

尹蒋松,李飒.基于弗雷歇距离的海上沉桩土阻力推荐方法[J].地震工程学报,2024,46(6):1345-1354.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230522003

YIN JIANGSONG, LI SA. Method for calculating the soil resistance during offshore pile driving based on Fréchet distance[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1345-1354. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230522003

基于弗雷歇距离的海上沉桩土阻力推荐方法

尹蒋松, 李 飒

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 随着海洋平台以及海上风电规模的扩大,桩基可打入性分析的精度越来越受到关注。打桩过程中土阻力的合理评估是提高可打入性分析准确性的前提,而土阻力分析中最重要的是端阻和侧阻折减系数的取值。以11个海上平台的99个打桩记录为数据库,首先,通过打桩记录数据证明弗雷歇距离算法在海上平台桩基打桩记录之间相似度计算的适用性,确定该海域弗雷歇距离的阈值,并对阈值结果的合理性进行验证;其次,通过计算现场打桩记录反算的土阻力与不同折减系数下计算得到的土阻力之间的弗雷歇距离,对该海域的折减系数进行探讨,并给出有土塞和无土塞工况下折减系数的推荐值。研究结果可为桩基可打入性分析中的土阻力的计算提供借鉴。

关键词: 土阻力; 弗雷歇距离; 桩基可打入性分析; 海上平台; 大直径管桩

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1345-11

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230522003

Method for calculating the soil resistance during offshore pile driving based on Fréchet distance

YIN JIANGSONG, LI SA

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the development of offshore platforms and offshore wind power, the accuracy of pile foundation drivability analysis, which is greatly impacted by soil resistance to driving (SRD), has attracted more and more attention. In SRD analysis, the key is determining the reduction coefficients for end-bearing resistance and shaft resistance. Based on a database that includes 99 pile driving records from 11 offshore platforms, the applicability of the Fréchet distance algorithm in evaluating the similarity between pile driving records was verified, and the threshold of Fréchet distance in the sea area was determined and verified. Then, the Fréchet distance between the calculated SRDs under different reduction coefficients and SRD from the back analysis of pile driving records was calculated, and the recommended values of reduction coefficient were proposed in the cases of soil plug and no soil plug. The results of this study could be helpful for the calculation of SRD in pile drivability analysis.

Keywords: soil resistance; Fréchet distance; pile drivability analysis; offshore platform; large-diameter pipe pile

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51890911)

第一作者简介: 尹蒋松(1993-),男,博士研究生,主要研究海洋土与结构相互作用方面的工作。E-mail: yinjs@tju.edu.cn.

0 引言

桩基的可打入性分析对于桩基设计和现场施工十分重要,其分析结果可以提供锤击数、桩身应力以及打桩时间,这三个参数能够帮助工程人员合理选择桩锤,以便在最短的时间内安装桩基到指定设计深度,同时避免溜桩和拒锤事故的发生^[1-4]。

在进行桩基可打入性分析时,合理确定打桩过程中的土阻力是提高桩基可打入性分析准确度的关键。由于打桩是一个动态过程,打桩过程中的土阻力与打桩结束后的桩基长期承载力有明显差异。近年来,不少学者在桩基承载力计算方法的基础上提出了不同工况下的土阻力的计算方法。Semple等^[5]提出在砂土层中依据《美国石油协会(American Petroleum Institute, API)规范》^[6]中的桩基承载力计算方法来计算土阻力,在黏土层中根据应力历史理论基于黏土的超固结比引入承载力折减因子来计算土阻力。Stevens等^[7]提出在计算土阻力时对于有土塞和无土塞工况应分别考虑上限结果和下限结果。有土塞工况下,土阻力包括桩外壁阻力以及桩端全面积阻力,下限结果为依据API规范计算的桩外壁阻力与桩端阻力之和,上限结果为提高了30%的桩外壁阻力和提高了50%的桩端阻力之和;无土塞工况下,土阻力包括桩内壁阻力、桩外壁阻力以及桩端环面积阻力,无土塞的下限结果中假定桩内壁阻力为外壁阻力的一半,上限结果则假定内壁阻力等于外壁阻力。此外,Stevens还提出了对于低质量岩石采用砂土参数计算土阻力,对于高质量岩石依据无侧限抗压强度计算桩端土阻力,桩侧土阻力依然依据砂土参数计算。

API规范中的承载力依据各个土层的室内试验参数计算,诸如黏性土的不排水抗剪强度或者砂土的摩擦角。不少学者也提出了依据静力触探试验(Cone Penetration Test, CPT)参数计算土阻力的方法。基于北海的大直径管桩现场打桩记录,Alm等^[8]提出了考虑侧阻退化的,依据CPT试验的锥尖土阻力计算方法。在计算无土塞工况下的土阻力时,Alm建议桩内壁阻力和外壁阻力都减小50%,由于大直径管桩直径与壁厚比值很大,导致内壁阻力和外壁阻力差异很小,因此可以近似为无土塞工况下只考虑外壁阻力,不考虑内壁阻力。Prendergast等^[9]在3个基于CPT的桩基承载力计算方法(ICP-05^[10], UWA-05^[11], Furgo-05^[12])的基础上,提出了考虑桩基恢复和基底残余应力的土阻力计算

方法。

上述成果都是根据现场的数据采用半理论半经验的方法获得的。桩基沉桩过程中土阻力的不同会导致桩基可打入性结果的不同^[13-14],同时打桩过程中的土阻力随深度变化曲线可以利用现场打桩记录的反分析结果获得。为充分利用现场测试数据,本文提出采用曲线相似度计算方法,获得打桩过程中土阻力与桩基承载力之间的关系。

曲线相似度计算方法分为等长曲线相似度计算方法和不等长曲线相似度计算方法。在进行等长曲线相似度计算时,可以将具有 n 个点的曲线看作 n 维欧氏空间上的一个点,利用空间点之间的距离公式计算相似度。常见的距离公式包括欧式距离^[15]、曼哈顿距离^[16]、切比雪夫距离^[17]等;不等长曲线相似度计算包括豪斯多夫距离^[18]、弗雷歇距离^[19-20]、动态时间弯曲距离^[21]等。其中,弗雷歇距离在工程应用上的适用性已得到证明,诸如通过对各种铁路道岔故障曲线的分析进行道岔故障诊断^[19],通过对海上目标轨迹历史曲线和研究曲线的相似度计算进行目标轨迹的预测^[20]。

