

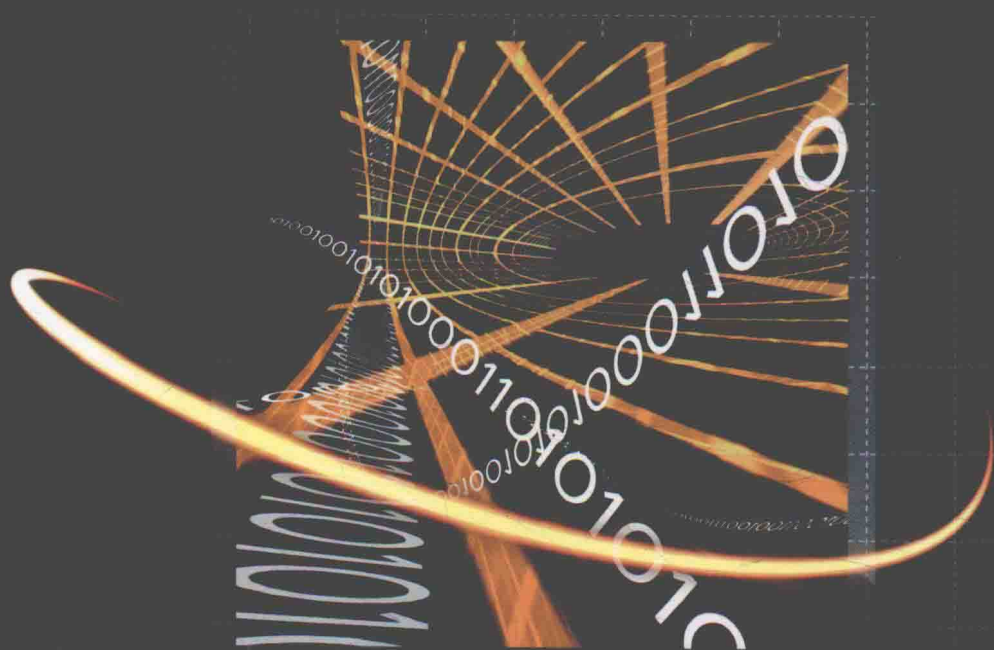


高端科技专著丛书

网络化目标体系 建模与分析

Networked Target Systems Modeling and Analysis

◆ 朱承 雷霆 张维明 刘忠 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高端科技专著丛书

网络化目标体系建模与分析

朱 承 雷 霆 张维明 刘 忠 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书面向军事运筹、指挥控制、目标选择等相关领域的研究和工程技术人员,提供有关网络化目标体系建模分析方法的阐述和介绍,期望对相关领域的发展起到抛砖引玉的作用。全书共分为6章,首先介绍了目标体系分析问题及相关概念,描述了网络化目标体系建模与分析的框架,梳理了相关基础理论与方法;然后介绍了基于单层、双层网络阻断的方法,基于故障树的方法,基于贝叶斯网络的方法,基于博弈论的方法。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

网络化目标体系建模与分析/朱承等编著. —北京:电子工业出版社,2017.1
(高端科技专著丛书)

ISBN 978-7-121-30640-2

I. ①网… II. ①朱… III. ①计算机网络-系统建模 IV. ①TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第306106号

策划编辑:曲 昕

责任编辑:康 霞

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:301千字

版 次:2017年1月第1版

印 次:2017年1月第1次印刷

定 价:48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: quxin@phei.com.cn。

前 言

在信息化条件下的现代战争中，交战双方已不再是简单的火力对抗，而是体系与体系之间的对抗，火力打击的目的也不可能像过去消耗战那样是完全摧毁对方的所有可能目标，而是通过对有限目标的摧毁，达到对对方作战体系迅速、高效的打击效果。

目标体系分析是指依据作战目的和意图，对战场各类目标的特点及其相关性进行分析、计算、对比，从中筛选出有助于作战目的实现的关键目标，从而快速高效地实现作战意图。这一问题不仅是涉及战争目的和作战思想的重大问题，更是一个复杂的技术问题，已成为信息化战争中作战筹划和指挥决策的核心。

美军非常重视目标体系分析的相关理论与方法。20 世纪 90 年代以来，从五环打击理论、基于效果的作战理论、战略瘫痪理论、快速决定性作战，到如今的空海一体战理论等一系列新军事理论和概念的出现，无不是将敌方视为整体来进行目标的选择和打击，目的是使得敌方的作战体系崩溃或者失效。科索沃战争、伊拉克战争到阿富汗战争中的目标选择，都是以使敌方战场重心瘫痪为打击目的，而不是以大面积摧毁敌方目标为目的。美军在其作战条令中明确给出了选择打击目标的基本流程，将基于效果作战理论和体系作战思想融入其中。随着我军建设指导思想与装备的发展，以目标为中心的作战样式已成为未来发展的重要方向，迫切需要大力发展目标装备，亟需目标体系建模与分析理论、方法和技术平台的支撑。另外，在我军体系化建设的同时，利用目标体系分析方法从对手的角度分析自身，能更好地找到体系建设中的薄弱环节，提高体系的抗毁性和鲁棒性。

