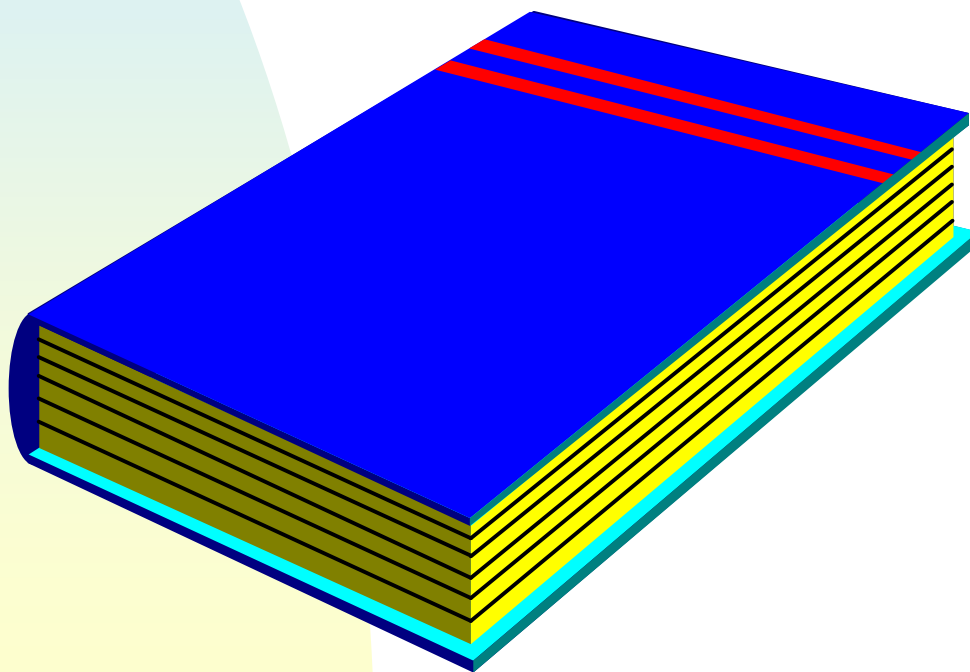
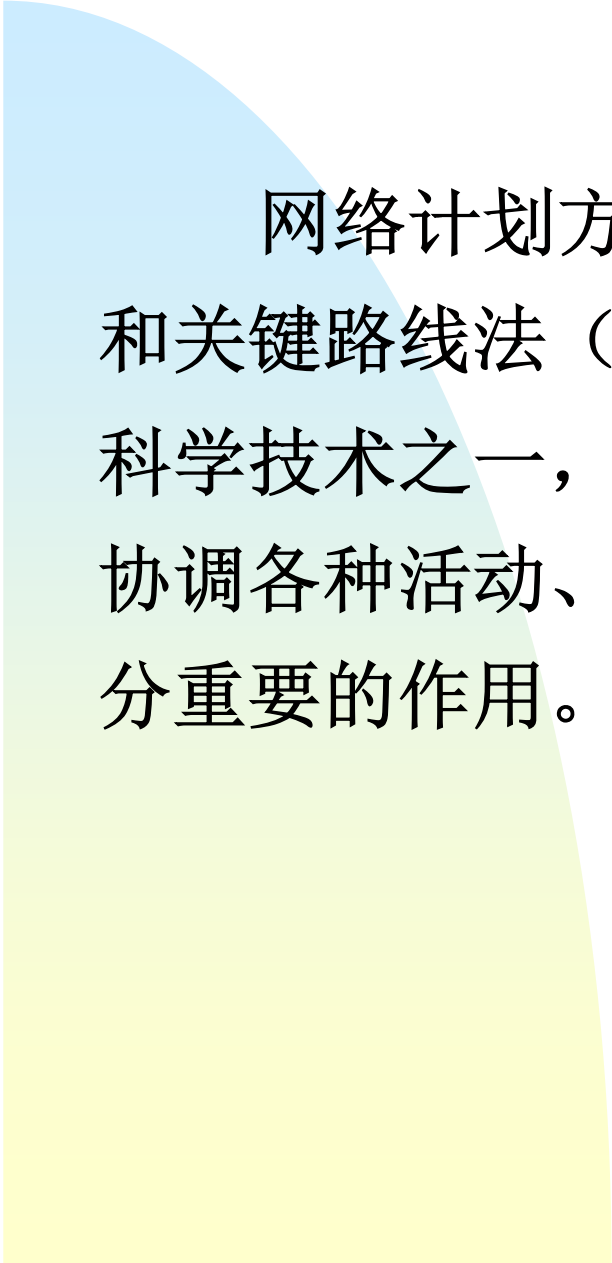


