

文章编号:1005-0523(2016)06-0058-07

基于 WBS-RBS 与故障树耦合的高速公路养护风险评价

柳本民¹, 赵伟¹, 朱材权², 肖殿良³

(1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 海南省交通运输厅, 海口 570100; 3. 交通部科学研究院, 北京 100029)

摘要:针对海南高速公路养护过程中事故频发的现状,提出 WBS-RBS 与故障树耦合的风险辨识与评价方法。在对海南省高速公路养护事故调研和统计分析的基础上,将养护作业分解结构(WBS)和风险分解结构(RBS)结合得到风险矩阵,分析辨识养护过程的风险源。然后将辨识结果与故障树耦合,借助 FreeFta 故障树分析软件对海南养护过程中三种主要事故进行敏感度分析。最后根据敏感系数值将风险源划分为三级,并根据分级结果,有针对性地提出风险防控策略,为高速公路养护风险辨识与评价提供借鉴。

关键词:高速公路养护;工作分解结构(WBS);风险分解结构(RBS);故障树分析;风险辨识;风险评价

中图分类号:U418;U491.3

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.008

海南高速公路采用不封闭管理模式,机非混行,养护过程事故频发。故有效辨识和评价海南高速公路养护过程中的风险,对降低事故发生率,提高作业区外交通运行能力有重要的意义^[1]。

目前,国内外很多学者围绕公路养护风险做了研究,刘维民^[2]采用敏感性分析法辨识出高速公路改扩建过程中风险源,并对其进行模糊综合评价;许洪国等^[3]采用 ISM 和 DEMATEL 两种方法对高速公路施工区行车风险进行辨识与分析;Saaty 等^[4]提出运用层次分析法对高速公路养护风险进行定量分析。总结这些研究成果,发现 2 个主要问题:① 所用方法未将主观分析和客观计算有机结合,所得结果可信度不高;② 目前研究主要集中在对养护作业区事故率统计分析、交通量以及车速的预测等方面,缺乏系统的风险辨识和评价。

针对上述问题,本文将 WBS-RBS 风险分析法与故障树模型耦合,降低故障树构建的难度。主、客观综合分析,全面辨识海南省高速公路养护过程中的风险源,并对其进行分级评价。

1 海南高速公路养护事故统计分析

对海南省近几年高速公路养护过程中发生的事故按发生时间、地点、类型、原因进行统计,绘制事故分布图 1。由图 1 可知,海南高速公路养护过程主要有三种事故:A1:养护作业区内事故;A2:社会车辆相撞;A3:社会车辆与养护器械相撞。三种事故分别占:25%,22.5%,45%。

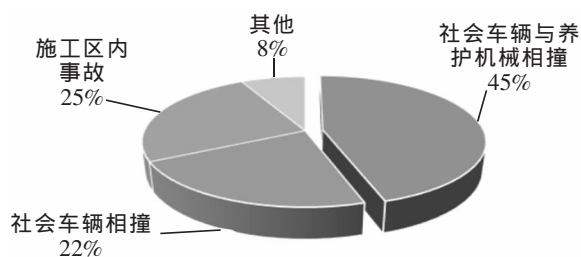


图 1 高速公路养护事故类型统计图
Fig.1 Statistics chart of expressway maintenance accidents

收稿日期:2016-04-30

基金项目:海南省交通厅基金项目(20150049)

作者简介:柳本民(1968—),女,副教授,博士,研究方向为道路安全。

进一步分析三种主要事故的原因,统计其在同类型事故中出现的频率,得到事故原因统计表,见表1。表中百分比为事故原因在同类事故中出现的频率。

表1 事故原因统计表
Tab.1 Statistics table of reasons for accidents

序号	事故类型	事故原因	频次/次	频率/%
1	A1	安全设施视认性差	6	12
2	A1	安全设施设置不合理	17	32
3	A1	路段不良	4	8
4	A1	机非混行	12	23
5	A1	违章驾驶	14	25
6	A2	高速公路不封闭	7	40
7	A2	交通组织不力	4	24
8	A2	不良路段	4	21
9	A2	能见度低	2	10
10	A2	施工布置不合理	3	15
11	A3	养护机械故障	6	14
12	A3	操作不当	9	23
13	A3	违章作业	7	18
14	A3	管理不到位	10	25
15	A3	材料堆放不合理	4	10
16	A3	不良路段	4	10

