引用格式:赵经彤,王兴洋,崔春义,等. 高桩码头结构安全性评价的本体知识协同表征方法[J]. 大连海事大学学报,2026,52(3):105-115.

高桩码头结构安全性评价的本体知识协同表征方法

赵经彤[1a],王兴洋[1a],崔春义*[1a,1b],季则舟[2],袁立莎[2],侯　亮[3]
(1. 大连海事大学 a.交通运输工程学院;b.港口与航运安全协同创新中心,辽宁 大连　116026;
2. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,天津　300220;3. 大连金帝建设工程有限公司,辽宁 大连　116000)

摘要:针对在役高桩码头结构安全评价过程中可靠指标、分级规则与评价结果难以统一组织与协同表达的问题,本文提出一种基于本体知识库的结构安全性评价知识协同表征方法。该方法以结构整体可靠度分析为定量基础,将工程对象、荷载工况、可靠指标、安全等级和判定规则进行语义化建模,构建高桩码头安全评价本体知识库 OntoPWSE(Ontology for Piled Wharf Safety Evaluation),并利用 SWRL 规则和 SQWRL 查询实现安全等级的自动推理与结果检索。选取某服役 10 年的集装箱高桩码头作为实例进行验证。结果表明:该码头在水平荷载作用下整体可靠指标为 3.2746,对应安全等级 B 级;OntoPWSE 本体知识库能够实现安全评价结果的结构化组织、规则化推理和知识图谱化表达。研究结果可为在役高桩码头结构安全评价知识的协同表征与信息化管理提供方法支撑。

关键词:高桩码头结构;整体可靠度;本体知识库;安全等级;结构安全评价

中图分类号:U656.1　　**文献标志码**:A

文章编号:1006-7736(2026)03-0105-11

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.03.010

An ontology-based holistic knowledge representation method for the safety evaluation of piled wharf structures

Zhao Jingtong[1a], Wang Xingyang[1a], Cui Chunyi*[1a,1b], Ji Zezhou[2], Yuan Lisha[2], Hou Liang[3]
(1a. *College of Transportation Engineering*; 1b. *Center of Ports and Maritime Safety*, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China; 3.Dalian Jindi Construction Engineering Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract:To address the difficulty in uniformly organizing and holistically representing reliability indices, grading rules, and evaluation results in the safety assessment of in-service piled wharf structures, this paper proposed an ontology knowledge base approach for the holistic representation of structural safety evaluation knowledge. Taking the structural global reliability analysis as the quantitative foundation, and semantically models engineering objects, load conditions, reliability indices, safety grades, and judgment rules, constructed the OntoPWSE (Ontology for Piled Wharf Safety Evaluation) knowledge base for piled wharf safety assessment, and achieved automatic reasoning for safety levels and result retrieval by using SWRL rules and SQWRL queries. A 10-year-old in-service container piled wharf was selected as an example for verification. The results show that the global reliability index of the wharf under horizontal loads is 3.2746, corresponding to safety grade B. The OntoPWSE ontology knowledge base can realize the structured organization, rule-based reasoning and knowledge-graph-based representation of structural safety evaluation results. The proposed method can provide methodological support for the holistic representation and information-based management of safety evaluation knowledge for in-service piled wharf structures.

Key words: piled wharf structure; global reliability; ontology knowledge base; safety grade; structural safety evaluation

收稿日期:2026-04-02;**修回日期**:2026-06-01

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2601102);国家自然科学基金面上项目(52478329);沈阳市工程结构安全评估与防控重点实验室项目(S230184)

作者简介:赵经彤(1995—),男,博士生,E-mail: zhaojingtong0811@163.com;崔春义*(1978—),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: cuichunyi@dlmu.edu.cn

0 引 言

高桩码头是港口工程中应用广泛的结构形式,具有服役周期长、受海洋环境作用显著、荷载作用复杂等特点。在长期运营过程中,受结构材料性能衰减、地基土参数演化,以及靠船荷载、堆载与环境作用的共同影响,高桩码头结构安全储备将随时间发生变化。对于已建成并投入运营的高桩码头,如何合理表征结构体系的实际承载能力,并据此开展安全等级判定,是港口工程运维阶段亟需解决的重要技术问题。

在工程结构安全评价领域,可靠性理论可将材料、荷载、尺寸、计算模型等各类不确定因素统一纳入概率分析框架,现已成为量化表征结构安全储备的重要理论工具[1]。围绕高桩码头结构可靠性评价,现有研究形成了两条较为明晰的技术思路。第一类研究从构件层面入手,通过构件损伤程度、构件重要性系数与系统失效模式,实现整体结构状态表征。例如,何林丹等[2]考虑材料退化与荷载时变效应,建立高桩码头桩基、横梁、面板等关键构件的时变可靠度分析框架,揭示主要参数对构件可靠度演化的影响;李声文等[3]利用 ANSYS 概率设计模块,对高桩墩式码头开展可靠度分析,并探讨了关键随机变量对结构可靠指标的影响;Su 等[4]基于扰动能方法,分析构件损伤、整体刚度退化与不同荷载工况共同作用下高桩码头结构的安全状态及失效路径,进一步说明局部构件损伤将改变结构整体安全性能。另一类研究则以结构整体极限承载力表征体系抗力,通过建立随机功能函数,实现整体可靠指标的直接求解。例如,王浩天等[5]通过参数化数值模型提取不同失效模式下的水平极限承载力,并将水平极限承载力与船舶撞击力分别等效为极限状态方程中的抗力与荷载效应,采用 JC 法求解高桩码头整体可靠指标;Jiang 等[6]针对板桩码头,提出了结合虚拟支撑梁模型与人工智能算法的综合可靠度分析模型,为复杂码头结构可靠度快速分析提供了参考;Yin 等[7]针对滨海软土中桩基水平承载与可靠度问题,考虑桩土时变特征,分析了承载性能与可靠指标随服役时间的变化规律。结果表明,相比构件组合评价,整体极限承载力方法更能体现高桩码头结构体系的整体受力特征,也更便于与规范目标可靠指标相衔接。

