

四川省2018—2020年高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2018-1025)
四川省第二批职业院校紧缺领域教师技艺技能传承创新平台
四川省教育厅2018年科研项目(18ZB0393)

联合资助

公路 隧道健康状况 评估标准量化研究

邓林 谢立广 著



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

公路隧道健康状况评估标准量化研究 / 邓林, 谢立广著. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.8
ISBN 978-7-5643-8239-1

I. ①公… II. ①邓… ②谢… III. ①公路隧道 - 评估 - 研究 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 181272 号

Gonglu Suidao Jiankang Zhuangkuang Pinggu Biaozhun Lianghua Yanjiu

公路隧道健康状况评估标准量化研究

邓 林 谢立广 著

责任编辑	韩洪黎
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	8.5
字 数	109 千
版 次	2021 年 8 月第 1 版
印 次	2021 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8239-1
定 价	48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

PREFACE

我国是一个多山的国家，随着高等级公路的快速发展，公路隧道日益增多。同时，公路隧道断面大、支护结构形式多样、施工技术复杂、运营管理监控技术相对落后，各种病害如渗漏水、衬砌裂损、衬砌冻害、衬砌腐蚀等尤为普遍，严重影响了公路隧道的正常运营，因此对公路隧道运营的健康状况评估非常重要和迫切。

针对公路隧道做合理有效的养护，需要正确评估隧道的健康状况。交通部发布的《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)为隧道养护提供了具体的技术标准，其中多数是定性的技术状况描述，这给现场的技术人员带来不少困难。本书主要从量化评价的角度出发，通过四川省职业教育教师技艺技能传承创新平台项目、四川省教育厅2018—2020年高等教育人才培养质量和教学改革项目——深度校企合作下的高职教育人才培养新模式-卓越工长培养计划项目支持，开展了大量的研究工作，取得了一定的研究成果，可为同类工程提供借鉴。

本书由四川建筑职业技术学院邓林和四川交通职业技术学院谢立广共同撰写完成。全书共分为5章和2个附录。第1章绪言对项目的研究意义、研究现状、研究内容及研究方法做了简要介绍；第2章现行养护规范研读，重点阐述了规范关于隧道健康评估的方法和不足；第3章模糊数学方法研究，比较了模糊评估与规范评分之间的差

异；第4章均衡健康模型探索，提出了均衡评估模型，即通过隧道相关物理力学参数（围岩压力和地层抗力）分布的均匀性和平衡性来推断或评价隧道健康状况的算法或模型，该模型计算涉及大量的力学分析、安全验算和模糊统计等，其方法和结论可供同类研究或隧道养护实践参考；第5章结语对相关研究成果进行了总结；附录列出了相关VBA程序和部分隧道病害照片。

在此特别感谢四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院李玉文正高级工程师和邓刚博士、重庆交通大学林志教授、甘孜藏族自治州公路管理局隧道和路网应急管理中心邓雄、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司沈习文等对本书内容所涉及研究项目的支持和协助。同时，感谢师弟丁大攀提供了大量与隧道相关的统计数据，同学邓彬提供了部分工程案例。在本书编写过程中，还得到了很多同行和专家的指导帮助，在此致以真诚的感谢！

限于研究程度和作者水平，本书在某些方面未能深入，不足之处在所难免，恳请各位读者批评指正！

作 者

2021年6月于成都

目录

CONTENTS

第1章 绪言

- 1.1 项目简介 /002
- 1.2 研究意义 /003
- 1.3 研究现状 /004
- 1.4 研究内容 /010
- 1.5 研究方法 /011

第2章 现行养护规范研读

- 2.1 概述 /013
- 2.2 隧道养护工作流程 /014
- 2.3 技术状况评定方法 /018
- 2.4 技术状况评定标准 /021
- 2.5 本章小结 /027

第3章 模糊数学方法研究

- 3.1 概述 /029
- 3.2 模糊综合评判方法 /030
- 3.3 隧道健康评价模型 /036
- 3.4 工程案例及分析 /039
- 3.5 本章小结 /046

第 4 章 均衡健康模型探索

- 4.1 概 述 /048
- 4.2 均衡数学模型 /049
- 4.3 内力计算程序 /052
- 4.4 综合安全系数 /073
- 4.5 算例及分析 /077
- 4.6 本章小结 /093

