



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

李志宏 黄宏伟 著

基于全寿命期风险分析的 路堑与隧道方案决策研究

Decision Making Between Cut-Slope and
Shallow Tunnel Alternatives Based on Life
Cycle Risk Analysis



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

李志宏 黄宏伟 著

基于全寿命期风险分析的 路堑与隧道方案决策研究

Decision Making Between Cut-Slope and
Shallow Tunnel Alternatives Based on Life
Cycle Risk Analysis



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书基于多目标决策理论,通过分析不同方案施工期内的常规成本风险、常规工期风险、施工期偶然风险导致的人员伤亡、经济损失和工期损失,以及运营期内的运营维护成本、方案可靠性和环境影响评价等指标,将全寿命理念和风险定量分析方法融入方案决策,构建了路堑与隧道方案的决策模型,并利用蒙特卡罗仿真技术,以 MATLAB 为平台开发了“基于全寿命期风险分析的工程方案决策系统”。

图书在版编目(CIP)数据

基于全寿命期风险分析的路堑与隧道方案决策研究/
李志宏,黄宏伟著. —上海:同济大学出版社,2017.8
(同济博士论丛/伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6970-4

I. ①基… II. ①李…②黄… III. ①路堑—道路施工—风险管理—研究②隧道施工—风险管理—研究 IV.
①U416.1②U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 090919 号

基于全寿命期风险分析的路堑与隧道方案决策研究

李志宏 黄宏伟 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 陆克丽霞 熊磊丽
责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 14.75

字 数 295 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6970-4

定 价 70.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际,喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行,倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时,我曾以《百年同济,大学对社会的承诺》为题作了演讲,如今看到付梓的“同济博士论丛”,我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果,也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色,向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学,历经 110 年历史风云,承古续今、汇聚东西,秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,发扬自强不息、追求卓越的精神,在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行,谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今,同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才,包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生,薪火相传,将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任,她的社会责任就是融入国家的创新体系之中,成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新,对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首,强调创新是引领发展的第一动力,要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略,以科技创新为核心带动全面创新,以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版110余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

前言

深挖路堑方案与浅埋隧道方案之间的决策普遍存在于山岭重丘区公路及铁路建设中。实际操作中,在工程技术均可行的前提下,主要是考察经济的合理性,在营运成本相差不大的情况下,以建设成本决定方案的优越性。然而,工程建设项目是一个周期长、投资大、技术要求高、系统复杂的生产和消费过程,在工程建设全寿命期内难免会受到各种各样风险因素的影响。本书依托交通部西部科技项目——山区高速公路工程风险分析与控制对策研究(项目编号:2006318799107),基于多目标决策理论,通过分析不同方案施工期内的常规成本风险、常规工期风险、施工期偶然风险导致的人员伤亡、经济损失和工期损失,以及运营期内的运营维护成本、方案可靠性和环境影响评价等指标,将全寿命理念和风险定量分析方法融入方案决策,构建了路堑与隧道方案的决策模型,并利用蒙特卡罗仿真技术,以 MATLAB 为平台开发了“基于全寿命期风险分析的工程方案决策系统”。本书主要研究成果如下:

(1) 根据工程建设中风险的特点,将风险分为常规风险和偶然风险进行分析,阐述了常规风险与偶然风险的含义。认为常规风险是必然发生的风险,由它导致的常规工期和成本风险是在项目能够按原计划顺利实施且无重大偶然风险发生时的工期和成本,一般可用连续的概率分布表示。工程建设中可能发生的重大的对工程造成较严重后果的风险属于偶然风险,这类风险是不确定性风险,可能发生也可能不发生,但一旦发生就会导致严重的后果,

偶然风险事故是导致工程能否顺利完工的主要原因。

(2) 阐述了常规工期风险和常规成本风险的计算方法。根据规划评审技术 PERT 原理,运用蒙特卡罗仿真技术,综合考虑影响各施工工序持续时间的常规风险因素,得到工程项目的工期分布图。结合各施工工序的特征,将各工序的成本分为时间相关成本、数量相关成本和固定成本计算,考虑成本构成要素的不确定性,通过对各工序的成本求和得到工程总成本分布图。基于此绘制工程项目的常规成本-工期散点图。

(3) 提出了滑坡风险的定量分析方法,详细阐述了滑坡风险分析过程。在总结前人研究的基础上,提出了滑坡风险易损性定量评价模型;以力学计算为基础,利用不同的数值模拟手段,辨识出最危险的滑坡场景,预测滑坡发生的概率以及滑坡体的体积、可能影响的区域,从而确定承险体的种类、数量和分布情况,在此基础上进行后果分析;借鉴“球与盒子”的经典概率问题,提出了人员伤亡的分析方法;基于事件树原理,采用蒙特卡罗技术定量地分析了滑坡风险导致的后果损失(人员伤亡、经济损失和工期损失),从而得到滑坡风险的损失分布。

(4) 详细论述了隧道塌方冒顶风险的分析过程,提出了隧道塌方冒顶风险的定量分析方法。根据可靠度理论,预测隧道塌方发生的概率;根据围岩性质及已有统计数据,运用普氏压力拱理论计算出塌方的长度、跨度以及塌方形成的空腔面积,从而确定加固所需建筑材料数量,得到加固措施所需费用;与滑坡风险定量分析类似,基于事件树原理和蒙特卡罗方法对人员伤亡和工期损失进行预测,最终得到隧道塌方冒顶风险导致的损失分布。

