

根据 DS 理论的船舶风险因素评估分析

李成海¹, 刘树锋¹, 胡甚平²

(1. 山东交通职业学院, 山东 潍坊 261206; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 针对船舶航行风险评估中存在许多不确定影响因素的问题, 提出了在模糊风险评估证据理论基础上建立的风险评估方法。在证据集理论空间中, 每一事件均可确认为模糊集合子集且融入了模糊概率理论, 从而更全面地描述行业学者的专业经验或证据诠释, 由此得出了模糊证据理论质量函数的描述法。最后应用其船舶安全系统, 提出了船舶风险因素识别和风险评估详细程序。计算结果证明, 此方法可有效避免决策失误, 且简单、易行, 有较强的推广和应用价值。

关键词: 水上运输; 船舶航行; 船舶风险评估; 模糊证据理论; 模糊集合子集

中图分类号: U698

文献标识码: A

Evaluation and Analysis of Ship Risk Factors Based on DS Theory

LI Chenghai¹, LIU Shufeng¹, HU Shenping²

(1. Shandong Transport Vocational College, Weifang 261206, Shandong, China;

2. School of Merchant Shipping, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, china)

Abstract: In view of the fact that there are many uncertain factors in ship navigation risk assessment, a risk assessment method based on fuzzy risk assessment evidence theory is proposed. In the evidence set theory space, each event can be identified as a fuzzy set subset and integrated with the fuzzy probability theory, so as to more comprehensively describe the professional experience or evidence interpretation of industry scholars, and put forward the description method of the quality function of fuzzy evidence theory. Finally, the detailed procedures of ship risk factor identification and risk assessment are put forward by using its ship safety system. The calculation results show that this method can avoid mistakes in decision-making, is simple and easy, and has strong popularization and application value.

Key words: water transport; ship navigation; ship risk assessment; fuzzy evidence theory; fuzzy set subset

船舶风险指船舶安全系统自身因素或外部环境因素导致的船员伤亡、船舶或设备损坏及海洋环境污染等船舶事故。船舶风险评估为依据船舶事故数据库信息及船舶安全系统已有的数据资料, 在系统运作前经过定性分析和定量研究相结合对船舶航行风险等级做出评估, 分析出船舶安全系统具有的安全能力。

在我国庞大的航运船队中, 有许多经济实力

相对薄弱的中小企业或私营企业没有及时更新报废老旧船舶, 这些船舶船体老化严重且设备工作不可靠、故障频发; 加之海上船舶通行交通流量大, 航道拥挤, 造成了船舶事故率较高, 甚至发生船毁人亡、重大经济损失的船舶事故。因此, 进行船舶航行风险评估具有重大意义。在船舶航行风险评估实践中, 存在储备知识缺乏、评估数据不详、评估标准不统一、风险识别内容不充

收稿日期: 2023-12-29

作者简介: 李成海, 副教授, 博士, 研究方向为海上航行安全

基金项目: 国家重点研发计划项目(项目3.1): 北极航道通信导航保障技术与系统开发(编号: 2021YFC2801000); 国家重点研发计划项目(项目4.2): 在航船舶安全风险辨识与防控平台(编号: 2019YFB1600602)

分、系统建模缺乏完整性等问题,因此需要取得相对高精度的船舶风险评估结果。近年来,业内对于船舶航行风险评估取得了许多成果。例如,张文君等^[1]在智能化船舶航行风险来源和类别基础上,采取不同研究方法对当前各类智能化船舶航行的风险进行评估和研究成果梳理,归纳了目前智能化船舶航行的风险研究存在的问题。陈逸涵^[2]选取通航复杂水域为分析对象,构建依据AIS数据信息的驱动动态模型。在冲突检测概率条件下,考虑船舶航行不确定性和动态性的特征进行了船舶航行预测,根据冲突定义作出冲突概率求解,且提出以通航水域管理为角度的船舶群组法,对海区船舶划分群组;基于船舶群组的模型,建立航行船舶风险在不同海域的评估架构,进行通航复杂水域船舶航行的风险动态计算。余庆等^[3]以国内外广泛的海上风电研究作为基础,对多种有代表性通航风险模型量化分析。研究认为:虽然部分国家已将航路风险模型用于选址工作,但电场周边水域航行船舶多因素的耦合作用,加上航行船舶状态不断发生变化给风险量化带来了困难,因此目前模型不能满足风险精确量化和实时量化需求。刘启新^[4]根据GO-贝叶斯法对自主智能航行船舶系统做可靠性能分析,在系统推理基础上,辨别出系统内薄弱的环节和系统冗余。利用动态贝叶斯信度网络法对船舶进行风险概率求解和开发智能风险预估系统;利用风险概率研究结果和系统可靠程度,确认船舶风险事件并编制应急预案。杨雪等^[5]根据北极航行船舶安全研究演化过程,综合分析风险评估的风险因素、数据来源、模型方法、支持决策和应用场景;选取战略、操作和营运层面支持的北极航行船舶风险评估策略,作为提高船舶航行安全主要

