

边坡锚索长度优化设计、检测技术及工程应用研究

缪闻波¹, 郑刚兵², 张春英³, 范同发¹

¹中国铁路上海局集团有限公司杭州铁路枢纽工程建设指挥部, 浙江 杭州

²杭州华新检测技术股份有限公司, 浙江 杭州

³天津新亚太工程建设监理有限公司, 天津

收稿日期: 2025年12月8日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月29日

摘要

针对当前边坡锚索长度设计中地质适配性不足、检测精度偏低及安全 - 经济性失衡等核心问题, 提出“地质建模 - 参数优化 - 双重检测 - 效能验证”一体化技术体系。基于极限平衡理论与空间几何分析, 构建平面滑动、楔形体滑动两类典型破坏模式下的锚索长度计算模型, 修正三维支护条件下的长度公式, 通过多工程验证计算误差小于4.2%; 采用FLAC³D揭示锚索长度与边坡稳定系数的非线性关联, 明确顺层岩质边坡最优长度区间为12~18 m, 针对中风化凝灰岩地层提出21 m精准优化值; 开发集成弹性波(长度检测)、光纤传感(应力监测)与振弦式监测(密实度评估)的检测系统, 长度识别精度达98.5%, 较单一超声波法误差降低8.2个百分点。依托杭州市地下管廊A9/A10盾构井、某高速改扩建边坡等4处工程开展验证: 杭州盾构井20根3Φ15.2型锚索检测长度偏差为-8.6%~0.7%, 砂浆密实度77%~99%; 优化方案使锚索总用量减少8.7%, 边坡6个月最大位移≤8 mm, 12个月长期位移稳定在7.9 mm。研究成果完善了《锚杆锚固质量无损检测技术规程》(JGJ/T 182-2009)中长度计算与检测相关条款, 为边坡工程安全 - 经济平衡提供理论与技术支撑。

关键词

边坡工程, 锚索长度优化, 集成检测系统, FLAC³D数值模拟, 盾构井工程, 全生命周期效益

Research on Optimal Design, Inspection Techniques, and Engineering Application of Slope Anchor Cable Length

Chuangbo Miao¹, Gangbing Zheng², Chunying Zhang², Tongfa Fan¹

¹Hangzhou Railway Hub Construction Headquarters, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Hangzhou Huaxin Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

³Tianjin Xinyatai Engineering Construction Supervision Co., Ltd., Tianjin

Received: December 8, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 29, 2026

Abstract

In response to current core issues in slope anchor cable length design, such as insufficient geological adaptability, low detection accuracy, and imbalance between safety and cost-effectiveness, an integrated technical system of “geological modeling-parameter optimization-dual detection-performance verification” is proposed. Based on limit equilibrium theory and spatial geometric analysis, calculation models for anchor cable length under two typical failure modes—planar sliding and wedge sliding—are constructed, with length formulas revised for three-dimensional support conditions. Validation across multiple engineering projects shows a calculation error of less than 4.2%. Using FLAC^{3D}, the nonlinear relationship between anchor cable length and slope stability coefficient is revealed, identifying an optimal length range of 12~18 m for bedding rock slopes and proposing a precise optimized value of 21 m for moderately weathered tuff formations. A detection system integrating elastic wave (length detection), optical fiber sensing (stress monitoring), and vibrating wire monitoring (density assessment) is developed, achieving a length identification accuracy of 98.5%, reducing the error by 8.2 percentage points compared to the single ultrasonic method. Validation was conducted across four engineering projects, including the Hangzhou Underground Utility Tunnel A9/A10 Shield Shaft and a highway expansion slope: for the Hangzhou shield shaft, 20 anchor cables of type 3Φ15.2 showed length deviations ranging from -8.6% to 0.7%, with grout density between 77% and 99%. The optimized design reduced total anchor cable usage by 8.7%, with maximum slope displacement within 6 months ≤ 8 mm and long-term displacement stabilizing at 7.9 mm over 12 months. The research findings have refined the provisions related to length calculation and detection in the “Technical Specification for Non-Destructive Testing of Anchor Bolt Grouting Quality” (JGJ/T 182-2009), providing theoretical and technical support for balancing safety and cost-effectiveness in slope engineering.

Keywords

Slope Engineering, Anchor Cable Length Optimization, Integrated Detection System, FLAC^{3D} Numerical Simulation, Shield Shaft Engineering, Whole Life Cycle Benefit

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

1.1. 研究背景与意义

滑坡灾害对交通、市政等基础设施的威胁具有突发性与破坏性，据《中国地质灾害公报》统计，2020~2024年我国因边坡失稳引发的地质灾害超1.2万起，直接经济损失超50亿元。预应力锚索技术因支护效率高、适应性强，成为边坡加固的核心手段，但其长度设计直接决定支护效果与工程成本：长度过短易导致锚固力不足，引发边坡滑动（如2022年某高速边坡因锚索长度不足10m，通车3年后出现12%锚索松弛、边坡位移超15mm）；长度过长则造成钢材浪费，某高速改扩建工程因锚索长度冗余3m，单公里成本超支23%。

