of AI for airway management. It integrates Chinese and English language evidence from simulated intubation trials, real-world ward cohorts, airway deep-learning studies, and endoscopy consensus statements to clarify the technical advantages of the three generations of laryngoscopes and differences in the applicable scenarios of domestic and international models, systematically summarize practical barriers to the large-scale adoption of intelligent airway devices, and propose

收稿日期: 2026-07-06; 修回日期: 2026-08-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (82572494)

通信作者: 邹 最 (1980-), 男, 湖南长沙人, 主任医师, 教授, 博士研究生导师, 主要从事脓毒症和肿瘤共病的发病机制和防治策略、医疗器械创新研发方向研究, E-mail: zouzui@smmu.edu.cn

#为共同第一作者

targeted improvement strategies, thereby providing a comprehensive evidence base for clinical airway device selection, the development of domestic intelligent laryngoscopes, and standardized management across the industry. A search is conducted for Chinese and English language literature published in China and abroad over the past five years on airway management, video laryngoscopy, and AI-based airway prediction, together with earlier literature to provide a complete account of the development of video laryngoscopes. The full iterative trajectory from direct laryngoscopes to video and intelligent laryngoscopes is systematically mapped, and the clinical performance and translational status of domestic and imported video laryngoscopes are summarized. The evidence indicates that video laryngoscopes have become one of the main devices for airway management, although gaps in industrialization and standardization remain. Deep integration with AI is the key direction for technological upgrading, and future efforts should strengthen multicenter clinical validation, establish unified device-evaluation standards, and simultaneously improve hardware compatibility and optimize cost-control strategies for primary-level healthcare institutions, thereby comprehensively advancing precision and standardization in airway diagnosis and treatment.

【Keywords】 Video laryngoscope; Airway management; Technological evolution; Artificial intelligence; Clinical translation

0 引言

气道管理是临床诊疗的核心基础操作之一, 气道通畅是保障患者生命安全的关键前提。困难气道是围手术期、急诊救治高发高危临床场景。气道评估不足、插管操作失败是麻醉致死、缺氧性脑损伤等重度不良事件的首要诱因, 同时也是麻醉领域发生医疗纠纷、高额索赔最常见源头之一^[1-2]。常规 Macintosh 直视喉镜依靠三轴对齐视野完成插管, 操作时对颌骨、咽喉软组织牵拉力度大, 颈椎活动幅度高, 肥胖、小下颌人群暴露效果差, 操作高度依赖操作者个人经验与操作场景^[3-4]。

20世纪90年代微型CCD摄像、光纤成像技术量产落地, 初代光纤视频喉镜正式投入临床, 此后硬件成像、镜体设计持续改良, 逐步形成中期进口便携机型、现代国产一体化视频喉镜产品格局。近年来深度学习、边缘计算等人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术为视频喉镜智能化升级提供全新路径, 但智能融合方案仍面临多重落地阻碍。

梳理现有国内外相关文献可发现明显研究缺口, 多数文献仅单一一对比某一类视频喉镜的短期插管指标, 缺少从传统直视设备到视频喉镜完整纵向技术演进梳理, 国产与进口机型分层循证数据整合分析不足; 现有气道AI相关研究分散于单中心模拟试验或小样本择期手术队列, 未系统归纳AI融合技术、产业及监管瓶颈; 目前缺少立足国产气道器械, 分析国产喉镜临床数据缺失、行业标准空白等产业痛

点综述。

基于上述研究空白, 本文系统检索近5年气道管理、视频喉镜、气道AI中英文文献, 补充经典历史器械研究资料, 纵向梳理直视喉镜→初代光纤视频喉镜→进口便携视频喉镜→国产一体化视频喉镜迭代脉络, 多维度量化对比传统设备与视频喉镜的临床优劣, 横向对比C-MAC、McGrath进口机型与优亿 (UE)、兰佳 (LanJia)、VDO国产机型适用场景、循证短板; 阐释AI与视频喉镜融合技术原理及临床应用价值, 归纳视频喉镜落地瓶颈; 立足国产气道器械产业发展痛点, 剖析国产视频喉镜临床证据匮乏、核心光学元器件对外依赖等关键问题, 提出长远发展对策。

1 从传统喉镜到视频喉镜的迭代历程

1.1 传统直视喉镜的技术特征与临床局限

传统直视喉镜以 Macintosh 弯镜片、Miller 直镜片为主, 依靠肉眼直线直视声门完成气管插管, 结构简单、成本低廉, 长期作为手术室常规气道工具。但此类设备存在不可规避的先天缺陷。Macintosh 镜片需尽量对齐口、咽、喉三轴, 正确操作时应向前上方提拉下颌。若操作者错误以上切牙为支点进行杠杆式撬动, 则会导致应力集中于上切牙, 增加牙损伤风险; 此外, 镜片置入过深或角度不当亦可能压迫咽后壁黏膜。Gadomski 等^[4-7]的插管生物力学对照试验量化证实, 常规 Macintosh 镜片插管峰值作用力可达 48.8 N, 枕骨至 C5 颈椎平均伸展角度 29.5°,

持续机械挤压会造成牙釉质挫伤、牙龈撕裂,同时牵拉舌骨、会厌韧带,引发术后咽喉水肿、声音嘶哑、吞咽疼痛等并发症^[8]。若遇到科马克-莱汉分级(声门视野分级)(Cormack-Lehane, C-L)Ⅲ~Ⅳ级视野患者为代偿暴露视野,操作者会进一步加大上抬力度,使并发症更加严重。直线光路限制造成困难气道声门暴露分级差,普通病房大样本回顾研究^[3,6]显示,传统直视喉镜首次插管成功率仅59%,远低于视频喉镜的79%,多次尝试会显著提升低氧、误吸并发症风险。插管操作学习曲线陡峭,低年资

医师、基层医护初次插管成功率仅60%左右;直视喉镜无影像留存功能,操作过程无法复盘,规培医师学习困难,气道评估完全依靠操作者主观判断,观察者一致性较差^[9-10]。