随着工程安全评价逐步向信息化与智能化方向发展,仅给出可靠指标和安全等级已难以满足评价知识组织、规则表达和结果复用的需求。本体建模能够通过类、属性、实例及其逻辑关系对领域知识进行形式化描述,并支持规则推理与语义查询,且已在工程安全管理和风险评价中得到应用。Gao 等[8]构建了面向施工健康安全管理的 HSM-Onto 本体模型,实现了安全知识的组织、存储与复用;Chen 等[9]建立了深基坑开挖施工风险本体知识库,通过规则库实现风险事件识别与防控措施推荐;Xu 等[10]将本体与概率分析相结合,构建了建筑结构地震风险评估 OntoBSRA 框架;Cui 等[11]结合 Monte Carlo 模拟、本体模型与语义网规则,实现了地铁车站地震风险的综合自动化评价。上述研究表明,本体方法适用于复杂工程评价知识的结构化组织、规则化表达和自动推理。

在此基础上,知识图谱能够进一步以图结构方式组织评价对象、指标参数、规则条件和评价结果,从而增强知识关联表达与结果展示能力。例如,Zhang 等[12]构建了桥梁养护知识图谱,以本体作为知识组织与表示框架,结合规则推理与一致性检查,实现分散知识向关联知识的转化;Yu 等[13]提出了面向领域知识图谱构建多尺度注意力方法;Abu-Salih[14]从应用适配性角度分析了通用知识图谱在专业场景中的局限性,并归纳了现阶段主流的领域知识图谱构建路径。针对高桩码头安全评价这类同时涵盖工程对象、规范标准、可靠指标与等级结果的综合性问题,知识图谱更适合作为评价知识的组织与展示方式,并可与本体规则推理实现衔接。

综上,现有高桩码头安全评价研究多集中于整体可靠指标计算与安全等级判定,而对评价对象、评价指标、分级规则与评价结果之间的知识关联表达关注不足。为此,本文基于整体极限承载力的高桩码头安全等级判定基础,引入本体建模与语义规则推理方法,构建面向高桩码头安全评价的 OntoPWSE(Ontology for Piled Wharf Safety Evaluation)本体知识库,以实现评价知识的结构化组织、自动推理、结果查询与图谱化表达,旨在为在役高桩码头结构安全评价提供一种兼顾定量分析、规则推理与知识组织的实现路径。

1　基于可靠性理论的高桩码头安全性评价方法

高桩码头结构体系安全性评价本体知识协同表征的总体技术路线与实施流程如图 1 所示。结构可靠性通常用来表征结构在规定环境与服役时段内完成预定功能的能力。在工程实践中，结构可靠性是设计和评估的核心目标。为此，引入功能函数 Z 来衡量结构的工作状态。若基本随机变量 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$，则功能函数表示为：

$$Z=g(X_1,X_2,\cdots,X_n) \tag{1}$$

式中：$g(\cdot)$ 表征基本随机变量与结构状态之间的关系：$Z>0$，表示结构处于安全状态；$Z=0$，表示结构处于临界状态；$Z<0$，表明结构处于失效状态。

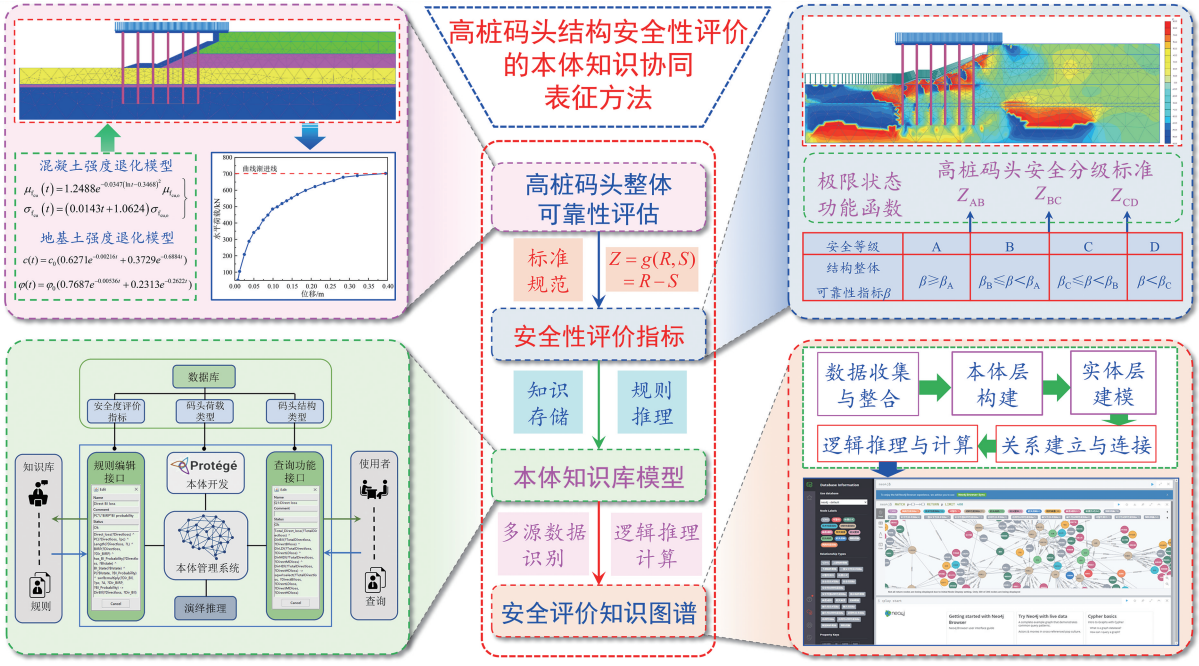


图 1　高桩码头结构安全性评价方法流程

Fig.1　Flowchart of the safety evaluation method for piled wharf structures

在具体工程计算中，影响结构极限状态的不确定因素较多，通常可将其归结为抗力 R 与荷载效应 S 两类基本随机变量。因此，功能函数可改写为由抗力与荷载效应共同控制的形式，即

$$Z=g(R,S)=R-S \tag{2}$$

在评估高桩码头安全性时，依据现行规范对一系列关键参数进行定量分析[15]，以确定其安全等级。高桩码头结构安全状态的分级标准如表 1 所示。

表 1　高桩码头安全性评估分级标准

Tab.1　Safety assessment grading scale for the piled wharf

安全等级	上部结构构件承载力		桩基承载力	岸坡稳定
	主要构件	一般构件		
A	$R_d/S_d\geq1.00$	$R_d/S_d\geq1.00$	$R_d/S_d\geq1.00$	$R_d/S_d\geq1.00$
B	$0.95\leq R_d/S_d<1.00$	$0.90\leq R_d/S_d<1.00$	$0.95\leq R_d/S_d<1.00$	$0.95\leq R_d/S_d<1.00$
C	$0.90\leq R_d/S_d<0.95$	$0.85\leq R_d/S_d<0.90$	$0.90\leq R_d/S_d<0.95$	$0.90\leq R_d/S_d<0.95$
D	$R_d/S_d<0.90$	$R_d/S_d<0.85$	$R_d/S_d<0.90$	$R_d/S_d<0.90$