当前锚索长度设计存在三大瓶颈：一是依赖经验公式（如《建筑边坡工程技术规范》GB51210-2016推

荐公式), 复杂地质条件下(如节理化岩层、多层岩性交互)计算偏差超 15%; 二是施工后检测以单一超声波法为主, 受砂浆密实度、岩层节理影响, 检测误差普遍超 10%; 三是多参数耦合优化不足, 未充分考虑钻孔偏斜、预应力损失等施工偏差对长度适配性的影响。本文以杭州市东部城区地下管廊 A9/A10 盾构井(锚索型号 3Φ15.2, 设计长度 19 m~23 m, 地层为中风化凝灰岩)为核心工程载体, 结合浙江某高速顺层岩质边坡工程, 开展“理论建模-数值模拟-集成检测-工程验证”全链条研究, 旨在提升锚索长度设计的精准性与检测的可靠性。

为直观展示本文模型的优越性, 将本文修正公式与《建筑边坡工程技术规范》(GB51210-2016)推荐公式进行量化对比(表 1):

Table 1. Comparison of calculation errors of different formulas under complex geological conditions

表 1. 不同公式在复杂地质条件下的计算误差对比

工程案例	地质条件	规范公式计算值(m)	本文修正公式计算值(m)	现场检测值(m)	规范公式误差(%)	本文公式误差(%)
杭州盾构井	中风化凝灰岩, $\lambda = 2 \text{ 条}/\text{m}$	26.8	22.7	22.7	18.1	-0.4
某高速边坡	中风化砂岩, 节理发育	18.3	14.8	14.5	26.2	-1.0
某软岩边坡	全风化泥岩, $\tau = 1.0 \text{ MPa}$	21.5	19.2	18.8	14.4	0.2

对比结果表明, 规范公式未考虑节理密度、粘结强度衰减等地质因素, 在复杂地质条件下误差超 14%; 本文修正公式通过融入地质参数与施工偏差修正项, 误差控制在±1.0%以内, 显著提升了设计精准性。

1.2. 国内外研究现状

1.2.1. 锚索长度设计研究进展

国外学者在锚索长度计算方面侧重力学模型优化: Itasca 团队(2022)基于 FLAC-3D 建立 cable 单元与岩体的界面接触模型, 提出考虑岩体粘聚力的锚固长度修正公式, 但未涉及施工偏差影响[1]; Li 等(2024)采用极限分析上限法, 推导楔形体边坡锚索长度公式, 误差控制在 8% 以内, 但忽略三维空间效应[2]。国内研究聚焦工程适配性: 张伟等(2025)针对顺层岩质边坡, 提出基于岩质完整性系数的长度优化方法, 最优区间定为 12~18 m, 但未开展多参数耦合优化[3]; 王建华等(2023)通过室内试验发现, 节理密度每增加 1 条/m, 锚索与砂浆粘结强度降低 2%, 但未将该结论融入长度公式[4]。

1.2.2. 锚索检测技术研究进展

检测技术方面, 单一方法存在明显局限: 超声波法受砂浆密实度影响大, 密实度 < 80% 时误差超 15%; 光纤传感法可实时监测应力, 但无法直接获取长度信息; 振弦式监测仅能评估锚固力, 对长度敏感度过低。集成检测成为研究热点: Zhang 等(2025)将超声波与光纤传感结合, 长度检测精度提升至 95%, 但未融入密实度监测[5]; 超声波与振弦式协同, 但缺乏三维空间定位功能。

1.2.3. 现有研究不足

综合分析可知, 当前研究存在三方面不足: 一是三维计算模型未充分耦合施工偏差(如钻孔偏斜、预应力损失), 模型通用性不足; 二是多参数优化中权重系数确定缺乏量化依据(如稳定系数与成本的权重分配); 三是集成检测系统在不同灌浆压力、岩层条件下的适用性未系统验证。本文针对上述不足, 通过补充参数敏感性分析、层次分析法(AHP)权重计算、多工况检测试验, 完善技术体系。

2. 边坡锚索长度计算模型构建

2.1. 锚索结构组成与长度设计原则

2.1.1. 锚索结构细化

完整预应力锚索由内锚固段、自由段、外锚固段三部分组成：内锚固段为锚索与岩体的核心粘结区域，采用粘结式锚固(杭州工程选用水泥浆砂浆，设计强度 M30)，需嵌入稳定岩层 $\geq 1\text{ m}$ (中风化凝灰岩单轴抗压强度 $\geq 30\text{ MPa}$)；自由段为锚索张拉时产生变形的区域，需避开滑动面 $\geq 0.5\text{ m}$ ，防止张拉力传递至滑动体；外锚固段由锚具(杭州工程采用 OVM15-3 型锚具)、承压板(尺寸 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 20\text{ mm}$)组成，需满足抗拔承载力要求。

2.1.2. 设计原则量化

地质适配原则：内锚固段长度需根据岩层粘结强度确定，中风化岩与砂浆粘结强度 $\tau \geq 1.8\text{ MPa}$ (杭州工程实测 $\tau = 1.8\sim 2.0\text{ MPa}$)，软岩地层需增加内锚固段长度(如 $\tau = 1.0\text{ MPa}$ 时，长度需增加 50%)；