为了验证弗雷歇距离算法在土阻力推荐方法中的适用性,本文基于某海域11个平台99根桩的打桩数据库,计算了不同折减系数条件下的土阻力与根据打桩记录反算得到的土阻力之间的弗雷歇距离,对利用弗雷歇距离获得土阻力的方法进行了探讨,并给出了所研究海域的土阻力折减系数的推荐值。该研究可为工程实际土阻力的计算提供借鉴。

1 桩基可打入性分析方法

桩基的可打入性分析通常是指在现场的沉桩工作之前,基于已有的地质资料和桩锤资料采用波动方程的方法,对于未来实际打桩过程的模拟工作。输出的内容主要包括锤击数随深度的变化情况,打桩时间,桩身的拉、压应力等^[22-23]。

在采用波动方程的方法进行分析时,需要确定桩的参数(桩身尺寸,桩身材料),锤的参数(锤型,冲程,锤效,锤垫和替打)以及土的参数。其中桩的参数是已知的,锤的参数除了锤效也都已知,海上打桩常常采用液压锤进行施工,可打入性分析时一般取90%锤效。不确定性最大的是土的参数,主要包括土阻力、弹限和阻尼。计算土阻力时往往需要通过前期的钻孔取样或者现场原位试验(例如CPT试验或者标准贯入试验)确定,计算结果存在很大的不确

定性。

1.1 桩基承载力计算方法

在进行桩基可打入性动力分析之前,需要先根据土力学理论计算其静阻力,即桩基的长期静承载力,以下简称桩基承载力。桩基承载力一般通过 API 规范中的计算方法获得^[6]。计算如下所示:

$$Q_u = Q_s + Q_b = \pi D \int \tau_f dz + A_b q_b \quad (1)$$

式中: Q_u 为桩基长期承载力(kN); Q_s 、 Q_b 分别为桩侧和桩端承载力(kN); D 为桩端直径(m); τ_f 为沿桩身分布的单位面积侧摩阻(kPa); z 为沉桩深度(m); A_b 为桩端面积(m²); q_b 为单位面积端阻(kPa)。

对于黏性土,桩基的单位面积侧摩阻 τ_f 的计算公式为:

$$\tau_f = \alpha S_u \quad (2)$$

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.5}, \psi \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.25}, \psi > 1.0 \quad (4)$$

$$\psi = S_u / \sigma'_{v0} \quad (4)$$

式中: α 为无量纲系数,且 $\alpha \leq 1.0$; S_u 为黏性土的不排水抗剪强度(kPa); σ'_{v0} 为土体的有效上覆压力(kPa)。

黏性土中的桩基单位面积端阻 q_b 的计算公式为:

$$q_b = 9S_u \quad (5)$$

非黏性土中的桩基单位面积侧摩阻 τ_f 的计算公式为:

$$\tau_f = K \sigma'_{v0} \tan \delta \leq \tau_{f, \max} \quad (6)$$

式中: K 为横向地基压力系数,也就是水平与竖向有效正应力之比,对于开口打入管桩, K 的取值为 0.8,对于闭口打入桩, K 取值为 1.0; δ 为桩壁和非黏性土之间的摩擦角; $\tau_{f, \max}$ 是单位面积侧摩阻极限值(kPa),该值与非黏性土类别和密实度有关,可根据桩土摩擦角按经验取值。

非黏性土的桩基单位面积端阻 q_b 的计算公式为:

$$q_b = N_q \sigma'_{v0} \leq q_{b, \max} \quad (7)$$

式中: N_q 是无量纲支撑系数; $q_{b, \max}$ 是单位面积端阻极限值(kPa),两者可根据桩土摩擦角按经验取值。

对于打桩土阻力的计算,存在无土塞和有土塞两种工况,本文采取 Alm 等^[8]的建议方法:对于无土塞工况,土阻力为桩外壁阻力和桩端环面积阻力之和;对于有土塞工况,土阻力为桩外壁阻力和桩端

全面积阻力之和。

1.2 土阻力计算方法

打桩过程中的土阻力与长时间停锤之后的桩基长期承载力 Q_u 之间可以用一个损失系数 f_{RD} 来表示:

$$SRD = f_{RD} \cdot Q_u \quad (8)$$

式中: SRD 是打桩过程的土阻力(kN); Q_u 是桩基的长期承载力(kN); f_{RD} 是土阻力相对承载力的损失系数,无量纲。

基于波动方程的桩基可打入性分析方法中,需要确定损失系数 f_{RD} ,其由两部分组成:一部分是控制土阻力相对承载力绝对变化的土阻力折减系数 f_{GL} ;另一部分是控制不同土层之间土阻力损失相对变化的土层恢复系数 f_s 。对于土阻力折减系数 f_{GL} ,其代表整个打桩过程中土阻力相对承载力的整体折减。但是由于施工现场沉桩往往不止贯入一个土层,不同土层之间土体的土阻力折减比例并不相同,因此引入了土层恢复系数 f_s ,代表不同土层未扰动情况下的强度与完全扰动情况下的强度的比值。对于黏性土,该值与土的灵敏度相关。

损失系数 f_{RD} 与土阻力折减系数 f_{GL} 、土层恢复系数 f_s 的关系如下:

$$f_{RD} = (1 - f_s^* + f_s^* \cdot f_{GL}) \quad (9)$$

式中: f_s^* 为该土层相对最敏感土层的相对土层恢复系数,计算公式如下所示:

$$f_s^* = \frac{1 - \frac{1}{f_s}}{1 - \frac{1}{f_{sx}}} \quad (10)$$

式中: f_s 为该土层的土层恢复系数; f_{sx} 为最敏感土层的土层恢复系数。

以上公式同样适用于单一土层情况,即 $f_{sx} = f_s$ 的情况,此时 $f_s^* = 1$, $f_{RD} = f_{GL}$,与前文所说的单土层结果一致。