第9章 网络计划





网络计划方法主要包括计划评审技术（**PERT**）和关键路线法（**CPM**），它们是应用最为广泛的管理科学技术之一，尤其是在项目管理领域，对于计划和协调各种活动、编制日程安排、监控项目进度具有十分重要的作用。

引例： Reliable建筑公司项目管理问题

- 该公司中标一项价值**540**万美元的新厂建设项目；
- 合同含有如下条款：
 - 若**47**周内不能完工，需赔偿**30**万美元；
 - 若**40**周内完工，则得到**15**万美元奖励。

问题：

1. 如何直观地**表示**项目中各活动的流程？
2. 如何确定**项目总工期**？
3. 各活动**最早或最迟的开工及结束时间**是多少？
4. 哪些活动是**关键活动**（或瓶颈）？
5. 哪些活动可以**推延**而不影响总工期？可推延多少？
6. 项目**按期完工的可能性**有多大？
7. 如何以最低**成本**在**40**周内完工？
8. 如何实时**监控**项目，以将成本控制在预算以内？

● 项目所包含的各种活动及执行顺序

活动	内容	紧前活动
A	挖掘	—
B	打地基	A
C	承重墙施工	B
D	封顶	C
E	安装外部管道	C
F	安装内部管道	E
G	外墙施工	D
H	外部上漆	E, G
I	电路铺设	C
J	竖墙板	F, I
K	铺地板	J
L	内部上漆	J
M	安装外部设备	H
N	安装内部设备	K, L

9.1 项目网络

- 表示整个项目的网络图称为**项目网络（网络计划图）**；
- 项目网络提供以下信息：
 - 活动信息；
 - 活动次序关系；
 - 时间信息
- 两种类型的项目网络：
 - **AOA（双代号）**：弧表示活动，节点表示活动间的关系

“紧前活动”与“紧后活动”



- **AON（单代号）**：节点表示活动，弧表示活动间的关系

本章采用单代号



项目网络图绘制规范

- **活动（或工作、工序、作业）**是网络图的基本单元，项目可根据需要的粗细程度分解成一系列需要消耗时间和资源的活动（或子项目）；
- 网络图按项目工作流程（活动的先后顺序）自左向右（或自上向下）绘制，网络中不能有缺口和回路；
- 一项活动的所有**紧前活动**结束后才能开始；
- 项目网络图只能有一个起始节点和终止节点；
- 起点至终点的通路称为**路线**，一条路线上所有活动时间之和为路线**长度**，网络中最长的路线称为**关键路线**，应尽量布局在网络中心位置。