注：R_d、S_d 分别为结构抗力、荷载组合效应的设计值。

《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010)规定:为保证结构在设计基准期内的安全性,各安全等级需对应特定最小目标可靠指标,具体对应关系见表 2。

表 2 不同安全等级结构最小目标可靠指标[16]

Tab.2 Minimum target reliability indicators for structures of different safety levels

结构	安全等级		
	一级	二级	三级
港口工程结构	4.0	3.5	3.0

王元战等[17]在现行规范基础上,提出了以结构整体可靠指标为核心的安全分级方法,将材料性能、荷载作用与几何尺寸等不确定因素统一纳入结构分析框架,并采用结构整体极限承载力作为体系抗力的表征参数。

通过将整体可靠指标与规范中的等级标准建立对应关系,可进一步确定高桩码头不同安全等级的临界状态,计算公式如下:

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{dA}} / S_{\mathrm{d}} &= 1.00 \\ R_{\mathrm{dB}} / S_{\mathrm{d}} &= 0.95 \\ R_{\mathrm{dC}} / S_{\mathrm{d}} &= 0.90 \end{aligned} \tag{3}$$

高桩码头结构是否满足表 2 的最小目标可靠指标,是评估新建或现有结构安全储备的关键依据。但对于在役结构,可靠指标低于目标值并不直接等同于结构失效,而应视为安全储备衰退的临界阈值,用于量化安全等级下降程度。为此,将最低目标可靠指标视为安全等级量化分级体系中的边界层级指标,记为 β_{A},当结构可靠指标 $\geqslant\beta_{\mathrm{A}}$ 时,结构安全等级为 A 级。

基于上述理念,本文针对不同设计安全等级分别设定最低目标可靠指标,并构建结构功能函数。该函数通过量化结构抗力与荷载效应的映射关系,为安全性评价提供精准判定基准。各安全等级对应的处置方案及极限状态功能函数表达式如下。

(1)A/a 级。结构在预定使用寿命内满足现行标准与规范要求,安全储备充足且可正常使用。

$$Z_{\mathrm{AB}} = R\left(1+\ln\left(1+\frac{R}{S}\right)\right)-S\left(1+\sqrt{\frac{S}{R}}\right) \tag{4}$$

(2)B/b 级。结构安全储备虽略低于现行标准目标值,但整体仍处于可使用状态,需结合运营情况进行持续监测。

$$Z_{\mathrm{BC}} = 0.95R\left(1+\ln\left(1+\frac{R}{S}\right)\right)-S\left(1+\sqrt{\frac{S}{R}}\right) \tag{5}$$

(3)C/c 级。结构因安全储备不足影响正常使用功能时,需启动针对性加固或维护方案。

$$Z_{\mathrm{CD}} = 0.90R\left(1+\ln\left(1+\frac{R}{S}\right)\right)-S\left(1+\sqrt{\frac{S}{R}}\right) \tag{6}$$

(4)D/d 级。结构安全状态较差,已严重影响正常使用,应及时采取处置措施。

式(4)—(6)中,R 为结构整体极限承载力,S 为荷载组合效应。括号内为统计修正项,其值基于抗力与荷载效应的概率分布特性及统计参数确定,旨在消除标准值/设计值分级方法导致的统计尺度系统误差。

为定量划分结构安全等级,依据 A 级与 B 级对应的整体极限承载力标准值,结合承载力、荷载效应的分布类型及统计参数,采用 JC 法计算各分类等级的可靠指标 β_{B} 和 β_{C}[17]。在此基础上,建立以整体可靠指标为核心的高桩码头安全等级划分标准,如表 3 所示。

表 3 高桩码头安全等级定量分级标准

Tab.3 Quantitative grading criteria for structural safety classification of the piled wharf

安全等级	结构整体可靠性指标 β
A	$\beta\geqslant\beta_{\mathrm{A}}$
B	$\beta_{\mathrm{B}}\leqslant\beta<\beta_{\mathrm{A}}$
C	$\beta_{\mathrm{C}}\leqslant\beta<\beta_{\mathrm{B}}$
D	$\beta<\beta_{\mathrm{C}}$

2 OntoPWSE 本体知识库构建方法

2.1 OntoPWSE 本体知识库功能定位与总体框架

OntoPWSE 本体知识库旨在对高桩码头安全评价全过程要素(对象/指标/规则/结果)进行体系化整合[18],涵盖评价对象、构件层级、结构安全性/适用性/耐久性等评价指标、整体可靠指标与安全等级分级阈值、SWRL 推理规则及 SQWRL 查询规则等内容。该知识库不替代结构可靠度计算,而是在可靠度计算结果基础上,实现评价知识的结构化表达、规则推理和结果查询[19]。OntoPWSE 本体知识库主要组成及其作用如表 4 所示。

表 4　OntoPWSE 本体知识库主要组成及其作用

Tab.4　The main components of the OntoPWSE ontology knowledge base and their roles

类别	主要内容	作用
核心类	高桩码头、荷载工况、可靠指标、安全等级、分级规则	描述安全评价的基本知识对象
对象属性	hasReliabilityIndex、hasSafetyGrade、underLoadCondition 等	描述对象之间的关系
数据属性	β、β_A、β_B、β_C、服役年限、荷载工况参数等	存储评价计算数据
实例	工程算例码头、水平荷载工况、B 级安全状态等	实现工程数据实例化
SWRL 规则	β 区间与 A/B/C/D 等级对应关系	实现安全等级自动推理
SQWRL 查询	查询工程对象、可靠指标、分级阈值、等级结果	支持评价结果检索与复核