在计算过程中,土阻力折减系数 f_{GL} 目前没有推荐值,需要由工程师根据经验进行取值。

由于打桩过程中的土阻力由侧阻和端阻两部分组成,因此土阻力折减系数 f_{GL} 涉及侧阻折减和端阻折减两个部分,而侧阻和端阻这两个折减系数并不相同。例如,Stevens 等^[7]对于黏土侧摩推荐的折减系数为 0.5,而端阻不折减,即端阻的折减系数为 1.0。因此一个土阻力结果往往需同时获得两个不同的折减系数,这就使得确定 f_{GL} 的难度很大。

2 弗雷歇距离方法原理

弗雷歇距离也被称为狗绳距离^[17],即若人的行走路径为 A ,狗的行走路径为 B ,两者走完各自路径所需的最短狗绳长度即为弗雷歇距离。如图 1 所示,情境一和情境二分别代表两组不同的人、狗速度, A 和 B 分别代表人和狗的路径,虚线代表不同时刻的狗绳长度, $D_A - D_B$ 和 $E_A - E_B$ 线段长度分别代表图 1 的两种情境下人、狗走完各自路径所需的最短狗绳长度。通过改变人和狗各自的速度,可以得到不同情境下的人狗走完全部路径所需的最短狗绳长度,在所有情境下的最短狗绳长度的最小值即为人狗路径的弗雷歇距离。图 1 中的 $D_A - D_B$ 线段相比 $E_A - E_B$ 线段更短,更接近弗雷歇距离。

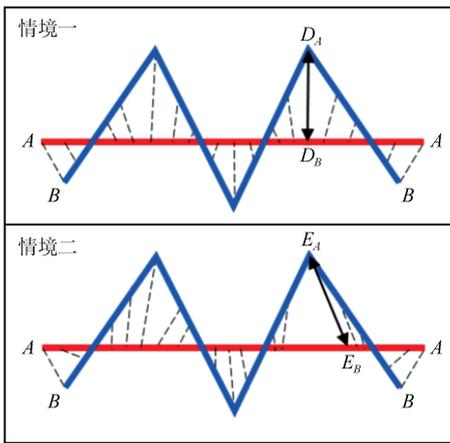


图 1 弗雷歇距离原理图

Fig.1 Schematic diagram of Fréchet distance

弗雷歇距离的数学表达形式为:

$$F(A, B) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} \{d\{A[\alpha(t)], B[\beta(t)]\}\} \quad (11)$$

式中: A 和 B 是度量空间 S 中的两条曲线; $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 分别是运动位置的描述函数; $A[\alpha(t)]$ 和 $B[\beta(t)]$ 分别是在 t 时刻 A 曲线上人和 B 曲线上狗的位置; d 是 S 上的度量函数,这里表示狗绳长度,那么 A 和 B 之间的弗雷歇距离 $F(A, B)$ 就被定义为在 $t \in [0, 1]$ 区间内最长狗绳长度的下确界,也就是任意一对 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$,总能找到最长的狗绳长度,而改变 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 使得最长的狗绳长度最小,这时的狗绳长度就是弗雷歇距离。利用弗雷歇距离可以对两条曲线的相似度进行判别。

3 弗雷歇距离方法适用性

为了说明弗雷歇距离算法在桩基打桩记录曲线

相似度识别上的适用性,首先运用该算法计算了某海域相同海上平台和不同平台的打桩记录的曲线相似度。选择的两个平台的工程概况如下所示。

平台 9 和平台 3 属于同一海域,两平台之间的直线距离为 68 km。其中,平台 9 的桩基由 8 根桩组成,桩径为 2.438 m,桩长为 124.1 m,设计入泥深度为 101 m,由 MHU 800S 液压冲击锤贯入;平台 3 的桩基由 12 根桩组成,桩径为 2.438 m,桩长为 121.3 m,设计入泥深度为 98 m,由 MHU 1200S 液压冲击锤贯入。两平台现场均进行了 CPT 试验,两平台通过 CPT 试验得到的锥尖阻力随深度变化如图 2 所示。

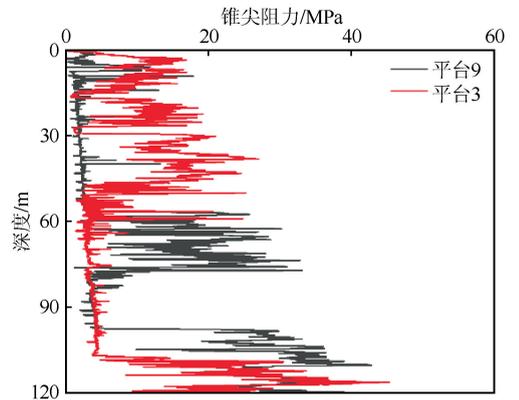


图 2 平台 9 和平台 3 CPT 试验锥尖阻力图

Fig.2 Cone tip resistance for platform 9 and platform 3 from CPT test

由图 2 可以看出,两平台除 0~20 m 以及 80~100 m 处土体的锥尖阻力较为接近之外,其他深度处土体的锥尖阻力均存在较大差异,由此可以推断出两平台桩基下的土阻力随深度曲线也存在较大差异。从平台 9 和平台 3 的桩基中各抽取两根桩,根据打桩记录反分析结果得到上述 4 根桩的土阻力随深度变化曲线如图 3 所示。

从图 3 中可以得到,平台 9 的桩 1 和桩 2 之间,平台 3 的桩 1 和桩 2 之间曲线的走向趋势存在很大的相似性。相反,平台 9 的两根桩和平台 3 的两根桩之间相似度不高。采用上一章节提到的弗雷歇距离计算方法得到上述 4 根桩之间的弗雷歇距离结果如图 4 所示。

其中桩 1、2 取自同一平台,桩 3、4 取自另一平台。4 根桩的打桩记录相互之间的弗雷歇距离计算结果在 0~52 之间,其中同一根桩的打桩记录的相似度是 100%,体现在图 4 中就是 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 的弗雷歇距离均为 0。弗雷歇距离越大,表明两个曲线的相似度越低,图 4 中来自同一平台的桩

