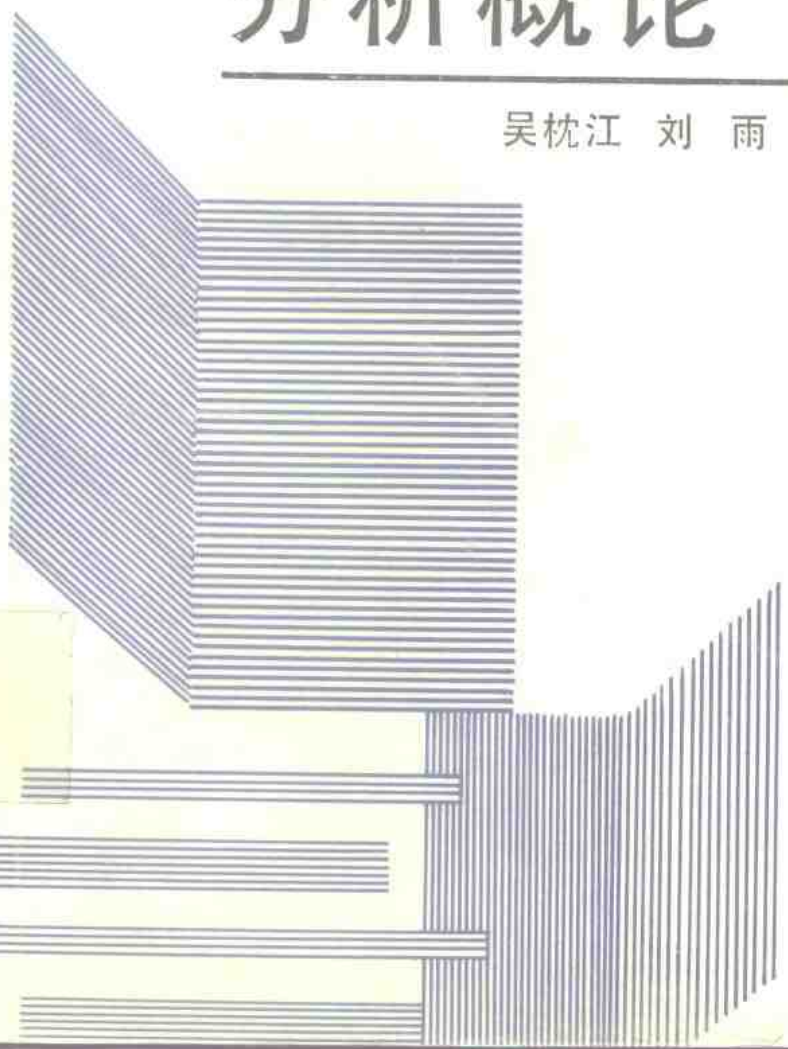


● 研究生教材 ● 研究生教材

指挥控制系统 分析概论

吴枕江 刘雨 等编著



W99

362239

■ 研究生教材 ■



吴枕江 刘雨 刘景伊 孙茂印 编著

指挥控制系统

分析概论

国防科技大学出版社

2480 / 12 [湘]新登字009号

内 容 简 介

指挥控制系统分析是一个新兴领域，已有不少研究成果。本书的目的就是要介绍其中的一些重要分析方法和它的研究概况。全书共八章，主要内容有两军作战模型、Petri网分析法和指挥控制系统各种功能的分析。书中各章节具有一定的独立性，读者可根据自己的兴趣选择阅读。