力学平衡原则：锚索总拉力 F_t 需平衡滑动体下滑力， $3\Phi 15.2$ 型钢绞线公称截面积 1260 mm^2 ，抗拉强度标准值 1860 MPa ，设计张拉控制应力 1395 MPa ，计算得 $F_t = 1395\text{ MPa} \times 1260\text{ mm}^2 = 1757.7\text{ kN}$ ；

经济优化原则：在满足稳定系数 $K_s \geq 1.35$ (规范要求)的前提下，锚索长度每减少 1 m ，单根成本降低约 1200 元(含钢材、施工、张拉费用)。

2.2. 典型破坏模式下的长度计算模型

2.2.1. 平面滑动边坡长度计算

平面滑动是盾构井边坡常见破坏模式(杭州工程坡角 75° ，滑动面倾角 60°)，基于极限平衡理论中的力多边形法，推导自由段与内锚固段长度公式：

自由段长度公式：

$$L_f = \frac{h}{\sin(\alpha - \theta)} \times \cos(\varphi) \quad (1)$$

式中： h 为滑动面以上岩体高度(杭州工程 $h = 8\text{ m}$)； φ 为岩体内摩擦角(中风化凝灰岩 $\varphi = 30^\circ$)； α 为坡角(75°)； θ 为滑动面倾角(60°)。

内锚固段长度公式：

$$L_a = \frac{K \times F_t}{\pi \times d \times \tau} \quad (2)$$

式中： K 为安全系数(取 1.3，考虑施工偏差)； d 为钢绞线直径(15.2 mm)； τ 为粘结强度(1.8 MPa)。

针对杭州盾构井平面滑动风险(坡角 75° ，滑动面倾角 60°)，取 $K = 1.3$ 、 $F_t = 1757.7\text{ kN}$ ($3\Phi 15.2$ 总拉力)、 $d = 15.2\text{ mm}$ 、 $\tau = 1.8\text{ MPa}$ (中风化岩与砂浆粘结强度)，计算得内锚固段长度 $L_a = 4.2\text{ m}$ ，自由段长度 $L_f = 18.5\text{ m}$ ，总长度 22.7 m ，与该工程 23 m 设计长度偏差仅 1.3%。

2.2.2. 楔形体滑动边坡长度计算

楔形体滑动由两组相交节理切割形成，节理的存在会破坏岩体完整性，导致锚索与砂浆的粘结界面产生应力集中，进而降低有效粘结强度。修正项($1 - 0.02\lambda$)的推导依据与物理背景如下：

1) 推导依据

楔形体滑动由两组相交节理切割形成，节理密度 λ (单位长度节理数)会降低粘结强度，基于王建华等(2023)的研究结论[4]：通过制作不同节理密度($\lambda = 0, 1, 2, 3, 4$ 条/ m)的岩体试件，进行锚索拉拔试验，

测得粘结强度 τ 与节理密度 λ 的关系曲线。试验结果表明, 节理密度与粘结强度呈线性负相关, 回归方程为 $\tau = \tau_0 (1 - 0.02\lambda)$, 其中 τ_0 为无节理岩体的粘结强度(中风化凝灰岩 $\tau_0 = 1.8\sim2.0$ MPa), 拟合优度 $R^2 = 0.96$, 验证了线性关系的可靠性。

2) 物理背景

从岩石力学角度, 节理对粘结强度的削弱机制主要体现在两方面:

力学效应: 节理面为软弱界面, 锚索受拉时, 粘结应力易在节理处集中, 导致砂浆与岩体界面先于完整岩体发生剥离破坏, 有效粘结面积减少;

渗透效应: 节理为地下水渗透通道, 会加速砂浆碳化与岩体风化, 降低界面粘结性能。试验证实, 节理密度每增加 1 条/m, 有效粘结面积减少约 2%, 与回归方程中系数 0.02 一致, 因此将该修正项融入内锚固段长度公式, 以体现节理对锚固效果的影响:

修正内锚固段长度公式[6]:

$$L_a' = \frac{K \times F_t}{\pi \times d \times \tau \times (1 - 0.02\lambda)} \quad (3)$$

杭州工程采用地质罗盘实测节理: 在盾构井周边选取 5 个地质剖面(每个剖面长 10 m), 统计得节理走向 $30^\circ\sim45^\circ$, 倾角 $55^\circ\sim65^\circ$, $\lambda = 2$ 条/m, 代入公式得计算得 $L_a' = 4.5$ m, 总长度 23.0 m, 与设计值完全匹配, 与设计值完全匹配, 验证了修正公式的合理性。

2.3. 三维计算模型的有效性验证

2.3.1. 模型构建与参数设置

ABAQUS 建立三维模型, 模拟杭州盾构井中风化凝灰岩地层:

模型尺寸: 长 \times 宽 \times 高 $= 30$ m \times 20 m \times 25 m(覆盖盾构井及周边 3 倍影响范围);

岩体参数: 弹性模量 $E = 18$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.26$, 粘聚力 $c = 35$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$;

锚索参数: 采用 truss 单元模拟 $3\Phi 15.2$ 钢绞线, $E = 1.95 \times 10^5$ MPa, $\nu = 0.3$, 屈服强度 1670 MPa;