2 海南高速公路养护风险辨识

WBS-RBS 分析法^[5-6]将复杂的工作系统和风险分解为比较简单、容易理解的基本单元,再将其结合,得到风险矩阵,可全面辨识出养护作业过程中的风险源。

2.1 养护作业 WBS 分解

根据海南养护施工和管理的特点,工作分解结构WBS(work breakdown structure)从养护作业区内活动和作业区外管理两个角度出发,将养护总作业分解为作业区内管理、养护作业、交通管制3个子作业;从要素角度出发,将各子作业分解为易于识别风险的基本工作要素,层次结构见图2。

2.2 养护风险 RBS 分解

基于人-车-路-环境的风险体系,风险分解结构RBS(risk breakdown sructure)根据海南高速公路安全现状,将整个养护过程中可能存在的风险分为:人员类风险、设施类风险、养护管理类风险和作业环境类风险;然后遵循分类互斥原则,将每类风险细化为若干子风险,具体见图3。

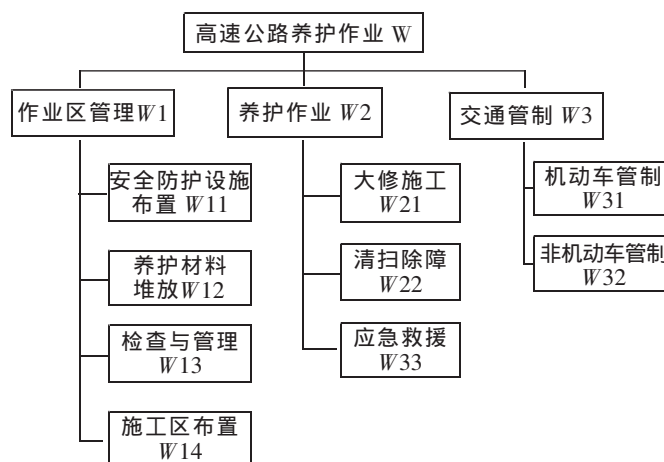


图2 高速公路养护作业分解图

Fig.2 WBS of expressway maintenance work

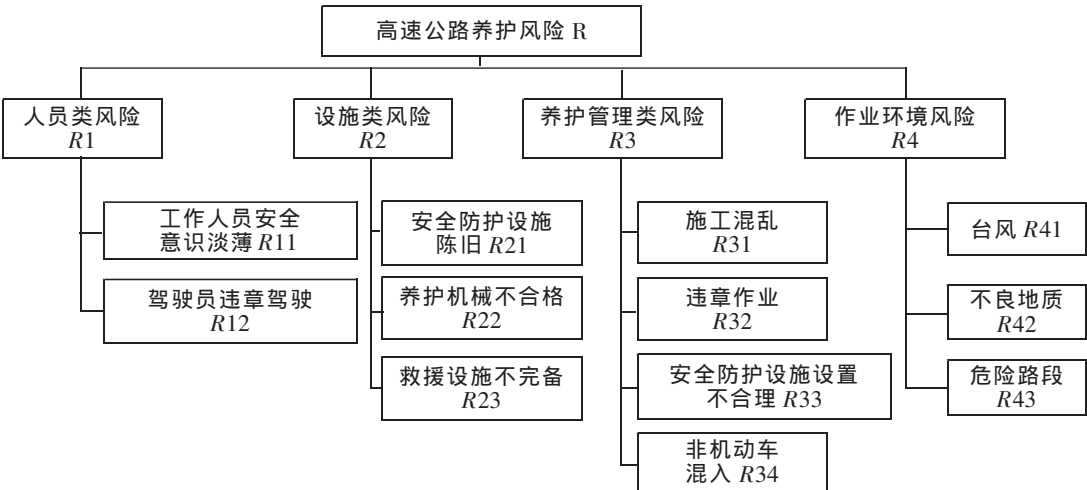


Fig.3 RBS of expressway maintenance work

2.3 养护过程 WBS-RBS 风险辨识

以 WBS“工序”层为行向量,RBS“子风险”层为列向量,构建风险矩阵。根据《公路养护技术规范》、《公路养护安全作业规程》以及海南调研获取的资料,判断工序 $W_{ij}(i=1,2,3\cdots; j=1,2,3\cdots)$ 与风险 $R_{mn}(m=1,2,3\cdots;n=1,2,3\cdots)$ 结合是否产生风险事件。产生则为 1,不产生或危害很小则为 0^[7],具体见表 2。

