

柔性内窥镜导管弯曲力学有限元仿真分析

谢名挺

珠海普生医疗科技股份有限公司 广东 珠海 519080

【摘要】：柔性内窥镜导管在狭窄腔道内转向时，弯曲段曲率连续性、拉索载荷传递和管壁局部应力共同影响操控精度。本文分析导管弯曲基础、结构力学建模、载荷约束和响应判定之间的关系，梳理外管壁、蛇骨节段、拉索孔道、末端接触面在不同弯曲工况下的受力路径，并将工况参数、网格分区、接触定义、回弹偏差和安全裕度纳入同一判读链条。有限元建模只有同步处理近端推拉、拉索张紧、末端限位和材料非线性，才能较准确识别孔边应力集中、外弯侧应变扩大和局部安全裕度下降等风险。

【关键词】：柔性内窥镜导管；弯曲力学；有限元分析；拉索载荷；安全裕度

DOI:10.12417/2705-098X.26.18.005

引言

柔性内窥镜导管依靠弯曲段完成视向调整和腔道绕行，外管壁、蛇骨节段、拉索孔道和内腔衬层在大角度转向中同步受力。若模型只关注末端角度，孔边应力、回弹偏差和末端接触反力容易被掩盖。围绕弯曲力学开展有限元分析，应先明确工况、材料、接触和约束，再读取曲率、应力应变与安全裕度等响应量，使导管结构评价从几何可弯转向载荷可解释，并为弯曲段细节调整提供依据。

1 柔性内窥镜导管弯曲分析基础概述

柔性内窥镜导管的弯曲段承担末端视向调整、腔道避让和器械通道保持等任务，结构上由外层弹性管壁、分节蛇骨、内腔衬层和拉索孔道共同工作。近端旋钮或电控机构输出的位移沿拉索传递到弯曲段后，管壁外侧受拉、内侧受压，内腔截面仍要维持成像线缆和工作器械的通行空间。弯曲失效并不总是表现为整体断裂，较常见风险来自外弯侧应变过大、拉索孔边缘撕裂、拉索断裂、蛇骨节段干涉和回弹角度超差^[1]。有限元分析应同步输出弯曲角度、曲率半径、最大等效应力、主应变和末端反力。模型边界收窄到弯曲段后，近端约束、拉索张紧、末端接触和管壁接触共同决定弯矩传递路径，也决定后续材料、网格和载荷设置的精细程度。

2 柔性内窥镜导管弯曲结构力学分析

2.1 弯曲操作工况选择及等效载荷确定

弯曲工况应从自由弯曲逐步过渡到接触弯曲，角度、半径、拉索载荷和近端位移形成递进关系。自由小弯曲用于检查模型收敛和曲率连续性，常规观察弯曲对应临床常见视向调整，小半径转向用于观察曲率集中，极限操控校核则把末端接触和侧壁反力纳入边界。工况参数把目标弯角、最小半径、拉索载荷和末端反力列为同一组变量，目的在于避免只改变单一载荷而忽略接触条件变化^[2]。四组取值均为建模参数，用来限定有限元分析的载荷层级和边界范围，并为后续响应对比提供统一行轴。这些参数把弯曲角度、最小半径和接触反力放在同一边界集合中，便于按同一载荷口径比较不同工况。

2.2 柔性导管有限元几何模型精细建立

几何模型应优先保留影响弯曲刚度和局部应力的结构特征，外管壁厚、内腔直径、拉索孔偏心距、蛇骨节段间隙和润滑度均不宜被过度简化。对远离最大曲率的长直插入段，可用等效约束或短段过渡代替完整长度，以减少计算规模；对弯曲段和末端接触面，则要保留真实截面关系。模型构造的关键不是让导管外形完整，而是让弯矩、拉索力和接触反力能够沿正确路径传递^[3]。内腔衬层既决定器械通道保持能力，也影响管壁厚度方向的弯曲刚度；拉索孔偏心距若被移到中性层附近，模型会低估拉索张紧产生的弯矩。末端圆角若被删除，接触反力会集中在人工尖点上，后处理得到的高应力区便难以回到真实结构位置。图1给出弯曲段有限元几何模型的主要保留部位。