本书作者及所在研究团队从 2009 年开始，在国家自然科学基金、国防预研、军口“863”等项目的支持下开展了目标体系建模与分析相关理论与方法的研究，同时通过承担相关型号项目，进行了目标体系分析的实践。在此过程中，我们深感目标体系分析领域是一个有着现实需求的新兴研究领域，同时也深刻认识到该领域在理论方法上有大量难题亟待突破，大量基础性、理论性、技术性问题有待解决，工程实践也亟需理论方法牵引。有感于此，我们将本团队在该方向多年来的研究成果进行了整理，提炼出在目标体系建模与分析中重要的典型问题，从数学角度给出对应的建模框架、模型和算法，并给出计算实验的过程和结果。

全书共分为 6 章。第 1 章为概述，介绍目标体系分析问题及相关概念，描述网络化目标体系建模与分析的框架，梳理相关的基础理论与方法。第 2、3 章分别介绍基于单层、双层网络阻断的模型和求解方法，第 4 章介绍基于故障树的模型和求解方法，第 5 章介绍基于贝叶斯网络的模型和求解方法，第 6 章介绍基于博弈论的模型和求解方法。全书由朱承研究员整体规划、统稿，并撰写第 1、2、3 章，雷霆撰写第 4、5、6 章，张维明教授、刘忠教授参与全书整体规划及第 1、5、6 章部分内容的撰写。

本书的出版得到国家自然科学基金（71571186，61273322）及教育部“指控组织设计与优化”创新团队等项目的资助，在此深表谢意。感谢本研究团队黄金才研究员、修保新

研究员、程光权副研究员、朱先强博士等，他们的思想和工作为本书内容提供了宝贵参考和指导。感谢肖开明、魏翔宇两位博士研究生，他们参与了书稿整理及计算实验工作。感谢周鋈博士、冯秀群硕士在研究生阶段所做的相关研究和工程实践，感谢冯暘赫博士、成清博士及团队中其他参与目标体系分析研究和实践的各位同学。

本书面向军事运筹、指挥控制、目标选择等相关领域的研究和工程技术人员，提供有关目标体系分析方法的系统性、专门性阐述和介绍，期望对相关领域的发展起到抛砖引玉的作用。本书所阐述的内容仍然处于探索阶段，再加上作者本身的能力和水平所限，其中错误、疏漏在所难免，恳请广大读者朋友提出宝贵意见和建议，以利于我们继续研究。

编著者

目 录

第 1 章 目标体系分析概述	1
1.1 目标与目标体系	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 概念	3
1.2 网络化目标体系建模与分析	9
1.2.1 问题	9
1.2.2 框架	11
1.2.3 要素	12
1.2.4 目标体系的分析扩展	21
1.3 相关理论与应用	21
1.3.1 体系理论	21
1.3.2 复杂网络理论	27
1.3.3 信息与决策理论	29
1.3.4 可靠性理论	32
1.4 本书的组织结构	33
第 2 章 基于单层网络阻断的方法	34
2.1 概述	34
2.1.1 相关概念	34
2.1.2 建模思路	35
2.2 带资源约束的单层网络最短路阻断模型	37
2.2.1 模型描述	37
2.2.2 基于分解模型的 Covering 分解算法	42
2.2.3 计算实验	45
2.3 多目标单层网络最短路阻断模型	52
2.3.1 模型描述	52
2.3.2 子图分解算法	54
2.3.3 计算实验	59
第 3 章 基于多层网络阻断的方法	62
3.1 概述	62
3.1.1 相关概念	62
3.1.2 建模思路	62

3.2	反馈依赖的双层网络最短路阻断模型	65
3.2.1	模型描述	65
3.2.2	算法设计	70
3.2.3	计算实验	74
第4章	基于故障树的方法	79
4.1	概述	79
4.1.1	相关概念	79
4.1.2	建模思路	79
4.2	基于静态故障树的模型	82
4.2.1	目标体系失效机制的静态故障树描述	82
4.2.2	基于静态故障树的目标体系单阶段分析模型	83
4.2.3	算法设计	83
4.2.4	计算实验	88
4.3	基于动态故障树的模型	91
4.3.1	目标体系失效机制的动态故障树描述	91
4.3.2	基于动态故障树的目标体系多阶段分析模型	95
4.3.3	算法设计	96
4.3.4	计算实验	101
第5章	基于贝叶斯网络的方法	106
5.1	概述	106
5.1.1	相关概念	106
5.1.2	建模思路	107
5.2	基于 OOBN 的模型	109
5.2.1	目标体系失效机制的 OOBN 描述	109
5.2.2	基于 OOBN 的目标体系单阶段分析模型	113
5.2.3	算法设计	114
5.2.4	计算实验	117
5.3	基于 OODBN 的模型	121
5.3.1	目标体系失效机制的 OODBN 描述	122
5.3.2	基于 OODBN 的目标体系多阶段分析模型	129
5.3.3	算法设计	134
5.3.4	计算实验	136
第6章	基于博弈论的方法	140
6.1	概述	140
6.1.1	相关概念	140
6.1.2	建模思路	141
6.2	基于多阶段博弈的模型	144