活动时间估算

1. 单时估计法（定额法）

每项工作只估计一个确定的持续时间：
$$D = \frac{Q}{R \cdot S \cdot n}$$

Q — 工作的**工作量**，以**时间**表示如小时，或以体积、质量、长度等单位表示；

R — 可投入人力和设备的**数量**；

S — 每人或每台设备每工作班能完成的**工作量**；

n — 每天正常工作**班数**。

👉 当具有类似工作持续时间历史统计资料时，可根据统计资料，采用分析对比方法确定持续时间。

活动时间估算

2. 三时估计法

不具备有关工作的持续时间历史资料，可采用该方法。要求估计三个时间：

乐观时间 a ：在一切顺利时完成工作的最少时间。

最可能时间 m ：在正常条件下完成工作的时间。

悲观时间 b ：在不顺利条件下完成工作的最多时间。

一般出现最顺利和最不顺利的情况较少，较多是正常情况，故工作持续时间按下式估计：
$$D = \frac{a + 4m + b}{6}$$

方差为：
$$\sigma^2 = ((b - a) / 6)^2$$

● 项目各活动执行顺序及时间

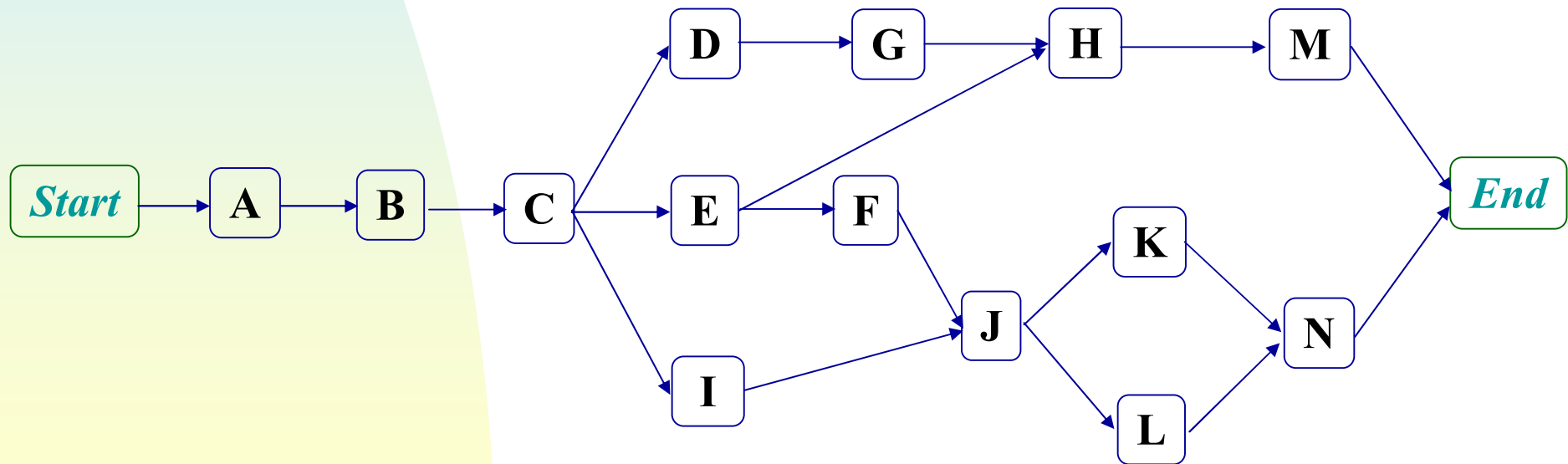
活动	内容	紧前活动	工期（周）
A	挖掘	—	2
B	打地基	A	4
C	承重墙施工	B	10
D	封顶	C	6
E	安装外部管道	C	4
F	安装内部管道	E	5
G	外墙施工	D	7
H	外部上漆	E, G	9
I	电路铺设	C	7
J	竖墙板	F, I	8
K	铺地板	J	4
L	内部上漆	J	5
M	安装外部设备	H	2
N	安装内部设备	K, L	6

