

# 以可靠性为中心的维修方法及其在隧道中的应用

王景春<sup>1</sup>, 房思思<sup>2</sup>, 李晓萌<sup>2</sup>, 张伟<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所, 石家庄 050043)

**摘要:** 本文针对目前隧道监控维修状况及存在的问题, 提出以可靠性为中心的维修(RCM)作为维修理念, 并将其引入到隧道管理中, 对隧道设备的故障模式及可靠性进行分析, 并对 RCM 方法在隧道监控维修中的应用做了初步研究。最后通过案例说明, 隧道采用 RCM 方法可有效降低维修费用, 具有一定的经济效益和社会效益。

**关键词:** 隧道; 可靠性; 维修; 监控; 故障分析

**中图分类号:** U25      **文献标识码:** A

## Reliability-centered Maintenance Method and Its Application in a Tunnel

Wang Jingchun<sup>1</sup>, Fang Sisi<sup>2</sup>, Li Xiaomeng<sup>2</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Structure Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** This study is presented in view of the current tunnel monitoring maintenance status and existing problems, and proposes reliability-centered maintenance (RCM) as a maintenance concept. RCM can be introduced into tunnel management. Accordingly, a preliminary study on the application of the RCM method in tunnel monitoring maintenance is performed through the tunnel equipment failure mode and a reliability analysis. Finally, by adopting a case, this study shows that a tunnel using the RCM analysis method can effectively reduce the maintenance cost, and has certain economic and social benefits.

**Keywords:** tunnel; reliability; maintenance; monitoring; failure analysis

### 一、前言

随着经济的快速发展, 我国对交通的需求量日益增加, 对交通安全的要求也越来越严格, 且新建交通基础设施明显增加。鉴于我国地理形势严峻复杂, 使得隧道成为交通事业中主要的发展方向。随着科学技术的不断发展, 现代化工程结构演变的更

加复杂, 功能更趋于完善。但在发展过程中许多结构仍面临着无法避免的影响因素 [1], 特别是近些年来隧道“老龄化”凸显, 频发的交通事故和自然破坏增加了设备故障率, 这些因素阻碍了隧道的正常运行。而目前传统的维修方法常导致大量人员和资源浪费, 这给工程结构的维修带来巨大的经济损失。我国正从隧道的大范围建设模式向大范围维

收稿日期: 2017-11-18; 修回日期: 2017-11-30

通讯作者: 王景春, 石家庄铁道大学, 教授, 主要研究方向为工程结构安全与监测控制; E-mail: wjc36295@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“交通基础设施重大结构安全保障战略研究”(2015-XZ-28)

本刊网址: www.enginsci.cn

修模式转变，隧道的维修和管理已成为隧道工程中的一个重要问题。

二、RCM 的基本观点和优势

(一) RCM 的产生与基本内涵

我们将维修大概划分为三个时段：第一时段是以功能故障修复为主；第二时段主要集中在维修计划与安排方面；第三时段则关注预防、监测和避免失败的后果。第三时段的维修从 20 世纪 70 年代左右开始，改变了对当时的失败模式的认识。大量的研究发现 [2~4]，条件故障概率与时间有关的比例大概占 11%，剩下的 89% 均与时间无关。这就意味着，以时间为基础的定时维修并不能处理和完善大多数故障模式。这一结论直接挑战了传统的“及时处理故障完全依赖定期预防性维护”的理念，同时刺激了新的维修概念和优化技术的诞生。

以可靠性为中心的维修 (reliability centered maintenance, RCM) 属于第三时段具有代表性的维修模式 [5~7]。这种维修思想最早起源于美国的民航界，发展已超过半个世纪，其定义在不同的领域有所不同。然而，最主要和最基本的定义是：RCM 是一个确定在使用时对有形资产有维护需求的过程。所以，从本质上讲它是一种制定决策的分析方法。RCM 以风险分析和可靠性方法为基础，以失效模式和故障后果作为制定维修策略的主要依据，然后以最少的维修资源消耗、运用逻辑决断分析方法来确定维修内容和方式，并制定出预防维修大纲从而达到优化和延长使用寿命的目的。

