

钢顶管偏压条件下稳定性分析与控制措施研究

许剑波^{1,2}, 罗超^{1,2}, 郭小雪^{1,2}, 邵智超³

¹中城乡生态环保工程有限公司, 湖北 武汉

²中国城乡控股集团有限公司, 湖北 武汉

³武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

为研究偏压条件下钢顶管屈曲稳定性影响规律与控制措施, 采用有限元分析方法, 基于薄壁圆筒屈曲理论, 考虑材料初始缺陷, 并引入Winkler弹性地基模型研究了轴线偏差条件下管道长度、壁厚、地层弹性抗力、轴线偏差大小对失稳承载力的影响规律, 结果表明: 1) 发生轴线偏差的管道长度小于30 m或轴线偏差过大(大于0.4 m)临界失稳荷载迅速下降; 2) 随壁厚的增加, 临界失稳荷载线性上升, 建议常规工况下, t/D 取值不低于0.008, 复杂工况下, t/D 取值不低于0.010; 3) 地层弹性抗力对临界失稳荷载影响不大, 在软土地层更应注意钢顶管的稳定性问题。同时按是否与人为因素相关系统性总结了轴线偏差影响因素, 并基于有限元结果提出对应的量化控制措施。

关键词

钢顶管, 屈曲稳定性, 轴线偏差, 有限元, 控制措施

Stability Analysis and Control Measures of Steel Pipe Jacking under Eccentric Loading Conditions

Jianbo Xu^{1,2}, Chao Luo^{1,2}, Xiaoxue Guo^{1,2}, Zhichao Shao³

¹Zhongchengxiang Ecological Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei

²China Urban-Rural Holding Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

³School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: February 16, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

To study the buckling stability laws and control measures of steel pipe jacking under eccentric

loading conditions, a finite element analysis method was adopted. Based on the buckling theory of thin-walled cylinders, considering initial material defects and introducing the Winkler elastic foundation model, the influence laws of pipe length, wall thickness, ground elastic resistance, and axial deviation on the buckling load were studied. The results show that: 1) the critical buckling load decreases rapidly when the pipe length with axial deviation is less than 30 m or the axial deviation is too large (greater than 0.4 m); 2) the critical buckling load increases linearly with the increase of wall thickness; it is suggested that the t/D value should be no less than 0.008 under normal working conditions and no less than 0.010 under complex conditions; 3) the ground elastic resistance has little effect on the critical buckling load, and more attention should be paid to the stability of steel pipe jacking in soft soil layers. Meanwhile, the factors affecting axial deviation were systematically summarized according to their correlation with human factors, and corresponding quantitative control measures were proposed based on the finite element results. During construction, the axial deviation should be strictly controlled within 0.05 m to improve construction safety.

Keywords

Steel Pipe Jacking, Buckling Stability, Axial Deviation, Finite Element Analysis, Control Measures

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢顶管技术作为现代非开挖技术, 凭借其管材加工性能优异、变形适应能力强及耐高水压等优势, 已成为城市输水工程、综合管廊建设和穿越复杂地层的关键技术。

然而, 随工程需求日益复杂化, 顶管技术面临着前所未有的挑战: 一方面, 管道口径增大和顶进距离延长导致管壁承受的纵向顶力与围岩压力增大; 另一方面, 顶管在穿越诸如高水压、复杂地层时, 顶管姿态控制更为困难, 使管道处于复杂偏压状态下, 其稳定性问题日益突出。这类复杂工况超出了传统设计理论的适用范围, 导致施工中屡次发生管壁屈曲、轴线偏移等工程事故。例如, 在厦门高崎海堤某海底顶管工程中, 因纵向稳定性不足导致的管道变形过大, 施工被迫停止[1], 中山市某输水管道在硬岩地层顶进时由于顶力过大导致局部失稳[2]。

目前钢顶管稳定性的研究主要基于圆柱壳屈曲理论和管土相互作用机理展开。基于圆柱壳屈曲理论, 荆哲等[3]依托深圳市某大直径钢顶管工程总结了不同长细比、径厚比和埋深对顶管稳定性的影响, 并线性拟合了稳定性系数。郑聪[4]与李江[5]分别基于 ABAQUS 研究了包括中继间间距、钢管壁厚、轴压与围压等多种因素对管道稳定性的影响。陈楠等[6]研究了复杂荷载组合下顶管屈曲极限荷载变化规律并建议通过控制注浆效果与顶进措施提高稳定性。管土的相互作用的考虑涉及弹性地基模型, 基于 Winkler 弹性地基模型, 邵俊辉等[7]将轴线偏差作为初弯曲, 建立了能量方程获得了考虑轴线偏差的允许顶力计算方法, 但该方法较为复杂。孙任运等[8]研究了纵向加劲肋与环向加劲肋对稳定性的影响。宣锋等[9]基于 Pasternak 地基模型考虑土体剪切刚度研究了管道尺寸参数与地层参数等对其纵向稳定性的影响规律。