Reliable公司的项目网络图绘制 (AON)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

若存在多个“开始活动”（无紧前）或多个“结束活动”（无紧后），则必须引入虚拟活动

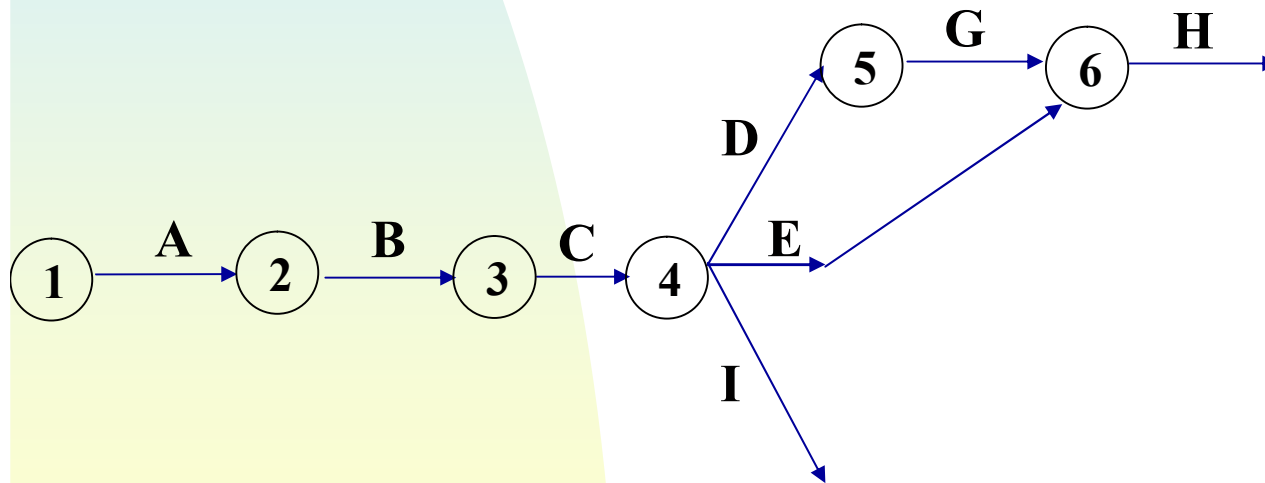


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

➡ 从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

➡ 注意虚拟活动的引入!

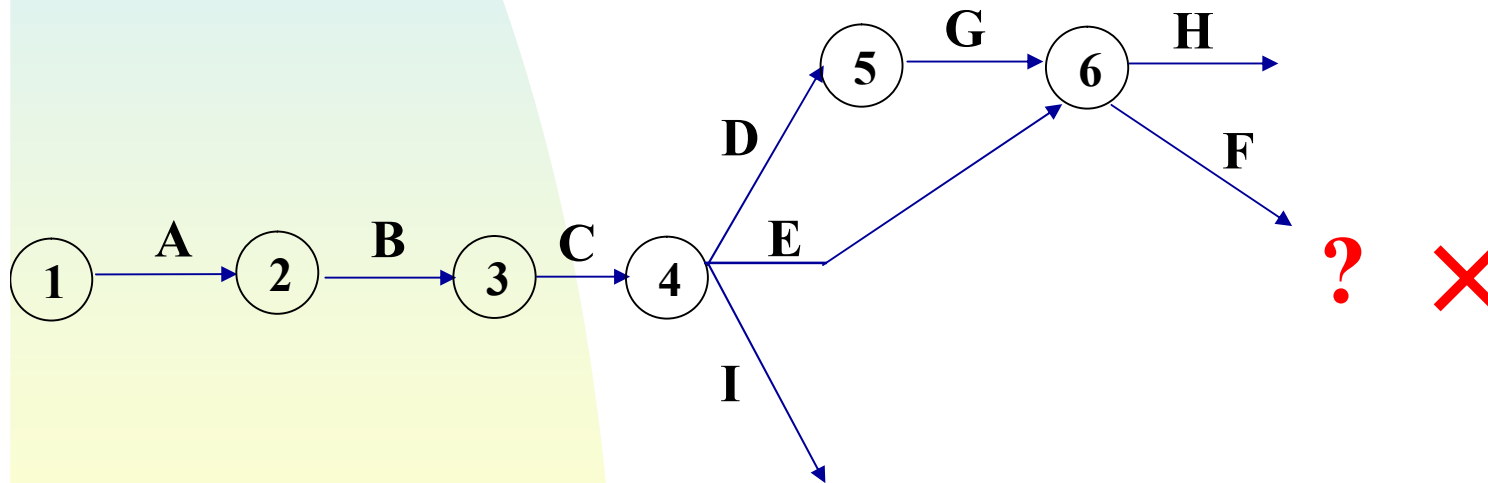


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

➡ 从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

➡ 注意虚拟活动的引入!

