

基于风险理念的公路隧道预防性养护管理研究<sup>\*</sup>王平让<sup>1</sup>, 豆海涛<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450046; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 随着隧道工程建设的快速发展, 隧道病害问题日益突出。文中在总结国内外隧道养护管理方法和技术的基礎上, 将预防性养护和风险理念相结合, 提出基于风险理念的公路隧道预防性养护管理模型, 该模型以减少隧道衬砌病害对结构性能劣化和对行车安全的影响为养护管理目标, 使养护更有针对性且高效; 利用该模型对实际公路隧道进行分析, 验证其适用性和可行性。

**关键词:** 工程管理; 隧道; 风险理念; 预防性养护

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0155-04

基于风险理念的基础设施检测维护方法能帮助管理部门对养护和投资作出正确决策, 将基础设施故障概率及后果降到最低。在基于风险理念的基础设施养护方面, Vesely W. E. 等制定了基于风险概率评估的养护策略; Vaurio J. K. 考虑相关安全风险因素, 对养护模型进行优化并提出了相应养护流程; Hagemeijer P. M. 等开发了基于风险理念的养护管理模式和养护方法; Dey P. M. 建立了基于风险理念的市政管道养护管理模型和养护方法, 并应用到实际市政管道养护中, 得到了合适的养护频率; Khan F. I. 等提出了基于风险理念的设施养护模型和养护方法; Faure R. M. 等分析并预测了隧道在服役期间的性能, 并对其养护进行了优化; 缪佳敏通过上海地铁隧道病害调查, 提出了基于风险理念的软土地区城市轨道交通盾构隧道养护方法。

道路预防性养护是用合理的方法、在合适的时间、在恰当的路段进行养护, 改善道路的功能状况。在公路隧道预防性养护方面, 蒋雅君等对公路隧道预防性养护理念下的隧道性能、养护管理和养护成本进行了初步分析; 李燕针对隧道内水泥砼路面抗滑性能开展了预防性养护研究; 韩兴博等采用理论近似方法计算劣化可靠度, 基于风险最优给出隧道预防性养护决策过程, 构建了隧道预防性养护决策框架; 刘玲等提出了基于 BIM 和 GIS 技术的公路预防性养护方法; 周健等开展了公路隧道预防性养护管理系统研究。该文将风险理念和预防性养护相结合, 以减少隧道衬砌病害对结构性能的劣化和对行车安全的影响为养护管理目标, 提出基于风险理念

的公路隧道预防性养护管理方法和模型。

## 1 基于风险理念的预防性养护方法

基于风险理念的养护方法的主要目的是降低由于设施损坏可能导致的风险, 由风险评价和养护规划构成, 对高风险构件增加检查频率, 对构件进行更彻底维护, 并采取更强的维护措施。预防性养护的主要目的是在设施损坏前, 在合适的时间、采用合理的方法、采取主动的养护措施。将风险理念和预防性养护相结合, 建立图 1 所示基于风险理念的预防性养护方法。

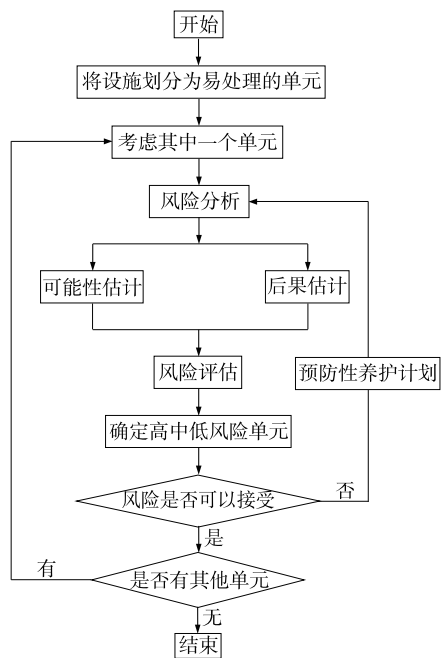


图 1 基于风险理念的预防性养护方法

<sup>\*</sup> 基金项目: 河南省科技攻关计划(社发领域)项目(192102310489; 202102310243)