1.2 视频喉镜的诞生背景与迭代阶段

随着微型高清摄像头、光纤传导、便携式显示屏产业化成熟,视频喉镜于20世纪90年代完成初代产品开发,历经迭代完成临床转化升级^[11-13],各代喉镜的时间节点、代表机型、技术特征汇总见表1。

表1 可视喉镜技术迭代时间轴汇总表
Table 1 Timeline of technological evolution of video laryngoscopes

时间轴	产品代次	代表设备	核心技术	主要优势	固有限制性
1990年以前	传统直视喉镜	Macintosh 弯镜片、Miller 直镜片	分体式镜柄+可拆卸金属镜片,无电子成像元件	结构极简,采购成本低	需对齐三轴,操作力集中,并发症多;C-L 分级差,首次成功率低;学习曲线陡峭;无影像留存功能;观察者一致性较差
1990—2000年	初代光纤视频喉镜	奥林巴斯 ENF-P3 柔性纤维喉镜、永岛 SFT-1 硬质光纤喉镜	光纤束光传导成像,外置独立显示器	可间接观察喉部解剖,突破直视喉镜部分视野限制	光纤束成像颗粒感、光学畸变、摩尔伪影;画面尺寸小;设备笨重;无图像存储功能
2000—2010年	中期便携 CMOS 视频喉镜	C-MAC、McGrath 型视频喉镜	CMOS 高清成像芯片;集成便携显示屏;新增拍照、录像存储;直视/视频双模式切换	设备小型便携;成像质量提升;可留存操作影像;C-MAC 支持直视视频双模式	设备采购成本高,配套耗材价格昂贵,镜头抗雾抗污染能力有限
2010年至今	国产一体化可视喉镜	UE、LanJia、VDO 国产机型	国产 CMOS 成像模组;一体化手柄显示屏;国产化镜片结构设计	购置成本低,耗材性价比高,适合基层医疗机构普及	大样本多中心临床数据匮乏

注: C-L: 科马克-莱汉分级(声门视野分级), Cormack-Lehane。

伴随微型高清摄像头、光纤传导、便携式显示屏产业化成熟,视频喉镜于20世纪90年代完成初代产品落地,整体上分为柔性纤维喉镜和硬质光纤望远镜喉镜两大类型,代表机型为奥林巴斯 ENF-P3 柔性纤维喉镜和永岛 SFT-1 硬质光纤喉镜。光纤束传输画面存在明显颗粒感、光学畸变、摩尔彩色伪影,配套独立外置显示器屏幕尺寸偏小、成像亮度不足;受成像短板限制,初代设备仅适用于手术室择期喉部静态检查,难以满足急诊、ICU 快速插管、气道急救等高强度动态操作场景,临床适用范围狭窄^[14]。

2000—2010 年,视频喉镜迎来关键硬件升级,升级为 CMOS 高清成像芯片,新增一键拍照、录像存储功能,同时体积缩小,更加便携,代表产品包括进口 C-MAC、McGrath^[15]。C-MAC 的独特优势为

可自由切换直视/视频双模式,镜片近端的操作空间更大,导管送入更顺畅,但设备及一次性镜片均为品牌专属配件,长期使用成本偏高。McGrath 手柄自带小型便携屏幕,更适合院前狭小抢救空间,但镜片近端宽度不足,导管操作阻力更大,两类设备镜头抗雾、抗血液污染能力有限,遇到镜头遮挡的紧急情况难以处理^[15]。

国内厂商基于国人短颈、肥胖、小下颌高发的困难气道解剖特征迭代出 UE、LanJia、VDO 三大系列多功能视频喉镜,镜片针对国人短颈、肥胖、小下颌等气道特征重新改良,该类产品无需向特定品牌方采购专属镜片。初学者模拟插管对照试验显示,LanJia 机型定位大角度改良视频喉镜,镜体远端呈约 90°的 L 型结构,贴合中立位口咽解剖,平均声门

显露时长为 5.47 s, 新手首次插管成功率为 89.5%; UE 属于中等弯角视频喉镜, 适用于张口受限场景, 在张口受限模拟环境成像稳定性更强; VDO 同样是中等弯角视频喉镜, 在插管固定通气环节速度最快。几款国产设备均支持插管视频本地归档, 建立标准化档案, 硬件预留嵌入式 AI 芯片搭载接口, 为后续智能升级预留空间^[13,16]。

1.3 传统直视喉镜与视频喉镜多维度量化对比

1.3.1 插管生物力学指标对比

人体气道力学对照试验结果显示, 传统 Macin-

tosh 镜片插管峰值作用力可达 48.8±15.8 N, 视频喉镜仅 10.4±2.8 N, 力学负荷降低了近 79%; 操作时枕骨至 C5 颈椎伸展角度直视喉镜均值为 29.5°, 视频喉镜仅 19.1°^[7], 大幅降低颈椎牵拉带来的术后颈痛、脊髓刺激的风险, 对于颈椎损伤、强直性脊柱炎患者优势突出。在标准化困难气道模拟模型中, 直视喉镜造成的咽喉软组织形变幅度约为视频喉镜的 2.3 倍, 牙体及口咽黏膜损伤发生率明显升高^[17], 相关数据如表 2 所示。

表 2 不同类型喉镜插管生物力学指标对比
Table 2 Comparison of biomechanical parameters for intubation with different types of laryngoscopes

观察指标	Macintosh 直视喉镜	视频喉镜	P 值	文献来源
最佳声门显露时峰值作用力(N)	48.8±15.8	10.4±2.8(Airtraq)	<0.001	Hindman 等 ^[7]
枕骨—C5 颈椎伸展角度(°)	29.5±8.5	19.1±8.7(Airtraq)	0.002	
正常气道麻醉医师操作峰值力(N)	39±22	27±15(GlideScope)	<0.05	Carassiti 等 ^[17]
正常气道学员操作峰值力(N)	45±24	21±15(GlideScope)	<0.05	
困难气道(舌水肿)麻醉医师峰值力(N)	95±22	66±20(GlideScope)	<0.05	
困难气道(舌水肿)学员操作峰值力(N)	100±38	48±16(GlideScope)	<0.05	
镜片平均接触压力(MPa)	0.13	0.07(GlideScope)	—	
颈椎固定场景首次插管成功率(%)	90(麻醉医师)/85(学员)	100(GlideScope, 两组均 100%)	<0.05	
舌水肿场景首次插管成功率(%)	5%(两组均 5%)	100(GlideScope, 两组均 100%)	<0.001	