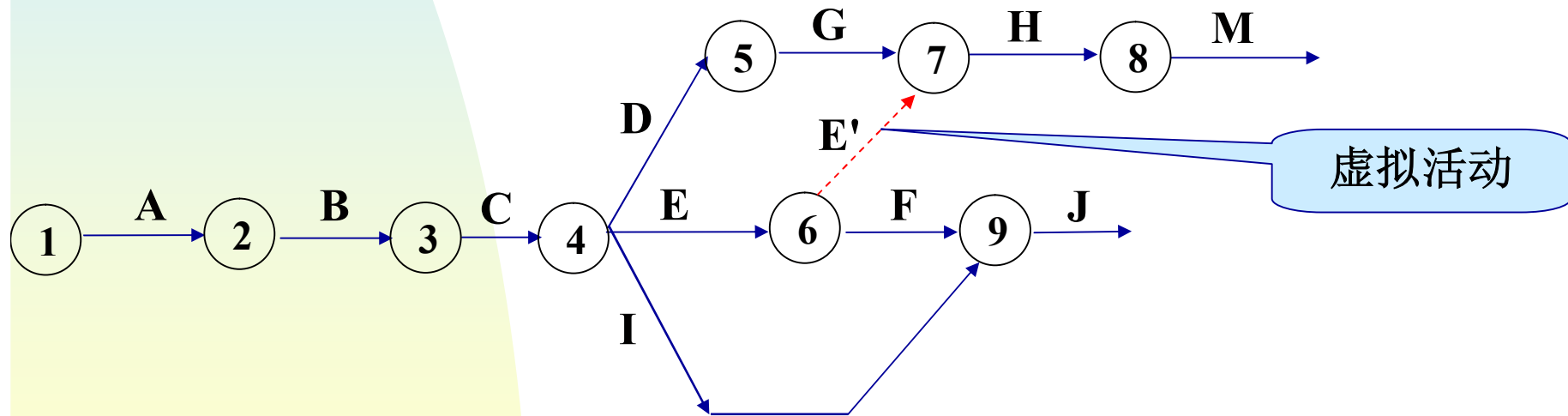


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

注意虚拟活动的引入!

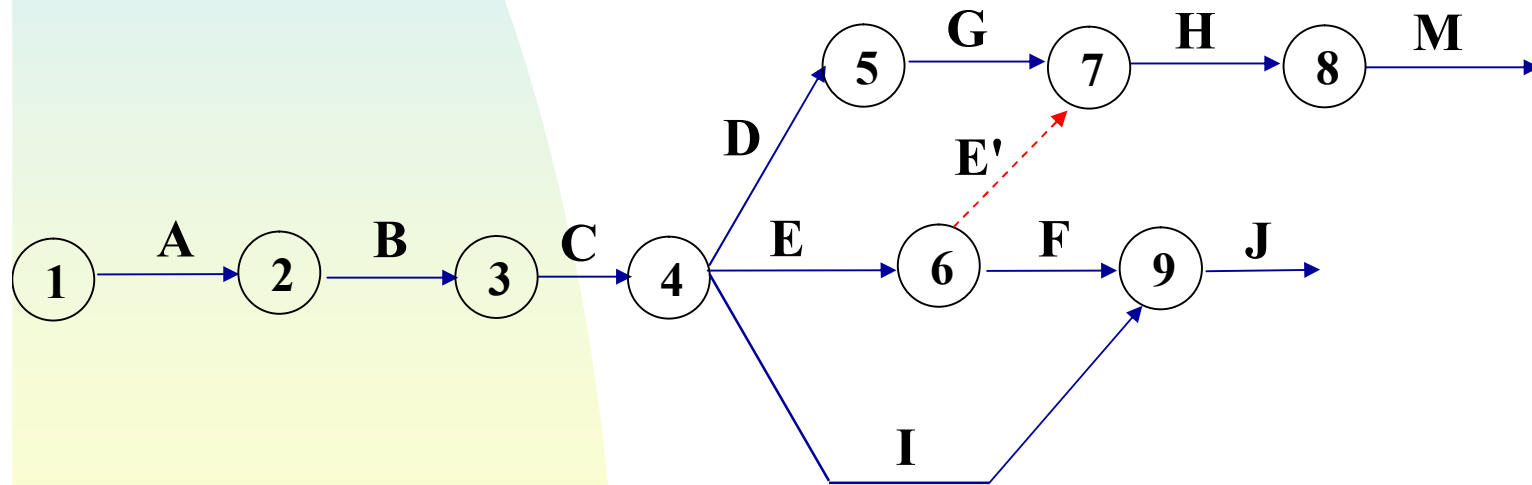


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

➡ 从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

➡ 注意虚拟活动的引入!