2.2　核心类、属性与实例设计

OntoPWSE 的核心类主要包括工程对象类、荷载工况类、可靠指标类、安全等级类、分级阈值类和评价规则类。其中,工程对象类用于定义高桩码头本体及其构件层级关系;荷载工况类用于表征水平荷载、堆载、靠船荷载等作用条件;可靠指标类用于量化存储整体可靠指标 β;分级阈值类用于存储 β_A、β_B、β_C 三级临界阈值;安全等级类用于描述 A、B、C、D 四类安全状态;评价规则类用于构建可靠指标与安全等级之间的判定关系。

对象属性用于建立不同类之间的关联关系,例如,工程对象与荷载工况之间通过 underLoadCondition 关联,工程对象与可靠指标之间通过 hasReliabilityIndex 关联,工程对象与安全等级之间通过 hasSafetyGrade 关联。数据属性则用于存储可靠指标数值、分级阈值和服役年限等定量信息。

2.3　SWRL 推理规则与 SQWRL 查询规则

安全等级推理规则基于整体可靠指标与分级阈值的区间关系构建。例如,当评价对象的整体可靠指标 β 满足 $\beta_B \leqslant \beta < \beta_A$ 时,则推理其安全等级为 B 级。

完成 SWRL 规则推理后,采用 SQWRL 查询评价对象、荷载工况、整体可靠指标、分级阈值和安全等级结果,以实现评价结果的快速检索与复核。

2.4　本体构建流程与一致性校核方法

OntoPWSE 的构建流程包括:

(1)确定本体应用范围;

(2)提取高桩码头安全评价核心术语;

(3)建立核心实体类目体系并定义其层级拓扑关系;

(4)定义对象属性和数据属性;

(5)创建工程实例并输入可靠指标与分级阈值;

(6)编写 SWRL 安全等级推理规则;

(7)设置 SQWRL 查询规则;

(8)进行一致性检查和推理验证。

通过上述步骤,构建面向高桩码头安全评价的本体知识库,为评价指标组织、安全等级推理及结果查询提供了统一的知识协同表征框架。

3　工程算例与方法验证

3.1　工程概况

选取某港口集装箱船高桩码头为研究对象。该码头采用梁板式全直桩结构,设计荷载等级为 10 万吨级,当前已运营 10 年。码头纵向长 324 m、桩台宽 32.5 m、排架间距 9 m。每榀排架内部平均布置 6 根大直径混凝土管桩,桩长40 m、管桩直径 1200 mm、壁厚 150 mm,混凝土强度等级为 C80。其中,管桩按钢筋混凝土构件建模,在数值分析中,通过等效刚度法将钢筋作用整合至管桩整体材料参数。设计高水位为 2.91 m、低水位为 0.41 m。码头横断面如图 2 所示,土体物理力学参数见表 5。

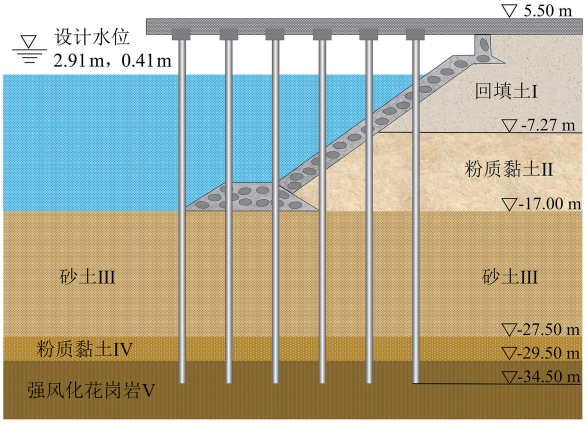


图 2　高桩码头横断面图

Fig.2　Cross section of the piled wharf

表 5 土体物理力学参数

Tab.5 Soil physical and mechanical parameters

土层	参考剪切模量/kPa	参考体积模量/kPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	饱和密度/(kg·m^{-3})
回填土 I	55	150	0	29	1700
粉质黏土 II	60	300	30	18	1950
砂土 III	100	300	0	37	2000
粉质黏土 IV	150	750	25	19	1900
强风化花岗岩 V	280	1300	0	40	2790
块石垫层	140	1300	15	45	2240

3.2 数值模型与整体极限承载力计算方法

基于 PLAXIS 建立高桩码头二维数值模型，采用摩尔-库伦本构模型对土体与结构进行模拟。为减小边界效应对结构内力与变形的影响，模型尺寸设为 330 m(宽)×50 m(高)。模型底部及两侧水平方向施加固定约束，顶部设置为自由场边界。高桩码头数值模型的网格划分如图 3 所示。

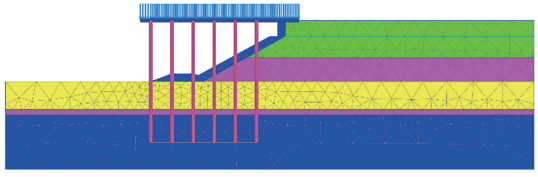


图 3 高桩码头数值模型网格划分

Fig.3 Numerical model meshing of the piled wharf

开展水平极限承载力分析时，在码头上部结构前沿控制点施加水平荷载，并以该点的水平位移为响应指标绘制荷载-位移曲线，据此判定结构极限承载状态。当荷载-位移曲线趋于平缓、结构刚度明显降低或计算迭代不再收敛时，可认为结构达到极限承载状态，相应荷载即为结构整体极限承载力。

3.3 高桩码头结构体系退化模型

高桩码头长期承受海洋环境腐蚀与持续荷载耦合作用，其材料性能参数及地基土强度会随服役时间渐进退化。为表征该类退化效应，本文重点研究混凝土强度演化与地基土长期抗剪强度变化两类因素。

(1)海洋环境下混凝土强度模型

研究表明，混凝土强度具有时变特性：经历增长期、峰值期及衰减期三阶段演化过程。本文采用牛荻涛[20]提出的海洋环境下混凝土强度经时变化模型，描述混凝土抗压强度均值与标准差随服役时间的变化规律。其表达式如下：

$$\left.\begin{aligned}\mu_{f_{cu}}(t)&=1.2488e^{-0.0347(\ln t-0.3468)^2}\mu_{f_{cu,o}}\\ \sigma_{f_{cu}}(t)&=(0.0143t+1.0624)\sigma_{f_{cu,o}}\end{aligned}\right\}\quad(7)$$