表 2 高速公路养护风险耦合矩阵

Tab.2 WBS-RBS coupled matrix of expressway maintenance work

风险		W1				W2			W3	
		W11	W12	W13	W14	W21	W22	W23	W31	W32
R1	R11	0	1	1	0	1	1	0	0	0
	R12	0	0	0	0	1	1	0	1	1
	R21	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	R22	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	R23	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	R31	0	0	1	0	1	0	0	0	0
R3	R32	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	R33	1	0	1	1	1	1	0	0	0
	R34	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R3	R41	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	R42	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	R43	0	0	0	0	1	0	0	1	0

提取 WBS-RBS 风险矩阵中的风险事件,并找出其对应的风险源:W11R21:安全设施视认性差,风险源为安全设施不合格;W11R33/W21R33/W22R33/W14R33:驾驶员有效反应时间变短,风险源为安全设施设置不合理;W12R11/W12R32:养护材料堆放不合理,风险源为养护材料堆放不合理;W13R11/W21R11/W22R11:安全培训不足,风险源为安全培训不足;W13R31/W13R32/W13R33:养护管理不到位,风险为安全管理不到位;W14R33:施工区布置不合理,风险源为施工布置不合理;W21R22/ W22R22:养护机械不合格导致事故,风险源为养护机械故障;W21R32:操作不当导致事故,风险源为操作不当;W21R31:违规作业导

致事故,风险源为违章作业; $W21R41/W22R41/W31R41$:台风导致事故,风险源为台风; $W21R42/W22R42/W31R42$:不良地质导致事故,风险源为不良地质; $W21R43/W22R43/W31R43$:不良路段导致事故,风险源为不良路段; $W22R12/W31R12$:驾驶员违章驾驶导致追尾,风险源为驾驶员违章驾驶; $W32R12$:交通组织不到位导致事故,风险源为交通组织不到位; $W32R34$:机非混行,风险源为高速公路不封闭。

3 海南高速公路养护风险分级评价

运用故障树分析法(fault tree analysis,简称FTA,下同)^[8]对上文所得风险源进行分级评价。分析过程分两步:①定性分析,绘制养护过程三种主要事故的事故树;②定量分析,求解各风险源的敏感度系数,划分风险源的等级。

3.1 养护故障树定性分析

3.1.1 确定顶上事件

根据图1中事故分布统计,将各事故所占比例作为其发生概率,选取事故率大于10%的事件为顶上事件:①车辆与养护器械相撞;②社会车辆相撞;③养护作业区内事故。

3.1.2 故障树作图

WBS-RBS风险辨识法与故障树模型耦合的本质是:将WBS-RBS辨识所得风险源作为故障树的中间事件和底事件,简化故障树模型,便于分析复杂系统的安全问题。

借助FreeFta故障树分析软件分别绘制3个顶事件的故障树,故障树的中间事件或基本事件与表2中风险事件一一对应,见图4~图6,图中 $X_i(i=1,2,3\cdots)$ 代表风险因素。