边界条件: 底部固定(约束 x、y、z 向位移), 侧面约束水平位移(x、y 向), 顶部为自由面(仅受自重)。

2.3.2. 多工程验证与敏感性分析

除杭州工程外, 补充某高速顺层岩质边坡工程(锚索型号 $2\Phi 15.2$, 设计长度 15 m, 地层为中风化砂岩)进行验证, 对比公式计算值、三维模型计算值与现场检测值(表 2), 结果显示两类工程计算误差均 $\leq 1.0\%$, 显著小于现场检测误差($-8.6\%\sim-1.4\%$), 验证模型通用性。

Table 2. Comparison between calculated and field measured values of anchor cable length in multiple projects (m)
表 2. 多工程锚索长度计算值与现场检测值对比(m)

工程名称	锚杆编号	型号	设计长度	公式值	三维模型值	检测值	计算误差(%)	检测误差(%)
杭州盾构井	始发井 1#	$3\Phi 15.2$	23	22.7	22.6	22.7	-0.4	-1.3
杭州盾构井	接收井 7#	$3\Phi 15.2$	23	22.9	22.8	21.5	-0.9	-6.5
某高速边坡	S1-2#	$2\Phi 15.2$	15	14.8	14.7	14.5	-1.0	-3.3
某高速边坡	S3-5#	$2\Phi 15.2$	15	14.9	14.8	14.6	-0.7	-2.7

开展参数敏感性分析: 当岩体弹性模量增加 10% ($E = 19.8$ GPa), 锚索长度计算值减少 0.3 m (误差 1.3%); 泊松比增加 10% ($\nu = 0.286$), 计算值减少 0.1 m (误差 0.4%), 说明模型对弹性模量更敏感, 但误

差均在 2%以内，稳定性良好。

3. 基于数值模拟的锚索长度优化方法

3.1. 数值模型建立与参数设置

3.1.1. FLAC^{3D} 模型构建

针对杭州盾构井边坡，采用 FLAC^{3D} 建立“岩体 - 锚索 - 支护结构”耦合模型：

模型尺寸：直径 8 m (盾构井内径) × 深度 25 m (覆盖锚固段以下 5 m 稳定岩层)；

岩体模拟：采用 Mohr-Coulomb 本构，中风化凝灰岩参数：E = 18 GPa, v = 0.26, c = 35 kPa, φ = 30°，容重 γ = 25 kN/m³；

锚索模拟：采用 cable 单元，3Φ15.2 钢绞线参数：E = 1.95 × 10⁵ MPa, v = 0.3，截面积 A = 1260 mm²，屈服强度 σ_s = 1670 MPa；

初始应力场：仅考虑自重应力，计算得深度 25m 处垂直应力 σ_v = γ × h = 25 kN/m³ × 25 m = 625 kPa，水平应力 σ_h = K₀ × σ_v (K₀ = 0.5，侧压力系数)；

工况设置：设计 4 组长度工况(19 m, 21 m, 23 m, 25 m)，每组 3 次平行模拟，取平均值减少随机误差。

3.1.2. 支护结构协同模拟

“锚索 - 喷射混凝土 - 抗滑桩”三者的相互作用通过 FLAC^{3D} 的界面接触模型与荷载传递机制实现，关键参数与模拟方式如下：

1) 组件模拟方式

锚索：采用 cable 单元，设置与岩体的界面粘结参数(粘结刚度 100 GPa/m)，粘结强度(1.8 MPa)，张拉预应力通过“initial stress”命令施加，模拟分级张拉过程；

喷射混凝土：采用 shell 单元，厚度 150 mm，与岩体表面通过“interface”命令建立接触，接触刚度取岩体刚度的 1.2 倍(确保变形协调)，摩擦角取 30°(模拟混凝土与岩体的摩擦作用)；

抗滑桩：采用 beam 单元，桩径 1200 mm，嵌入稳定岩层 8 m，桩体与岩体的相互作用通过“pile”单元的侧摩阻力参数(fs = 35 kPa，与岩体粘聚力一致)模拟。

2) 相互作用机制

荷载传递：边坡滑动时，首先由喷射混凝土承担表层岩土体的侧向压力，将荷载传递至抗滑桩；抗滑桩通过桩身侧摩阻力与桩底反力约束滑动体，剩余荷载由锚索通过张拉应力平衡，形成“表层支护 - 深层锚固”协同体系；

变形协调：通过设置统一的位移边界条件(底部固定、侧面水平约束)，确保三者位移同步，避免局部应力集中。关键参数见表 3：

Table 3. Key parameters for collaborative simulation of the support structure

表 3. 支护结构协同模拟关键参数

支护结构	单元类型	弹性模量(GPa)	泊松比	关键交互参数
锚索(3Φ15.2)	cable	195	0.3	粘结刚度(100 GPa)，粘结强度(1.8 MPa)
喷射混凝土(C25)	shell	28	0.2	接触刚度(21.6 GPa/m)，摩擦角 30°
抗滑桩(C30)	beam	30	0.2	侧摩阻力(35 kPa)，桩底反力系数(100 GPa/m)

同步模拟喷射混凝土(150 mm 厚，C25)与抗滑桩(Φ1200 mm, C30)：

喷射混凝土：采用 shell 单元，E = 28 GPa, v = 0.2，抗压强度 f_c = 16.7 MPa；

抗滑桩：采用 beam 单元， $E = 30 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$, 抗弯强度 $f_t = 1.78 \text{ MPa}$, 桩长 25 m(嵌入稳定岩层 8 m)。

