



“十二五”国家重点图书出版规划项目

公共安全应急管理丛书

关键基础设施系统保护 建模与仿真

韩传峰 等◎著



科学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目



公共安全应急管理丛书

关键基础设施系统保护 建模与仿真

韩传峰 等◎著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书采用“系统之系统”思想,立足学术前沿,将复杂系统、复杂网络、动力学模型和博弈论等理论方法成功地融入到关键基础设施系统保护中,形成系统结构总体分析、规划和设计的新思路、理论和方法。

本书分析单一关键基础设施系统内部失效产生连锁反应导致的系统崩溃,以及关联关键基础设施系统的相互作用机理及脆弱性特征,提出相应的修复策略;结构安全之外,注重功能安全,构建脆弱性云分布模型,综合度量关键基础设施系统脆弱性分布的态势;关注系统保护的不确定性与动态性,建立反恐应急设施选址的动态博弈模型,仿真分析不同情景下的最优设施分布策略。

本书面向公共安全与危机管理、系统工程、管理科学与工程等领域的研究人员,以及具有一定的复杂网络、动力学建模和博弈论基础的高年级本科生和研究生。各章逻辑严密、自成一体,可根据兴趣和需要选择阅读。

图书在版编目(CIP)数据

关键基础设施系统保护建模与仿真 / 韩传峰等著. —北京:科学出版社, 2016

(公共安全应急管理丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目 国家出版基金项目

ISBN 978-7-03-049130-5

I. ①关… II. ①韩… III. ①基础设施建设—系统建模—研究②基础设施建设—系统仿真—研究 IV. ①F294

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143263 号

责任编辑:魏如萍 王丹妮 / 责任校对:阴会宾
责任印制:霍 兵 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

※

2016 年 7 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 232 000

定价: 72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书编委会

主 编

范维澄 教 授 清华大学

郭重庆 教 授 同济大学

副主编

吴启迪 教 授 国家自然科学基金委员会管理科学部

闪淳昌 教授级高工 国家安全生产监督管理总局

编 委 (按姓氏拼音排序)

曹河圻 研究员 国家自然科学基金委员会医学科学部

邓云峰 研究员 国家行政学院

杜兰萍 副局长 公安部消防局

高自友 教 授 国家自然科学基金委员会管理科学部

李湖生 研究员 中国安全生产科学研究院

李仰哲 局 长 国家发展和改革委员会经济运行调节局

李一军 教 授 国家自然科学基金委员会管理科学部

刘 克 研究员 国家自然科学基金委员会信息科学部

刘铁民 研究员 中国安全生产科学研究院

刘 奕 副教授 清华大学

陆俊华 副省长 海南省人民政府

孟小峰 教 授 中国人民大学

邱晓刚 教 授 国防科技大学

汪寿阳 研究员 中国科学院数学与系统科学研究院

王飞跃 研究员 中国科学院自动化研究所

王 垒 教 授 北京大学

王岐东 研究员 国家自然科学基金委员会计划局

王 宇	研究员	中国疾病预防控制中心
吴 刚	研究员	国家自然科学基金委员会管理科学部
翁文国	教 授	清华大学
杨列勋	研究员	国家自然科学基金委员会管理科学部
于景元	研究员	中国航天科技集团 710 所
张 辉	教 授	清华大学
张 维	教 授	天津大学
周晓林	教 授	北京大学
邹 铭	副部长	民政部

总 序

自美国“9·11事件”以来，国际社会对公共安全与应急管理的重视度迅速提升，各国政府、公众和专家学者都在重新思考如何应对突发事件的问题。当今世界，各种各样的突发事件越来越呈现出频繁发生、程度加剧、复杂复合等特点，给人类的安全和社会的稳定带来更大挑战。美国政府已将单纯的反恐战略提升到针对更广泛的突发事件应急管理的公共安全战略层面，美国国土安全部2002年发布的《国土安全国家战略》中将突发事件应对作为六个关键任务之一。欧盟委员会2006年通过了主题为“更好的世界，安全的欧洲”的欧盟安全战略并制订和实施了“欧洲安全研究计划”。我国的公共安全与应急管理自2003年抗击“非典”后受到从未有过的关注和重视。2005年和2007年，我国相继颁布实施了《国家突发公共事件总体应急预案》和《中华人民共和国突发事件应对法》，并在各个领域颁布了一系列有关公共安全与应急管理的政策性文件。2014年，我国正式成立“中央国家安全委员会”，习近平总书记担任委员会主任。2015年5月29日中共中央政治局就健全公共安全体系进行第二十三次集体学习。中共中央总书记习近平在主持学习时强调，公共安全连着千家万户，确保公共安全事关人民群众生命财产安全，事关改革发展稳定大局。这一系列举措，标志着我国对安全问题的重视程度提升到一个新的战略高度。