目前对顶管稳定性的研究已积累了不少成果, 但大部分均是围绕管道尺寸、荷载工况对稳定性的影响展开, 对于轴线偏差的影响及控制措施相关的研究不足。本文基于薄壁圆筒屈曲理论, 引入 Winkler 弹性地基模型研究了不同轴线偏差下管长、壁厚、地基反力系数对稳定性的影响, 系统地分析了影响钢顶管轴线偏差的因素, 并提出相应控制措施, 可为实际工程提供有效参考。

2. 有限元分析方法

薄壁圆筒结构是指壁厚 t 与直径 D 之比满足 $t/D \leq 1/20$ 的圆筒结构, 两端可开口或封闭。承受外压荷载的薄壁结构, 当荷载增大到某一值时, 壳体会突然失去原有的形状, 被压扁或出现波纹, 卸载后不能恢复原状, 这一现象被称为壳体的屈曲或失稳。

薄壁圆筒结构受轴向压力作用, 当长度较长时, 失稳形式表现为 Euler 失稳, 而当长度较短时, 失稳形式表现为局部失稳。俄国力学家 Timoshenko 从弹性力学角度, 假设圆柱壳体两端简支, 受轴向均匀布压力, 得到局部屈曲失稳临界应力公式如下:

$$\sigma_{cr} = \frac{E_p}{\sqrt{3(1-\mu_p^2)}} \frac{t}{R} \quad (1)$$

式中, E_p 为弹性模量; t 为管壁厚度(m); μ_p 为泊松比; R 为外半径(m)。

事实上, 当钢顶管在地层顶进时变形不可避免的会受到周围地层的约束, 在有限元计算中通常采用引入土弹簧考虑管土相互作用。Winkler 弹性地基模型作为目前最为常用的地基模型, 将地层对结构的约束作用简化成若干个只能受压不能受拉的独立弹簧。

本文中利用有限元软件 Abaqus 进行分析, 基于薄壁圆筒屈曲理论, 引入 Winkler 弹性地基模型, 并考虑管道初始缺陷分析轴线偏差下管道屈曲特性。

初始缺陷对管道稳定性影响显著, 在 Abaqus 可以进行线性屈曲和非线性屈曲分析, 线性屈曲分析(buckle 分析步)将屈曲荷载的确定转化为线性特征求根的方法, 不能考虑初始缺陷; 在线性屈曲分析的基础上, 以其一阶模态下最大变形的 0.01 作为初始缺陷[5] [10], 代入计算可进行非线性分析(Risk 分析步)。

局部失稳形式常在短管中出现, 因此选用管长 $L = 8 \text{ m}$ 的 DN2100 钢管, 钢管内径 $D = 2.10 \text{ m}$, 建立有限元模型如图 1 所示, 钢管采用弹塑性本构, 弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, 屈服应力 $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$ 。模型环向每 3° 设置一个单元, 轴向共设置 160 个单元, 采用 S4R 单元(线性四节点壳单元), 边界条件设置为一端固支($U_x = U_y = U_z = 0$), 一端铰接($U_x = U_z = 0$, 轴向不约束)。土弹簧的刚度系数按地层弹性抗力系数与土弹簧对应的土体面积乘积进行计算, 在均匀轴压下, 当土弹簧刚度系数为 0 时, 其结果应满足薄壁圆筒屈曲理论。