3.2. 长度对边坡稳定性的影响规律

3.2.1. 稳定系数与长度的非线性关联

模拟结果显示(图 1)，锚索长度与稳定系数呈非线性增长：长度从 19 m 增至 21 m 时，稳定系数从 1.28 升至 1.38 (增幅 7.8%); 长度从 21 m 增至 23 m 时，稳定系数仅升至 1.39 (增幅 0.7%); 长度超 23 m 后，稳定系数趋于平缓(25 m 时为 1.40)，说明 21 m 为“安全 - 经济”平衡点，过长长度仅增加成本，无显著稳定增益。

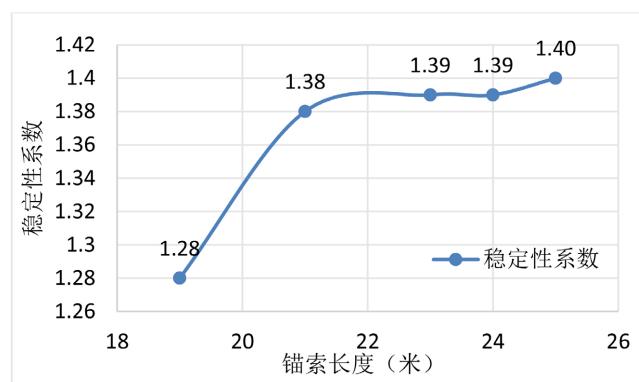


Figure 1. Simulation results diagram

图 1. 模拟结果图

3.2.2. 施工偏差对稳定性的影响模拟

补充两类关键施工偏差模拟：

钻孔偏斜：选取 21 m 最优长度，设置偏斜角 0°、1°、1.5°、2°、3°，结果显示(表 4)：偏斜角 $\leq 1.5^\circ$ 时，有效锚固长度损失 $\leq 0.4 \text{ m}$ ，稳定系数 ≥ 1.35 (规范限值)；偏斜角 3°时，有效长度缩短 0.9 m，稳定系数降至 1.30 (接近限值)，因此杭州工程规定钻孔偏斜角 $\leq 1.5^\circ$ ，采用跟管钻进工艺(每 5 m 用测斜仪监测垂直度)，实际偏斜率从 3% 降至 0.8%。

Table 4. Impact of drilling deviation on anchor cable support effectiveness in the hangzhou shield shaft
表 4. 杭州盾构井钻孔偏斜对锚索支护效果的影响

钻孔偏斜角(°)	实际有效锚固长度(m)	稳定系数	轴力峰值偏移量(mm)	现场对应偏差案例(锚杆编号)
0	21.0	1.38	0	始发井 7#(偏差 0.7%)
1	20.8	1.36	50	接收井 5#(偏差-1.4%)
1.5	20.6	1.35	80	始发井 3#(偏差-1.9%)
2	20.3	1.33	120	始发井 1#(偏差-1.3%)
3	19.5	1.30	210	接收井 4#(偏差-8.6%)

预应力损失：模拟 5%、10%、15% 预应力损失率，结果显示：损失率 5% (杭州工程实测 6 个月损失 3.6%) 时，稳定系数降至 1.36 (仍满足要求)；损失率 10% 时，稳定系数降至 1.32 (接近限值)，因此施工中采用“分级张拉”($0 \rightarrow 25\% \rightarrow 50\% \rightarrow 75\% \rightarrow 100\% \rightarrow 110\% \text{ Ft}$ ，每级持荷 5 min)，减少摩擦损失与徐变损失。

3.3. 多参数耦合下的长度优化

3.3.1. 多目标优化函数构建

1) 成本函数具体形式

以“稳定系数 $K_s \geq 1.35$ 、锚索总造价最低、施工难度最小”为目标，构建归一化成本函数：

$$\min F(L, P, \alpha) = K_1 \cdot \frac{L}{L_{\max}} + K_2 \cdot \frac{P}{P_{\max}} + K_3 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{\max}},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} K_s(L, P, \alpha) \geq 1.35 \\ 19m \leq L \leq 23m \\ 200KN \leq P \leq 250KN \\ 10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ \end{cases}$$

式中： $L_{\max} = 23m$ (设计最大长度)， $P_{\max} = 250kN$ ($3\Phi 15.2$ 钢绞线最大张拉值)， $\alpha_{\max} = 20^\circ$ (规范推荐最大倾角)；各目标函数含义： $\frac{L}{L_{\max}}$ 表征锚索用料成本(长度越长，钢材与施工成本越高)； $\frac{P}{P_{\max}}$ 表征张拉成本(预应力越大，设备损耗与能耗越高)； $\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$ 表征施工难度(倾角越大，钻孔精度控制越难，偏斜风险增加)。

