



网络计划管理中的 机动时间特性理论及其应用

乞建勋 张立辉 李星梅 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

网络计划管理中的机动时间 特性理论及其应用

乞建勋 张立辉 李星梅 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

机动时间是网络计划管理中的核心概念。本书系统研究了机动时间的长度特性和使用特性理论,具体包括后单时差、前单时差、总时差、节点时差等各种机动时间与路长的关联规律,机动时间的使用方式,机动时间的传递性和稳定性等。在此基础上,利用机动时间的特性研究了时间-费用优化问题中超大型网络化简方法、 k 阶次关键路线的求法、最大有效压缩量的求法以及项目稳定性分析等问题。

本书可供从事网络计划优化理论研究的科研人员参考阅读,也可作为项目管理人员的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

网络计划管理中的机动时间特性理论及其应用/乞建勋,张立辉,李星梅著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-021199-6

I. 网… II. ①乞…②张…③李… III. 项目管理-时间学 IV. F224.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 035239 号

责任编辑:张 敏 孙 芳 王向珍/责任校对:郭瑞芝

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张:8 1/4

印数:1—2 500 字数:151 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换《新蕾》)

序

乞建勋教授的新著《网络计划管理中的机动时间特性理论及其应用》是一部研究网络计划管理中机动时间问题的学术著作。网络计划是一种在项目管理和工程建设中得到广泛应用的管理技术，为项目管理带来了人力、物力、时间等资源的节约和效率的提高，在国内外应用产生过巨大的经济效益，近年来在我国经济建设（特别是基本建设）与国防事业各领域应用十分广泛，取得了很好的效果，但随着目前建设工作在工期与资源分配方面的要求日益提高，对网络的优化问题提出了新的挑战。为了进一步合理调配各项资源，更充分发挥其具有的潜力，需要全面研究网络计划的优化问题，其中最关键和核心的问题是网络计划中有关机动时间特性及其同整个工程完成的时间长度（即路长）的关系。

尽管近年来国内外在网络计划优化方面也有所研究，但实际应用效果并不理想，其主要原因在于对网络的基本性态与参数的深入研究未予充分关注，特别是对时间特性中的机动时间问题缺乏细微深入探究，因而无法取得优化的成效。乞建勋教授在多年的理论研究与实际应用和研究生教学的基础上，对此问题开展了深刻性研究，他长期以来一直探索解决网络计划优化中困扰人们的核心难题，该书是他和他的团队成员二十多年研究成果结晶的凝聚。其原创性成果反映在：系统地研究了各种时差与路长的关系；用极其简单的方法解决了工期压缩中的关键问题；首次研究机动时间的不同使用方式对结果不同影响的规律；研究了机动时间的传递特性与稳定特性，给出了运用机动时间求解各阶次关键路线的方法，从而将时间-费用优化问题的超大型网络简化为等效的简单子网络；证明了一条路线上各自由时差的相互联系，有利于提高机动时间使用效率，实现资源节约；揭示了机动时间的传递特性与稳定特性，找出了新关键工序的形成规律。这些原创性的成果系统地总结在这本著作之中，为网络计划管理的研究与使用奠定了微观基础，有着深远的理论意义与实用价值。

我国的网络计划管理从华罗庚、钱学森等前辈倡导推行以来，数十年来实际应用多而理论研究少。近年来，由于建设工作的巨大规模与工程项目的高度复杂，使得实际应用遇到许多困难。值得庆幸的是有像乞建勋教授这样的工程管理专家，在丰富的工程实践与深入的理论研究基础上，不断探索，取得许多原创性成果，使得我国的网络计划管理的研究与应用在世界上独树一帜，为建筑事业的管理提供了有力的支持。该书是国内外迄今为止第一部探讨机动时间特性的著