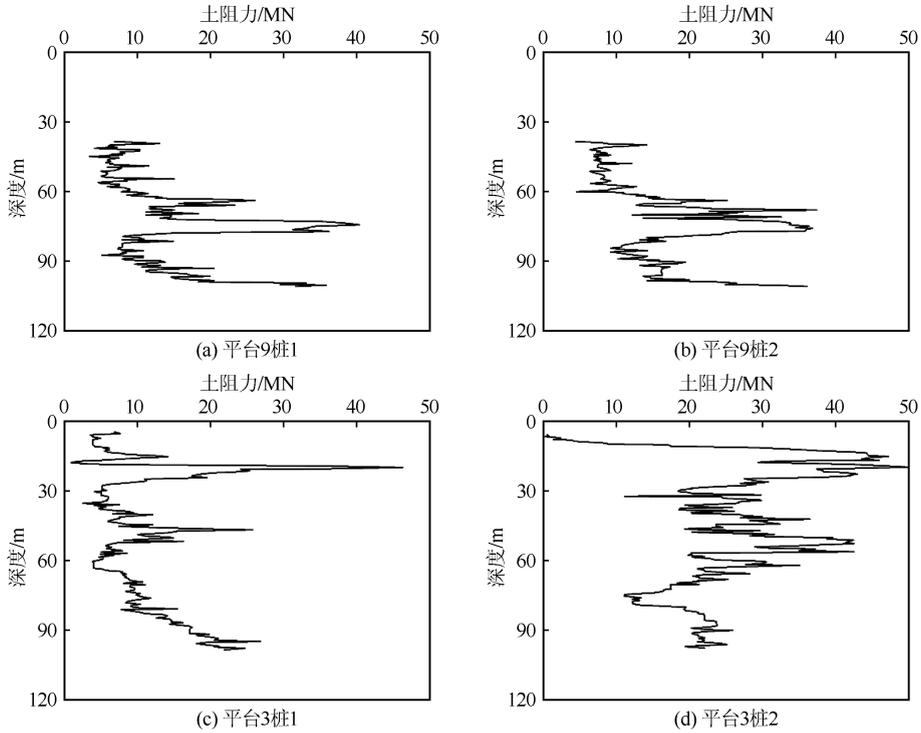


图 3 同一平台和不同平台打桩记录反算土阻力随深度变化图

Fig.3 Variation of soil resistance with depth inferred from the piling records of the same and different platforms

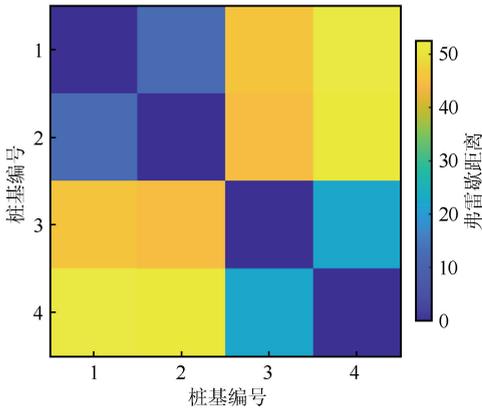


图 4 曲线相似度计算结果示例

Fig.4 Example of curve similarity calculation

(1—2,3—4) 弗雷歇距离均在 25 以下,而不同平台的桩的弗雷歇距离均在 40 以上,十分符合实际的工程情况,证明了弗雷歇距离算法在对这 4 根桩归属平台上的判别的准确性。

以上 4 根桩的结果说明设定弗雷歇距离阈值为 25~40 均可合理划分不同桩的平台归属,为了明确该海域 11 个平台 99 根桩的弗雷歇距离阈值,对这 99 根桩进行计算。11 个平台的工程背景汇总概况如表 1 所列。从表 1 可以看出,11 个平台的桩基桩径只有 2.134 m 和 2.438 m 两种情况;桩长汇总为 99~124.1 m;设计入泥深度汇总为 77~101 m;锤型包括三种,分别为 IHC S-500 液压冲击锤、MHU 800S 液压冲

表 1 11 个平台工程背景汇总表

Table 1 Summary of engineering backgrounds of 11 offshore platforms

编号	桩径/m	桩长/m	设计入泥深度/m	锤型	桩基数量	最终锤效/%	总锤击能量/MJ
平台 1	2.134	99	80	IHC S-500	8	87~98	1 635~2 444
平台 2	2.134	121	99	IHC S-500	12	76~90	796~2 426
平台 3	2.438	121.3	98	MHU 1200S	12	75~85	1 887~6 124
平台 4	2.134	100.2	77	MHU 1200S	12	75~85	2 265~6 451
平台 5	2.438	117.6	96	MHU 800S	12	42~70	509~1 253
平台 6	2.134	102.5	85	MHU 800S	8	76~89	1 197~1 577
平台 7	2.134	99.7	80	IHC S-500	8	80~94	659~917
平台 8	2.134	104	85	IHC S-500	8	65~85	822~1 030
平台 9	2.438	124.1	101	MHU 800S	8	63~87	1 919~2 388
平台 10	2.134	110.2	90	MHU 800S	8	80~88	903~1 274
平台 11	2.134	99.7	99	MHU 800S	3	50~70	1 072~1 480

击锤、MHU 1200S 液压冲击锤；桩基数量为 8 或 12 (平台 11 为特殊情况只有 3 根桩)；锤效分布为 42%~98% 不等；总锤击能量分布为 659~6 451 MJ 不等。

为了验证上述阈值在新数据上的适用性,采用机器学习中的划分训练集和测试集的方法,将平台 10 和平台 11 的数据作为测试集,没有用于确定阈值。平台 1~9 的同一平台打桩记录数据进行了 404 次计算,不同平台打桩记录数据进行了 3 424 次计算。隶属于同一平台和不同平台的桩基弗雷歇距离统计情况分别如图 5、6 所示。