6.2.1 模型描述	144
6.2.2 基于逆向归纳法和启发式的求解算法	148
6.2.3 计算实验	149
6.3 基于随机博弈的模型	159
6.3.1 模型描述	159
6.3.2 基于逆向归纳法和启发式的求解算法	162
6.3.3 计算实验	163
参考文献	172

第1章

目标体系分析概述

目标选择一直是战争中的重要问题。随着信息与网络技术的兴起与发展,体系作战成为新的战争形态,各作战要素深度互联,力量凝聚,并具有更高的鲁棒性和适应性。在此背景下,如何对目标体系进行分析,并科学合理地选择目标具有重要的理论价值和实际意义。

本章介绍目标与目标体系的相关概念,提出目标体系分析问题,给出网络化目标体系建模与分析的框架,并简要介绍相关的理论与方法,最后对本书的组织结构进行概述。

1.1 目标与目标体系

孙子曰:“敢问:‘敌众整而将来,待之若何?’曰:‘先夺其所爱,则听矣。’”(《孙子兵法·九地篇》)。孙子兵法中的这句话是指当面临敌人时(“敌众整而将来”),要先选择敌方的要害目标进行攻击(“先夺其所爱”),才能够控制和击败敌方(“则听矣”)。

1.1.1 背景

目标与目标选择长期以来就是战争中的重要问题,与国家安全、军事战略密切相关。正确地选择目标可以达到快速瓦解对手,以最小的代价实现战争意图的目的。

在1991年的海湾战争中,美军把伊拉克军事目标情报输入相关的目标体系分析系统,对目标逐个分析、筛选、排序,对准备突击伊拉克的5类12种共600多个目标在计算机系统的辅助下进行了分析,并最后确定主要打击的50个重要目标^[1],实现了快速使伊拉克战争能力瘫痪的目的。海湾战争中联军空袭目标分布如图1.1所示。

2015年,联军在叙利亚及伊拉克境内对伊斯兰国(IS)的空袭中,除了消灭IS的作战力量外,另一个重要作战意图是削弱IS通过石油获利的能力。IS的石油获利链条包括油田(Oil Fields)、运输系统(Primary and Smuggling Routes)、炼油厂(Mobile Refinery)、石油黑市(Oil Market)等。为了打击IS通过石油获利的能力,同时避免环境和人道灾难,联军重点空袭了IS获取和运输石油的设备,如图1.2所示。

其中,联军的空袭行动以IS获取和运输石油的设备、油田集中控制设备为主,集中在代尔祖尔(Deir Ezzor)、拉卡(Raqqa)至伊德利卜(Idlib)沿线,以实现油田生产、运输和黑市交易瘫痪为目的。