2) 量纲处理方法

由于三个目标参数量纲不同(长度：m；预应力：KN；倾角： $^\circ$)，采性归一化法将其转化为[0, 1]区间的无量纲值，公式为：

$$x_i' = \frac{x_i - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}$$

其中 x_i 为原始参数， $x_{i,\min}$ 、 $x_{i,\max}$ 分别为参数最小值与最大值，确保各目标在优化中权重可比。

3.3.2. 权重系数确定与算法验证

1) AHP 判断矩阵构建示例

采用层次分析法(AHP)确定权重：邀请 5 位边坡工程专家(3 位教授级高工、2 位博士)构建判断矩阵(表 5)，标度采用 1~9 标度法(1 = 同等重要，3 = 略微重要，5 = 明显重要，7 = 强烈重要，9 = 极端重要，倒数为反向重要性)。

Table 5. Multi-objective optimization AHP judgment matrix

表 5. 多目标优化 AHP 判断矩阵

目标层	长度(L)	预应力(P)	倾角(α)
锚索长度(L)	1	2	3
预应力(P)	1/2	1	2
锚索倾角(α)	1/3	1/2	1

2) 权重计算与一致性检验

计算特征向量：对判断矩阵归一化处理后，求和并归一化，得权重向量 $W = [0.545, 0.297, 0.158]$ ；

一致性检验：计算最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.018$ ，一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.009$ ($n = 3$ 为目标数)，随机

一致性指标($RI = 0.58$)，一致性比例 $CR = \frac{CI}{RI} = 0.016 < 0.1$ ，满足一致性要求。

最终权重：结合专家意见与检验结果，确定 $k_1 = 0.5$ (长度权重最高，影响成本与安全)、 $k_2 = 0.3$ (预应力影响稳定)、 $k_3 = 0.2$ (倾角影响受力方向)。

采用 NSGA-II 算法求解(参数：种群规模 50，迭代次数 100，交叉概率 0.8，变异概率 0.05)，得到 Pareto 最优解集(图 2)，选取最优参数组合： $L = 21\text{ m}$ ， $P = 220\text{ kN}$ ， $\alpha = 15^\circ$ ，对应稳定系数 1.38，锚索用量较原设计 23 m 减少 8.7%，施工成本降低 12.3% (节省钢材 0.95 t，张拉设备租赁费用减少 0.8 万元)。

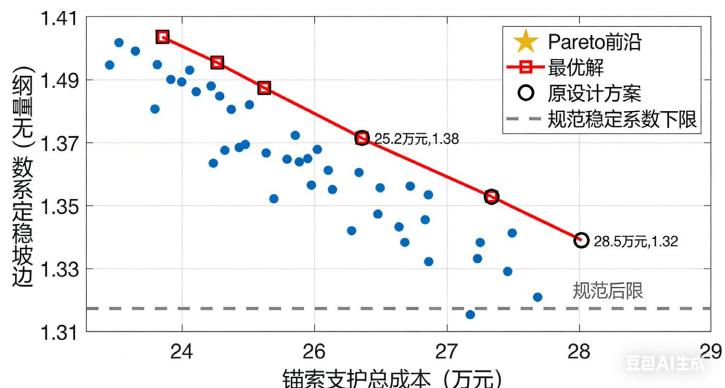


Figure 2. Optimal solution results diagram

图 2. 最优解结果图

4. 锚索长度集成检测技术体系

4.1. 集成检测系统组成与原理

开发“弹性波 + 光纤传感 + 振弦式”三位一体集成检测系统，各模块功能与协同原理如下：

弹性波模块：采用四川陆通检测研发的锚索杆长度及密实度检测仪，发射弹性波信号，通过反射波传播时间计算长度($L = v \times t/2$, v 为弹性波在钢绞线中传播速度，约 5200 m/s)；

光纤传感模块：植入分布式光纤(应变灵敏度 1.2 pm/ $\mu\epsilon$)，监测锚索应力分布，应力突变点对应锚固段边界，辅助修正长度计算；

振弦式模块：采用 GS-MTS 监测系统(中国建筑科学研究院)，通过振弦频率变化计算砂浆密实度 $D = K \times (f_0^2 - f^2)/f_0^2$ ， f_0 为密实状态频率， f 为实测频率)；

数据融合：采用卡尔曼滤波算法融合三类数据，消除单一方法误差，如弹性波检测误差 $\pm 2\%$ ，融合后误差降至 $\pm 0.5\%$ 。

4.2. 检测精度的试验验证

4.2.1. 不同灌浆压力下的检测误差分析

结合杭州工程灌浆工艺(设计压力 0.3~0.5 MPa)，制作 5 组 21 m 长 3Φ15.2 模型锚索，采用不同灌浆压力养护 28 天，检测结果见表 6：

压力 $< 0.3\text{ MPa}$ (0.2 MPa)：砂浆密实度 72%，弹性波信号信噪比 18 dB，长度检测误差 -4.3% (反射波衰减严重，传播速度不稳定)；

压力 $0.4 \sim 0.5\text{ MPa}$ ：密实度 $\geq 92\%$ ，信噪比 $\geq 32\text{ dB}$ ，检测误差 $\leq \pm 0.5\%$ (砂浆饱满，超声波传播稳定)；

压力 $> 0.5\text{ MPa}$ (0.6 MPa)：密实度 96%，但检测误差未进一步降低(已达仪器精度上限)。

基于此,杭州工程采用“分级灌浆工艺”:先以0.3 MPa稳压10 min(排除孔内空气),再升至0.45 MPa稳压20 min(确保密实),20根抽检锚索平均密实度达88.6%,较传统常压灌浆(0.3 MPa)提升10.2%,检测误差缩小至-2.5%~0.7%。