注: RCT: 随机对照试验, Randomized Controlled Trial。

1.3.2 声门暴露分级及插管难度对比

以 C-L 分级为评价标准, 纳入 41 项研究、4 615 例受试者的荟萃分析显示: 相比直视喉镜, 视频喉镜 C-L Ⅲ/Ⅳ 级不良视野总体发生率由 22.7% 降至 8.9%^[18]; 肥胖、小下颌困难气道人群中, 直视喉镜不良视野发生率 37.2%, 视频喉镜为 11.5%, 声门开放百分比评分平均提升 24.91 分, 可降低反复插管引发的低氧、黏膜损伤风险^[19]。首次插管成功率方

面, ICU 危重患者队列中视频喉镜组为 85.1%, 显著高于直视组的 70.8%; 普通病房非麻醉医师操作场景下, 视频喉镜首次成功率 79.3%, 直视组仅为 58.7%, 初学者亚组差距最为明显。操作时长中, 急诊插管视频喉镜中位时间较直视喉镜缩短 6.92 s, 口咽/牙齿损伤、食管误插等并发症发生率亦显著降低^[1,18-20]。上述核心指标汇总如表 3 所示。

表 3 直视喉镜与视频喉镜声门暴露分级及插管难度对比
Table 3 Comparison of glottic exposure grades and intubation difficulty between direct and video laryngoscopes

评估维度	具体指标	直视喉镜	可视喉镜	效应量 / 临床意义	文献来源
声门显露质量	C-L Ⅲ/Ⅳ 级不良视野发生率(总体)	0.227	0.089	困难视野下降 62%	Hansel 等 ^[18]
	困难气道 C-L Ⅲ/Ⅳ 级发生率	0.372	0.115	受限气道优势更突出	Hansel 等 ^[18]
	重度肥胖人群 C-L Ⅲ/Ⅳ 级例数	可视组的 3 倍	—	肥胖人群获益显著	Lee 等 ^[19]
	声门开放百分比评分提升(分)	—	24.91	声门显露面积大幅增加	Alsabri 等 ^[11]
	插管难度量表评分(中位数)	2 分(McCoy)	1 分(C-MAC D-Blade)	整体操作难度降低	Lee 等 ^[19]

续表

评估维度	具体指标	直视喉镜	可视喉镜	效应量 / 临床意义	文献来源
首次插管成功率	ICU 危重患者 (多中心 RCT)	0.708	0.851	绝对差 + 14.3%, $P<0.001$	Prekker 等 ^[20]
	急诊插管 (Meta 分析)	—	—	RR=1.09, $P=0.02$	Alsabri 等 ^[1]
	普通病房 (回顾队列)	0.587	0.793	$P<0.001$	Baek 等 ^[21]
	急诊插管 Meta	—	—	MD=-6.92 s, $P=0.02$	Alsabri 等 ^[1]
插管时效	ICU 危重患者	46 s	38 s	中位差-8 s	Prekker 等 ^[20]
	潜在困难气道 (McGrath vs C-MAC)	67 s (McGrath)	50 s (C-MAC)	$P<0.001$	Ng 等 ^[22]
并发症与辅助操作	食管误插管发生率 (急诊 Meta)	—	—	RR=0.37, $P=0.04$, 视频喉镜显著降低	Alsabri 等 ^[1]
	口咽/牙齿损伤发生率 (急诊 Meta)	—	—	RR=0.15, $P=0.005$, 视频喉镜显著减少	Alsabri 等 ^[1]
	严重并发症发生率 (ICU)	0.209	0.214	差异无统计学意义	Prekker 等 ^[20]
	严重并发症发生率 (ICU)	0.209	0.214	差异无统计学意义	Prekker 等 ^[20]

注：RR：相对风险比，Relative Risk；MD：均数差，Mean Difference。本研究中 ICU 场景下严重并发症统一定义为：插管相关心跳骤停、重度低氧血症（血氧饱和度持续<80 % 超过 60 s）、气道穿孔、大量误吸、严重咽喉大出血、需气管切开补救插管、插管后缺氧性脑损伤；上述严重并发症发生率两组差异无统计学意义。视频喉镜在首次插管成功率、操作时长、食管/口咽黏膜损伤方面优于直视喉镜，但危重患者致命级严重不良事件发生风险差异无统计学意义。

1.3.3 国产主流机型性能分化

设备在声门显露速度、插管成功率等维度各有侧重，

国产 UE、LanJia、VDO 三大品牌系列针对国人

具体性能对比如表 4 所示。

短颈、肥胖、小下颌气道解剖特征专门优化，三款

表 4 三款国产视频喉镜基础参数、显露分级与插管操作指标对比
Table 4 Comparison of basic parameters, glottic exposure grades, and intubation performance indicators among three domestic video laryngoscopes

对比维度	细分指标	LanJia(LJ-N700)	UE(UE-TDC3)	VDO(VDO-100A)	组间 P 值
设备基础信息	镜片结构	90°超弯 L 型改良镜片	大角度超弯镜片	大角度超弯镜片	—
声门显露 C-L 分级分布	I 级(完整声带)例(%)	22(68.8)	18(56.3)	15(46.9)	—
	II 级(部分声带)例(%)	8(25.0)	9(28.1)	11(34.4)	—
	III 级(仅会厌)例(%)	2(6.3)	4(12.5)	5(15.6)	—
	IV 级(未见会厌)例(%)	0(0)	1(3.1)	1(3.1)	—
插管时间指标(均数±标准差, s)	IVT 声门显露时长	5.47±2.84	9.29±2.88	8.97±2.99	0.001
	VFT 显露至置管总时长	25.21±7.35	25.04±7.75	27.66±3.80	0.310
	FVT 置管至首次通气时长	5.61±1.88	6.95±2.82	4.95±1.80	0.004