本书可用作有关研究生和高年级本科生的教材，也可供从事指挥控制、通信与计算机网络、柔性制造系统、交通管制等领域工作的研究和管理人员参考。



指挥控制系统分析理论

吴杭江 刘景伊 刘景伊 孙彦明 编著

责任编辑：胡见堂 朱淑敏

国防科技大学出版社出版发行

新华书店总店科技发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

开本：850×1168 1/32 印张：14 字数：350千

1992年10月第1版第1次印刷 印数：1200册

ISBN 7-81024-193-1

E·12 定价：(平)5.90元

(精)7.90元

《研究生教材》出版说明

研究生教育是我国高等教育的重要组成部分。研究生必须打下本门学科坚实的理论基础和掌握系统的专门知识，并具有从事科学研究工作以及担任专门技术工作的能力。

为加强研究生课程建设，满足研究生教学的需要，我们组织出版研究生系列教材。教材编著者都是我校多年从事研究生培养工作，有丰富教学和科研经验的教师。

为了保证研究生通过课程学习，在本门学科上掌握坚实的基础理论和系统的专门知识，在组织编写研究生教材的过程中，首先，强调突出重点，注意反映课程的基本内容和基本知识，以保持教材基本内容的相对稳定性和系统性，以及对本课程有一定的覆盖面。同时，要求教材的编写要着眼于研究生未来的工作和现代科学技术发展

的需要，注意反映国内外的最新研究成果和发展趋势，具有一定的学术水平，使研究生能迅速接近该学科发展的前沿。当然，在教材的结构和阐述方法上，要求条理清楚，叙述严谨，论证充分，文字简炼，符合人们的认识规律。这样，使研究生通过课程学习不仅得到足够的科学训练，培养了能力，发展了智力，而且有利于教师传授知识和研究生自学。总之，力求使研究生教材具备系统性、先进性、科学性和可读性。

尽管我们主观上希望研究生教材质量高一些，并在教材的选题、组稿、编审出版各个环节，都力求精益求精，但由于我们对出版研究生教材的经验不足，缺点错误在所难免，敬请同行专家和广大读者指正。我们希望通过研究生教材的出版，能为我国，特别是军队的研究生教育事业奉献微薄之力。

国防科技大学研究生院

一九九一年九月

前 言

指挥控制系统的理论研究已有10余年历史，虽然还没有一个统一的理论，但已有不少研究成果。我国在这一领域的研究正在开始，并获得越来越多的重视。为了进一步推动在这一领域内的研究工作，把已有成果和主要研究方法作系统的介绍是很有意义的。

指挥控制系统是一个很特殊的系统。首先，它是一个大规模控制系统，因为它的功能就是指挥与控制众多的资源（人和武器）同对方进行战斗。但又有别于它，因为一般的控制系统所讨论的只是现实的物理装置，而指挥控制系统是一个人机系统。不尽如此，由于在现代战争中，指挥司令部往往是由若干个指挥员所组成，因而它应是一个由多人组成的队决策组织。在这样一个组织中，各指挥员在地区上分散，为了一个共同的目标而协同作战。这一特点进一步决定了它是一个分布式异步并行处理的决策系统，有别于完全分散或完全集中的系统。

由于以上所述特点，因此指挥控制系统的理论分析涉及到控制理论、人机系统、通信理论、运筹学等学科，任一学科都不能单独包含它。由于它与以上学科之间的内在联系，所以各学科的新进展必将对指挥控制系统的分析有所促进，反之亦然。

指挥控制理论分析的题目很大，显然难以包罗万象。有鉴于此，本书除了介绍一些常见的方法外，想以具有代表性的分布式队决策为线索介绍有关方法，如 Petri 网分析，分布式假

设检验，分布式资源分配等。也许这样更能体现出指挥控制系统分析的总体概况和目前的研究水平。本书在内容上可分三个层次。第一层次为对抗双方的作战模型，可以说是总体分析。第二层次为Petri网分析法，它评估某一方的指挥控制系统的性能与结构。由于Petri网的发射条件和运行规则的灵活性，使得它可以有效地模化分布式异步并行处理系统，这正是指挥控制系统的突出特征。第三层次为指挥控制各种功能的分析。为了对它进行更深入的研究，可把一个指挥控制系统分解成若干功能来分析。第一章绪论中提到有8个指挥控制功能，任何功能的分析均属于这一层次的研究范围，但本书仅研究其中两项最重要的功能：信息获取和决策功能。情况评估（第四章）分析信息获取功能；任务选择和资源分配（第六、七两章）分析决策功能。