(二) RCM 的优势

1. 与传统维修方式的对比  
作为一种优化的维修策略，RCM 的概念和原

理比较系统化，可以为现代企业设备的发展提供科学的指导方法。其在概念及应用上与传统维护方法存在显著差异，具体见表 1。

2. 与其他维修策略的对比

对设备故障原因及其所造成的后果有不同层次的理解将会对应不同的维修方法，如图 1 所示。如果对设备故障（模式、现象、概率）、故障原因及其可能造成的后果尚不清楚，只能进行事后修复 (BM) 和定期维护 (TBM)；如果能在设备状态和变化趋势上实现监测或定期检测，便可以实施状态维修 (CBM)；如果已知故障的概率和后果，则可以使用 RCM，同时掌握故障机制和故障的初始原因，即可以主动去修理，进行根治维修 (RM)。

三、隧道维修现状

在国民经济快速发展的大背景下，铁路作为我国经济的大动脉，近年来发展空间不断扩大。我国地理形势严峻复杂，这也给隧道的快速发展提供了更大的平台和契机。

有相关数据统计，到 2015 年年底，全国在建的铁路隧道总共 3 784 条，总长度为 8 692 km，规划中的隧道总共 4 384 条，总长度为 9 345 km；总共 13 411 条运营隧道，总长度为 13 038 km。2015 年新建成通车铁路隧道 1 316 条，全长 2 160 km，其中 18 条隧道长度超过 10 km，总长 245 km [8]。我国已经是世界上隧道规模最大、数量最多和修建技术发展最快的国家，不难看出我国隧道拥有的市场很大。另外，隧道经过一定时期的运行后，需要对其进行维修和养护，然而现有的维修方式大多采用对故障进行逐一排查后再进行修复的模式，这种维修方式效率较低，而且隧道一旦发生故障，将会被迫停止运行或导致更严重的后果。鉴于这些原因，

表 1 RCM 与传统维护方法的比较

传统维护	RCM 维修	备注
设备的使用直接导致设备故障的发生，只要根据使用时间定期对设备进行维护即可	设备或者系统故障和劣化与使用时间未必有直接关系，定时计划维修不一定好	复杂与简单设备存在很大的差别
预防性维修提高了固有的可靠性	预防性维修不能提高固有可靠度	可靠度是设备或者产品的固有属性
没有隐蔽故障和多重故障的概念	根据可靠性和历史经验的原则，可消除隐蔽故障，或防止多重故障	这是可靠性理论的基础之一
通过更新改造来提高设备的性能	通过改进使用和维修方式，也实现了功能类似的效果	经济因素也是维修的一个考量因素

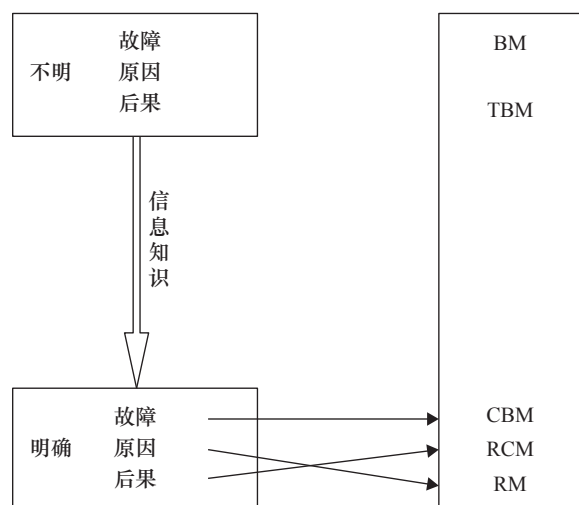


图1 基于对设备了解程度的不同维修方式

一个新的运营理念引起研究者的关注，这就是以可靠性为中心的维修。

### （一）隧道监控系统维修现状

对运营隧道监控系统进行维修和保养，重点工作在于对隧道内各类设施和隧道整体运行状态的安全监视、监测和隧道必要的通信设施，及相应的系统设备的监测和故障应急管理。

隧道监控系统对整个隧道的正常运行起着关键性的作用，在隧道运行过程中相当于一个管理者。未能有效地解决或及时修理相关设施或系统，会导致城市地区交通的混乱。因此，最终的目标和主要原则就是有效地预防和处理好隧道监控系统。