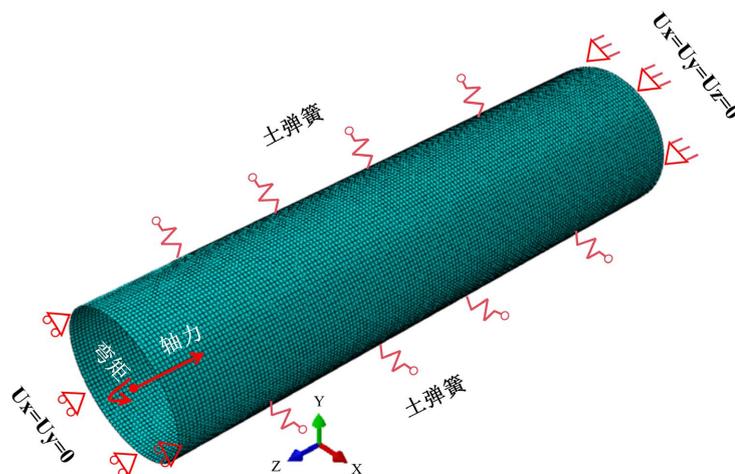


Figure 1. Numerical calculation model for steel pipes
图 1. 钢管数值计算模型

在均匀轴压下, 分别选取壁厚 $t=4\text{ mm}$ 、 6 mm , 线性屈曲有限元计算值与按式(1)计算得到的理论值对比结果如表 1 所示, 两者差距小于 1%, 验证了有限元模型的合理性。

Table 1. Comparison between FEM calculations and theoretical values

表 1. 有限元计算值与理论值对比

壁厚	有限元计算值/kN	理论值/kN	误差
$t=4\text{ mm}$	12,859	12,996	0.64%
$t=6\text{ mm}$	28,972	29,223	0.76%

在后续分析中, 将轴线偏差对管道稳定性的影响考虑为初弯曲[7], 即在顶面同时施加均匀轴压荷载与弯矩荷载, 弯矩按 $M=Fe$ 计算, 这种简化处理与文献[7]采用的力学模型逻辑一致, 该文献指出, 偏心距是诱发局部屈曲的关键因素, 且其解析解得到的承载力随偏心距增加而下降的线性趋势, 与本文第三节的数值模拟规律在定性上完全吻合。这从力学机理上证明了本文有限元模型在处理偏压失稳问题时的适用性。

3. 偏压条件下钢顶管屈曲特性分析

3.1. 管长对管道屈曲特性的影响

以管壁厚度为 20 mm , 地层弹性抗力为 100 MPa/m , 轴线偏差为 0.05 m 为例, 设置管道长度分别为 4 m 、 8 m 、 20 m 、 30 m 、 40 m 、 50 m , 得到管道局部失稳临界荷载如图 2 所示。

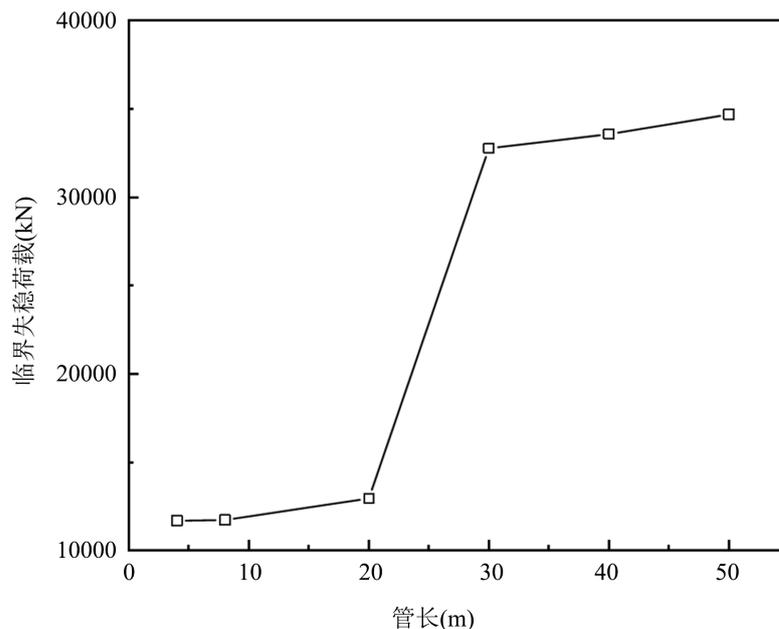


Figure 2. The influence of pipe length on critical buckling load

图 2. 管长对临界失稳荷载的影响

由图 3 可知, 在管长小于 50 m 是管道均表现为局部屈曲失稳, 在发生相同幅度的轴线偏差时, 发生偏差的管道长度越长, 轴线偏差对屈曲临界失稳荷载的影响越小。当发生偏差的管长小于 30 m 时, 屈曲失稳临界荷载迅速下降, 下降幅度超过 60%。