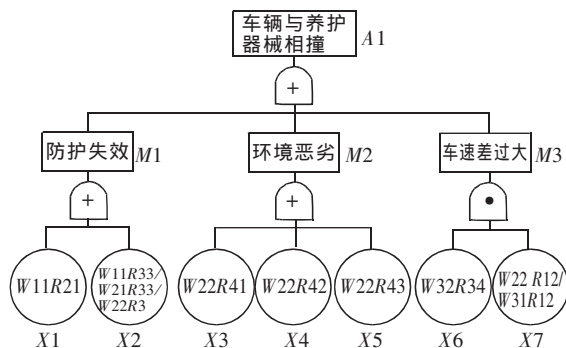


图4 车辆与养护器械相撞故障树

Fig.4 Fault tree of collision among vehicle and maintenance machinery

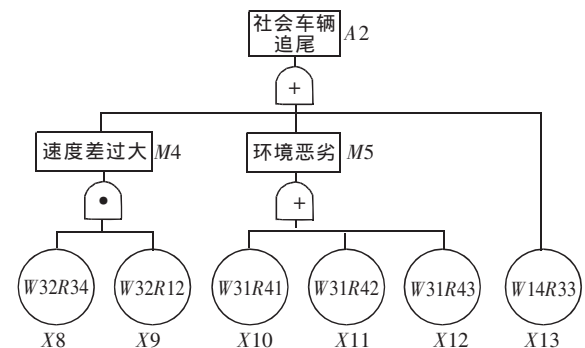


图5 社会车辆相撞故障树

Fig.5 Fault tree of vehicle collision

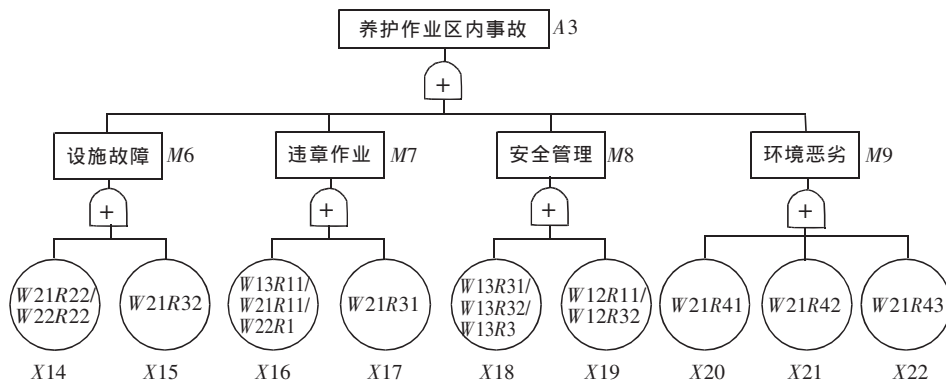


图6 养护作业区事故故障树

Fig.6 Fault tree of accidents in maintenance work

3.2 养护故障树定量分析

3.2.1 计算故障树最小割

引起顶事件发生的集合称为割集,在这些割集中凡不包含其他割集的称为最小割集。本文应用布尔代数化^[9]简法求最小割集,记为:

$$\{K_i, i=1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

式中: K 为最小割集。

借助 FreeFta 故障树分析软件得到: ① 社会车辆与养护器械相撞的最小割集为: $\{X1\}$ 、 $\{X2\}$ 、 $\{X3\}$ 、 $\{X4\}$ 、 $\{X5\}$ 、 $\{X6, X7\}$; ② 社会车辆相撞的最小割集为: $\{X8, X9\}$ 、 $\{X10\}$ 、 $\{X11\}$ 、 $\{X12\}$ 、 $\{X13\}$; ③ 养护作业区内事故的最小割集为: $\{X14\}$ 、 $\{X15\}$ 、 $\{X16\}$ 、 $\{X17\}$ 、 $\{X18\}$ 、 $\{X19\}$ 、 $\{X20\}$ 、 $\{X21\}$ 、 $\{X22\}$ 。

3.2.2 养护风险敏感度分析

风险敏感度是最小割集中风险事件对顶事件发生影响程度的表征,以此作为划分风险事件等级的依据。一般分三步求解:

1) 求顶事件发生概率。基于最小割集理论,通过公式(2)计算顶事件概率

$$P(T) = P\{E_1 + E_2 + E_n\} = \sum_{i=1}^n p(E_i) - \sum_{i < j-2}^n p(E_i E_j) + \dots + (-1)^{n-1} p(E_1 E_2 \dots E_i) \quad (2)$$

式中: $P(T)$ 为顶事件发生的概率。

将图 2~4 中统计得到的风险因素的百分比近似作为其发生概率,无统计的风险源设定其概率比既有统计数据低一个数量级,为 0.01,得:

$$P_{X1}=0.12, P_{X2}=0.32, P_{X3}=P_{X4}=0.01, P_{X5}=0.08, P_{X6}=0.23, P_{X7}=0.25, P_{X8}=0.4, P_{X9}=0.24, P_{X10}=0.1, P_{X11}=0.01, P_{X12}=0.21, P_{X13}=P_{X14}=0.15, P_{X15}=0.23, P_{X16}=0.01, P_{X17}=0.18, P_{X18}=0.25, P_{X19}=0.1, P_{X20}=P_{X21}=0.01, P_{X22}=0.09$$