2013年，厦门市的一场暴雨导致了梧村隧道发生洪水，这次灾害造成了3h的交通堵塞。2017年，北京北站地下隧道由于暴雨导致上下行线近1km区域内的道路全部被淹，隧道高4.5m，淹水水位距离隧道顶端约1.5m，此次事故还导致了北京城区部分路段断交。还有很多这样的隧道事故，都带来了严重的经济损失甚至人身伤害。造成这些损失的原因不单是自然灾害，设备无法良好运行、预防及应急措施不到位等也是其中很重要的原因。所以，隧道内各类设备的良好维护对隧道的正常运行发挥着极其重要的作用。

### （二）隧道监控系统维修中存在的问题

常见的隧道监控设备有较强的隐蔽性，它相比较于其他设备存在很多特殊的地方，大部分采

用传统隧道监控系统的维护方法：终端产品和设备的维修和保养，设备和产品的预定报废，以及在一定年限之后进行的改善和维护。这种方法基本上是被动的，没有针对性的维护。在日常生产过程中，维修人员只针对“看得见”的设备发生破坏的地方进行维修，而不是进行定期的系统性的检测和维修。此外，对于没有经任何相关的检查和维护的内部功能设备的“隐形”系统，仅根据传统的使用经验和设备使用寿命进行单一定期维修，这样没有考虑到设备实际运行情况。然而改进的维护也并不具有针对性，没有考虑到监控系统使用条件和实际情况，仅仅依靠传统的经验。该方法不能有效避免损失，而且未能识别出隐蔽故障，需要花费很长的时间去检查和维护。当系统发生不能避免的功能性缺陷，甚至很严重的故障后果时，例如，系统瘫痪，维修人员将没有具体策略和有效措施去应对。

## 四、隧道 RCM 分析

隧道监控系统可以确保行车安全和避免交通事故的发生，有效的减轻城市交通压力。将 RCM 的分析方法引入到隧道中去，可以使其发挥更重要的作用。

### （一）隧道监控 RCM 分析过程

对隧道监控系统进行 RCM 分析，要从以下六个方面入手：①故障信息的采集；②故障模式的分析；③明确故障原因；④故障影响及后果的评估；⑤制定维修策略；⑥根据已有经验数据不断更新优化策略库。

只有非常清楚其定义和理解隧道内各种设施的功能和故障，才能对上述六个方面进行详细的描述。要做到这一点，需要我们找到所有设备的故障模式，把它们按照造成影响的严重程度依次进行分类和排序，根据排序结果决定是否采取预防措施以及采取何种预防措施来对付故障。这就是故障模式及影响分析（FMEA）。一般流程的 RCM 分析具体如图2所示[9,10]。

### （二）隧道 RCM 故障分析

在进行隧道 RCM 分析时，首先要识别故障模

式，然后对其可靠性进行一定的分析才能做到有效的维修管理。下面以具体的隧道风机分析为例进行阐述。

平均故障时间（MTBF）是指在一段时间内，平均每两次失效模式的平均时间。

$$MTBF = \frac{\text{一段时期的总工作时间}}{\text{该段时间内故障次数}} \quad (1)$$

根据风机在隧道内的运行情况，该风机在运行的 3 000 h 内，总共发生了 4 次故障，根据公式（1）可得平均故障时间为：

$$MTBF = 3\,000 \div 4 = 750 \text{ h}$$

假设该风机的故障率符合指数分布规律，

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2)$$

那么它的可靠度为：

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t} = e^{-t/MTBF} \quad (3)$$

