



北方民族大学商学院博士文库

铁路网 抗毁性分析

Analysis on the Survivability of Railway
Network

王伟 著



经济管理出版社

ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE



北方民族大学商学院博士文库

本成果受到“宁夏回族自治区电子商务培训基地”项目资助

铁路网 抗毁性分析

Analysis on the Survivability of Railway
Network

王 伟 著



经济管理出版社

ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

铁路网抗毁性分析/王伟著. —北京: 经济管理出版社, 2017.2
ISBN 978-7-5096-4898-8

I. ①铁… II. ①王… III. ①铁路网—列车无线调度系统—安全—研究
IV. ①U285.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 323611 号

组稿编辑: 杨国强
责任编辑: 杨国强 张瑞军
责任印制: 黄章平
责任校对: 超凡

出版发行: 经济管理出版社
(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn
电 话: (010) 51915602
印 刷: 北京玺诚印务有限公司
经 销: 新华书店
开 本: 720mm × 1000mm/16
印 张: 11.5
字 数: 202 千字
版 次: 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5096-4898-8
定 价: 48.00 元

·版权所有 翻印必究·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

前言

我国幅员辽阔，四通八达、畅通无阻的铁路通道承担着大跨度的经济联系和相互交往的运输工作。在高负载、出现突发事件的情况下，铁路网功能会受到不同程度的损坏，当陷入瘫痪的状态时，需要及时采取应急措施使铁路网尽快恢复到正常状态，这个过程持续时间的长短反映了铁路网抗毁性能的好坏。许多客观存在的且已发生的事例说明，铁路网系统需要一个新的特性——铁路网抗毁性来描述，如 2008 年初的持续低温雨雪冰冻的极端天气、四川汶川地震、青海玉树地震等自然灾害以及高负载的突发事件。这些自然灾害及突发事件（以下统称为突发事件）发生后，铁路部门通过迂回的方式组织运输，缓解了突发事件对铁路运输系统功能的影响。

铁路网的抗毁性是指发生内部或外部突发事件，导致设施或服务失效后，铁路网维持或恢复其性能到一个可接受程度的能力，表征了铁路网应对突发事件的适应和恢复能力。铁路网系统作为一个具有复杂层次结构的系统，与其他网络具有本质的区别，其包括铁路物理网和铁路运输网。因此，铁路网的抗毁性研究不仅要考虑铁路物理网的抗毁性，而且要考虑铁路运输网的抗毁性。本书创新性地对从突发事件发生时起，到通过采取维修、调度等措施使铁路网（包括铁路物理网和铁路运输网）恢复到稳定状态时止的整个过程进行描述，应用多阶段决策理论提出铁路网抗毁性理论模型，研究了铁路网应急评估和恢复的技术，运用案例和算例分别验证了

模型及技术的有效性。

本书的研究结论主要有以下几点:

(1) 铁路物理网受突发事件的影响容易出现不连通的现象, 铁路旅客运输网具有无标度特性的小世界网络。本书分析了铁路网系统的构成, 将铁路网系统分为铁路物理网和铁路运输网, 并分别构建铁路网的网络模型, 以实证的方式分析了铁路网的复杂特性: 对于铁路物理网, 大部分节点度很低, 平均聚集系数接近于 0, 突发事件发生后容易造成网络不连通; 对于铁路旅客运输径路网, 部分节点的介数非常高, 网络中存在关键节点; 对于铁路旅客换乘网, 平均最短径路很低而聚集系数非常高, 是具有无标度特性的小世界网络, 其容错性很好, 但抗攻击能力不高。

(2) 提出铁路网的抗毁性分析和研究模型。在总结计算机、通信网抗毁性定义的基础上, 根据铁路网系统的可恢复性和他组织特性, 提出了铁路网抗毁性的定义, 即突发事件发生后, 铁路网维持或恢复其关键服务的能力, 可以概括为突发事件、适应性和恢复性三个方面。提出了铁路网抗毁性的分析模型, 即描述从突发事件发生时起, 到通过采取修复、调度等措施使铁路网恢复到正常状态时止的整个过程。在此基础上, 提出了铁路网抗毁性的研究框架。