通过对目标的合理选择并打击，联军在 2015 年 12 月将 IS 的石油产量削减了 30%。

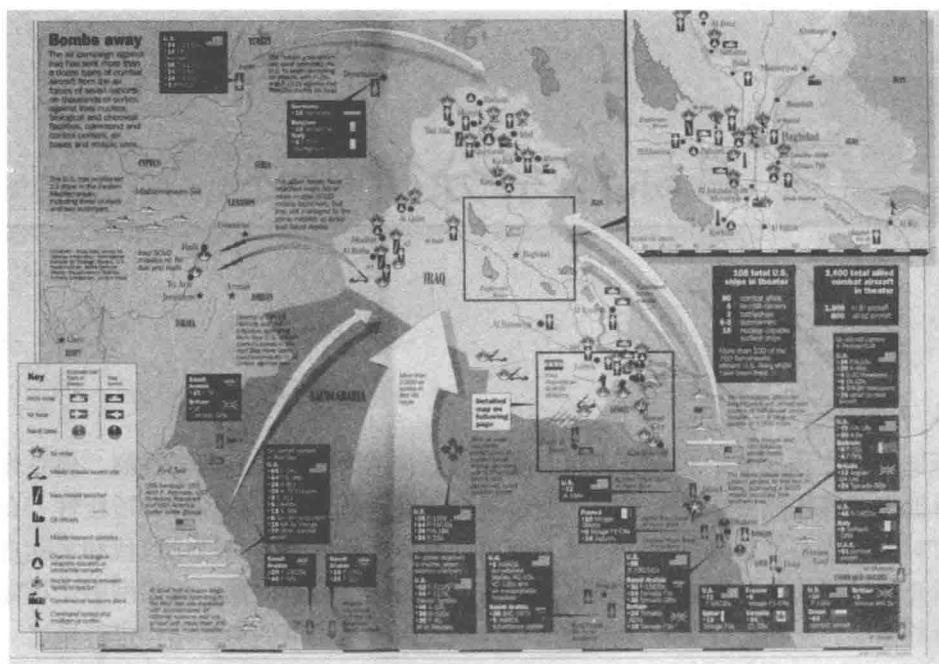


图 1.1 海湾战争中联军空袭目标

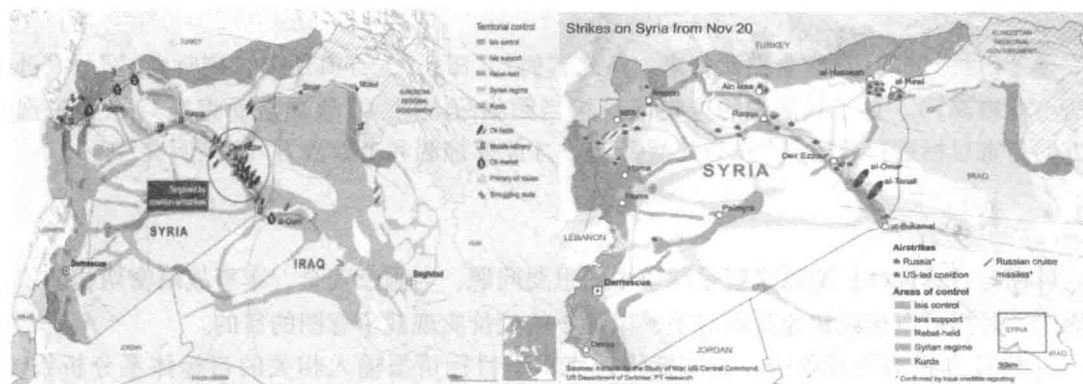


图 1.2 海湾战争联军对 IS 石油目标打击示意图

与目标相关的工作已成为信息化战争中作战筹划和指挥决策的核心问题，受到高度重视。美军非常重视目标选择，其目标分析与选择理论相对成熟和完善，并建立了国家级、战区级、军种级的目标选择机构，注重在平时对目标情报的搜集和分析。更有甚者，日本《军事研究》2014 年 11 月刊登了一篇题为《攻击长江铁路桥可产生摧毁中国的效果》的文章^[2]，提出了在难以对中国内陆实施长时间持续轰炸的条件下，选择京广、京沪、京九、武广等线路的长江铁路桥作为打击目标将成为瓦解中国战时经济、使中国屈服的理想策略，中国长江铁路桥示意图如图 1.3 所示。除给出基于中国南北交通流量的计算依据外，文章还进一步给出了利用巡航导弹从防空能力相对薄弱的中国西南方向进行突击的“低成本”实现方案。在美国“重返亚太”和中日摩擦加剧的大背景下，该文一经提出立刻引发了各方

强烈关注和热烈讨论。

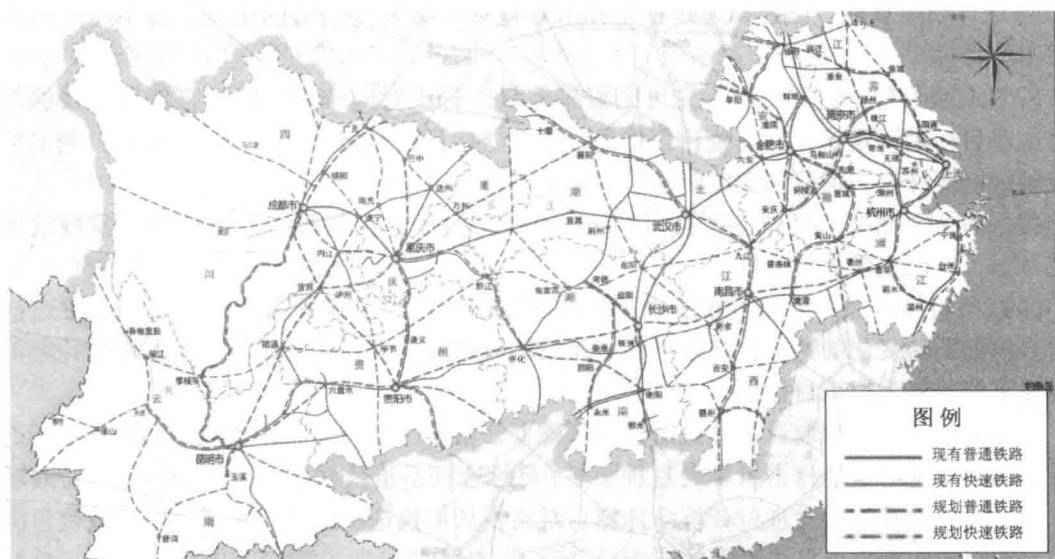


图 1.3 中国长江铁路桥示意图

该文分析,主干线铁路桥从下游算起,包括位于南京的京沪线(双复线)、京沪高铁线(六线),位于武汉的武广客运线(复线)、京广线(复线)的4座桥。如果破坏了这4座桥,连接南北铁路网的25条线路中将有14条中断,会减少中国6成运输容量。

第二优先的是剩余对应复线的3座铁路桥。从长江出海口方向起,分别是芜湖的淮南线(非电气化线)、九江的京九线、宜昌的焦柳线,如果这些桥也不能使用,连接南北的25条线路中,将有22条无法通车,可让中国丧失超过9成的南北运输量,南北铁路网的联络功能事实上将丧失。