措施。当前,对于频发的推进系统和机械故障、海洋污染等事故,在人为因素、高纬度等风险源方面的评估研究尚不完善。李壮等^[6]以船舶北极海域海冰影响下船舶航行风险为研究对象,提出了根据监测数据信息贝叶斯的动态风险分析评估法;分析北极海域船舶航行的关键风险因素,根据控制理论建立北极航道航行船舶风险评估模型;结合北极海域海冰监测的数据,进行北极航行船舶动态风险的评估研究;以“永盛轮”为北极航行分析对象,对其沿航行风险变化因素研究进行仿真和结果分析。

模糊评估理论能够较好描述未知和不确定性等认知科学的重大概念,并广泛应用于信息融合、决策分析、人工智能等领域,以解决信息不完备或不确定等问题^[7]。它不需预估条件概率及先验概率,便可实现证据融合,符合措施决策推理程序且过程简单,同时利用似然度PL和信任度Bel描述存在风险的不确定性^[8]。本研究提出将DS理论,即模糊评估理论船舶航行风险评估法,应用于船舶安全系统风险评估,并推出船舶风险评估程序、求解出风险评估的具体结果。

1 船舶安全系统风险因素分析

船舶安全系统包括多个子系统^[9],各子系统又包括多个分系统,见图1。船舶安全系统的风险由其子系统的风险综合产生,各子系统风险成为船舶安全系统风险的影响因素。同时,各子系统的风险由其各部件风险综合产生,此综合过程选取与证据相结合方式作为衡准^[10]。针对子系统内各部件风险评价缺乏高精度数据及相对完备的理论知识的问题,将证据理论融入模糊集合子集用于证据集合体空间内证据的描述^[11]。

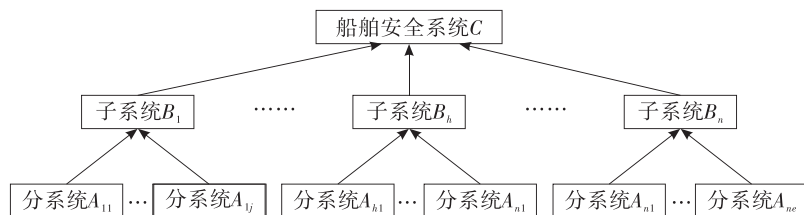


图1 船舶安全系统架构

图1中,C代表船舶安全系统;第二层代表各子系统,其中, B_i 代表固定的子系统, B_h 代表机械设备、装备的子系统, B_n 代表电子电气的子系统;第三层代表各分系统,其中 A_{i1} 代表船舶固定的子系统内的舵设备, A_{ij} 代表其装卸设备或装备等。以此为依据构建船舶安全系统结构中

风险分析评估模型。

2 DS理论

DS理论即模糊评估证据理论,起初设定一空间 Θ ,此空间称为识别框架,包括一些穷举而且互相排斥的因素,对任一命题C设定映射 n :

$2^{\mathbb{H}} \rightarrow [0, 1]$ 表示基本概率函数, 且 n 能够达到:

① $n(\delta) = 0$; ② $0 \leq n(c) \leq 1$; ③ $\sum_{c \in 2^{\mathbb{H}}} n(c) = 1$ 。假定 $c \in 2^{\mathbb{H}}$, 而且 $n(c) > 0$, 则 c 称作焦元, $n(c)$ 代表命题 c 中证据具有的信任度。