作，填补了网络计划管理的机动时间研究的空白，它的出版无论在理论上与实际应用上均有很大的价值，相信该书的问世，必将对我国网络计划的研究和应用起到推动作用。

中国工程院院士

王众托

2008年12月

前 言

机动时间是网络计划管理中的一个核心概念。自 1956 年 CPM 网络计划图诞生后,人们第一次能够科学地计算出机动时间,从而能够确定关键路线和关键工序,网络计划技术在各国的工程项目管理中得到了非常广泛的应用。尽管后来人们对机动时间进行了研究,引入了总时差、安全时差、自由时差、干扰时差、节点时差等概念,但大量研究仅仅停留在概念上,未能深入。时至今日,人们普遍认为 CPM 网络计划只需解决如何应用的问题,至于理论上的研究已经山穷水尽,缺少继续深入研究的空间,这实在是很大的误解,事实恰恰相反。我们在研究中发现,机动时间的规律之多,应用之广,价值之大,使得理论上的进一步研究显得更加必要。因此,作者系统总结了多年来从事机动时间研究的成果,其中包括已发表和尚未发表的论文,国家自然科学基金和教育部博士点基金的部分科研成果,与国内外同行的交流和在博士生课程上的讨论结果,与原国家电力公司等单位合作的多个项目管理实践的成果。本书绝大部分内容都是作者的原创性成果,是多年研究心血的结晶。纵观国内外网络计划优化理论的相关文献,本书是第一本系统研究机动时间特性理论的著作。作者希望本书的出版能够为广大网络计划优化理论的研究人员提供一种新的研究视角和理论基础,为项目管理人员提供一种新的管理工具。

全书分为 4 个部分,共 9 章。第一部分是第 1 章,回顾了网络计划理论的发展和国内外对机动时间的研究现状,指出机动时间特性研究对网络计划优化的意义。第二部分包括第 2~6 章,着重研究机动时间的静态特性,即 CPM 网络计划图的“长度”特性。国内外已有文献对机动时间的研究都局限于时间分析,未见从“长度”角度的研究,因此机动时间的长度特性研究给我们带来一系列新的发现。其中,第 2 章提出了主要的机动时间概念及相邻两工序间机动时间的关系。第 3~6 章分别探讨了后单时差、前单时差、总时差、节点时差的长度特性,提出了路长定理、机动时间定理等重要理论。第三部分包括第 7、8 章,主要研究机动时间的动态特性,即机动时间在使用过程中表现出来的特性。第 7 章讨论了工序机动时间使用的不同方式对各种时差发生顺序的影响;第 8 章则研究了机动时间的传递性和稳定性问题。在第二和第三部分机动时间特性理论分析的基础上,本书第四部分(第 9 章)提出了机动时间特性理论的应用,主要讨论了在求时间-费用优化问题中对超大型网络的化简、求 k 阶次关键路线、求最大有效压缩量和项目稳定性分析中的应用。

本书最大的特点是将机动时间作为研究网络计划优化理论的出发点和立足点。本书所做的创新性工作主要有以下几方面：

(1) 本书第一次全面系统地研究了机动时间的“长度特性”，即机动时间与路长的关系。从机动时间概念被提出开始，人们只是关注和研究机动时间的“时间特性”，而很少研究它的“长度特性”。例如，“节点时差”，人们一直认为是“节点的结束时间与开始时间之差”，但是本书则提出了“节点时差”的“长度特性”，即“节点时差等于关键路线与过该节点的最长路线的路长之差”。又如，本书证明了工序的“后单时差（自由时差）”就是“过工序结束节点的最长路线与过该工序的最长路线的路长之差”等。本书对各种机动时间的长度特性都进行了深入地研究，并对所得结果进行了详细的证明，这将有助于人们更深入地理解和认识机动时间的概念和应用。

(2) 本书根据机动时间与路长的关系，提出了时间-费用优化问题中将大型、超大型网络化简为等效的简单子网络的方法，从而大大减少了计算工作量。

(3) 本书根据单时差与路长的关联规律，即“任意一条路线与关键路线的路长之差等于该条路线上各工序的后单时差之和，也等于该条路线上各工序的前单时差之和”，第一次给出了运用前单时差和后单时差求解各阶次关键路线的方法。

(4) 本书第一次研究了机动时间不同使用方式对结果的不同影响的规律。机动时间不同使用方式会造成不同结果的问题，至今无人研究。例如，传统认识是“一个工序的机动时间没有使用完，则该工序肯定不会成为新关键工序”，但是本书却证明了“一条路线上各个工序如果都仅仅使用了后单时差，则该路线上的每个工序将都变成关键工序”，可见一个工序单独使用机动时间与多个工序共同使用机动时间其效果是大不相同的，本书揭示了这种现象的规律性。这一理论应用到项目管理实践中将有利于提高机动时间的使用效率，实现资源的节约。