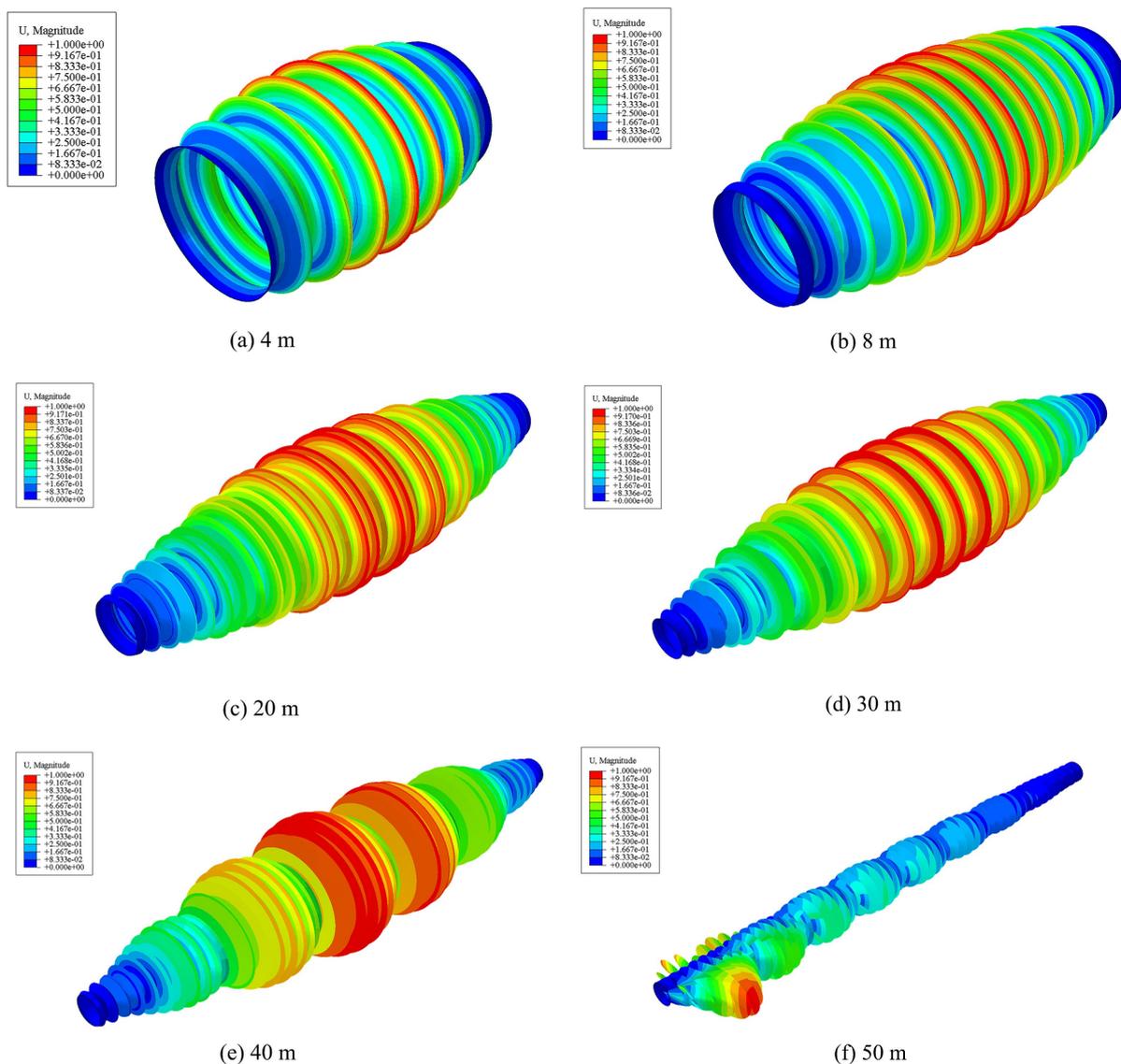


Figure 3. First-order buckling modes of pipes under axial compression with varying lengths
 图 3. 不同管长受轴压作用的一阶屈曲模态

3.2. 壁厚对屈曲稳定性的影响

以管道长度为 50 m，地层弹性抗力为 100 MPa/m，轴线偏差为 0.05 m 为例，设置管壁厚度分别为 12 mm、16 mm、20 mm、24 mm、28 mm、32 mm，得到管道局部失稳临界荷载如图 4 所示。

