

第3章 项目进度计划与资源均衡

本章提要

计划过程是决策的组织落实过程。决策是计划的前提，计划是决策的逻辑延续。将项目在一定时期内的活动任务分解给组织的各个部门、环节和个人，不仅为这些部门、环节和个人在该时期的工作提供具体的依据，还为决策目标的实现提供保证。项目进度计划是项目计划的重要组成部分，项目资源计划及项目成本计划的制订都是以项目进度计划为基础的，因此项目进度计划的制订是项目计划的主要内容。

3.1 项目进度计划

3.1.1 项目目标与项目分解

1. 项目目标

1) 项目目标的定义及特点

项目目标，概括说就是实施项目所要达到的期望结果。项目的实施是追求项目目标的过程。因此，如同其他目标一样，项目目标的确定不仅要在客户同承包商之间达成一致，还要具体、明确、可测量、切实可行。

项目目标具有以下3个主要特点。

(1) 系统性。项目是一个多目标的系统，各种目标之间相互关联、相互作用，要确定项目目标，就需要对项目的多个目标进行协调。实施项目的过程就是多个目标协调的过程，这种协调包括项目在同一层次的多个目标之间的协调、项目总体目标与其子项目目标之间的协调、项目本身与组织总体目标的协调等。

项目无论大小、种类如何，其基本目标可以表现为3个方面，即时间进度、成本和技术性能。项目实施的目的就是充分利用可获得的资源，使项目在一定时间内，在一定成本下，获得所期望的技术性能。然而，这3个方面之间往往存在着一定的冲突。通常，缩短工期要以提高成本为代价；而降低成本、缩短工期可能会影响技术性能的实现。因此，项目目标的确定需要在这3个方面寻求最佳的平衡。

(2) 优先性。在项目的多目标系统中，不同目标对于不同项目的重要程度是不同的。例如，预算拮据的私人住宅装修项目，成本目标十分重要；新型战机的研制项目，技术性能目标的重要性要大于成本目标；而生命周期较短的产品开发项目，时间目标则显得尤为重要。在项目管理中，识别目标的优先顺序对于指导项目规划和实施是一项十分重要的工作。

(3)层次性。项目目标是一个从抽象到具体的层次结构。项目目标的最高层是总体目标，它指明要解决的问题的总的依据和原动力，可能是一个抽象的概念。这个抽象的概念被层层分解，最终形成针对具体技术问题的具体目标。在项目目标的层次结构中，上层目标是下层目标的目的，下层目标是上层目标的手段。上层目标一般表现出概略性、难以控制性，而下层目标则表现为具体的、明确的、可测的。层次越低，目标越具体、可控。

例如，京九铁路建设项目，其最高目标是改善我国交通基础设施，带动东部地区的经济发展。对该目标进行分解可以得到交通设施建设目标和促进经济增长目标；进一步分解得到交通流量目标、财务目标、国民经济目标、社会发展影响目标、环境影响目标等；再进一步分解，最终形成施工建设的具体技术目标。

2) 项目目标的确立过程

项目目标的确立是一个由模糊、不确定逐步过渡到清晰、明确的过程。在项目的初始阶段，项目目标往往是模糊的、不具体的，甚至是不确定的。这种模糊性和不确定性随着机会研究和项目可行性研究的深入而不断变得清晰明了。

项目目标的确定过程包括明确制定项目目标的主体和描述项目目标两个阶段。一般来说，项目目标由项目发起人或项目提议人来确定，承包商的意见对于项目目标的确定起着重要的参考作用。项目目标的描述应该明确、具体、尽量量化，保证项目目标容易被沟通、理解和度量，并使所有项目组成员能够结合项目目标确定个人的具体目标。

3) 项目目标的描述

在项目建议书中，项目目标的描述应是一项非常重要的内容。在理想状况下，项目建议书的起草人是项目经理，因此项目经理是确定项目目标的重要主体。从一定程度上讲，项目经理对项目目标的正确理解和正确定义决定了项目的成败。

描述项目目标的准则有以下4条。

- (1) 能定量描述的，不要定性描述。
- (2) 应使每个项目组成员都明确项目目标。
- (3) 项目目标应该是现实的，不应是理想化的。
- (4) 项目目标的描述应尽量简化。

2. 项目分解

项目目标明确后，要制订完善的项目计划，就必须对项目进行分解，以明确项目所包含的各项工作。这些工作可以被视为活动，这些活动在项目进程中是单独计划的工作部分。项目分解是制订项目进度计划、进行控制的基础。

项目分解先把复杂的项目逐步分解成一层一层的要素(工作)，直到具体明确为止，得到一系列活动。这些活动具有以下特点：具有明确的起点和终点、便于估计和控制所需的资源、每项活动都有专人负责。

项目分解的工具是工作分解结构(Work Breakdown Structure, WBS)，它是一个分级的树型结构，是一个对项目工作由粗到细的分解过程。工作分解结构主要有两种类型：产品导向型工作分解结构和活动导向型工作分解结构。

产品导向型工作分解结构依据的是最终产品的构成(如图3-1所示)。这种工作分解结

构的特点是重视结果而忽略过程，有助于项目的分包、结果检查等管理工作。其缺点是在较低层次上的分解结构不容易理解，并且难以掌握项目的进展过程。

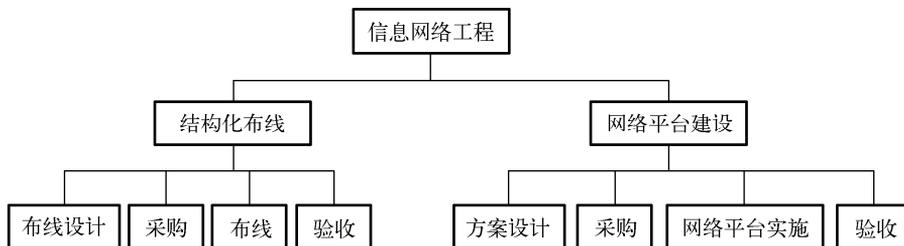


图 3-1 信息网络工程项目工作分解结构图

活动导向型工作分解结构的基本依据是项目活动的过程(如图 3-2 所示)。这种工作分解结构的特点是分解结构简单易懂，逻辑性强，容易进行活动的识别和定义，且易于实施。其缺点是不易跟踪考察，且容易注重过程而忽略结果。

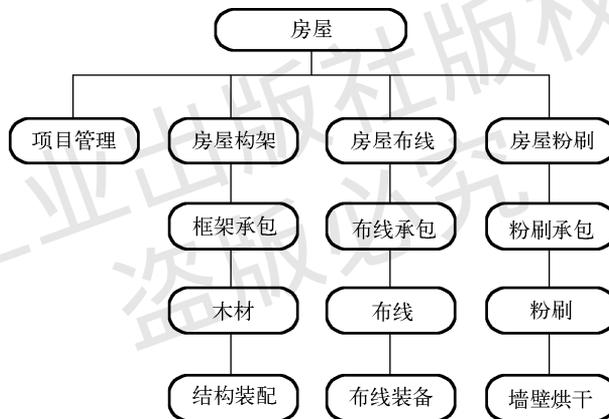


图 3-2 房屋改造项目工作分解结构图

3.1.2 项目工作(活动)依赖关系的确定

工作(活动)的先后依赖关系是指任何工作的执行必须依赖于一定工作的完成，也就是说其必须在某些工作完成之后才能进行。依赖关系既可以是强制性的，也可以是自由性的。强制性的依赖关系是指合同要求或工作性质内在固有的关系，自由性的依赖关系是指建立在最佳实践基础上，期望一种特定顺序的依赖关系。项目团队应考虑所有的强制性依赖关系，判断包括哪些自由性依赖关系。大多数团队不喜欢含有过多依赖关系的项目，因为随着项目的进展，越多的依赖关系会带来越少的选择。

“完成到开始”是最常见的依赖关系，在这种逻辑关系中存在着超前和滞后两种情况。超前是指后续活动可以提前于先行活动的结束时间，滞后就是要求后续活动比原定逻辑的活动开始时间延迟。

除了“完成到开始”依赖关系，还存在如下 3 种类型的依赖关系。

“完成到完成”依赖关系，是指先行活动完成之后后续活动才能完成的逻辑关系。

“开始到开始”依赖关系，是指先行活动开始之后后续活动才能开始的逻辑关系。

“开始到完成”依赖关系，是指先行活动开始后后续活动才能完成的逻辑关系。这是最不常见的依赖关系，如在替换旧系统的项目中，新系统必须在旧系统完全停止前开始。

工作依赖关系确定的最终结果是要得到一张描述项目中各工作依赖关系的项目网络图及详细的工作关系列表。项目网络图通常是表示项目各工作的依赖关系的基本图形，通常可由计算机或手工绘制，它包括整个项目的详细工作流程。工作关系列表包括项目各工作的详细说明，是项目工作的基本描述。

3.1.3 项目工作时间的估计

工作时间是在一定的条件下，直接完成该工作所需时间与必要停歇时间之和。工作时间的估计是制订项目计划的一项重要的基础工作，它直接关系到各事项、各工作网络时间的计算和完成整个项目所需要的总时间。若工作时间估计得太短，则会在工作中造成被动紧张的局面；相反，若工作时间估计得太长，则会导致整个项目的完工期长。

网络中所有工作的进度安排都是由工作时间来推算的，因此对工作时间的估计要做到客观正确。这就要求在进行工作时间估计时，不应受到工作重要性及项目完成期限的影响，要在考虑各种资源、人力、物力、财力的情况下，把工作置于独立的正常状态下进行估计，要通盘考虑，不可顾此失彼。工作时间估计结果形成了各项工作时间的估计、基本的估计假设及工作列表的更新。

1. 工作时间估计主要依赖的数据资料

(1) 工作详细列表。

(2) 项目约束和限制条件。

(3) 资源需求。大多数工作时间将受到分配给该工作的资源情况及该工作实际所需要的资源情况的影响，如当人力资源减少一半时，工作时间一般来说将会增加一倍。

(4) 资源能力。资源能力决定了可分配资源数量的大小，对多数工作来说，其工作时间将受到分配给它们的人力及材料资源的明显影响，如一个全职的项目经理处理一件事情的时间将会明显地少于一个兼职的项目经理处理该事情的时间。

(5) 历史信息。许多类似的历史项目的工作资料对于项目工作时间的确定很有帮助，主要包括项目档案、公用的工作时间估计数据库、项目团体的知识积累等。

2. 确定工作时间的�主要方法

(1) 专家判断。专家判断主要依赖于历史的经验和信息，当然其对工作时间估计的结果也具有一定的不确定性和风险。

(2) 类比估计。类比估计意味着以先前类似的实际项目的工作时间来推测，估计当前项目各工作的实际时间。在项目的一些详细信息获得有限的情况下，这是一种最为常用的方法，类比估计可以说是专家判断的一种形式。

(3) 单一时间估计法。单一时间估计法是指估计一个最可能的工作实现时间，对应于关键路线法(Critical Path Method, CPM)网络。

(4) 3 个时间估计法。3 个时间估计法是指估计工作执行的 3 个时间——乐观时间 (t_o)、悲观时间 (t_p)、最可能时间 (t_m)，对应于计划评审技术 (Program Evaluation and Review Technique, PERT) 网络，式 (3-1) 为期望时间的计算公式 (3 个时间服从 β 分布)。

$$\text{期望时间 } t_e = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6} \quad (3-1)$$

例如，某一工作在正常情况下的工作时间是 10 天，在最有利的情况下其工作时间 (乐观时间) 是 6 天，在最不利的情况下其工作时间 (悲观时间) 是 14 天，那么该工作的工作期望时间为

$$t = \frac{6 + 4 \times 10 + 14}{6} = 10(\text{天})$$

(5) 学习曲线。学习曲线的基本思想是一个人实施某项工作的次数越多，他工作起来就会越快越好。学习曲线之所以适用于工作时间估计是因为其可以研究和预测改进的效率。因此，如果项目的某些工作已经完成过许多次了，那么项目计划人员就可以预测出这些工作的工作时间。工作效率的改进取决于以下因素：组织文化强调持续发展的程度、工作的技术含量、工作的复杂程度、工作对人的依赖程度，以及对机器设备的规定和要求。

完成工作的时间是以执行工作重复次数的两倍为改进效率进行估算的。例如，学习效率为 80%，第一次完成工作用时 100 分钟 (生产第一单元)，那么生产两倍单元容量时，第二单元只需 80 分钟。要求再加倍，第四单元只需 64 分钟。每次完成工作所需的时间可以用学习曲线表示。注意，学习效率非常重要，因为快速的学习能够更快地完成连续的工作。

对顾客而言，如果一个行业有陡峭的学习曲线，就会导致价格快速下降。如果人们希望新的电子产品和其他消费品价格下降，那么项目经理应将可能发生的学习置于计划之中；并且项目经理应创造和维持鼓励学习环境，这样项目才能更具竞争力。

在敏捷项目中，随着早期迭代的完成，时间估计的效率不断提高。了解特定工作需要耗费的时间之后，后续预测会越来越准确。然而，因为预测周期一般是 2~4 周迭代时间，这意味着项目经理要预测在下次迭代中能完成的工作量。

3.1.4 项目进度计划的制订

1. 里程碑计划

项目计划与行军路线相似：它们不仅显示了怎样到达目标，而且显示了所经历的路程。在达到目标的道路上，要设置一些路标，以表明已经行进了多远的路程。这种路标称为里程碑。项目的里程碑计划就是以项目中某些重要事件的完成或开始时间作为基准所形成的计划，它是项目的一个战略计划或框架，以中间产品或可实现的结果为依据，显示了项目为达到最终目标必须经过的条件或状态序列，描述了项目在每一个阶段应达到的状态，而不是如何达到。

图 3-3 为某项目的里程碑计划图。3 月底为检查点，签订子承包合同事件已经完成，完成产品规范事件已经开始，正在进行，其他事件还没有开始。

重大事件	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
签订子承包合同			△▼					
完成产品规范				△▼				
产品设计评审					△			
子系统测试						△		
产品首件提交							△	
完成生产计划								△

图 3-3 某项目的里程碑计划图

里程碑计划是制订详细项目进度计划的基础。里程碑计划的制订方式主要有两种。

(1) 制订项目进度计划前，根据项目特点制订里程碑计划，并以该里程碑计划作为制订项目进度计划的依据。

(2) 制订项目进度计划后，根据项目特点及项目进度计划制订里程碑计划，并以此作为项目进度控制的主要依据之一。

制订里程碑计划的基本程序如下：

- (1) 从最后一个里程碑，即项目的终结开始反向进行；
- (2) 运用“头脑风暴法”产生里程碑的计划草图；
- (3) 复查各个里程碑，有些里程碑可能是另外某个里程碑的一部分，而有些则可能是产生新的里程碑概念的工作；
- (4) 尝试每条因果路线；
- (5) 从最后一个目标开始，顺次往前，找出逻辑依存关系，以便可以复查每个里程碑，增加或删除某些里程碑，或者改变因果路线的定义；
- (6) 画出最后的里程碑计划图。

2. 甘特图

甘特图是制订项目进度计划最常用的一种工具，最早由亨利·L.甘特(Henry L. Gantt)于1917年提出。由于其简单明了、易于绘制，因此成为小型项目管理中制订项目进度计划的主要工具。即使在大型工程项目中，它也是高层管理者了解全局、基层管理者安排进度时有用的工具。