## 2 基于风险理念的预防性养护模型

Tummala V. M. R.等提出的包括5个核心元素的风险管理过程(RMP)见图2,它是一种量化风险管理方法。将养护引入RMP中形成基于风险理念的养护管理模型,该模型可克服其他养护管理模型的缺陷,能考虑风险的后果,且可根据辨识的不同风险事件确定相应的养护策略。文献[22]利用RMP框架构建了基于风险理念的养护管理模型(RBMMM),将风险理念引入养护中,以减少对行车安全的影响为主要目标,使养护更高效。该模型考虑了风险事故发生概率及可能造成的后果严重程度,从风险的角度对养护管理活动提供一个新的技术分析思路,具有较好的操作性。

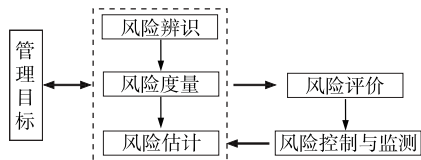


图2 风险管理过程(RMP)的基本框架

参考以上模型,采用工程风险管理理论分析方法,结合中国公路隧道运营养护管理实际情况,将风险理念和预防性养护相结合,以减少隧道衬砌病害对结构性能的劣化和对行车安全的影响为养护管理目标,提出图3所示基于风险理念的预防性养护管理模型(RBPMMP)。该模型分为如下模块:

(1) 养护管理目标。在不同内部和外部因素综合影响下,决策者通过考虑隧道使用者的要求,确定隧道需达到的高效、适用的养护操作状态。基于风险理念的公路隧道预防性养护管理模型以减少隧道衬砌病害对结构性能的劣化和对行车安全的影响为养护管理目标。

(2) 结构分解。按照各种风险因素出现的情况将隧道衬砌结构分为几个相对独立的部分。

(3) 风险辨识。发现并解释各种风险因素。

(4) 风险度量。分析风险发生可能造成的后果严重程度。

(5) 风险估计。估计风险发生的概率水平。

(6) 风险评价。根据养护管理目标将辨识的风险进行分级,即确定风险接受准则,并制定相应风险规避计划。

(7) 预防性养护执行。按照风险评价阶段制定的风险规避计划进行预防性养护操作。

(8) 风险控制与监测。实施风险规避计划,并对所做的预防性养护进行跟踪监测。

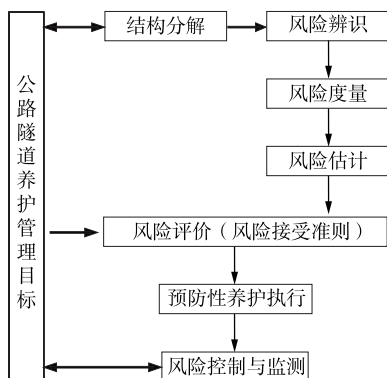


图3 基于风险理念的预防性养护管理模型

## 3 基于风险理念的预防性养护流程

以河南省洛栾(洛阳—栾川)高速公路某运营隧道衬砌病害为例,应用上述基于风险理念的公路隧道预防性养护管理模型进行隧道养护管理,验证模型的适用性和可行性。

### 3.1 养护管理目标

隧道养护管理目标受内部和外部因素的综合影响,而内部因素受政府需求和业主需求的影响。政府主要关心标准、法规的变化和更新,业主则主要关心隧道衬砌结构的服役性能、运营安全和运营成本。根据隧道衬砌结构实际情况,综合考虑政府和业主的养护管理需求,隧道衬砌病害的养护管理目标可归纳为减少隧道衬砌病害对结构性能和行车安全的影响。

### 3.2 结构分解及风险辨识

在进行风险分析和风险评价前,先分析衬砌病害对隧道结构和行车安全的影响,再对隧道结构进行分解并进行风险辨识。采用文献[22]提出的失效模式和影响分析方法对隧道衬砌结构病害进行风险辨识。

