

## 第四章 网络计划技术

### §1. 前言

在“修船管理程序”一章中，已提及网络计划技术常被用于复杂项目和改装工程。因为前面介绍的“工程进度表”（亦称“线表”或“横道图”）在遇到复杂的计划时，常在不重要的工序项目投入过量的人力资源来赶工，却忽略了会影响大局的关键工序，虽然忙得团团转，却收效甚微，致使无法完成最后目标。

因此“线表”只适用于小而简单的工作计划，它对规划和控制大而复杂系统的工作计划是有困难的。针对线表存在的上述缺点，五十年代以来，国外陆续出现了一些计划管理的新方法，由于这些方法是建立在网络模型的基础上，并且主要用于进行计划和控制，因此又称它为网络计划法。1956年在美国一个数学家和工程师组成的整体小组开始了这方面的研究工作，1957年他们得出了一个现在已很广泛应用的方法——关键路线法(critical path method)即CPM。1958年在美国海军特种计划局里也得到了一个叫做PERT的新的计划管理方法。这两个方法后来都在世界各国，在计划的管理和生产活动的组织安排方面得到极为普遍的应用。国外各造船企业也早在六十年代初就广泛采用了网络计划法这一技术。

网络计划技术是运用网络图的形式，组织生产和进行计划管理，控制进度和费用，以达到预定目标的一种科学方法。它的主要特点是：通过网络图表示计划任务的进度安排，并反映出计划任务的各项活动以及各道工序之间的相互关系；据此进行网络分析，计算网络时间，确定关键工序和关键线路，利用时差，不断改善网络计划，进行网络计划的优化。网络计划技术的优点是便于对计划项目进行统筹安排，既能掌握全局，又能抓住关键，从而可以缩短工时，合理利用资源，降低成本，提高经济效益。因而，这种方法广泛应用于企业科研、大型新产品试制、生产、重大基本建设、大型设备维修等许多方面，特别适用于一次性的生产和工程项目。

我国著名科学家钱学森、华罗庚教授在六十年代就从国外引进了网络计划法这一新技术，并把它统称为“统筹法”，从1965年开始，在全国大力推广应用统筹法。我国造船企业，当时也曾应用统筹法编制过船舶建造网络图。但没能很好地坚持下来，主要原因有两点：一是当时对网络计划随执行情况变化的动态调整没有很好解决；二是由于船舶建造的网络庞大复杂，当时还缺乏先进的计算工具电子计算机，故虽然也编制了一些网络计划图，但没能很好地贯彻执行并坚持下来，修船行业亦因工程项目增减频繁，工程范围变化大等特点，给网络时间计算带来了一定困难。近年来，国内计算机应用虽有较大发展，但在工程计划管理方面，应用还不普遍。尽管如此网络计划技术在修造船业中仍自觉或不自觉地在不同程度下应用。

随着形势的发展，电子计算机的广泛应用，网络计划技术在修造船业中将会得到进一步推广。修船主管学习并掌握这一计划管理方法是很有必要的。

### §2. 网络图的组成和网络规则

网络图又名统筹图，它是计划任务及其组成部分的综合反映。



网络图有两种基本类型：箭线式网络图(见图 4-1)和结点式网络图(见图 4-2)。箭线式网络图以结点表示工作的开始与结束，以箭线表示活动。结点式网络图以结点表示活动，箭线只是把各项活动连结起来，表明先后顺序和相互关系。

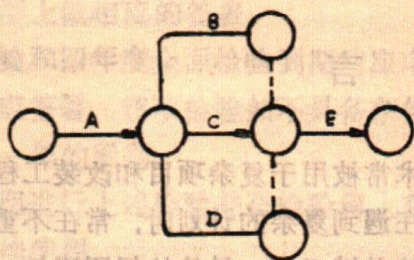


图 4-1 箭线式网络图

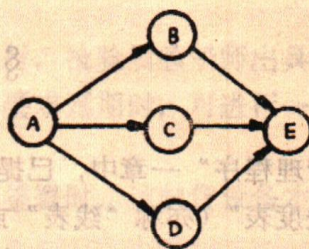


图 4-2 结点式网络图

### 一、网络图的组成

以箭线式网络图为例，箭线式网络图是由活动、事项、线路组成的。

1. 活动。一项计划任务可分解为许多具体作业或工序，其中一项作业或一道工序就是一项活动。活动用箭线“→”表示。活动的特点要消耗一定的资源和占用一定的时间。每项活动都有相应的名称，一般以相应的代号标在箭线的上方；完成这项活动所需的作业时间，一般用字母  $T$  或时间值标在箭线的下方。如：

$\frac{\text{活动名称}}{\text{时间值}} \rightarrow \text{或} \frac{A}{T_E} \rightarrow$

网络图中的虚箭线“……→”表示虚活动，即不消耗资源，也不占用时间的活动，或叫作业时间为零的活动。引用虚箭线只表示前后工序的衔接关系，指明活动的前进方向。虚活动没有活

动名称，一般用字母  $D_{u_1}, D_{u_2}, \dots$  表示。如  $\dots \xrightarrow{D_{u_1}} \dots$ 。

区别作业的先后关系，需了解先行作业、后续作业、平行作业的概念。现以图 4-3 作业关系图来说明(对作业 E 来说)。

先行作业(又称紧前工序)：当作业 B 完工之后，作业 E 才能开始，则称作业 B 是作业 E 的先行作业。

后续作业(又称紧后工序)：当作业 E(及作业 F)完工之后，作业 L 紧接着开始，则称作业 L 是作业 E 的后续作业。

平行作业：当作业 F 与作业 E 同时开始，平行地进行作业时(不一定同时完工)，则称作业 F 是作业 E 的平行作业。

2. 事项。事项指一项活动的开始或结束。一般用圆圈“○”表示。事项的特点，是它不消耗资源，也不占用时间，只表示某项活动开始或结束的一瞬间。在网络图中，圆圈是两条以上箭线的交结点，故又称结点。

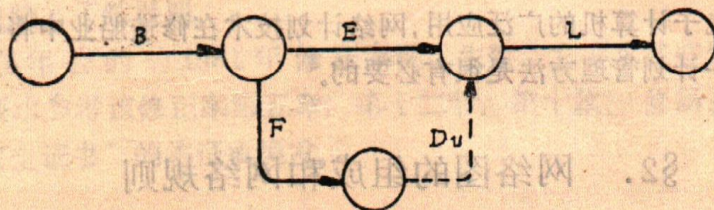


图 4-3 作业关系图



在网络图中，左方第一个结点称作网络始点事项，它只表示这项计划任务的开始；右方最后一个结点称作网络终点事项，它只表示这项计划任务的结束或完工；介于网络始点事项与网络终点事项之间的结点，称作网络的中间事项。中间事项的意义是双重的，既表示前一项活动的结束，又表示后一项活动的开始。

3. 线路。线路是指从网络始点事项开始，顺着箭线方向，到网络终点事项为止，中间经过一系列首尾相接的结点和箭线所组成的通道。在一个网络图中可以有許多条线路。每一条路上各项活动的作业时间之和，就是这条线路的作业时间。作业时间最长的一条线路称作关键线路。

## 二、网络规则

绘制网络图，应当遵守以下规则：

1. 在网络图中，不允许出现循环线路。即箭线不能从某一个结点出发，又回到同一个结点上。如图 4-4。

2. 在网络图中，每一条箭线的头尾都必须有结点。不能从一条箭线中间引出另一条箭线来。如图 4-5。如果图中的作业 A 可分解为  $a_1$ 、 $a_2$  两道工序时，则可作图 4-6。

为使网络图的图面整齐、美观，有时使用共用箭线也是允许的。如图 4-7。图中 A、B 两页活动应视为共用一段箭线。

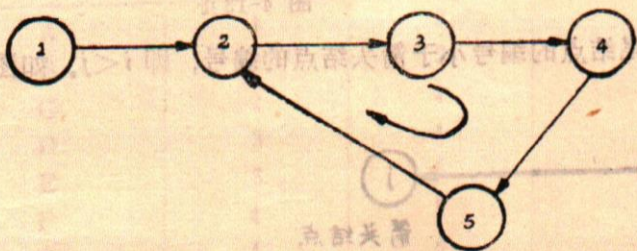


图 4-4

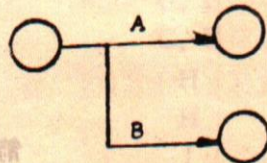


图 4-5 误

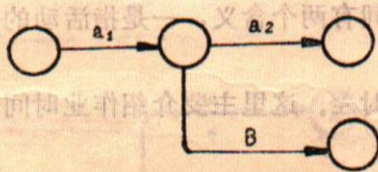


图 4-6 正

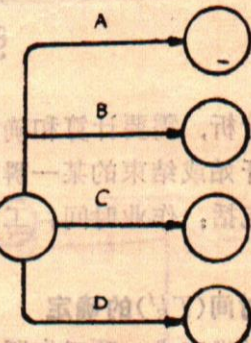


图 4-7

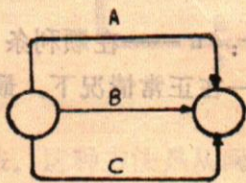


图 4-8 误

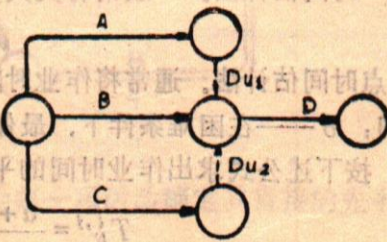


图 4-9 正



3. 相邻两个结点之间, 只允许有一条箭线直接相连。图 4—8 的绘法是不对的。为表示活动的相互关系, 必要时可引入虚箭线, 如图 4—9。

4. 在网络图中, 不允许出现没有先行作业的中间事项(图 4—10)和没有后续作业的中间事项(图 4—12)。如果实际上出现时, 需用虚箭线, 把没有先行作业的中间事项同始点事项连接起来(图 4—11), 把没有后续作业的中间事项, 同终点事项连接起来(图 4—13)。

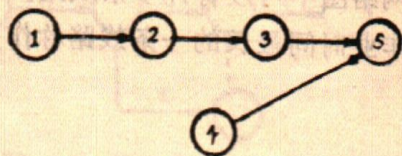


图 4-10 误

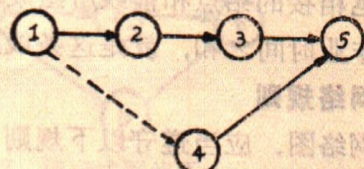


图 4-11 正

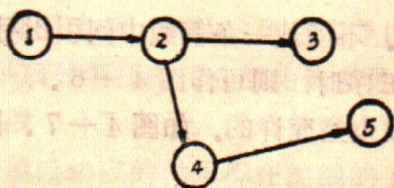


图 4-12 误

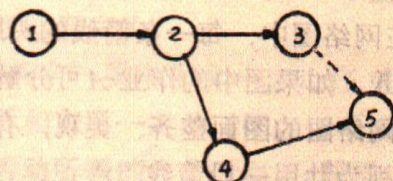


图 4-13 正

5. 结点编号不能重复使用, 并使箭尾结点的编号小于箭头结点的编号, 即  $i < j$ 。如图 4-14。

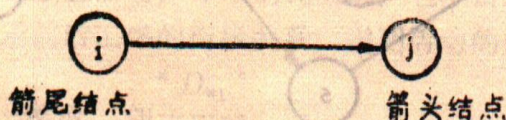


图 4-14

### §3. 网络时间的计算

进行网络分析, 需要计算和确定网络时间。网络时间有两个含义: 一是指活动的延续时间, 一是指活动的开始或结束的某一瞬间时刻。

网络时间包括: 作业时间; 工序时间; 结点时间; 时差。这里主要介绍作业时间和工序时间的计算。

#### 一、作业时间( $T_E^{i,j}$ )的确定

作业时间是指完成一项工作所需要的时间。确定作业时间有两种方法。

1. 单一时间估计法。一般请有关人员一起, 采用经验估工法, 给每项作业估计一个作业时间。

2. 三点时间估计法。通常将作业时间按三种情况进行估计:  $a$ ——在顺利条件下, 最乐观的完成时间;  $b$ ——在困难条件下, 最保守的完成时间;  $m$ ——在正常情况下, 最可能的完成时间。然后, 按下述公式求出作业时间的平均值:

$$T_E^{i,j} = \frac{a + 4m + b}{6}$$

例: 某项作业, 其最乐观的完成时间为 2 天, 最保守的完成时间为 10 天, 最可能的完成时间



为3天, 则它的作业时间的平均值为:

$$T_E = \frac{2+4 \times 3+10}{6} = 4(\text{天})$$

确定了各项作业时间, 如果又知道各项作业的先后关系, 就可以据此画出网络图, 并计算其余的网络时间。

## 二、网络图的绘制方法

网络图的绘制方法有顺推法和逆推法。

1. 顺推法。这种方法是从网络的始点事项开始, 为每一项活动确定其直接的后续作业, 直到网络的终点事项为止。

例: 有某一项计划任务, 其有关资料如表4-1。

表 4-1

作业名称 (代号)	结 点 编 号		作业时间 $T_E(\text{天})$	后续作业
	$i$	$j$		
A	1	2	4	C
B	1	3	5	D, E
C	2	4	5	G, F
D	3	4	8	G, F
E	3	5	5	H
F	4	5	7	H
G	4	6	5	I
H	5	7	4	—
I	6	7	5	—

用顺推法, 画出网络图如下, 见图4-15。

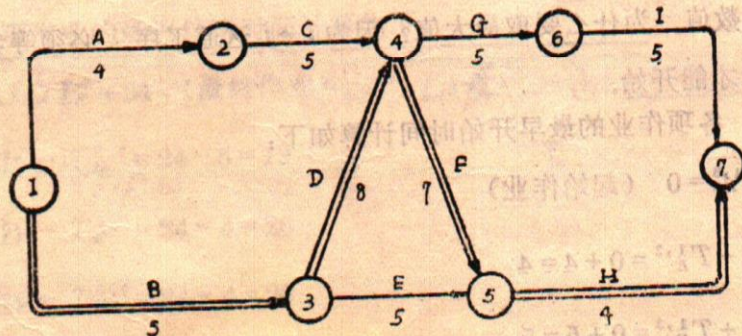


图 4-15 网络图

2. 逆推法。这种方法是从网络的终点事项开始, 为每一项活动确定其直接的先行作业, 直到网络的始点事项为止。

例: 上述计划任务, 如果给出如下资料(见表4-2),



表 4-2

作业名称 (代号)	结 点 编 号 $i$	$j$	作业时间 $T_E(\text{天})$	先行作业
A	1	2	4	—
B	1	3	5	—
C	2	4	5	A
D	3	4	8	B
E	3	5	5	B
F	4	5	7	C、D
G	4	6	5	C、D
H	5	7	4	E、F
I	6	7	5	G

用逆推法，画出网络图，仍如图 4-15。

### 三、工序时间的计算

1. 工序最早开始时间 ( $T_{ES}^{i,j}$ )，是指某工序最早可以开工的时间。计算时要从起始作业(从网络始点事项开始的作业叫起始作业)开始，顺箭线方向，从左到右，依次计算，直至最终作业(以网络终点事项为结束的作业叫最终作业)为止。

起始作业的最早开始时间一般令它为零。工序最早开始时间按下述公式计算：

$$T_{ES}^{i,j} = \max_{i < j} \{ T_{ES}^{k,i} + T_E^{k,i} \}$$

式中： $T_{ES}^{i,j}$ ——表示从  $i \rightarrow j$  这道工序的最早开始时间

$T_{ES}^{k,i}$ ——表示  $i \rightarrow j$  的先行作业的最早开始时间

$T_E^{k,i}$ ——表示  $i \rightarrow j$  的先行作业的作业时间

$\max$ ——表示取括号中各和数的最大值

如果  $i \rightarrow j$  的先行作业不止一项， $T_{ES}^{k,i}$  的数值不止一个，加上相应的  $T_E^{k,i}$ ，应从中选取一个最大值，作为  $T_{ES}^{i,j}$  的数值。为什么要取最大值？因为  $i \rightarrow j$  这道工序，必须等其延续时间最长的先行作业完工之后，才能开始。

以图 4-15 为例，各项作业的最早开始时间计算如下：

$$T_{ES}^{1,2} = 0 \quad T_{ES}^{1,3} = 0 \quad (\text{起始作业})$$

$$T_{ES}^{2,4} = T_{ES}^{1,2} + T_E^{1,2} = 0 + 4 = 4$$

$$T_{ES}^{3,4} = T_{ES}^{1,3} + T_E^{1,3} = 0 + 5 = 5$$

$$T_{ES}^{3,5} = T_{ES}^{1,3} + T_E^{1,3} = 0 + 5 = 5$$

$$T_{ES}^{4,6} = \max_{i < j} \{ (T_{ES}^{2,4} + T_E^{2,4}), (T_{ES}^{3,4} + T_E^{3,4}) \} = \max \{ (4+5), (5+8) \} = 13$$



$$T_{ES}^{4,5} = \max\{(T_{ES}^{2,4} + T_E^{2,4}); (T_{ES}^{3,4} + T_E^{3,4})\} = 13$$

$$T_{ES}^{5,7} = \max\{(T_{ES}^{4,5} + T_E^{4,5}); (T_{ES}^{6,5} + T_E^{6,5})\} = \max\{(13+7); (5+5)\} = 20$$

$$T_{ES}^{6,7} = T_{ES}^{4,6} + T_E^{4,6} = 13 + 5 = 18$$

2. 工序最迟结束时间 ( $T_{LF}^i$ ), 是指某工序最迟必须完工的时间。计算时要从最终作业开始, 逆箭线方向, 从右到左, 依次计算, 直至起始作业为止。

最终作业的最迟结束时间依下式确定

$$T_{LF}^{\text{最终}} = \max\{(T_{ES}^{\text{最终}} + T_E^{\text{最终}})\}$$

式中:  $T_{LF}^{\text{最终}}$ ——表示最终作业的最迟结束时间;

$T_{ES}^{\text{最终}}$ ——表示最终作业的最早开始时间;

$T_E^{\text{最终}}$ ——表示最终作业的作业时间。

在上例中,

$$\begin{aligned} T_{LF}^{\text{最终}} &= \max\{(T_{ES}^{6,7} + T_E^{6,7}); (T_{ES}^{7,7} + T_E^{7,7})\} \\ &= \max\{(20+4); (18+5)\} = 24 \end{aligned}$$

工序最迟结束时间可按下列公式计算:

$$T_{LF}^{i,j} = \min_{i \rightarrow j}\{(T_{LF}^{\text{后续}} - T_E^{\text{后续}})\}$$

式中:  $T_{LF}^{i,j}$ ——表示从  $i \rightarrow j$  这道工序的最迟结束时间;

$T_{LF}^{\text{后续}}$ ——表示  $i \rightarrow j$  的后续作业的最迟结束时间;

$T_E^{\text{后续}}$ ——表示  $i \rightarrow j$  的后续作业的作业时间;

min——表示取括号中各差数的最小值。

如果  $i \rightarrow j$  的后续作业不止一项,  $T_{LF}^{\text{后续}}$  的数值就不止一个, 加上相应工序的  $T_E^{\text{后续}}$ , 应从中选取最小值, 作为  $T_{LF}^{i,j}$  的数值。为什么要选最小值? 因为只有取最小值, 才能保证其应先开始的后续作业按时开工。

在上例中, 各项作业的最迟结束时间计算如下:

$$T_{LF}^{6,7} = 24 \quad T_{LF}^{7,7} = 24 \quad (\text{最终作业})$$

$$T_{LF}^{4,6} = T_{LF}^{6,7} - T_E^{6,7} = 24 - 5 = 19$$

$$T_{LF}^{4,5} = T_{LF}^{5,7} - T_E^{5,7} = 24 - 4 = 20$$

$$T_{LF}^{3,5} = T_{LF}^{5,7} - T_E^{5,7} = 24 - 4 = 20$$

$$T_{LF}^{2,4} = \min\{(T_{LF}^{4,6} - T_E^{4,6}); (T_{LF}^{4,5} - T_E^{4,5})\} = \min\{(19-5); (20-7)\} = 13$$

$$T_{LF}^{3,4} = \min\{(T_{LF}^{4,6} - T_E^{4,6}); (T_{LF}^{4,5} - T_E^{4,5})\} = 13$$

$$T_{LF}^{1,2} = T_{LF}^{2,4} - T_E^{2,4} = 13 - 5 = 8$$



$$T_{LF}^{1,3} = \min\{(T_{LF}^{3,4} - T_E^{3,4}); (T_{LF}^{3,5} - T_E^{3,5})\} = \min\{(13 - 8); (20 - 5)\} = 5$$

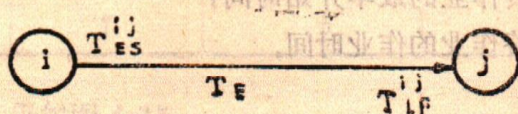
如果到达结点  $j$  的作业不止一项，只需计算出其中一项作业的  $T_{LF}^{ij}$  就可以了，其他的可不再计算，如  $T_{LF}^{2,4} = T_{LF}^{3,4}$ ，这样可以简化计算。

#### 四、网络时间的计算方式

在网络图不太复杂的条件下，采用手算方法计算网络时间还是可行的。这里具体介绍三种方法：

1. 图上计算法。根据工序时间计算的基本原理，在网络图上进行计算，并把计算结果记在网络图上。

图例：



以图 4-15 为例，用图上计算法算出的结果如下，见图 4-16。

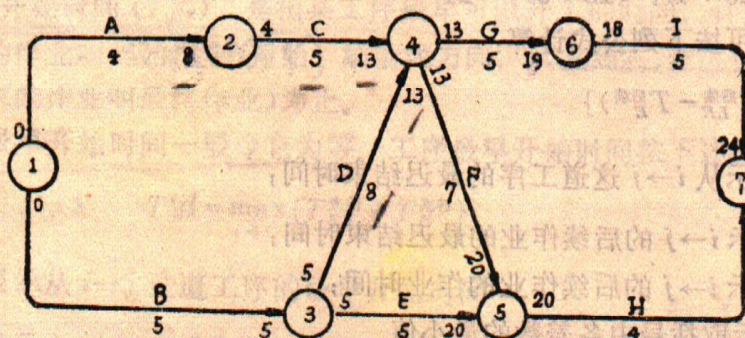


图 4-16 图上计算法

2. 表上计算法。根据工序时间计算的基本原理，事先制定一张表格，把各项活动的有关资料，如结点编号、作业时间等填入表内，然后在表上计算工序时间。见表 4-3。

表 4-3

作业名称(代号)	结 点 编 号		作业时间 $T_E$	$T_{ES}^{ij}$	$T_{EF}^{ij}$	时 差	关 键 线 路
	$i$	$j$					
A	1	2	4	0	8	4	✓
B	1	3	5	0	5	0	
C	2	4	5	4	13	4	
D	3	4	8	5	13	0	✓
E	3	5	5	5	20	10	
F	4	5	7	13	20	0	✓
G	4	6	5	13	19	1	
H	5	7	4	20	24	1	✓
I	6	7	5	19	24	0	



3. 矩阵算法。先根据网络图的结点数目，作一个  $N \times N$  的矩阵，填上各道的作业时间；再根据工序时间的计算公式和原理，在矩阵的行和列上算出每道工序的最早开始时间  $T_{ES}^i$  和最迟结束时间  $T_{LF}^j$ ，填在如下表格中，见表 4-4。

$T_{ES}^i$  的计算：

(1)  $i$  栏首行的  $T_{ES}^i$  为 0，即  $i=1$  的  $T_{ES}^i$  为 0。

$T_{ES}^i$	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
0	1		4	5				
4	2				5			
5	3				8	5		
13	4					7	5	
20	5							4
18	6							5
24	7							
$T_{LF}^j$		0	8	5	13	20	19	24

(2) 从首行起，将  $j$  列的工序时间值，加与之对应的  $T_{ES}^i$  值，所得和即为与  $j$  同号的  $i$  行的  $T_{ES}^i$  值。如  $4+0=4$ ； $5+0=5$ 。

如果  $j$  列的工序时间值不止一个，取和值最大者。如  $j=4$  这一列有两个数(5; 8)，加相应的  $T_{ES}^i$  得： $5+4=9$ ； $8+5=13$ 。则与  $j=4$  列同号的  $i$  行的  $T_{ES}^i$  应为 13。依次计算。

(3)  $i=7$  这一行的  $T_{ES}^i$  为 24。

$T_{LF}^j$  的计算：

(1)  $j$  栏末列的  $T_{LF}^j$ ，即为  $i$  栏末行的  $T_{ES}^i$ 。因  $i=7$  没有后续工序， $T_{ES}^i = 24$  本来没有意义，即  $j=7$  列的  $T_{LF}^j = 24$ 。

(2) 以  $j$  栏末列的  $T_{LF}^j$  减同列的工序时间值，将差数填入相应的  $j$  列的  $T_{LF}^j$  栏内，如  $24-5=19$ ，5 所在的行  $i=6$ ，即将 19 填入  $j=6$  列的  $T_{LF}^j$  栏内；又  $24-4=20$ ，4 所在的行  $i=5$ ，则将 20 填入  $j=5$  列的  $T_{LF}^j$  栏内。



如果  $i$  行的工序时间值不止一个, 取所得差数最小者。如  $i=4$  行有两个数(7; 5)被相应的  $T_{LF}^j$  值减后, 得:  $19-5=14$ ;  $20-7=13$ 。应取 13 填入与  $i=4$  同号的  $j$  列的  $T_{LF}^j$  栏内。依次计算。

(3)  $j$  栏首列的  $T_{LF}^j$  应为 0。

上述三种方法, 图上作业法比较简单, 适用于活动项目较少的网络图。表上作业法比较方便, 不易遗漏, 实际工作中较多采用。矩阵算法掌握后计算简单, 不易出错, 常用来核算前两种方法所得的结果。所以, 三种方法可结合应用。

## §4. 时差和关键线路

计算一项计划任务各项活动的最早开始与最迟结束时间, 既可以明确该项任务对各项活动的时间要求; 也可以据此来分析各项活动的时间配合上是否合理, 有无潜力可挖。有些活动在时间配合上紧密相连, 环环相扣, 没有机动余地; 有些活动在时间上比较灵活, 其开始与结束时间提前或后, 对后续活动没有影响, 有一定的机动时间。为了判明这些不同情况, 就需要计算时间差。计算和利用时差, 是网络计划技术的一个重要问题。它为进度安排的优化提供了可能性, 又是确定关键线路的科学依据。

### 一、时差的计算

对于某道工序来说, 时差就是该工序的最迟结束时间与最早开始时间之差, 减去该工序的作业时间所得之差。时差表明某工序可以利用机动时间。时差越大, 机动时间就越多, 潜力也就越大; 时差越小, 机动余地也就越小。所以, 时差又叫机动时间、或宽裕时间。

工序时差的计算公式如下:

$$S^{i,j} = T_{LF}^{i,j} - T_{ES}^{i,j} - T_E^{i,j}$$

式中:  $S^{i,j}$ ——表示  $i \rightarrow j$  这道工序的时差;

$T_{LF}^{i,j}$ ——表示  $i \rightarrow j$  工序的最迟结束时间;

$T_{ES}^{i,j}$ ——表示  $i \rightarrow j$  工序的最早开始时间;

$T_E^{i,j}$ ——表示  $i \rightarrow j$  工序的作业时间。

以图 4-15 为例, 可以算出工序时差如下, 并将计算结果记入表 4-3 中。

$$S^{1,2} = 8 - 0 - 4 = 4;$$

$$S^{1,3} = 5 - 0 - 5 = 0;$$

$$S^{2,4} = 13 - 4 - 5 = 4;$$

$$S^{3,4} = 13 - 5 - 8 = 0;$$

$$S^{3,5} = 20 - 5 - 5 = 10;$$

$$S^{4,5} = 20 - 13 - 7 = 0;$$

$$S^{4,6} = 19 - 13 - 5 = 1;$$

$$S^{5,7} = 24 - 18 - 5 = 1;$$



$$S^{5.7} = 24 - 20 - 4 = 0$$

通常，时差的计算结果，可能出现三种情况：

1.  $S^{ij} > 0$ ，表明这道工序有机动时间；
2.  $S^{ij} = 0$ ，表明这道工序是关键工序，没有机动时间；
3.  $S^{ij} < 0$ ，表明这道工序能力不能满足计划工期的要求，必须采取措施，以求得  $S^{ij} \geq 0$ 。

## 二、关键线路。

在网络图中，由以时差为零的关键工序连结起来的线路，就是关键线路。例如在表 4-3 中打“√”的工序为关键工序，因此该网络图的关键线路为： $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{5} \rightarrow \textcircled{7}$ 。在图 4-15 中，将关键线路用双线(或色线、粗线)标出。用这种方法确定关键线路，叫时差法。

确定关键线路的另一种方法是破圈法。如果从网络图的某个结点到另一个结点之间，存在两条不同的线路，便形成了一个封闭的环，称之为圈。如果形成圈的两条线路的作业时间不等，可将其中作业时间较短的一条线路删除(或作一记号以示剪除)，保留下来的是作业时间较长的一条线路。这就叫破圈。破圈时要从网络始点事项开始，顺着箭头方向找出每一个圈，逐个破，直至终点事项。最后留下来的就是关键线路。

例如图 15-15，从结点①至结点④为第一个圈，删去作业时间较短的①→②和②→④；从结点③至结点⑤为第二个圈，删去③→⑤；从结点④至⑦为第三个圈，删去④→⑥和⑥→⑦。最后保留下来的①→③→④→⑤→⑦，就是关键线路。

掌握和控制关键线路是网络计划技术的精华。关键线路决定一项计划的工期。在关键线路上各工序的作业时间如果提前或延迟一天，整个工期就提前或延迟一天。因此，要缩短工期，提高经济效益，就必须从缩短关键线路的延续时间入手。掌握住了关键线路，就抓住了重点，抓住了主要矛盾。在组织和指挥生产时，可以考虑利用时差，抽调非关键线路上的人力、物力等资源，支援关键线路上的工作，保证关键线路不误工期或提前完工。

## §5. 网络计划的优化

编制网络计划，不仅要考虑缩短工期的要求，而且要考虑资源的合理利用和降低成本的要求。时间、资源和成本三者是互相联系的矛盾的统体。我们应当追求编制出一个时间短、资源耗费少、成本低的计划方案。网络计划优化的基本方法，就是利用时差不断改善网络计划方案，使之获得最佳的工期、最低的成本和对资源的最合理的利用。逐次优化，时差便逐次减少，直至大部或全部消灭，获得最佳方案。

网络计划优化主要有两个内容。

### 一、时间——资源优化

资源包括人力、物力资源等。任何计划任务的每项活动都需要使用一定的资源，为了充分利用资源，使资源的利用不要时多时少，就应力求平衡。

下面举例说明时间——劳动力平衡的简单方法。

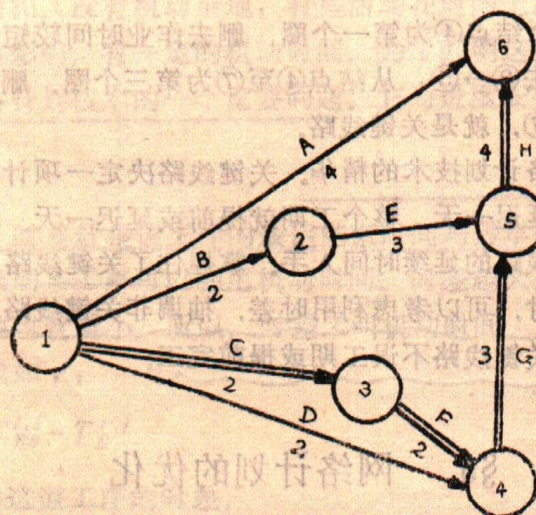
已知某项任务的有关资料如表 4-5，试进行时间——劳动力的平衡。



表 4-5

作业名称	先行作业	作业时间(天)	需要人力(人)
A	—	4	9
B	—	2	3
C	—	2	6
D	—	2	4
E	B	3	8
F	C	2	7
G	F、D	3	2
H	E、G	4	1

平衡步骤: 1. 画出网络图, 计算网络时间, 画出关键线路, 如图 4-17。



2. 画出横道图, 表示出每项活动的最早开始时间( $T_{ES}^j$ ), 最迟结束时间( $T_{EF}^j$ )及时差。见图 4-18。

3. 把每项作业所需劳动力沿着最早开始( $T_{ES}^j$ )到最早结束时间之间的线段分配, 表中以粗实线表示。(注: 最早结束时间 =  $T_{ES}^j + T_E^j$ )

4. 绘制劳动力分布图, 见图 4-19。

5. 保持关键线路上的劳动力, 利用时差, 对非关键线路上的劳动力进行调整, 直至大体平衡(见图 4-18 波浪线)。平衡后的劳动力分布用……画在劳动力分布图上(见图 4-19), 以便与调整前进行对比。

## 二、时间——成本优化

时间——成本优化, 就是力求以最短的时间和最少的费用来完成计划任务, 也就是要从时间长、费用少和时间短、费用多的两个极端出发, 寻找期限较短而费用最少的合理方案。



图 1-18 工序作业时间横道图

作业	作业时间 (天)	$T_{ES}^{ij}$	$T_{LF}^{ij}$	时差	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	4	0	11	7	9							~	~	~	~
B	2	0	4	2	3		~	~							
C	2	0	2	0	6										
D	2	0	4	2	4										
E	3	2	7	2			8		~	~	~				
F	2	2	4	0			7		~	~					
G	3	4	7	0					2		~				
H	4	7	11	0								1			
平衡前劳动力分布 (人)					22	22	24	24	10	2	2	1	1	1	1
平衡后劳动力分布 (人)					10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

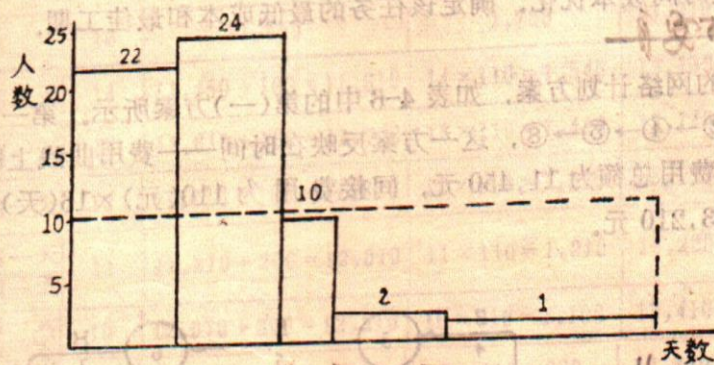


图 4-19

产品(或工程)的成本是由直接费用和间接费用两部分组成的。这两种费用与工期的关系,一般说来,缩短工期,会引起直接费用的增加和间接费用的减少;延长工期,会引起直接费用的减少和间接费用的增加。时间——成本化。就是要使产品总成本(直接费用和间接费用的总和)最低。与最低总成本相对应的工期为最佳工期。

直接费用是指可以并宜于直接计入成本的费用,如直接生产工人工资和附加费、材料费、工具费等;间接费用是指不能或不宜直接计入成本而是按一定标准分配于成本的费用,如企业管理费等。优化主要是分析直接费用与工期的关系。直接费用与工期的关系最简单的表示方法如图 4-20 所示,用连接折线的 A、B 两点的直线来表示。A 点的直接费用  $C_a$  最小,称为正常费用;与此费用相对应的时间  $T_a$ ,称为正常时间。B 点是完成任务的最短时间  $T_b$ ,称为极限时间;与此时间对应的费用称为极限费用  $C_b$ ,或称赶工费用。由图 4-20 可以求出费用变动率  $K$ 。

$$K = \frac{C_b - C_a}{T_b - T_a}$$

费用变动率的意义,就是缩短单位时间需要增加的直接费用。由于 AB 之间近似地取成直线,



因此 $K$ 值是固定的。不同的作业，其 $K$ 值是不同的。 $K$ 值愈大，意味着工作延长一天需要增加的直接费用也愈大。所以，缩短工期，首先要缩短关键线路上 $K$ 值最小的工序的作业时间。

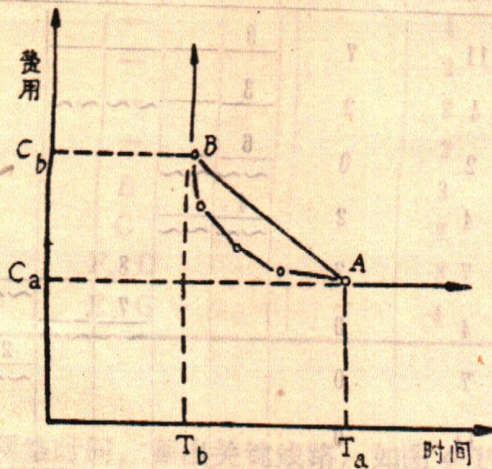


图 4-20

下面举例说明时间——成本优化的步骤和方法。

某计划任务的网络图及各工序的有关资料分别如图 4-21 和表 4-6 所示。该项任务的间接费用为每天 110 元。现通过时间成本优化，确定该任务的最低成本和最佳工期。

计算步骤如下：

1. 先计算正常工期的网络计划方案，如表 4-6 中的第(一)方案所示。第一方案的总工期为 16 天，关键线路为①→②→④→⑤→⑧，这一方案反映在时间——费用曲线上即为 A 点。根据表 4-6 可算出该方案的直接费用总额为 11,450 元，间接费用为  $110(\text{元}) \times 16(\text{天}) = 1,760(\text{元})$ ，总费用为  $11,450 + 1,760 = 13,210$  元。

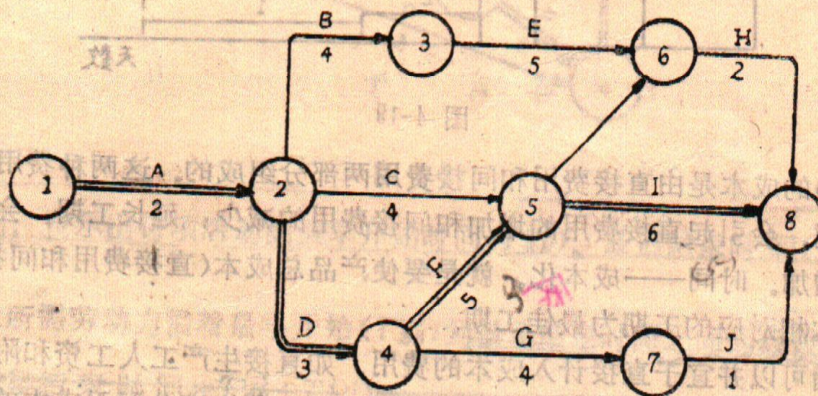


图 4-21

2. 以正常工期计划方案为基础，逐次压缩关键工序的延续时间(以不超过极限工期为限)；每次压缩时均应选择费用变动率最小者，以使工期缩短引起的直接费用增加额为最小。在本例中，以正常工期计划方案为方案 1 压缩工期时从关键工序中选择变动费用率最小的 D 工序压缩二天，得到方案 2。相应的网络图如图 4-22 所示。依此法继续下去，直到关键线路上各工序均达到极限时间为止。于是得到七个不同方案，如表 4-7 所示。



表 4-6 (不以)同相差基面有工费关非斗基大至解基式为从再

工 序	结点编号		正常时间		极限时间		相 差		费用变动率 (元/天)
	i	j	时间 (天)	直接费用(元)	时间 (天)	直接费用(元)	时间 (天)	直接费用(元)	
A	1	2	2	2,000	1	2,100	1	100	100
B	2	3	4	1,400	3	1,500	1	100	100
C	2	5	4	800	3	950	1	150	150
D	2	4	3	700	1	860	2	160	80
E	3	6	5	1,200	4	1,400	1	200	200
F	4	5	5	2,000	3	2,200	2	200	100
G	4	7	4	800	2	900	2	100	50
H	6	8	2	700	1	850	1	150	150
I	5	8	6	900	8	1,340	3	450	150
J	7	8	1	950	0.5	1,150	0.5	200	400

表 4-7

计划方案	较前方案的 变动点	总工期 (天)	直接费用(元)	间接费用(元)	总费用 (元)	关键线路
1		16	11,450	1,760	13,210	①→②→④→⑤→⑧
2	工序D压缩二天	14	11,450 + 160 = 11,610	14 × 110 = 1,540	13,150	同 上
3	工序A压缩一天	13	11,610 + 100 = 11,710	13 × 110 = 1,430	13,140	同 上
4	工序F压缩一天	12	11,710 + 100 = 11,810	12 × 110 = 1,320	13,130	①→②→④→⑤→⑧ ①→②→③→⑥→⑧
5	工序B压缩一天 工序F压缩一天	11	11,810 + 200 = 12,010	11 × 110 = 1,210	13,220	①→②→④→⑤→⑧ ①→②→③→⑥→⑧ ①→②→⑤→⑧
6	工序H压缩一天 工序I压缩一天	10	12,010 + 300 = 12,310	10 × 110 = 1,100	13,410	同 上
7	工序E和I各压 缩一天	9	12,310 + 350 = 12,660	9 × 110 = 990	13,650	同 上

在表 4—6 的各个方案中，方案 4 的总费用最低，相应的工期为最佳工期。由此得出该计划任务的最佳工期为 12 天，最低成本为 13,130 元。其网络图如图 4-23 所示。

以上是以正常工期方案为基础逐次压缩，进行方案优化。此外，也可以先制定极限工期方案，

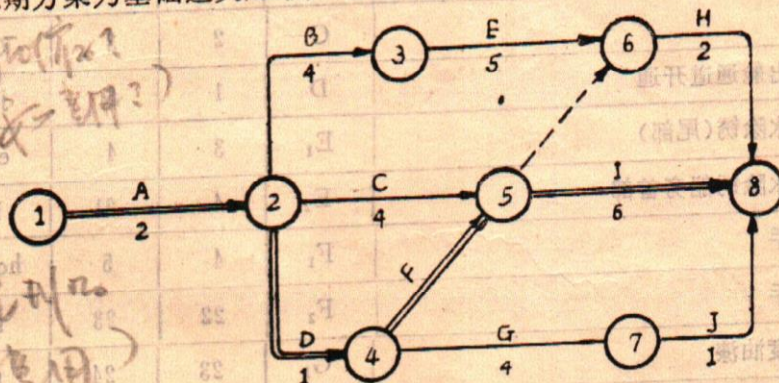


图 4-22



再从此为基础逐次延长非关键工序的延续时间，最后延长关键工序的延续时间(以不超过正常期限为限)，并使直接费用的降低额为最大(为此应选择较大的K值)。这两种方法的结果是一样的。

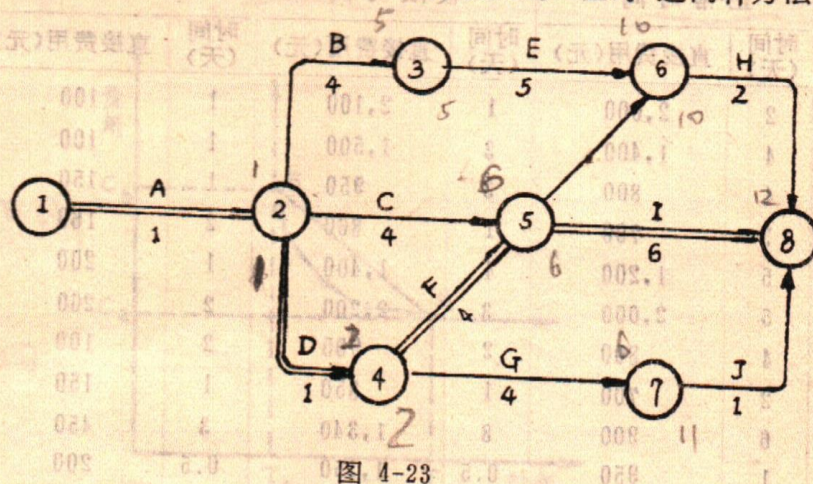


图 4-23

## §6. 网络计划技术在修船中的应用实例

一、表 4-11 和图 4-41 是某船一次坞修工程的“工序明细表和分析表”及“网络图”。在此去掉了繁琐的网络计划，作业时间凭借平时积累的经验进行估算而得，当某些工序的作业时间稍变更时，多采用作业人员延时作业或增加作业人员来进行调整，当工程范围有较大变动时，才用网络图进行修正。为直观起见，亦可采用网络图上附设时间坐标，将线表和网络图结合起来。图 4-42 就是上述坞修工程的附设时间坐标的网络图。对照表 4-11 工程工序明细表和分析表，就能较清楚地按计划进行作业和检查工程完成进度。对工程较大的船舶修理，可以分类(如分轮机、舾装、电器、坞修等)编制网络图，各分类之间关连工程，可用虚线沟通。

表 4-11 某船坞修工程的“工序明细表和分析表”

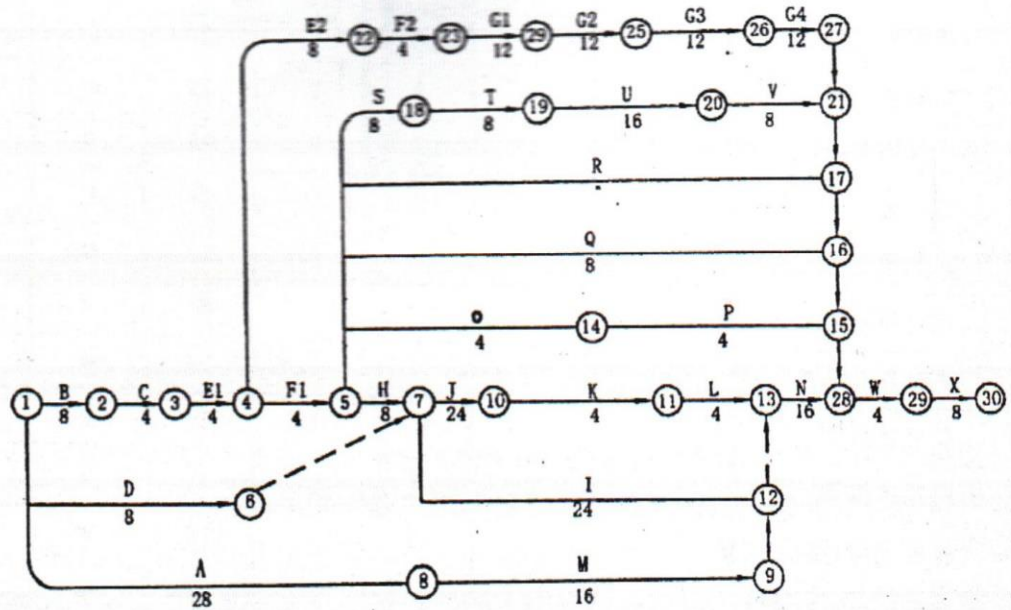
序号	工 序 名 称	代号	结点编号		后续紧 后工序	作业时 间小时	关键路
			i	j			
1	尾轴筒铁梨木预制	A	1	8	III	28	
2	尾轴联轴节拆开、测量、中间轴移位	B	1	2	C	8	1-2
3	进坞	C	2	3	C	4	2-3
4	尾轴出舱通道开通	D	1	6	ji	8	
5	高压水除锈(尾部)	E <sub>1</sub>	3	4	ef	4	3-4
6	高压水除锈船旁首部	E <sub>2</sub>	4	21	f	8	
7	搭脚手	F <sub>1</sub>	4	5	hoqr	4	4-5
8	搭脚手	F <sub>2</sub>	22	23	g	4	
9	第一度油漆	G <sub>1</sub>	23	24	g	12	
10	第二度油漆	G <sub>2</sub>	24	25	g	12	



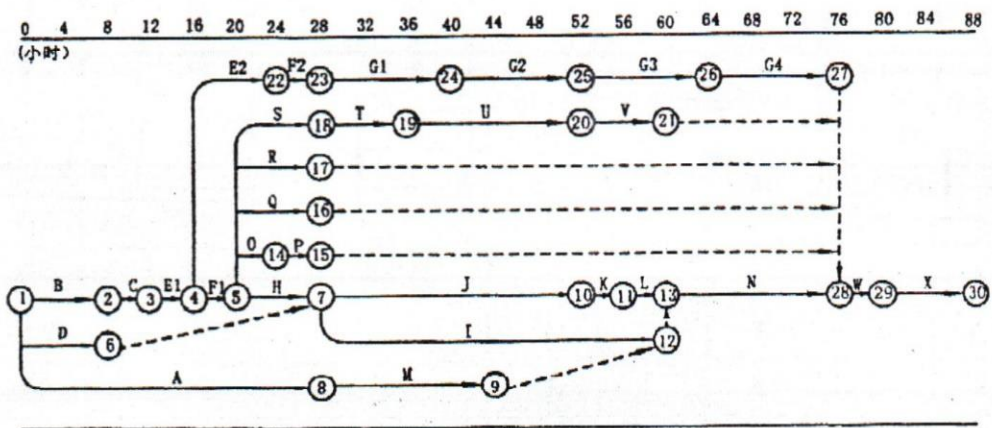
续 表

序号	工 序 名 称	代号	结 点 编 号		i 续紧 后工序	作业时 间 小时	关键 路线
			i	j			
11	第三度油漆	G <sub>3</sub>	25	26	g	12	
12	第四度油漆	G <sub>4</sub>	26	27	w	12	
13	拆车叶、抽尾轴	H	5	7	Ji	8	5-7
14	尾轴进厂光车、探伤	I	7	12	m	24	
15	车叶切随边	J	7	10	R	24	7-10
16	车叶做静平衡	K	10	11	L	4	10-11
17	车叶抛光	L	11	13	m	4	11-13
18	尾轴筒镶铁梨木及搪削	M	8	9	n	16	
19	尾轴车叶总装	N	13	28	w	16	13-28
20	船底塞拆卸	O	5	14	p	4	
21	船底塞装复	P	14	15	w	4	
22	舵杆及舵销间隙测算	Q	5	16	w	8	
23	防蚀锌板换新	R	5	17	w	8	
24	海底伐解体	S	5	18	t	8	
25	海底伐盘光车	T	18	19	u	8	
26	海底伐研磨	U	19	20	V	16	
27	海底伐合拢	V	20	21	w	8	
28	出坞	W	28	29	x	4	28-29
29	中间轴复位、测算	X	29	30	终点	8	29-30





图表 2-40 某船进坞工程网络图



图表 2-41 某船进坞工程网络图 (时间坐标)



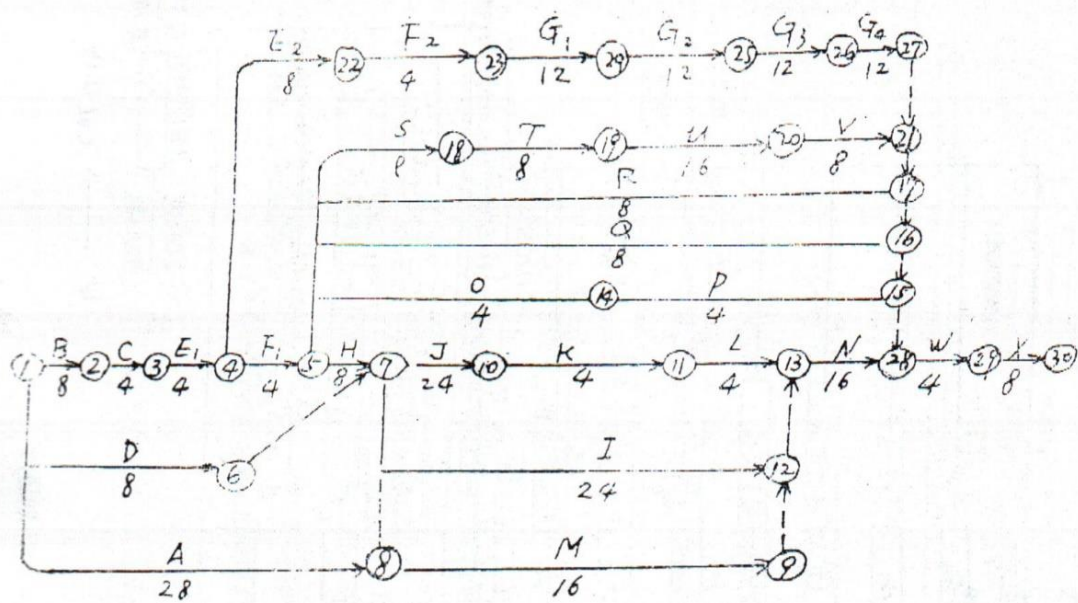


图 4-41 某船进坞工程网络图

二、图 4-43 是为 ×× 轮修理编制的一份“网络计划进度表”。此种编制方法比较直观，而且为保证占坞期(关键路线)对各项工程的每个工序都定出了最早开工期、最迟开工期、最早完工期及最迟完工期。

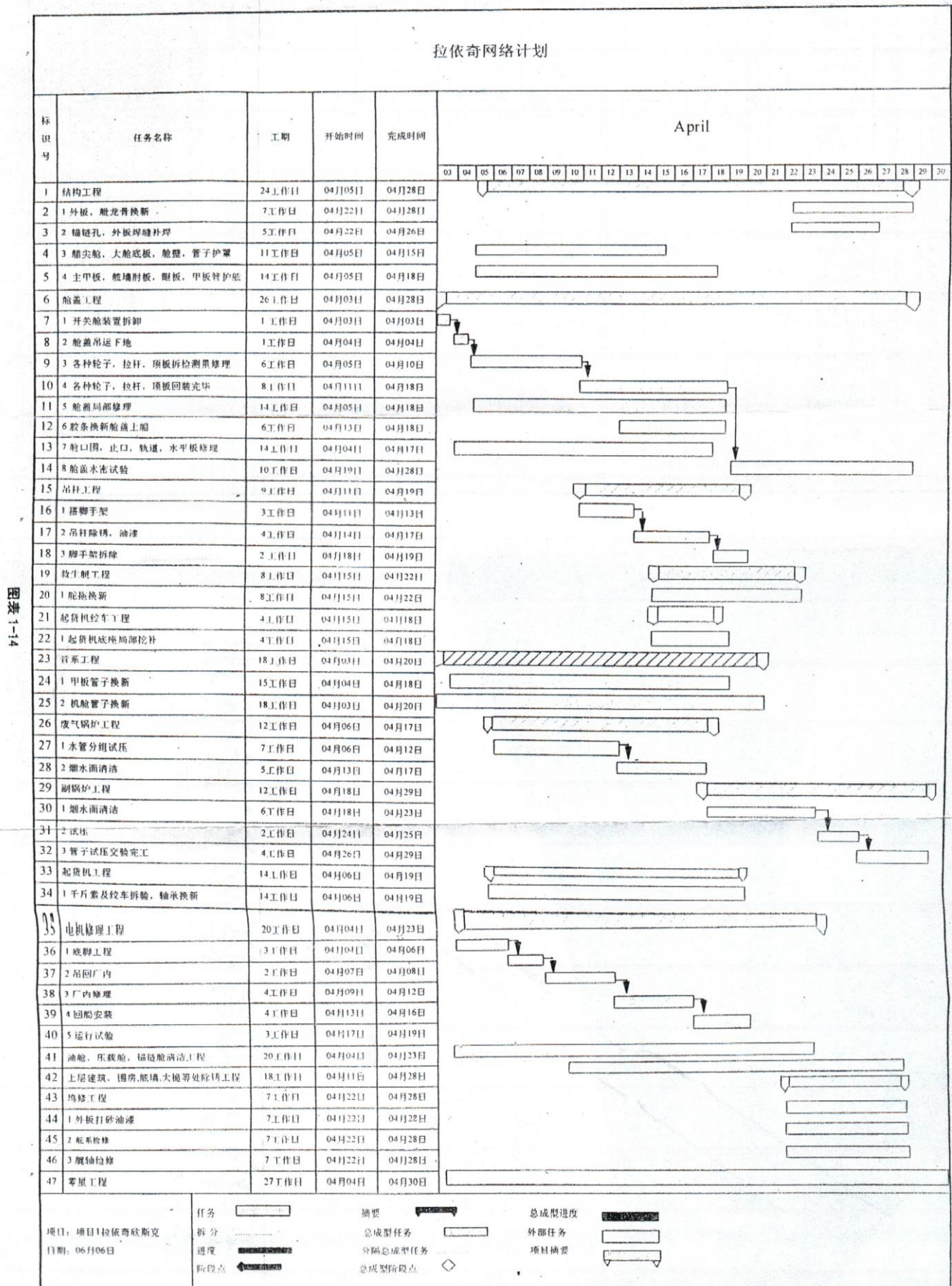
三、图 4-44 系某船机舱修理工程的计划进度表，它采用了线表与网络相结合的编制方法。







图表1-14使用PROSPECT程序编制的工程计划表



图表1-14



图 2 - 42 某船机舱修理工程计划

工程编号  
工程名称