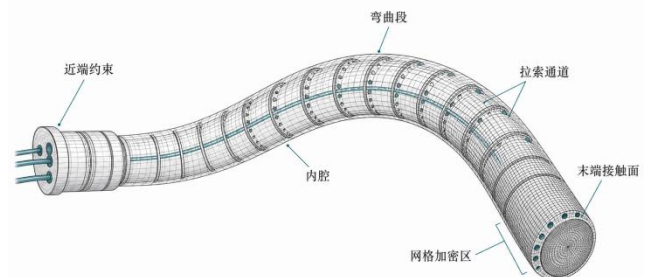


图1 柔性内窥镜导管弯曲段有限元建模示意

图1显示，弯曲段、拉索通道和网格加密区共同决定载荷传递路径，近端约束与末端接触面则限定模型边界。

2.3 医用弹性材料选择与管壁接触定义

医用弹性管壁在大角度弯曲中呈现明显非线性，材料参数应区分外层弹性体、内衬层、蛇骨节段和拉索材料。弹性体可采用超弹性或分段弹塑性近似，金属蛇骨和拉索则按弹性模量、泊松比和屈服强度建立独立材料。管壁与蛇骨、拉索与孔道、末端与接触面的相互作用不能简单合并为整体粘结，局部滑移和摩擦会改变载荷传递效率。接触定义还要给出法向硬接触、切向摩擦系数和允许分离条件，使模型既能反映拉索孔边

的挤压,也能避免把真实可滑移界面误算成刚性连接。若材料曲线过硬,模型会低估回弹偏差;若切向摩擦过大,拉索孔边应力会被放大。材料参数还应与加载步同步校核,小角度阶段先检查弹性响应,大角度阶段再观察滑移、分离和局部压缩。

2.4 弯曲段网格密度分区划分

网格划分应采用整体可收敛、局部可识别的分区策略,直线过渡段用较粗单元保证计算效率,拉索孔边缘、蛇骨过渡、末端接触和最大曲率外弯侧使用细化单元。弯曲段若采用均匀粗网格,曲率梯度会被平滑,应力峰值被低估;若全域过度细化,接触迭代耗时增加且容易暴露无关振荡。合理做法是沿中心线建立轴向分区,在孔边和接触面设置尺寸过渡带,并检查相邻单元尺寸比。网格收敛不应只看整体位移差,还应比较孔边最大应力、外弯侧主应变和末端接触反力的变化。厚度方向单元层数还应覆盖内外壁应变差,使孔边局部峰值能够与整体曲率响应区分。

3 导管弯曲载荷施加与边界约束

3.1 近端操控段轴向推拉载荷添加

近端推拉载荷代表操作者或驱动机构输入的轴向位移,它决定拉索张紧前导管整体是否出现预弯和轴向压缩。模型中可在近端截面设置参考点,将端面节点耦合到参考点后施加位移或力,使输入载荷沿导管轴线传递。若近端完全固定而只在远端施加转角,模型会跳过柔性导管最真实的载荷进入过程。近端边界还应允许必要的转动自由度,避免把管壁截面锁死;当推拉位移与拉索张紧叠加时,应按加载顺序分步施加,以分辨预紧、弯曲和接触三个阶段的响应差异。耦合截面要覆盖完整管壁和内衬层,同时保留拉索孔道相对运动,避免端部刚化。