图 3-4 为某市场调查项目计划甘特图。图中，左侧列出了项目的所有工作，项目的时间表则在图表的顶部列出，图中的横道线显示了各项工作的开始时间和结束时间，线段的长度则代表了工作的工期。而项目计划的详细程度取决于图中时间表的单位。甘特图的绘制者可以根据计划的要求，以月、周、天、小时等为时间表的单位。在绘制图形时还可以用不同的颜色代表不同性质的工作。

甘特图的特点是直观、简单、容易绘制、易于理解，但是当项目所包含的工作数量较多、逻辑关系复杂时，甘特图则难以表达清楚，更不利于进行定量分析和优化。

甘特图的类型包括传统甘特图(如图 3-5 所示)、带有时差的甘特图(如图 3-6 所示)和具有逻辑关系的甘特图(如图 3-7 所示)。

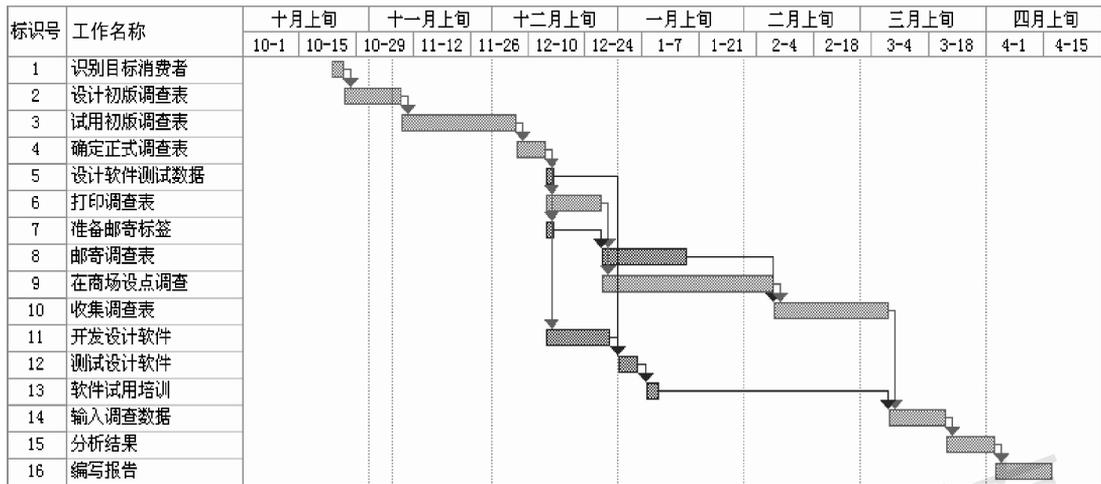


图 3-4 某市场调查项目计划甘特图

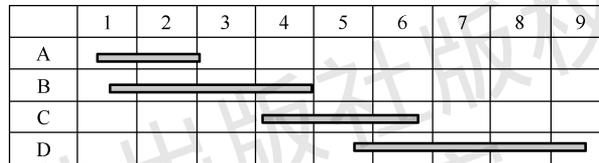


图 3-5 传统甘特图

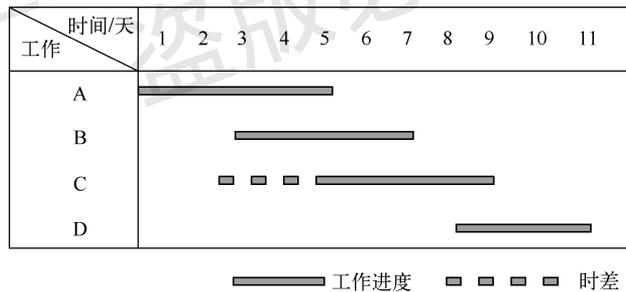


图 3-6 带有时差的甘特图

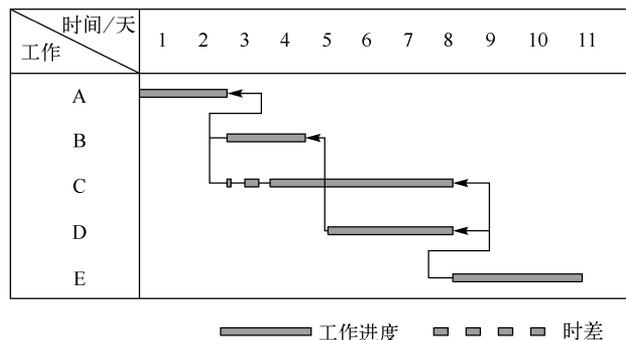


图 3-7 具有逻辑关系的甘特图

3. 网络图

网络计划的基本形式包括关键路线法(Critical Path Method, CPM)和计划评审技术(Program Evaluation and Review Technique, PERT)。CPM和PERT是分别独立发展起来的两种计划制订方法,但其基本原理一致,即用网络图来表达项目中各项工作的进度和它们之间的相互关系,并在此基础上进行网络分析,计算网络中各项时间参数,确定关键工作与关键路线,利用时差不断地调整与优化网络,以求得最短工期。此外,还可将成本与资源问题考虑进去,以求得综合优化的项目计划方案。用PERT制订项目进度计划时,以“箭线”代表工作,按工作顺序,依次连接完成网络结构图,在估计工作的工作时间的基础上,即可计算整个项目工期,并确定关键路线。这种方法的重点是研究项目所包含的各项工作的的工作时间。

在用CPM制订项目进度计划时,其图形与PERT基本相同。除具有与PERT相同的作用外,CPM还可以调整项目的成本和工期,以研究整个项目的成本与工期的相互关系,争取以最低的成本、最佳的工期完成项目。

PERT无法精确定工作间,只能以概率论为基础加以估计,并在此基础上,计算网络的时间参数。而CPM可以在经验数据的基础上较精准地确定各项工作的的工作时间。对于一般项目来说,根据经验和知识,能够对项目中各项工作的的工作时间进行合理、精准的确定。所以,项目管理中最常用计划制订方法的是CPM。

很显然,采用以上几种不同的项目进度计划制订方法所需的时间和成本不尽相同。其中,制订里程碑计划花费时间最短,成本最低;甘特图所需时间要长一些,成本也高一些;CPM要把每个工作都加以分析,如果工作数目较多,还需用计算机求出总工期和关键路线,因此花费的时间和成本更多;PERT可以说是制订项目进度计划方法中最为复杂的一种,所以花费的时间和成本也最多。

3.1.5 网络计划技术概述

1. 网络计划技术的概念

网络计划技术大约产生于20世纪50年代,最著名的是计划评审技术(PERT)和关键路线法(CPM)。PERT/CPM的网络图提供了一种比甘特图更为有效的时间和工作关系的度量方法。自网络计划技术发明以来,它很快成为各行各业新的项目进度计划制订和管理方法,并且在实践中得到不断的发展与完善。在PERT/CPM的基础上,随后又产生了一些新的网络计划技术,如图形评审技术、优先日程图示法、风险评审技术等。网络计划技术正日益成为项目进度计划和控制,以及资源优化配置的有力工具。

网络计划技术是用网络计划对项目的工作进度进行安排和控制,以保证实现预定目标的科学的计划制订和管理技术。网络计划是在网络图上加注工作的时间参数等信息而制订的进度计划。所以,网络计划主要由两大部分组成,即网络图和网络参数。网络图是由箭线和节点组成的用来表示工作流程的有向、有序的网络图形,如图3-8所示。网络参数是根据项目中各项工作的的工作时间和网络图所计算的工作、节点、路线等要素的各种时间参数。

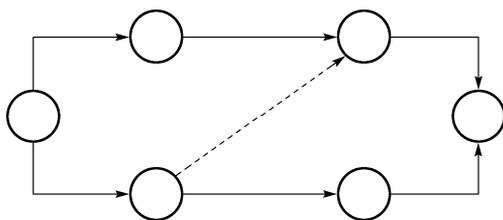


图 3-8 网络图

网络计划技术按逻辑关系及工作时间是否肯定可分为表 3-1 所示的几种类型。

表 3-1 网络计划技术分类表

类型		工作时间	
		肯定	不肯定
逻辑关系	肯定型	关键路线法 (CPM)	计划评审技术 (PERT)
	非肯定型	决策关键路线法 (DCPM)	图形评审技术 (GERT) 随机评审技术 (QGERT) 风险评审技术 (VERT)

按网络结构的不同，可以把网络计划分为双代号网络计划和单代号网络计划两种。双代号网络计划又可以分为双代号时间坐标网络计划和非时间坐标网络计划；单代号网络计划又可分为普通单代号网络计划和搭接网络计划。搭接网络计划主要是为了反映工作之间执行过程的相互重叠关系而引入的一种网络计划表达形式。

2. 网络图的基本构成

下面以双代号网络图为例，说明网络图的基本构成——箭线、节点和路线。网络图是由若干表示工作的箭线和节点组成的，其中每一项工作都用一根箭线和两个节点来表示，每个节点都编以号码，箭线的箭尾节点和箭头节点就是每一项工作的起点和终点。

1) 箭线(或工作)

在一个项目中，任何一个可以被定义名称且独立存在，并需要一定时间或资源完成的活动或任务都可看作一个箭线或工作。其具体内容可多可少，范围可大可小。例如，可以把整个产品设计作为一项工作，也可把产品设计中的每一道工序、任务作为一项工作。完成一项工作需要人力、物力，占用一定的时间和空间。有些工作，如油漆后的干燥、等待材料等，虽不消耗资源但要消耗时间，在完成任务的过程中，它们同样是一个不可缺少的过程。

工作通常可以分为以下两种。

(1) 需要消耗时间和资源的工作。这类工作称为实工作，在网络图中用实箭线表示。一般在箭线的上方标出工作的名称，在箭线的下方标出工作的的工作时间，箭尾表示工作的开始，箭头表示工作的完成或结束，相应节点的号码表示该项工作的代号。

(2) 既不消耗时间，也不消耗资源的工作。这类工作称为虚工作，在网络图中用虚箭线表示。虚工作是虚设的，只表示相邻工作之间的逻辑关系，虚工作的工作时间为零。

2) 节点(或事项)

每一项工作都存在开始时刻和结束时刻。一项工作若只有一项紧前工作，那么这项紧前

工作的结束时刻，就是该工作的可能开始时刻；一项工作若有数项紧前工作，则要待各项紧前工作全部结束后，才有可能开始做这项工作。这种紧前工作和紧后工作的结束和开始标志，称为节点或事项。节点的主要作用是连接箭线。箭线尾部的节点称为箭尾节点，或开始节点；箭线头部的节点称为箭头节点，或结束节点，如①→②，i表示箭尾节点，j表示箭头节点。

网络图中的第一个节点称为起始节点，它意味着一个项目或任务的开始；最后一个节点称为终止节点，它意味着项目或任务的完成。网络图中的其他节点称为中间节点。

在网络图中，就一个节点来说，可能有许多箭线通向该节点，这些箭线就称为内向箭线或内向工作；若由同一个节点发出许多箭线，这些箭线称为外向箭线或外向工作。

节点具有时间内涵，不同类型的节点具有不同的时间内涵。起始节点标志着整个网络计划和相关工作开始的时刻；终止节点标志着整个网络计划和相关工作完成的时刻；箭尾节点标志着相应工作的开始时刻，箭头节点标志着相应工作结束的时刻；中间节点标志着内向工作完成和外向工作开始的时刻。

3) 路线

从起始节点开始，沿着箭线的方向连续通过一系列箭线与节点，最后到达终止节点的通路称为路线。每一条路线都有自己确定的完成时间，它等于该路线上各项工作的工作时间总和，也是完成这条路线上所有工作的计划工期，该工期也可称为路长。

在网络图的各条路线中，最长的路线称为关键路线，位于关键路线上的所有工作称为关键工作；其他路线则称为非关键路线，位于非关键路线上的所有工作称为非关键工作。有时，关键路线不止一条，可能同时存在若干条，即这几条路线的路长相同。关键路线和关键工作直接影响整个项目工期的实现。

关键路线并非一成不变，在一定条件下，由于干扰因素的影响，关键路线可能会发生变化。这种变化可能体现在两个方面：一是关键路线的数量增加了；二是关键路线和非关键路线可能会发生互相转化。例如，非关键路线上的某些工作的工作时间拖延了，使得相关路线的路长超出了关键路线的路长，则该路线随之转化为关键路线，而原来的关键路线则转化为非关键路线。

目前，在项目计划中广泛应用的网络图方法包括双代号网络图和单代号网络图。

3. 双代号网络图

双代号网络图又称为“活动在线上”（Activity on Arrow, AOA），即在箭线上标识项目的一项工作或活动的方法，如图3-9所示。

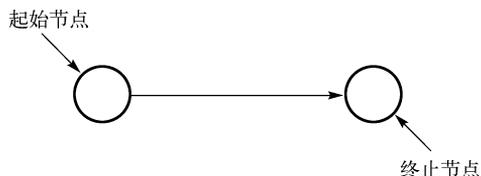


图3-9 一项活动的AOA表示法

1) 网络图的绘制

(1) 网络图绘制的基本规则

双代号网络图的绘制应遵循以下基本规则。

①必须正确表达项目各工作之间的逻辑关系。要做到正确表达，首先在绘制网络图之前，应确定工作之间正确的逻辑关系；其次要正确绘制。工作之间逻辑关系的网络图表示方法如图 3-10 所示。

序号	工作之间的逻辑关系	网络图中的表示方法	说明
1	A、B两项工作依次施工		A制约B的开始， B依赖A的结束
2	A、B、C三项工作 同时开始施工		A、B、C三项工作 为平行施工方式
3	A、B、C三项工作同时结束		A、B、C三项工作 为平行施工方式
4	对于A、B、C三项工作， A结束后，B、C才能开始		A制约B、C的开始， B、C依赖A的结束， B、C为平行施工
5	对于A、B、C三项工作， A、B结束后，C才能开始		A、B为平行施工， A、B制约C的开始， C依赖A、B的结束
6	对于A、B、C、D四项工作， A、B结束后，C、D才能开始		节点①正确地 表达了A、B、C、D 之间的关系
7	对于A、B、C、D四项工作， A完成后，C才能开始； A、B完成后，D才能开始		虚工作 ①→① 正确地表达了它们 之间的逻辑关系
8	对于A、B、C、D、E五项工作， A、B、C完成后，D才能开始； B、C完成后，E才能开始		虚工作 ①→① 正确地表达了它们 之间的逻辑关系
9	对于A、B、C、D、E五项工作， A、B完成后，C才能开始； B、D完成后，E才能开始		虚工作 ①→①，正 确地表达了它们之 间的逻辑关系

图 3-10 工作之间逻辑关系的网络图表示方法

②不允许出现循环回路，即不能从某一个节点出发顺着箭线的方向又回到该节点，如图 3-11 所示。

③严禁出现带双向箭头或无箭头的箭线。在网络图中，箭头所指的方向就是工作进展的方向，因此一条箭线只能有一个箭头。双向箭头箭线和无箭头箭线的错误画法如图 3-12 所示。