除此之外，本书把人机系统和队决策的分析贯穿于整书。如规范-描述研究法（第五章）讨论如何把人的因素纳入到指挥控制系统模型中去，其他各章也多次用到这一方法。本书除第一、二两章外，其余各章都是讨论队决策的各种问题。而第八章的队决策是讨论一般性问题，在作更深入的研究时具有一定的指导意义。以上两问题的介绍是本书的重要内容。

陈丹怀同志、郭桂蓉教授、刘馨宝教授、欧阳鄂教授等先后审阅了本书，提出许多宝贵意见，对本书的编写和出版给予了重要的帮助与支持，对此，我们表示深切的谢意。

编者还要感谢陈国顺和曹志刚两同志的帮助，陈国顺同志曾参加第四、五两章中部分内容的编写。

由于我们水平有限，书中难免存在缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

1992年4月

• 目 录 •

第一章 绪 论

- 一 什么是指挥控制系统·····(1)
- 二 两类军事指挥系统·····(3)
- 三 指挥系统的一般问题·····(5)
- 四 基本研究方向·····(8)
- 五 研究概况·····(14)

第二章 作战模型与分析

- 第一节 Lanchester 方程的随机模型·····(21)
 - 一 确定型 Lanchester 方程·····(21)
 - 二 随机模型·····(22)
 - 三 稳态解 $P_{x,y}(\infty)$ 的性质·····(31)
- 第二节 马尔可夫模型·····(34)
 - 一 马尔可夫损耗-增援模型·····(34)
 - 二 马尔可夫纯损耗模型·····(37)
 - 三 纯损耗模型的平均损耗率·····(39)
- 第三节 炮战参考模型·····(43)
 - 一 参考模型·····(43)
 - 二 对抗位置问题·····(44)
 - 三 火炮边移动边射击·····(47)
 - 四 目标还击情况下的火炮位置问题·····(49)
- 第四节 概率逻辑模型·····(51)

| | | |
|-----|-----------|------|
| 一 | 模型的建立 | (53) |
| 二 | 冲突结果 | (54) |
| 第五节 | 突变论模型 | (57) |
| 一 | 突变论模型一般概念 | (57) |
| 二 | 歧点型突变模型 | (60) |
| 三 | 蝴蝶形突变模型 | (61) |
| 第六节 | MCES分析法 | (62) |
| 一 | MCES概念 | (63) |
| 二 | MCES应用实例 | (67) |

第三章 Petri 网在 C³ 系统中的应用

| | | |
|-----|-------------------|-------|
| 第一节 | 绪论 | (71) |
| 第二节 | Petri 网基本理论 | (74) |
| 一 | 基本定义 | (74) |
| 二 | S-不变量和 T-不变量 | (81) |
| 三 | Petri 网理论与图论 | (84) |
| 四 | 时间 Petri 网 | (87) |
| 第三节 | 决策组织的描述与分析 | (92) |
| 一 | 信息论方法 | (93) |
| 二 | 单个决策员模型与分析 | (102) |
| 三 | 两人决策组织模型与分析 | (111) |
| 第四节 | 决策组织结构的设计 | (118) |
| 一 | 决策组织的 Petri 网交互模型 | (118) |
| 二 | 约束条件 | (120) |
| 三 | 算法描述 | (122) |
| 四 | 应用举例 | (130) |
| 第五节 | 确定型决策组织的性能分析 | (134) |
| 一 | 引言 | (134) |

| | | |
|-----|------------------|-------|
| 二 | 最大流通率的计算 | (137) |
| 三 | 执行顺序表分析 | (154) |
| 第六节 | 随机型 Petri 网的性能分析 | (169) |
| 一 | 马尔可夫链分析法 | (169) |
| 二 | 随机事件图性能分析方法 | (175) |
| 第七节 | 小结 | (198) |
| 附录 | SEG 状态概率分布递推算法 | (199) |