再破坏剩余的3座单线铁路桥,中国铁路网将完全丧失南北联络功能。此为第三优先攻击目标。这3座桥分别位于重庆的川黔线、宜宾的内六线、攀枝花的成昆线。

以上案例无不说明目标及目标选择对于战争准备和军事行动的极端重要性。

1.1.2 概念

美军联合目标选择条例对目标定义如下:“目标是一个可能对其实施打击或采取行动的实体或物体。^[3]”并指出,一个目标可能是一个地域、综合体、设施,一支部队,一套装备,一种能力,一个功能、个人、集团、系统、实体或行为,查明这些目标,并对其实施打击,对实现指挥官的目标、指示和意图能起支撑作用。目标的重要性取决于对实现指挥官目标或对实现受领任务的潜在支撑作用。

《中国人民解放军军语》中对于军事目标的定义是:“具有军事性质或军事价值的打击或防卫的对象,如军事设施、军事要地、军事机构、作战集团^[4]”。军事目标按目标大小和形态可分为点目标、面目标;按目标运动状态可分为固定目标、运动目标;按目标在作战体系中的地位可分为战略目标、战役目标、战术目标;按照目标参战方式可以分为主战目标和保障目标。

根据行动计划和战机情况,美军目标选择条例中将目标分为以下4类。

(1) 计划内目标。已经知道存在于作战环境内,有充分的时间定位,将于特定时间实施打击的目标。

(2) 召唤目标。行动已经事先计划好,但具体打击时间未定,指挥官期待有足够的时间对这些目标进行定位,并实施计划好的行动。这些目标有特殊性,是通过预有计划的目标选定制定行动计划,但行动实施时通常运用动态目标选定法。

(3) 计划外目标。知道这些目标存在于作战环境中,但尚没有足够的时间发现或定位这些目标,以便实现战役目标。

(4) 预料外目标。事先不知道或未预料到在作战地域有这些目标,发现或定位这些目标后,根据不断变化的情况,认为对这些目标的打击能实现具体受领的任务或联合特遣部队司令要求的效果或行动目标。

目标选择是指在获取目标情报信息的基础上,依据作战需求和作战能力对战场目标进行分析,从中挑选出最佳打击目标的过程^[2]。(目标选择是指依据作战目的和意图,对战场各类目标的特点及其相关性进行分析、计算、对比,从中挑选出那些有助于战略或战役目的实现的关键目标作为重点打击对象的活动。)目标选择的艺术在于选定以最小的风险、最短的时间和最低的资源消耗创造预期的、与目标选择相关的效果。

目标选择可分为两类:预有计划目标选择和动态目标选择。预有计划目标选择是指事先计划选择的目标,动态目标选择是指发现太晚或未能及时纳入预有计划目标选择以便实施打击行动的目标。动态目标选择需要对原计划目标或随机出现的目标打击行动进行调整。

对于目标选择这种关系到军事行动结果成败的大事,古今中外有大量的理论和方法。例如,中国古代的“三十六计”就提出了“擒贼擒王”,民间也有“打蛇打七寸”的说法,意指通过打击敌军要害,使敌军彻底瓦解的谋略。

但是随着时代的变化,低烈度常规战争成为战争的新形态,从摧毁到控制,“斗而不破”成为常用的战略意图。对方最重要、最核心的资产未必就是需要直接打击和摧毁的目标,新型的、低烈度的领域、手段,如特种作战、网络空间作战等成为首选。例如,美军采用网络空间作战方法,利用“震网”病毒对伊朗核设施中的离心机控制系统进行间歇性攻击,以软杀伤的方式破坏其核设施,是以低成本、低烈度作战的方式达到战略意图的典型案列。

另外,随着信息与网络技术的兴起与发展,体系作战成为新的战争形态。《2010年中国的国防》白皮书指出,中国人民解放军坚持把联合作战体系建设作为军队现代化建设和军事斗争准备的重点内容,着力提高基于信息系统的体系作战能力。从军事的角度看,体系是采用信息技术对战场指挥员、作战平台、作战系统、传感器及其他战场设施的整合,整合的目的是提高整体作战效能。整合的手段包括建立相应的条令、条例、技术标准、战术原则、结构与运作机制等。常见的体系包括国际航空系统(包括飞机、机场、航空公司、航空交通控制系统)、海军水面舰艇火力支援体系(侦察、定位、武器系统和C⁴I)、战区弹道导弹防御体系(监视、跟踪、拦截系统和C⁴I)等。从目标选择的角度看,体系规模庞大,各要素之间深度互联,结构也越来越复杂,如何结合作战意图寻找对方的“七寸”变成一个需要系统和深入分析的问题。

对于目标体系目前尚没有统一的概念。《中国人民解放军军语》中近似的概念只有作战

体系：由各种作战系统按照一定的指挥关系、组织关系和运行机制构成的有机整体^[4]。文献[5]中将目标体系解释为“是由多个目标、多个子系统相互协作，相互依赖，为完成特定的、统一的整体功能而组成的复杂系统”。文献[6]中给出的定义为“目标体系是由多个目标系统组成，并通过组织、体制和通信等联系方式把各个目标系统连接成的一个整体”。