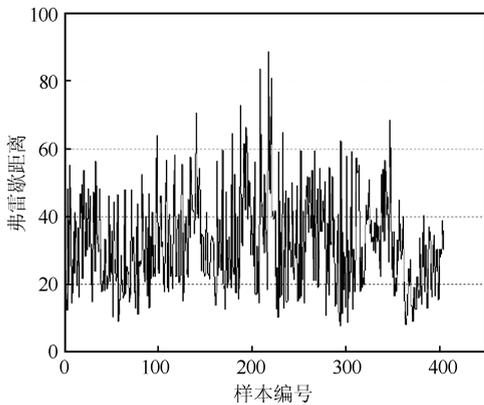


图 5 同一平台桩基的弗雷歇距离统计结果

Fig.5 Fréchet distance results of pile foundations on the same platform

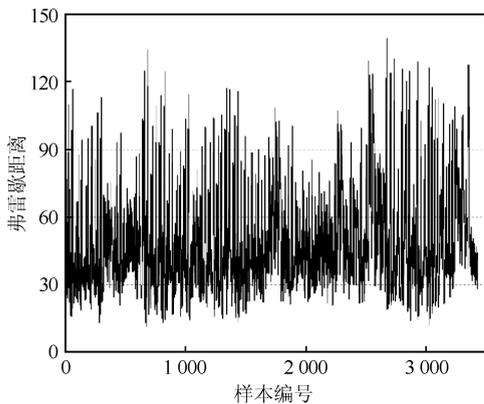


图 6 不同平台桩基的弗雷歇距离统计结果

Fig.6 Fréchet distance results of pile foundations on different platforms

从图 5、6 中可以看出,同一平台桩基的弗雷歇距离主要集中在 20~60 之间,不同平台桩基的弗雷歇距离集中在 30~80 之间。由于两者之间存在较大的重合区域,无法像图 4 一样可以直观地确定阈值,本文采取了通过分析概率分布的方法确定阈值。对图 5、6 中的数据进行了累积概率分布的计算,计算结果如图 7 所示。

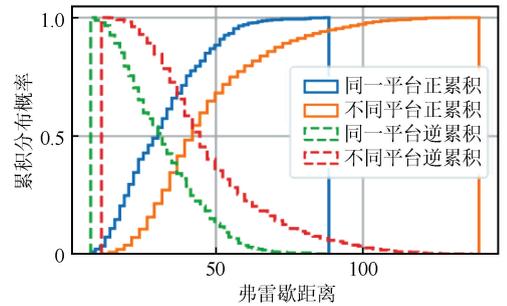


图 7 同一平台和不同平台桩基弗雷歇距离累积概率分布图

Fig.7 Cumulative probability distribution of Fréchet distance of pile foundations on the same and different platforms

为了确定合理的阈值从而确保依据阈值划分的同平台、不同平台桩基划分结果最佳,这里阈值的确定需要同时考虑同平台、不同平台的累积分布曲线。具体来说,就是该阈值能使该弗雷歇距离对应的同一平台正累积概率和不同平台逆累积概率之和最大。依据图 7 的结果,阈值的位置确定在 32 处,该处的同一平台正累积概率是 56.4%,不同平台逆累积概率是 75.8%。也就是将 32 作为弗雷歇距离的阈值,同一平台的准确率为 56.4%,不同平台的准确率为 75.8%,平均准确率为 66.1%。

上述阈值结果是基于已有的数据统计出来的,为了验证该数据在新平台上的适用性,对平台 10、11 的打桩记录数据进行了弗雷歇距离计算,并依据阈值 32 进行了分类,与实际结果进行了比较,计算结果如表 2 所列。从表 2 中可以看出,同一平台的桩基隶属划分准确率高达 100%,相应的不同平台划分准确率为 70.8%,总体准确率为 87.3%。弗雷歇距离阈值在新样本集上的表现是可以接受的,甚至比训练集上的更好。

表 2 平台 10 和平台 11 的分类结果

Table 2 Classification results for platform 10 and platform 11

		实际结果		累积
		同一平台	不同平台	
预测结果	同一平台	31	7	38
	不同平台	0	17	17
累积		31	24	55

4 弗雷歇距离用于土阻力折减系数推荐

弗雷歇距离方法可以用来确定桩基的相似度,进而获得桩基承载力的折减系数。在确定桩基的相似度中,具体的方法为:

(1) 有土塞和无土塞工况下都对桩基的桩侧折减系数和桩端折减系数从 0.1 到 1.0,按 0.1 增量计算 10×10 共计 100 次可打入性结果,两个工况共得到 200 条桩基的土阻力随深度变化曲线。

(2) 各个工况下比较实际的打桩记录和可打入性结果,计算两者之间的弗雷歇距离,弗雷歇距离最小者对应的可打入性结果即为最接近实际打桩记录的结果,其对应的折减系数也就是该工况下推荐的折减系数。

以该海域平台 9 桩 1 为例,桩 1 的 100 个有土塞和 100 个无土塞可打入性结果与桩 1 的实际打桩记录之间的弗雷歇距离结果如图 8 所示。如前所述,为了表述清楚,按折减系数(1.0,1.0)至(1.0,0.1)从 1 到 10 编号,以此类推直到(0.1,0.1)编号为 100,折减系数编号和对应的侧、端部折减系数对应

情况如表 3 所列。

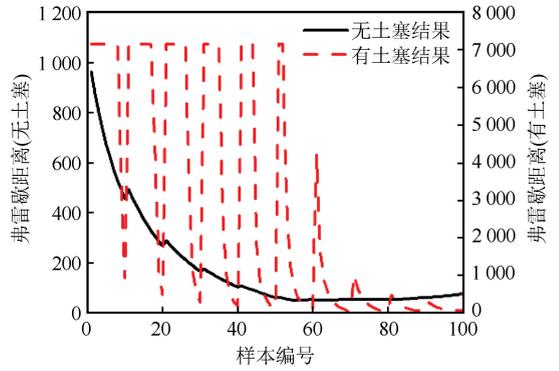


图 8 平台 9 桩 1 的打桩记录与不同折减系数可打入性预测结果之间的弗雷歇距离结果

Fig.8 Fréchet distance between the pile driving record and pile drivability prediction using different reduction coefficients for pile 1 in platform 9

表 3 折减系数编号和侧,端部折减系数的对应关系

Table 3 Correspondence between the number of reduction coefficients and those at side and end