根据式(2)可得顶事件的概率: $P(A1)=0.69$; $P(A2)=0.93$; $P(A3)=0.68$ 。

2) 计算风险源的敏感系数。采用临界重要度系数^[10]作为敏感系数,其计算公式:

$$I_g^c = \frac{\partial P(T)}{\partial P_i} \cdot \frac{P_i}{P(T)} \quad (3)$$

式中: I_g^c 为临界重要度,亦即敏感系数。

根据式(3),借助 FreeFta 分析软件求解各底事件的敏感系数:

$$\begin{aligned} I_g^c(X1) &= 0.14; I_g^c(X2) = 0.49; I_g^c(X3) = 0.01; I_g^c(X4) = 0.01; I_g^c(X5) = 0.09; \\ I_g^c(X6) &= 0.063; I_g^c(X7) = 0.063; I_g^c(X8) = 0.13; I_g^c(X9) = 0.125; I_g^c(X10) = 0.13; \\ I_g^c(X11) &= 0.01; I_g^c(X12) = 0.31; I_g^c(X13) = 0.21; I_g^c(X14) = 0.08; I_g^c(X15) = 0.14; \\ I_g^c(X16) &= 0.05; I_g^c(X17) = 0.1; I_g^c(X18) = 0.16; I_g^c(X19) = 0.052; I_g^c(X20) = 0.05; \\ I_g^c(X21) &= 0.05; I_g^c(X22) = 0.047; \end{aligned}$$

3) 养护风险源分级。将求得的敏感系数进行整合,相同风险源对应的敏感系数求平均,得 16 个风险源。取敏感度大于 0.1 的风险源为关键风险源,共 10 个,占比 62.5%;取敏感系数介于 0.05~0.1 的风险源为次关键风险源,共 4 个,占比 25%;取敏感系数小于 0.05 的风险源为非关键风险源,共 2 个,占比 12.5%^[11],如表 3 所示。

由表 3 知,安全防护设施、养护管理等为关键风险源,需重点防控。与海南实地调研结果相符:高速公路养护期间,管理者常将防撞桶等安全防护设施放置于距作业区很近处(规范中高速公路养护过程安全警告区不得小于 1 600 m),导致驾驶员来不及采取制动措施而发生碰撞的事故。将台风和不良地质被列为非关键风险源是因为,在这些极端气候条件下,一般不进行养护作业,故不会发生安全事故,但在养护过程中遇到这些灾害,后果将很严重。故应对台风和不良地质等灾害做好预警预报,避免在灾害气候下进行养护作业。

表 3 各安全风险事件对应的风险源分析表
Tab.3 Comprehensive analysis on risk sources

序号	风险因素代号	敏感系数	风险源	风险级别
1	X2	0.49	安全设施设置	关键风险源
2	X13	0.21	施工区布置	关键风险源
3	X18	0.16	养护管理	关键风险源
4	X5/X12/X22	0.149	不良路段	关键风险源
5	X1	0.14	安全防护设施	关键风险源
6	X15	0.14	养护操作	关键风险源
7	X8/X6	0.13	非机动车	关键风险源
8	X10	0.13	能见度	关键风险源
9	X9	0.125	交通组织	关键风险源
10	X17	0.1	违章作业	关键风险源
11	X14	0.08	养护机械	次关键风险源
12	X7	0.063	违章驾驶员	次关键风险源
13	X19	0.052	养护材料	次关键风险源
14	X16	0.05	安全培训	次关键风险源
15	X3/X20	0.03	台风	非关键风险源
16	X4/X11/X21	0.023	不良地质	非关键风险源

3.3 风险控制策略

养护作业区内事故、社会车辆相撞和社会车辆与养护器械相撞是海南高速公路养护作业中的三大事故类型。根据敏感性分析结果,有针对性地制定可能导致上述事故的风险源的控制策略。

养护作业区内事故的关键风险源是:养护安全管理、违章作业和养护操作。对此,应该在养护期间派专门巡视人员对作业区进行监督,一经发现违规、违章现象立即制止;加强养护人员的技能培训,可以考虑养护作业人员特别是养护机械操作人员持证上岗,提高养护作业队伍的知识水平。