式（3）中， $f(t)$  为风机故障率分布函数； $\lambda$  为风机在一定时间内发生故障的次数； $t$  为风机运行时间。

如果该风机的可靠度要求达到 80%，即  $R(t) = 0.8$ ，那么根据公式（3）可得：

$$T = \ln R(t) \times MTBF = 0.223 \times 750 = 167 \text{ h}$$

从以上分析可以看出，如果风机的可靠度要求达到 80%，那么风机检修周期应该保持在 167 h 左

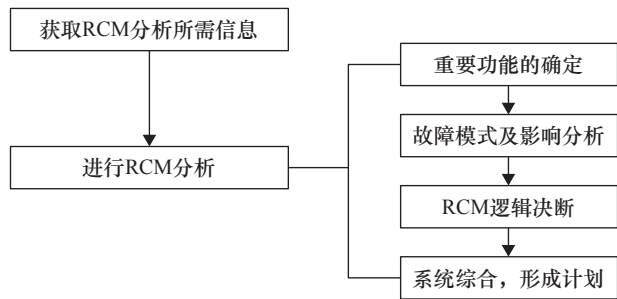


图 2 RCM 分析的一般流程

右。将该风机运行时间与隧道监控平台对接，在达到此检修周期时，系统会自动提示工作人员进行隧道维修。

## 五、隧道引入 RCM 的应用和效益

虽然在前期工作中付出了很多的时间和精力，但后期得到的回报将远大于之前的投资。RCM 的引入在一定程度上削减了各种类型的费用，包括设备维修费、设备报废和再采购费，以及人事费。隧道维修策略得以优化 [11~13]，改造维修过程变得更加有规划性和目的性。

### （一）成本降低

引入 RCM 可以降低维修成本，主要体现在两个方面。一方面，通过 RCM 制定出得到优化的策略，这样减少了日常项目维修需要的经费，同时也延长了维修需要的时间间隔；另一方面，为了保证整个系统的稳定性，降低大型设备故障率及维修成本，增加了一些配件或小配件的定期保养。表 2 为南京某隧道引入 RCM 管理前后维修费用对比结果。

### （二）安全性提高

这里所指的安全性提高主要体现在两个方面，一是保障了行车人员的安全，二是增强了城市环境的安全。在引入 RCM 后，隧道可以保证系统的稳定运行，防止因隧道故障导致的特殊故障或自然灾害造成的经济损失或人身伤害 [14]。RCM 的引入使隧道可以正常运行，保障了道路的顺利通行，减缓了地面行车压力，减少了废气污染物的排放，有利于城市环境保护，同时也减少了环境污染对市民健康的影响。

### （三）社会效益增长

交通拥堵会给国家带来巨大的经济损失，2012

表 2 优化维修前后总费用对比

内容	传统花费 / 万元	RCM 花费 / 万元	节省金额 / 万元	降低百分比 / %
日常维护	672.43	552.2	120.23	17.88
设备检修	248.57	206.24	42.33	17.03
成本	382	341	41	10.73
其他	117.22	118.43	-1.21	-1.03
总计	1 420.22	1 217.87	202.35	14.25



年《人民日报》刊登的一篇文章表明：“交通拥堵造成的影响可以使中国 15 个城市每天损失 10 亿元。”文章通过对隧道设备进行故障模式和可靠性分析，得到当设备风机可靠性达到一定程度时所需要的维修周期，在这个周期内进行维修大大降低了设备故障发生概率和设备的损坏率，使隧道设备基本处于良好的操作环境，这无疑缓解了地上交通的压力。另外，当隧道引入 RCM 对设备故障进行分析后，可通过具体情况制定出最优维修策略确保隧道正常运行，给公民营造了一定程度的安全感，经济损失也明显下降。