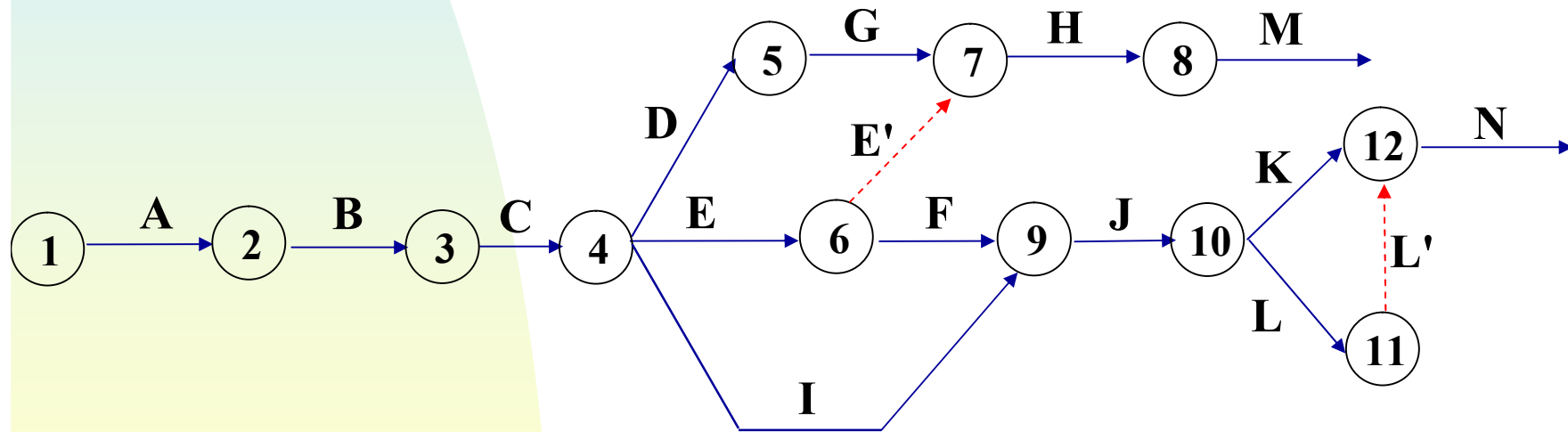


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

➡ 从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

➡ 注意虚拟活动的引入!