式中：$\mu_{f_{cu}}$ 为混凝土抗压强度均值；$\sigma_{f_{cu}}$ 为混凝土抗压强度标准差；$\mu_{f_{cu,0}}$、$\sigma_{f_{cu,0}}$ 为混凝土初始强度。

(2)地基土长期抗剪强度模型

地基土在长期荷载下的蠕变效应将引发抗剪强度时效衰减[21]。基于已有研究成果[22]，采用粉质黏土黏聚力 c 与内摩擦角 φ 随时间变化的回归模型描述地基土长期抗剪强度变化规律。

$$c(t)=c_0(0.6284e^{-0.00175t}+0.3716e^{-0.7029t})\quad(8)$$

$$\varphi(t)=\varphi_0(0.8206e^{-0.00358t}+0.1794e^{-0.2609t})\quad(9)$$

式中：c_0、φ_0 分别为两种土体在初始时刻的黏聚力与内摩擦角。

3.4 高桩码头结构体系安全性评价

高桩码头水平极限承载力分析中，需先识别主要不确定性因素(如材料性能、几何参数及计算模型)，进而选取关键参数建立随机变量样本集。随后，通过增量分析法计算各样本极限承载力，进而获得高桩码头水平极限承载力，结果如图 4 所示。

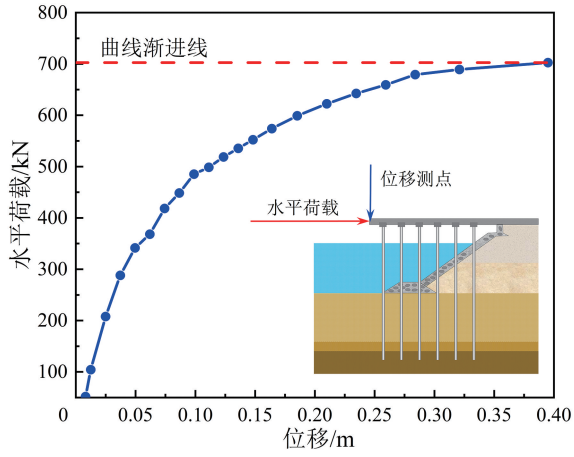


图 4 高桩码头荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of the piled wharf

本文通过假设检验和极大似然参数估计方法，确定了结构整体极限承载力的分布类型及其变异系数，其中，承载力服从正态分布，变异系数取值为 0.0702。

根据承载力极限状态功能函数，采用 JC 法进行结构整体可靠指标求解，并以水平极限承载力平均值作为验算点初值。计算结果表明，该高桩码头结构体系在水平荷载作用下的整体可靠指标为 3.2746。该码头设计安全等级为二级，对应目标可靠指标 $\beta_A=3.500$。经计算，分级临界值 $\beta_B=3.122$、$\beta_C=2.798$，具体分级标准见表 6。

表 6　水平荷载下码头安全分级标准

Tab.6　Safety classification criteria for wharves under horizontal loads

安全等级	码头整体可靠指标 β
A	$\beta\geqslant3.500$
B	$3.122\leqslant\beta<3.500$
C	$2.798\leqslant\beta<3.122$
D	$\beta<2.798$

由表 6 可知，该码头在水平荷载作用下的整体可靠指标介于 β_B 与 β_A 之间，其安全等级可判定为 B 级。该结果表明，结构整体安全储备低于现行规范目标值，但仍处于可使用状态，后续应结合现场监测和维护措施开展持续评估。

3.5　OntoPWSE 推理结果验证

将 3.4 节所得整体可靠指标与安全等级分级阈值导入 OntoPWSE 本体，分别对工程对象、荷载工况、可靠指标、分级阈值和安全等级五类核心要素进行实例化操作。其中，将已服役 10 年的集装箱高桩码头定义为工程对象实例，将水平荷载作用定义为荷载工况实例，将整体可靠指标 $\beta=3.2746$ 定义为数据属性，将 $\beta_A=3.500$、$\beta_B=3.122$、$\beta_C=2.798$ 定义为分级阈值，将 A、B、C、D 定义为安全等级实例。图 5 为 OntoPWSE 核心类与属性的实例化结果。