在科学研究领域，公共安全与应急管理研究的广度和深度迅速拓展，并在世界范围内得到高度重视。美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）资助的跨学科计划中，有五个与公共安全和应急管理有关，包括：①社会行为动力学；②人与自然耦合系统动力学；③爆炸探测预测前沿方法；④核探测技术；⑤支持国家安全的信息技术。欧盟框架计划第5~7期中均设有公共安全与应急管理的项目研究计划，如第5期（FP5）——人为与自然灾害的安全与应

急管理,第6期(FP6)——开放型应急管理系统、面向风险管理的开放型空间数据系统、欧洲应急管理信息体系,第7期(FP7)——把安全作为一个独立领域。我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中首次把公共安全列为科技发展的11个重点领域之一;《国家自然科学基金“十一五”发展规划》把“社会系统与重大工程系统的危机/灾害控制”纳入优先发展领域;国务院办公厅先后出台了《“十一五”期间国家突发公共事件应急体系建设规划》、《“十二五”期间国家突发事件应急体系建设规划》、《“十二五”期间国家综合防灾减灾规划》和《关于加快应急产业发展的意见》等。在863、973等相关科技计划中也设立了一批公共安全领域的重大项目和优先资助方向。

针对国家公共安全与应急管理的重大需求和前沿基础科学研究的需求,国家自然科学基金委员会于2009年启动了“非常规突发事件应急管理研究”重大研究计划,遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路,围绕应急管理中的重大战略领域和方向开展创新性研究,通过顶层设计,着力凝练科学目标,积极促进学科交叉,培养创新人才。针对应急管理科学问题的多学科交叉特点,如应急决策研究中的信息融合、传播、分析处理等,以及应急决策和执行中的知识发现、非理性问题、行为偏差等涉及管理科学、信息科学、心理科学等多个学科的研究领域,重大研究计划在项目组织上加强若干关键问题的深入研究和集成,致力于实现应急管理若干重点领域和重要方向的跨域发展,提升我国应急管理基础研究原始创新能力,为我国应急管理实践提供科学支撑。重大研究计划自启动以来,已立项支持各类项目八十余项,稳定支持了一批来自不同学科、具有创新意识、思维活跃并立足于我国公共安全核应急管理领域的优秀科研队伍。百余所高校和科研院所参与了项目研究,培养了一批高水平研究力量,十余位科研人员获得国家自然科学基金“国家杰出青年科学基金”的资助及教育部“长江学者”特聘教授称号。在重大研究计划支持下,百余篇优秀学术论文发表在SCI/SSCI收录的管理、信息、心理领域的顶尖期刊上,在国内外知名出版社出版学术专著数十部,申请专利、软件著作权、制定标准规范等共计几十项。研究成果获得多项国家级和省部级科技奖。依托项目研究成果提出的十余项政策建议得到包括国务院总理等国家领导人的批示和多个政府部门的重视。研究成果直接应用于国家、部门、省市近十个“十二五”应急体系规划的制定。公共安全和

应急管理基础研究的成果也直接推动了相关技术的研发，科技部在“十三五”重点专项中设立了公共安全方向，基础研究的相关成果为其提供了坚实的基础。

重大研究计划的启动和持续资助推动了我国公共安全与应急管理的学科建设，推动了“安全科学与工程”一级学科的设立，该一级学科下设有“安全与应急管理”二级学科。2012年公共安全领域的一级学会“（中国）公共安全科学技术学会”正式成立，为公共安全领域的科研和教育提供了更广阔的平台。在重大研究计划执行期间，还组织了多次大型国际学术会议，积极参与国际事务。在世界卫生组织的应急系统规划设计的招标中，我国学者组成的团队在与英、美等国家的技术团队的竞争中胜出，与世卫组织在应急系统的标准、设计等方面开展了密切合作。我国学者在应急平台方面的研究成果还应用于多个国家，取得了良好的国际声誉。各类国际学术活动的开展，极大地提高了我国公共安全与应急管理在国际学术界的声望。