本书认为，目标体系是由多个目标、目标系统相互协同，为追求整体效能而构成的复杂系统。组成目标体系的各个目标、目标系统按照一定结构，通过组织、体制、通信及机制连接成一个整体。

例如，信息化条件下的防空反导体系就可以被视为以战场 C⁴ISR 系统为中心，以通信系统为基础，由预警探测系统、指挥控制系统、拦截打击系统组成的分层、分布式目标体系，其组成如图 1.4 所示。其中，预警探测系统主要包括分布在陆地、海洋、航空空间、邻近空间和航天的各类探测、监视、预警传感器平台；指挥控制系统主要包括指挥控制中心、通信网络、数据链系统及情报中心；拦截打击系统是防空反导体系的“拳头”，主要功能是拦截来自空天的各类威胁目标，以有效保卫重点目标或重点区域的安全，主要包括地面反导武器系统、地面防空武器系统、歼击机航空兵和舰船防空武器系统。

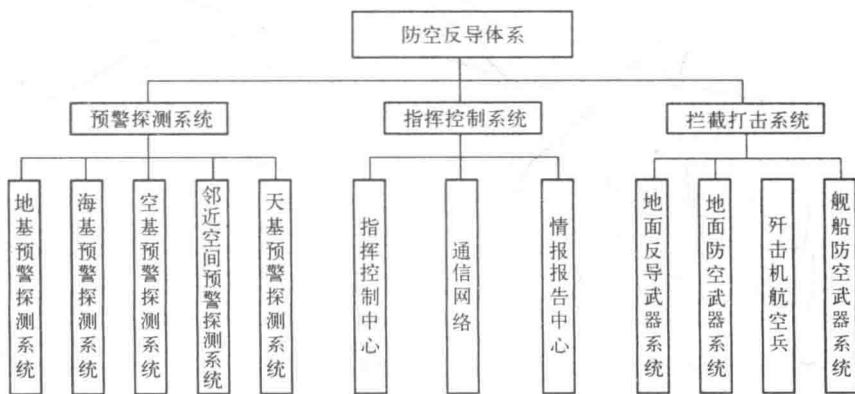


图 1.4 防空反导体系组成结构示意图

通信系统是基础保障系统，其他类型的目标只有连接在通信网络上才能进行信息交换，发挥作用，可以说通信类战场目标是战场神经元，通信系统是信息化战争的神经系统。典型的战场通信骨干网络包括光纤网络、微波接力网、卫星通信网络等多种通信手段。如图 1.5 所示，跨网络的通信链路是将上述几类通信网络连为一体，进行信息交换的关键，同时可以为信息通信提供多样化的选择方案，从而提高系统的鲁棒性。

预警探测系统是情报来源、发现敌方目标并上报相关联的指控单元，可以说预警类目标是战场感知器。预警探测系统由相互联系、相互作用、相互关联的天基、空中和地面的雷达探测器、光电探测器，以及相应的作战应用系统和信息传输系统综合集成的具有预警侦察、信息融合、指挥控制功能的有机整体。其主要作战任务是探测战略弹道导弹、巡航导弹、中高空、低空突防及隐身突防的作战飞机等目标，为指挥控制系统和武器系统提供空情信息。

预警探测系统的典型结构如图 1.6 所示。按功能划分，预警探测系统可以划分为反导预警探测系统和防空预警探测系统。按预警层次划分，预警探测系统可以划分为战略预警探测

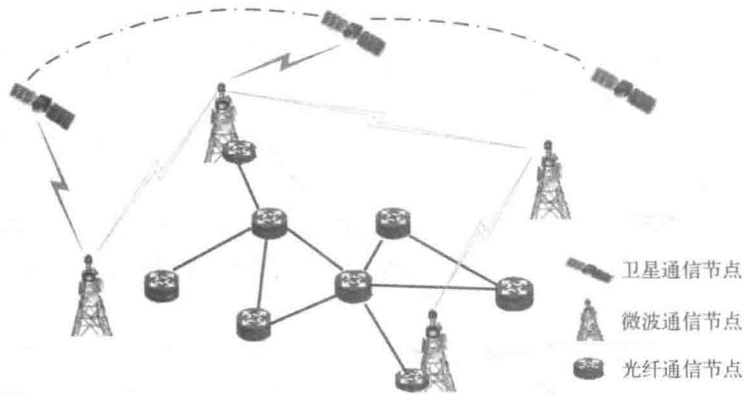


图 1.5 战场通信骨干网络示意图

系统和战役战术预警探测系统。战略预警探测网下辖国内各战役战术预警探测网。战役战术预警探测网下辖战区内各雷达阵地，并在必要时直接调用星载预警雷达、机载预警雷达、气球载预警雷达、超视距雷达和大型相控阵雷达的情报信息，与常规地面雷达网信息进行融合。各战役战术预警探测网之间情报可以互传，相互调用。