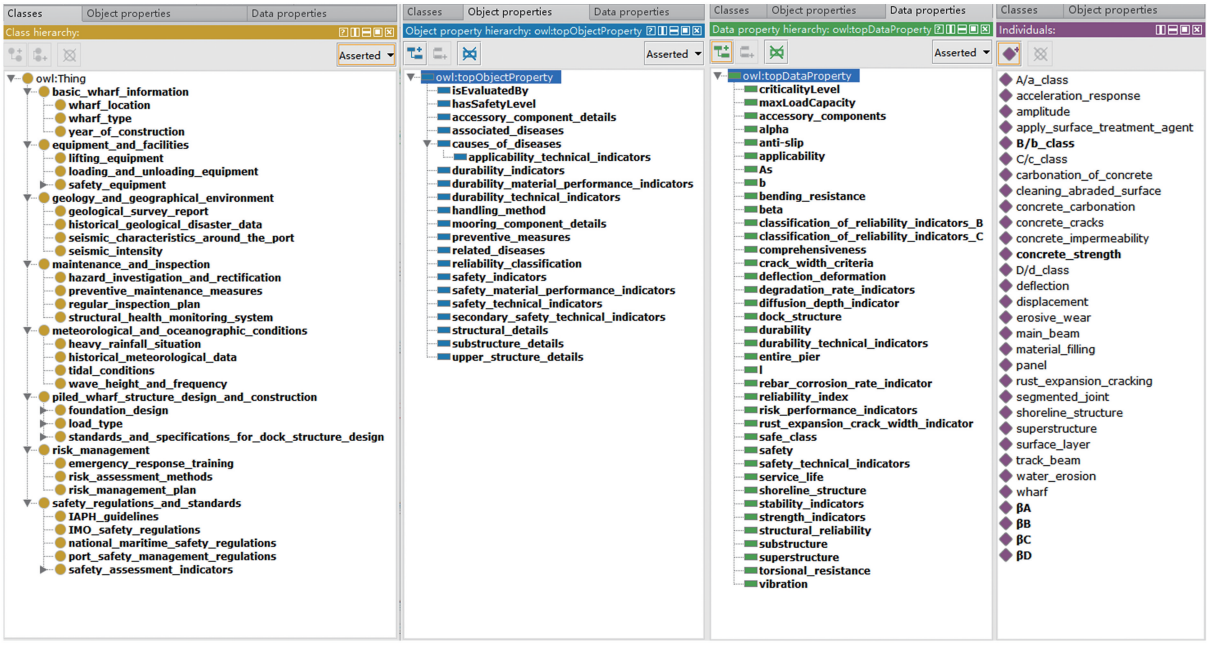


图 5　OntoPWSE 核心类与属性实例化结果

Fig.5　Instantiation results of core classes and properties in OntoPWSE

完成实例化后，根据整体可靠指标 β 与分级阈值 β_A、β_B、β_C 之间的区间关系建立 SWRL 安全等级判定规则，并在推理前对本体模型与规则进行一致性检查，结果如图 6 所示。随后，运行推理机进行自动判定。本算例中 $\beta=3.2746$，满足 $\beta_B\leqslant\beta<\beta_A$ 的 B 级判定条件，OntoPWSE 自动生成该工程对象对应的 B 级安全等级本体实例，推理结果如图 7 所示。

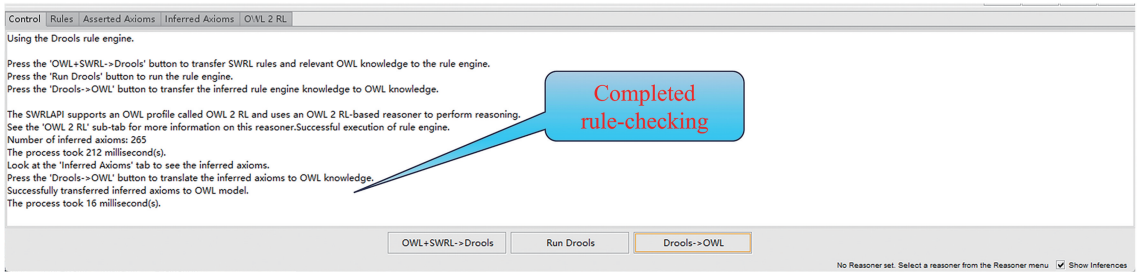


图 6 OntoPWSE 规则一致性检查结果

Fig.6 Consistency checking results of OntoPWSE rules

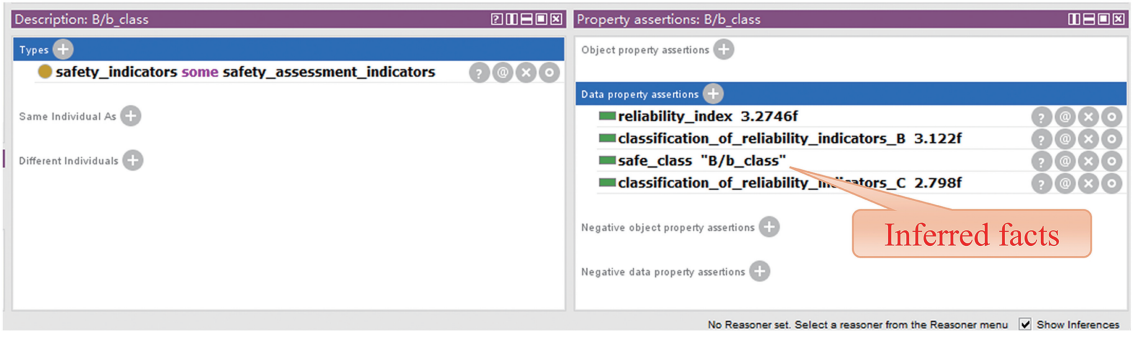


图 7 运行推理机后生成的安全等级本体实例

Fig.7 Safety grade facts generated after running the reasoner

采用 SQWRL 对工程对象、荷载工况、整体可靠指标、分级阈值和安全等级结果进行查询，结果如图 8 所示。由图 7 和图 8 可知，OntoPWSE 能够实现安全等级的自动推理和评价结果的结构化查询，且推理结果与 3.4 节中的可靠度计算及人工判定结果一致，验证了本体知识库在高桩码头安全评价中的可行性。