(5) 本书第一次研究了机动时间的传递特性和稳定特性。如果一个工序或部分工序使用机动时间时，其他工序中有一部分工序的机动时间也会相应减少，那么哪些工序机动时间会减少，减少的规律性是什么；哪些工序会因其他工序使用机动时间而被动的变成新关键工序，哪些工序则不受其他工序使用机动时间的影响等，这就是机动时间传递性和稳定性问题。本书不但提出了这个问题，还找出了该问题的内在规律性，尤其是找到了成为稳定工序的充分必要条件。

在本书即将出版之际，感谢各位国内外同行，他们的建议使作者受益匪浅；感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书的资助；感谢国家自然科学基金委员会管理科学部，本书科研成果的取得与国家自然科学基金项目（项目编号：70671040）的支持密不可分；感谢中国科学院科技政策与管理科学研究所的支持，作者在该所做高级访问学者时收获良多；感谢科研团队中的各位研究生，他们在研究成果推广和本书出版过程中做了大量深入细致的工作，尤其是博士研究

生周远成副教授，他将作者的许多思想通过管理软件予以实现并申请了国家发明专利，使其在项目管理中得到更广泛的应用。

本书是作者多年科研与教学工作的总结。作者深切感到，科研是一个令人兴奋的工作，教师是一项令人年轻的职业。当作者沉浸科研的时候，虽有苦苦思索的苦闷，但更多的是获得新发现的快乐；当作者身处学生之中时，感觉自己思如泉涌，仿佛又重新年轻起来。由机动时间的特性出发，作者将这一理论拓展至最短路和旅行商等问题，又取得了一系列新的发现。因此，本书既是机动时间前期研究的总结，又是新研究阶段的开启；它并不意味着结束，而意味着一个新的开始。

乞建勋

2008年12月

目 录

序

前言

第 1 章 综述	1
1.1 网络计划技术的产生和发展	1
1.1.1 网络计划技术的含义	1
1.1.2 网络计划技术的发展阶段	2
1.2 CPM 网络的主要创新之处	5
1.2.1 节点的时间参数	5
1.2.2 工序的时间参数	6
1.3 对机动时间特性的初步研究	8
1.3.1 总时差	8
1.3.2 自由时差	9
1.3.3 安全时差	9
1.3.4 干扰时差	9
1.3.5 节点时差	10
1.3.6 机动时间的研究现状与不足	10
1.4 研究机动时间特性的重大意义	10
1.4.1 在网络计划优化中基础理论的研究现状	10
1.4.2 优化方法落后的根本原因是网络基础理论的研究尚未开展	12
1.4.3 CPM 优化的基础理论研究的新思路——机动时间特性研究	13
第 2 章 相邻两工序间机动时间的联系与影响	14
2.1 工序 (i, j) 的机动时间受紧前工序机动时间使用的影响	15
2.1.1 基本概念	15
2.1.2 工序 (i, j) 的前共用时差和工序 (i, j) 的前单时差间的关系	15
2.1.3 工序 (i, j) 的前共用时差的节点表达式	16
2.2 工序 (i, j) 的机动时间的使用对紧后工序的影响	16
2.2.1 基本概念	16
2.2.2 工序 (i, j) 的后共用时差和工序 (i, j) 的后单时差间的关系	16
2.2.3 工序 (i, j) 的后共用时差的节点表达式	17
2.3 相邻两工序间机动时间的关系与影响	17

2.3.1	相邻两工序间机动时间的关系	17
2.3.2	机动时间使用的方式	19
第3章	后单时差的特性	22
3.1	后单时差在一条路线上的分布规律	22
3.1.1	前主链定理	22
3.1.2	路线后单时差与路长的关系	23
3.2	单个工序的后单时差的特性	23
3.2.1	后单时差定理	23
3.2.2	后单时差特性与网络次关键路线的关系	23
第4章	前单时差的特性	29
4.1	前单时差在一条路线上的分布规律	29
4.1.1	后主链定理	29
4.1.2	路线的前单时差与路长的关系	30
4.2	单个工序的前单时差的特性	30
4.2.1	前单时差定理	30
4.2.2	前单时差特性与网络次关键路线的关系	30
第5章	总时差的特性	36
5.1	总时差与路长的关系——总时差定理	36
5.1.1	总时差定理	36
5.1.2	关键工序与总时差的关系	36
5.2	特征路线定理	36
5.3	最小总时差工序的分布特点	38
5.4	最小总时差与网络次关键路线	40
第6章	节点时差的特性	42
6.1	工序间节点时差的特性	42
6.2	路线段节点时差的特性	42
6.3	路线节点时差的特性	44
6.4	最小节点时差分布的特点	45
第7章	机动时间发生顺序的研究	48
7.1	工序前移, 各时差发生的顺序	48
7.1.1	工序前移	48
7.1.2	工序前单时差、前共用时差的发生顺序	48
7.2	工序后移, 各时差发生的顺序	49
7.2.1	工序后移	49
7.2.2	工序后单时差、后共用时差的发生顺序	50