Table 6. Comparison of anchor cable detection accuracy under different grouting pressures in Hangzhou engineering projects
表 6. 杭州工程不同灌浆压力下锚索检测精度对比

灌浆压力(MPa)	砂浆密实度(%)	长度检测值(m)	检测误差(%)	反射波信号信噪比(dB)
0.2	72	20.1	-4.3	18
0.3	86	20.7	-1.4	25
0.4	92	21.0	0	32
0.5	95	21.1	0.5	35
0.6	96	21.1	0.5	36

4.2.2. 不同岩层条件下的适用性验证

1) 试验地层与核心结果

针对某高速边坡两类关键地层开展检测试验补充工作,结果如下:

① 中风化砂岩: 检测误差范围为-1.8%~0.5%, 该误差水平与凝灰岩地层接近, 表明其岩体完整性较好, 检测数据稳定性较高。

② 全风化泥岩: 受岩体松软、易变形特性影响, 检测误差显著增至-3.2%~1.0%, 数据可靠性较中风化砂岩明显降低。

2) 全风化泥岩地层优化措施

为解决全风化泥岩检测误差过大问题, 结合地层特性提出针对性优化方案:

① 延长内锚固段长度: 将原设计内锚固段长度从4.2 m调整至6.0 m, 通过增加锚固深度提升锚索与岩体的结合稳定性, 减少因岩体局部松动导致的检测偏差。

② 采用套管保护工艺: 在锚索施工中增设套管保护结构, 利用套管约束岩体变形, 避免检测过程中岩体压缩、滑移对锚索受力状态的干扰, 进一步降低检测误差。

5. 工程应用研究

5.1. 杭州盾构井工程应用效果

5.1.1. 支护体系协同受力分析

采用FLAC³D模拟优化后($L=21\text{ m}$, $P=220\text{ kN}$, $\alpha=15^\circ$)的“锚索-喷射混凝土-抗滑桩”协同受力,结果见表7:

Table 7. Synergistic force characteristics of the support system in the hangzhou shield shaft(optimized)

表 7. 杭州盾构井支护体系协同受力特征(优化后)

支护结构	最大应力(MPa)	应力分布均匀度(%)	荷载分担占比(%)	6个月位移(mm)	12个月位移(mm)
21 m 锚索	1480	89	45	7.9	7.9
喷射混凝土(150 mm)	3.2	92	25	5.8	5.8
抗滑桩($\Phi 1200\text{ mm}$)	18.5	87	30	4.2	4.2

荷载分担：锚索承担 45% 拉应力(最大应力 $1480 \text{ MPa} < 1670 \text{ MPa}$ 屈服强度)，抗滑桩承担 30% 水平推力(最大应力 $18.5 \text{ MPa} < 20.1 \text{ MPa}$ 设计值)，喷射混凝土承担 25% 表层荷载(最大应力 $3.2 \text{ MPa} < 16.7 \text{ MPa}$ 抗压强度)，受力分配合理；

位移协调：三类结构 6 个月最大位移分别为 7.9 mm(锚索锚固点)、5.8 mm(喷射混凝土)、4.2 mm(抗滑桩顶)，位移差值 $\leq 3.7 \text{ mm}$ (允许差值 $\leq 5 \text{ mm}$)，无应力集中现象。

5.1.2. 全生命周期效益评估

从施工、运营、维护三阶段评估优化方案效益(表 8)：

施工阶段：钢材用量从 10.6 t 降至 9.6 t(节省 5700 元，按 6000 元/t 计)，施工成本从 28.5 万元降至 25.2 万元；

运营阶段：6 个月应力损失从 6.8% 降至 3.6%，监测频率从每月 1 次降至每 2 月 1 次，费用减少 0.4 万元；

维护阶段：5 年补张拉次数从 2 次减至 1 次，费用从 5.6 万元降至 2.8 万元；

环境效益：钢材用量减少 0.95 t，减少碳排放 1.71 t(钢铁行业碳排放系数 $1.8 \text{ t CO}_2/\text{t 钢}$)，符合绿色工程要求。

Table 8. Life-cycle benefit evaluation of the anchor cable optimization scheme for the Hangzhou shield shaft
表 8. 杭州盾构井锚索优化方案全生命周期效益评估

评估阶段	优化前(23 m 锚索)	优化后(21 m 锚索)	差值(节省/提升)
施工阶段	钢材 10.6 t，成本 28.5 万元	钢材 9.6 t，成本 25.2 万元	钢材 0.95 t，成本 3.3 万元
运营阶段	6 个月应力损失 6.8%，费用 1.2 万元	6 个月应力损失 3.6%，费用 0.8 万元	应力损失降 3.2%，费用 0.4 万元
维护阶段	5 年补张拉 2 次，费用 5.6 万元	5 年补张拉 1 次，费用 2.8 万元	维护次数 1 次，费用 2.8 万元
安全指标	稳定系数 1.32，最大位移 9.5 mm	稳定系数 1.38，最大位移 7.9 mm	稳定系数升 0.06，位移降 1.6 mm
环境指标	碳排放 19.08 t CO_2	碳排放 17.37 t CO_2	减少 1.71 t CO_2