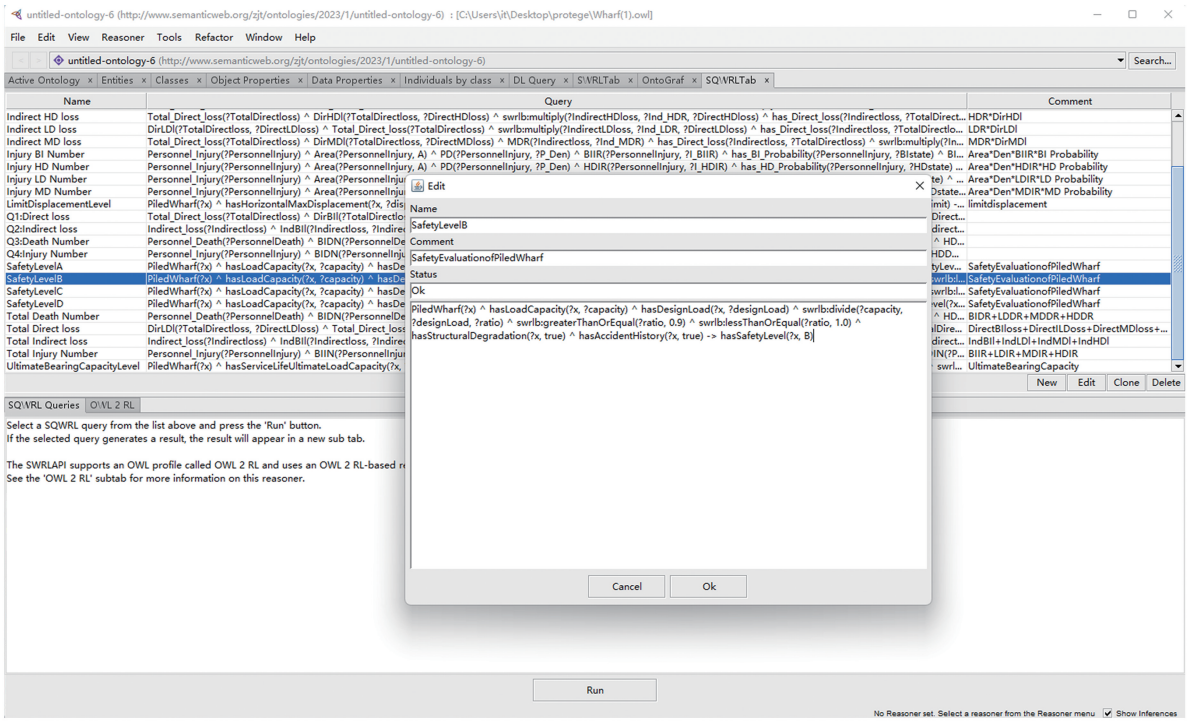


图 8 基于 SQWRL 的安全评价结果查询

Fig.8 Safety evaluation result query based on SQWRL

3.6　安全评价知识图谱的表达方法及其作用

在 OntoPWSE 本体知识库基础上，进一步将工程对象、评价指标、规则条件、可靠指标及安全等级结果进行图谱化组织，构建高桩码头安全评价知识图谱，如图 9 所示。相较单纯的文本记录或表格结果，该图谱能够更直观地呈现“工程对象–评价参数–规则关系–评价结果”之间的关联结构。

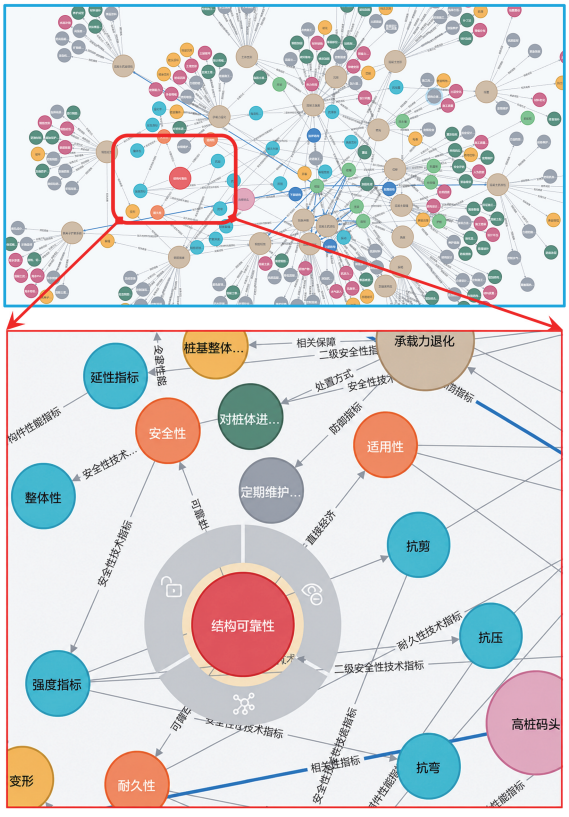


图 9　高桩码头安全性评价领域知识图谱

Fig. 9　Knowledge graph in the field of safety evaluation of the piled wharf

需要说明的是，本文中的知识图谱并不替代整体可靠度计算，也不直接决定安全等级，其核心作用是对评价过程与评价结果进行结构化表达和关系追溯。具体而言，知识图谱将高桩码头工程实例、荷载工况、整体可靠指标、分级阈值、SWRL 判定规则及安全等级结果组织为图结构，评价结果不再局限于单一可靠指标 β 或安全等级标签，而是完整呈现数据来源、判定依据与要素关联路径。通过该图谱，用户可从工程实例节点追溯至荷载工况、可靠指标、分级阈值和安全等级结果，从而提高评价过程的透明性、可解释性和结果复用能力。

4　结论与方法适用性分析

4.1　主要结论

本文面向在役港口高桩码头结构安全评价问题，围绕“安全状态定量分析—评价知识结构化表征—规则推理与结果查询”的技术路径开展相关研究。以整体可靠度分析作为高桩码头结构安全评价的定量基础，以本体建模和语义网规则作为安全评价知识表征与推理实现手段，构建面向高桩码头安全评价的知识协同表征方法。主要研究结论如下：

（1）以高桩码头结构整体极限承载力表征结构体系抗力，建立了考虑服役期退化效应的结构安全定量评价方法，并结合现行规范构建了基于整体可靠指标的安全等级分级标准。该方法可从结构体系层面反映高桩码头的整体安全储备，为安全状态判定提供了统一的定量依据。

（2）以某已服役 10 年的集装箱高桩码头为例，计算得到其在水平荷载作用下的整体可靠指标为 3.2746。结合安全等级分级标准，判定该结构安全等级为 B 级，表明其整体仍处于可使用状态，但安全储备已低于现行规范目标值。

（3）在整体可靠度分析结果基础上，构建了面向高桩码头安全评价的本体知识库 OntoPWSE，并利用 SWRL 和 SQWRL 实现了评价指标、判定规则及安全等级结果的结构化表征、自动推理与查询。本体推理结果与整体可靠度计算结果保持一致，说明所构建的知识库能够有效支撑高桩码头安全评价知识的组织、表达与应用。

4.2　方法适用性与局限性

本文方法适用于已获得整体可靠指标，或可开展整体可靠度分析的在役高桩码头安全评价场景。其优势在于能够将数值计算结果、分级标准、判定规则和安全等级结果组织为可推理、可查询和可追溯的知识结构，从而提高安全评价结果的可解释性、复核便利性与知识复用能力。

同时，本文方法仍存在一定的局限性。首先，当前分析尚未将荷载时变效应纳入随机分析框架；其次，钢筋锈蚀尚未作为独立退化变量进行显式建模；再次，本文采用的混凝土强度和地基土强度退化模型主要基于既有研究中的统计经验模

型,其适用性仍需结合更多工程实测数据进行进一步验证。

后续研究将进一步引入运营期实测数据、荷载时变模型、钢筋锈蚀退化模型和多工况安全评价规则,扩展 OntoPWSE 在不同类型港口结构安全评价中的适用性,以提高在役港口结构安全评价的动态化、精细化和智能化水平。

