

物流保障网络 级联失效抗毁性研究

Study on Cascading Invulnerability of
Logistics Support Networks

李勇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

国家自然科学基金项目（71101013）成果
中国博士后基金项目（2013M531778）成果
湖南省教育厅优秀青年基金项目（11B013）成果

物流保障网络 级联失效抗毁性研究

Study on Cascading Invulnerability of
Logistics Support Networks

李勇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

物流保障网络级联失效抗毁性研究/李勇著. —武汉: 武汉大学出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-307-12908-5

I. 物… II. 李… III. 物流—物资保障—级联网络—研究
IV. F252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 050106 号



责任编辑: 鲍 玲

责任校对: 汪欣怡

版式设计: 马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉中远印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 10.75 字数: 152 千字 插页: 1

版次: 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-12908-5 定价: 30.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着复杂网络研究的发展，复杂网络的抗毁性已经成为复杂网络最重要的研究问题之一，其研究的重大理论意义和应用价值也日益凸显。在城市管理中，在高负载、出现突发事件的情况下，如何提高物资运输和人流输送网络的抗毁性，是管理者最重视的问题之一；在生物领域中，一些核心基因的故障会带来灾难性的后果；在经济发展中，一个国家或地区不确定因素引起的金融危机可能波及全世界；在军事网络中，各种复杂网络的抗毁性研究更具意义和价值。

高技术局部战争，实行的是多兵种联合作战，也需要全方位的综合保障。军事部门对综合保障的定义一般是作战保障、技术保障及后勤保障的综合，包括物资保障、技术保障、卫生保障、机动部队保障、军事运输保障、通信保障等内容。

物资保障隶属后勤保障，是综合保障的重要组成部分，涉及军用物资的筹集、储备和供应。这里讲的物资种类主要包括给养、军需、油料、建筑器材、弹药、补充装备及零配件、医药卫生器材、其他非军事专用物资等。

技术保障又称技术支援。随着技术的发展，武器装备中的技术含量越来越高。为了充分发挥装备的效能，对装备的技术维护要求也越来越高。此外，战争中装备损坏严重，期望全部由新装备来补充是不现实的，所以，装备的维修再生能力对战争胜负的影响就十分重大，这就需要调动技术人员、设备及备件等快速到达战伤维修点。

卫生保障又称卫生勤务。卫生保障的主要任务是运用科学技术保持和恢复军队有生力量，其保障的对象是战争的主体——人。卫

生保障的目的是提高作战人员的生存能力和战斗力。除战场自救以外，主要的卫生保障任务要依靠伤员后送、医疗人员前往等方式完成。

在战争过程中，除非战斗特需，一般都留有预备部队——机动部队。机动部队的任务是在战争需要的应急时刻投入战场，争取战争的胜利。机动部队保障就是及时地把预备部队投入到需要的战场。

军事运输是综合保障的核心环节。从上述四项保障内容可以看出，无论是物资输送、技术人员输送、伤病员输送还是机动作战部队的战场投送，任何一项保障工作都离不开军事运输。军事运输保障的主要内容有：军事运输组织管理、交通路线管线和交通工具的准备、交通路线的组织运用和抢修、抢建等。

军事通信是综合保障的神经中枢。所有上述的五项保障内容要实现其功能，完成保障任务，没有通信是不可能的。只有通过有效的通信手段，相互传达信息，保障资源才能按需求进行配置。通信保障的主要内容有：建立通信网、维护通信设备和设施等。

本书以保障资源的网络为研究对象。撇开物资、人员等具体的属性，抽取其被运输的共性，可以统称其为资源或保障资源，当资源在网络中运行时，均称其为物流，对应的网络为物流保障网络。物流在网络中运行，运载保障资源的车辆、轮船、飞机、管道等统称为载体。据此，可以把保障网络描述为：保障网络是为了保障现代战争所需，以基地等保障实体为依托，把各种保障资源按一定的要求和原则合理部署，形成网络化布局的保障体系。