### 3.3 风险度量

将公路隧道衬砌病害风险等级量化为4级,判定标准见表1。

综合考虑各种风险因素对隧道结构性能和行车安全的影响,得到该隧道各评估段的病害后果水平CSL(见表2)。

### 3.4 风险估计

采用合适的风险发生概率估算方法对辨识出的风险因素潜在发生概率进行估算。RBPMMP模型

表 1 风险因素危害等级判定标准

危害程度	对隧道行车安全的影响	对隧道衬砌结构的影响	风险等级
非常严重	严重影响	衬砌结构崩溃、坍塌	4
显著	影响	在较短时间内衬砌表面凸凹不平	3
需要考虑	不久可能影响	衬砌表面易损坏	2
可忽略	几乎不影响	使用初期需注意	1

表 2 隧道病害后果水平

区段号	CSL	区段号	CSL	区段号	CSL	区段号	CSL
1	3	6	2	11	1	16	3
2	2	7	3	12	1	17	3
3	2	8	1	13	2	18	3
4	3	9	2	14	2	19	2
5	2	10	3	15	3	20	1

将隧道病害风险概率分为频繁发生、可能发生、偶尔发生、很少发生和不可能发生 5 级,其风险概率分级、定性描述、定量描述及风险级别见表 3。

表 3 风险概率分类

风险概率分级	定性描述	定量描述	级别
频繁发生	运营期频繁出现	$P \geq 10\%$	5
可能发生	运营期多次出现	$1\% \leq P < 10\%$	4
偶尔发生	运营期偶尔出现	$0.1\% \leq P < 1\%$	3
很少发生	运营期可能出现	$0.01\% \leq P < 0.1\%$	2
不可能发生	运营期不会出现	$P < 0.01\%$	1

根据该隧道病害调查分析结果,综合考虑评估区段内衬砌病害情况,得到各评估区段的风险概率水平 RPL(见表 4)。

表 4 隧道病害风险概率水平

区段号	RPL	区编号	RPL	区段号	RPL	区编号	RPL
1	4	6	4	11	5	16	3
2	3	7	3	12	5	17	3
3	4	8	5	13	4	18	3
4	5	9	4	14	5	19	4
5	4	10	3	15	4	20	5

3.5 风险评价

风险评价主要是确定风险值 REV。风险值综合反映风险因素的发生概率及产生后果的严重程度,可作为养护管理决策依据。参考文献[23],采用式(1)计算风险因素的 REV,计算结果见表 5。

$$REV = CSL \cdot RPL \tag{1}$$

表 5 风险因素对行车安全和隧道结构危害的风险值

区段号	REV	区段号	REV	区段号	REV	区段号	REV
1	12	6	8	11	5	16	9
2	6	7	9	12	5	17	9
3	8	8	5	13	8	18	9
4	15	9	8	14	10	19	8
5	8	10	9	15	12	20	5

为便于分析,将 REV 分为 4 个水平,每一水平对应于 REV 数值上的一个区间。根据文献[24]将风险接受准则定为 4 级,不同风险等级需采用不同风险管理和控制措施(见表 6)。

表 6 风险分级及风险接受准则

危害或影响	接受准则	风险等级	REV	区段数/个
对隧道衬砌结构和行车安全的危害	拒绝接受	4	16~25	0
	不可接受	3	9~15	9
	可接受	2	4~8	11
	可忽略	1	1~3	0

由表 6 可知:考虑病害对隧道结构性能和行车安全的影响,该隧道各评估区段属于可接受或不可接受的水平,其中可接受的区段 11 个,不可接受的区段 9 个,无拒绝接受和可忽略的风险因素。

3.6 预防性养护执行

对隧道结构病害的预防性养护管理最终体现在养护实施上。根据风险接受准则确定的预防性养护管理措施见表 7。

表 7 基于风险理念的预防性养护管理措施

风险等级	危害程度	接受准则	风险处置措施	养护建议
1	低度	可忽略	日常管理和审视	日常检查养护
2	中度	可接受	需注意,加强日常管理审视	日常检查养护
3	高度	不可接受	引起重视,需采取防范、监控措施	整治
4	极高	拒绝接受	立即停止,需整改、规避或启动预案措施	修复及抢险