(3) 从铁路物理网和铁路运输网两个层次分别提出抗毁性评估指标, 通过对突发事件下与正常情况下的网络性能的变化进行对比分析, 衡量铁路网系统的抗毁性能。通过对 2008 年雨雪冰冻灾害实例分析, 可以得出: 从铁路物理网和铁路运输网两个方面能够较全面、合理地对铁路网系统进行评估, 以突发事件发生前后网络性能变化为基础, 量化的指标能够反映铁路网的实际抗毁性能, 所提出指标的评估值与实际情况相符。利用以上提出的评估指标, 综合分析突发事件影响过程中各个阶段的抗毁性, 可以得出铁路网在整个应急过程中的整体抗毁性能。

(4) 从节点对网络性能贡献的角度提出的关键节点识别方法较现有方法更加准确。在铁路物理网修复方案制定中, 关键节点可能会直接影响到系统的关键服务以及整个系统功能。在借鉴现有关键节点识别指标和方法

的基础上,从节点或边被修复后对网络性能的贡献(包括路径的广义费用和恢复的运输量)角度,综合考虑客、货运输的优先级和运输需求量,提出关键节点的识别方法。通过算例对指标和识别方法进行验证分析,得出在研究如何识别突发事件下铁路网关键节点或边的问题时,本书提出的方法更加准确。

(5) 铁路客、货流疏散问题包括铁路客流疏散问题和铁路货流疏散问题。对于铁路客流疏散问题,针对旅客运输量大、按去向组织旅客运输的特点,通过将低等级的车站合并到高等级的车站构建了铁路旅客运输网,并提出了突发事件下铁路旅客输送合理径路的确定方法;对于铁路货流疏散问题,根据突发事件下铁路货物整车直达、货物输送有优先等级的特点,以列车为对象,将运输需求优先级转化为列车开行的权重系数,构建了包含载运工具调拨的动态服务网络模型,其以列车开行数最多和车辆的周转次数最大为目标。根据模型的特点,设计了一种按时间周期分段优化的启发式方法求解上述模型,并通过实例分析比较,验证了模型和算法的有效性,其可为突发事件下铁路应急保障预案的编制提供理论指导。

本书的创新之处在于:首先,通过对从突发事件发生时起,到通过采取调度、维修等措施使铁路网恢复到稳定状态时止的整个过程进行描述,将突发事件下铁路网的修复及调度调整视为在外部作用下的系统状态跃迁过程中的决策,提出了铁路网抗毁性的分析模型。从铁路物理网和铁路运输网两方面提出铁路网抗毁性评估指标,并对突发事件下与正常情况下网络性能的变化进行对比、量化和计算指标值,以此衡量铁路网的抗毁性能。该方法能够完整地评估突发事件下铁路网的抗毁性能,较之单纯精确分析突发事件下的网络性能更能反映实际情况。其次,基于“节点或边被修复后对网络功能的影响”的思路,从节点对网络性能贡献的角度提出关键节点或边的识别方法。结合铁路网系统的特点,指标的量化和计算考虑了客、货运输的优先级和运输需求量,较之单纯地从铁路网拓扑结构角度识别关键节点更加准确。最后,考虑到突发事件下铁路货物整车直达、货

物输送有优先级的特点,构建了包含载运工具调拨的动态服务网络模型,其以列车开行数最多和车辆的周转次数最大为目标。同时,提出了一种按时间分阶段取整的启发式求解方法,该方法借助 Lingo 求解工具求解松弛模型,结合逐步固定变量为整数值的启发式规则求得较优解。与 Lingo 软件直接求解相比较,该算法的求解时间效率高,并且求解结果的偏差较小。