在这个体系中，基地、兵站、仓库、医院、工厂、供应站、运输单位等构成保障实体，铁路、公路、水路、管线、航线等是连接成网的纽带。按功能划分，保障网络包括物资供应网、医疗救护网、交通运输网、技术保障网等。在网络中运行的有物资、弹药、兵员、技术实体等。局部战争保障就是有效运行保障网络，从而及时提供战争所需物资及人员、技术等。网络的保障能力、保障需求、保障内容、保障形式等受到作战样式、作战时间、作战地域、战争策略等诸多因素的影响。

保障网络分布于地理形态各异的局部地域内,各基地、仓库、修理所等保障实体之间,战场作战部队等被保障点之间的需求可能互不相同,连接这些保障实体的公路、水路、航线、管线等都存在属性差异。但是,要规划、建设保障某地域作战的保障网络,评价网络的可靠性如何以及如何改进,应抛弃这些实体及连接路线的某些属性,简化其为节点和边(或弧),把整个网络抽象为一个带有保障能力属性的网络模型。

本书首先利用概率母函数和分支过程方法解析分析了物流保障网络的临界抗毁性,以此为基础,又研究了面向任务的物流保障网络抗毁性,最后建立了物流保障网络抗毁性仿真平台,并将研究成果应用到某军事系统当中。

本书的内容主要集中在保障网络的建模,解析分析和仿真分析等各环节,力求从解析的角度证明研究方法的正确性,从仿真的角度扩展模型的可用性,从应用的角度实践成果的可行性。本书详述了建模、解析推导的过程,结合了系统工程、运筹学、随机过程、计算机仿真等领域的知识,对于复杂网络研究的初学者具有较好的参考价值,也可作为大专院校物流管理、物流工程、交通运输规划与管理、系统工程、系统分析与集成、工业工程、经济管理等专业的高年级本科生选修教材和研究生教材。

本书内容的一部分是对当前已经较为成熟的研究成果的系统总结;另一部分是作者近年来的研究成果。写作此书时,作者查阅了国内外大量的相关文献,力求做到内容新颖,取材丰富。撰写本书的主要想法是通过解析与仿真结合的方法进行研究,并通过系统实现其应用,为物流网络研究、复杂网络研究、复杂网络抗毁性研究提供参考,起到抛砖引玉的作用。然而由于物流保障网络的高度复杂性,同时受到研究条件和研究水平的限制,书中难免存在许多不足之处,敬请广大读者以及各界专家批评指正。

本书有关科研工作的完成得益于国家自然科学基金项目(71101013)、中国博士后基金项目(2013M531778)、湖南省教育厅优秀青年基金项目(11B013)的大力支持。

本书的完成还得益于与国内外同行专家的广泛学术交流与探

讨，特别得到了国防科技大学谭跃进教授、吴俊副教授、邓宏钟副教授，湖南大学赖明勇教授、曹二保副教授的大力支持，在此一并表示感谢。

作者

2014 年于长沙

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	6
1.2.1 物流保障网络研究现状	6
1.2.2 级联失效抗毁性研究现状	10
1.3 本书的主要工作	15
1.3.1 本书的主要工作和创新点	15
1.3.2 本书的组织结构	16
第2章 物流保障网络级联失效抗毁性建模	19
2.1 物流保障网络的网络模型	19
2.1.1 战术保障网络模型	24
2.1.2 战略保障网络模型	26
2.2 物流保障网络的负载模型	30
2.2.1 物流保障网络的负载表示方式	31
2.2.2 物流保障网络的负载形成机制	33
2.3 物流保障网络的级联失效抗毁性模型	43
2.3.1 物流保障网络级联失效抗毁性的定义	43
2.3.2 物流保障网络级联失效抗毁性影响因素	46
2.3.3 物流保障网络级联失效抗毁性建模	49
2.4 本章小结	53
第3章 基于容量的战术保障网络级联失效抗毁性分析	55
3.1 预备知识	55

目 录

3.1.1	概率母函数	56
3.1.2	分支过程	63
3.2	相同容量的战术保障网络级联失效抗毁性分析	72
3.2.1	解析分析	72
3.2.2	仿真分析	74
3.3	随机容量的战术保障网络级联失效抗毁性分析	75
3.3.1	解析分析	76
3.3.2	仿真分析	79
3.4	容量与节点属性相关的战术保障网络级联失效抗毁性分析	80
3.4.1	解析分析	80
3.4.2	仿真分析	82
3.5	本章小结	83
第4章	基于任务的战略保障网络级联失效抗毁性分析	84
4.1	任务空间约束的战略保障网络级联失效抗毁性分析	85
4.1.1	任务空间约束问题描述	85
4.1.2	任务空间约束仿真分析	87
4.2	任务时间约束的战略保障网络级联失效抗毁性分析	90
4.2.1	任务时间约束问题描述	91
4.2.2	任务时间约束仿真分析	94
4.3	本章小结	105
第5章	物流保障网络级联失效抗毁性分析系统设计与实现	106
5.1	软件总体设计	106
5.1.1	总体框架	106
5.1.2	系统接口	109
5.2	软件系统实现	112
5.2.1	场景管理子系统	112
5.2.2	想定管理子系统	116

5.2.3 系统仿真子系统	119
5.2.4 抗毁性分析子系统	122
5.3 系统简介	124
5.3.1 软件开发环境	124
5.3.2 系统介绍	124
5.4 本章小结	130
 第6章 应用实例	 131
6.1 战术保障网络抗毁性分析	131
6.1.1 局部作战想定与战术保障网络	131
6.1.2 战术保障网络级联失效抗毁性分析	133
6.2 战略保障网络抗毁性分析	135
6.2.1 战略储备想定与战略保障网络	135
6.2.2 战略保障网络级联失效抗毁性分析	140
 第7章 总结与展望	 145
7.1 本书总结	145
7.2 进一步研究与展望	147
 参考文献	 149

第1章 绪 论

1.1 研究背景

第二次世界大战以来，爆发全面战争的可能性越来越小，高技术局部战争成为当今主要战争形态。纵观马岛海战、格林纳达危机、美军袭击利比亚、海湾战争等战事，尤其是20世纪90年代以来的几场局部战争，体现了高技术条件下现代局部战争的特点：作战进程快、持续时间短、偶发性强、物资消耗巨大等。随着现代局部战争日益成型，保障的地位越来越重要，保障的水平、质量已经成为决定现代战争胜负的重要因素，保障的难度也骤然增加，需要建立全方位的后勤保障系统才能提供这种保障能力。保障难度增加的主要原因是：

第一，机动性要求高。现代高技术局部战争作战空间广阔，战争进程加快，推进迅速，战场机动性高。战场的高度机动化要求保障与作战进程相适应。然而，战争偶发性强，作战规模和作战地点难以准确判断，导致保障的方位、力度、时间难以准确预计，其保障难度可想而知。伊拉克战争中，“快速机动，抓住战机”是美军的特点。美军的地面机动部队主要采取机械化开进的方式，尤其是美军第3机械化步兵师拥有日行170千米的开进速度，这等于海湾战争时部队开进速度的3倍。令人关注的是，这种机动方式不再是简单的攻城略地，而是依靠空中火力优势直奔要害领域，甚至不顾后勤保障暴露出的危险和弱点，以至于后勤补给曾一度出现困难^[1]。

第二，保障任务繁重。参战兵力兵器多，各种资源消耗巨大，

补给品种复杂,保障任务繁重。现代战争是诸军兵种联合作战,军队装备的技术兵器、器材越来越多,也越来越复杂,战争中资源的消耗量越来越大,增长迅速。美军在历时仅 42 天的海湾战争中物资消耗高达 3000 多万吨,约相当于前苏联卫国战争消耗总量的 50%^[2],投弹量为 50 万吨,月平均高达 35.7 万吨,是越南战争的 4.5 倍,是朝鲜战争的 19 倍,另以前苏军为例,1945 年一个炮兵师一次齐射的弹药消耗量是 2.4 吨,到了 1968 年则达到 53 吨,提高了 22 倍^[2]。再如在对越自卫反击作战中,我军在 28 天的作战中,总共消耗物资 35 万吨,为抗美援朝月消耗量的 4.4 倍^[2]。未来可能的高技术战争中,敌我双方斗争手段更多,破坏威力更强,物资消耗量更大,保障任务更加繁重。