3.7 风险控制与监测

预防性养护结束后,通过定期检查和监测对预防性养护效果和质量进行检查,监测反馈信息有助于管理人员进行正确的预防性养护管理。例如如果由于某一风险因素的养护频率减少导致风险事件发生,那么就需要加大养护频率。

## 4 结语

将风险理念和预防性养护相结合,提出基于风险理念的公路隧道预防性养护管理模型,该模型以减少隧道衬砌病害对结构性能的劣化和对行车安全的影响为养护管理目标,使养护管理更具有针对性。在预防性养护执行过程中,根据风险评估等级分别对各风险因素进行不同处理,可在有限的时间和资金条件下使养护更高效。在预防性养护结束后,通过对各风险因素的动态控制与监测,实时制定新的预防性养护计划,可实现对隧道的动态养护管理。

## 参考文献:

- [1] BROWN S J, MAY I L. Risk-based hazardous protection and prevention by inspection and maintenance[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2003, 122(3): 362—367.
- [2] LOGANATHAN Krishnasamy, FAISAL Khan, MAHMOUD Haddara. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18: 69—81.
- [3] VESELY W E, BELHADJ M, REZOS J T. PRA importance measures for maintenance prioritization applications[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1993, 43: 307—318.
- [4] VAURIO J K. Optimization of test and maintenance intervals based on risk and cost[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 49: 23—36.
- [5] HAGEMEIJER P M, KERKVELD G. A methodology for risk-base inspection of pressurized systems: Selected topics on aging management, reliability, safety and license renewal[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1998, 212(1): 37—47.
- [6] DEY P M. A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2001, 40(4): 24—31.
- [7] KHAN F I, ABBASI S A. Analytical simulation and Profat II: A new methodology and a computer automated tool for fault tree analysis in chemical process industries[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 75: 1—27.
- [8] FAURE R M, LARIVE C, RIVAL F. A new approach for determining middle and long term maintenance costs for large underground works[C]. The Proceeding of the ITA-AITES World Tunnel Congress, 2010.
- [9] 缪佳敏. 基于风险理念的软土地铁盾构隧道结构养护方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [10] 张国梁. 预防性养护最佳时机的确定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] 董瑞琨, 孙立军, 彭勇. 路面预防性养护时机确定方法探讨[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(3): 31—35.
- [12] 刘汝晓. 公路预防性养护最优化决策与研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [13] 张萌. 预防性养护政策及关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [14] 蒋雅君, 陶磊, 魏晨茜, 等. 运营公路隧道预防性养护研究初探[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊 2): 15—20.
- [15] 李燕. 隧道内水泥混凝土路面抗滑性能预防性养护研究[J]. 公路, 2020(4): 352—354.
- [16] 韩兴博, 叶飞, 王永东, 等. 劣化可靠度下的隧道衬砌结构预防性养护决策[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 104—115.
- [17] 刘玲, 孟庆昕, 刘晓东, 等. 基于 BIM 和 GIS 技术的公路预防性养护研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015(4): 13—15.
- [18] 周健, 杨洋, 付立家. 公路隧道预防性养护管理系统研究[J]. 公路交通科技, 2011(6): 131—134.
- [19] 刘耘. 高速公路沥青路面预防性养护管理决策[J]. 公路与汽运, 2020(3): 152—155.
- [20] TUMMALA V M R, BURCHETT J F. Applying a risk management process (RMP) to manage cost risk for an EHV transmission line project[J]. International Journal of Project Management, 1999, 17(4): 223—235.
- [21] NG M F, RAO V M Tummala, RICHARD C M Yam. A risk-based maintenance management model for toll road/tunnel operations[J]. Construction Management and Economics, 2003, 21(7): 495—510.
- [22] MCANDREW I, FMEAS O' Sullivan J. A manager's handbook: TQM practitioner series[M]. Technical Communications Publishing Limited, Hitchin, 1993.
- [23] GROSE V L. Managing risk-systematic loss prevention for executives [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1987.
- [24] 中华人民共和国交通部. 公路隧道建设安全风险评估指南(试用本)[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2009.