## 六、结语

RCM 是一种极具现代化的维修管理模式，相比较于其他的传统维修方法，其优势在各个领域都已被证实。它的实用、科学、专业、高效的特点也是未来维修管理模式发展的必然趋势，也是唯一的出路。笔者结合我国隧道维修现状和实际工程中遇到的问题，创新性地将可靠性理念运用其中，对隧道的维修提出了一套切之可行的管理模式。目的是在有限的资源下，提供对隧道更为有利的管理、维修和运营。相信随着国内功能性隧道的逐渐普及，RCM 的高效性和实用性将有更大的发展空间。

### 参考文献

- [1] 李佳翰, 王泰典, 薛文城, 等. 隧道维修补强技术与案例探讨 [J]. 隧道建设, 2010, 30(s1): 113–119.  
Li J H, Wang T D, Xue W C, et al. Tunnel repair reinforcement technology and case discussion [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(s1): 113–119.
- [2] Li D C, Gao J J. Study and application of reliability-centered maintenance considering radical maintenance [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(5): 622–629.
- [3] Afefy I H. Reliability-centered maintenance methodology and application: A case study [J]. Engineering, 2010, 2(11): 863–873.
- [4] Zhong H C, Lu C W, Li B L. Case retrieval mechanism of the intelligent RCM analysis system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 1069(40): 686–691.
- [5] 刘文彬, 王庆锋, 高金吉, 等. 以可靠性为中心的智能维修决策模型 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(5): 672–677.
- [6] Liu W B, Wang Q F, Gao J J, et al. The intelligence of reliability centered maintenance decision-making model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(5): 672–677.
- [7] 高金吉. 石化设备以可靠性为中心的智能维修系统 [J]. 中国设备工程, 2008(1): 2–4.  
Gao J J. Petrochemical equipment reliability centered intelligent maintenance system [J]. China Equipment Engineering, 2008(1): 2–4.
- [8] 王庆锋, 刘文彬, 高金吉, 等. 往复压缩机以可靠性为中心的维修研究与应用 [J]. 压缩机技术, 2010(5): 4–7, 11.  
Wang Q F, Liu W B, Gao J J, et al. Reciprocating compressor reliability centered maintenance research and application [J]. Compressor Technology, 2010(5): 4–7, 11.
- [9] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况 [J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351–364.  
Wang M S. China's railway, tunnel and underground space development [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 351–364.
- [10] 乌家玫. 隧道监控系统中的故障诊断 [J]. 电气自动化, 2014, 36(1): 8–9, 96.  
Wu J M. Fault diagnosis in the tunnel monitoring system [J]. Electrical Automation, 2014, 36(1): 8–9, 96.
- [11] Zhi M L, Feng S, An S C, et al. RCM analysis for insulating switch in substation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3488(641): 1231–1237.
- [12] 武禹陶, 贾希胜, 温亮, 等. 以可靠性为中心的维修(RCM)发展与应用综述 [J]. 军械工程学院学报, 2016, 28(4): 13–21.  
Wu Y T, Jia X S, Wen L, et al. A review of reliability centered maintenance (RCM): Development and application [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2016, 28(4): 13–21.
- [13] 王庆锋, 高金吉. 过程工业动态的以可靠性为中心的维修研究及应用 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 135–143.  
Wang Q F, Gao J J. Research and application of dynamic reliability centered maintenance for process industry [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 135–143.
- [14] 杨立飞, 陈宇, 黄立军, 等. 以可靠性为中心的维修在风电行业的应用 [J]. 中国设备工程, 2014(10): 45–48.  
Yang L F, Chen Y, Hang L J, et al. Reliability centered maintenance in the application of wind power industry [J]. China Plant Engineering, 2014(10): 45–48.
- [15] 李晓明, 杨超, 陈世均, 等. 以可靠性为中心的维修的经济效益评估模型 [J]. 工业工程与管理, 2005, 10(3): 110–114.  
Li X M, Yang C, Chen S J, et al. The evaluation model for the economic benefits of reliability-centered maintenance [J]. Industrial Engineering and Management, 2005, 10(3): 110–114.