第 5 章 结 语

- 5.1 本阶段主要结论 /095
- 5.2 下一步研究方向 /096

参考文献 /097

附录 A VBA 程序代码 /103

附录 B 部分隧道病害照片 /119

第 1 章

绪 言

1.1 项目简介

鉴于我国公路隧道相对落后的运营管理现状，隧道养护是目前行业必须面对的重要课题。对公路隧道做合理有效的养护，需要正确评估隧道的健康状况。然而，由于涉及系统且复杂的诸多内容，至今行业未能建立相对完善的公路隧道健康评估标准体系，距离实用尤为任重而道远。因此，在本项目中开展一些研究，是非常必要的。

本项目研究的主要内容包括：现行养护规范研读、模糊数学方法研究和均衡健康模型探索等。其中，“现行养护规范研读”旨在阐述规范关于隧道健康评估的方法，分析和总结其不足之处；“模糊数学方法研究”旨在介绍模糊数学方法的特点，比较其与规范采用方法之间的差异；而“均衡健康模型探索”是本项目研究的重点和主要创新点，其中提出了均衡评估模型，即通过相关物理力学参数分布的均衡性，来推断公路隧道的健康状况。

本项目研究的主要结论为：（1）现行养护规范关于隧道健康评估的方法，是一种定性结合定量的方法，但主要还是以单纯的现象分析、经验类比为依据；它倾向以局部的最不利状况来评价隧道的整体，不太符合我们的认知习惯。（2）模糊评判法比较适用于评价隧道健康状况，它具有更为严谨的数学表述，是未来努力的方向。从实用性的角度，模糊评估在因素权重、技术标准和隶属函数等方面还需深入研究。（3）采用均衡模型评估隧道健康状况是行之有效的，该模型通过隧道围岩压力和地层抗力分布的均匀性和平衡性，来推断或评价隧道健康状况，概念比较清晰且具有较强的针对性。

1.2 研究意义

我国是一个多山的国家,随着高等级公路的发展,公路隧道日益增多。据不完全统计,截至2015年底,全国运营公路隧道有14 006座,总里程为12 683.9 km,运营铁路隧道高达13 411座,总里程为13 038 km,在建铁路隧道为3 784座,总里程为8 692 km。单就四川省而言,根据四川省交通运输厅公路局官网信息,截至2017年底,全省共有各类公路隧道1 089座,上下行合计长1 181.69 km。如今我国在世界上已成为名副其实的隧道赋存环境最复杂、隧道现存数量最多和今后隧道建设发展最快的国家之一。

隧道建成后,围岩范围内原有的各种平衡被打破,隧道支护体系将经历较长的调整期才能达到足够稳定的状态。基于不同的气候和地质条件、设计与施工水平,运营隧道在调整期必然出现不同程度的病害,进而影响隧道的运营安全、结构安全乃至使用寿命等。

公路隧道断面大、支护结构形式多样、施工技术复杂、运营管理相对落后,各种病害尤为普遍而且严重。国内外调查研究表明,常见的病害包括渗漏水、衬砌裂损、衬砌冻害、衬砌腐蚀等。1990年日本公路协会对总长1 970 km的4 307座正运营公路隧道进行了现场调查,结果发现约60%隧道存在衬砌开裂及渗漏水等病害,还有近24%的隧道存在材料劣化现象。德国、意大利等欧洲国家也有数量不等、严重程度不同的病害隧道。隧道的各种病害导致衬砌实际承载力下降,严重威胁着隧道安全,有大量因主体结构严重开裂等工程病害影响行车安全和中断交通的报道。如1999年6月27日,日本山阳新干线福冈隧道发生了衬砌混凝土剥落,造成列车破损的重大事故。2003年湖南浏永公路蕉溪岭一号隧道拱顶混凝土塌落,塌落的混凝土重达0.2 t,隧道拱顶深处甚至露出岩石,造成隧道封闭17小时。

我国目前 20%~30% 的公路隧道处于病害发育的亚健康状态(陈洪凯, 2005), 相关统计数据表明, 截至 2014 年底, 四川省约 10% 的高速公路隧道存在异常情况, 约 40% 的普通公路隧道存在安全隐患, 因此对运营公路隧道的养护是非常重要和迫切的。随着公路隧道的大量建设和使用, 行业内部越来越认识到公路隧道养护工作的重要性。

针对公路隧道做合理有效的养护, 需要正确评估隧道的健康状况, 国内外同行为此做了较多相关的理论研究和实践经验总结。然而, 由于该项技术的复杂性, 建立相对完善的公路隧道健康评估标准体系任重而道远。2015 年, 交通运输部发布《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015), 为隧道养护提供了具体的技术标准, 其中多数是定性的技术状况描述, 这给现场的技术人员带来不少困难, 量化评价或是解决问题的途径。本项目在一定范围内尝试量化公路隧道健康评估标准, 研究结论或能启发同类研究的深入, 仅供参考。

1.3 研究现状

隧道健康状况评估, 也有称安全评价, 还有称健康安全评价, 这些不同的称谓可能导致一些不必要的麻烦, 宜采用统一的表述。笔者认为包含“健康”一词更为恰当。健康是指隧道系统在运营过程中的良好状态, 与此类似, 日本采用“健全度”的概念, 美国采用“损伤度”的概念; 而安全是指隧道系统不受威胁, 没有危险, 更适用于表述施工过程或运营交通的相关内容, 比如施工安全技术和交通安全管理等。

隧道健康状况评估, 相关的研究历史并不长, 但从一开始就受到了各国专家学者的普遍关注和高度重视, 目前已取得比较丰富的研究成果, 在笔者看来, 这些成果的主流大致可分为三类, 即标准评分法、力学分析法以及模糊评估法。

1.3.1 标准评分法

标准评分法是根据经验将隧道病害划分为若干子项，每项根据检测情况按一定的技术标准进行评分，然后根据各项评分对隧道的健康状态进行综合评价，但主要还是以单纯的现象分析、经验类比和定性分析为依据。由于将原本复杂的问题过于简单化，所以有可能导致评价结论失真和难以准确地分析病害原因，但它具有数学概念清晰、操作简便易行等优点，容易为大多数技术人员所接受，各国相关的行业标准和规范基本上都采用此类方法。

法国国营铁路公司(SNCF)在20世纪80年代制定了铁路隧道养护标准，标准中包含了铁路隧道的检查方法、状态评价方法、例行维护方法和实用的修补方法。该隧道养护标准主要是给出了铁路隧道检查和维修的方法，对铁路隧道健康状态的判定主要是参考检测数据进行定性判定，没有给出定量评价隧道健康状态的方法(Eraud, 1984)。

德国铁路隧道设计、施工与养护规范(DS853)中的《人工建筑物的监控和检查规范》规定：每隔三年必须由联邦铁路局的专家对铁路隧道做一次检查，对新建隧道从第一次鉴定时起不超过25年的，准许每隔6年进行一次检查。检查包括隧道所有部位及其所属设备，尤其应注意早期情况的变化，以判断隧道的安全、运营和工作状态，并按隧道的损坏情况将单项的病害程度划分为三级。

日本从20世纪80年代起，在铁路隧道、水工隧洞中引入“健全度”的概念，对结构物的剩余寿命进行评估。2000年，日本公路协会编写了《公路隧道维护管理便览》，提出了隧道健全度等级和变异的判定准则及对策，将隧道划分为3A、2A、A、B和S等安全等级，根据经验将病害分为外力、材料劣化、渗漏水病害，分别提出了外力崩塌、变形、开裂剥落、错台、开裂的变形判断基准。

2004年,美国《公路和铁路交通隧道检查手册》给出了隧道的检测方法和程序,将隧道的结构安全划分为0~10级,并给出了相关等级的分级标准和判定基准,其中提出了定性评价隧道健康状况的标准,将一些隧道缺陷分为轻度、中度和严重三个等级。

2015年,我国交通运输部发布了《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015),该规范引入结构技术状况评定的内容,按技术状况评分值将隧道结构分为1~5类,分别表示完好状态、轻微破损、中等破损、严重破损、危险状态。

1.3.2 力学分析法

力学分析法是在分析隧道病害调查和检测结果的基础上,建立隧道力学计算模型以分析隧道结构的健康状态。由于无法对所有的隧道病害都建立力学计算模型,而隧道的工作状态又是十分复杂的问题,它是受各种因素综合作用的结果,所以此类方法可用于具体的或特定的案例分析或者相关标准的研究,但很难准确诊断一般隧道结构体系的健康状况。

宋瑞刚等(2004)针对铁路运营隧道病害的检测结果,对衬砌背后空洞进行平面弹塑性计算分析,得出不同位置、不同大小的空洞以及空洞群对结构各截面安全系数影响的系统认识,明确提出衬砌结构与围岩结合的不紧密性是恶化衬砌受力条件、造成围岩进一步松动、进而造成衬砌裂损的一个重要原因。

罗鑫(2006)等使用同济曙光 GeoFBA,对计算模型进行平面的弹塑性分析,得到了衬砌背后不同位置及尺寸空洞对隧道结构内力的具体改变,以此来分析空洞对于拱脚结构内力的影响。

刘海京(2007)根据隧道病害现状,提出基于隧道健康诊断和结构计算模型的隧道病害分类方法和参数量化方法,利用荷载-结构方法建立衬砌裂缝、材料劣化、厚度不足、背后空洞四类病害的简化力学模型。

Bernardino chiaia 等(2008)建立了隧道纤维钢筋混凝土衬砌的评价模型,可预测裂缝产生的宽度、间距和深度。彭跃(2008)通过数值模拟病害隧道的典型断面,得出拱部内力以及安全系数,提出隧道衬砌背后任何位置出现空洞,均对隧道结构的安全系数有影响,且随着空洞直径的增大,安全系数受影响的程度也越大。

Breitung W(2008)等采用刚度退化模型计算了裂缝对隧道衬砌结构安全性的影响规律。H.H.Mo(2008)和J.S.Chen(2009)运用三维有限元程序对盾构隧道管片衬砌在顶推力作用下相邻管片发生扭转条件下的裂缝状态进行分析,通过计算得出:盾构隧道管片衬砌裂缝主要发生在接缝、螺栓孔、吊装孔等位置,且在正常荷载下管片衬砌内外侧弧段不会出现裂缝。

秦洲(2013)根据隧道实际病害情况,建立了基于荷载-结构法荷载计算原理的衬砌结构安全性计算模型,通过计算分析了衬砌开裂、厚度不足、强度不足、衬砌背后空洞等单项病害和组合病害对衬砌结构安全性能的影响程度,得出了相应病害对于隧道衬砌结构安全性能的影响规律。

孟庆威(2013)采用载荷结构法和 ABAQUS 软件建立了无损衬砌、含背后空洞衬砌、含局部厚度不足衬砌、含混凝土强度劣化衬砌和含衬砌裂缝四种有限元分析模型,其中衬砌背后空洞模型的建立采用去除空洞部分对应载荷及支撑弹簧的方式。分别研究了不同程度病害发生位置位于拱顶、拱腰、边墙和拱脚时衬砌的变形、内力及安全系数,得到了病害程度与衬砌整体安全性下降程度的关系,并给出了关于衬砌病害定量评价的推荐分级标准。

刘学增等(2012, 2015)基于荷载-结构模型,开展了带裂缝钢筋混凝土衬砌和裂损隧道在偏压荷载作用下的模型试验,并基于衬砌结构荷载试验提出带裂缝隧道衬砌梁弹簧计算模型,定量分析裂缝深度、位置以及地层抗力对衬砌结构承载力的影响,并提出了裂缝深度与极限承载力关系的公式。

刘新根(2015)基于荷载-结构法隧道计算理论,建立了公路隧道衬砌的裂缝、材料劣化、空洞、附加荷载等病害的力学评价模型,研制了公路隧道衬砌病害力学模拟分析软件,通过计算表明:衬砌裂缝和空洞的存在均会降低结构的安全系。

1.3.3 模糊评估法

模糊评估法,它根据隧道调查和检测数据,利用模糊数学及相关的基本原理建立隧道健康状况的综合评价模型。此类方法在理论上比较符合隧道健康评价的实际情况,也是研究的热点之一,但目前的实际应用并不多,它在评价指标的选取、指标体系的建立、指标的定量判定标准、指标权值的确定方法、评价模型的建立等方面都还有待于进一步研究(罗鑫, 2007)。

姜松湖等(1992)以层次分析法为基础,结合模糊数学理论研究了铁路隧道健全度判定模型,提出了以“检测-判定-诊断-决策”为基础的铁路隧道病害变异诊断专家系统的合理结构,从而在国内首次把人工智能技术应用用于隧道的养护与诊断。

罗鑫(2007)分析了模糊综合评价方法中隶属函数的确定模糊算子的选择和模糊综合评价结果向量的分析等几个重要问题,在此基础上建立了公路隧道健康状态的模糊综合评价模型。