7.3 工序工期延长, 各时差发生的顺序	51
7.3.1 工序工期延长	51
7.3.2 工序后单时差、后共用时差的发生顺序	51
7.3.3 工序前单时差、前共用时差的发生顺序	53
7.4 工序使用机动时间方式的综合分析以及各时差的发生顺序	54
7.4.1 工序使用机动时间的综合分析	54
7.4.2 工序结束时间从自身最早结束时间开始推迟, 各时差发生的顺序	54
7.4.3 工序开始时间从自身最迟开始时间开始提前, 各时差发生的顺序	55
第8章 工序机动时间传递性和稳定性分析	56
8.1 相关概念	56
8.2 工序机动时间传递性分析	56
8.2.1 工序机动时间传递性特点描述	56
8.2.2 单个工序机动时间传递性分析	57
8.2.3 多个工序机动时间传递性分析	60
8.2.4 工序机动时间传递性的量化分析	64
8.3 工序机动时间稳定性研究	71
8.3.1 工序机动时间稳定性	72
8.3.2 工序机动时间稳定性的特点	74
第9章 机动时间特性理论的应用	82
9.1 求时间-费用优化问题的等效子网络	82
9.1.1 前单时差法	82
9.1.2 后单时差法	88
9.1.3 总时差法	89
9.1.4 应用	90
9.2 求 k 阶次关键路线的方法	93
9.2.1 求 k 阶次关键路线的后单时差法	94
9.2.2 求 k 阶次关键路线的前单时差法	106
9.2.3 应用举例	110
9.3 项目稳定性分析	112
9.3.1 项目稳定性分析的定义	112
9.3.2 项目稳定性分析的意义	113
9.3.3 算例分析	114
参考文献	116

第 1 章 综 述

项目工期和工序机动时间是项目管理中进度控制的核心问题。1956 年杜邦公司提出关键路线法(critical path method, CPM)网络计划之后,人们终于可以利用标准的 CPM 算法计算出各项工作的时间参数,尤其是机动时间,CPM 网络图也因此在世界各国应用。机动时间的特性研究成为人们关注的热点问题,人们从不同角度提出了不同特点的机动时间概念,如 Battersby(1970)和 Thomas(1969)提出了总时差(total float)、安全时差(safety float)、自由时差(free float)、干扰时差(interference float)的概念,Elmaghraby(1977)又提出了节点时差的概念。Elmaghraby 等(1990)对这些时差相对于 CPM 网络表示方法的依赖性进行了系统的分析,并提出了改进的计算方法。虽然人们可以利用各种工具准确计算出 CPM 网络中各工序的时间参数,但还无法揭示 CPM 网络的整体规律,本书对工序各种时差之间的内在联系、机动时间的特性进行了进一步研究,并对其在次关键路线、等效子网络等方面的应用进行了充分及有效的证明。

1.1 网络计划技术的产生和发展

1.1.1 网络计划技术的含义

网络计划技术是 20 世纪 50 年代末在美国产生和发展起来的一种编制大型工程进度计划的项目管理方法,是现代管理科学总结出的一种比较有效的管理手段。它的基本原理是以缩短工期、提高效率、节省劳力、降低成本消耗为最终目标,通过较为形象的工序关系图——网络图来表示预定计划任务的进度安排及其各个环节之间的相互联系,并在此基础上进行系统分析、计算时间参数、找出所谓的关键路线和关键工序,然后利用机动时间进一步改进实施方案,以求得工期、资源、成本等的优化,从而对计划进行统筹规划。在计划执行过程中,可以通过信息反馈,不断地对实际进程进行监督、控制和调整,以保证达到预期的目标和最佳效果。网络计划技术是一种能缩短工期、降低成本、用最快的速度顺利完成计划的有效方法。