④严禁出现无箭头节点或无箭尾节点的箭线。箭头节点和箭尾节点代表了一项工作的结束和开始时间。无箭头节点的箭线和无箭尾节点的箭线的错误画法如图 3-13 所示。

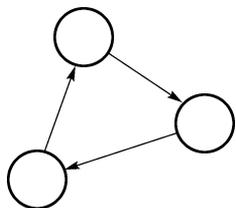


图 3-11 循环回路

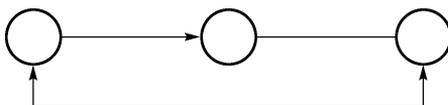
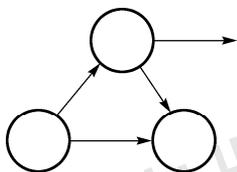
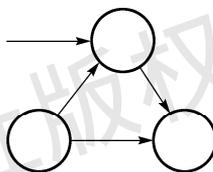


图 3-12 双向箭头箭线和无箭头箭线的错误画法



(a) 无箭头节点的箭线



(b) 无箭尾节点的箭线

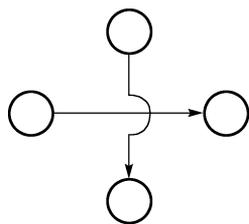
图 3-13 无箭头节点的箭线和无箭尾节点的箭线的错误画法

⑤尽量避免箭线交叉。当箭线交叉不可避免时，可采用过桥法(暗桥法)，如图 3-14(a)所示；或者采用指向法，如图 3-14(b)所示。

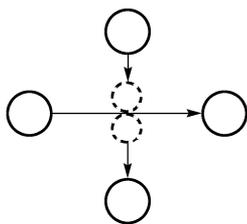
⑥在双代号网络图中，应只设置一个起始节点；在不考虑分期完成任务的网络图中，终止节点也只能有一个；其他所有节点均应是中间节点。

⑦关于箭线的画法。

箭线形状。箭线可采用直线或折线画法，避免采用圆弧线。当网络图的某些节点有多条内向箭线或多条外向箭线时，在不违反“一项工作应只有唯一的一条箭线和相应的节点”规则的前提下，可使用母线法绘图，如图 3-15 所示。



(a) 过桥法



(b) 指向法

图 3-14 交叉线的画法

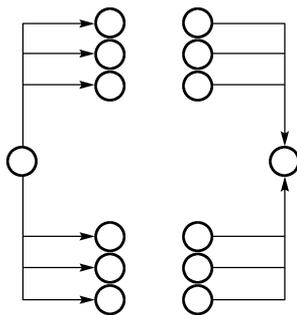


图 3-15 箭线的母线画法

箭线长短。在非时间坐标网络图中，箭线的长短与工作的工作时间无关，而主要考虑

网络图的图面布置；在时间坐标网络图中，箭线的长短应与工作的工作时间相对应，如图 3-16 所示。

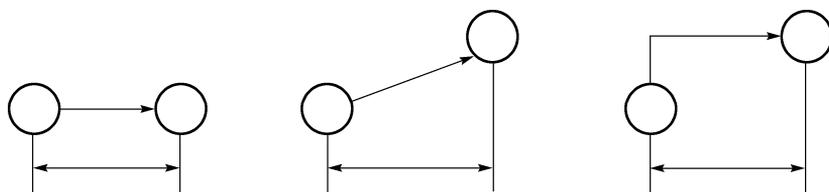


图 3-16 时间坐标网络图中箭线长短与工作时间的对应关系

箭线方向。通常，网络图以从左向右的方向标志着项目进展的方向，该方向称为正向；反之则为反向。所以，箭线的方向应尽量符合从左向右表示项目进展的规则，避免出现反向箭线。

⑧关于节点编号。双代号网络图中的所有节点都必须编号且不能出现重复编号；箭尾节点的编号应小于箭头节点的编号；可采用连续编号或非连续编号的方式，其中非连续编号的方式有利于网络计划的修改和调整。

(2) 网络图的绘制步骤

用网络计划方法制订项目进度计划的第一步是绘制网络图。通常，先画一个初步网络图，在此基础上进行优化和调整，最终得到正式的网络图。一般按以下步骤绘制初步网络图。

①项目分解。根据计划要求将项目分解为各项独立的工作(活动)，其中宏观控制的网络计划可以分解得相对粗略；具体实施的网络计划可以分解得细一些。一般情况下，项目分解和工艺、方法的选定是密切相关的。

②工作关系分析。工作关系确定各项工作之间的逻辑关系，一般根据已确定的项目实施方法、工艺、环境条件及其他因素，对项目进行分析，通过比较、优化等方法确定合理的逻辑关系。工作分析的结果是明确各项工作的紧前和紧后的关系，形成项目工作列表。

③估计工作的基本参数。在网络图中，工作的基本参数包括工作时间和资源需要量。一般情况下，应对每项工作估计出两个工作时间，即正常工作时间和最短工作时间。正常工作时间是指在正常条件下，完成该工作所需要的时间；最短工作时间是指通过采取特殊措施，如增加资源的投入等，完成该工作所用的最短时间。

④绘制初步网络图。将项目所包含的各项工作及关系用网络图表示出来。

2) 网络计划时间参数的计算及关键路线

绘制网络图是为了对项目进度进行安排，并综合考虑资源和成本因素，对项目计划进行优化。为此，必须首先计算网络计划时间参数，这是网络计划实施、优化、调整的基础。

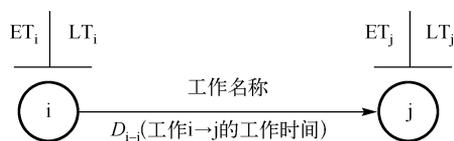


图 3-17 节点参数在网络图上的表示方法

(1) 网络计划时间参数的组成

网络计划时间参数可归纳为以下 3 类。

①节点参数，包括节点最早时间和节点最迟时间。

节点参数在网络图上的表示方法如图 3-17 所示(i、j 为工作名称)。

节点最早时间——ET，表示该节点所有后续工作最早可能开始的时刻，它限制其前导工作最早可能结束的时间，如式(3-2)所示。

$$ET_j = \max \{ET_i + D_{i-j}\} \quad (3-2)$$

节点最迟时间——LT，表示该节点所有前导工作最迟必须结束的时间，它也限制其后续工作的开始，如式(3-3)所示。

$$LT_i = \min \{LT_j - D_{i-j}\} \quad (3-3)$$

②工作参数，包括基本参数、最早时间、最迟时间和时差。

工作参数在网络图上的表示方法如图3-18所示。

工作最早开始时间(ES)和工作最早完成时间(EF)分别如式(3-4)、式(3-5)所示。

$$ES_{i-j} = ET_i \quad (3-4)$$

$$EF_{i-j} = ES_{i-j} + D_{i-j} \quad (3-5)$$

工作最迟开始时间(LS)和工作最迟完成时间(LF)如式(3-6)、式(3-7)所示。

$$LF_{i-j} = LT_j \quad (3-6)$$

$$LS_{i-j} = LF_{i-j} - D_{i-j} \quad (3-7)$$

工作总时差(TF)是指在不影响后续工作按照工作最迟开始时间开工的前提下，允许该工作推迟其最早开始时间或延长其工作时间的幅度，如式(3-8)所示。

$$\begin{aligned} TF_{i-j} &= LT_j - ET_i - D_{i-j} = LT_j - EF_{i-j} = LF_{i-j} - EF_{i-j} \\ &= (LF_{i-j} - D_{i-j}) - (EF_{i-j} - D_{i-j}) \\ &= LS_{i-j} - ES_{i-j} \end{aligned} \quad (3-8)$$

工作自由时差(FF)是指在不影响后续工作按照工作最早开始时间开工前提下，允许该工作推迟其最早开始时间或延长其工作时间的幅度，如式(3-9)所示。

$$FF_{i-j} = ET_j - ET_i - D_{i-j} = ET_j - (ET_i + D_{i-j}) = ET_j - EF_{i-j} \quad (3-9)$$

③路线参数，包括计算工期和计划工期。计算工期等于以网络计划的终止节点为箭头节点的各个工作的最早完成时间的最大值；计划工期是指进度计划的编制者，在规定工期的限制下，根据计算工期，结合项目实际情况确定的项目工期。

(2) 关键工作及关键路线的确定

① 关键工作的确定。

关键工作是网络计划中总时差最小的工作。若按计算工期(T_c)计算网络参数，则关键工作的总时差为0。若按计划工期(T_p)计算网络参数，则：

当 $T_p = T_c$ 时，关键工作的总时差为0；

ES _{i-j}	LS _{i-j}	TF _{i-j}
EF _{i-j}	LF _{i-j}	FF _{i-j}

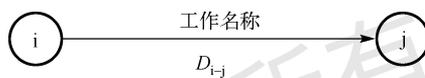


图3-18 工作参数在网络图上的表示方法

当 $T_p > T_c$ 时, 关键工作的总时差最小, 但大于 0;

当 $T_p < T_c$ 时, 关键工作的总时差最小, 但小于 0。

②关键路线的确定。

一是根据关键工作确定关键路线。首先确定关键工作, 由关键工作所组成的路线就是关键路线。

二是根据自由时差确定关键路线。关键工作的自由时差一定最小, 但自由时差最小的工作不一定是关键工作。若从起始节点开始, 沿着箭头的方向到终止节点为止, 所有工作的自由时差都最小, 则该路线是关键路线, 否则就是非关键路线。

例 3-1 某网络计划的有关资料如表 3-2 所示, 试绘制双代号网络图, 并计算各项工作的时间参数, 判定关键路线。

表 3-2 某网络计划资料

工作	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
工作时间(天)	2	3	5	2	3	3	2	3	6	2
紧前工作	—	A	A	B	B	D	F	E、F	C、E、F	G、H

解: 假设 $ET_1 = 0$, $LT_9 = ET_9$, 网络参数计算如图 3-19 所示。

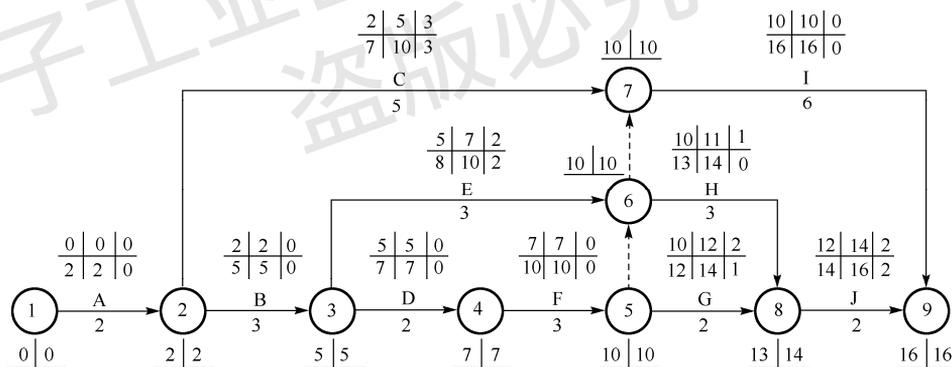
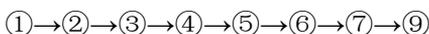


图 3-19 网络参数计算

关键路线:



4. 单代号网络图

单代号网络图根据活动和事项的发生顺序来描述项目的执行情况。一项活动就是一项工作任务。单代号网络图(Activity on Node, AON)用节点表示一项活动和相关事件, 如图 3-20 所示。在单代号网络图中, 箭尾节点表示的工作是箭头节点的紧前工作; 反之, 箭头节点所表示的工作是箭尾节点的紧后工作。单代号网络图所表示的逻辑关系易于理解,



图 3-20 一项活动的 AON 表示法

绘制中不易出错。

1) 网络计划时间参数计算及关键路线

单代号网络图的特点是以节点表示工作，节点的编号即工作的代号，箭线表示工作之间的逻辑关系。所以，单代号网络图的时间参数只包括两部分：工作参数与路线参数。

(1) 工作参数

单代号网络图的工作参数所包括的内容与双代号网络图完全相同，其概念也完全一致，所不同的是表示符号不一样，单代号网络图工作参数的内容及表达符号如下：

工作 i 的工作时间，用 D_i 表示；

工作 i 的最早开始时间，用 ES_i 表示；

工作 i 的最早完成时间，用 EF_i 表示；

工作 i 的最迟开始时间，用 LS_i 表示；

工作 i 的最迟完成时间，用 LF_i 表示；

工作 i 的总时差，用 TF_i 表示；

工作 i 的自由时差，用 FF_i 表示。

① 工作最早时间的计算。

工作 i 的最早开始时间 ES_i 应从网络计划的起始节点开始，顺着箭线的方向依次逐项计算。起始节点的最早开始时间，若无规定，则其值应等于 0，即：

$$ES_i=0$$

当工作 i 只有一项紧前工作时：

$$ES_i=ES_h+D_h$$

式中， ES_h 为工作 i 的紧前工作 h 的最早开始时间； D_h 为工作 i 的紧前工作 h 的工作时间。

当工作 i 有多项紧前工作时：

$$ES_i=\max\{ES_h+D_h\}$$

工作 i 的最早完成时间：

$$EF_i=ES_i+D_i$$

② 工作最迟时间的计算。

工作 i 的最迟完成时间 LF_i 应从网络计划的终止节点开始，逆着箭线的方向依次逐项计算。终止节点所代表的工作 n 的最迟完成时间 LF_n 应根据网络计划的计算工期 T_c 或计划工期 T_p 计算，即：

$$LF_n=T_p(\text{或 } T_c)$$

式中， T_p 的确定与双代号网络图相同；计算工期 $T_c=\max\{EF_n\}$ ； EF_n 为网络终止节点所代表工作 n 的最早完成时间。

当工作 i 只有一项紧后工作时，工作 i 的最迟完成时间：

$$LF_i=LF_j-D_j$$

式中， LF_j 为工作 i 的紧后工作 j 的最迟完成时间； D_j 为工作 i 的紧后工作 j 的工作时间。

当工作 i 有多项紧后工作时：

$$LF_i = \min \{LF_j - D_j\}$$

工作 i 的最迟开始时间:

$$LS_i = LF_i - D_i$$

③工作时差的计算。

工作总时差为:

$$TF_i = LS_i - ES_i \text{ 或 } TF_i = LF_i - EF_i$$

工作自由时差为:

$$FF_i = \min \{ES_j - EF_i\} \text{ 或 } FF_i = \min \{ES_j - ES_i - D_i\}$$

式中, ES_j 为工作 i 的紧后工作 j 的最早开始时间。

(2) 路线参数

单代号网络计划的计算工期的确定, 前已叙述, 在此不再重复。

与双代号网络不同的是, 单代号网络用时间间隔 $LAG_{i,j}$ 表示相邻两项工作之间的时间关系。时间间隔是指相邻两项工作之间, 后项工作 j 的最早开始时间与前项工作 i 的最早完成时间之差, 如式 (3-10) 所示。

$$LAG_{i,j} = ES_j - EF_i \tag{3-10}$$

终止节点与其前项工作的时间间隔如式 (3-11) 所示。

$$LAG_{i,n} = T_p \text{ (或 } T_c) - EF_i \tag{3-11}$$

式中, n 为终止节点, 或者虚拟的终止节点。

例 3-2 表 3-3 是某项目工作列表, 根据该表制订单代号网络计划。

表 3-3 项目工作列表

序号	工作名称	工作代号	紧后工作	工作时间(天)
1	项目策划	A	B、C、D	5
2	材料购置	B	D	8
3	组织准备	C	D、E	15
4	项目实施	D	E	15
5	项目结束	E		10