由图可得，临界失稳荷载随壁厚增加呈近似线性增长，随厚径比 t/D 从 0.0057 (12 mm) 增至 0.0152 (32 mm) 时，临界荷载从约 20,000 kN 提升至近 60,000 kN，增幅达 200%，由式(1)可知，当不考虑地层抗力与轴线偏差时临界应力与 t/D 成正比，有限元结果表明当考虑地层抗力与轴线偏差时这一规律仍然适用，增大壁厚可显著提升管道抗屈曲能力，且该效应在全厚度区间内持续有效。在常规地层顶进时，顶进偏差控制难度较低，建议 t/D 选取在 0.008~0.010 之间，在复杂地层条件下如地层软硬不均、强富水地层等，顶进偏差控制难度较高，建议将 t/D 提升至 0.012 以上，以补偿由于偏压导致的承载力损失。

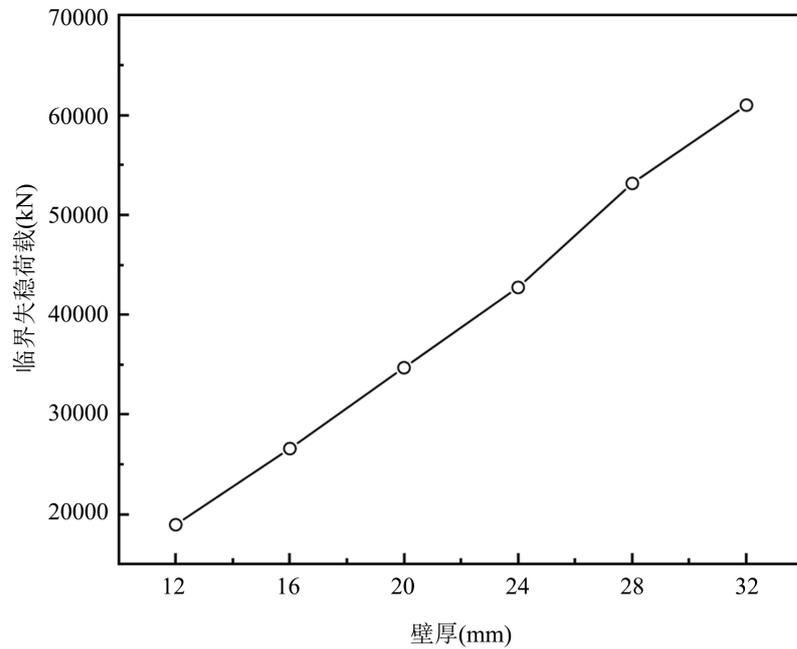


Figure 4. The influence of wall thickness on critical buckling load
图 4. 壁厚对临界失稳荷载的影响

3.3. 地层弹性抗力系数对稳定性的影响

以管道长度为 50 m，壁厚为 20 mm，轴线偏差为 0.05 m 为例，设置地层弹性抗力系数分别为 100 MPa/m、200 MPa/m、300 MPa/m、400 MPa/m、500 MPa/m、600 MPa/m，得到管道局部失稳临界荷载如图 5 所示。

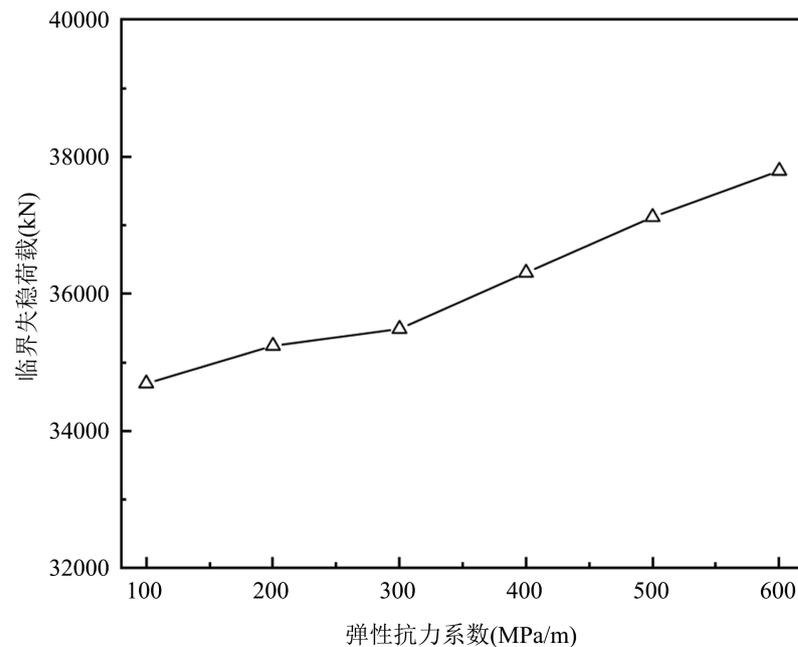


Figure 5. The influence of elastic resistance coefficient on critical buckling load
图 5. 弹性抗力系数对临界失稳荷载的影响