注：数据来源于 Wang 等^[13]，试验对象为 29 名无任何气管插管经验医学生，采用标准化气道模拟人体模型试验；IVT：喉镜过切牙至可完成 C-L 分级的声门显露时间，Intubation View Time；VFT：声门显露至喉镜拔出时间，View-to-Finish Time；FVT：插管成功至第一次通气时间，First Ventilation Time。

2 视频喉镜临床应用现状与转化进展

2.1 主流视频喉镜设备分类与技术特点

2.1.1 按品牌与市场定位划分：进口高端机型、国产经济型机型两大体系

进口高端机型以 C-MAC、McGrath、Pentax Airway-Scope 为代表，3 款视频喉镜的具体数据见表 5^[23]。C-MAC 保留经典麦氏镜片形态，操作手感与传统直视喉镜高度统一，临床医师无需重新适应操作手法；设备搭载一体化 CMOS 高清摄像模组，可同步实现直视、视频两种观察模式，若镜头起雾、设备供电异常，可立即切换纯直视操作，提升急救场景安全性^[19]；成像分辨率高、内置完整影像存储系统，配套标准化气道教学软件^[18,20]；McGrath 采用手柄集成一体式微型显示屏，整机体积小，便携，适用于普通病房床旁、院前急救、持续心肺复苏等狭小抢救场景；设备沿用经典 Macintosh 麦氏镜片造型，操作逻辑与传统喉镜高度一致^[24]。Pentax Airway-Scope 自带导管导向通道，声门显露分级更优，新手插管难度更低。但 3 类进口设备主机采购、一次性专用镜片耗材价格偏高，全生命周期使用成本显著更高，受预算限制难以在基层医疗机构大规模普及^[19]。

表 5 三款进口高端视频喉镜临床量化指标对比

Table 5 Comparison of quantitative clinical parameters among three high-end imported video laryngoscopes

观测指标	C-MAC	McGrath MAC	Pentax AWS	统计差异
C-L I 级声门暴露占比	0.87	0.761	0.97	$P<0.001$
平均插管完成时长	31.9±17.6 s	33.5±15.2 s	20.6±11.5 s	$P<0.001$
首次插管成功率	0.93	0.912	0.95	无显著差异
操作主观难度评分(0=极易, 100=极难)	10分	12.5分	0分	$P<0.001$
术中需喉外按压辅助比例	0.31	0.183	0	$P<0.001$

注：数据来自 Teoh 等^[23]，Pentax AWS 因自带导管导向通道，声门显露与操作难度指标显著优于另外两款无通道视频喉镜。

国产经济型主流机型包含 UE、LanJia、VDO 三大系列，针对肥胖、小下颌、巨舌等中国人困难气道解剖特征优化显露效果^[13,25]；主机与配套国产一次性镜片定价较低，可以适配基层医院批量采购需求。

但硬件层面仍存在短板，高端防抖算法、镜头长效防雾成像技术与进口设备存在差距，分泌物、血液污染场景下画面清晰度衰减更明显^[13]。

2.1.2 按镜体结构形态分型：普通弯片式、通道导向式、硬质多功能弯曲式

从镜片结构与功能设计角度，临床视频喉镜可分为三类^[18]：普通弯镜片视频喉镜：以 C-MAC、国产 UE 常规款为代表，弯曲形态与传统 Macintosh 直视喉镜高度接近，学习曲线较为平缓，兼顾常规择期手术插管与气道教学，适合门诊、手术室常规气道操作^[26]。通道式视频喉镜以 Pentax AWS 为代表：镜片内置专属导管导向槽，插管过程中会限制导管大幅度弯折，降低气道黏膜、声带划伤风险，新手操作容错率更高，多用于规培医师训练、急诊快速诱导插管。自研硬质弯曲视频喉镜例如 LBTK 弧形视频悬吊喉镜，依托 MIMICS、ANSYS 软件，结合国人口咽喉解剖完成弧度仿真优化，镜身侧方预留器械操作通道，可开展声带息肉、喉部活检等微创操作^[27]，弥补常规插管喉镜仅能建立气道而无法同步喉部操作的缺陷^[16]。

2.2 多学科临床转化应用现状

视频喉镜已完成麻醉、急诊、重症、耳鼻喉科四大科室全域临床转化。麻醉领域内，针对择期常规手术、产科分娩、高龄及肥胖等高气道风险人群，视频喉镜已成为全麻气管插管首选工具，显著降低术前预判及意外困难气道的插管失败风险，减少反复操作带来的气道损伤。儿科场景下，婴幼儿喉位靠前、氧储备薄弱，视频喉镜可缩短插管操作时长，降低术中低氧风险，即使无丰富气道操作经验的医师也可获得更高一次插管成功率，是小儿麻醉与新生儿手术的首选气道设备。急诊场景下，操作者资质参差不齐，甚至有大量非麻醉科医生独立进行插管操作，且缺乏术前气道评估的条件，视频喉镜能够显著提升非麻醉从业者一次插管成功率，减少食管误插等致命并发症，为后续的抢救操作争取宝贵的时间^[28]。重症医学场景下，视频喉镜可以协助在床旁完成气管插管、气道分泌物直视吸引及长期人工气道维护，无需将卧床危重患者转运至手术室，规避转运过程中血氧下降、血流动力学紊乱等不良事件，适配于多器官衰竭危重患者气道管理^[29]。耳鼻喉科中，视频喉镜除用于术前气道风险筛查外，还可以搭配微型操作器械同步开展声带息肉、咽喉微小病灶微创切除，单次操作即可兼顾气道评估与病灶处理，减轻患者多次内镜检查的诊疗负担^[27]。

2.3 视频喉镜现存技术短板

当前视频喉镜仍存在多项临床应用短板有待完善。术中气道内痰液、血液及气雾极易污染镜头,造成视野模糊,现有设备尚无实时智能除雾与图像修复算法,污染后成像质量显著衰减^[30];对于张口度<2 cm者、重度颌面部畸形者等极端受限气道,常规镜片置入、声门显露与导管送入均存在操作障碍^[31]。现阶段,设备普遍缺乏标准化数字化操作引导体系,镜片置入深度、导管送入角度等关键操作参数无智能提示,操作质量高度依赖医师个人经验^[32]。此外,进口高端机型整机与配套一次性耗材采购、维护成本偏高,国产经济型设备的长期耗材支出同样较高,阻碍了基层医疗机构大范围普及。