第一, 根据项目工作列表绘制单代号网络图。

项目单代号网络图如图 3-21 所示。

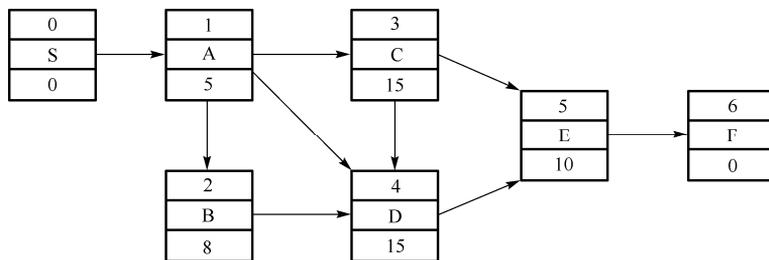


图 3-21 项目单代号网络图

第二，计算网络计划时间参数。

①计算工作时间参数。

网络的起始节点是虚设的，其节点编号为 0，工作时间、最早开始时间、最早完成时间均为 0。据此可以从左向右计算各节点或工作的最早时间、最迟时间和时差等工作时间参数，其结果如表 3-4 所示。

表 3-4 网络图中的工作时间参数计算

工作	工作时间(天)	最早时间(天)		最迟时间(天)		时差(天)		说明
		开始	完成	开始	完成	总时差	自由时差	
S	0	0	0	0	0	0	0	
A	5	0	5	0	5	0	0	关键工作
B	8	5	13	12	20	7	7	
C	15	5	20	5	20	0	0	关键工作
D	15	20	35	20	35	0	0	关键工作
E	10	35	45	35	45	0	0	关键工作
F	0	45	45	45	45	0	0	

②计算相邻工作的时间间隔。

相邻工作的时间间隔如表 3-5 所示。

表 3-5 相邻工作的时间间隔

相邻工作	时间间隔符号	时间间隔(天)	相邻工作	时间间隔符号	时间间隔(天)
A-B	LAG _{1,2}	0	C-D	LAG _{3,4}	0
A-C	LAG _{1,3}	0	C-E	LAG _{3,5}	15
A-D	LAG _{1,4}	15	D-E	LAG _{4,5}	0
B-D	LAG _{2,4}	7			

第三，确定关键工作和关键路线。

在本案例中，总时差为 0 的工作是关键工作，即 A、C、D、E 是关键工作；根据关键工作可知关键路线是：0—1—3—4—5—6。

5. 网络计划优化

上述网络图所描述的项目计划仅是一个初始方案，这种方案可能存在某些问题，如在时间方面，可能会出现计算工期超出了要求工期；在资源方面，可能出现供不应求或不平衡的情况；或者在时间和资源方面的潜力未能得到最佳的发挥。因此，要使项目进度计划如期实现，并使项目工期短、质量优、资源消耗少、成本低，则须用最优化原理调整原网络计划，这就是网络计划的优化问题。

网络计划优化是在满足既定的约束条件下，按照某一目标，通过不断调整，寻找最优网络计划方案的过程。网络计划优化包括工期优化、资源优化及成本优化 3 个方面。

1) 网络计划的工期优化

工期优化也称为时间优化，其目的是当网络计划的计算工期不能满足要求工期时，通过不断压缩关键路线上关键工作的工作时间等措施，达到缩短工期、满足要求工期的目的。

(1) 缩短工期的方法

①强制缩短法。通过采取措施使网络计划中的某些关键工作的工作时间缩短，达到缩短工期的目的。强制缩短法的核心问题是选择哪些工作压缩其工作时间来达到缩短工期的目的。

②调整工作关系。根据项目各项工作关系的特点，将某些串联的关键工作调整为平行作业或交替作业。

③关键路线的转移。利用非关键工作的时差，用其中的部分资源加强关键工作，以缩短关键工作的工作时间，使工期缩短。采用这一措施，可能导致关键路线不断发生转移。

(2) 选择调整对象(工作)考虑的主要因素

①缩短工作时间对质量影响不大的工作。

②有充足备用资源的工作。

③缩短工作时间所需增加的资源量最少的工作。

④缩短工作时间所需增加的费用最少的工作。

(3) 工期优化的步骤

①计算并确定初始网络计划的计算工期、关键路线及关键工作。

②按要求工期计算应缩短的时间。

③确定各关键工作能缩短的工作时间。

④根据上述因素选择关键工作压缩其工作时间，并重新计算网络计划的计算工期。

⑤若计算工期仍超过要求工期，则重复以上步骤，直至满足工期要求或工期已不能再缩短为止。

⑥当所有关键工作的工作时间都已达到其能缩短的极限而工期仍不能满足要求时，应对计划的原技术、组织方案等进行调整或对要求工期的合理性进行重新审定。

2) 网络计划的资源优化

任何一个项目都需要消耗一定的资源才能完成，而在一定时间内，由于某些客观因素的影响，能够提供的各种资源的数量往往是有限的，这就存在如何合理利用这些有限资源的问题。对于一个项目来说，如果安排得不合理，就可能在计划工期内的某些时段出现资源需求的“高峰”，而在另一时段内出现资源需求的“低谷”。在“高峰”期，如果计划的某些时段内资源需求量超出最大可供应量，则会造成“供不应求”，导致工期延误；而当出现资源需求低谷时，就可能造成资源的大量积压；这种资源消耗的不均衡，必然会影响项目目标的实现。网络计划的资源优化，即力求解决这种资源的供需矛盾，实现资源的均衡利用。

资源优化通常有两个目标：一是对于一个确定的网络计划，当可供使用的资源有限时，如何合理安排各项工作的进展，使得完成计划的总工期最短，即“资源有限，工期最短”的目标；二是对于一个确定的网络计划，当总工期一定时，如何合理安排各项工作，使得在整个计划期内所需要的资源较均衡，即“工期固定，资源均衡”的目标。

(1) “资源有限，工期最短”的优化

“资源有限，工期最短”的优化的核心是通过优化，使单位时间内资源的最大需求量小于资源限量，而为此需延长的工期最少，使“工期最短”。这种优化必须在网络计划制订后进行，并且不能改变各项工作之间的先后顺序关系，否则会导致用数学方法求

解问题变得复杂。目前,解决这类问题的计算方法往往只能得到一个较优的方案,难以得到最优方案。

“资源有限,工期最短”的优化应逐步对各“时间单位”进行资源检查,当出现第 t 个时间单位资源需求量 R_t 大于资源限量 R_q 时,就要进行计划调整。资源调整时,应对资源冲突的各项工作的开始和结束时间做出新的安排。其选择标准是“工期延长,时间最短”。

“资源有限,工期最短”的优化的一般步骤如下。

①计算网络计划每“时间单位”的资源需求量。

②从计划开始之日起,逐个检查每个时间单位资源需求量是否超出资源限量。若在整个工期内每个时间单位资源需求量均能满足资源限量要求,可行优化方案即制订完成,否则必须进行计划调整。

③分析超过资源限量的时段,即时间单位资源需求量大于资源限量的时间区段,确定新的安排顺序。

④若最早完成时间最小值和最迟开始时间最大值同属一个工作,则应找出最早完成时间为次小,最迟开始时间为次大的工作,分别组成两个顺序方案,再从中选取较小者进行调整。

⑤制订调整后的网络计划,重复上述步骤,直至满足要求为止。

(2)“工期固定,资源均衡”的优化

工期固定,是指严格要求项目在规定(国家颁布的工期定额、甲乙双方签订的合同工期或上级机关下达的工期)的工期指标范围内完成。资源均衡问题是在可用资源数量充足并保持工期不变的前提下,通过调整部分非关键工作进度的方法,使资源的需求量随着时间的变化趋于平稳的过程。由于情况的不同,资源本身的性质不同,资源平衡的目标亦有区别。但就一般情况而言,理想的资源计划安排应是平行于时间坐标轴的一条直线,即使资源需求量保持不变。

实际上,资源计划安排难以达到理想状态,但可以通过调整工作的时间参数使资源需求量在理想情况的上下范围内波动。常用的资源均衡方法是一种启发式方法,称为削峰填谷法,也称为削高峰法。

削峰填谷法的基本步骤为:

①计算网络计划每时间单位资源需求量;

②确定削峰目标,其数值等于每时间单位资源需求量的最大值减去一个单位量;

③确定高峰时段的最后时间点及相关工作的最早开始时间和总时差;

④计算有关工作的时间差值;

⑤若峰值无法再减少,即求得均衡优化方案;否则,重复以上过程。

3)网络计划的成本优化

一个项目由许多必须完成的工作或工序所组成,而每项工作或工序都有着各自的实施方案、资源需求和工作时间,并且不同的实施方案、资源需求和工作时间之间存在着一定的内在联系。网络计划的成本优化,就是应用网络计划方法,在一定的约束条件下,综合考虑成本与时间之间的相互关系,以求成本与时间的最佳组合,达到成本低、时间短的优化目的。因此,对于网络计划的成本优化,其核心是在时间与成本之间寻求一个最佳的平衡点。

(1) 项目时间与成本之间的关系

一般来说,项目成本包括直接成本和间接成本两部分。直接成本包括材料费、人工费、设备购置及使用费等。通常情况下,直接成本随工期的缩短而增加,当工期不正常延长时,其成本也会增加。间接成本包括项目实施、组织管理等工作所需要的成本。间接成本与项目工期大致成正比关系。

由图 3-22 可知,总成本曲线是由直接成本曲线和间接成本曲线叠加而成的,曲线的最低点就是项目成本与时间的最佳组合点,表示在合适的工期下总成本最低。

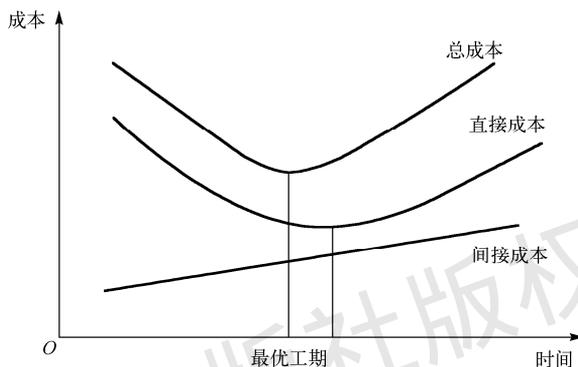


图 3-22 项目时间与成本之间的关系

(2) 成本优化方法

成本优化的目的就是使项目的总成本最低,其优化过程应考虑以下几个问题。

- ① 在规定工期的条件下,确定项目的最低成本。
- ② 若需要缩短工期,则考虑如何使增加的成本最小。
- ③ 若要求以最低成本完成整个项目计划,则考虑如何确定其最佳工期。
- ④ 若增加一定数量的成本,则考虑可使工期缩短多少。

进行成本优化,应首先求出不同工期情况下最低直接成本,然后考虑相应的间接成本的影响和工期变化带来的其他损益,包括效益增量和资金的时间价值等,最后再通过叠加求出项目总成本。

(3) 成本优化的步骤

- ① 按正常工作时间确定关键工作和关键路线;
- ② 计算网络计划中各项工作的成本费率;
- ③ 按成本费率最低的原则选择优化对象;
- ④ 考虑不改变关键工作性质并在能够缩短的范围之内等原则,确定优化对象能够缩短的时间,并按该时间进行优化;
- ⑤ 计算相应的成本增加值;
- ⑥ 考虑工期变化带来的间接成本及其他损益,在此基础上计算项目总成本;
- ⑦ 重复步骤③至⑥,直至总成本最低为止。

3.1.6 计划评审技术

计划评审技术(PERT)是一种双代号非确定型网络分析方法。在PERT中,工作的工作

时间无法提前完全确定,这种网络分析方法适用于不可预知因素较多、从未进行过的新的项目和复杂的项目。

PERT 网络的画法与 CPM 网络画法相同,它与一般的 CPM 网络的区别主要在于工作时间的估计与分析。

1. 工作历时、均值与方差的估算

3种时间估计值是指对工作时间 t 做出 t_o 、 t_m 、 t_p 3个估计值。其理论依据是将 t 视为一个连续型的随机变量,假定某个工作所有可能的历时都可以用图 3-23 所示的统计分布来表示,估算人员可以据此对工作做出 3个时间的估计。

①乐观时间(Optimistic Time, t_o),是指在一切进行顺利、没有任何困难的情况下,完成某项工作所需的时间。

②最可能时间(Most Likely Time, t_m),是指在正常情况下完成某工作最经常花费的时间。如果已经多次完成某项工作,最经常发生的实际工期可以作为最可能时间。

③悲观时间(Pessimistic Time, t_p),是指在最不利的情况下(如遇到不常见的或未预见到的困难)能够完成工作的时间。

在估算一项工作的工作时间,建立 3个时间估计时,最可能时间必须大于或等于乐观时间,悲观时间必须大于或等于最可能时间。

这个分布的平均值,也称为“期望时间”(Expected Time, t_e),可以用式(3-12)计算得出:

$$t_e = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6} \quad (3-12)$$

这个计算是对 β 概率分布的真实平均值的一个估算。使用 β 概率分布的原因是它比正态概率分布更灵活,而且能更准确地反映实际的时间和成本结果。

我们还可以估算出此分布的标准偏差 σ :

$$\sigma = \frac{t_p - t_o}{6} \quad (3-13)$$

在这种情况下,6 不是一个加权平均数,而是假定一个分布范围包括 6 个标准差 (6σ)。这个假定很重要,它是指当工时估算人员进行工时的三时估计时,该工时落在范围 $t_o - t_p$ 的概率是 99%。99%意味着“几乎从来不在范围以外”。在实际情况下,这会大大低估与工作历时相关的不确定性。对这一结果进行修正,如果 t_o 、 t_p 是按 95%水平做出的,这时使用式(3-14)求出 σ 。

$$\sigma = \frac{t_p - t_o}{3.3} \quad (3-14)$$

如果 t_o 、 t_p 是按 90%水平做出的,那么 $\sigma = \frac{t_p - t_o}{2.6}$ 。

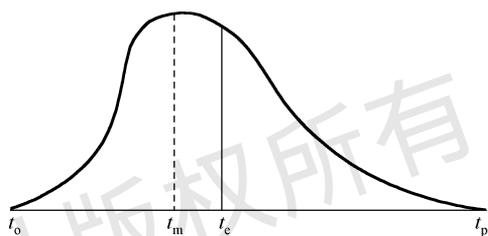


图 3-23 一项工作所有可能时间的统计分布

在网络计划中，给出 3 个假定按 β 概率分布的估计时间后，就默认为允许在工作时间估计中存在不确定因素，因此为每项工作估计 3 个时间是一项随机(Stochastic)的或概率统计(Probabilistic)的技术。仅使用一个时间估计的技术叫确定性的(Deterministic)技术。既然已经假定每项工作的 3 个时间估计的分布符合 β 概率分布，则可计算在要求完工时间之前完成项目的概率。

当采用 3 个时间估计时，网络图中关键路线上所有工作的时间估计加起来可以得到一个总概率分布。由概率理论的中心极限定理可知，这个总概率分布不是一个 β 概率分布，而是正态概率分布(Normal Probability Distribution)，概率曲线是以其平均值为对称轴的钟形曲线。这个总概率分布的期望时间等于构成总分布的各项工作的期望时间之和，且其方差(Variance)等于构成总分布的各项工作时间的方差之和。