(5) 对工程方案的全寿命周期成本进行分析,改进了方案运营维护成本的计算方法。通过引入维修费用增长率系数,体现了结构随使用年限的增加发生老化和耐久性降低的趋势。

(6) 运用模糊综合评判法和模糊层次分析法,对不同方案的可靠性及环境影响进行评价。以长期稳定性、可维修(护)性及结构变异(病害)及其他因

素等作为方案可靠性因素集的基本层;通过对社会环境影响、生态环境影响和自然环境影响三类环境影响因素集的评价评判方案的环境影响指标。

(7) 分析总结了常用的多目标决策集结算子,对模糊判断矩阵的构造方法、排序方法以及一致性检验方法进行了深入讨论,指出各种方法的长处与不足。确定采用加权几何平均算子(WGA)对单个决策者的决策信息进行集结,完成个体决策;采用组合加权几何平均算子(CWGA)对多个决策者的决策信息进行集结,完成群决策。

(8) 根据风险定量分析过程以及选定的多目标决策方法,基于MATLAB平台开发了“基于全寿命期风险分析的工程方案决策系统”,其中包括施工期分析、运营期分析和多目标决策三个模块。施工期分析模块包括对常规工期风险、常规成本风险以及偶然风险导致的人员伤亡、工期损失和经济损失进行分析;运营期分析模块包括对运营成本进行计算,对方案可靠性和环境影响评价;决策模块可提供个体决策以及群决策,可基于施工期的5个指标或全寿命期的8个指标进行决策。

常用符号说明

C	工程总成本
C_n	常规风险成本
C_e	偶然风险成本
a	施工工序的最乐观时间
b	施工工序的最保守时间
m	施工工序的最可能时间
C_i	工序 i 的常规成本
C_{nt}	时间相关成本
C_{nq}	数量相关成本
C_{nf}	固定成本
R_H	人员伤亡风险指标
$P_{(T R)}$	偶然风险发生的时间概率
$P_{(n S, R)}$	偶然风险发生时空间区域 S 内有 n 个人的概率
$V_{(S R)}$	空间区域 S 内人的平均易损性
V_f	死亡的易损性平均值
V_s	重伤的易损性平均值
V_l	轻伤的易损性平均值
I_{hi}	人员伤亡综合指标
R_{NSD}	可移动承险体的偶然风险经济损失指标
$P_{(n S, R)}$	偶然风险发生时空间区域 S 内有 n 个承险体的概率
NV	承险体的平均市场净值
V_{sd}	施工机械严重损坏的易损性平均值
V_{md}	施工机械中度损坏的易损性平均值

V_{ld}	施工机械轻微损坏的易损性平均值
LE_{hi}	施工机械经济损失指标
R_{SD}	已建结构的经济损失指标
$P_{(D R)}$	滑坡体或塌方体影响结构的概率
$V_{(S R)}$	结构的易损性
C_S	建造相应损坏结构的成本
I	滑坡灾害强度
R	承险体抗灾害能力
I_{dyn}	动力强度参数
I_{gem}	几何强度参数
I_{dpt}	滑坡体厚度参数
I_{dyn-s}	开阔空间内结构遭受滑坡体冲击的动力强度参数
I_{dyn-p}	开阔空间内人员遭受滑坡体冲击的动力强度参数
C_L	滑坡体平均速度
D_{dpt}	建筑物位置处滑坡体的厚度
ξ_i	抗灾能力系数
R_{str}	建筑结构的抗灾能力
ξ_{sfd}	基础深度系数
ξ_{sty}	结构形式系数
ξ_{smn}	建筑维护状态系数
ξ_{shh}	建筑物高度系数
D_{fod}	建筑基础深度
R_{per}	人员抗灾能力
ξ_{phy}	身体抵抗力指标
ξ_{kng}	知识抵抗力指标
V_{p-s}	建筑物内人员的易损性
V_{str}	建筑物的易损性

目 录

总序

论丛前言

前言

常用符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状分析	2
1.2.1 工程风险研究现状	2
1.2.2 风险分析中的全寿命理念	7
1.2.3 多目标决策	9
1.2.4 路堑与隧道方案决策比选	12
1.3 主要研究内容及思路	13
1.4 关键技术与创新点	14
1.4.1 关键技术	14
1.4.2 创新点	16
第 2 章 工程施工期常规风险分析	17
2.1 工程项目风险	17
2.2 常规工期风险	20
2.2.1 常规工期风险	20
2.2.2 规划评审技术	23

2.2.3	工期分布模拟方法	25
2.3	常规成本风险	28
2.3.1	常规成本风险	28
2.3.2	蒙特卡罗模拟法	35
2.3.3	常规成本风险计算	37
2.4	本章小结	38
第3章	工程施工期偶然风险分析	39
3.1	概述	39
3.2	偶然风险损失分析原理	39
3.2.1	一般原理	39
3.2.2	人员伤亡分析	41
3.2.3	经济损失分析	43
3.2.4	人员伤亡导致的工期损失	45
3.3	路堑边坡滑坡风险定量分析	47
3.3.1	滑坡发生概率及规模预测	47
3.3.2	滑坡灾害易损性分析	49
3.3.3	滑坡风险损失分析	63
3.3.4	工程实例应用	66
3.4	隧道塌方风险定量分析	79
3.4.1	塌方发生概率及规模预测	83
3.4.2	塌方风险损失分析	91
3.4.3	计算实例	100
3.5	本章小结	105
第4章	工程方案运营期风险分析	107
4.1	概述	107
4.2	运营成本预测	108
4.3	方案可靠性分析	111
4.3.1	模糊综合评判法	111