第四章 情况评估中的假设检验问题

| | | |
|-----|---------------|-------|
| 第一节 | 引言 | (203) |
| 第二节 | 集中式假设检验问题 | (203) |
| 第三节 | 分散式假设检验问题 | (209) |
| 一 | 问题的描述 | (209) |
| 二 | 分析与求解 | (211) |
| 三 | 在最小错误概率函数下的解 | (216) |
| 四 | 举例 | (217) |
| 五 | 数据合成 | (219) |
| 第四节 | 分布式假设检验的队决策问题 | (220) |
| 一 | 队决策问题 | (220) |
| 二 | 问题的描述 | (221) |
| 三 | 一般问题的解 | (224) |
| 四 | 举例 | (225) |
| 五 | 定理证明 | (230) |
| 第五节 | 分散决策与检验问题的复杂性 | (241) |
| 一 | 复杂性的分类 | (241) |
| 二 | 无通讯合作问题 | (242) |
| 三 | 分散检测 | (244) |
| 四 | 队决策 | (245) |

第五章 规范-描述研究法

| | | |
|-----|------------|-------|
| 第一节 | 导言 | (246) |
| 第二节 | 三阶段设计法 | (249) |
| 一 | 第一阶段(规范阶段) | (249) |
| 二 | 第二阶段(描述阶段) | (258) |
| 三 | 第三阶段(综合阶段) | (275) |
| 四 | 组织测试 | (284) |
| 第三节 | 队决策实验研究模型 | (285) |
| 一 | 导言 | (285) |
| 二 | 实验方案 | (286) |
| 三 | 实验装置的排队网模型 | (289) |

第六章 任务选择

| | | |
|-----|--------------|-------|
| 第一节 | 任务选择的动态决策模型 | (295) |
| 一 | 导言 | (295) |
| 二 | 模型研究的思路 | (299) |
| 三 | 系统动态方程 | (303) |
| 四 | 感知模型 | (306) |
| 五 | 信息处理器 | (307) |
| 六 | 决策策略 | (316) |
| 七 | 模型的结果 | (323) |
| 第二节 | 任务选择的排队模型 | (326) |
| 一 | 模型的描述与分析 | (327) |
| 二 | 最佳控制策略的结构与特性 | (337) |
| 三 | 数值结果 | (345) |
| 附录 | | |
| 1. | Luce选择公理 | (349) |

| | |
|-------------------|-------|
| 2. P1—P4 证明 | (353) |
|-------------------|-------|

第七章 资源分配

| | |
|------------------------------|-------|
| 第一节 单决策员随机资源分配 | (362) |
| 第二节 两决策员随机资源分配的规范-描述模型 | (368) |
| 一 实验描述 | (369) |
| 二 规范模型 | (370) |
| 三 初级规范-描述模型 | (373) |
| 四 模型的修正 | (378) |
| 第三节 大规模资源分配问题 | (380) |
| 一 资源调度 | (380) |
| 二 决策树的产生 | (387) |
| 三 减小计算量的方法 | (391) |

第八章 队决策问题讨论

| | |
|------------------|-------|
| 一 引言 | (395) |
| 二 队决策的一般模型 | (400) |
| 三 变异论题 | (408) |
| 四 在经济方面的应用 | (417) |

中英名词对照

参考文献

第一章 绪 论

一 什么是指挥控制系统

谈到军事指挥控制系统，我们曾有不同的名称： C^2 （指挥与控制）， C^3 （加通讯）， C^3I （加上情报）， C^4I （再加上计算机）。其中 C^2 是核心，情报与计算机的加入是为了强调所研究系统的不同成分与功能，实际上它们指的是同一事物^[1]。本书着重于讨论关键性的 C^2 系统，有时称为 C^3 系统或简称指挥系统。