折减系数编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
侧、端部折减系数	1.0,1.0	1.0,0.9	1.0,0.8	1.0,0.7	1.0,0.6	1.0,0.5	1.0,0.4	1.0,1.2	1.0,0.3	1.0,0.1
折减系数编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
侧、端部折减系数	0.9,1.0	0.9,0.9	0.9,0.8	0.9,0.7	0.9,0.6	0.9,0.5	0.9,0.4	0.9,0.3	0.9,0.2	0.9,0.1
折减系数编号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
侧、端部折减系数	0.8,1.0	0.8,0.9	0.8,0.8	0.8,0.7	0.8,0.6	0.8,0.5	0.8,0.4	0.8,0.3	0.8,0.2	0.8,0.1
折减系数编号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
侧、端部折减系数	0.7,1.0	0.7,0.9	0.7,0.8	0.7,0.7	0.7,0.6	0.7,0.5	0.7,0.4	0.7,0.3	0.7,0.2	0.7,0.1
折减系数编号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
侧、端部折减系数	0.6,1.0	0.6,0.9	0.6,0.8	0.6,0.7	0.6,0.6	0.6,0.5	0.6,0.4	0.6,0.3	0.6,0.2	0.6,0.1
折减系数编号	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
侧、端部折减系数	0.5,1.0	0.5,0.9	0.5,0.8	0.5,0.7	0.5,0.6	0.5,0.5	0.5,0.4	0.5,0.3	0.5,0.2	0.5,0.1
折减系数编号	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
侧、端部折减系数	0.4,1.0	0.4,0.9	0.4,0.8	0.4,0.7	0.4,0.6	0.4,0.5	0.4,0.4	0.4,0.3	0.4,0.2	0.4,0.1
折减系数编号	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
侧、端部折减系数	0.3,1.0	0.3,0.9	0.3,0.8	0.3,0.7	0.3,0.6	0.3,0.5	0.3,0.4	0.3,0.3	0.3,0.2	0.3,0.1
折减系数编号	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
侧、端部折减系数	0.2,1.0	0.2,0.9	0.2,0.8	0.2,0.7	0.2,0.6	0.2,0.5	0.2,0.4	0.2,0.3	0.2,0.2	0.2,0.1
折减系数编号	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
侧、端部折减系数	0.1,1.0	0.1,0.9	0.1,0.8	0.1,0.7	0.1,0.6	0.1,0.5	0.1,0.4	0.1,0.3	0.1,0.2	0.1,0.1

从图 8 中可以看出,基于无土塞假定下的可打入性结果与实际打桩记录的弗雷歇距离随编号的变大(表现为随整体土阻力的减小)而减小,变化趋势相对较缓和,其中最小的弗雷歇距离为 49.02,对应的折减系数编号是 55,对应的折减系数情况是侧部折减系数 0.5,端部折减系数 0.6;基于有土塞假定的可打入性结果与实际打桩记录之间的弗雷歇距离随编号的变化存在周期性的波动,其原因在于有土塞的端部土阻力占比相对无土塞更大,从而有土塞的总土阻力也会随着编号存在周期性的变化。如图 9 所示,土阻力和弗雷歇距离随折减系数编号的变化

趋势是完全一致的。图 9 中有土塞弗雷歇距离最小值为 50.06,对应的折减系数编号是 70,表示侧部折减系数为 0.4,端阻折减系数为 0.1。具体来说,无土塞中折减系数编号 55 对应的侧部土阻力为 34.1 MN,端部土阻力为 2.8 MN,总土阻力为 36.9 MN。有土塞折减编号 70 对应的侧部土阻力为 27.3 MN,端部土阻力为 4.5 MN,总土阻力为 31.8 MN,比无土塞的总土阻力小 13.8%,两者总土阻力差异不大。

为了研究弗雷歇距离与土阻力关系,得到弗雷歇距离随土阻力的变化情况如图 10 所示。根据反分析结果得知,该算例在打桩结束时的土阻力为

31.7 MN,从图 10 可以看出,当土阻力与现场土阻力最为吻合时,弗雷歇距离最小。

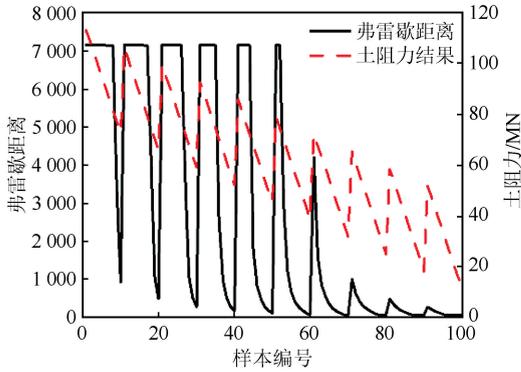


图 9 有土塞弗雷歇距离和土阻力随折减系数编号的变化图

Fig.9 Variation of Fréchet distance and soil resistance with reduction coefficient number in the case of soil plug

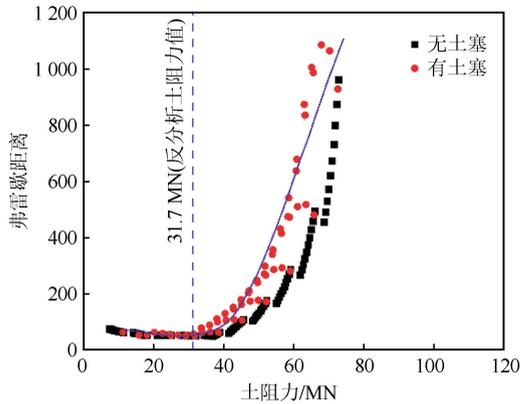


图 10 平台 9 桩 1 弗雷歇距离随土阻力变化图

Fig.10 Fréchet distance variation with soil resistance for pile 1 in platform 9

依据对平台 9 桩 1 的处理方式,对于平台 9 剩下的 7 根桩做了相同计算处理,计算结果如图 11 所示。考虑到有土塞和无土塞是人为确定的两种情况,且对于同一位置,打桩的土阻力只存在一个数值,因此选择采用两种工况得到的土阻力结果接近且出现频率较高的情况作为该平台的折减系数,统计结果见表 4。

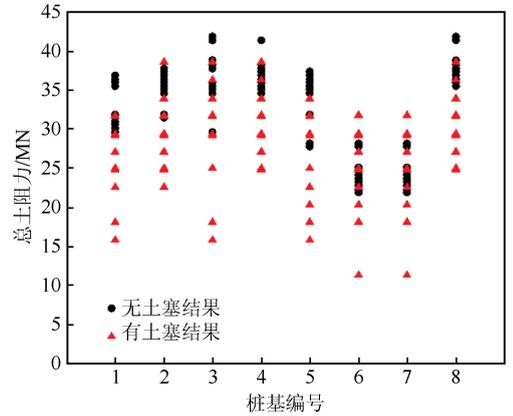


图 11 平台 9 上 8 根桩的 10 个最小弗雷歇距离

Fig.11 10 minimum results for Fréchet distance of 8 piles in platform 9

依据上述方法,对其余 10 个平台的现场实测打桩记录和可打入性结果之间的弗雷歇距离进行计算,无土塞和有土塞的汇总结果分别如图 12、13 所示。从图 12 可以看出,无土塞工况下,除了平台 5、7,其余平台的折减系数编号集中在 55 附近;图 13 中,有土塞工况下的结果相对无土塞更集中,除了平台 7 以外,其他 10 个平台的数据主要都集中在