3.2 弯曲蛇骨段拉索载荷添加

拉索载荷是弯曲段产生曲率的主要驱动量,加载位置应与拉索孔道、末端固定点和蛇骨节段方向一致。单侧拉索受力时,拉索侧节段间隙减小,背侧管壁被拉伸,中心线逐渐偏向受力侧;双向或多向拉索同时参与时,还要考虑不同拉索之间的预紧力差。加载曲线不宜一步达到峰值,应采用平滑幅值函数逐步提高张力,降低接触突跳造成的收敛扰动。拉索孔边的接触压力、拉索轴向应变和末端转角要同步读取,才能判断载荷是否真正转化为弯曲位移。加载方向还应随弯曲几何逐步更新,避免大角度下低估拉索与孔壁的侧向接触。

3.3 末端接触面限位反力载荷添加

针对插入部(含蛇管端与编织管端)的先端头,模拟其接触腔道壁或器械通道边界后的限位状态。在自由弯曲阶段,先端头空间位移不受限制;进入接触弯曲阶段后,接触面设置为刚性或弹性支承,并允许先端头在切向方向发生有限滑移。接触反力的引入会改变插入部的弯矩分布,促使最大应力集中区域从单纯外弯侧转移至先端压接区;若忽略该边界条件,模型

易高估插入部的可达弯曲角度,同时低估局部压溃风险。近端推拉载荷、拉索牵引力、先端接触反力及切向滑移许可属于同一受力组合,各载荷并非单点独立输入,而是在约束组合中协同重分配。相较于完全固定边界,弹性支承面更适合表征受限转向状态,既能保留压接法向反力,又能实现切向应力释放。需注意,接触面刚度取值对结果敏感:刚度过高会放大先端反力,刚度过低则会削弱末端限位效果,该边界参数的设定应与弯曲角度的递进关系协同标定。

4 导管弯曲响应有限元结果分析

4.1 弯曲角度曲率变化响应结果分析

弯曲角度和曲率是判断导管操控性能的第一组响应量。有限元后处理可沿导管中心线提取离散点,计算相邻点夹角和局部曲率,再与目标角度比较。常规观察弯曲应保持较连续的曲率分布,小半径转向允许局部曲率升高,但不应在单个蛇骨节段突然集中。若中心线曲率在拉索固定点附近出现尖峰,应回到几何和接触设置检查孔边圆角、节段间隙和网格尺寸。曲率判读还应与蛇骨节段位置对应,避免把网格噪声放大成局部失效。中心线提取点间距保持稳定,避免漏掉局部尖峰、端部突变或放大网格噪声。

4.2 管壁应力应变云图结果识别

管壁应力应变云图要结合结构位置读取,单纯比较最大颜色区并不足以判断风险。外弯侧高应力通常与拉伸应变有关,拉索孔边缘高应力可能来自孔边曲率和接触摩擦,末端接触区的高值区域多与反力集中相关。最大应力、回弹方向和接触反力区并不总是重合,判读时要分别追踪外弯高应力区、中性层和末端接触面。若最大值落在几何尖角或约束边界,还应检查此处是否为建模奇异点;若应力高值区没有对应主应变变化,可能是约束奇异造成的局部峰值。两类云图共同读取,才能区分孔边风险、外弯拉伸和末端压接,并结合相邻工况确认高值区是否沿真实截面连续延伸且随弯角递增。图2用于区分管壁不同位置的响应含义。