指挥控制系统有众多的定义，美国军事术语词典所引用的是常见的一种。该定义称“ C^3I 系统就是指挥员对其所属部队行使权力、进行管理、发号施令时所需要的设备、器材、程序软件及各种有关人员的总称”。以上是从军用术语解释角度出发进行定义的。MIT教授Athans从学科的观点出发，给出了 C^2 的另一组定义，它对 C^3 理论的发展是很重要的^[2]。下面是所给出的若干定义。

- C^2 过程：军事指挥员(WC)对资源和设备的派遣或配置作出决策，使得上级下达的任务能得以完成。
- C^2 职权与责任：职权指一个特定指挥员能够指示、下令、部署、移动和控制上级给与他的兵员和武器装备。责任是完成上级下达给他的特定任务。
- C^2 组织：它指分层型式和组织规则，指挥人员通过它并利用在战争领域、地理区间上的 C^2 职权和责任把自

已组织起来。

- C^2 系统元素：指物理、技术硬件、软件，它们产生、管理、通讯并显示信息。

典型的 C^2 系统元素：

- (1) 感知器（固定的与移动的）；
- (2) 通讯线路（通常为 C^2 战术电台和有关装置）；
- (3) 计算机和显示器（硬、软件、微程序语言，决策辅助等）；
- (4) 武器平台和武器系统。

- C^2 系统：规定元素间联系的物理系统及其结构。因此 C^2 系统

- (1) 为在 C^2 组织中的不同 WC 产生数据和信息；
- (2) 允许 WC 之间的协作；
- (3) 提供一种手段来执行由 C^2 过程产生的决策。

注意，在一个 C^2 系统中的元素和 WC 可能分布在很广泛的地区上。明了定义是一件重要的事情，这有利于对 C^3 系统进行正确的分析。从以上分析可知， C^3 系统的功能是给指挥员提供准确而及时的情报，使得指挥员能作出正确的决策，配置与派遣军力，分配必要的资源，完成赋予的任务。为了完成这些任务，指挥员必须建立一个指挥与控制组织结构，以便有效地处理千变万化的战术形势。必要的 C^3 组织结构在很大程度上决定于感知器，通讯和武器技术（系统元素）。例如在战术通讯还不存在时，指挥员只能进行开环（即按军事原则）指挥。不同的组织结构在有通讯时将会更有效，这样兵力和资源协调能实时进行（闭环 C^2 ）。感知器和决策人员的分布式特征显然与 C^2 系统结构有关联，不可能期待所有的信息均能及时地传到所有决策员那里去。分布式结构将消耗宝贵而脆弱的资源，产生大的时延。以上说明在军事 C^2 系统中存在着系统理论

即在敌人能发射远距离导弹之前拦截它，军舰部署得广阔有利于对敌目标的侦察。其次是“区域防御”。最后是“近区防御”，即对近区敌目标给予打击，这可用火炮和近程导弹反击敌人，或者使用干扰设备使敌威胁的进攻失效。

通讯对指挥系统至关重要，它关系到信息的获取与命令的下达是否通畅。首先要求通讯是可靠的，即使在敌人打击和干扰下部分通讯设施和感知器失效时，剩下的部分仍能完成探测与指挥任务。这就要求通讯系统有比较好的结构与性能，感知器有良好的协调与算法等等。其次要求通讯具有保密性。由于舰只分布广阔，军舰之间的通讯容易被截获，故最好使用视距通讯。同时采取什么通讯策略也值得研究，最好的办法是在有必要时才通讯，而不是按惯例把每一件事告诉每一个人，以尽量减小通讯量和暴露的可能性。

对于现代战争条件下的海军战斗群，由于军舰分布广阔和所指挥的装备的复杂性、其指挥职能往往不是由一个人，而是由一个指挥司令部来完成。该司令部有一名总指挥，下设若干战斗指挥员分别指挥反潜、反水面舰只、防空和电子战。各战斗指挥员都是该战斗领域内的专家，他们互相协调以保证战斗的胜利。这样一个司令部的结构叫做“队”，这样的作战指挥称为分布式指挥控制。他们如何协调、利用有限的资源（资源分配）来打击敌目标（任务选择）同样是一个值得研究的问题，海军战斗群防御系统为我们留下了很多理论研究课题。