参考文献(References):

[1]王元战, 李妲. 堆货荷载下高桩码头结构整体安全度分析[J]. 水道港口, 2013, 34(5): 430-436.
Wang Yuanzhan, Li Da. Integral safety degree analysis of high-piled wharf structure under heaped load[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(5): 430-436. (in Chinese)

[2]何林丹, 林玉娴. 高桩码头结构构件时变可靠度分析[J]. 中国水运, 2025(24): 78-80.
He Lindan, Lin Yuxian. Time-varying reliability analysis of structural components of high-piled wharf[J]. China Water Transport, 2025(24): 78-80. (in Chinese)

[3]李声文, 张日向, 韩丽华. 基于 ANSYS 的高桩墩式码头可靠度分析[J]. 水道港口, 2011, 32(4): 276-280.
Li Shengwen, Zhang Rixiang, Han Lihua. Reliability analysis of pile pier based on ANSYS[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011, 32(4): 276-280. (in Chinese)

[4]Su Jingbo, Yang Ganquan, Zhang Limin, et al. Safety evaluation method for high-piled wharf structures based on the disturbing-energy method[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(6): 04020044.

[5]王浩天, 董胜. 水平荷载作用下高桩码头整体可靠度研究[J]. 中国海洋大学学报, 2021, 51(8): 65-71.
Wang Haotian, Dong Sheng. Study on reliability of high-pile wharf subjected to horizontal loads[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(8): 65-71. (in Chinese)

[6]Jiang Fenyuan, Dong Sheng. An integrated reliability analysis model of sheet pile wharfs based on virtual support beam model and artificial intelligence algorithm[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25: 4312-4323.

[7]Yin Pingbao, Wang Kang, Chen Lu, et al. Horizontal bearing capacity and reliability of piles in coastal soft soil considering the time-varying characteristics[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 247.

[8]Gao Shang, Ren Guoqian, Li Haijiang. Knowledge management in construction health and safety based on ontology modeling[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8574.

[9]Chen Yuan, Liang Bingge, Hu Hang. Research on ontology-based construction risk knowledge base development in deep foundation pit excavation[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2025, 24(3): 1640-1658.

[10]Xu Minze, Zhang Peng, Cui Chunyi, et al. An ontology-based holistic and probabilistic framework for seismic risk assessment of buildings[J]. Buildings, 2022, 12(9): 1391.

[11]Cui Chunyi, Xu Minze, Xu Chengshun, et al. An ontology-based probabilistic framework for comprehensive seismic risk evaluation of subway stations by combining Monte Carlo simulation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105055.

[12]Zhang Yang, Liu Jia, Hou Kepeng. Building a knowledge base of bridge maintenance using knowledge graph[J]. Advances in Civil Engineering, 2023: 6047489.

[13]Yu Haoze, Li Haisheng, Mao Dianhui, et al. A domain knowledge graph construction method based on Wikipedia[J]. Journal of Information Science, 2021, 47(6): 783-793.

[14]Abu-Salih B. Domain-specific knowledge graphs: a survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 185: 103076.

[15]JTS 304—2019 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范[S].
JTS 304—2019 Technical code for inspection and assessment of hydraulic structures of water transport engineering[S]. (in Chinese)

[16]GB 50158—2010 港口工程结构可靠性设计统一标准[S].
GB 50158—2010 Unified standard for reliability design of port engineering structures[S]. (in Chinese)

[17]王元战, 刘翰琪, 高树奇, 等. 高桩码头整体安全度定量分级方法[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 92-99.
Wang Yuanzhan, Liu Hanqi, Gao Shuqi, et al. Quantitative classification of overall safety of open wharfs on piles[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 92-99. (in Chinese)

[18]Ma Zhiliang, Liu Zhe. Ontology-and freeware-based platform for rapid development of BIM applications with reasoning support[J]. Automation in Construction,

2018, 90:1-8.

[19]Zhang Jisong, Li Haijiang, Zhao Yinghua, et al. An ontology-based approach supporting holistic structural design with the consideration of safety, environmental impact and cost[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 115: 26-39.

[20]牛荻涛. 海洋环境下混凝土强度的经时变化模型[J].西安建筑科技大学学报, 1995, 27(1): 49-52.
Niu Ditao. Changing models of concrete strength along with time in marine environment[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1995, 27(1): 49-52. (in Chinese)

[21]张先伟, 王常明. 漳州软土直接剪切蠕变特性及蠕变参数的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(4): 71-76.
Zhang Xianwei, Wang Changming. Study on direct shearing creep characteristics of Zhangzhou soft clay and creep parameters[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(4): 71-76. (in Chinese)

[22]王元战, 戈浩波, 吴林键. 考虑软土蠕变对强度影响的高桩码头岸坡时变可靠度分析[J]. 海洋科学, 2018, 42(9): 88-97.
Wang Yuanzhan, Ge Haobo, Wu Linjian. Time-variant reliability analysis of bank slope of open type wharf on piles considering the effect of soft soil creep on strength[J]. Marine Sciences, 2018, 42(9): 88-97. (in Chinese)

本刊插图绘制要求

线条图应清晰且有区分度,可用 Word 或 Visio 打开编辑。字体字号要求:中文字体为宋体,英文字体为 Times New Roman,字号为 8 磅。

坐标曲线图的坐标轴、标值线的画法应规范。如果坐标轴未给出标值线和标值,坐标原点应用字母"*O*"标注,在坐标轴的末端应按照增量方向画出箭头,标目应排在坐标轴末端的外侧。如果坐标轴上已给出标值线和标值,坐标原点应用阿拉伯数字"0"或实际数值标注,不宜画出表示增量方向的箭头,标目应居中排在坐标轴的外侧,标注形式为"量的符号或名称/单位符号"。

图题应准确、简明地阐释插图内容。插图的分图宜使用字母编号,如(a)(b)(c)。插图中的英文一般应改为中文。图元注应置于图题上方,整图注应置于图题下方。图元的注码与注文之间可用一字线或下圆点隔开,各条注之间应用分号隔开,最后一条注末应用句号。