2. 有关参数计算举例

1) 工作时间的估计

每项工作的估计时间是从该工作开始到结束所经历的全部时间。对于那些在工作时间估计中存在高度不确定因素的项目，可以给每项工作 3 个估计时间。

假定一项工作的乐观时间为 1 周，最可能时间为 5 周，悲观时间为 15 周，这项工作的期望时间 $t_e = \frac{1+4 \times 5+15}{6} = 6$ (周)。其 β 概率分布如图 3-24 所示。

假定另一项工作的乐观时间为 10 周，最可能时间为 15 周，悲观时间为 20 周，这项工作的期望时间 $t_e = \frac{10+4 \times 15+20}{6} = 15$ (周)。其 β 概率分布如图 3-25 所示。这正好与最可能时间的估计相同。

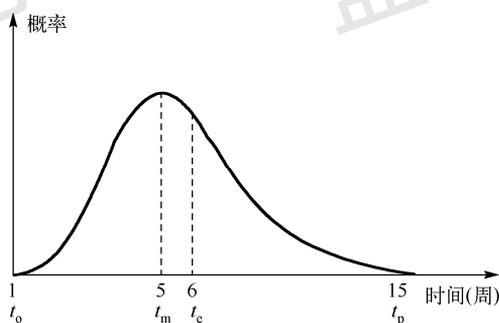


图 3-24 β 概率分布 1

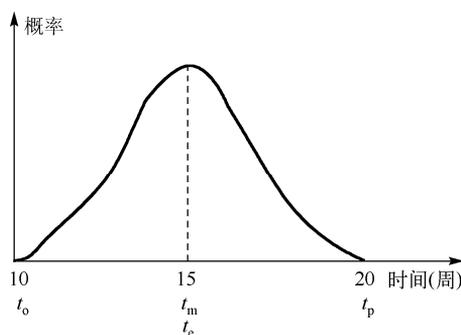


图 3-25 β 概率分布 2

图 3-24、图 3-25 中曲线的峰值代表了每项工作各自的最可能时间。期望时间(t_e)把 β 概率分布曲线下的总面积分成相等的两部分，50%的面积在 t_e 的左边，50%的面积在 t_e 的右边，因此工作实际执行时间多于和少于期望时间的概率均为 50%。换句话说，工作实际执行时间超出 t_e 的概率为 50%，少于 t_e 的概率也为 50%。例如，在图 3-25 中，曲线下 50%的面积在 6 周的左边，50%的面积在 6 周的右边，即工作实际执行时间多于 6 周的概率为 50%，少于 6 周的概率也为 50%。

2) 工作标准差的估计

标准差是衡量分布离散程度的尺度。对于正态概率分布(如图 3-26 所示)，期望值两边

一个标准差的范围内，曲线下面积约占总面积的 68%；两个标准差范围内，曲线下面积约占总面积的 95%；3 个标准差范围内，曲线下面积约占总面积的 99%。

图 3-27 给出了两个正态概率分布。由于左边的概率分布比右边的概率分布更宽，因此其分布就有较大的标准差。然而，对于任何两个正态概率分布，在其平均值两侧的一个标准差范围内包含了各自总面积的 68%。

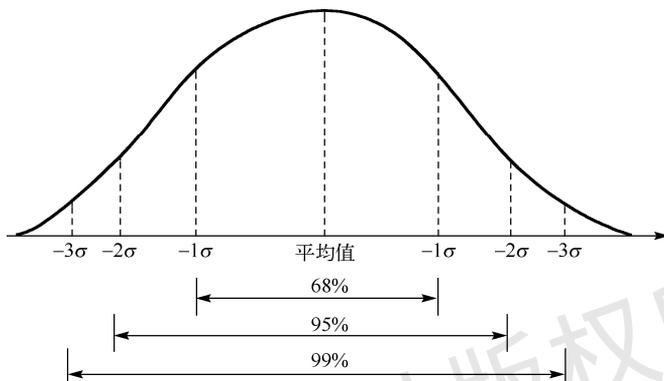


图 3-26 正态概率分布

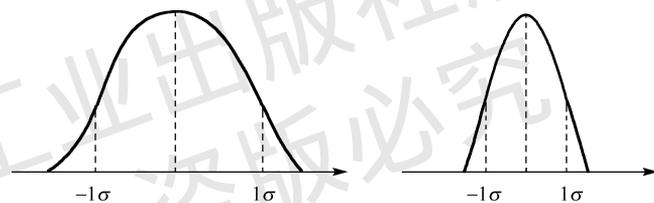


图 3-27 比较两个正态概率分布

3. PERT 网络举例

下面通过一个例子来说明 PERT 网络中的各种相关知识，以加深对 PERT 网络处理问题方法的理解。

表 3-6 所示为一组任务的前导工作和每个工作的乐观、最可能和悲观时间，期望时间和工作历时方差。每个工作的期望时间通过前面提到的 3 次估算的加权平均来计算（为方便起见小数保留两位）。例如，计算工作 A 的 t_e ：

$$t_e = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6} = (6 + 4 \times 10 + 14) / 6 = 60 / 6 = 10 \text{ (天)}$$

工作 A 的方差也容易计算：

$$\text{Var} = [(t_p - t_o) / 6]^2 = (8 / 6)^2 = 1.33^2 \approx 1.78$$

与表 3-6 中数据相关的网络图如图 3-28 所示。

可用每项工作的期望时间找出网络中的关键路线和关键时间。用正推法得出关键路线为 A → B → D → G → H，期望时间为 45 天。因为期望时间 (t_e) 可用于所有的活动，在 45 天之前和在 45 天之后完成项目的概率都为 50%。此外，对于关键路线，由于此时的工作

历时具有不确定性，因此并不能肯定 A → B → D → G → H 一定是关键路线。其他的路线，在项目实际执行时可能会变得更长。我们称 A → B → D → G → H 为关键路线仅仅是因为习惯上称具有最长期望时间的路线为关键路线。事实上，只有在实际情况发生后我们才知道哪一条路线是实际的关键路线。

表 3-6 具有不确定历时的项目工作举例

单位：天

工作	前导工作	乐观时间 t_o	最可能时间 t_m	悲观时间 t_p	期望时间 $t_e = (t_o + 4t_m + t_p) / 6$	方差 = $[(t_p - t_o) / 6]^2$
A	—	6	10	14	10	1.78
B	A	10	12	14	12	0.44
C	B	7	12	17	12	2.78
D	B	6	6	6	6	0
E	B	10	14	18	14	1.78
F	C,D	4	10	10	9	1.00
G	D	5	10	15	10	2.78
H	E,G	4	7	10	7	1.00

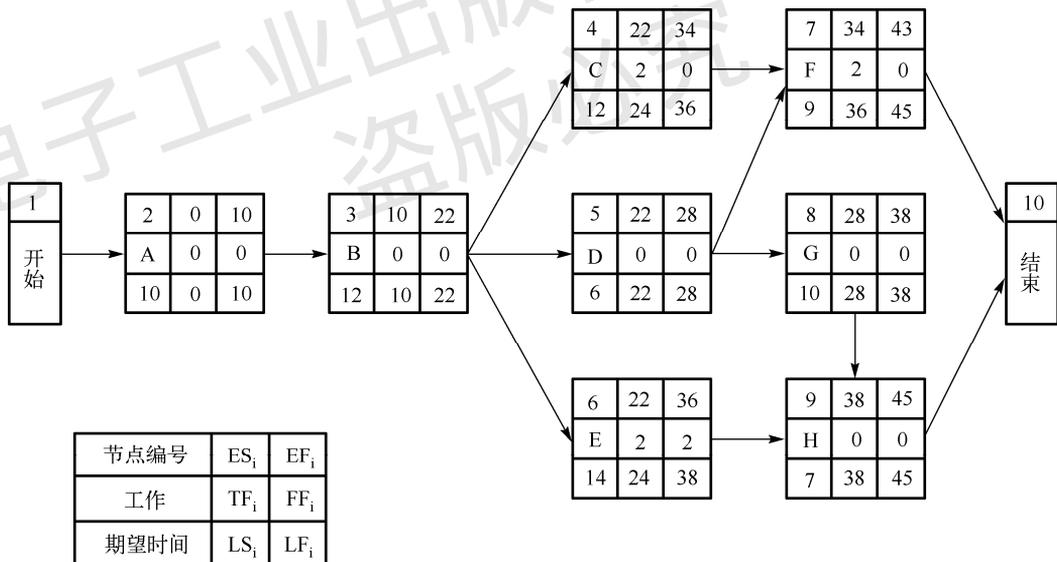


图 3-28 与表 3-6 中数据相关的网络图

项目在 50 天或更少的时间内完成的概率是多少呢？这个问题需要用项目工作不同程度的不确定性信息来回答。前文已经提到，所有工作的时间估计加起来可以得到一个总概率分布，且这个总概率分布为正态概率分布，而这个正态概率分布的期望时间则等于构成总概率分布的各项工作期望时间之和，其方差 (Variance) 等于构成总概率分布的各项工作时间的方差之和。这里存在的一个统计学上的假设，即这组工作在统计学上是独立的。这个独立性是指如果 A 是 B 的前导工作，A 早了或晚了并不会影响 B 的历时，即 A 晚了，B

可能也会晚,但并不影响完成B所需要的时间。实际中也会遇到统计独立性假设不符合的情况,这就需要根据实际问题进行一些相应的处理。根据网络图找出关键路线 $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow H$ 后,由 $t_e = 45$, $\sigma_t = \sqrt{1.78+0.44+0.00+2.78+1.00} = \sqrt{6.00} \approx 2.45$ 就可以得到整个关键路线完成时间的总概率分布。图3-29给出了总概率分布曲线。

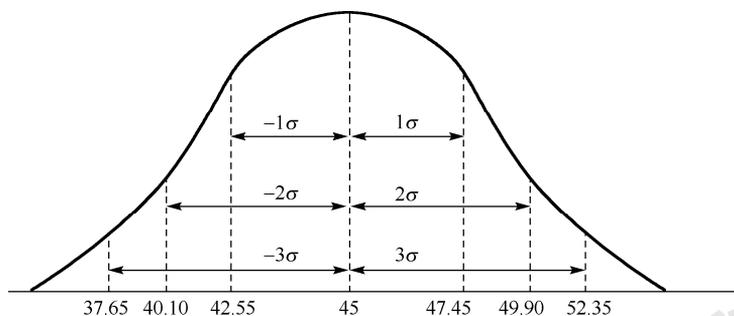


图3-29 总概率分布曲线

根据图3-29可以得出总概率分布曲线及其标准差解释:图3-29是一个正态曲线,由前面的分析可知,在 $\pm 1\sigma$ 范围内,即在42.55天与47.45天之间包含了总面积的68%;在 $\pm 2\sigma$ 范围内,即在40.10天和49.90天之间包含了总面积的95%;在 $\pm 3\sigma$ 范围内,即在37.65天与52.35天之间包含了总面积的99%。概率分布可以解释如下。

- 在37.65天到52.35天之间完成项目的概率为99%。
- 在40.10天到49.90天之间完成项目的概率为95%。
- 在42.55天到47.45天之间完成项目的概率为68%。

如想求出项目在50天内完成的概率,其计算公式如式(3-15)所示:

$$Z = \frac{LF - t_e}{\sigma_t} \quad (3-15)$$

式中,LF——项目的要求完工时间(最迟结束时间);

t_e ——项目最早期望结束时间(正态分布的均值);

σ_t ——沿最长(花费最多时间)路线完成项目各项工作的总概率分布的标准差。

根据 $t_e = 45$, $LF = 50$, 且 $\sigma_t = 2.45$, 则: $Z = (50 - 45) / 2.45 \approx 2.04$ 。

在上面的公式中, Z 是度量正态曲线上 t_e 和 LF 之间标准差的量值。这个 Z 值必须转化为 t_e 和 LF 之间正态曲线下的面积与正态曲线下总面积的比值。因为正态曲线下总面积为1.0,因此在项目的规定完工时间之前完成项目的概率就等于曲线下 LF 以左的面积所占总面积的比例,如图3-30所示。

由上面对 Z 的计算,可通过查正态分布表得出:这条路线在50天或少于50天时间内完成项目的概率约为97.93%。

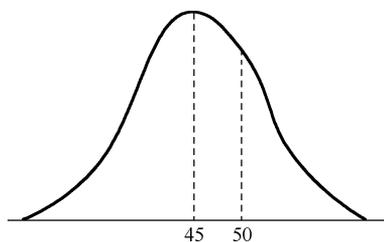


图3-30 求解完成项目的概率的分布曲线

3.1.7 CCPM 制订项目进度计划

关键链项目管理方法(Critical Chain Project Management, CCPM)是项目管理一项较为新颖的管理方法,它由以色列物理学家、管理学家高德拉特博士提出。高德拉特博士出版了《关键链》一书,将约束理论(Theory of Constraints, TOC)应用于项目管理领域,提出了项目管理的一种新的管理方法。关键链项目管理方法强调在制订项目计划时考虑现实存在的资源约束,也强调在项目执行过程中的动态管理,以及整个项目管理流程的持续改进。

约束理论在项目管理方面,尤其是在项目进度管理上的应用,推动了关键链项目管理方法的产生。关键链项目管理方法自提出以来,引发了各个行业的关注,在各行业也取得了非常突出的成绩,被业内人士认为是项目管理领域自关键路线法(CPM)和计划评审技术(PERT)以后的最大理论成果和最重要的进展之一。国内外许多知名企业纷纷使用关键链项目管理方法提高项目管理绩效及对项目的实践计划进行控制。据有关数据,美国通信设备制造商 Harris 公司通过应用关键链项目管理方法成功将建设半导体工厂的时间从行业平均水平的 46 个月缩短到 14 个月;以色列航空公司将飞机的平均维护时间从 3 个月降到 2 周;朗讯公司则将项目的平均工期缩短了 25%。

1. 关键链的确定

关键链项目管理方法的核心是关键链。该方法认为制约项目周期的是关键链而非关键路线。关键链项目管理方法以 CPM/PERT 为基础,采用每个工作可能完成时间的 50%作为该工作工期的估算值,并以此为基础建立网络图,根据工作间紧前逻辑关系和资源约束关系确定项目最长周期的工作序列,即关键链。

(1) 对项目进行工作分解,建立工作节点网络图,网络图中每个工作节点都使用三元组属性($a/r/c$)表示,其中 a 为理想工作条件下的工作执行时间估计, r 是该项工作需要的资源, c 是所需资源的数量。

(2) 找出项目中的制约因素,也就是由一系列瓶颈组成的工序链,即项目的关键链。使用 CPM 和 PERT 网络计划方法时,将项目中的关键路线看作项目管理的基础,关键链项目管理方法与 CPM 不同,不仅考虑项目中各工作逻辑关系,也充分考虑项目中现实存在的资源约束。如图 3-31 所示,在 CPM 中,工作 A、C、E、F 组成了项目的关键路线,但如果考虑资源约束,假设工作 D 和工作 E 需要同一种资源,而该资源一次只能投入一项工作的执行,那么事实上工作 D 和工作 E 是不能同时进行的,综合考虑整个项目的情况,确定工作 E 的优先级高于 D,整个项目的网络图可以进行修改。因此,在考虑资源约束的情况下,项目的关键工作为 A、C、E、D、F,这 5 个逻辑构成了项目的关键链。可见,是关键链而不是关键路线决定了项目在给定紧前逻辑关系和资源约束条件下完成项目所需的最短时间。高德拉特博士的关键链定义是既考虑工作间的依赖关系又考虑资源间依赖关系的最长的工作序列。