3 视频喉镜与AI融合的技术体系、应用价值及转化瓶颈

3.1 AI融合视频喉镜的技术基础

当前主流融合算法以YOLOv4/v5、掩码区域卷积神经网络(Mask Region-based Convolutional Neural Network, Mask R-CNN)为核心,依托海量临床视频喉镜影像数据集完成模型训练:标注声门、会厌、舌根、声带等气道解剖特征,构建多分类图像分割模型,实现术中实时识别、目标框标注、操作路径测算等^[33-35]。

临床采集影像包含出血、黏液、雾气等复杂干扰样本,经过图像降噪、增强预处理后输入深度学习模型,弥补传统视频喉镜人眼识别误差大、反应滞后等缺陷;搭配嵌入式边缘计算芯片,实现设备本地实时运算,无需云端传输,规避数据延迟与隐私泄露风险,从算法与硬件双维度验证二者融合技术可行性^[36]。

3.2 AI融合视频喉镜的核心应用场景

近年来,AI与视频喉镜结合已形成完整落地应用体系,覆盖插管术前评估、术中实时辅助及术后教学科研全流程。术中算法可自动识别声门、会厌等关键气道解剖结构,并高亮标注目标区域,即便画面存在雾气、血液、黏液等干扰也能稳定输出清晰分割结果,大幅降低人眼实时判读带来的主观偏差与反应延迟;术前依托多模态临床数据训练的AI预测模型曲线下面积(Area Under Curve, AUC)可达0.84,预测效能远优于传统床旁评估体系^[37]。

操作过程中系统可通过增强现实动态叠加最优导管置入轨迹,同步给出镜体抬升、喉外按压等实操调整建议,有效减少插管相关黏膜、牙齿损伤。

整套系统还可自动记录并量化单次操作总时长、有效声门暴露时长、操作失误频次等客观指标,生成标准化实操评分,缩短低年资医师的插管学习周期;同时设备可批量归档全部喉镜影像数据集,用于喉部狭窄、咽喉肿瘤等气道疾病的流行病学挖掘与回顾性科研。随机仿真对照试验证实,搭载AI实时引导模块的视频喉镜可使新手麻醉医师首次插管成功率提升72%,同时缩短整体操作时长、降低气道组织损伤发生概率。

3.3 AI融合模式的临床转化优势与创新价值

在急诊ICU应用层面,现有普通视频喉镜虽可改善声门视野,但仍存在双手协同操作门槛高的固有缺陷,研究^[20]表明临床中约53%插管失败案例均表现为声门显露良好但导管难以送入气道,在急诊、ICU高压紧急场景下,操作者精细操作能力易受情绪干扰,进一步放大操作差异。AI赋能视频喉镜可以建立术前风险预判、术中实时导引、术后操作质控的标准化气道管理,通过客观解剖识别与操作提示来弱化人为判断差异^[37-38]。

在规范化教学层面,现阶段气道操作带教普遍采用人工现场评价模式,评分结果受带教医师主观认知、个人带教习惯干扰,缺乏统一、稳定的评价体系,基层与规培医师技能成长周期较长。AI与视频喉镜的融合可自动捕捉镜片置入、导管推送、喉外辅助操作等关键动作特征,形成不依赖人工干预的客观技能评估体系。该体系能够持续为初学者提供实时操作反馈,减少高年资带教人力消耗,缓解基层医疗机构专职气道教学资源匮乏的压力,缩短基层医师上手独立操作的学习周期^[39-40]。

3.4 当前技术融合的瓶颈与挑战

3.4.1 高质量标注影像数据集稀缺

高质量标准化气道标注影像数据集稀缺是制约AI视频喉镜规模化落地的首要技术瓶颈之一。当前主流气道深度学习训练样本大多来源于择期全麻手术室,画面视野清晰;且高应激高危场景的带标注影像存量极低,复杂干扰样本在现有数据集中占比不足8%^[35]。Kim等^[35]基于YOLOv4构建声带检测模型的对照试验直观印证了样本失衡带来的泛化缺陷:模型在视野干净的验证集声带识别F1-score(F1综合得分,模型精确率与召回率调和均值)得分可达0.906,而纳入雾气、血性分泌物、胸廓持续运动干扰的急诊测试集整体F1-score显著下滑至0.808,纯心肺复苏插管亚组F1-score仅为0.683,分泌物、雾化遮挡下气道解剖漏检、误检风险显著升高。Choi

等^[33]基于 Mask R-CNN 开展多气道结构分割研究, 进一步证实, 现有公开数据集缺少大量舌根被黏液、血液覆盖的标注样本, 即便针对急诊场景优化训练, 舌根分割的戴斯相似系数 (Dice Similarity Coefficient, DSC) 仍不足 0.12, 软组织识别精度存在明显短板; 根源在于传统门诊、手术室图像与急诊危重插管影像之间存在显著域偏移, 单一平稳场景训练出的模型难以适应真实多变急救环境^[33]。两类研究共同证实, 多场景均衡标注数据匮乏是限制 YOLO、Mask R-CNN 等气道视觉模型在急诊、ICU 稳定落地的关键阻碍。

3.4.2 实时运算硬件限制

当前临床普及的便携式视频喉镜普遍仅搭载基础处理芯片, 未配备专门用于 AI 图像运算的加速硬件, 硬件性能不足成为制约 AI 气道识别功能落地的关键因素。气道识别类深度学习算法在台式计算机上运行流畅, 但移植至喉镜设备本地后, 处理效率明显下降; 当镜头存在血迹、痰液、雾气等干扰时, 声门、会厌等结构的识别标注及插管引导轨迹会出现明显滞后, 难以同步匹配临床实时操作需求。

若通过简化算法结构来提升设备运行速度, 模型对复杂遮挡场景下气道组织的识别能力会出现明显下降, 漏判、误判解剖结构的概率升高, 无法兼顾识别实时性与判断准确度。同时, 设备持续运行 AI 识别功能会加快电池耗电, 在院前急救、ICU 长时间插管等场景存在中途断电风险; 若采用云端服务器处理喉镜影像, 网络波动会造成操作引导延迟, 且咽喉影像包含患者敏感隐私信息, 存在医疗数据泄露隐患, 难以在急诊急救场景推广应用^[41-42]。