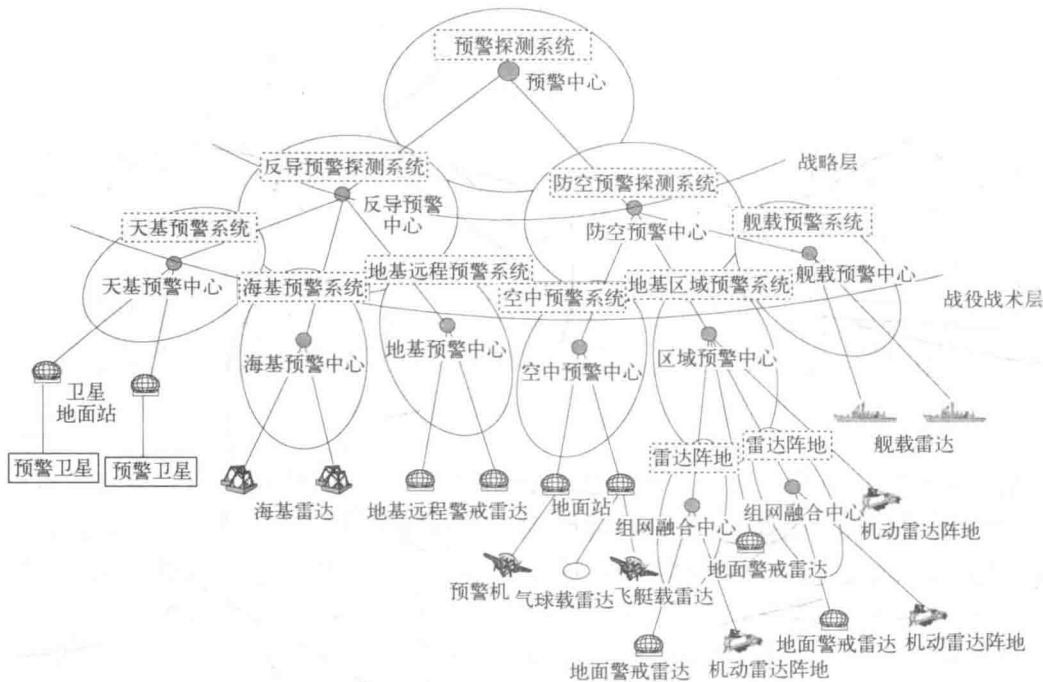


图 1.6 预警探测系统的典型结构图

指控系统负责处理各种情报，形成综合的战场态势，判断威胁，形成应对方案并下达作战命令，是防空反导目标体系的神经中枢和大脑，是最重要、最关键的战场目标，但其防护往往非常严密，难以直接打击。指挥控制系统与预警探测系统之间交互的信息有雷情、防情和指管命令等信息。预警探测系统将信息送到指挥控制系统进行信息处理和指挥决策，指挥控制系统根据获得的预警信息和敌我双方其他情报，以及地理、环境等因素，形成战场综合

态势图,然后完成目标识别、威胁估计,目标分配决策等任务。典型指挥所的信息交互流程如图 1.7 所示。

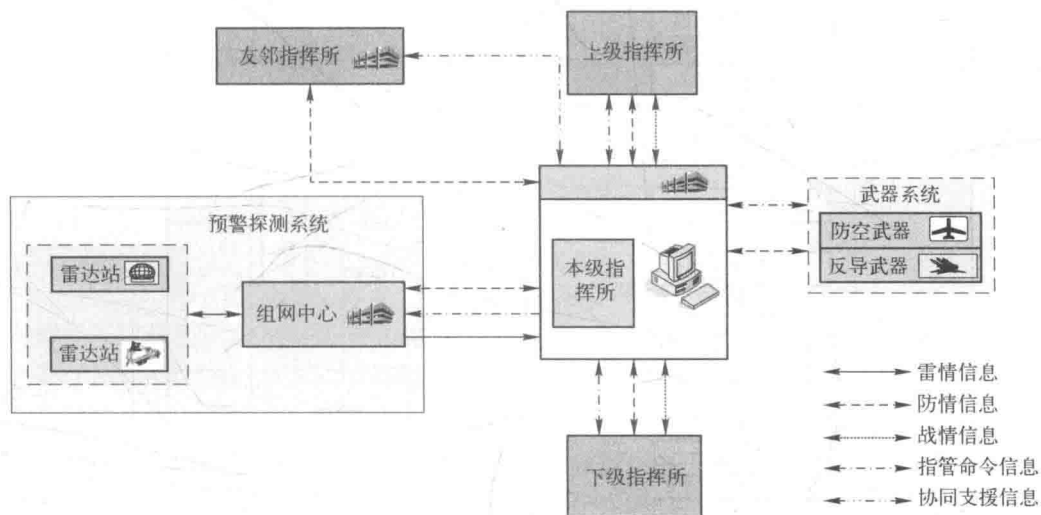


图 1.7 典型指挥所的信息交互流程示意图

指挥控制系统与武器系统之间交互的信息有防情信息和指管命令信息等。指挥控制系统将决策结果形成指挥命令,实现对向武器平台系统(防空反导、先制反制)的指挥控制,武器平台系统执行命令向目标发起攻击,同时将结果反馈到指挥所。同时,指挥控制系统与下级指挥控制系统和上级指挥控制系统之间具有指管命令、防情和战情等信息交互,与友邻指挥所之间具有防情、协同支援的信息交互。指挥所之间有光纤、微波、卫星等通信链路,当某条链路出现故障后能自动选择其他类型的链路进行通信。当指挥所无法与上级指挥所进行通信时,可与更高级别的指挥所建立越级指挥关系。