网络计划的设计思想:先高度抽象化,以最简洁的符号表达各种不同的活动和它们之间的联系,即用节点(或有向线段)表示某项工序,用有向线段(或节点)组成类似于网络的形式来表达一项计划(工程)中各项工作(任务、工序)的先后顺序和相互关系。然后,通过有联系的逻辑关系计算找出计划中决定总工期的一组工作(工序),这组工作的逻辑顺序形成的“步骤链”称为关键路线,该组工作称为关键

工序。

由于网络图突出了整个工程项目的主要矛盾,明确了各个工作间相互配合的关系,因而使各方面围绕关键路线紧密配合地工作,克服了忙乱、窝工现象,使工程得以有计划、有步骤地进行。显而易见,网络计划技术能使工程“计划分明,重点突出,心中有数,配合紧密”,是适应现代化建设需要的一种有效管理手段。正是由于这个原因,自网络计划技术出现以来,便迅速引起世界各国的重视,在工业、农业、国防、关系复杂且庞大的科学研究计划和管理中都得到了广泛的应用。尤其是在土木建筑工程和公路项目中,利用网络计划技术编制工程项目的进度计划,对于控制总工期,有效利用各种资源以及组织、监督和指导施工都起到了积极的作用。

1.1.2 网络计划技术的发展阶段

1. 横道图法

传统的进度计划的编制方法是横道图法,也称甘特图法,是20世纪初由美国的亨利·甘特开发出来的。它是反映施工与时间关系的一种进度图表,由条形图来表示,横轴表示时间,纵轴表示工序,线条表示在整个期间上工序的计划和实际进度情况,是最早对进度计划编制和操控的科学表达方式。这种表达方式简单、明了、容易掌握,便于检查和计算资源的需求状况,因而很快地应用于工程进度计划中,得到广大项目管理者的普遍好评。但是它也存在着一些缺点,如不能表示工序之间相互影响、相互制约的紧前紧后关系;条形图不能反映整个项目中的制约因素,即关键路线和关键工序,不能对整个项目进行宏观的把握;对于大型复杂的项目,甘特图更是显得无能为力;更重要的是甘特图不能应用于现代化的计算工具——计算机。这些都限制了甘特图的适用范围和发展前景。

2. CPM

1956年,美国杜邦化学公司开发出一种面向计算机描述工程项目合理安排进度计划的方法,制定了第一套网络计划,该计划首次运用于化工厂的建造和设备维修中,大大缩短了工作时间,节约了费用。这种计划借助网络图表示各项工序与所需要的时间,以及各项工序的相互关系,通过网络分析研究项目费用、资源与工期的相互关系,并找出在编制计划时和计划执行过程中的关键路线。这种方法称为CPM。它通过箭线和节点直观地表示出所有项目工序环节的顺序及相互之间的依赖关系,箭头方向从左至右依次表示工序的先后顺序,组成一个整体的网络图,从而能够将各种分散、复杂的数据加工处理成项目管理者所需的信息,方便项目管理人员进行各种资源的分析和配置,并进行有效的项目控制。CPM的计算原则是根据指定的工序紧前紧后关系和确定的工序工期估算,计算各项工序的单一、确定

性的最早与最迟的开始与结束时间,从而确定制约整个项目的关键因素,即关键路线和关键工序。关键路线是网络中从起始节点到结束节点最长的路径,它的长度就等于这个项目的总工期,关键路线一旦延长,总工期就会随之推迟。关键工序也是整个项目的“瓶颈”,关键工序的工期延长会影响它的后继工序,还有可能影响项目总工期。CPM的核心和焦点是机动时间的计算和使用问题,通过计算机动时间,可以很容易地找出关键路线和关键工序,在解决工期一定-资源有限,资源均衡,时间-费用优化等问题中起着至关重要的作用。如今,CPM广泛适用于生产技术复杂、工作项目繁多且联系紧密的一些跨部门的工作计划。例如,新产品研制开发、大型工程项目、生产技术准备、设备大修等计划,还可以应用在人力、物力、财力等资源的安排,合理组织报表、文件流程等方面。

实践表明,CPM具有下面一系列优点:

- (1) 网络计划能够清楚地表达项目各项工序之间的逻辑关系。
- (2) 通过在网络图上各参数的计算,可以清楚地知道关键路线和关键工序,便于项目管理者将资源集中到这些关键因素上。
- (3) 可以计算出各工序的机动时间,有利于合理利用这些机动时间调整工序,从而达到合理配置资源和降低成本的效果。
- (4) 是运用计算机处理的理想模型,在信息化时代,该方法的应用会更加广泛,起到的作用也会更加突出。