(3) 充分挖掘项目中约束活动的潜力,缩短关键链所需时间,从而重新调整系统的关键链,因此将出现新的“约束”因素。利用关键链不断进行优化管理,同时不断调整系统的关键链,使整个系统处于不断迭代优化的过程,直到得出较为理想的结果。

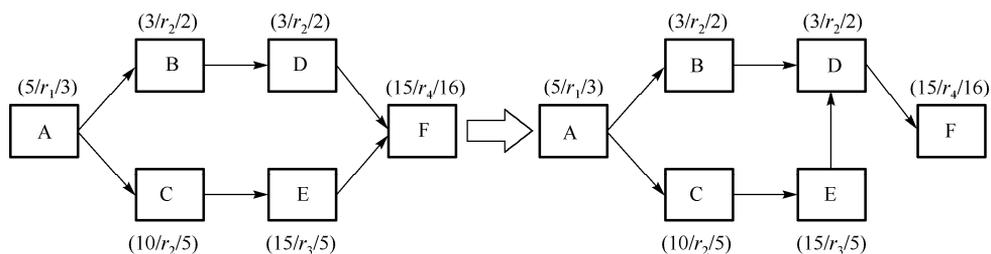


图 3-31 项目关键链确定图

2. 项目缓冲的设置

在项目执行过程中，由于项目组成员普遍存在风险规避心理，因此项目执行者提出的工作计划时间均远远长于完成工作所需的实际时间，这可以看作在工作所需的平均时间上增加了一段“安全时间”。这样的处理方式具有两方面的效果，正面效果是提高了管理不确定因素的能力，负面效果是延长了完成项目所需的时间。为了保证工作能够有较高的概率在计划时间内完成，关键链项目管理方法采取了一种方式，即用工作所需的平均时间或专家评测时间作为最终计划时间。但是由于项目执行具有很大的不确定性，为了更好地控制、管理项目的进度，在关键链末端添加安全时间，也就是项目的缓冲时间，关键链项目管理方法重新配置了 CPM 中分散存在的安全时间，这样的重新配置能够大大缩短项目所需的时间。根据有关数理统计研究，将每项工作的安全时间整合在整个项目的最后，在相同概率下，只需要较少的时间就可以完成所有工作。

为保护关键链上的工作不影响整个项目的计划进度，关键链项目管理方法要求为关键链设置项目缓冲区；同时为了防止非关键链上的工作影响关键链上工作的进度，在非关键链与关键链的汇合处设置汇入缓冲。高德拉特博士提出以关键链上所有工作可能完成时间的压缩时间作为安全时间，即缓冲区的大小，通过对缓冲区的监控来进行风险的控制和管理。

当前常用的缓冲设置方法有以下几种。

1) 均方差法

均方差法由概率统计数学方法而得，一组串行过程被合并后，串行过程的不确定性会降低为总量的一部分。具体地说，对于串行过程，总的不确定性是各个不确定量平方和的平方根。

2) 任务链工期长度 1/2 法

该方法的缓冲长度取任务链工期长度的 1/2。不确定性高的项目，比例可以比 1/2 高一些，不确定性小的项目，比例可以小一些。

3) 安全时间 1/2 法

安全时间 1/2 法也需要用两点分析法，缓冲长度等于每项任务的安全时间总和的一半。这种方法输入较麻烦，且在多数情况下计算结果和任务链工期长度 1/2 法差不多，唯一的优点是容易计算。

3. 关键链项目管理方法的优点

关键链项目管理方法相比以前的一些管理方法，既考虑了工作间的逻辑关系约束，也

考虑了工作间的资源冲突。关键链项目管理方法能够大大提高项目的绩效。根据高德拉特博士的理论，关键链项目管理方法需要设置时间缓冲，通过设置缓冲，整个项目中的每项工作没有保留富余时间，对每个项目组成员都形成一种无形的压力，这样可以大大提高工作效率。传统的估计时间，没有考虑项目负责人在实施项目过程中的心理因素，而关键链项目管理方法则考虑负责人、同事、上司三者的心理因素，从而剔除项目管理中因心理因素所导致的不良习惯，大大提高项目如期完成的可能性。从系统的角度思考问题，可减少因频繁修改计划时间表所导致的工程项目的失控。

3.1.8 可调控的项目进度计划方法

在特定行业或特定情况下，可以采用可调控的方法制订项目进度计划，包括反向阶段进度计划、滚动计划、敏捷项目计划。因为这些方法不是相互排斥的，所以在同一个项目中可以使用多种方法。

1. 反向阶段进度计划

建筑行业使用的一种进度计划制订方法叫作反向阶段进度计划或倒排工序计划。反向阶段进度计划由最密切接触工作的人进行制订，他们从项目最终可交付成果开始，不断询问在可交付成果前应该做什么。通过定义每项工作，确定它们的顺序，进度计划制订者确信公司有资源可以按照暂定的进度计划完成各项工作。

在使用该方法的过程中，团队应系统地从项目结束到项目开始进行反向考虑。这有助于确保所有的项目可交付成果与工作列表都能完成，因为通过反向推导，很容易发现被遗漏的可交付成果与工作。

2. 滚动计划

滚动计划背后的思想是随着项目详细计划中上一部分工作的完成，再制订项目后续部分的计划。这使得项目团队既能关注短期，又不忽略长期。这意味着项目团队需要根据可用信息逐步制订详细的计划。

3. 敏捷项目计划

敏捷项目计划背后的基本思想是：使工作人员、其他干系人均合作参与计划之中；虽然在起始阶段确定整个项目范围的困难程度比较高，但干系人切实希望在批准项目之前对总成本、进度、功能有粗略的了解；虽然不受控制的变更不妥，但过于僵化的变更控制也往往意味着干系人有效的紧急需求不能得到满足。

3.2 项目资源计划

项目经理应具备两方面能力以准确调整项目资源。一方面是行为能力，另一方面是技术方法。大量的技术方法可以用来估算资源需求，制订人员配备管理计划，为各项工作分配一个或多个工人，及时发现某工人在某工作处超负荷；可以运用有限的关键人员和其他资源压缩(加速)项目进度计划。

3.2.1 项目资源的分类

在项目管理中，对所使用的资源进行分类，常见的分类方法有以下3种。

(1) 根据会计学原理对项目所需资源进行分类：劳动力成本(人力资源)、材料成本，以及诸如分包、借款等其他生产成本。

(2) 根据项目所需资源的可得性进行分类。

① 可以持续使用的资源，如固定的劳动力。

② 消耗性的资源，如各种材料或计算机的机时。

③ 双重限制资源，如资金的使用就是典型的双重限制资源，在项目各个阶段的使用量和总体的使用量都是有限制的。

(3) 根据项目进行所需资源的特点进行分类。

① 没有限制的资源，如不需要经过培训的劳动力或通用设备。

② 非常昂贵或在整个项目的工期内，不可能完全得到的资源。例如，项目实施过程中，使用的特殊试验设备，每天只能进行4个小时的工作；或者某些技术专家同时负责很多项目的技术工作。这些都是此类资源的典型代表。

3.2.2 资源在项目计划中的影响

资源是项目实施的基础，没有资源一切都是空谈。资源对项目的进度计划、成本计划等有直接的影响。因为项目的每一项工作都需要利用物质资源及非物质资源，而项目中的各项工作(活动)在资金、时间、人力等资源方面往往存在既共享又竞争的关系；在多项目并行实施过程之中，项目之间在资金、时间、人力等资源方面也存在既共享又竞争的关系，资源配置的合理与否直接影响各项目的进度和完工质量，关系着各项目的成败。具体来说，当两项工作同时使用一种资源，即出现了冲突，有时还会出现某一项工作资源超负荷的情况，这时则需要通过网络计划技术调整资源的利用，适当合理分配资源的使用，如果无法调整就会出现项目延迟。项目出现资源不够或项目推迟，又会影响项目的费用。

在制订项目进度计划的最初，通常不会考虑资源在所需时是否可用的问题。因此，若忽视资源约束的影响则会产生严重问题。为避免这一问题，首先要重新调整项目的进度计划，使所有的工作都与可用资源一致；然后，检查其他项目的资源需求，并解决存在的资源冲突。而一旦没有时间修改原定进度计划，就会严重影响项目进度。

在实际项目进行的过程中，项目在很多情况下需要更多的资源，这时就要调整预算和进度表。但是，在一些项目中，在缺乏足够时间的情况下，项目经理必须确定项目的风险在哪里，并且制订计划来应对风险。备用资源的准备有两种情况，有时需要资源随时备用；另一些时候，只需要知道在必要时能够很快获得这些资源。

3.2.3 项目资源的均衡

资源均衡是处理多约束综合挑战的过程。在项目生命周期中，需要实施一系列措施进行资源均衡，从而使资源需求的影响降到最低。资源均衡要达到以下两个目标。

(1) 确定资源需求并保证资源在合适的时间是可用的。

(2) 制订项目进度计划时要求每个工作在不同的资源利用水平中尽可能平稳地变化。

资源均衡能帮助项目成员通过资源负载表、资源负载图全面地了解项目各项工作的资源需求与应用情况。在实际的项目实施过程中，制订合理的资源需求计划会使工作的衔接非常顺畅，不会出现因为突然的资源稀缺而不得不停止项目去寻找资源的情况。资源均衡的关键在于如何制定最优决策，即在合适的时间将合适数量的资源给到合适的工作。在对资源均衡的可选方案做出决策时，常用的方法是用平衡试探法分析资源平衡问题，或者利用简单的经验规则。

确定资源配置的平衡试探法包括将资源应用于以下方面。

(1) 具有最少时差的工作。其决策规则是选择具有最小时差的工作进行资源优先排序。有人认为这种决策规则对于制定优先排序决策最有利，它可以在整个项目中产生最小的进度计划滑动。

(2) 具有最短历时的工作。工作按历时由小到大排序，资源也根据工作的优先级排序。

(3) 具有最小工作标识编号的工作。平衡试探法提出，当存在疑问时资源最好首先被应用到较早开始的工作中。

(4) 具有最多后续任务的工作。选择有最多后续任务的工作并进行资源优先排序。

(5) 需要最多资源的工作。通常将资源应用到需要最多资源的工作中，然后根据额外资源的可用性来分析剩余的工作。

下面以实例来分析资源均衡的过程。

1. 工期约束下的资源均衡

下面以表 3-7 所示的项目为例来深入说明资源均衡的过程。

根据网络计划的内容，现在可以计算出每项工作的最早开始时间、最迟开始时间、最早完成时间、最迟完成时间和总时差，并且绘制如图 3-32 所示的项目单代号网络图。

表 3-7 项目举例

工作	紧前工作	工作时间(周)	每周需要的工日	需要的总工日
A	—	8	16	128
B	—	6	8	48
C	A	12	6	72
D	A、B	10	4	40
E	—	10	10	100
F	C、D、E	6	18	108
G	F	8	14	112

根据网络图可以确定项目工期与工作时间参数，如表 3-8 所示。

表 3-8 确定了网络的关键路线为 A → C → F → G。在了解这些项目信息的基础上，项目网络的资源均衡需要遵循一系列步骤，这些步骤将按照一定的顺序进行。

资源均衡的过程包括以下几个步骤。

1) 编制资源负载表，确定工作的最迟完成时间

将网络图的内容与工作所需的资源数量相结合表现在资源负载表中，绘制包括工作时差的资源负载表，如表 3-9 所示。

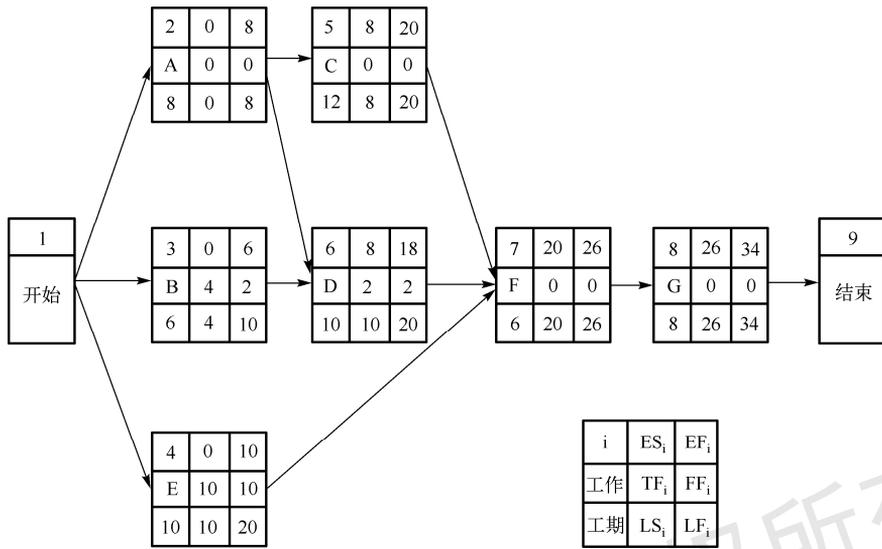


图 3-32 项目单代号网络图

表 3-8 项目任务

单位：工时

工作	历时	最早开始时间	最早完成时间	最迟开始时间	最迟完成时间	总时差
A	8	0	8	0	8	—
B	6	0	6	4	10	4
C	12	8	20	8	20	—
D	10	8	18	10	20	2
E	10	0	10	10	20	10
F	6	20	26	20	26	—
G	8	26	34	26	34	—

表 3-9 资源负载表

工作	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
A	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16]																					
B	8	8	8	8	8	8																									
C											6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6]										
D											4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4]										
E	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																					
F																						18	18	18	18	18	18]				
G																															
合计	34	34	34	34	34	34	26	26	20	20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	6	6	18	18	18	18	18	18	14	14	14	14

工作	31	32	33	34
A				
B				
C				
D				
E				
F				
G	14	14	14	14]
合计	14	14	14	14

注：] = 最迟完成时间

此时，项目甘特图如图 3-33 所示，资源负载图如图 3-34 所示。

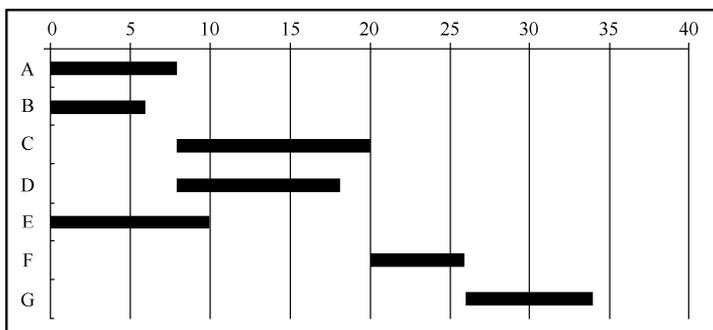


图 3-33 项目甘特图

此时，资源负载表的信息非常全面，项目开始于第 1 周，工作的先后顺序根据网络图与甘特图可得。从表中可以看出每项工作每天所需要的资源。资源投入项目的时间(以工日为单位)在表的底部汇总，用来说明项目资源总需求的概况。同时，还可以看出，资源需求在开始的 6 周内达到了峰值，为 34 个工日。