为了更广泛地和广大科研人员、应急管理工作者以及关心、关注公共安全与应急管理问题的公众分享重大研究计划的研究成果，在国家自然科学基金委员会管理科学部的支持下，由科学出版社将优秀研究成果以丛书的方式汇集出版，希望能为公共安全与应急管理领域的研究和探索提供更有力的支持，并能广泛应用到实际工作中。

为了更好地汇集公共安全与应急管理的最新研究成果，本套丛书将以滚动的方式出版，紧跟研究前沿，力争把不同学科领域的学者在公共安全与应急管理研究上的集体智慧以最高效的方式呈现给读者。

重大研究计划指导专家组

序

近年来，国家城镇化战略推进下的关键基础设施建设持续进行，规模效应和网络效应不断增强，系统的风险与脆弱性日益凸显。在跨越式发展的过程中，不可避免地存在着盲目无序建设和粗放管理，长期高负荷运转导致的系统故障，以及物理破坏和信息网络干扰等外部袭击，关键基础设施系统保护的形势异常严峻。

美国、欧盟等针对关键基础设施系统保护的学术研究与政策实践早已展开，但我国尚处起步阶段。韩传峰教授是该领域的重要推动者和实践者，土木工程专业的教育背景，融合对管理系统与系统工程 20 多年的学术探索，使得他的研究视角独特，内容丰富且具前瞻性，一直处于学术前沿。建设是短暂的，管理是永恒的，韩传峰教授更加注重对关键基础设施系统内在规律的把握，而非项目的规划与管理，研究成果更具政策性和应用性。

该书是国内第一部正式出版的关键基础设施系统脆弱性评估与保护仿真领域的专著，是韩传峰教授团队多年潜心研究成果的结晶。本书将复杂系统、复杂网络、动力学模型和博弈论等理论方法成功地融入到关键基础设施系统保护中，形成系统结构总体分析、规划和设计的新思路、理论和方法。采用“系统之系统”思想，从国家安全和经济社会可持续发展的高度，认知关键基础设施系统的风险，分析系统的相互作用规律，从功能角度提出脆弱性云分布模型，综合度量系统脆弱性分布，科学理解系统的行为机制。研究成果极大地丰富和发展了相关学科领域的研究理论与方法，同时为关键基础设施系统的规划、设计、建设、运营与维护等提供了科学支持和实践指导。

该书开创了中国关键基础设施系统保护研究的新方向，为研究者提供了理论与方法的有益借鉴；将关注重点由有形的规划建设转到无形的控制决策，有助于管理者在政策制定中开阔眼界，革新思维；提出了系统保护与脆弱性评估的有效方法和策略，使实践者的活动更具针对性，提高了关键基础设施系统的运行效率。

从理论到实践，从模型到政策，关键基础设施系统保护还有很长的路要走，该书迈出大胆而重要的一步，对此领域的理论与实践的发展做出了重要贡献。希

望更多的研究人员和从业者能够阅读该书，更多的学生和管理者能够加入进来，共同推动关键基础设施系统保护的研究与实践。



同济大学原校长、教育部原副部长
国家自然科学基金委员会管理科学部主任

前 言

2001年,“9·11”事件使疲软的美国经济迅速陷入衰退,并通过贸易、资本流动、汇率和金融传染等渠道波及全球,严重冲击了增长乏力的世界经济。2003年,北美大停电导致供水和输油中断、机场被迫关闭,造成交通停滞、通信中断,区域瘫痪,5000万居民的正常生活受到严重影响。2005年,卡特里娜飓风导致美国新奥尔良堤坝决口,洪水肆虐,造成巨大的人员伤亡和经济损失。2008年,中国南方地区遭遇大范围雨雪冰冻灾害,受灾省份达19个,人数超过1亿人,直接经济损失500亿元。上述事件表明,银行金融、能源供应、水利工程和交通运输等关键基础设施,存在着物质、地理、信息、逻辑等相互作用,遭遇袭击或破坏将导致功能下降,从而影响其他设施的正常运行,制约经济社会的发展,甚至造成国家难以防御打击的严重局势。