由图可得, 随地层弹性抗力系数的增加, 临界失稳荷载上升, 说明在软土地层中更应注意钢顶管稳定问题。总体而言, 从V级围岩(100 MPa/m)到III级围岩(600 MPa/m), 临界失稳荷载变化幅度不大。

3.4. 轴线偏差大小对稳定性的影响

以管道长度为 50 m, 壁厚为 20 mm, 地层弹性抗力系数为 100 MPa/m 为例, 设置轴线偏差大小分别为 0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m、0.30 m、0.35 m、0.40 m, 得到管道局部失稳临界荷载如图 6 所示。

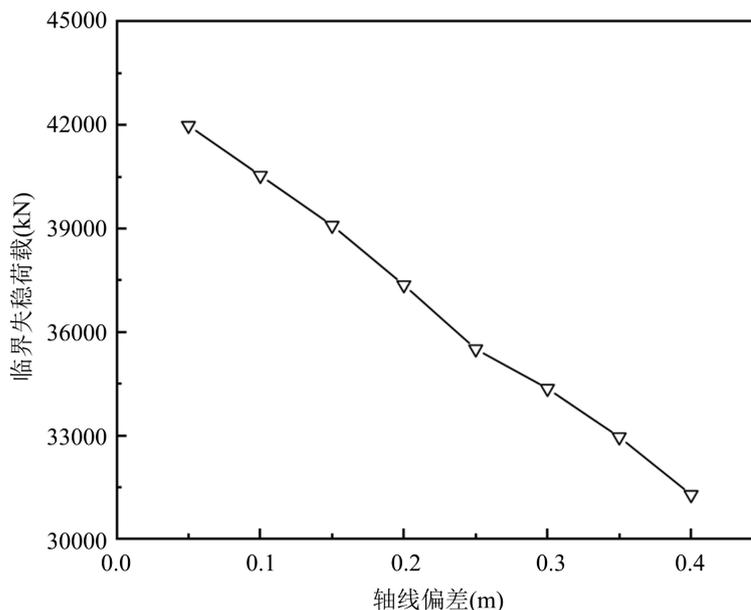


Figure 6. The influence of axis deviation on critical buckling load

图 6. 轴线偏差对临界失稳荷载的影响

由图可得, 轴线偏差会显著降低管道的临界失稳荷载, 当偏离距离为 0.15 m 时, 临界失稳荷载较无偏离时下降 12%~16%; 当偏离距离达到 0.4 m 时, 临界失稳荷载较无偏离时下降超过 30%。施工时应尽量控制轴线偏差在 0.05 m 内, 以降低偏压对管道稳定性的影响, 提高管道的安全性。

4. 钢顶管轴线偏差影响因素与控制措施

综合有限元结果, 为减少顶管发生局部失稳的情形, 提出以下量化决策依据——当发生偏差的管长小于 30 m 时, 临界荷载迅速下降。施工中应将千斤顶前方 30 米管段划定为“重点监控区”, 提高监测与响应级别。根据临界荷载下降曲线, 设立偏差分级预警机制: 预警值 0.05 m (日常控制目标); 行动限值 0.15 m (达到即需停顶纠偏)。同时纠偏力的本质是施加与偏移方向相反的附加弯矩, 应确保当前总荷载(顶力 + 纠偏等效荷载)不超过当前偏差下的临界荷载, 因此为避免纠偏时发生局部失稳, 在纠偏时采用“微纠”的决策, 纠偏弯矩不宜超过 $0.3F_{cr}$ 。

事实上, 在顶进过程中由于各种因素的影响, 管节在土层中不可能沿直线前进, 而是出现偏离设计轴线的现象, 本文中分析总结了常见的可能导致轴线偏差的因素, 并针对性的提出了相应的控制措施。