资源负载表与资源负载图可以形象有效地表示整个项目基准计划中预期资源需求。据此，就可以制定优化资源平衡的策略。

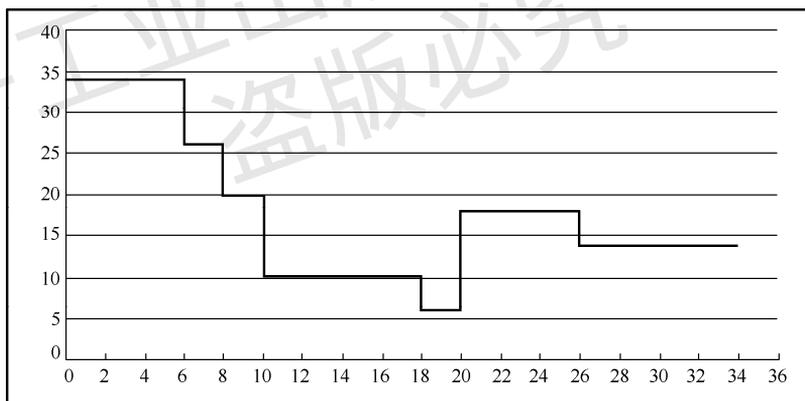


图 3-34 资源负载图

由于资源的均衡过程还需要一些额外的信息，如关键工作、有浮动时差的工作。据此，表 3-9 还将总时差与最迟完成时间应用到资源负载表中，工作的最迟完成时间(包括时差)用中括号的形式标出。因此，工作 B、D、E 显示了与各自时差相对应的最迟完成时间，而关键路线(A → C → F → G)上工作的最迟完成时间与其最早完成时间相同。

2) 识别资源的过度分配

在完成资源负载表并确定所有工作的最迟完成时间之后，实际的资源均衡过程正式开始，第一步是检查项目资源负载表。在这个步骤中，需要在项目基准计划中寻找资源配置已经超过其最大可用资源水平的所有点。如表 3-9 所示，总的资源需求(最后一行的合计)显示了在项目中每天最大的需求量，如在第 1~6 周，进度计划中需要 34 个工日。项目经

理需要考虑的问题是，此时的资源分配情况是否可以接受，每天的资源负荷能否承受，或者是否出现问题，资源是否由于过度分配而变得不可用。例如，如果项目预算为每周 34 个工日，则此时的资源负荷情况可以接受。如果资源被限制到某个数值，而该数值小于项目资源负载表中出现的最大值，那么项目中过度分配问题必须予以处理和修正。最佳情况是，被分配的工日数小于或等于项目基准计划中资源配置的最大值。然而，如果给定时间和资源项目约束的具体特性，就会更容易找到需要平衡的资源冲突。假设例子中的项目每天可用的工日最多为 24 个，而已经确定在进度计划中第 1~6 周项目需要 34 个工日，这就意味着资源在这一天被过度分配。发现资源过度分配后，就可以进行资源均衡过程的下一步了，即修正进度计划并消除资源冲突。

3) 均衡资源负载表

在确定项目基准计划存在资源过度分配的情况后，迭代过程正式开始，在该过程中，会重新配置资源负载表以消除资源冲突。在开始重新制订资源进度计划并消除资源冲突时，一般会产生连锁效应。在完成项目资源均衡的必要步骤后，连锁效应将变得非常明显。

阶段一：在表 3-9 中检查冲突点，即在第 1~6 周，工作共需要 34 个工日。工作 A、B、E 都被安排在这几周，分别需要 16、8、10 个工日。因此，资源均衡的第一个阶段需要识别相关工作，并决定哪一项工作是需要调整的候选对象。那么，哪一项工作应该被调整呢？通过前面提到的平衡试探法，首先要检查工作，了解哪些是关键工作和哪些工作有浮动时差。从编制网络的过程中可知，工作 A 在关键路线上。因此如果可能的话，应避免重新配置此工作，因为对其历时的任何调整将相应地影响整个项目的基准进度计划。因此，排除工作 A 后，剩下的调整对象就是工作 B 或工作 E。

阶段二：第二个阶段选择要重新配置的工作。虽然工作 B 和工作 E 都有浮动时差，但工作 B 只有 4 个工日的时差，而工作 E 有 10 个工日的时差。根据经验规则，保持工作 B 不变，因为它有较少的浮动时差，可以选择调整工作 E 的进度计划。表 3-10 显示了对初始资源负载表进行第一次调整后的结果。第 1~6 周工作 E 分配的 10 个工日被划掉，即工作 E 推迟 6 周开工。调整后的资源负载表显示第 1~6 周不存在资源冲突，基准计划中第 1~6 周现需 24 个工日，正好满足项目每天可用的工日最多为 24 个的约束。

阶段三：在做出调整从而缓解资源冲突后，需重新检查资源负载表的其他部分并寻找新的资源冲突点。这时我们发现第 7、8 两周仍然存在资源冲突，因此必须重新经历第二阶段的过程并消除最新的资源冲突。调整的候选对象为项目中第 7、8 周进行的所有工作，包括工作 A 和 E。显然，工作 A 被排除（它位于关键路线上），因为它没有时差。因为工作 E 具有更进一步向后推迟的潜力，所以可以考虑将工作 E 安排在工作 A 完成之后再开始，即工作 E 继续延迟 2 周。如表 3-11 所示，资源负载表底部的资源合计显示，所有工作的资源分配都保证了每天小于或等于 24 个工日的阈值水平，从而完成了任务。在该例中，可以在不延长项目的基准计划，也无须增加额外资源的前提下，进一步对项目资源进行均衡。实质上，该例中的资源均衡既不与资源约束相冲突，也不与时间约束相冲突。

从表 3-11 可以看出，资源的最大需求量是每周 24 个工日，发生在第 1~6 周；最小的资源需求量为每周 6 个工日。在该项目中，资源需求的变化范围减少至 18 个工日。

在该项目中，在不延长整个工期的情况下，为了使资源需求的变化范围最小化，最大

限度地达到资源的均衡使用，还可以进一步利用总时差来进行资源的均衡。可以将工作 E 继续推迟 2 周来完成，然后将工作 B 再延迟 4 周来完成，如表 3-12 所示。

表 3-10 第一次调整后的资源负载表

工作	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
A	16 16 16 16 16 16 16 16]		
B	8 8 8 8 8 8]		
C		6 6 6 6 6 6 6 6 6 6]	
D		4 4 4 4 4 4 4 4]	
E	10 10 10 10	10 10 10 10 10 10]	
F			18 18 18 18 18 18]
G			14 14 14 14
合计	24 24 24 24 24 24 26 26 20 20	20 20 20 20 20 20 10 10 6 6	18 18 18 18 18 18 14 14 14 14

工作	31 32 33 34
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	14 14 14 14]
合计	14 14 14 14

表 3-11 第二次调整后的资源负载表

工作	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
A	16 16 16 16 16 16 16 16]		
B	8 8 8 8 8 8]		
C		6 6 6 6 6 6 6 6 6 6]	
D		4 4 4 4 4 4 4 4]	
E	10 10	10 10 10 10 10 10 10]	
F			18 18 18 18 18 18]
G			14 14 14 14
合计	24 24 24 24 24 24 16 16 20 20	20 20 20 20 20 20 20 20 6 6	18 18 18 18 18 18 14 14 14 14

工作	31 32 33 34
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	14 14 14 14]
合计	14 14 14 14

表 3-12 第三次调整后的资源负载表

工作	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
A	16 16 16 16 16 16 16 16]		
B		8 8 8 8 8 8]	
C		6 6	6 6 6 6 6 6 6 6 6]
D		4 4	4 4 4 4 4 4 4 4]
E		10 10 10 10 10 10 10 10 10]	
F			18 18 18 18 18 18]
G			14 14 14 14]
合计	16 16 16 16 24 24 24 24 18 18	20 20 20 20 20 20 20 20 16 16	18 18 18 18 18 18 14 14 14 14

工作	31 32 33 34
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	14 14 14 14]
合计	14 14 14 14

从表 3-12 可以看出, 此时资源需求的最大值仍为每周 24 个工日, 但是最小的资源需求量变为每周 14 个工日, 所以该项目资源需求的变动范围减少至 10 个工日。此时, 项目的甘特图与资源负载图如图 3-35、图 3-36 所示。

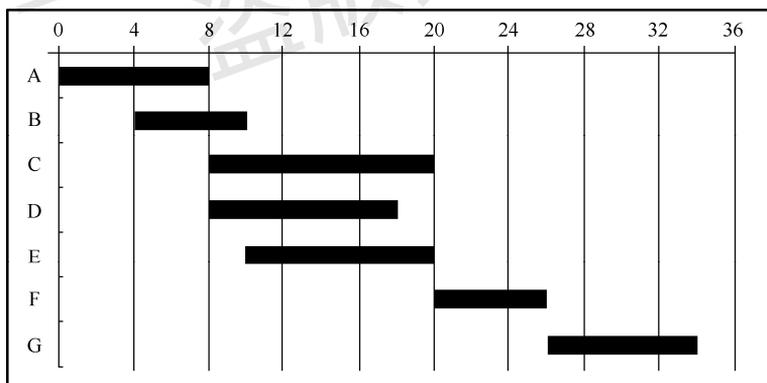


图 3-35 项目甘特图

2. 资源约束下的资源均衡

在安排进度时, 往往根据经验确定资源需求情况, 并假设资源可获取。实际上, 很多项目均受来自资源约束条件的制约, 这可能导致工作的延期完成或中断, 从而使项目原有的计划无法按期实现。因为在项目进行的一个或多个阶段中, 会发生资源的需求超过实际可以利用的资源的现象, 同时该项目非关键工作的时差又不足以解决上述问题。因此, 应用这种方法可能导致项目工期的延长。

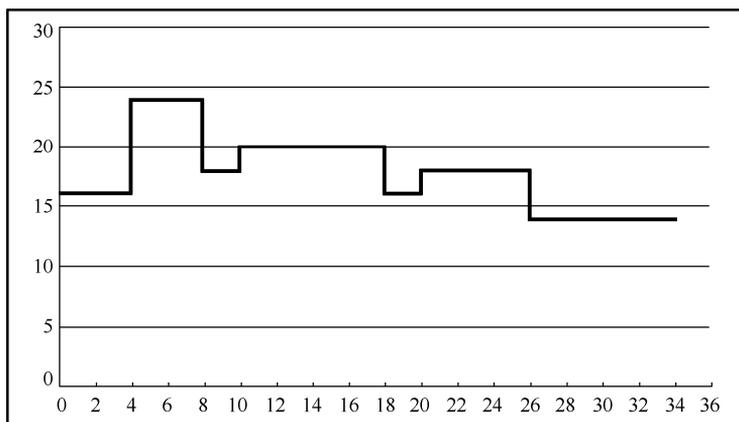


图 3-36 项目资源负载图

资源约束进度安排方法是在各种可得资源的数量不变的情况下制订最短进度计划的一种方法。在几项工作同时需要同一有限资源的情况下，拥有最小时差的工作将拥有资源配置的优先权；如果资源还有闲置，再优先分配给未被分配资源的工作中时差最小的工作，以此类推。当其他工作也需要这种资源，而该资源已经全部分给较高优先权的工作时，低优先权的工作需推迟。

仍以文中表 3-7 所示的项目为例，假设该项目在更严格的资源约束下进行，每周资源约束为 18 个工日，而非 24 个工日，则项目经理需要重新配置资源负载表，并且需保持与资源约束的基本原则不相冲突。表 3-13 列出了在本例中进行资源均衡决策过程的一系列步骤，为了保证与资源负载限制不冲突，可能会要求对初始进度计划做出必要的推迟。

表 3-13 资源均衡决策的步骤

步骤行动
1. 在工作 A、B 中选择被调整的工作时，排除 A(关键工作)，为工作 A 分配资源，将 A 添加至资源负载表中，由此延迟 B
2. 在第 9 周首先为 B 分配资源。B 有 4 周的时差，调整后延迟了 8 周，故工作 B 实质延迟了 4 周
3. 比较 C、D 与 E，首先为 C 分配资源(关键工作)，将 C 添加至资源负载表中，由此延迟 D 与 E，在第 9 周再为 C 分配资源
4. 比较 D 与 E，D 时差更少，而 D 必须在 B 之后，因此首先在第 15 周为 D 分配资源，D 有 2 周的时差，调整后延迟了 6 周，故实质延迟了 4 周
5. 为 E 分配资源，由于资源的约束，E 只能第 21 周为其分配资源，E 有 10 周的时差，调整后延迟了 21 周，故工作 E 实质延迟了 11 周
6. 下面为 F 分配资源，F 必须在 E 后，因此第 31 周为 F 分配资源，F(关键工作)调整后延迟了 10 周
7. 最后，为 G 分配资源，G 必须在 F 后，因此第 37 周为 G 分配资源，G(关键工作)调整后延迟了 10 周。整个项目第 1 周开始，第 44 周结束，整个项目延迟了 44-34=10 周

表 3-14 描述了按照表 3-13 的步骤进行资源均衡后的结果。从资源均衡的过程可以看出，当项目的资源约束为每周 18 个工日时，项目的关键工作有 A、C、F、G。所以，首先工作 A 开始分配资源，因为工作 A 占用了 18 个工日中的 16 个工日，所以工作 B 只能在工作 A 完成之后开始。工作 B 的紧后工作是工作 D，这种逻辑关系导致了工作 D、F、G 的延期完成，项目工期延长至 44 周。此时，项目的甘特图与资源负载图如图 3-37、图 3-38 所示。

表 3-14 资源负载表 2

总时差	工作	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
0	A	[16 16 16 16 16 16 16 16		
-4	B	[8 8 8 8	
0	C		[6 6 6	6 6 6 6 6 6 6 6
-4	D		[4 4 4 4 4 4
-11	E	[10 10 10 10 10 10 10 10 10
	F			[
	G			[
	合计	16 16 16 16 16 16 16 16 14 14	14 14 14 14 10 10 10 10 10 10	14 14 14 14 10 10 10 10 10 10

总时差	工作	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40	41 42 43 44
	A		
	B		
	C		
	D		
-10	E		
-10	F	18 18 18 18 18 18	
	G		14 14 14 14
	合计	18 18 18 18 18 18 14 14 14 14	14 14 14 14