目 录

第一章 绪论 / 001

- 第一节 研究背景 / 001
- 第二节 研究目的及意义 / 003
- 第三节 研究综述 / 005
- 第四节 研究方法及技术路线 / 022

第二章 铁路网系统复杂性分析 / 027

- 第一节 铁路网系统 / 027
- 第二节 铁路网系统的特性分析 / 032
- 第三节 铁路网系统的复杂性 / 034

第三章 基于复杂网络的铁路网复杂特性实证分析 / 037

- 第一节 复杂网络 / 037
- 第二节 中国铁路网数据 / 040
- 第三节 铁路网模型构建 / 041
- 第四节 实证分析 / 043
- 第五节 本章小结 / 051

第四章 铁路网抗毁性 / 053

第一节 铁路网抗毁性的提出依据 / 053

第二节 铁路网抗毁性的概念 / 054

第三节 铁路网抗毁性与相关理论关系 / 059

第四节 铁路网抗毁性模型 / 062

第五节 铁路网抗毁性研究框架 / 070

第五章 铁路网抗毁性评估方法 / 073

第一节 铁路网抗毁性的评估指标构建 / 073

第二节 铁路物理网抗毁性评估指标 / 077

第三节 铁路运输网抗毁性评估指标 / 080

第四节 实例分析 / 083

第六章 突发事件下铁路物理网修复方案研究 / 091

第一节 铁路物理网的关键节点和关键边 / 091

第二节 关键节点和关键边判定指标 / 094

第三节 关键节点和关键边的识别流程 / 099

第四节 铁路物理网修复时序方案 / 100

第五节 算例分析 / 102

第七章 突发事件下铁路客货流疏散方案研究 / 105

第一节 突发事件下铁路客货流疏散方案编制问题 / 105

第二节 突发事件下铁路旅客输送径路优化 / 108

第三节 突发事件下铁路货流疏散方案编制模型 / 117

第四节 铁路货流疏散方案编制算例 / 128

第五节 本章小结 / 137

第八章 总结及展望 / 139

附 录 货物运输网疏解方案算例计算结果 / 143

参考文献 / 157

后 记 / 173

第一章 绪论

铁路是国民经济的大动脉，是大众化的交通工具，承担着大跨度的经济联系和相互交往的运输工作，在我国的国民经济建设和社会发展的过程中起着不可替代的作用。随着铁路路网规模的不断快速增长，其遭受自然灾害、突发客流货流和特殊运营情况影响的概率逐渐增大。保证铁路运输的安全生产越来越受到重视：如何准确度量突发事件对路网的破坏程度以及对运输工作造成的影响，为突发事件发生后的调度、维修策略提供理论指导和支持，以及在突发事件发生前，如何评估路网的抗毁性等关键问题需要进一步的研究。

第一节 研究背景

铁路网是铁路进行运输生产的主要物质基础，铁路网具有复杂的层次结构。随着铁路网规模不断扩大，遭受自然灾害、突发客流货流和特殊运营条件增多，铁路网的安全风险增加。2008年1月下旬，中国南方大部分地区和西北地区东部出现了新中国成立以来罕见的持续雨雪和冰冻的极端天气，受灾害天气影响，京广线、沪昆线等主要干线牵引供电网和通信信号系统中断运行，铁路运输瘫痪，造成大量列车滞留晚点和停运，旅客积