关键基础设施系统是由大量的物理设施、技术部件、运营过程和机构制度等构成的社会技术系统,其关键性在于,系统功能的稳定与可靠对国家安全和经济社会运行具有重要的战略意义。各国政府十分重视关键基础设施系统的保护。自1984年以来,美国政府从国家安全的高度,颁布实施了近10项关键基础设施系统保护方面的政策、总统令和国家计划,建立起一整套详细有效的关键基础设施系统保护体系。2006年,欧盟颁布《关键基础设施保护规划》法案,强调各成员国要加强对关键基础设施系统特性与保护的研究。

长期以来,中国对关键基础设施系统保护的重要性认识不足,缺乏从国家安全、经济社会可持续发展的高度,系统认知关键基础设施系统的脆弱性和风险性。关键基础设施系统的综合防范能力薄弱,对环境条件和灾害等级估计不足,规划和建设标准不科学,缺乏定期维护和适时更新,规模和质量未能及时得到增强和保障,不能有效地抵御突发事件,存在着不容忽视的脆弱性。同时,随着经济快速发展、信息技术突飞猛进,电力、通信和交通等信息密集型关键基础设施系统的规模与日俱增,系统间关联日益增强,加之突发事件频发,关键基础设施系统存在着不容回避的高风险性。

关键基础设施系统由大量存在耦合作用的功能子系统组成,具有开放性、层次性、动态性、自组织临界性、相互作用非线性等复杂系统特征。作为开放系统,关键基础设施系统内部及其与外部环境间,存在着物质、能量和信息的交换,运行过程受多种不确定因素干扰。一类关键基础设施系统的子系统在某一层次或环节上滞后或失效,均可引起连锁反应,导致整个系统崩溃;不同关键基础设施系统的子系统在不同层次上存在关联,在不确定因素干扰下,会产生系统间的连锁反应,影响多个系统的生存能力和功能,甚至崩溃。关键基础设施系统的运行状态和失效模式多样,单纯的技术手段或安全措施难以保证这一超大规模系统的稳定可靠,应从管理和控制等方面研究关键基础设施系统安全保护。

本书内容来源于作者长期从事关键基础设施系统保护领域研究的成果。采用“系统之系统”(system of systems)思想,立足学术前沿,综合运用复杂系统、复杂网络、动力学模型和博弈论(game theory)等理论方法,深入探索和科学理解关键基础设施系统的相互作用机理、脆弱性特征、行为机制和抗干扰能力等。分析单一关键基础设施系统内部故障、损坏、滞后或失效等导致的连锁反应和系统崩溃,仿真分析关键基础设施工程网络的保护策略;构建关联关键基础设施系统相互作用的动力学模型,分析得到连锁反应机制与修复策略;注重关键基础设施系统的功能和服务,建立系统的脆性传导关系网络,提出综合度量系统脆弱性分布的脆弱性云分布模型,评估系统的结构与即时脆弱性态势;关注关键基础设施系统保护的不确定性与动态性,将应急设施选址问题抽象为恐怖组织与政府间的完全信息动态博弈,建立反恐应急设施选址的动态博弈模型,分析双方的行为依赖与战略交互。

本书是韩传峰教授、孟令鹏博士、刘亮博士、姚晓勃博士、张超博士通力合作的结晶。韩传峰教授拟订体例与章节架构,统稿审定。第1章、第2章由韩传峰教授和刘亮博士撰写;第3章由刘亮博士和张超博士撰写;第4章、第5章、第6章分别由张超博士、姚晓勃博士、孟令鹏博士撰写。韩传峰教授、孟令鹏博士统校全稿。

本书得到国家自然科学基金面上项目“关键基础设施相互作用建模及脆性控制研究”(项目编号:70871093),国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“非常规突发事件处置模式及应急技术集成原理与方法”(项目编号:91024023),

国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“中国应急管理体系顶层设计原理方法及模式重构”（项目编号：91224003）等的资助，特此致谢。