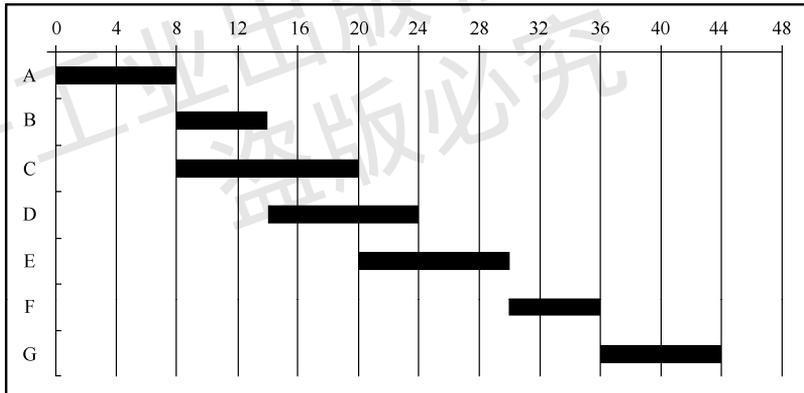


图 3-37 项目甘特图

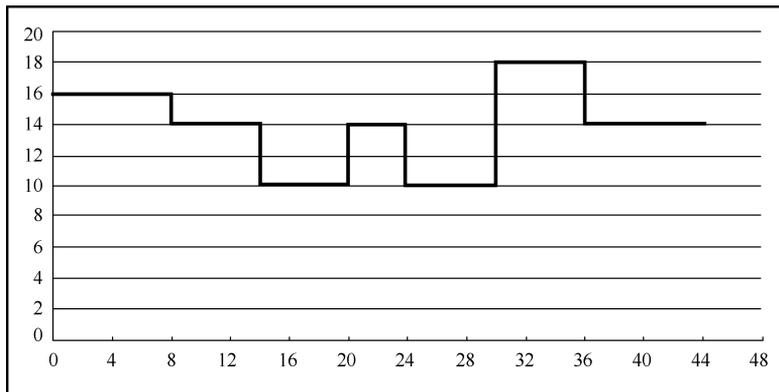


图 3-38 项目资源负载图

3.3 工程案例分析

某信息系统集成公司有在某小型炼油企业成功实施工厂制造执行系统 (Manufacturing Execution System, MES) 的经验, 其针对炼油企业的 MES1.0 软件深受用户好评。

公司去年承接了 A 公司的 MES 项目实施工作。A 公司是一家大型石化公司, 有下属分厂十余家, 包括炼油厂、橡胶厂、烯烃厂、塑料厂、腈纶厂和储运厂等, 以炼油厂为石油炼制龙头, 其他分厂提供半成品和生产原料, 业务流程复杂。

钱经理为公司的项目经理, 全面负责这个项目, 这是他第一次负责大型项目。A 公司信息中心的夏经理作为甲方项目经理负责实施配合。由于涉及分厂较多, 因此从各分厂抽调了生产调度人员、计划统计人员、计量人员、信息人员中的技术骨干, 组成各分厂的项目小组。钱经理带领的乙方项目组成员均为 MES 业务顾问, 其中资深顾问安排到了业务最复杂的炼油厂, 其他顾问水平参差不齐, 分别安排到了其他分厂。公司的软件开发部设在总部, MES 业务顾问均在 A 公司提供的现场(某宾馆)集中办公, 钱经理负责 A 公司与公司总部之间的沟通, 从总体上管理项目。

项目在 8 月初启动, 钱经理按原 MES1.0 版本软件的实施经验制订了项目开发计划, 收集了各分厂的用户需求, 组建了 MES 测试服务器环境等。项目初期进行得较为顺利, 但之后发生了一系列的问题。由于原 MES1.0 版本软件仅适用于单纯的炼油业务, 而现在的化工业务在软件系统中并没有合适的模型, 且 A 公司规模大, 炼油厂的许多业务并非直线式, 而是网状关系, 因此 MES 软件的炼油业务模型也需要修改。而在钱经理的项目计划中, 并没有炼油业务模型的修改计划, 业务需求分析占用了很长时间, 钱经理将这些需求提交给软件开发部抓紧开发。而与此同时, 甲方的部分业务人员, 如统计和信息人员却无事可做, 或上网打游戏, 或通过远程桌面处理自己原单位的一些日常工作事务。

当软件开发部将软件开发完成后, 已经进入 12 月, 项目进度已经远远落后于钱经理当初的计划。钱经理要求各分厂项目小组由顾问牵头分别对自己负责的模块进行测试, 同时安排各小组中的信息人员进行报表开发, MES 软件试运行的原计划则安排在 12 月底, 拟 1 月中旬正式上线。信息人员认为, 以现有的可用时间开发如此多报表会导致任务无法完成, 而统计人员发现 MES 软件根本不能满足业务的需要。

项目进入混乱状态, 各分厂的项目小组内也有不同的声音, 有的抱怨软件操作不便, 运行一个查询页面需花费 3 分钟时间, 也有用户反映在一些录入页面中找不到提交按钮, 造成资料不能保存。一些顾问迫于压力尝试修改软件, 却造成用户的数据丢失, 引起很大不满, 甚至一些成员开始嘲笑乙方顾问的水平, 进而开始怀疑 MES 软件能否正常运转。根据实际情况, 钱经理经用户同意, 将软件的投用时间重新设在 1 月底。为了完成这个目标, 钱经理要求各项目小组从 12 月中旬开始, 每周六、周日和晚上必须加班。元旦期间, 项目小组中的一些甲方成员并没有来加班, 且一个假日的中午, 所在的宾馆也没有提供足够的午餐, 乙方项目小组中开始有人跳槽……

钱经理受到公司总部的批评, 但他却认为, 即使他能准确估算出每项工作所需的时间, 也无法确定项目的总工期; 以项目现在的状态, 到 1 月底无法完成, 2 月底也没有把握, 且他无法判断具体的完成时间。

从时间角度推断项目更改失败的主要原因如下。

- (1) 钱经理缺少管理大型项目的经验，制订的进度计划存在问题。
 - (2) 钱经理对某些工作的历时估算有问题，如需求分析和软件开发所需要的时间。
 - (3) 钱经理提交给开发人员的业务需求可能存在问题。
 - (4) 乙方项目组内部缺少沟通。
 - (5) 甲乙双方没有明确的分工。
 - (6) 甲方项目经理可能没有发挥对甲方成员的管理作用。
 - (7) 没有变更控制系统或规范的变更控制流程，没有使用配置管理系统。
 - (8) 可能对项目的每个阶段没有明确的划分，也没有相应标准来评审，就进入下一阶段。
 - (9) 缺少从总体上控制项目的项目经理或其他监控措施。
 - (10) 甲乙双方沟通不足，甲乙双方应该确立一个共同目标。
 - (11) 在赶工时，加班过度降低了工作效率。
 - (12) 工作资源估算上有问题，在人力资源使用的安排上，没有充分发挥资源的作用。
 - (13) 缺少激励措施，没有考虑人员的流动风险。
 - (14) 缺少对进度监控的机制，没有使用网络图等工具，没有确定各项工作间的依赖关系，对各项工作先后顺序的安排可能出现了错误。
- 通过原因分析，钱经理对工作方式进行了以下调整。
- (1) 钱经理和项目组一起重新修订一个合理的进度计划。
 - (2) 重新核实各项工作的历时估算，包括已经发生过的历时，并记录错误原因。
 - (3) 重新和用户一起梳理业务需求，确保理解的一致性。
 - (4) 加强乙方项目组内部的沟通交流。
 - (5) 对甲乙双方进行明确的分工，分清职责。
 - (6) 甲方项目经理行使管理甲方成员的权力。
 - (7) 制定规范的变更控制流程，在项目中使用配置管理系统。
 - (8) 明确划分项目的每个阶段，制定评审标准。
 - (9) 增加一个从总体上控制项目的项目经理，或制定一些监控措施。
 - (10) 加强甲乙双方项目组之间的沟通。
 - (11) 合理赶工，如果需要，可以缩小范围，先保证核心工作的实现。
 - (12) 建立人力资源日历，充分发挥资源的作用。
 - (13) 制定积极的绩效考核制度，减少人员的流动风险。
 - (14) 重新梳理各项工作间的依赖关系，确保网络图能反映真实的情况，并加强对进度的监控。

本章小结

本章首先从项目进度计划与资源均衡两方面展开，针对项目进度计划，介绍了确定项目工作关系及项目工作时间估算的方法；并介绍了项目进度计划的制订方法、网络计划技术的概念及网络图的绘制方法；进一步介绍了计划评审技术、CCPM 制订项目进度计划、可调控的项目进度计划方法。其次，针对项目资源计划，从不同约束视角下分析了资源配置的均衡。最后，结合工程案例体现了项目进度计划在实际工程项目中的重要作用。

能力测试题

1. 是非判断题

- (1) 项目的进度、成本和质量三者之间的关系是对立统一的。 ()
- (2) 项目的进度计划表明了项目各项工作的先后顺序以及每个项目工作的历时。 ()
- (3) 关键路线就是完成项目时间最短的路线。 ()
- (4) 计划评审技术的工作工期不是固定的, 而是用期望值表示的。 ()
- (5) 资源对项目的进度计划、成本计划等没有直接影响。 ()

2. 单项选择题

- (1) 在任务赶工时, 应该集中于()。
- A. 路线的非关键工作 B. 耗费资源多的工作
- C. 关键路线的工作 D. 降低成本, 加速执行
- (2) 你正在执行房屋装修项目, 只有你一个人, 那么在装修门和窗的顺序上, 只能采用()逻辑关系。
- A. 完成到开始 B. 完成到完成
- C. 开始到开始 D. 开始到完成
- (3) 某项工作工期的乐观时间为 3 天, 最可能时间为 6 天, 悲观时间为 9 天, 此任务工期为()。
- A. 3 天 B. 6 天 C. 9 天 D. 8.5 天
- (4) 甘特图与网络图之间的区别是()。
- A. 历时 B. 工作 C. 节点 D. 资源的分配
- (5) 关于关键路线的正确描述是()。
- A. 关键路线是指在项目开始到完成的多条路线中耗时最短的那条路线
- B. 关键路线是指在项目开始到完成的多条路线中耗时最长的那条路线
- C. 网络图中最多存在一条关键路线
- D. 关键路线上的某项工作延误一天, 不影响整个项目的完工时间

3. 多项选择题

- (1) 项目进度计划常用的编制方式有()。
- A. WBS B. 里程碑 C. 甘特图
- D. 网络图 E. 3 个时间估计法
- (2) 下列表述正确的是()。
- A. 关键路线法主要应用于以往在类似项目中已取得一定经验的项目
- B. 计划评审技术更多地应用于研究与开发项目
- C. 如果任务工期无法正确估计, 一般采用计划评审法
- D. 关键路线法属于非肯定型, 计划评审技术属于确定型方法
- E. 网络计划的基本形式是关键路线法和计划评审技术
- (3) 下列表述错误的是()。

- A. 如果进度计划进行了修改, 关键路线不会发生改变
 - B. 如果总时差为负, 表示在预定时间内提前完成项目
 - C. 如果总时差为正, 表示在预定时间内提前完成项目
 - D. 如果总时差为正, 表示在预定时间内无法完成项目
 - E. 如果自由时差为负, 表示在预定时间内无法完成项目
- (4) 网络图表述正确的是()。
- A. 工作的最早完成时间可在这项工作最早开始时间的基础上加上这项工作的工期估计
 - B. 工作的最迟完成时间以项目预计完成时间为参照点在网络图中逆向计算
 - C. 工作的最迟完成时间可在前置工作的最迟开始时间基础上计算出来
 - D. 工作的最迟开始时间可在该工作最迟完成时间的基础上加上该工作的工期得出
 - E. 工作的最迟开始时间与最早开始时间的差为工作的自由时差
- (5) 根据项目所需资源的可得性进行分类, 资源主要可以分为()。
- A. 可以持续使用的资源
 - B. 不可再生资源
 - C. 消耗性资源
 - D. 双重限制性资源
 - E. 没有限制的资源
- (6) 通过工作分解结构(WBS)可达到的目的有()。
- A. 准确说明项目目标
 - B. 为项目控制奠定基础
 - C. 全面改进项目沟通
 - D. 识别关键工作和各项子工作
 - E. 了解工作包之间的逻辑关系
- (7) 下面为制订里程碑计划的基本程序, 正确的顺序为()。
- A. 利用“头脑风暴法”产生里程碑的概念草图
 - B. 从最后一个目标开始, 顺次往前, 找出逻辑依存关系
 - C. 尝试每条因果路线
 - D. 复查各个里程碑
 - E. 从达成最后一个里程碑, 即项目的终结开始反向进行

4. 简答题

- (1) 项目中各项工作的工作时间是如何确定的? 它们与资源、成本、质量的关系是什么?
- (2) 网络图在项目计划中的作用是什么? 其构成要素有哪些?
- (3) 简述双代号网络计划与单代号网络计划的区别。
- (4) 资源在项目计划中的影响是什么?
- (5) 分析资源均衡问题常用的方法是什么?

5. 计算题

1) 某项目 A 工作在正常情况下需要 3 天完成, A 工作完成后, B 工作正常需要 5 天完成, 如果赶工可压缩 1 天, 多支出 3 万元; B 工作完成后, C 工作正常需要 2 天完成, 如果赶工可压缩 1 天, 多支出 1 万元; C 工作完成后, D、E 工作可以并行, D 工作正常需要 4 天完成, E 工作正常需要 8 天完成, 如果赶工可压缩 2 天, 多支出 4 万元; 最后是 F 工作, 正常需要 6 天完成, 如果赶工可压缩 2 天, 多支出 4 万元。

- (1) 请绘制该项目的单代号网络图。
 - (2) 请标出各任务的 ES/LS, EF/LF, TF/FF 时间参数, 并写出该项目的关键路线, 并计算总工期是多少。
 - (3) 项目按计划进行到第 6 天的时候, 由于某种原因, D 工作的工作时间变为 9 天。请问通过赶工的方式, 如何保证总工期不变? 写出调整后的计划。
- 2) 某公司一新产品投产前全部准备工作如表 3-15 所示, 请绘制双代号网络图, 并计算时间参数和确定关键路线。

表 3-15

工作	工作内容	紧前工作	工时(周)
A	市场调查	/	4
B	资金筹备	/	10
C	需求分析	A	3
D	产品设计	A	6
E	研制产品	D	8
F	制订成本计划	C、E	2
G	制订生产计划	F	3
H	筹备设备	B、G	2
I	筹备原材料	B、G	8
J	安装设备	H	5
K	调集人员	G	2
L	准备开工投产	I、J、K	1

案例分析

某银行信息系统工程项目包含若干子项目。此工程项目通过公开招标方式确定承建单位。希赛信息技术有限公司(CSAI)经过激烈竞标争夺, 赢得工程合同。合同约定, 工程项目的开发周期预计为 36 周。

由于银行对于应用软件质量的要求很高, 因此 CSAI 安排资历颇深的高级工程师张工全面负责项目实施。在项目正式开工之前, 张工针对应用软件开发制订了详细的开发计划, 设置应用软件的开发生周期为 36 周。

张工安排给测试组进行测试的时间非常充足, 测试周期占整个软件开发周期的 40%, 约 14.5 周。在软件测试的过程中, 张工安排了详细的测试跟踪计划, 统计每周发现的软件系统故障数量, 以及解决的软件故障。根据每周测试的结果分析, 软件故障随时间的推移呈明显的下降趋势, 第 1 周发现约 100 个故障, 第 2 周发现约 90 个故障, 第 3 周发现约 50 个故障……第 10 周发现 2 个故障, 第 11 周发现 1 个故障, 第 12 周发现 1 个故障。于是, 张工断言软件可以在完成第 14 周的测试之后顺利交付给用户, 并进行项目验收。

问题:

- (1) 张工的软件开发计划中是否存在问题? 为什么?
- (2) 张工根据对软件测试的跟踪统计分析, 得出项目可于计划的测试期限结束后达到验收交付的要求, 你认为可行吗? 为什么?