第三,战场损伤率高,技术保障任务艰巨。高技术装备技术密集、结构复杂,包装、储运、使用、维修技术要求高,战场损伤率高,技术保障任务艰巨。高技术兵器的使用使现代战争具有极大的破坏性、消耗性,战场毁伤严重。海湾战争中,伊军 80% 的指挥控制系统被摧毁,95% 的雷达无法运转,30% ~ 45% 的坦克等重型装备受损。现代战争进程快、持续时间短,损坏的装备不可能像二战时那样运送到后方进行修理,而必须进行战场抢修,较快地恢复其战斗力,这就对技术保障提出了很高的要求,备件及技术人员等必须及时到达战伤抢修区。据美军统计,在伊拉克沙漠地区,“阿帕奇”直升机即使在有防尘罩的情况下飞行,每天吸尘量仍达到 40 千克。除了更换发动机的零件,基本上没有其他办法。美军为了保障“阿帕奇”作战,调集了大量的发动机和零配件^[4]。

第四,运输线、通信线上的破坏与反破坏斗争更加激烈。由于军事保障对战争胜负的影响越来越大,地位越来越突出,战争双方对运输线、交通线等保障要道的破坏已提升到战略地位。马岛战争中,英军封锁阿根廷与马岛的海上交通线,驻守马岛的阿军 1.1 万人因弹尽粮绝而向数量少于自己的英军投降。海湾战争中,多国部队共出动飞机 2000 多架,对伊境内的指挥控制中心、各类仓库、通信及运输等网络系统等进行了集中轰炸,摧毁其中大部分设施,炸毁弹药库、油料库、给养库等 200 多个,底格里斯河与幼发拉底

河上的 36 座桥被炸 33 座，导致保障网络严重毁坏，削弱其保障能力的 90%^[5]。伊拉克战争中，由于美军采取“直取核心”和“快速机动”的战略，主力部队置沿途城市及守军于不顾，绕城而过急向巴格达进军，导致其保障线频频受袭扰，迟滞了部队前进。英国媒体报道，由于需要解决保障问题，美英联军向巴格达的推进被迫暂停 4~6 天。

技术的进步、战争形式和作战样式的重大变化，使得保障已经不再是简单的粮草先行，而成为现代战争取胜的关键因素之一。指挥、通信、侦察、监视的网络化已经使现代战争演变成体系与体系的对抗^[4]，而体系的对抗需要全方位的网络型保障体系。只有建立完善的网络型保障体系才能与现代战争相适应^[3]。

在现代战争中，保障网络系统是敌对双方为达到其战役、战略目的而进行干扰、破坏的主要对象。在高技术兵器多方位、长时间、大规模、高精度、强火力的综合立体打击下，保障网络系统的生存能力将受到严重威胁。网络的抗毁性对网络功能的发挥甚至战争的结局具有关键性的影响。若网络系统的抗毁性差，可用性不高，极易导致网络的保障能力不足，装备无法正常发挥其效能，或造成保障网络瘫痪、指挥失灵，影响战争结局。马岛战争、海湾战争、科索沃战争已经给出了最切实的例证，尤其是海湾战争，总共历时 42 天，战略空袭就占了 38 天，可以说，海湾战争就是保障网络的袭击战。破坏敌人的保障网络可以达到不战而屈人之兵的目的。可见，保障网络系统影响战争全局的发展，在敌方破坏、自然灾害和技术故障等不利条件下，保障网络必须具备较高的抗毁性。

高技术局部战争实行的是多兵种联合作战。为了保障战争的胜利，需要全方位的综合保障^[7]。军事部门对综合保障的定义一般是作战保障、技术保障及后勤保障的综合^[8]，这不同于保障性工程方面的装备综合保障^[9]概念，装备综合保障指的是在装备的寿命周期内，为满足系统装备完好性要求，降低寿命周期费用，综合考虑装备的保障问题，确定保障性要求，进行保障性设计、规划并研制保障资源，及时提供装备所需保障资源的一系列管理和技术活