4.1. 影响钢顶管轴线偏差的因素

轴线偏差影响因素中按是否与人为因素有关可分为主观因素与客观因素。由于施工过程中设备加工、

设备安装、管节选择、操作技术等人为原因产生的误差称为主观因素，常见主观影响因素如下：

1) 顶管机及反力墙的加工。顶管机壳体偏心、刀盘不平衡，反力墙刚度不足、安装倾斜、受力面不平整导致顶力分布不均，均可导致顶管轴线偏差。

2) 管道的外形尺寸。管节端面不平或倾斜可导致顶力偏心从而导致轴线偏差。

3) 设备安装精度。导轨安装误差是机头出洞阶段发生轴线偏差的主要因素，尤其容易导致机头磕头、抬头等高程偏差现象。后靠背及千斤顶的安装误差则将导致顶推力发生偏心，也会引起轴线偏差。

4) 管道掘进操作。管道掘进操作不当，可能造成管前与管周围的水土压力不平衡，甚至出现塌方，以致产生较大的偏心荷载，从而造成轴线偏差。

5) 轴线测量误差。激光靶、倾角传感器等测量装置的安装基准面加工误差会直接导致导向数据失真，使纠偏决策依据错误。

6) 管侧土体超挖量不合理。超挖过大，容易造成管节产生向内的轴线偏差。超挖过小，则管节可能产生向外的轴线偏差。

7) 注浆操作：触变泥浆注入压力、流量、点位分布不均匀或同步性差，导致管节周围形成的泥浆套厚度或支撑力不均，降低土体对管节的约束效果，增加轴线控制难度或诱发偏移。

顶管穿越土层的复杂性所造成的误差称为客观因素，常见的客观影响因素如下：

1) 土层很软弱。当土层很软弱(或很松散)时，一方面，由于机头的自重和上方覆土的荷载，将使机头由于受压而下俯，顶进路线将发生向下的高程偏差；另一方面，松软土层往往不能承受偏心顶力引起的径向推力，也就不能提供管节偏转所需要的土抗力，此时将很难控制顶进的方向，极易造成中心偏差。

2) 土层不均匀。当土层不均匀，比如在穿越层理倾斜而且各层密度也差别较大的层状土时，将使机头前端遇到不均匀的迎面阻力，而且机头周围的土压力也不平衡，如施工不慎也会造成轴线偏差。

3) 地下水作用：高地下水位或动水压力会降低土体的有效应力和强度，使管节更易在顶力或纠偏力作用下发生位移；渗流产生的附加荷载也可能改变管节受力平衡，导致偏差。

4) 管节温度变形差异：长距离顶进中，暴露于不同环境(如日晒、地下水土)的管节温度变化不同，导致线性膨胀/收缩量差异，可能引起管节微小偏转或附加应力，影响轴线。

5) 障碍物或异常地质体：顶进路径中遇到未探明的孤石、废弃桩基、硬质透镜体等障碍物，或局部存在的空洞、软弱包裹体等异常地质体，使机头或管节受到突发的、不均匀的阻力或支撑力，导致轴线急剧变化。

4.2. 钢顶管轴线偏差控制措施

针对上述主、客观因素导致的轴线偏差问题，需采取系统性控制措施，从设备、工艺、监测和管理等多方面入手，确保顶进轴线符合设计要求。

4.2.1. 主观因素控制措施

1) 严控设备与结构质量与安装：

① 顶管机/反力墙现场验收：确保顶管机壳体同心、刀盘动平衡合格；反力墙刚度达标，受力面平整。

② 高精度安装：使用精密仪器保证导轨、后靠背、千斤顶的安装位置、垂直度和平整度符合设计要求，顶力中心线与设计轴线重合。

③ 管节进场检验：严格检查管节端面平整度和垂直度，不合格者退回。

2) 优化掘进操作与参数控制

① 平衡压力掘进：精细控制顶进速度、出土量及泥水平衡参数，维持掌子面稳定，防止水土压力失衡。

② 规范超挖：根据土层特性精确控制超挖量。

③ 均匀同步注浆：采用自动化注浆系统，保证触变泥浆压力、流量稳定，注浆点位分布合理且同步性好，形成完整均匀的泥浆套。

④ 重点监控千斤顶前方 30 m 范围，将 0.05 米作为日常操作的预警值，当偏差达到 0.15 m，必须立即停顶纠偏。

3) 提升测量精度与信息化施工

① 高精度导向系统：使用高精度、稳定可靠的激光靶、倾角传感器等，并确保其安装基准面准确。

② 实时监测与纠偏：建立自动、连续的轴线测量系统(如激光导向 + 倾角仪)，实时获取姿态数据。基于准确数据，制定并及时执行“微纠”指令，确保单次纠偏操作所产生的附加荷载，不超过 $0.3F_{cr}$ 。