社会车辆相撞的关键风险源是:不良路段、能见度和非机动车。对此,在小半径圆曲线路段/长大下坡等特殊路段作业时,严格按照规范布置作业区,另外结合道路容错理念可以在特殊路段上游设置可提携式震动带,配合语音提示,提醒驾驶员主动减速;养护作业路段应严禁非机动车通行,必要时可以分流大货车,减少交通冲突。

社会车辆闯入养护作业区的关键风险源是:安全防护设施和违章驾驶员。对此,应严格按照规范摆放安全防护设施,并在上游过渡区设置水马,减少事故损失;在交通量大的路段最好能配置交警进行交通疏导。

4 结语

1) 运用 WBS-RBS 分析法全面辨识出海南高速公路养护过程中 17 个风险源,有效解决了海南高速公路养护过程环境复杂、不确定因素多而导致风险分析不完善的问题。

2) 将 WBS-RBS 分解结构与故障树模型进行耦合,简化了其结构,提高了其在复杂系统问题分析中的适用性。同时定性分析和定量分析相结合,提高了风险分析结果的可信度。

3) 根据求得的敏感系数值将辨识出的 16 个风险源分为关键风险源、次关键风险源、非关键风险源 3 级,

便于风险分级管理。但风险分级标准的确定研究不足,该分析方法有待继续完善。

4) 根据风险源的分级结果,有针对性地提出风险控制策略。

参考文献:

- [1] 胡万欣,刘玉露,周则程,等. 基于 IAHP 的低碳绿色高速公路评估研究[J]. 华东交通大学学报,2015,32(3):70-77.
- [2] 刘维民. 基于敏感性分析的改扩建高速公路安全性评价[J]. 公路,2015,60(2):131-138.
- [3] 吴彪,许洪国,戴彤焱. 高速公路施工区行车安全影响因素辨识方法的比较研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(1):95-98.
- [4] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York:Mcgraw-Hill,1980:150-200.
- [5] 王敏. 基于多维矩阵 WBS 的施工项目成本动态控制研究[D]. 北京:中国矿业大学,2015:25-30.
- [6] 程鸿群,余佳雪,袁宁,等. 深基坑工程施工过程风险综合评价[J]. 同济大学学报:自然科学版,2016,44(3):491-498.
- [7] 周红波,高文杰,蔡来炳,等. 基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析[J]. 岩土力学,2009,30(9):2703-2707.
- [8] 史定华,王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京:北京师范大学出版社,2011:99-123.
- [9] 周靖轩,阮德振,宋文华. 基于成功流法与故障树法比较分析的火灾自动报警系统可靠性综做[J]. 南开大学学报:自然科学版,2016(4):104-111.
- [10] 熊鑫,郭忠印,方勇. 山区高速公路立交出口匝道区域可变限速研究[J]. 华东交通大学学报,2014,31(2):20-25.
- [11] 杨乾辉. 地铁深基坑工程安全风险辨识和评价研究[D]. 长沙:中南大学,2013.

Risk Identification and Assessment of Hainan Expressway Maintenance Based on Coupling of WBS-RBS and Fault Tree Analysis

Liu Benmin¹, Zhao Wei¹, Zhu Caiquan², Xiao Dianliang³

(1.College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804; 2. Department of Transportation of Hainan Province, Haikou 570100; 3. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the present situation of frequent accidents in Hainan expressway maintenance, a risk identification method combining WBS-RBS with fault tree analysis is put forward. Based on the accident investigation and statistical analysis in Hainan expressway maintenance, work breakdown structure (WBS) and risk breakdown structure (RBS) are integrated and risk matrix is carried out for the analysis and identification of risk factors. Combining the method of fault tree analysis with the risk sources, three main kinds of accidents of Hainan expressway maintenance are explored by FreeFta fault tree analytical software. Finally, according to the sensitive coefficient values, the risk sources are divided into three levels, according to which precaution measures of risk events are taken. Research results may provide reference for risk identification and assessment of expressway maintenance.

Key words: expressway maintenance; work breakdown structure(WBS); risk breakdown structure(RBS); fault tree analysis; risk identification; risk assessment

(责任编辑 姜红贵 李 萍)