由于水平所限，不足之处在所难免。作者对本书的任何事实、判断或科学偏差负责，对批评指正或提出改进建议的读者，表示衷心感谢。

韩传峰

目 录

第 1 章 关键基础设施系统相互作用与保护	1
1.1 关键基础设施系统及其相互作用	1
1.2 关键基础设施系统风险及保护	8
1.3 本书研究内容	12
第 2 章 理论与方法	15
2.1 复杂系统建模与仿真	15
2.2 复杂网络理论与方法	21
2.3 博弈论概述	28
第 3 章 单一关键基础设施网络脆弱性仿真与保护	34
3.1 关键基础设施复杂网络脆弱性	34
3.2 关键基础设施网络结构脆弱性仿真——以交通网络为例	38
3.3 关键基础设施网络功能脆弱性仿真——以电力网络为例	48
3.4 关键基础设施网络保护策略	53
第 4 章 关联关键基础设施系统相互作用建模及脆弱性分析	59
4.1 关联关键基础设施系统相互作用模型及修复策略	59
4.2 关联关键基础设施系统脆弱性分析	71
第 5 章 关键基础设施系统脆弱性云分布	85
5.1 关键基础设施系统服务的脆性传导关系网络	85
5.2 单一关键基础设施系统脆弱性云分布	92
5.3 关联关键基础设施系统脆弱性云分布	102
第 6 章 关键基础设施选址建模与仿真——以反恐应急设施为例	121
6.1 反恐应急设施选址动态博弈模型	121
6.2 能力约束条件下反恐应急设施选址动态博弈模型	134
6.3 失效风险下反恐应急设施选址动态博弈模型	143
第 7 章 总结与展望	153

7.1 主要结论	153
7.2 研究展望	155
参考文献	157

第 1 章

关键基础设施系统相互作用与保护

1.1 关键基础设施系统及其相互作用

1.1.1 关键基础设施系统

关键基础设施系统是由大量的物理设施、技术部件、运营过程和机构制度(人员和程序)等构成的社会技术系统,各组分相互作用、协同工作,产生、提供和配置经济社会运转所必需的产品和服务,其关键性内涵来源于功能稳定性和可靠性对国家安全和经济社会运行具有的战略影响^[1,2]。

1997 年,美国关键基础设施保护总统委员会(President's Commission on Critical Infrastructure Protection, PCCIP)提出,关键基础设施由诸多子系统构成,包括通信、电力、油气储运、银行金融、交通运输、给排水、应急服务和政府服务 8 类^[3]: ①通信,包括支持数据信息获取、存储、处理、传输、挖掘、分析、识别、控制与决策的计算机和通信设备、软件和程序;②电力,包括发电

厂、变电站、输送电网、管理控制和数据获取系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)等;③油气储运,即燃气和石油产品的生产、加工、储存、分发与运送;④银行金融,包括银行、非存款性金融服务公司、投资和基金公司、证券和商品交易所、零售及商业机构等相关业务组织实体及其运作、支持和参与方式等;⑤交通运输,即支持国家安全和经济社会正常运行的航运、水运、公路和铁路运输等;⑥给排水,即保障生产生活的水源、水库,过滤、清洁等水处理设备,以及管道等输送装置组成的系统;⑦应急服务,即医疗、警察、消防等救援系统;⑧政府服务,即政府所提供的公共行政管理及服务。

关键基础设施系统的界定不断发展和更新^[4]。2002年,美国国土安全部^[5]重新界定了13类关键基础设施,包括农业、食品、水、公共卫生、应急服务、政府、国防工业、通信、能源、交通运输、银行金融、化学工业和邮政航运。2003年,美国关键基础设施和资产总统办公室^[6]提出了关键资产的概念,包括核电站、水坝、有害物质存储设备,以及代表国家形象的肖像、纪念馆、政府和商务中心等。

1.1.2 关键基础设施系统相互作用

系统是要素及其相互作用关系的集合^[7]。作为一个多要素、多层次的动态系统,关键基础设施系统子系统的组成要素(如技术部件、组织、人员等)间存在物理或信息的相互作用,一类基础设施运行状态的改变,会通过某种联系和机制影响其他基础设施的运行状态和功能的提供^[8]。关键基础设施系统的相互作用机制复杂,考虑时空尺度、社会行为、国家或企业政策和利益相关者价值取向等因素,Rinaldi等^[9]从相互作用类型、耦合关系与驱动行为、关键基础设施属性、外部环境、失效类型和运行状态六个维度解析其相互作用,见图1.1。

1. 相互作用类型

Rinaldi^[10]将关键基础设施系统相互作用方式分为物质(physical)、信息(cyber)、地理(geographical)和逻辑(logical)4种主要类型,见表1.1。