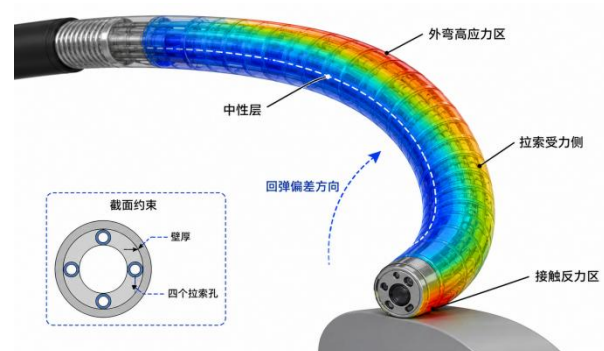


图2 导管弯曲响应与局部高应力区域示意

图2表明,外弯高应力区、拉索受力侧和接触反力区分布在不同位置,回弹偏差方向不能替代局部应力判读。

4.3 拉索驱动力回弹偏差结果计算

拉索驱动力与回弹偏差之间存在非线性关系,原因在于弹性体大变形、拉索孔摩擦和蛇骨节段接触共同储存能量。卸载后若弯曲角度不能回到初始状态,残余偏差会影响再次转向精度;若回弹过快,则可能造成末端视野跳动。响应参数中,45°自由小弯曲对应1.50°回弹偏差和3.60MPa最大等效应力,150°极限操控校核对应9.50°回弹偏差和13.50MPa最大等效应力;两者相比,回弹偏差增大8°,应力差为9.90MPa,安全裕度由3.40降至1.20。这种关系提示,拉索载荷不能只按目标角度单独校核,应与回弹偏差和安全裕度一起判断。相比90°常规观察弯曲的4.20°回弹偏差和7.80MPa应力,120°小半径转向已经升至6.80°和10.90MPa,说明风险并非只在极限角度才出现。

4.4 导管弯曲局部失效安全裕度判定

安全裕度判定应以材料许用应力、最大等效应力和局部应变共同约束。有限元响应中若安全裕度接近1,说明局部应力已经逼近材料允许范围;若同时出现较大的最大主应变,则重点检查外弯侧和拉索孔边的疲劳风险。导管弯曲段属于薄壁、多接触、强约束结构,单一最大应力点不宜直接决定结构结论。更稳妥的判定方式是把应力水平、应变分布、回弹偏差和末端反力共同读取,在不同工况下寻找重复出现的高风险区域,再把安全裕度不足的位置反馈到孔边圆角、材料硬度、拉索预紧和节段间隙调整中。壁厚、硬度和拉索预紧的调整会相

互影响,安全裕度判定应同时保留操控灵活性。图3将三类响应指标放入同一归一化坐标。

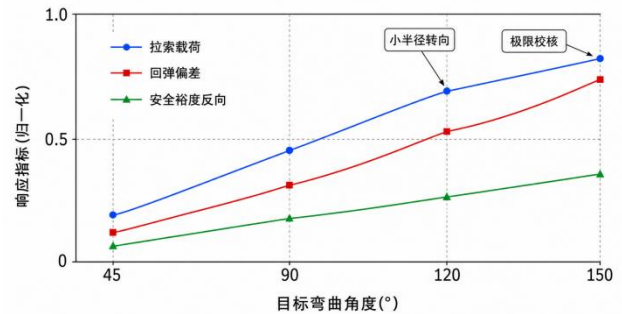


图3 导管弯曲载荷与响应指标归一化变化

图3显示,拉索载荷和回弹偏差随弯曲角度同步升高,安全裕度反向指标在极限校核附近抬升,说明小半径工况应联合读取精度和安全风险。

5 结语

柔性内窥镜导管弯曲力学分析应把结构细节、材料非线性和边界约束放在同一有限元框架内处理。工况设置决定曲率和拉索载荷的递进关系,几何建模与网格分区决定孔边、外弯侧和末端接触区的应力识别精度。响应判定不宜停留在转角达成情况,还应联合回弹偏差、最大主应变和安全裕度判断局部失效风险,为导管弯曲段结构调整和载荷边界取值提供依据。

参考文献:

- [1] 潘旭东,陈翔宇,李跃峰,等.结肠镜弯曲部运动学和静力学仿真及实验研究[J].振动.测试与诊断,2024,44(3):502-507+618-619.
- [2] 徐昕,杨龙泽,潘乾豪.一次性电子内窥镜插入管前端弯曲优化及临床验证研究[J].科技创新与应用,2026,16(11):51-54.
- [3] 何志坤,金晓怡,胡聪慧,等.连续型内窥镜机器人弯曲模型[J].轻工机械,2023,41(5):29-37.