2. 星球大战的战场管理

星球大战是为对付敌人的洲际导弹的多层次防御系统。敌导弹可从陆基也可以从潜艇发射。洲际导弹的轨道很长，有上升、弹道和重入大气层阶段，因而星球大战过程也可分为多层次防御，每个层次需要不同的感知器、武器和决策时限。感知器可能设置在不同的卫星、飞机和陆基节点上。使用的武器包

(6) 武器对目标的分配。它是对每一个敌威胁分派不同武器的作战安排，包括要使用的感知器，通讯和其他资源。

(7) 作战控制。实施(5)和(6)的措施。

(8) 损伤估计。检验作战结果，了解敌威胁是否已被摧毁，为下一轮规划提供数据。

希望在受到敌人攻击后，每一项功能仍能正确地被执行，这样总的作战任务才能被完成，系统才具有较好的生存性。

2. 特点

指挥系统有上述 8 项基本功能，这是从功能角度出发而抽取出来的特征。若从系统所提出问题的学科领域来看，它有如下的特点，正因为这些特点，使得它比一般系统更难于分析。

(1) 分布式结构

因为在现代战争中，指挥机构往往由多个指挥员组成，其中有一个总指挥，下属若干作战指挥员。同时由于从生存性及其他因素考虑，各作战指挥员及其所属兵员可能分布在广阔的地域上，这就使得指挥系统呈分布式结构，即各作战指挥员各行其职，又互相协调的一种工作方式。

一般，集中式指挥机构、即各作战指挥员都集中在一起，容易受损，生存性低，经不起敌人的致命打击。同时这么多信息集中在一起处理必将带来很大的时延，但在资源利用上却十分有效。相反地，完全分散的工作模式，即分散式指挥机构的生存性强，时延小，但没有战术协同，资源上利用不经济。往往发生这样的情况，对一些敌目标分派了很多武器，而对另一些敌目标则没有任何武器去对付，因为各作战指挥员不协调。分布式指挥结构介于上述二种结构之间，它既是分散指挥，各作战指挥员各行其职，又有互相间的战术合作与协同，似乎是运用现代战争的一种比较好的工作模式。但它带来了分析上的困难。

正好像一个计算机网的分析要比一台计算机要困难得多一样，有分布式结构且用分布式计算机网相连的指挥系统的分析也很困难。例如，如何将各感知器来的分散信息融合成一幅完整的态势图，如何实现分散的武器资源的分配与共享，以及如何根据分散而可能是动态的信息结构作出作战安排，都是难以解决甚至目前还没有办法解决的问题。

(2) 人机系统

指挥系统总是离不开指挥员的，因此指挥系统从本质上讲是一个人机系统。人的行为表现出很多特征，如人的记忆力有限而不能作精确的计算。人有内在随机性与主观性，甚至对同一刺激有时作出不同的反应。人只顾眼前利益忽视长远打算。人单独工作与合作时行为不一样。由于参与决策的人的以上种种特性，使得系统的分析变得困难。为了简化问题，目前很多研究方法根本就不考虑人的作用，因而得出的结论有较大的局限性。因此一个指挥系统的模型与分析要更具有实用价值并符合作战实际，一定要考虑人的因素，目前这还是一个困难的课题。

(3) 问题的复杂性

一个指挥系统既包含有敌我双方的对抗，也包含有我方指挥员之间的协同。就敌方讲，敌威胁数目大，还有不少诱饵假目标。它们有的带常规也有的带核弹头，因而具有不同的威慑力量。它们的行进速度不一样，并具有转弯等机动性能等等，使得威胁难以用恒值来描述，增加了分析的难度。对我方讲，它的分布式结构以及指挥员之间既合作又争夺共有资源的关系难以描述与分析。另外感知器及各种武器的参数也不一致，难以统一描述。由于以上种种原因、给指挥控制系统的分析带来很大的困难、也给科学家提出了新的挑战。