表 4 平台 9 所有桩基折减系数汇总结果

Table 4 Summary of reduction coefficients for all pile foundations in platform 9

无土塞				有土塞			
折减系数编号	折减系数	总土阻力/MN	出现频率/%	折减系数编号	折减系数	总土阻力/MN	出现频率/%
57	0.5,0.4	36	75	70	0.4,0.1	31.8	100
58	0.5,0.3	35.5	75	79	0.3,0.2	29.4	100
55	0.5,0.6	36.9	62.5	80	0.3,0.1	25	100
56	0.5,0.5	36.4	62.5	96	0.1,0.5	29.2	100
53	0.5,0.8	37.8	50	87	0.2,0.4	31.6	75

折减系数编号 85 附近。即对于该海域,在无土塞工况下,侧摩阻力的折减系数为 0.4~0.6,端阻折减系数范围为 0.4~1.0;有土塞工况下侧摩阻力的折减系数范围为 0.1~0.4,端阻折减系数范围为 0.1~0.6。

得到上述推荐折减系数之后,利用平台 9 的打桩记录反算得到的土阻力随深度曲线对推荐的折减

系数进行验证,验证方法如下所示:

(1) 选择推荐的折减系数上限和下限得到 4 种工况,分别计算 4 种工况下的土阻力随深度变化结果,如表 5 所列(以平台 9 为例)。

(2) 再将每个平台的实际打桩记录反算的土阻力结果与依据上述计算条件得到的土阻力结果相比较,验证上述折减参数是否合理。

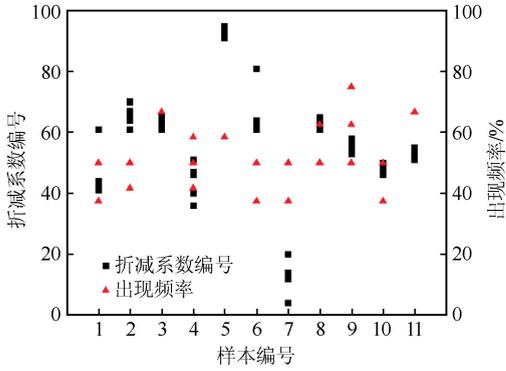


图 12 无土塞工况下 11 个平台汇总结果

Fig.12 Summary of 11 platforms in the case of no soil plug

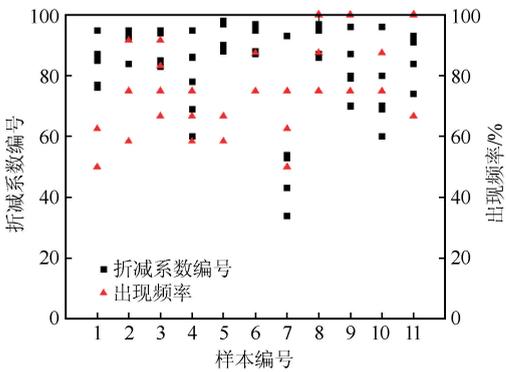


图 13 有土塞工况下不同平台汇总结果

Fig.13 Summary of 11 platforms in the case of soil plug

表 5 各个平台的计算工况

Table 5 Calculation conditions of different platforms

编号	土塞状况	侧部折减系数	端部折减系数
工况 1	无土塞	0.4	0.4
工况 2	无土塞	0.6	1.0
工况 3	有土塞	0.1	0.1
工况 4	有土塞	0.4	0.6

平台 9 的 8 根桩的反算土阻力结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,尽管个别深度部分桩的土阻力在数值上不完全相同,但是整体上平台 9 上 8 根桩的反算土阻力结果具有很好的一致性。

将表 5 中的 4 种工况的计算结果与图 14 中反算土阻力结果比较,比较结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,无土塞工况下,侧部和端部折减系数分别为 0.4/0.4 的土阻力结果与平台 9 上 8 根桩的反算土阻力结果均值更接近;有土塞工况下,侧部和端部折减系数分别为 0.1/0.1 的土阻力结果整体小于实际反算土阻力,也就是计算结果偏危险,该种工况更适合用于预测溜桩等不能高估土阻力的工况;无土塞工况下,侧部和端部折减系数分别为 0.6/1.0

和有土塞工况下,侧部和端部折减系数分别为 0.4/0.6 的土阻力结果整体大于实际反算土阻力,也就是计算结果偏安全。

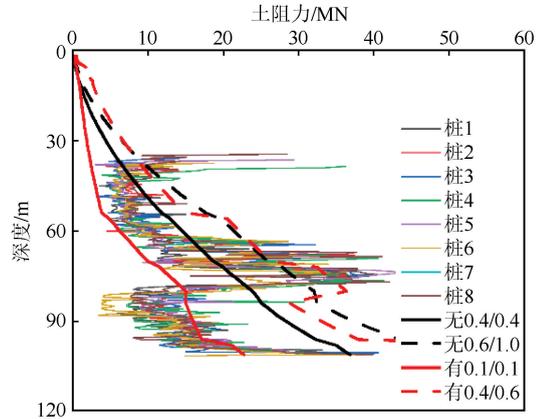


图 14 平台 9 折减系数验证结果

Fig.14 Verification of reduction coefficients for platform 9

综合图 14 的结果可以看出,表 5 推荐的折减系数可为实际工程的折减系数的选取提供借鉴。

5 结语

本文基于弗雷歇距离方法的曲线相似度算法,提出了海上平台沉桩过程中的土阻力折减系数推荐方法,并得出以下结论:

(1) 11 个平台上 99 根桩之间的打桩记录曲线弗雷歇距离的计算结果显示,同平台、不同平台之间的弗雷歇距离结果差异明显。当以弗雷歇距离 32 作为判断是否同一平台的阈值时,9 个平台结果中同一平台的准确率为 56.4%,不同平台的准确率为 75.8%。将该阈值结果应用于剩下 2 个平台时,同一平台的准确率为 100%,不同平台的准确率为 70.8%。利用弗雷歇距离进行曲线相似度判别具有可行性。

(2) 在进行桩基可打入性分析中采用有土塞和无土塞工况,均可获得与现场土阻力接近的结果。尽管在不同的工况下,所采用的折减系数不同,但两者计算得到的打桩过程中的总土阻力数值接近。

(3) 综合所有计算结果,某海域在进行可打入性分析时,无土塞工况下,侧部折减系数范围为 0.4~0.6,端阻折减系数范围为 0.4~1.0;有土塞工况下侧摩阻力的折减系数范围为 0.1~0.4,端阻折减系数范围为 0.1~0.6。

参考文献(References)

[1] 闫澍旺,李嘉,贾召霖,等.海洋石油平台超长桩拒锤分析及工

- 程实例[J].岩土力学,2015,36(增刊2):559-564.
- YAN Shuwang, LI Jia, JIA Zhaolin, et al. Analysis and engineering case of super-long pile refused hammer in offshore oil platform[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Suppl02): 559-564.
- [2] 李飒, 王耀存, 蒲玉成, 等. 海洋平台打桩过程中溜桩对桩基影响的研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 462-467.
- LI Sa, WANG Yaocun, PU Yucheng, et al. Influence of pile sinking on pile capacity during pile driving on offshore platforms[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 462-467.
- [3] BYRNE T, GAVIN K, PRENDERGAST L J, et al. Performance of CPT-based methods to assess monopile driveability in North Sea sands[J]. Ocean Engineering, 2018, 166: 76-91.
- [4] LI S, TIAN Y H, ZHOU Y R, et al. Premature refusal of large-diameter, deep-penetration piles on an offshore platform[J]. Applied Ocean Research, 2013, 42: 55-59.
- [5] SEMPLE R M, GEMEINHARDT J P. Stress history approach to analysis of soil resistance to pile driving[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, Texas: [s.n.], 1981: 165-172.
- [6] American Petroleum Institute. WSD Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design (21st ed.) [S]. USA: American Petroleum Institute, 2005.
- [7] STEVENS R S, WILTSIE E A, TURTON T H. Evaluating drivability for hard clay, very dense sand, and rock[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, Texas: [s.n.], 1982: 465-481.
- [8] ALM, T, HAMRE L. Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations[C]// Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul: [s.n.], 2001: 27-31.
- [9] PRENDERGAST L J, GANDINA P, GAVIN K. Factors influencing the prediction of pile driveability using CPT-based approaches[J]. Energies, 2020, 13(12): 3128.
- [10] JARDINE R, CHOW F, OVERY R, et al. ICP design methods for driven piles in sands and clays[M]. London: Thomas Telford, 2005.
- [11] LEHANE B M, SCHNEIDER J A, XU X. Development of the UWA-05 design method for open and closed ended driven piles in siliceous sand[C]//Proceedings of the Contemporary Issues in Deep Foundations. Denver, Colorado, USA: American Society of Civil Engineers, 2007: 1-10.
- [12] KOLK H J, BAAIJENS A E, SENDERS M. Design criteria for pipe piles in silica sands[C]// Proceedings of the First International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Taylor, Francis, London: Press of University of Western Australia, 2005: 711-716.
- [13] 李飒, 吴兴州, 王耀存, 等. 打桩过程中考虑溜桩影响的土阻力研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1150-1157.
- LI Sa, WU Xingzhou, WANG Yaocun, et al. Soil resistance to driving considering effect of pile running on pile installation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1150-1157.
- [14] QIN W, CAI S Y, DAI G L, et al. Soil resistance during driving of offshore large-diameter open-ended thin-wall pipe piles driven into clay by impact hammers [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 153: 105085.
- [15] 党倩, 崔阿军, 高闻博, 等. 采用欧式形态距离的负荷曲线近邻传播聚类方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 165-176.
- DANG Qian, CUI Ajun, SHANG Wenbo, et al. Affinity propagation clustering method of typical load curve with euclidean morphological distance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(1): 165-176.
- [16] 胡涛, 任仙怡, 张基宏. 高分辨率 PCB 裸板图像轮廓快速 DP 曲线抽稀[J]. 光电工程, 2013, 40(7): 83-88.
- HU Tao, REN Xianyi, ZHANG Jihong. A fast DP polyline simplification algorithm for high-resolution PCB bare board image contours[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(7): 83-88.
- [17] 黎佳, 陈元坤, 陈晓强, 等. 基于切比雪夫网格的自由曲面网格自适应及杆长优化[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(3): 91-95, 102.
- LI Jia, CHEN Yuankun, CHEN Xiaoqiang, et al. Adaptive and length optimization research on free-form surface grid generation based on Chebyshev net[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(3): 91-95, 102.
- [18] 刘冠兰, 徐亚明, 柏文峰. 地铁隧道断面变形分析方法研究[J]. 测绘通报, 2016(2): 103-106, 135.
- LIU Guanlan, XU Yaming, BAI Wenfeng. A method to determine the deformation of tunnel section[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(2): 103-106, 135.
- [19] 黄世泽, 陈威, 张帆, 等. 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1690-1695.
- HUANG Shize, CHEN Wei, ZHANG Fan, et al. Method of turnout fault diagnosis based on Fréchet distance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(12): 1690-1695.
- [20] 赵一鉴, 林利, 王茜蓓, 等. 基于大地距离计算相似度的海上目标轨迹预测[J]. 计算机应用, 2023, 43(11): 3594-3598.
- ZHAO Yijian, LIN Li, WANG Xiqian, et al. Trajectory prediction of sea targets based on geodetic distance similarity calculation[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(11): 3594-3598.
- [21] 李映辉, 钟平安, 钱睿智, 等. 基于动态时间弯曲算法的相似洪水识别方法[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 51-55.
- LI Yinghui, ZHONG Ping'an, QIAN Ruizh, et al. Similar flood recognition method based on dynamic time warping algorithm [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 51-55.