动。综合保障是物资保障、技术保障、卫生保障、机动部队保障、军事运输保障、通信保障等的总称。

1. 物资保障

物资保障隶属后勤保障，是综合保障的重要组成部分，涉及军用物资的筹集、储备和供应。这里讲的物资种类^[10]主要包括：给养、军需、油料、建筑器材、弹药、补充装备及零配件、医药卫生器材、其他非军事专用物资等。

随着军事技术的发展，战争中物资的消耗量不断增大。为了保证军队在高技术局部战争中获得胜利，必须及时提供所需物资。

2. 技术保障

技术保障又称技术支援。随着科技的发展，武器装备中的技术含量越来越高。为了充分发挥装备的效能，对装备的技术维护要求也越来越高。此外，战争中装备损坏严重，期望全部由新装备来补充是不现实的，所以，装备的维修再生能力对战争胜负的影响是十分重大的，这就需要调动技术人员、设备及备件等快速到达战伤维修点。另外，在高技术局部战争中，战争对交通设施以及物资仓库、基地、兵站等军事设施的打击也成为主要的作战样式。为了保证网络功能的正常发挥，这些设施毁坏以后也需要及时调动技术力量加紧维修。装备技术保障和设施的维修保障都属于技术保障的重要内容。

3. 卫生保障

卫生保障又称卫生勤务。卫生保障的主要任务是运用科学技术保持和恢复军队有生力量，其保障的对象是战争的主体——人。卫生保障的目的是提高作战人员的生存能力和战斗力。除战场自救以外，主要的卫生保障任务要依靠伤员后送、医疗人员前往等方式完成。

4. 机动部队保障

在战争过程中，除非战斗特需，一般都留有预备部队——机动部队。机动部队的任务是在战争需要的应急时刻投入战场，争取战争的胜利。机动部队保障就是及时把预备部队投入到需要的战场。

5. 军事运输保障

军事运输是综合保障的核心环节。从上述四项保障内容可以看出,无论是物资输送、技术人员输送、伤病员输送还是机动作战部队的战场投送,任何一项保障工作都离不开军事运输。军事运输保障的主要内容有:军事运输组织管理、交通管线和交通工具的准备、交通线和管线的组织运用和抢修、抢建等。

6. 通信保障

军事通信是综合保障的神经中枢。所有上述的五项保障内容要实现其功能,完成保障任务,没有通信是不可能的。只有通过有效的通信手段,相互传达信息,保障资源才能按需求进行配置。通信保障的主要内容有:建立通信网、维护通信设备和设施等。

由上述的分析可以看出,在综合保障中涉及的保障资源可以分为三类:

第一类是物资类保障资源,大都属于消耗品,如装备、弹药、维修耗材、被装、饮食等;

第二类为人员类保障资源,包括装备使用与维修保障人员、交通设施等保障网络构成实体的维修人员、机动部队等;

第三类为信息类保障资源,如通信点、通信线路等。

保障资源按其属性可以分为两类:物质资源与信息资源。物资类保障资源和人员类保障资源以及通信设备等均需要通过运输供应网传输,我们称之为物质资源。而指挥信息以及各类通信数据称为信息资源。鉴于通信网的研究已经比较成熟,本书特选取物质资源的网络作为研究对象。如果从物资、人员等具体的属性中抽取被运输物资的共性,可以将其统称为资源或保障资源,当资源在网络中运行时,均称其为物流,对应的网络为物流保障网络,将运载保障资源的车辆、轮船、飞机、管道等统称为载体。

据此,可以把物流保障网络描述为:物流保障网络是为了保障现代战争所需,以基地等保障实体为依托,把各种保障资源按一定的要求和原则合理部署,形成网络化布局的保障体系。

在这个网络体系中,基地、兵站、仓库、医院、工厂、供应站、运输单位等构成保障实体,即网络的节点。铁路、公路、水路、管线、航线等是连接成网的纽带,即网络的边。按功能划分,