于伟达(2010)借鉴现阶段桥梁、汽车、航空等领域结构安全评估的已有成果,概述现有安全评估方法,比较其优缺点,选用模糊神经网络技术作为隧道衬砌裂缝安全评估的方法。根据衬砌裂缝安全判定标准,建立模糊神经网络的安全评价模型,将裂缝监测数据作为样本输入模型进行模糊评价,得出隧道衬砌裂缝的安全评价结果。

李明(2011)通过构造可变模糊集的相对差异度函数,得出了隧道健康模糊综合评价动态模型。杨艳青(2012)应用模糊数学理论,提出了运营铁路隧道衬砌安全性三级模糊综合评价方法。王亚琼等(2015)运用模糊理论、灰色系统理论和信息熵理论,构建了基于非对称贴近度判定隧道结构健康状态的评价模型。

孙可(2015)等提出了一类专用的模糊层次分析综合评价模型,建立6层指标评价体系,并建立对应的分层模糊因子集、评价集、权重集与隶属函数。形成了形式简洁的模糊综合算子,实现了对单类监测因子、单个监测管片、单个监测环以及隧道全线健康状态的分级模糊综合评价,构建了渗漏等级评价指标体系和递阶层次评价结构。

炎炯睿(2015)采用层次分析法将隧道病害分为三级指标,利用可拓学理论确定各因素的权重,形成权重集,利用权重集与单因素模糊评价矩阵的合成算法,最终得到隧道病害模糊评价模型,并将量化的评价结果与现行规定中的评价等级进行对应。

苏亮亮(2016)等运用层次分析法建立健康评价指标体系,依据相关规范确定了公路隧道结构健康状态评估指标的4个评价等级,同时对各评价指标进行了无量纲处理;将层次分析法与熵权法组合确定权重,克服了传统权重确定中的主观随意性问题,最终采用灰色聚类理论、层次分析法和信息熵理论构建了基于灰色定权聚类的隧道结构健康状态的评价模型。

傅鹤林(2017)等建立反映盾构隧道结构健康状况等级评语集的正态云模型,然后依据逆向云发生器原理,将隧道结构健康状态指标的监测数据的归一化结果值转化为隶属度云模型。将健康状态指标的重要性语言值转化为权重云,用于表征各健康状态指标的重要程度。最后运用云理论的计算方法对隧道结构健康状态等级进行诊断,得到健康状态等级诊断结果的云模型。

1.4 研究内容

本项目研究的主要内容包括三个方面:现行养护规范研读、模糊数学方法研究和均衡健康模型探索。

现行养护规范研读,通过研读现行行业标准《公路隧道养护技术规范》以下简称“规范”,归纳了公路隧道养护工作流程,整理了土建结构技术状况评定的相关要求和技术标准,列举了一些值得注意的细节和存在问题。

模糊数学方法研究,首先介绍模糊综合评判的基本方法和步骤,然后参照《规范》内容构建了隧道衬砌的健康评价体系和评价指标,最后结合具体案例进行了模糊评判的计算,并与《规范》中评分的方法进行对比分析,总结了模糊评估的特点和实用价值。

均衡健康模型探索,是本项目研究的重点和主要创新点,其中提出了均衡评估模型,即通过相关物理力学参数分布的均衡性,来推断公路隧道的健康状况。均衡评估模型,首先建立隧道荷载结构力学模型,其中的围岩压力和地层抗力是按设定限值随机分布的,根据该力学模型计算大量工况的结构内力分布,进而计算相应的结构安全系数;其次,按一定的统计指标来界定上述工况围岩压力和地层抗力分布的均衡程度;最后,统计上述工况围岩压力和地层抗力分布的均衡程度与结构安全系数之间的关系,探索其中的规律。

1.5 研究方法

本项目研究的方法包括文献研究、归纳总结和理论分析等。首先查阅国内外隧道养护相关的规范和标准,尤其是我国的《公路隧道养护技术规范》,以及国内外隧道养护相关的技术文献,了解隧道养护技术相关理论和实践的现状;其次分析目前隧道健康状况评估的各种方法,归纳总结相关的技术特点和在实际应用中存在的问题;最后是理论分析,本项目提出了均衡健康评估模型,该模型主要采用了力学分析、结构验算和模糊统计的方法,相关计算通过常用的结构分析软件和自编 VBA 程序完成。