火力系统负责执行对敌方目标的拦截或摧毁,将信息能力最终转化为火力能力。典型的作战流程如图 1.8 所示。

总体来看,防空反导这一典型目标体系具有多层级网络及多样化的网络信息流。预警探测、指挥控制、火力打击等目标节点在物理层通信网络之上形成了互相关联和依赖的逻辑子网,在运行机制的作用下,形成一个执行防空反导任务的整体。

在这一体系中,通信、预警、指控、火力等各类目标节点之间存在明确的依赖关系,但体系的结构及信息传递、指控关系等运行机制可动态调整,因此对于敌方的打击具备一定的演化特性。例如,通信网络往往采用多种手段,目标节点间的通信可随时切换;重要节点均有冗余备份,可随时进行接替;指挥关系、信息传递关系可动态定义和重构。

因此,从体系作战的视角看,由目标组成的整体符合体系的关键特征,可以用“体系”来描述。

(1) 网络化。目标体系各组分单元之间联系紧密,构成一个网络,体系的每一组分单元的变化都会受到其他单元变化的影响,并会引起其他单元的变化。

(2) 依赖性。目标体系具有多层次、多功能的结构,每一层次均成为构筑其上一层级的单元,同时也有助于系统某一功能的实现,体系的有效性依赖于结构的合理性和完整性。

(3) 可演化。针对有限的外部干扰,体系能够通过备份、接替、路由等方式进行自我修复,降低体系能力损伤,更高级的目标体系甚至能够不断学习,在打击过程中对其层次结构与功能结构进行重组及完善。

(4) 开放性。体系与环境、任务密切联系,能够根据环境和任务的变化做出相适应的调整,其能力和结构也会随着环境及任务的变化发生变化。

1.2 网络化目标体系建模与分析

1.2.1 问题

梅特卡夫定律指出:网络的价值与节点数量的平方成正比^[7]。该定律揭示了网络的外部性效果(Network Externality),即使用者越多,对原来的使用者而言,不仅其效果不会如一般经济财产那样,人越多分享越少;反而其效用会越大。如图1.9所示,网络的价值与网络设备数量的平方成正比,当网络设备数量超过临界数量时,网络的价值将超过网络设备的费用。以20世纪90年代以来互联网的发展为例,互联网络不仅呈现了这种超乎寻常的指数增长趋势,而且爆炸性地向经济和社会各个领域进行广泛渗透和扩张。计算机网络的数目越多,它对经济和社会的影响就越大。

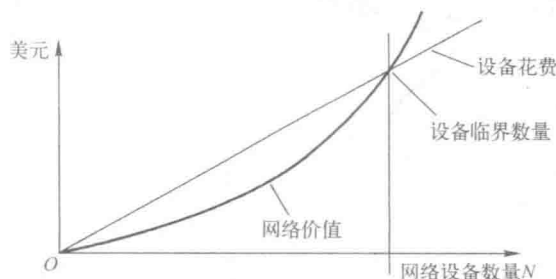


图 1.9 梅特卡夫定律示意图

因此,从网络的角度看,由于深度互联,整体的力量增强。但是,从可靠性的角度看,由于复杂性的增加,各要素关联性、依赖性增强,潜在的“阿喀琉斯之踵”风险增大,部分关键要素和结构的失效有可能“牵一发而动全身”,这些目标的失效会大大削弱体系能力,甚至导致整个目标体系瘫痪。复杂网络研究中一个广为人知的理论结果表明:现实世界中的复杂网络对随机攻击鲁棒,但对于精心选择的攻击很脆弱^[8]。

如图1.10所示为指数型与无标度型网络的结构,多数实际网络具备后者的特征和性质。文献[9]中分析了在随机失效和蓄意攻击的两种节点失效机制下,两类网络的鲁棒性特征,如图1.11所示。其结论是,指数型网络的网络直径随节点失效比例增大而缓慢增大,即该类型网络对两种机制的鲁棒性响应无差别;而对于无标度型网络,其在随机失效机制条件下显示出强鲁棒性,而在蓄意攻击条件下该网络极端脆弱。

在现实世界中,系统或网络之间复杂的耦合关系已被证明可能导致更多始料未及的脆弱性。2003年9月28日意大利电网的一个发电站的关闭直接导致了互联网的通信节点失效,而通信节点的失效反过来进一步导致了更多发电站的关闭,最终引起波及整个电力和信息基础设施的级联失效^[10]。