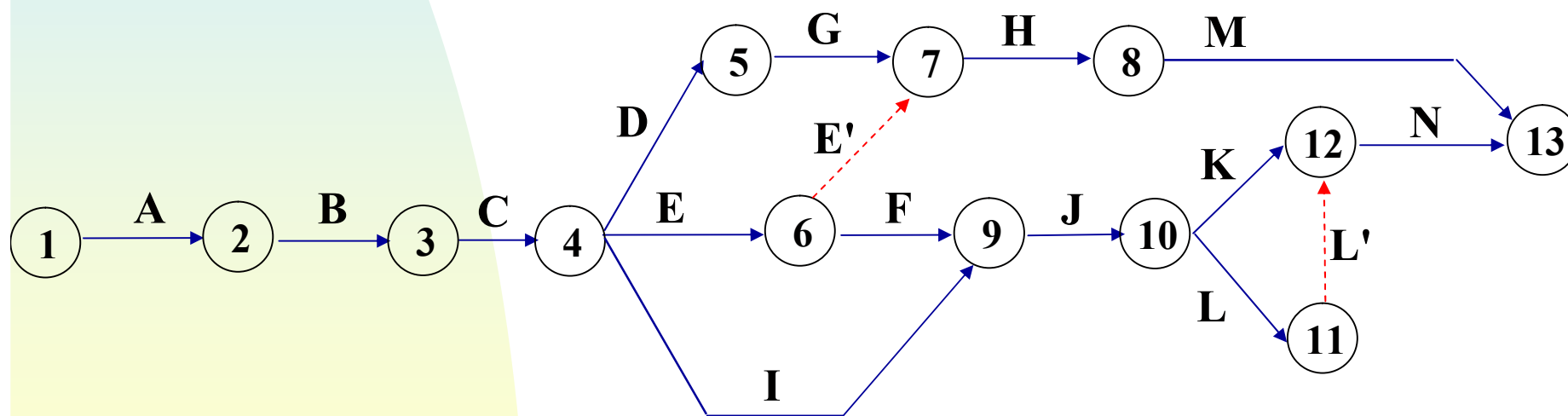


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

➡ 从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

➡ 注意虚拟活动的引入!

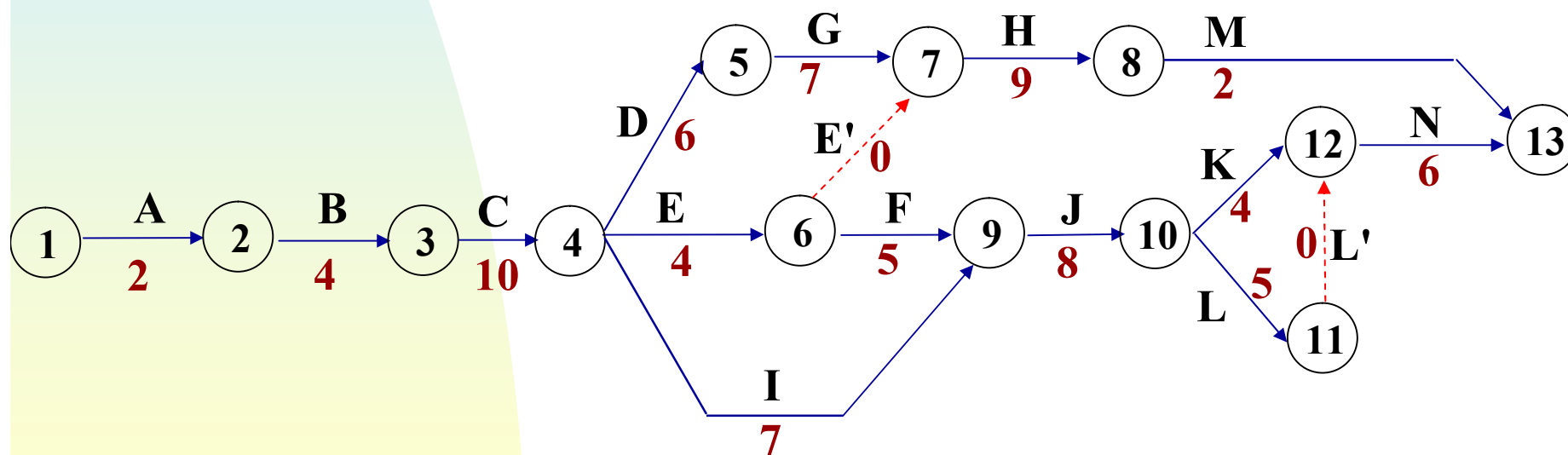


Reliable公司的项目网络图绘制 (AOA)

活动	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
紧前活动	-	A	B	C	C	E	D	E,G	C	F,I	J	J	H	K,L

➡ 从“紧前活动”栏寻找下一步要画的活动

➡ 注意虚拟活动的引入!