物流保障网络包括物资供应网、医疗救护网、交通运输网、技术保障网等。在网络中运行的有物资、弹药、兵员、技术实体等。局部战争的物流保障就是有效地运行物流保障网络,及时提供战争所需物资及人员、技术等。网络的保障能力、保障需求、保障内容、保障形式等受到作战样式、作战时间、作战地域、战争策略等诸多因素的影响。物流保障网络的目标就是在各种条件下提供完成军事保障任务的能力。本书中,如果没有特别指出,保障任务就是指军事保障任务。

目前,对于装备的可靠性、维修性^[8,11]和保障性的研究比较普遍,然而将保障网络系统作为研究对象的还比较少,研究范围仅局限于通信网络的可靠性、交通网络的连通性以及保障体制(单兵种自给保障向三军联勤保障过渡)等方面,距离适应现代化局部战争的保障要求还有很大的差距。此外,保障网络的建设也缺乏理论的指导,所以,进行保障网络的抗毁性研究,特别是基于物资流的动态抗毁性——级联失效抗毁性的研究有着非常重要的理论和实际意义。

1.2 研究现状

1.2.1 物流保障网络研究现状

现代战争中,保障重要性的提高促进了物流保障网络的发展。物流保障网络作为一个整体,现有研究资料主要是关于破坏敌方保障网络策略和保障资源调度的。国内文献对物流保障网络抗毁性的研究尚处于定性研讨和分析阶段,主要集中在对物流保障网络的网络实体——交通网络的一些抗毁性指标的研究。

1.2.1.1 物流保障网络的建模研究

在保障网络建模分析方面,很少有从宏观上用复杂网络的观点来研究的文献,大多数是从微观的角度出发建立影响保障能力的指标模型,或者在保障网络的子网络(公路网、通信网等)上建立模型,分析影响保障能力的因素。

Baker 等人^[12]建立了基于战略航线容量的大规模线性规划模型,可根据运输编队安排物资和人员的任务路线,但没有考虑网络毁伤及毁伤后的再路由问题;Lee^[13]分析了战役中兵力和物资运送问题,并通过公路网络建立了数学规划模型;Sanso 等人^[14]针对和平环境下的交通问题,研究了利用路由模型评价网络可用性指标问题;Huffaker 开发了红蓝双方对抗演习中的普通物流模型,并提出了两个评估指标:供应天数(DOS)和供应事件数(EOS);在考虑毁伤发生的情况下,Erkut 等人^[15]研究了交通网络的功效,其中考虑了路由问题等。

国内关于这个问题的研究起步较晚,出现的文献也少。现有研究成果主要有:汤德品等人^[10,16]以若干统计资料为基础,对建立区域性物流中心的公共交通运输网络模型进行了初步的探讨;王宗喜^[17]等人在多年研究仓储问题的基础上,讨论了军地物流联合发展的问题;方爱华^[18]研究了国防交通保障问题,探讨了国防交通保障方案的编制方法、设想;刘建尧等人^[19]研究了军事交通道路的优化选择问题,提出了多参数带约束限制的风险运输网络模型;马卫民等人^[20]对局内军车调度的时间优化及其竞争策略问题进行了初步的研究,等等。徐军教授等人^[21]研究了公路网络连通性问题,定义连通强度为网络中所有节点对的连通强度的平均值。万绪军等人^[22]提出了一种交通网络连通性表达法——“边标号法”,分析了城市交通网络的结构。针对一般网络,许多学者^[23-33]研究并提出了以最重要单元的形式描述的网络单元重要度概念及相关算法。这些研究成果可以归结为基于最短路的单元重要度^[23-25]、基于最大流的单元重要度^[26-29]和基于最小生成树的单元重要度^[30-33]三大类。在已经出现的文献中,基本都是从最重要的节点(most vital node, MVN)或最重要的边(most vital edge, MVE)方面来描述网络单元的重要度。在物流保障网络中运行的车辆、人员等都是网络流,关于网络流的研究由来已久,卢开澄、谢政、Bela Bollobás 等人^[34-36]分别在其著作中对已经取得的成果作了系统总结。

张凤林^[37]建立了物流保障网络可用性指标体系。他将物流保障网络可用性指标分为四个层次:网络拓扑层、网络单元层、基础