4.2.2. 客观影响因素控制措施

1) 地质改良与预处理

① 软弱/松散土层：提前进行地基加固(如注浆、搅拌桩、降水、冻结等)，提高土体强度和稳定性，提供必要土抗力。

② 不均匀土层/障碍物：加强详细地质勘探(物探 + 钻探)，精准识别土层变化、障碍物(孤石、桩基等)和异常地质体(空洞、透镜体)。针对性采取预处理，如清除障碍、局部加固、调整轴线等。

2) 地下水控制

有效降水/止水：根据水文地质条件，采取可靠降水措施降低地下水位，或采用注浆、冻结等方法形成止水帷幕，控制渗流和动水压力。同时在管节设计或注浆方案中考虑地下水影响。

3) 环境因素应对

长距离顶进时，设计可考虑温度变形补偿。在穿越复杂地层(软弱、不均、含水)时，动态调整顶进参数(顶速、顶力、平衡压力、出土量、注浆量等)以适应地层变化。

5. 结论

本文采用有限元方法，基于薄壁圆筒屈曲理论，引入 Winkler 弹性地基模型，研究了在偏压条件下发生轴线偏差的管段长度、壁厚、地层弹性抗力系数与轴线偏差大小对钢顶管稳定性的影响规律。同时系统性的总结了影响钢顶管轴线偏差的影响因素与相应的控制措施，共得出以下结论：

1) 在产生相同的轴线偏差时，发生轴线偏差的管道长度越长，对临界失稳荷载的影响越小，发生轴线偏差的管道长度小于 30 m 时，临界失稳荷载急剧下降，降幅超过 60%。轴线偏差越大，对临界失稳荷载的影响越大，当轴线偏差大于 0.4 m 时，临界失稳荷载下降超过 35%。

2) 在考虑材料初始缺陷与偏压条件下，临界失稳荷载随壁厚增加线性增加，当 t/D 从 0.0057 提升至 0.0152 时，临界失稳荷载可提升约 200%。在实际工程设计中，建议针对预期轴线偏差较大的工况，将 t/D 控制在 0.012 以上，以确保足够的稳定性冗余；临界失稳荷载随地层弹性抗力系数变化幅度不大，在软土地层中更应注意钢顶管稳定性问题。

3) 依据是否人为影响将轴线偏差影响因素分为主观因素与客观因素，并基于有限元结果提出相应的量化控制措施，将千斤顶前方 30 m 作为重点监控区域，进行轴线偏差分阶段预警，并严格控制纠偏力，制定并执行常纠、微纠决策。

参考文献

- [1] 甄亮. 复杂地层条件下钢顶管在施工中的稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [2] Zhao, R., Chen, Z., Feng, D., Liu, Q., Wen, P. and Yang, H. (2024) Buckling and Ultimate Bearing Capacity of Steel

Pipes Jacked in Hard Rocks: A Case Study of a Water Pipeline Project in Zhongshan. *Water*, **16**, Article 3041.
<https://doi.org/10.3390/w16213041>

- [3] 荆哲, 房鹏帅, 张耀阳, 等. 高水位软弱地层条件下大直径钢顶管稳定性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12131-12138.
- [4] 郑聪, 马保松. 基于 ABAQUS 的顶管施工中钢管稳定性分析[J]. 给水排水, 2016, 42(4): 99-103.
- [5] 李江. 基于 ABAQUS 的钢顶管屈曲分析[J]. 城市道桥与防洪, 2022(12): 259-261.
- [6] 陈楠, 陈锦剑, 夏小和, 等. 长钢顶管稳定特性的有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(5): 832-836.
- [7] 邵光辉, 薛双, 赵志峰, 等. 考虑轴线偏差的钢顶管允许顶力计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 729-734.
- [8] 孙任运, 许大鹏, 宣锋, 等. 钢顶管纵向失稳特性及加固措施数值分析研究[J]. 特种结构, 2023, 40(4): 12-17.
- [9] 宣锋, 黄彪, 夏鑫磊. 基于 Pasternak 地基模型的钢顶管纵向稳定性研究[J]. 特种结构, 2020, 37(1): 48-53.
- [10] 李兆超. 地下管道屈曲稳定研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.