压严重,铁路运输遭受到了罕见的影响。这次灾害对铁路网系统影响的突出特点:铁路物理网的连通性是良好的,但由于载运工具的原因,使铁路网的功能受到很大的影响。2008年5月12日,四川省汶川县发生地震,全国铁路除哈尔滨、沈阳、乌鲁木齐铁路局以外,都有震感,其中成都、西安、兰州、北京、太原铁路局震感强烈。地震对铁路运输影响较大,导致宝成线、成昆线及相关支线线路多处塌方,其中宝成线4处、成昆线4处、成渝线7处,沿线部分车站房屋设备不同程度遭到损坏,多处房屋出现裂纹,有31列客车、149列货车在途滞留。2010年4月14日,青海玉树发生7.1级地震,造成部分房屋倒塌,震区周边多条路段出现大面积的滑坡、沉陷、路面裂缝,震后10天内全国铁路累计开行“抢”字头救灾专列164列,紧急运输救灾物资1346车,开行“救”字头客车4列,开行“抢”字头军列3列,累计运送伤员168人,医护人员1937人。2013年4月20日,四川省雅安市芦山县(北纬30.3度,东经103.0度)发生的7.0级地震,震源深度13公里,重庆及陕西的宝鸡、汉中、安康等地均有较强震感,国道318线、省道210线、省道211线及宝兴县道路、芦山县龙门至大川道路、铜头电站至灵关道路因灾交通均中断,成都铁路局迅速扣停了运行中的客货列车,总共停开111列客车,并立即对成昆线、宝成线、成遂渝线、成渝线、成灌线等受影响线路设备进行排查,以最快的速度组织运输救灾物资,开行了以“抢”字头的救灾专列,最大限度地保证了救灾物资的运输,并逐步恢复运行以上线路上的列车。又如2013年7月22日甘肃省定西市岷县、漳县交界(北纬34.5度,东经104.2度)发生的6.6级地震,2013年8月12日西藏自治区昌都地区左贡县、芒康县交界(北纬30.0度,东经98.0度)发生的6.1级地震等。以上这些灾害对铁路网系统影响的突出特点是:铁路物理网连通性受损,业务受阻,受影响较严重时导致的瘫痪,给社会经济带来巨大的影响,破坏了人们的生活秩序。

突发事件(特别是许多种类的自然灾害)是不可避免的,但通过制定快速、有效的应急处置方案,其造成的损失可以大幅度降低甚至消除,如

何准确度量和控制突发事件对铁路网的影响,减少突发事件带来的损失是需要解决的关键问题。在突发事件发生前,通过对铁路网系统的适应性和恢复性进行研究,分析在突发事件影响下铁路网性能的变化,可以评估铁路网维持和恢复关键服务的能力,其反映了铁路网的抗毁性能,而具有良好抗毁性的铁路网对适应高负载和突发事件、保障铁路网功能具有重要作用;在突发事件发生后,在修复、调度调整策略下制定相应的恢复方案,尽快恢复铁路网性能,提高其应对突发事件的能力。本书围绕突发事件发生前后,以上应急预案分析和处置控制过程中所涉及的关键技术,研究突发事件下铁路网的抗毁性评估和恢复方法,其主要解决三个问题:第一个问题是突发事件下铁路网抗毁性评估问题,提出铁路网抗毁性的评估方法;第二个问题是突发事件下铁路物理网修复问题,提出突发事件下铁路物理网修复时序方案编制方法;第三个问题是突发事件下铁路客、货流疏散方案编制问题,提出突发事件下铁路客流和货流疏散方法。通过对以上问题的研究,提高应对突发事件的能力,使保障铁路网系统安全性的工作做到有的放矢,为铁路部门建立应急保障预案提供科学依据。

第二节 研究目的及意义

随着铁路网规模的不断扩大,提高铁路网的抗毁性能和增强突发事件下铁路网的恢复能力越来越受到关注。本书分析铁路网系统的构成及复杂性,提出铁路网抗毁性的定义及分析模型,给出铁路网抗毁性的评估指标及其计算方法。在此基础上,从铁路物理网和铁路运输网角度,提出了铁路物理网修复和铁路客、货流疏散方法,试图为突发事件下铁路的应急处置和控制提供理论指导。

一、研究目的

(1) 阐述铁路网系统的定义,分析其构成要素。在此基础上,构建铁路网的网络模型,以实证的方式分析中国铁路网的复杂特性,为铁路网抗毁性评估及突发事件下铁路网恢复方法的研究提供理论基础。

(2) 针对铁路网系统抗毁性评估问题,建立铁路网系统的抗毁性分析模型,给出铁路网系统抗毁性分析的框架,提出抗毁性评估指标及其计算方法。

(3) 突发事件发生后,关键节点的快速修复,能够有效提升铁路网系统的性能,通过研究关键节点的识别方法,给出铁路物理网修复时序方案。

(4) 铁路客、货流疏散问题可以分为铁路客流疏散和铁路货流疏散两个子问题。对于铁路客流疏散问题,针对突发事件下铁路旅客的输送特点,提出铁路旅客运输输送径路优化方法;对于铁路货流疏散问题,针对突发事件下铁路货物输送特点,提出铁路货流疏散模型,并给出快速求解方法。铁路客、货流疏散问题的研究能够为突发事件下的客、货运输疏散决策提供理论指导。

二、研究意义

铁路网规划要满足长远、持续发展的要求,不能忽视突发事件下铁路网的适应能力,铁路网抗毁性研究能够为判断规划铁路网络是否具有所期望的适应能力提供依据。再者,通过对铁路网抗毁性的研究,能够为既有线的路网优化、高品质运输产品设计和运输产品可靠性分析等提供科学理论依据。

突发事件具有突发性、紧急性和破坏性等特点,是不可避免的,要做到防患于未然,需要从预警管理的角度,对铁路网抗毁性进行研究,分析突发事件对铁路网系统的影响,通过制定相应的措施,提高应对突发事件的能力,使保障铁路网系统安全性的工作做到有的放矢,为铁路部门建立应急保障预案提供科学依据。

在理论方面,本书在既有研究工作的基础上,进一步完善铁路网特性的相关理论和突发事件下铁路应急管理理论,并对其他网络系统尤其是交通运输网络的相关理论研究提供借鉴意义。对该领域类似问题的研究,有一定理论意义和实际参考价值。

第三节 研究综述

本书以铁路网系统为研究对象,对铁路网抗毁性评估和恢复问题进行研究。通过检索国内外相关文献,将所涉及的相关理论与方法总结如下:

一、交通运输网络结构

交通运输在国民经济发展中具有重要作用,是国民经济的生命线。交通运输是依托网络型的固定设施提供服务的,其拓扑结构的特性决定了它的行为和功能,认识其拓扑结构,可为交通网络的规划、设计以及维护提供重要的依据。国内外学者对交通运输网络(铁路、城市公共交通、航空)做了大量的研究。随着复杂网络理论的兴起,物理学家运用统计学的方法研究交通运输网络的结构特征,主要分为以下几个方面:

(一) 航空网络

航空网络是指在一定区域内由若干条航线按照某种方式连接组成的复杂系统,包括机场、航线和飞机等要素。关于航空网络的研究分为两个方面:世界航空网和区域航空网。

在世界航空网方面,Amaral等(2000)针对世界航空网做了研究,得出两个重要的结论:一是世界范围的机场网络具有小世界网络的特征,度分布和介数分布都服从幂律分布;二是节点度最大的城市不一定是枢纽城市(介数最大的),按现有的网络模型不能很好地解释这种现象。Guimerà

(2004) 提出了一个基于地缘政治限制的新模型解释这种现象。即在一个国家内只有个别的门户机场能和国外机场连接, 其他机场只能在国内连接, 由此考虑其对机场网络增长的影响, 结果很好地解决了上述现象。Barrat (2005) 分析了 2002 年 International Air Transportation Association (IATA) 的数据库, 对世界航空网络进行了研究。他们得到了类似于 Guimerà 等的研究结论: 相对于网络的大小 $N \sim 10^4$ 来说, 平均最短路径长度依然很小, 只有 4.37, 而度分布 $P(k) = k^{-r} f(k/k_x)$, $r \approx 2.0$, $f(k/k_x)$ 是指截断函数。

在区域航空网方面, 李炜 (2004) 对中国的航空网 (ANC) 进行研究, 结果表明: 中国航空网具有小世界性质, 平均路径长度为 2.067, 簇系数为 0.7333, 度分布服从双段幂律分布。于海波 (2005) 以 1988~2003 年的数据分析了中国航空网络, 得出在此期间我国航空网络拓扑结构出现了结构上的退化, 反映了市场从有序向混沌无序的发展过程, 也反映了计划体制向市场体制转型过程中市场正经历着痛苦的整合过程。刘宏鲲 (2007) 应用统计物理学方法研究中国航空网络的拓扑结构及其影响因素, 分别以人口、两个城市之间的距离、第三产业产值作为优先连接概率模型的影响因素, 分析得出以第三产业产值为优先连接因素的仿真网络的度分布、最短路径长度、簇系数以及介数都与真实航空网络接近。Bagler (2008) 研究了印度航空网, 得出了类似中国航空网络的结论, 具有小世界性质, 网络具有层次性且负相关。Barrat (2005) 研究了北美航空网络, 发现平均最短路径长度为 4, 平均度约为 8.4, 度大的节点倾向于连接度小的节点。网络的簇系数非常大, 在度大时有递减的趋势。

(二) 公交网络

城市公交网络作为城市建设的重要组成部分之一, 直接关系到城市经济的发展、城市环境的保护及方便市民出行等方面。而城市公交网络的效率对城市的功能和市民的生活具有很大的影响, 现实中的城市交通都受到特定交通路线的限制, 如停靠点、公交线路等, 同时由于城市公交系统本身也是一个复杂巨系统, 因此改善城市交通网络的运输效率等问题可依靠

复杂网络的相关理论进行分析。运用复杂网络理论分析公交网络,有三种网络构建方法:公交站点网络模型、公交线路网络模型和公交换乘网络模型。以现实的城市公交线路中公交站点之间实际拓扑模型构建公交站点网络模型;以公交线路为顶点,如果两条公交线路之间有部分相同的站点,则这两个顶点之间有一条边连接构建公交线路网络模型;以公交站点为网络的顶点,按照公交站点的走向把线路沿线的站点连接起来构建公交换乘网络模型。

Sienkiewicz (2005) 分析了波兰 21 个城市的公共运输网络的拓扑结构特性,发现它们的度分布不是服从幂律分布就是服从指数分布。

Wu (2006) 从两个方面对城市公交网络进行了探讨,发现北京市公交网络具有典型的复杂网络特性,并通过随机攻击和蓄意攻击两种方式进一步分析了北京公交网络的有效性和抗攻击性。

张欣 (2006) 在大连市实际公交网络数据的基础上,构造了大连市公交停靠站点网络模型和大连市公交换乘网络模型。通过与相同规模的随机网络的对比,在大连市公交停靠站点网络上发现了其网络的小世界效应(具有相对大的集聚系数和相对小的平均最短路径长度)。通过分析大连市公交停靠站点网络的度值分布、边权值分布,发现这三个分布的双对数曲线大致均为直线,表明大连市公交网络具有无标度特征,公交网络对随机故障具有较强的鲁棒性。

李英 (2007)、惠伟 (2008) 对北京、上海、大连、深圳等城市的城市公交网络进行研究,从公交停靠站点网络、公交换乘网络和公交线路网络三种不同的方向研究了城市公交网络的复杂网络特性,对平均路径长度、聚类系数、节点度等方面进行了统计。

张玮 (2008) 阐述了城市公交复杂网络建模的三种方法,并以江苏南京市公交网络为例,分析城市公交网络的几何特征,研究结论表明:南京市公交网络具有一定的增长性,南京市公交网络的节点对新增节点有着很强的偏好依附性。在众多的节点中,大多数节点度很小,但也有一些节点度很大,这些节点一般都出于市区繁华地带或者是交通要道。