在绘制 CPM 网络图的过程中,有以下几个作图原则:

- (1) 网络图中不允许出现闭合回路。
- (2) 各项工序之间必须按照逻辑关系进行,紧前工序全部完成之后,紧后工序才能开始。
- (3) 同一道工序只能在网络图中表达一次。
- (4) 相邻两节点之间只能存在一道工序。
- (5) 在一个网络图上,只能有一个起始节点和一个结束节点。

3. 计划评审技术法

1958年,美国海军武器部在制定“北极星”导弹计划时应用了网络分析方法与网络计划,但它注重对各项工作安排的评价和审查。这种计划称为计划评审技术(program evaluation and review technique, PERT)法。“北极星”导弹潜艇的研制工作包含几十亿个管理项目,有上万家企业参加,所承担的工作相互联系、相互制约,如一个企业不能如期完成,就要影响其他企业的完成,协调工作十分复杂。应用 PERT 法,将研制导弹过程中各种合同进行综合权衡,效果极佳,有效地协调了成百上千个承包商的关系,不仅有效地控制了计划,而且提前完成了任务,并在成本控制上取得了显著的效果。

PERT 法在安排和表示进度计划的形式方面与 CPM 有相似之处,但基础资料收集的难度及处理这些资料的复杂程度要比 CPM 复杂得多。所以,PERT 法多用于一些难于控制、缺乏经验、不确定性因素多而复杂的项目中。这类项目往往需要反复研究和反复认识,具体到某一工作环节,事先不能估计其需要时间,而只能推测一个大致的完成时间的范围。PERT 法假设各个活动的工序是随机变量,可以根据专家调查法、经验估计和历史资料进行估算,也就是三点法。三点法给出了工序工期的悲观时间、最有可能时间和乐观时间的估计。

虽然 CPM 与 PERT 法是彼此独立和先后发展起来的两种方法,但它们的基本原理是一致的。它们的不同在于 CPM 采用的时间是确定的,而 PERT 法采用的时间是不确定的,是基于概率统计的。因此,CPM 把缩短时间和降低成本一起考虑,且把降低成本作为主要目标;而 PERT 法则以缩短时间为目标。另外,CPM 主要应用于以往在类似工程中已取得一定经验的承包工程;PERT 法更多地应用于研究与开发项目。近年来,两者的发展趋向一致,即采用两者的长处来规划与控制系统,做到从时间和费用的统一中选择最佳方案。

4. 其他网络计划技术方法

随着电子计算机技术的突飞猛进,边缘学科不断发展,网络计划技术应用领域的不断拓宽,又产生了多种网络计划技术,主要有图示评审技术和风险评审技术。图示评审技术(graphical evaluation review technique, GERT),又叫随机网络,该技术方法可对网络逻辑和活动所需时间估算进行概率处理(即某些活动可能根本不进行,某些活动可能只部分进行,而其他活动则可能多次进行)。在 GERT 中,可以包含具有不同逻辑特征的节点,节点的引出端允许有多个概率分支,网络中允许回路和自环存在,每项活动的周期可选取任何种类的概率分布等。一句话, GERT 随机网络完全立足于真实的项目进程,允许考虑项目的返工,考虑项目及各个进度路径的选择、废弃,以及考虑通过重复某一过程而带来的学习效应等,基本上不受方法本身先天局限的影响。

在 GERT 之后,又发展起来了风险评审技术(venture evaluation review technique, VERT),按照工程项目和研制项目的实施过程,建立对应的随机网络模型。根据每项活动或任务的性质,在网络节点上设置多种输入和输出逻辑功能,使网络模型能够充分反映实际过程的逻辑关系和随机约束。同时,VERT 还在每项活动上提供多种赋值功能,建模人员可对每项活动赋予时间周期、费用和性能指标,并且能够同时对这三项指标进行仿真运行。因此,VERT 仿真可以给出不同性能指标下相应时间周期和费用的概率分布、项目在技术上获得成功或失败的概率等。这种方法将时间、费用、性能联系起来进行综合性仿真,为多目标决策提供了强有力的工具。