3.4.3 临床验证体系不完善

现阶段气道 AI 相关研究存在明显循证短板, 现有试验大多依托气道模拟人体外模型、单中心术后回顾影像数据集完成分析, 大样本、多中心、前瞻性随机对照临床试验十分稀缺。当前评价体系仅依靠受试者工作特征 AUC、Dice 分割系数、识别帧率等算法替代指标, 缺少插管失败、术中低氧、咽喉/牙齿损伤、术后严重咽痛等以患者安全为核心的硬终点对比数据, 无法量化 AI 辅助喉镜对围插管期不良事件的真实改善效果。模拟人试验与单中心择期患者队列场景单一, 难以覆盖急诊创伤、重度肥胖、颈椎固定等高危复杂气道人群, 模型的真实临床价值仍缺乏多中心验证, 大幅延缓智能喉镜临床落地进程^[18,35]。

3.4.4 医疗数据伦理与隐私风险

喉镜视频影像包含患者面部轮廓、声带及喉部独有黏膜生物特征, 属于高度敏感生物隐私数据, 若采用第三方云端集中存储模式, 极易遭遇网络攻击、批量数据窃取等安全隐患。喉部内镜图像难以通过简单脱敏手段完全消除个体识别特征, 即便去除姓名、身份证等标识, 依靠喉黏膜纹理、病灶特征仍可反向定位患者^[43-44]。目前国内尚未形成专门针对喉镜 AI 影像采集、传输、归档、共享的全国统一标准, 不同厂商、医疗机构设备所用参数和规则各自独立, 严重制约多中心 AI 气道研究合规落地。

3.4.5 行业监管标准空白

目前针对 AI 喉镜类智能医疗设备, 整套监管流程尚不够完善, 很大程度限制了大范围投入临床使用。一方面, 产品上市前, 缺乏针对性评判标准, 现有审核标准大多针对传统医疗器械, 缺乏喉镜 AI 统一验证要求, 很难证明实际使用安全有效。另一方面, 算法更新审批门槛高, AI 模型需要不断补充新病例优化识别效果, 但按现行规定, 只需微调模型就属于重大变更, 需要重新进行整套申报流程, 耗时过久, 厂商很难快速迭代优化。同时, 国内外都缺少上市后长效监管办法, 无法定期监测 AI 识别精度下滑问题, 最终导致医疗机构不愿采购普及^[45-46]。

3.4.6 国产视频喉镜临床数据严重缺乏

国产视频喉镜发展存在核心系统性短板, 大样本真实临床循证数据严重缺乏: 当前主流国产机型 LanJia 和 VDO 仅依靠小型模拟试验支撑性能结论, 缺乏完整临床应用数据, 缺少与进口高端设备真实世界对照研究, 循证证据等级偏低, 难以写入国内气道管理指南, 临床选用缺乏统一客观依据; 同时各厂商设备影像标准不互通, 国产标准化气道影像数据集尚属空白, 既限制国产设备自身临床认可度, 也严重拖累本土气道 AI 算法的训练、验证与落地。

3.5 综合落地解决方案

针对数据集短缺、硬件算力不足、临床循证薄弱、数据隐私安全、行业监管滞后、国产器械临床证据缺失等六大核心瓶颈, 可推行一体化协同落地方案: 多中心医疗机构统一气道影像采集与标注标准, 扩充急诊、创伤、危重患者等含痰液、出血干扰的插管样本, 规范 LanJa、UE、VDO 国产设备影像输出格式, 搭建本土化均衡标注数据库, 借助域自适应图像增强算法解决手术室与急救场景样本域偏移问题; 硬件端开发适配便携喉镜的轻量化 AI 分割模型, 搭载离线本地推理模块, 原始插管影像仅

存储于院内私有服务器,不上传公有云,同时优化供电程序缓解 AI 运算高功耗问题;临床层面开展覆盖肥胖、颈椎损伤、颌面畸形高危人群的多中心前瞻性随机对照试验,以低氧、气道损伤等患者不良事件为核心评价指标,构建模拟人联合真实患者的分层验证体系,制定统一的 AI 喉镜临床评估量表;数据安全方面,实现影像本地脱敏,自动清除面部、喉部生物识别特征,仅传输算法分析结论;监管领域,推动药监部门出台 AI 喉镜专项审评规范,划分硬件改造、算法微调两类申报通道,简化迭代流程,强制设备搭载精度自检模块,建立上市后长期性能监测机制;产业端同步开展国产喉镜真实世界对照研究,分层收集各场景下插管疗效与并发症数据,补齐国产设备循证证据链,为气道指南更新、本土 AI 模型迭代提供临床支撑。

AI 与视频喉镜融合并非单纯的算法、硬件叠加,而是气道管理由医师经验驱动向标准化数据驱动的系统性行业转型。目前相关研究多聚焦于单一技术维度的优化,未能统筹临床实操限制、器械产业链基础、医疗数据合规要求与国内监管规则,开展全局分析,这也是各类智能气道设备长期止步于小样本试验、无法大范围下沉基层的核心根源。从产业格局来看,进口品牌凭借早期硬件积累与完整临床数据壁垒,垄断高端智能喉镜赛道,其封闭数据体系难以适配国人气道解剖特点;国产喉镜虽具备成本优势,且硬件预留 AI 拓展接口,但受限于标准化影像库、大样本循证数据与配套算法体系缺失,仅实现基础硬件替代,其智能化升级潜力未能充分释放。

立足分级诊疗、医疗器械自主创新两大行业发展背景,气道 AI 设备的规模化落地需要多主体协同推进,不能仅依赖工科单一优化模型或器械厂商更新硬件。唯有联动麻醉、急诊、生物工程、药监及医疗器械产业多方力量,同步打通影像数据共建、轻量化算法适配、多中心临床验证、隐私合规共享及算法迭代监管全链条配套体系,才能充分发挥 AI 均衡各级医疗机构气道操作水平的核心价值,实现精准、标准化的可视化气道技术覆盖三甲医院至基层急救的全层级医疗体系。

4 总结

视频喉镜历经光纤初代、进口便携、国产一体化三代技术迭代,相较传统 Macintosh 直视喉镜,可显著降低插管力学损伤,提升首次插管成功率,国产 UE、LanJia、VDO 等经济型机型大幅降低基层设

备使用门槛,弥补进口耗材高价造成的壁垒。但全系设备存在成像抗干扰能力弱、极端气道适配性差、缺乏原生智能辅助功能等固有缺陷。

以 YOLO、Mask R-CNN 等为基础的气道 AI 模型可实现术前风险预判、术中实时插管引导,弥补纯人工操作的主观偏差,但规模化临床转化存在多重壁垒:气道标注数据集场景单一、便携嵌入式硬件算力不足、缺乏多中心前瞻性硬终点循证证据、喉部生物影像隐私保护规范缺失、AI 器械审批迭代制度不完善。

未来可统筹气道影像共建、轻量化 AI 硬件适配、多中心临床验证、影像隐私合规与智能器械监管全链条建设,同步补齐国产喉镜临床循证数据短板,依托麻醉、工科、药监等多方协同,优化本土气道智能设备,推动 AI 视频喉镜在各级医疗机构普及,持续提升国内气道诊疗标准化水平。

参考文献

- [1] ALSABRI M, ABDELWAHAB O A, ELSNHORY A B, et al. Video laryngoscopy versus direct laryngoscopy in achieving successful emergency endotracheal intubations: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Systematic Reviews, 2024, 13(1): 85.
- [2] CHEN H, ZHENG Y, FU Q, et al. A review of the current status and progress in difficult airway assessment research [J]. European Journal of Medical Research, 2024, 29(1): 172.
- [3] APFELBAUM J L, HAGBERG C A, CONNIS R T, et al. 2022 American society of anesthesiologists practice guidelines for management of the difficult airway[J]. Anesthesiology, 2022, 136(1): 31-81.
- [4] GADOMSKI B C, HINDMAN B J, POLAND M J, et al. Intubation biomechanics: Computational modeling to identify methods to minimize cervical spine motion and spinal cord strain during laryngoscopy and tracheal intubation in an intact cervical spine[J]. Journal of Clinical Anesthesia, 2022, 81: 110909.
- [5] KADIREHALLY N, ANUPAMA G, SADASIVAN I, et al. A comparative crossover randomized study of miller and macintosh blade for laryngoscopic view and ease of intubating conditions in adults[J]. Archives of Anesthesiology and Critical Care, 2021, 7(2): 58-62.
- [6] XUE F S, LI H X, LIU Y Y, et al. Current evidence for the use of C-MAC videolaryngoscope in adult airway management: A review of the literature[J]. Therapeutics and Clinical Risk Management, 2017, 13: 831-841.

- [7] HINDMAN B J, SANTONI B G, PUTTLITZ C M, et al. Intubation biomechanics: Laryngoscope force and cervical spine motion during intubation with Macintosh and Airtraq laryngoscopes[J]. *Anesthesiology*, 2014, 121(2): 260-271.
- [8] MABROUK Y, GRISSA M H, YOUSSEF S B. Dental trauma related to orotracheal intubation: Prospective study of 43 cases[J]. *Chinese Journal of Traumatology*, 2025, 28(6): 491-496.
- [9] OCHROCH E A, HOLLANDER J E, KUSH S, et al. Assessment of laryngeal view: Percentage of glottic opening score vs cormack and lehane grading[J]. *Canadian Journal of Anaesthesia*, 1999, 46(10): 987-90.
- [10] GUNNING S G S, URWIN D, COOK T M, et al. Videolaryngoscopy versus direct laryngoscopy for teaching direct laryngoscopy skills: A systematic review and meta-analysis [J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2025, 135(5): 1397-1409.
- [11] PATERNÒ D S, LA VIA L, LO GIUDICE E C, et al. The evolution of laryngoscopy in airway management and tracheal intubation[J]. *Journal of Otorhinolaryngology, Hearing and Balance Medicine*, 2026, 7(2): 24.
- [12] GÓMEZ-RÍOS M, GASZYŃSKI T, MICHAŁEK P, et al. From mirrors to monitors: The historical evolution of laryngoscopy toward universal videolaryngoscopy[J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2026, 23(7): 769-777.
- [13] WANG M, RUAN W, LI H, et al. Comparison study of LanJia, UE, and VDO video laryngoscopes for simulated endotracheal intubation in beginners[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2025, 104(47): e45803.
- [14] YANAGISAWA E, YANAGISAWA K. Stroboscopic videolaryngoscopy: A comparison of fiberoptic and telescopic documentation[J]. *Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 1993, 102(4 Pt 1): 255-265.
- [15] ABHYANKAR P, SABHARWAL N, GUPTA A, et al. Comparative evaluation of C-MAC and McGrath MAC videolaryngoscopes with Macintosh direct laryngoscope for endotracheal intubation in adult patients undergoing elective surgeries[J]. *Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology*, 2023, 39(3):422-428.
- [16] 中华医学会耳鼻咽喉头颈外科学分会咽喉学组及相关专家. 电子鼻咽喉镜检查人工智能数据采集及应用专家共识[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2026, 40(2): 120-130.
- [17] CARASSITI M, ZANZONICO R, CECCHINI S, et al. Force and pressure distribution using macintosh and glide-scope laryngoscopes in normal and difficult airways: A manikin study[J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2012, 108(1): 146-151.
- [18] HANSEL J, ROGERS A M, LEWIS S R, et al. Videolaryngoscopy versus direct laryngoscopy for adults undergoing tracheal intubation: A cochrane systematic review and meta-analysis update[J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2022, 129(4): 612-623.
- [19] LEE J, CHO Y, KIM W, et al. Comparisons of videolaryngoscopes for intubation undergoing general anesthesia: Systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Journal of Personalized Medicine*, 2022, 12(3): 363.
- [20] PREKKER M E, DRIVER B E, TRENT S A, et al. Video versus direct laryngoscopy for tracheal intubation of critically ill adults[J]. *New England Journal of Medicine*, 2023, 389(5): 418-429.
- [21] BAEK M S, HAN M, HUH J W, et al. Video laryngoscopy versus direct laryngoscopy for first-attempt tracheal intubation in the general ward[J]. *Annals of Intensive Care*, 2018, 8(1): 83.
- [22] NG I, HILL A L, WILLIAMS D L, et al. Randomized controlled trial comparing the McGrath videolaryngoscope with the C-MAC videolaryngoscope in intubating adult patients with potential difficult airways[J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2012, 109(3): 439-443.
- [23] TEOH W H, SAXENA S, SHAH M K, et al. Comparison of three videolaryngoscopes: Pentax airway scope, C-MAC, glidescope vs the macintosh laryngoscope for tracheal intubation[J]. *Anaesthesia*, 2010, 65(11): 1126-1132.
- [24] KRIEGE M, NOPPENS R R, TURKSTRA T, et al. A multicentre randomised controlled trial of the McGrath™ Mac videolaryngoscope versus conventional laryngoscopy[J]. *Anaesthesia*, 2023, 78(6): 722-729.
- [25] LI L, YANG G, LI S, et al. Preoperative bedside test indicators as predictors of difficult video laryngoscopy in obese patients: A prospective observational study[J]. *PeerJ*, 2024, 12: e17838.
- [26] CHAE M S, CHUNG J H, SHIM J W, et al. Comparison of the UEScope video laryngoscope with the traditional direct laryngoscope in neonates and infants: A randomized clinical trial[J]. *Children (Basel)*, 2022, 9(8): 1161.
- [27] LI H, ZHANG W, QU H, et al. Clinical application of a curved video suspension laryngoscope in laryngeal surgery [J]. *Acta Oto-Laryngologica*, 2022, 142(2): 197-201.
- [28] RUDERMAN B T, MALI M, KAJI A H, et al. Direct vs video laryngoscopy for difficult airway patients in the emergency department: A national emergency airway registry study[J]. *Western Journal of Emergency Medicine*, 2022, 23

- (5): 706-715.
- [29] ZHANG K, ZHONG C, LOU Y, et al. Video laryngoscopy may improve the intubation outcomes in critically ill patients: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials[J]. *Western Journal of Emergency Medicine*, 2025, 42(5): 334-342.
- [30] KNAPP J, EBERLE B, BERNHARD M, et al. Analysis of tracheal intubation in out-of-hospital helicopter emergency medicine recorded by video laryngoscopy[J]. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, 2021, 29(1): 49.
- [31] POPAL Z, DANKERT A, HILZ P, et al. Glidescope video laryngoscopy in patients with severely restricted mouth opening-A pilot study[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2023, 12(15): 5096.
- [32] FUCHS A, RAEBER A, LIPPUNER R, et al. Artificial intelligence-assisted tracheal intubation in humans: A prospective observational study of diagnostic accuracy[J]. *Anaesthesia*, 2026, 81(3): 343-350.
- [33] CHOI S J, KIM D K, KIM B S, et al. Mask R-CNN based multiclass segmentation model for endotracheal intubation using video laryngoscope[J]. *Digital Health*, 2023, 9: 20552076231211547.
- [34] TIAN Y, YANG C, SANG L, et al. TI-YOLO: A light-weight and efficient anatomical structure detection model for tracheal intubation[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2026, 13(4): 451.
- [35] KIM D K, KIM B S, KIM Y J, et al. Development and validation of an artificial intelligence algorithm for detecting vocal cords in video laryngoscopy[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2023, 102(51): e36761.
- [36] AZAM M A, SAMPIERI C, IOPPI A, et al. Deep learning applied to white light and narrow band imaging videolaryngoscopy: Toward real-time laryngeal cancer detection[J]. *Laryngoscope*, 2022, 132(9): 1798-1806.
- [37] SHEN Y, WU Y, QIU Y, et al. AI-based decision models for difficult airway assessment: From research innovation to clinical implementation-a narrative review[J]. *Frontiers in Medicine*, 2026, 13: 1818061.
- [38] DE ROSA S, BIGNAMI E, BELLINI V, et al. The future of artificial intelligence using images and clinical assessment for difficult airway management[J]. *Anesthesia and Analgesia*, 2025, 140(2): 317-325.
- [39] ZHAO S, XIAO X, WANG Q, et al. An intelligent augmented reality training framework for neonatal endotracheal intubation [C]// *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2020: 672-681.
- [40] STEFFENSEN T L, BARTNES B, FUGLSTAD M L, et al. Playing the pipes: Acoustic sensing and machine learning for performance feedback during endotracheal intubation simulation[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, 10: 1218174.
- [41] LAL VALLATH A, KRISHNAN S, SKIKIC E, et al. The production, assessment, and utility of 3D-printed video laryngoscopes in Eastern India: A low-cost alternative to conventional video laryngoscopes[J]. *Cureus*, 2024, 16(5): e60386.
- [42] CUI H, WU J, LI T, et al. Improved YOLOv8-seg for laryngeal structure recognition in medical images[J]. *American Journal of Translational Research*, 2025, 17(5): 3293-3306.
- [43] MOON Y, HYUN J, OH J, et al. A Wi-Fi-based mask-type laryngoscope for tediagnosis during the COVID-19 pandemic: Instrument validation study[J]. *Journal of Medical Internet Research*, 2021, 23(10): e31224.
- [44] HAMEED S S, HASSAN W H, ABDUL LATIFF L, et al. A systematic review of security and privacy issues in the internet of medical things; the role of machine learning approaches[J]. *PeerJ Computer Science*, 2021, 7: e414.
- [45] 浙江大学, 中国食品药品检定研究院, 海军军医大学第二附属医院. 人工智能医疗器械性能评价通用方法专家共识(2023)[J]. *协和医学杂志*, 2023, 14(3): 494-503.
- [46] 李屹玲, 赵琪, 魏旗鹏, 胡琳琳. 优化人工智能医疗器械全生命周期监管: 国际经验与中国路径[J]. *中国食品药品监管*, 2026 (3):42-51.