证据理论内的证据是指经验内部分内容或专家知识或观测到的数据, 而不是实证据。证据理论根据决策层所掌握的证据, 在识别框架内产生一个分配概率函数^[12], 即基本概率函数, 亦称 mass 函数, 可看作该研究领域学者凭其专业经验对于假定做出的评估, 对于最高决策层而言可视作某一证据^[13], 而基本概率函数的取得始终为研究证据理论的难点和重点^[14]。通常而言, 证据集合体空间内的证据一般采取模糊语言进行描述, 因而本研究证据集合体空间法融入模糊集合子集^[15], 进而得到基本概率函数。

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ 表示一证据集合体空间, $\mathbb{H} = R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 表示识别框架。

设定 1: 提出的映射 $u\tilde{p}: G \rightarrow [0, 1]$, $g \rightarrow u\tilde{p}(g)$, 则 $u\tilde{p}$ 确认 G 上某一模糊集合子集, $u\tilde{p}$ 表示 P 隶属度的函数, $u\tilde{G}(g)$ 表示 g 对 $\tilde{p}$ 的隶属度。整个 G 的模糊集合子集构成的集合可记作 $P(G)$, 称作 G 的模糊函数幂集。

设定 2: q_j 代表证据集合体空间内证据 g_j 的权重值, 此模糊集事故 $\tilde{p}$ 的模糊基本概率为:

$$F(\tilde{p}) = \sum_{(j=1)}^m u\tilde{p}(g_j) q_j \quad (1)$$

设定 3: 设 $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2 \in \tilde{P}(G)$, 设定运算为:

$$\tilde{P}_1 \cup \tilde{P}_2 : u\tilde{P}_1 \cup \tilde{P}_2(g) = u\tilde{P}_1(g) W u\tilde{P}_2(g) \quad (2)$$

定理: 构建映射 $K: \tilde{p} \rightarrow 2^{\mathbb{H}}$, 对 $\forall R_j \in 2^{\mathbb{H}}$, $\exists \tilde{P}_j \in \tilde{P}$, $s \cdot t$, $K(\tilde{P}_j) = R_i$ ($j=1, 2, \dots, m_j$; $i=1, 2, \dots, n$)。而且由此设定如下映射: $K[F]: 2^{\mathbb{H}} \rightarrow [0, 1]$ 。可达到:

$$K[f](R_i) = \begin{cases} \frac{1}{N} F(\cup_{\tilde{P}_j \in P(G)} \tilde{P}_j) & R_i \neq \delta \\ K(P_j) = R_i & \\ 0 & R_i = \delta \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, $N = \sum_{\substack{R_i \in 2^{\mathbb{H}} \\ R_i \neq \delta}} f(\cup_{\substack{\tilde{P}_j \in P(G) \\ K(P_j) = R_i}} \tilde{P}_j)$, 则 $K[f](R_i)$ 为 R 上的一基本概率函数。

论证: 当 $R_i = \delta$, 明显 $K[f](\delta) = 0$ 。而且

$$\sum_{\substack{R_i \in 2^{\mathbb{H}} \\ R_i \neq \delta}} K[f](R_i) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{R_i \in 2^{\mathbb{H}} \\ R_i \neq \delta}} F(\cup_{\substack{\tilde{P}_j \in P(G) \\ K(P_j) = R_i}} \tilde{P}_j) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{R_i \in 2^{\mathbb{H}} \\ R_i \neq \delta}} F(\cup_{\substack{\tilde{P}_j \in P(G) \\ K(P_j) = R_i}} \tilde{P}_j) = 1$$

所以它成为一个基本概率函数, 论证毕。

以此将证据集合体空间融入模糊集合子集, 可以得到每一条证据的基本概率函数^[16], 最后依据如下的模糊评估证据理论合成公式并求解:

$$n(c) = [n_1 \oplus n_2 \oplus \dots \oplus n_m](c) = \begin{cases} 0 & c = \delta \\ \frac{\sum_{C_i \cap B_j \cap A_h \dots C} n_1(C_j) n_2(B_i) n_3(A_h) \dots}{1 - \sum_{C_i \cap B_j \cap A_h \dots = \delta} n_1(C_j) n_2(B_i) n_3(A_h) \dots} & c \neq \delta \end{cases} \quad (4)$$