鉴于机动时间的产生是基于 CPM 网络,因此,为了更好地研究机动时间的特性,本书主要研究在 CPM 网络中机动时间有哪些特性以及它们的应用,这些特性可以进一步推广至其他网络计划方法。

1.2 CPM 网络的主要创新之处

CPM 提出了“最早”和“最迟”的概念,并产生了工序的 4 个时间参数,从而第一次可以科学的计算出机动时间。网络时间的计算是编制和控制计划的基础。人们感兴趣的往往是通过计算网络时间,确定网络图从源点到汇点的所有通道中最长的路线,即关键路线,也就是工程的总工期。为此,必须对每项工序赋予时间参数。本书是在 CPM 双代号网络图中研究机动时间,双代号网络图的特点是箭线表示工序,节点表示工序的起始和结束。在网络图中,还要计算节点的时间参数,从而方便地找出关键路线和关键工序。

1.2.1 节点的时间参数

在 CPM 双代号网络图中,节点本身不占用时间,它只是表示某个工序应在某一时刻开始或结束的时间点,节点的时间参数有两个:一个是节点的最早开始时间;另一个是节点的最迟结束时间。

1. 节点的最早开始时间 ES_i

它是指从该节点(i)开始的各项工序最早可能开始工作的时刻。在此时刻之前,各项工序不具备开始工作的条件,这个时刻称为节点(i)的最早开始时间,以 ES_i 表示。计算每个节点的最早开始时间应从网络的源点开始,自左向右,顺着箭线的方向,逐个计算,直至网络的汇点。网络汇点因无后继工序,所以它的开始时间也就是它的结束时间。网络源点,即网络第一个节点的最早开始时间一般为零。箭尾节点的最早开始时间加上工序的工期就是该工序箭头节点的最早开始时间,若同时有几条箭线与箭头节点相接,选其中箭尾节点最早开始时间与工序工期的最大值作为箭头节点的最早开始时间。为什么要选择最大值作为箭头节点的最早开始时间呢?这是因为后继工序必须等它前面工期最长的工序完工后才能开始工作。

计算公式如下:

$$\begin{cases} ES_1 = 0 \\ ES_j = \max_{i,j \in p} \{ES_i + T_{ij}\} \end{cases}$$

式中: p ——节点集合;

T_{ij} ——工序 (i, j) 的工期;

ES_i ——箭尾节点的 earliest 开始时间;

ES_j ——箭头节点的 earliest 开始时间。

2. 节点的最迟结束时间 LF_j

它是指以该节点 (j) 为结束的各项工序最迟必须完成的时刻(若此时刻不能完成势必影响后继工序的按时开始),以 LF_j 表示。计算每个节点的最迟结束时间应从网络汇点开始,自右向左,逆箭线方向,逐个计算,直至网络源点。因网络汇点无后继工序,所以汇点 (w) 的最迟结束时间等于汇点 (w) 的最早开始时间,即 $LF_w = ES_w$,且 $LF_w = \text{工程总工期}$ 。

一个箭尾节点的最迟结束时间是由它的箭头节点的最迟结束时间减去工序工期决定的。若以此箭尾节点出发同时有几条箭线,则选其中节点最迟结束时间与工序工期差的最小值。为什么要选择最小值作为箭尾节点的最迟结束时间呢?这是因为前继工序必须保证它的各后继工序能最早开工的需要。不然,超过此时刻,必将影响后继各工序的开始时间。

计算公式如下:

$$\begin{cases} LF_w = ES_w \\ LF_i = \min_{i,j \in p} \{ LF_j - T_{ij} \} \end{cases}$$

式中: p ——节点集合;

LF_w ——汇点的最迟结束时间;

LF_i ——箭尾节点的最迟结束时间;

LF_j ——箭头节点的最迟结束时间。

1.2.2 工序的时间参数

工序的时间参数有 4 个,即工序的最早开始时间、最早结束时间、最迟开始时间和最迟结束时间。

1. 工序的最早开始时间 ES_{ij}

一个工序 (i, j) 必须等它的所有紧前工序完成之后才能开始,在这之前是不具备开始条件的,这个时间称为工序 (i, j) 的最早开始时间,即紧前工序全部完成之后,本工序可能开始的最早时间,以 ES_{ij} 表示。它是自左向右逐个计算的,计算方法有两种。

第一种计算方法:工序的最早开始时间就是它的箭尾节点的最早开始时间,其计算公式如下: