

单元 3 网络计划

3.1 网络图基本概念

建设工程进度控制工作中,较多地采用确定型网络计划。确定型网络计划的基本原理是:首先,利用网络图形式表达一项工程计划方案中各项工作之间的相互关系和先后顺序关系;其次,通过计算找出影响工期的关键线路和关键工作;再次,通过不断调整网络计划,寻求最优方案并付诸实施;最后,在计划实施过程中采取有效措施对其进行控制,以合理使用资源,高效、优质、低耗地完成预定任务。由此可见,网络计划技术不仅是一种科学的计划方法,同时也是一种科学的动态控制方法。

1. 网络图的组成

网络图是由箭线和节点组成,用来表示工作流程的有向、有序网状图形。一个网络图表示一项计划任务。网络图中的工作是计划任务按需要粗细程度划分而成的、消耗时间或同时也消耗资源的一个子项目或子任务。工作可以是单位工程,也可以是分部工程、分项工程;一个施工过程也可以作为一项工作。在一般情况下,完成一项工作既需要消耗时间,也需要消耗劳动力、原材料、施工机具等资源。但也有一些工作只消耗时间而不消耗资源,如混凝土浇筑后的养护过程和墙面抹灰后的干燥过程等。

网络图有双代号网络图和单代号网络图两种。双代号网络图又称箭线式网络图,它是以箭线及其两端节点的编号表示工作,同时,节点表示工作的开始或结束以及工作之间的连接状态。单代号网络图又称节点式网络图,它是以节点及其编号表示工作,箭线表示工作之间的逻辑关系。网络图中工作的表示方法如图 3-1 和图 3-2 所示。

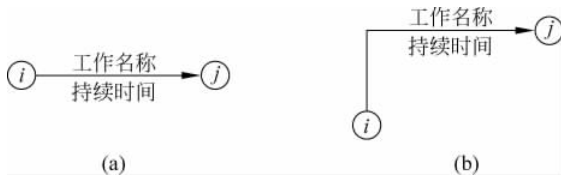


图 3-1 双代号网络图中工作的表示方法

网络图中的节点都必须有编号,其编号严禁重复,并应使每一条箭线上箭尾节点编号小于箭头节点编号。

在双代号网络图中,一项工作必须有唯一的一条箭线和相应的一对不重复出现的箭尾、箭头节点编号。因此,一项工作的名称可以用其箭尾和箭头节点编号来表示。而在单代号网络图中,一项工作必须有唯一的一个节点及相应的一个代号,该工作的名称可以用其节点

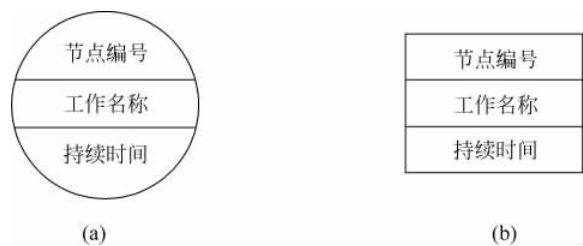


图 3-2 单代号网络图中工作的表示方法

编号来表示。

在双代号网络图中,有时存在虚箭线,虚箭线不代表实际工作,称为虚工作。虚工作既不消耗时间,也不消耗资源。虚工作主要用来表示相邻两项工作之间的逻辑关系。但有时为了避免两项同时开始、同时进行的工作具有相同的开始节点和完成节点,也需要用虚工作加以区分。

在单代号网络图中,虚拟工作只能出现在网络图的起点节点或终点节点处。

2. 工艺关系和组织关系

工艺关系和组织关系是工作之间的先后顺序关系——逻辑关系的组成部分。

1) 工艺关系

生产性工作之间由工艺过程决定的、非生产性工作之间由工作程序决定的先后顺序关系称为工艺关系。如图 3-3 所示,支模 1→扎筋 1→混凝土 1 为工艺关系。

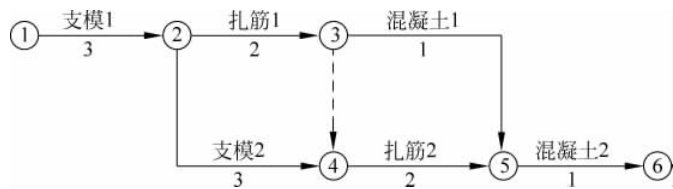


图 3-3 某混凝土工程双代号网络计划

2) 组织关系

工作之间由于组织安排需要或资源(劳动力、原材料、施工机具等)调配需要而规定的先后顺序关系称为组织关系。如图 3-3 所示,支模 1→支模 2; 扎筋 1→扎筋 2 等为组织关系。

3. 紧前工作、紧后工作和平行工作

1) 紧前工作

在网络图中,相对于某工作而言,紧排在该工作之前的工作称为该工作的紧前工作。在双代号网络图中,工作与其紧前工作之间可能有虚工作存在。如图 3-3 所示,支模 1 是支模 2 在组织关系上的紧前工作;扎筋 1 和扎筋 2 之间虽然存在虚工作,但扎筋 1 仍然是扎筋 2 在组织关系上的紧前工作。支模 1 则是扎筋 1 在工艺关系上的紧前工作。

2) 紧后工作

在网络图中,相对于某工作而言,紧排在该工作之后的工作称为该工作的紧后工作。在双代号网络图中,工作与其紧后工作之间也可能存在虚工作。如图 3-3 所示,扎筋 2 是扎筋 1 在组织关系上的紧后工作;混凝土 1 是扎筋 1 在工艺关系上的紧后工作。

3) 平行工作

在网络图中,相对于某工作而言,可以与该工作同时进行的工作即为该工作的平行工作。如图 3-3 所示,扎筋 1 和支模 2 互为平行工作。

紧前工作、紧后工作及平行工作是工作之间逻辑关系的具体表现,只要能根据工作之间的工艺关系和组织关系明确其紧前或紧后关系,即可据此绘出网络图。工作之间逻辑关系是正确绘制网络图的前提条件。

4. 先行工作和后续工作

1) 先行工作

相对于某工作而言,从网络图的第一个节点(起点节点)开始,顺箭头方向经过一系列箭线与节点到达该工作为止的各条通路上的所有工作,都称为该工作的先行工作。如图 3-3 所示,支模 1、扎筋 1、混凝土 1、支模 2、扎筋 2 均为混凝土 2 的先行工作。

2) 后续工作

相对于某工作而言,从该工作之后开始,顺箭头方向经过一系列箭线与节点到网络图最后一个节点(终点节点)的各条通路上的所有工作,都称为该工作的后续工作。如图 3-3 所示,扎筋 1 的后续工作有混凝土 1、扎筋 2 和混凝土 2。

在建设工程进度控制中,后续工作是一个非常重要的概念。在工程网络计划实施过程中,如果发现某项工作进度出现拖延,则受影响的工作必然是该工作的后续工作。

5. 线路、关键线路和关键工作

1) 线路

网络图中从起点节点开始,沿箭头方向顺序通过一系列箭线与节点,最后到达终点节点的通路称为线路。线路既可依次用该线路上的节点编号来表示,也可依次用该线路上的工作名称来表示。如图 3-3 所示,该网络图中有三条线路,这三条线路既可表示为:①→②→③→⑤→⑥、①→②→③→④→⑤→⑥和①→②→④→⑤→⑥,也可表示为:支模 1→扎筋 1→混凝土 1→混凝土 2、支模 1→扎筋 1→扎筋 2→混凝土 2 和支模 1→支模 2→扎筋 2→混凝土 2。

2) 关键线路和关键工作

在关键线路法中,线路上所有工作的持续时间总和称为该线路的总持续时间。总持续时间最长的线路称为关键线路,关键线路的长度就是网络计划的总工期。如图 3-3 所示,线路①→②→④→⑤→⑥或支模 1→支模 2→扎筋 2→混凝土 2 为关键线路。

在工程网络计划中,关键线路可能不止一条。而且在工程网络计划实施过程中,关键线路还会发生转移。

关键线路上的工作称为关键工作。在工程网络计划实施过程中,关键工作的实际进度提前或拖后,均会对总工期产生影响。因此,关键工作的实际进度是建设工程进度控制的工作重点。

3.2 网络计划时间参数的计算

网络计划是指在网络图上加注时间参数而编制的进度计划。网络计划时间参数的计算应在各项工作的持续时间确定之后进行。

3.2.1 网络计划时间参数的概念

时间参数是指网络计划、工作及节点所具有的各种时间值。

1. 工作持续时间和工期

1) 工作持续时间

工作持续时间是指一项工作从开始到完成的时间。在双代号网络计划中,工作 $i-j$ 的持续时间用 D_{i-j} 表示;在单代号网络计划中,工作 i 的持续时间用 D_i 表示。

2) 工期

工期泛指完成一项任务所需要的时间。在网络计划中,工期一般有以下三种。

(1) 计算工期。计算工期是根据网络计划时间参数计算而得到的工期,用 T_c 表示。

(2) 要求工期。要求工期是任务委托人所提出的指令性工期,用 T_r 表示。

(3) 计划工期。计划工期是指根据要求工期和计算工期所确定的作为实施目标的工期,用 T_p 表示。

① 当已规定了要求工期时,计划工期不应超过要求工期,即

$$T_p \leq T_r \quad (3-1)$$

② 当未规定要求工期时,可令计划工期等于计算工期,即

$$T_p = T_c \quad (3-2)$$

2. 工作的六个时间参数

除工作持续时间外,网络计划中工作的六个时间参数是:最早开始时间、最早完成时间、最迟完成时间、最迟开始时间、总时差和自由时差。

1) 最早开始时间和最早完成时间

工作的最早开始时间是指在其所有紧前工作全部完成后,本工作有可能开始的最早时刻。工作的最早完成时间是指在其所有紧前工作全部完成后,本工作有可能完成的最早时刻。工作的最早完成时间等于本工作的最早开始时间与其持续时间之和。

在双代号网络计划中,工作 $i-j$ 的最早开始时间和最早完成时间分别用 ES_{i-j} 和 EF_{i-j} 表示;在单代号网络计划中,工作 i 的最早开始时间和最早完成时间分别用 ES_i 和 EF_i 表示。

2) 最迟完成时间和最迟开始时间

工作的最迟完成时间是指在不影响整个任务按期完成的前提下,本工作必须完成的最迟时刻。工作的最迟开始时间是指在不影响整个任务按期完成的前提下,本工作必须开始的最迟时刻。工作的最迟开始时间等于本工作的最迟完成时间与其持续时间之差。

在双代号网络计划中,工作 $i-j$ 的最迟完成时间和最迟开始时间分别用 LF_{i-j} 和 LS_{i-j} 表示;在单代号网络计划中,工作 i 的最迟完成时间和最迟开始时间分别用 LS_i 和 LF_i 表示。

3) 总时差和自由时差

工作的总时差是指在不影响总工期的前提下,本工作可以利用的机动时间。在双代号网络计划中,工作 $i-j$ 的总时差用 TF_{i-j} 表示;在单代号网络计划中,工作 i 的总时差用 TF_i 表示。

工作的自由时差是指在不影响其紧后工作最早开始时间的前提下,本工作可以利用的机动时间。在双代号网络计划中,工作 $i-j$ 的自由时差用 FF_{i-j} 表示;在单代号网络计划中,工作 i 的自由时差用 FF_i 表示。

从总时差和自由时差的定义可知,对于同一项工作而言,自由时差不会超过总时差。当工作的总时差为零时,其自由时差必然为零。

在网络计划的执行过程中,工作的自由时差是该工作可以自由使用的时间。但是,如果利用某项工作的总时差,则有可能使该工作后续工作的总时差减小。

3. 节点最早时间和最迟时间

1) 节点最早时间

节点最早时间是指在双代号网络计划中,以该节点为开始节点的各项工作的最早开始时间。节点 i 的最早时间用 ET_i 表示。

2) 节点最迟时间

节点最迟时间是指在双代号网络计划中,以该节点为完成节点的各项工作的最迟完成时间。节点 j 的最迟时间用 LT_j 表示。

4. 相邻两项工作之间的时间间隔

相邻两项工作之间的时间间隔是指本工作的最早完成时间与其紧后工作最早开始时间之间可能存在的差值。工作 i 与工作 j 之间的时间间隔用 $LAG_{i,j}$ 表示。

3.2.2 双代号网络计划时间参数的计算

双代号网络计划的时间参数既可以按工作计算,也可以按节点计算,下面分别以简例说明。

1. 按工作计算法

所谓按工作计算法,就是以网络计划中的工作为对象,直接计算各项工作的时间参数。这些时间参数包括:工作的最早开始时间和最早完成时间、工作的最迟开始时间和最迟完成时间、工作的总时差和自由时差。此外,还应计算网络计划的计算工期。

为了简化计算,网络计划时间参数中的开始时间和完成时间都应以时间单位的终了时刻为标准。如第3天开始是指第3天终了(下班)时刻开始,实际上是第4天上班时刻才开始;第5天完成即是指第5天终了(下班)时刻完成。

下面以图3-4所示双代号网络计划为例,说明按工作计算法计算时间参数的过程。其计算结果如图3-5所示。

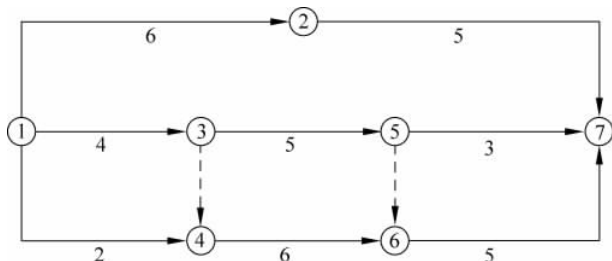


图 3-4 双代号网络计划

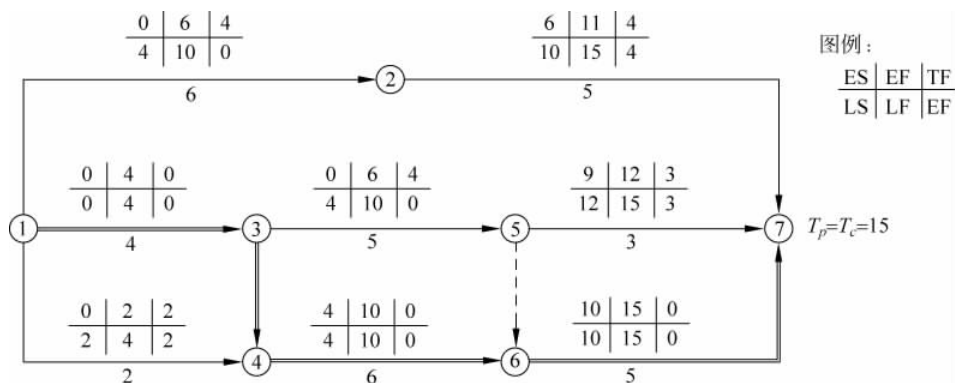


图 3-5 双代号网络计划(六时标注法)

1) 计算工作的最早开始时间和最早完成时间

(1) 工作最早开始时间和最早完成时间的计算应从网络计划的起点节点开始,顺着箭头方向依次进行。其计算步骤如下。

以网络计划起点节点为开始节点的工作,当未规定其最早开始时间时,其最早开始时间均为零。例如,工作 1-2、工作 1-3 和工作 1-4 的最早开始时间都为零,即

$$ES_{1-2} = ES_{1-3} = ES_{1-4} = 0$$

(2) 工作的最早完成时间可利用公式(3-3)进行计算

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

式中: EF_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最早完成时间;

ES_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最早开始时间;

D_{i-j} ——工作 $i-j$ 的持续时间。

例如,工作 1-2、工作 1-3 和工作 1-4 的最早完成时间分别为

$$\text{工作 1-2:} \quad EF_{1-2} = ES_{1-2} + D_{1-2} = 0 + 6 = 6$$

$$\text{工作 1-3:} \quad EF_{1-3} = ES_{1-3} + D_{1-3} = 0 + 4 = 4$$

$$\text{工作 1-4:} \quad EF_{1-4} = ES_{1-4} + D_{1-4} = 0 + 2 = 2$$

(3) 其他工作的最早开始时间应等于其紧前工作最早完成时间的最大值,即

$$ES_{i-j} = \text{Max}\{EF_{h-i}\} = \text{Max}\{ES_{h-i} + D_{h-i}\} \quad (3-4)$$

式中: ES_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最早开始时间;

EF_{h-i} ——工作 $i-j$ 的紧前工作 $h-i$ (非虚工作)的最早完成时间;

ES_{h-i} ——工作 $i-j$ 的紧前工作 $h-i$ (非虚工作)的最早开始时间;

D_{h-i} ——工作 $i-j$ 的紧前工作 $h-i$ (非虚工作)的持续时间。

例如,工作 3-5 和工作 4-6 的最早开始时间分别为

$$ES_{3-5} = EF_{1-3} = 4$$

$$ES_{4-6} = \text{Max}\{EF_{1-3}, EF_{1-4}\} = \text{Max}\{4, 2\} = 4$$

(4) 网络计划的计算工期应等于以网络计划终点节点为完成节点的工作的最早完成时间的最大值,即

$$T_c = \text{Max}\{EF_{i-n}\} = \text{Max}\{ES_{i-n} + D_{i-n}\} \quad (3-5)$$

式中: T_c ——网络计划的计算工期;

EF_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作的最早完成时间;

ES_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作的最早开始时间;

D_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作的持续时间。

例如,网络计划的计算工期为

$$T_c = \text{Max}\{EF_{2-7}, EF_{5-7}, EF_{6-7}\} = \text{Max}\{11, 12, 13\} = 15$$

2) 确定网络计划的计划工期

网络计划的计划工期应按公式(3-1)或公式(3-2)确定。假设未规定要求工期,则其计划工期就等于计算工期,即

$$T_p = T_c = 15$$

计划工期应标注在网络计划终点节点的右上方,如图 3-5 所示。

3) 计算工作的最迟完成时间和最迟开始时间

工作最迟完成时间和最迟开始时间的计算应从网络计划的终点节点开始,逆着箭线方向依次进行。其计算步骤如下。

(1) 以网络计划终点节点为完成节点的工作,其最迟完成时间等于网络计划的计划工期,即

$$LF_{i-n} = T_p \quad (3-6)$$

式中: LF_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作的最迟完成时间;

T_p ——网络计划的计划工期。

例如,工作 2-7、工作 5-7 和工作 6-7 的最迟完成时间为

$$LF_{2-7} = LF_{5-7} = LF_{6-7} = T_p = 15$$

(2) 工作的最迟开始时间可利用公式(3-7)进行计算:

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

式中: LS_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最迟开始时间;

LF_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最迟完成时间;

D_{i-j} ——工作 $i-j$ 的持续时间。

例如,工作 2-7、工作 5-7 和工作 6-7 的最迟开始时间分别为

$$LS_{2-7} = LF_{2-7} - D_{2-7} = 15 - 5 = 10$$

$$LS_{5-7} = LF_{5-7} - D_{5-7} = 15 - 3 = 12$$

$$LS_{6-7} = LF_{6-7} - D_{6-7} = 15 - 5 = 10$$

(3) 其他工作的最迟完成时间应等于其紧后工作最迟开始时间的最小值,即

$$LF_{i-j} = \text{Min}\{LS_{j-k}\} = \text{Min}\{LF_{j-k} - D_{j-k}\} \quad (3-8)$$

式中: LF_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最迟完成时间;

LS_{j-k} ——工作 $i-j$ 的紧后工作 $j-k$ (非虚工作)的最迟开始时间;

LF_{j-k} ——工作 $i-j$ 的紧后工作 $j-k$ (非虚工作)的最迟完成时间;

D_{j-k} ——工作 $i-j$ 的紧后工作 $j-k$ (非虚工作)的持续时间。

例如,工作 3-5 和工作 4-6 的最迟完成时间分别为

$$LF_{3-5} = \text{Min}\{LS_{5-7}, LS_{6-7}\} = \text{Min}\{12, 10\} = 10$$

$$LF_{4-6} = LS_{6-7} = 10$$

4) 计算工作的总时差

计算工作的总时差等于该工作最迟完成时间与最早完成时间之差,或该工作最迟开始时间与最早开始时间之差,即

$$TF_{i-j} = LF_{i-j} - EF_{i-j} = LS_{i-j} - ES_{i-j} \quad (3-9)$$

式中: TF_{i-j} ——工作 $i-j$ 的总时差; 其余符号同前。

例如,工作 3-5 的总时差为

$$TF_{3-5} - EF_{3-5} = 10 - 9 = 1$$

或

$$TF_{3-5} = LS_{3-5} - ES_{3-5} = 5 - 4 = 1$$

5) 计算工作的自由时差

工作自由时差的计算应按以下两种情况分别考虑。

(1) 对于有紧后工作的工作,其自由时差等于本工作之紧后工作最早开始时间减本工作最早完成时间所得之差的最小值,即

$$\begin{aligned} FF_{i-j} &= \min\{ES_{j-k} - EF_{i-j}\} \\ &= \min\{ES_{j-k} - ES_{i-j} - D_{i-j}\} \end{aligned} \quad (3-10)$$

式中: FF_{i-j} ——工作 $i-j$ 的自由时差;

ES_{j-k} ——工作 $i-j$ 的紧后工作了 $j-k$ (非虚工作) 的最早开始时间;

EF_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最早完成时间;

ES_{i-j} ——工作 $i-j$ 的最早开始时间;

D_{i-j} ——工作 $i-j$ 的持续时间

例如,工作 1-4 和工作 3-5 的自由时差分别为

$$\begin{aligned} FF_{1-4} &= ES_{4-6} - EF_{1-4} = 4 - 2 = 2 \\ FF_{3-5} &= \min\{ES_{5-7} - EF_{3-5}, ES_{6-7} - EF_{3-5}\} \\ &= \min\{9 - 9, 10 - 9\} \\ &= 0 \end{aligned}$$

(2) 对于无紧后工作的工作,也就是以网络计划终点节点为完成节点的工作,其自由时差等于计划工期与本工作最早完成时间之差,即

$$FF_{i-n} = T_p - EF_{i-n} = T_p - ES_{i-n} - D_{i-n} \quad (3-11)$$

式中: FF_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作 $i-n$ 的自由时差;

T_p ——网络计划的计划工期;

EF_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作 $i-n$ 的最早完成时间;

ES_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作 $i-n$ 的最早开始时间;

D_{i-n} ——以网络计划终点节点 n 为完成节点的工作 $i-n$ 的持续时间。

例如,工作 2-7、工作 5-7 和工作 6-7 的自由时差分别为

$$\begin{aligned} FF_{2-7} &= T_p - EF_{2-7} = 15 - 11 = 4 \\ FF_{5-7} &= T_p - EF_{5-7} = 15 - 12 = 3 \\ FF_{6-7} &= T_p - EF_{6-7} = 15 - 15 = 0 \end{aligned}$$

需要指出的是,对于网络计划中以终点节点为完成节点的工作,其自由时差与总时差相等。此外,由于工作的自由时差是其总时差的构成部分,所以,当工作的总时差为零时,其自

由时差必然为零,可不必进行专门计算。例如在本例中,工作 1—3、工作 4—6 和工作 6—7 的总时差全部为零,故其自由时差也全部为零。

6) 确定关键工作和关键线路

在网络计划中,总时差最小的工作为关键工作。特别地,当网络计划的计划工期等于计算工期时,总时差为零的工作就是关键工作。例如,在本例中,工作 1—3、工作 4—6 和工作 6—7 的总时差均为零,故为关键工作。

找出关键工作之后,将这些关键工作首尾相连,便构成从起点节点到终点节点的通路,位于该通路上各项工作的持续时间总和最大,这条通路就是关键线路。在关键线路上可能存在虚工作。

关键线路一般用粗箭线或双线箭线标出,也可以用彩色箭线标出。例如,在本例中,线 ①→③→④→⑥→⑦即为关键线路。关键线路上各项工作的持续时间总和应等于网络计划的计算工期,这一特点也是判别关键线路是否正确的准则。

上述计算过程是将每项工作的六个时间参数均标注在图中,故称为六时标注法,如图 3-5 所示。为使网络计划的图面更加简洁,在双代号网络计划中,除各项工作的持续时间以外,通常只需标注两个最基本的时间参数——各项工作的最早开始时间和最迟开始时间即可,而工作的其他四个时间参数(最早完成时间、最迟完成时间、总时差和自由时差)均可根据工作的最早开始时间、最迟开始时间及持续时间导出。这种方法称为二时标注法,如图 3-6 所示。

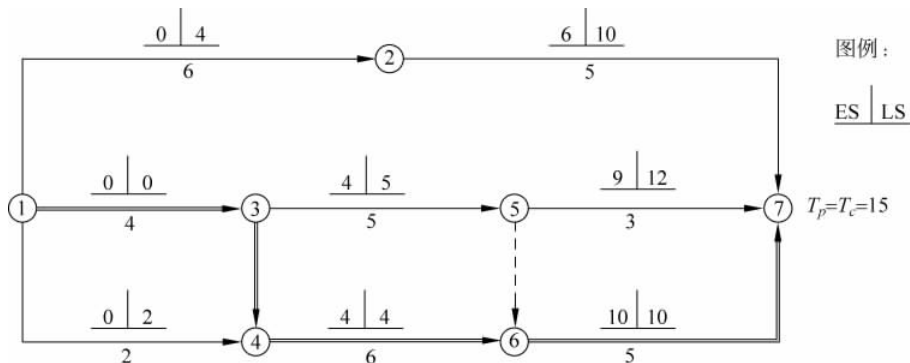


图 3-6 双代号网络计划(二时标注法)

2. 按节点计算法

按节点计算法就是先计算网络计划中各个节点的最早时间和最迟时间,然后再据此计算各项工作的时间参数和网络计划的计算工期。

下面仍以图 3-4 所示双代号网络计划为例,说明按节点计算法计算时间参数的过程。其计算结果如图 3-7 所示。

1) 计算节点的最早时间和最迟时间

(1) 计算节点的最早时间

节点最早时间的计算应从网络计划的起点节点开始,顺着箭线方向依次进行。其计算步骤如下。

① 网络计划起点节点,如未规定最早时间,其值等于零。例如,起点节点①的最早时间

为零,即

$$ET_1 = 0$$

② 其他节点的最早时间应按公式(3-12)进行计算:

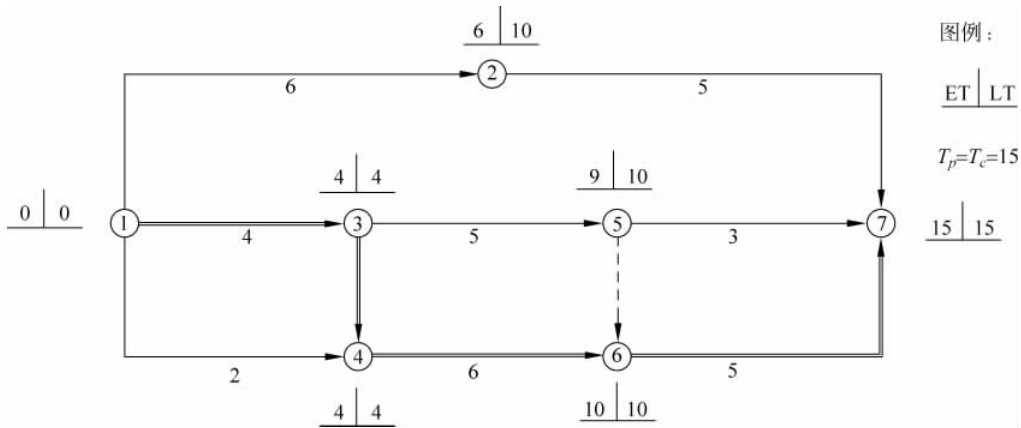


图 3-7 双代号网络计划(按节点计算法)

$$ET_j = \text{Max}\{ET_i + D_{i-j}\} \quad (3-12)$$

式中: ET_j ——工作 $i-j$ 的完成节点 j 的最早时间;

ET_i ——工作 $i-j$ 的开始节点 i 的最早时间;

D_{i-j} ——工作 $i-j$ 的持续时间。

例如,节点③和节点④的最早时间分别为

$$ET_3 = ET_1 + D_{1-3} = 0 + 4 = 4$$

$$\begin{aligned} ET_4 &= \text{Max}\{ET_1 + D_{1-4}, ET_3 + D_{3-4}\} \\ &= \text{Max}\{0 + 2, 4 + 0\} \\ &= 4 \end{aligned}$$

③ 网络计划的计算工期等于网络计划终点节点的最早时间,即

$$T_c = ET_n \quad (3-13)$$

式中: T_c ——网络计划的计算工期;

ET_n ——网络计划终点节点的最早时间。

例如,其计算工期为

$$T_c = ET_7 = 15 \quad (3-14)$$

(2) 确定网络计划的计划工期

网络计划的计划工期应按公式(3-1)或公式(3-2)确定。假设未规定要求工期,则其计划工期就等于计算工期,即

$$T_p = T_c = 15$$

计划工期应标注在终点节点的右上方,如图 3-7 所示。

(3) 计算节点的最迟时间

节点最迟时间的计算应从网络计划的终点节点开始,逆着箭线方向依次进行。其计算