通过式 (4) 可求得综合性证据集合体空间内对于 $2^{\mathbb{H}}$ 含有元素的认可度的一切证据, 进而取得最终的评价结果。

3 基于 DS 理论的船舶风险因素评价

整体船舶安全系统风险因素评估程序见图 2。选取某一艘集装箱船船舶安全系统内机械设备、装备的子系统作为例证, 介绍如何在证据集合体空间内融入模糊集合子集并以此求得基本概率函数^[17-18], 最终选取与证据相结合方式作为衡准进行全系统风险因素评估。

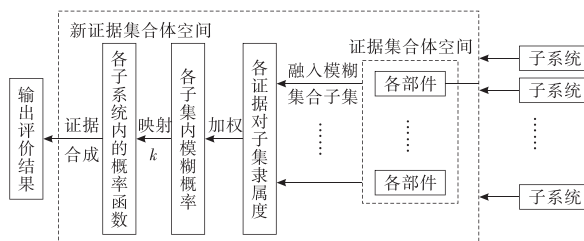


图2 船舶安全系统风险因素评估程序

将船舶安全所处状态分为“优”“良”“一般”“差”四个档次, 分别对应 R_4, R_3, R_2 和 R_1 。在此一切的焦元都是单假定集, 且仅为船舶安全系统最终的决策、措施或评判的结论内某一元素。

整体船舶安全系统包括船舶固定的子系统, 船舶机械设备、装备的子系统, 船舶电子子系统和船舶电气子系统四部分。其中船舶机械设备、装备的子系统含有主机、动力管路、辅助机械、轴系和推进器五部分部件^[19-20]。根据行业学者经验及观测收集的数据可获得四条证据, 确认证据集合体空间 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_5\}$; 将 G 看作包含一定量元素的数学系统, $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_{10}$ 设定为 G 上模糊集合子集, $\tilde{P}_{h+1}$ 优于 $\tilde{P}_h$, 此模糊集合子集可较准确地描述行业学者的评价结果。证据集合体空间模糊集合子集隶属度, 见图 3。从图 3 可知其隶属度函数为:

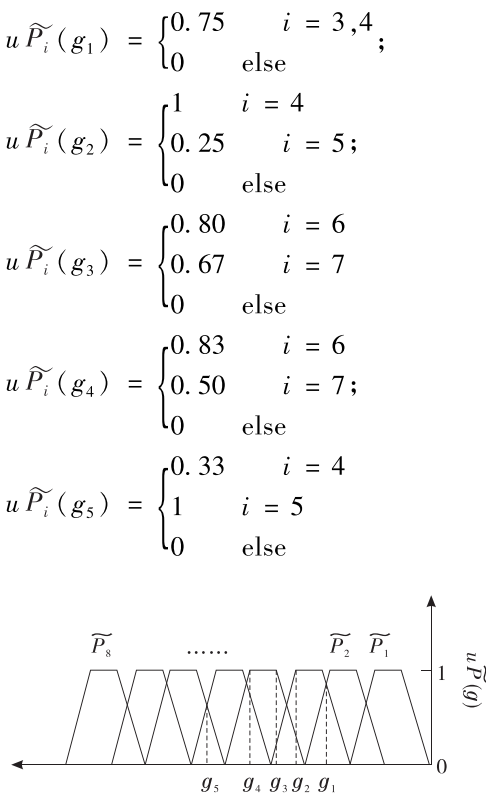


图 3 证据集合体空间模糊集合子集隶属度

由行业学者依据经验给出每一证据具有的权重值, $q = \{q_1, q_2, \cdots, q_5\} = \{0.3, 0.2, 0.3, 0.2, 0.1\}$, 从式 (1) 可根据顺序得到 $F(\widetilde{P}_3) = 0.23$, $F(\widetilde{P}_4) = 0.46$, $F(\widetilde{P}_5) = 0.32$, $F(\widetilde{P}_6) = 0.18$, $F(\widetilde{P}_7) = 0.20$ 。且 $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4\} = \{\text{差}, \text{一般}, \text{良}, \text{优}\}$ 作为船舶安全系统级别的集合。其集合映射 K 设定为:

$$K(\widetilde{P}_i) = \begin{cases} R_1 & i = 1, 2 \\ R_2 & i = 3, 4, 5 \\ R_3 & i = 6, 7 \\ R_4 & i = 8 \end{cases}$$