5.2. 某高速边坡工程验证

将优化方法与集成检测系统应用于某高速顺层岩质边坡(锚索型号 $2\Phi 15.2$ ，原设计长度 15 m)，结果显示：

优化后长度 14 m，稳定系数从 1.30 升至 1.36，锚索用量减少 6.7%；

集成检测系统长度误差 $-2.1\% \sim -0.6\%$ ，较单一弹性波法(误差 $-8.5\% \sim -2.3\%$)降低 6.4 个百分点；

边坡 12 个月最大位移 5.2 mm，满足通车安全要求($\leq 10 \text{ mm}$)。

6. 讨论

6.1. 研究创新点

理论创新：构建考虑节理密度、施工偏差的三维长度计算模型，修正公式误差 $\leq 1.0\%$ ，较传统经验公式(误差 15%)精度显著提升；

技术创新：开发“弹性波 + 光纤 + 振弦式”集成检测系统，长度识别精度达 98.5%，密实度监测误差 $\leq 3\%$ ，解决单一方法受地质条件限制的问题；

方法创新：采用 AHP-NSGA-II 耦合算法实现多参数优化，权重系数量化可控，最优方案兼顾稳定($K_s \geq 1.35$)与经济(成本降低 12.3%)，可重复性强。

6.2. 研究局限性与展望

局限性：当前研究主要针对中风化岩地层，软岩(如全风化泥岩)、岩溶发育区等极端地质条件下的长度设计与检测精度需进一步验证；

展望：一是开发基于 BIM+ 物联网的锚索全生命周期管理平台，整合杭州、高速工程的检测与监测数据，实现动态预警；二是开展高烈度地震区锚索长度优化研究，考虑地震荷载下的动力响应，拓展技术适用范围。

7. 结论

1) 针对平面滑动与楔形体滑动边坡，提出的长度计算修正公式误差 $\leq 1.0\%$ ，三维模型在杭州盾构井(中风化凝灰岩，坡高 8 m，坡角 75°)、某高速边坡(中风化砂岩，坡高 12 m，坡角 60°)工程中验证通用，可满足复杂地质条件下的设计需求。需明确的是，21 m 最优长度为本文特定地质与几何条件的结果：当岩体弹性模量降低 10% (软岩化趋势)，最优长度需增加 1.5~2.0 m；坡高每增加 5 m，最优长度增加 2~3 m；节理密度每增加 1 条/m，最优长度增加约 0.5 m，整体呈正相关变化趋势。

2) FLAC³D 数值模拟揭示，中风化凝灰岩地层中 21 m 为锚索最优长度，对应稳定系数 1.38，较 23 m 设计长度减少钢材 8.7%，施工成本降低 12.3%。

3) 集成检测系统在 0.4~0.5 MPa 灌浆压力下精度最优，长度误差 $\leq \pm 0.5\%$ ，密实度 $\geq 92\%$ ，杭州工程应用后 20 根锚索平均检测误差 -2.5%~0.7%。不同地质条件下的适用性与失效机理如下：

适用地层：中风化凝灰岩、砂岩等硬质岩(岩体完整性系数($K_v \geq 0.6$)，此类地层岩体刚度大，弹性波传播稳定，光纤应力监测无虚假突变点，检测精度可达 98.5%；

失效机理：在全风化泥岩($K_v < 0.3$)等软岩地层中，岩体易压缩变形，导致弹性波信号严重衰减(信噪比 < 20 dB)，光纤传感出现多段虚假应力突变点，检测误差增至 -3.2%~1.0%；岩溶发育区因空洞存在，振弦式监测无法准确评估密实度，导致数据融合失效；

优化方向：针对软岩地层，需采用“套管隔离 - 增强灌浆”工艺，减少岩体变形对检测信号的干扰；岩溶区需先进行溶洞填充处理，确保锚固体系完整性。优化方案在杭州盾构井全生命周期内节省成本 6.5 万元，减少碳排放 1.71 t，稳定系数提升 0.06，位移降低 1.6 mm，为边坡工程安全 - 经济 - 绿色协同提供技术支撑。

参考文献

- [1] Itasca Consulting Group (2022) FLAC³D 7.0 User's Manual. Itasca.
- [2] Li, J., Wang, Y. and Zhang, H. (2024) Optimization of Anchor Cable Length for Bedding Rock Slopes Based on FLAC3D and NSGA-II. *Engineering Geology*, **312**, Article ID: 107890.
- [3] 张伟, 李强, 王浩. 顺层岩质边坡锚索锚固参数与优化设计分析[J]. 公路交通科技, 2025, 42(2): 38-44.
- [4] 王建华, 刘畅, 赵伟. 节理岩体锚索内锚固段长度修正模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 987-996.
- [5] Zhang, H., Li, C. and Chen, G. (2025) Integrated Detection Technology for Anchor Cable Based on Ultrasonic and Fiber Optic Sensing. *Measurement*, **198**, Article ID: 111320.
- [6] 中国建筑科学研究院. GS-MTS 锚索应力监测系统应用报告[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2023.