从式 (3) 可求得 $K[F](R_1) = F(\widetilde{P}_1 \cup \widetilde{P}_2) = 0$, 根据此原理取得 $K[F](R_2) = 0.72$, $K[F](R_3) = 0.25$, $K[F](R_4) = 0.03$ 。依次类推, 计算取得其余三个子系统的基本概率函数, 其分别记作 n_1, n_2, n_3, n_4 , 船舶安全系统内的基本概率函数记为 n , 见表 1。以此形成最新的证据集合体空间, 依次对应上面的四个子系统。

表 1 各证据相应的基本概率函数值

安全级别/ R	R_4	R_3	R_2	R_1	$\textcircled{H}$
n_4	0.35	0.45	0.14	0	0.10
n_3	0.39	0.33	0.19	0	0.13
n_2	0.27	0.41	0.35	0	0
n_1	0.04	0.26	0.73	0	0

从式 (4) 计算得到: $n(R_1) = 0$, $n(R_2) = 0.2809$, $n(R_3) = 0.3971$, $n(R_4) = 0.3223$ 。因此, 可评价整体船舶安全系统风险因素影响属于“一般”状况的置信度可达 0.2809, 在“良好”状况的置信度可达 0.3971, 在“优”状况的置信度可达 0.3223。依据置信度最高规则判定的结果为: 整体船舶安全系统风险因素影响较小, 即系统为“良好”状况。

4 结束语

由于船舶航行风险评估中存在诸多不确定的影响因素, 在模糊评估证据理论融入模糊集合子集及其模糊概率理论, 从根本上提升了证据的诠释和理解能力。此方法应用到船舶安全系统的风险评估中, 采取已收集到的数据和行业学者经验相结合方法, 提升了评价的有效性和精确度, 从而使决策层在数据不详情形下, 仍能最大程度地避免决策失误或盲目性。然而, 模糊评估证据理论需要强有力的条件, 即统一的证据间一定彼此独立, 所以在整体船舶安全系统中, 每条信息之间具有必然的联系或相关性。因此, 本研究方法的应用推广有着局限性, 下一步研究应在改进的基础上, 最大限度顺应非独立性证据之间的高度融合, 力求结果更符合实际。

参考文献:

[1] 张文君, 张英俊, 刘子豪. 智能船舶航行风险评估研究现状与发展趋势[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(4): 1-8.

[2] 陈逸涵. 复杂通航水域船舶航行风险动态计算研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.

[3] 余庆, 刘克中, 袁志涛, 等. 海上风电水域船舶航行风险量化研究现状综述[J]. 中国航海, 2022, 45(3): 21-25.

[4] 刘启新. 自主船舶智能航行系统可靠性与风险分析方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.

[5] 杨雪, 智靖凯, 章文俊, 等. 北极船舶航行风险评估研究现状与趋势[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(2): 1-14.

[6] 李壮, 付姗姗, 高郭平, 等. 海冰影响下船舶北极水域航行风险评估方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(3): 92-98.

[7] 汪恒, 兰培真. 区间直觉模糊集的港口水域船舶航行环境风险评价[J]. 中国航海, 2021, 44(02): 38-44, 52.

[8] 熊永万. 远东到中东航线船舶航行安全风险分析与防控策略研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

[9] 张志兵. 古雷港水域实时交通流风险评估模型[D]. 厦门: 集美大学, 2020.

[10] 陆冰清. 一种基于船舶轨迹预测的碰撞预警系统设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.

- [11]边金宁,张海鹏,陈森,等.基于模糊理论的船舶进水速度计算方法[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(10):1410-1417.
- [12]陈浩,胡基平,王发根,等.珠江口船舶引航风险态势未知测度评估[J].中国航海,2023,46(4):38-45.
- [13]李新宏,付雅倩,刘亚洲,等.基于Copula-BN的海上船舶碰撞风险评估方法[J].中国安全科学学报,2023,33(9):204-213.
- [14]王发根,胡基平,焦喜鑫,等.北极西北航道船舶通航风险分析[J].极地研究,2023,35(2):326-335.
- [15]杨志成.“双预防”机制下的船舶航次安全风险评估和管控[J].中国海事,2023(5):40-42.
- [16]季鑫.基于机器学习的船舶风险评估模型研究[D].舟山:浙江海洋大学,2023.
- [17]王学峰,苏高辉,谢旭阳,等.基于do算子的船舶风险干预及推理方法[J].科学技术与工程,2023,23(12):5332-5339.
- [18]范中洲,严啸,李锦晓.连续弯曲航道的船舶碰撞风险评估方法研究[J].安全与环境学报,2023,23(10):3429-3437.
- [19]邵承谱,朱浩纲,温小飞,等.基于AIS数据的渔业船舶碰撞风险度评估模型[J].上海船舶运输科学研究所学报,2021,44(1):1-5,10.
- [20]胡勤友,戚玉玲,张蓓,等.基于船舶时空轨迹数据的水上输出风险评估[J].交通信息与安全,2020,38(2):143-148.

(上接第14页)

预防性养护触发值为 $PCI=90$,其他指标和 BCR 计算结果见表4。从 BCR 计算结果看,两种预防性养护措施的“性价比”没有本质性的差别,还要从施工、材料和封路时间等方面做进一步的比选。

表4 预防性养护措施技术经济指标

序号	预防性养护措施	技术要求	预期性能/年	单价/(元/ m^2)	BCR结果
1	2cm高黏弹超薄磨耗层	抗裂/抗滑	4~8	60	0.0636
2	4cm改性沥青SMA-13	抗裂/抗滑	5~10	70	0.0709

注: BCR 的计算只考虑了施工的成本,没有考虑封路影响和用户的成本。

3 结论

本文在归纳总结近年来高速公路沥青路面预防性养护成功经验的基础上,结合某高速公路沥青路面实际技术状况检测结果,探索了以养护措施性能和寿命周期费用为指标的最佳预防性养护方案的确定方法。本研究的相关内容有益于完善全寿命周期效益最优的公路养护科学决策体系,规范现有高速公路预防性养护措施选择程序,为高速公路预防性养护方案和施工图设计提供科学依据。

参考文献:

- [1]广东省人民政府办公厅关于印发广东省“十四五”干线公路养护管理提升行动方案的通知[EB/OL].(2022-08-08)[2023-08-03].https://www.gd.gov.cn/xxts/content/post_3989755.html.
- [2]GALTHOUSE LARRY,MOULTHROP JAMESS,HICKS R G. Principles of Pavement Preservation [J]. TR News, 2003,228:4-9.
- [3]MANDAPAKA V, BASHEER I, SAHASI K, et al. Mechanistic-Empirical and Life-Cycle Cost Analysis for Optimizing Flexible Pavement Maintenance and Rehabilitation[J], Journal of Transportation Engineering, 2012,138(5): 625-633.
- [4]彭灿.基于全寿命周期成本的公路预防性养护决策研究[J],纳税. 2017(18):164-164.
- [5]向超.高速公路沥青路面性能预测模型与预防性养护措施研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [6]高昌.基于全寿命周期的清连高速公路养护规划研究[D].西安:西安建筑科技大学,2010.
- [7]江红.基于寿命周期的高速公路养护决策优化研究[J].公路交通科技(应用技术版). 2019,15(09):304-307.
- [8]黄志军,王端宜,王显华,等.高粘弹改性沥青制备方法 & 混合料性能验证[J].石油沥青. 2022,36(04):24-30.
- [9]虞将苗,杨倪坤,于华洋.道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2287-2298.
- [10]广东交科检测有限公司.韶赣高速公路2023年度路面病害评估与处治咨询报告[R].2023.
- [11]WANG G M, MORIAN D, FRITH D. Cost-benefit analysis of thin surface treatments in pavement treatment strategies and cycle maintenance [J], Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25 (8): 1050-1058.
- [12]BABASHAMSI P, YUSOFF N I M. Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis [J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2016(9):241-254.
- [13]吴敏,王端宜,雷超旭.沥青路面性能预测模型研究[J],广东公路交通,2009(1):5-9.