9.2 项目进度安排（排程）

- 项目进度安排的主要工作包括：
 - 确定每道工序的最早和最迟开工时间；
 - 确定各工序的时差；
 - 找出关键路径；
 - 确定项目总工期

活动日程安排（1）：最早时间

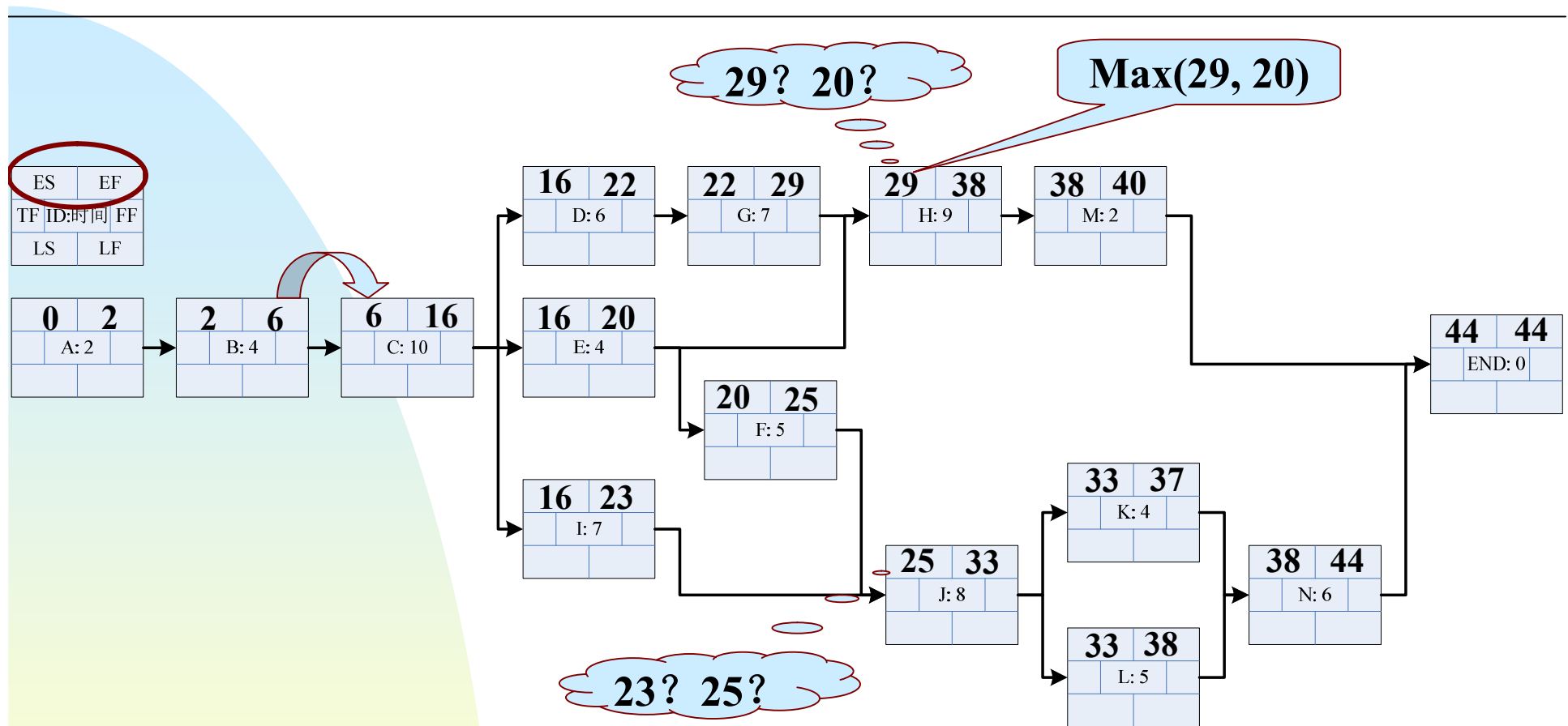
■ 最早开始时间ES和最早结束时间EF

- 在没有延误的情况下，每个单项活动最早可以开始和完成的时间；

“没有延误”的含义为：一旦一项活动的紧前活动完成，这个活动就要马上开始进行；其实际完成时间与预计的活动时间一致；

- $EF = ES + \text{活动的工期}$
- 规定项目的开始时间为0

活动日程安排（1）：最早时间



活动日程安排（1）：最早时间

- 最早开始时间规则：

- ES = 该活动的所有紧前活动的最早结束时间（ EF ）中最大的一个；
- 从前向后计算

活动日程安排（2）：最晚时间

■ 最晚开始时间LS和最晚结束时间LF

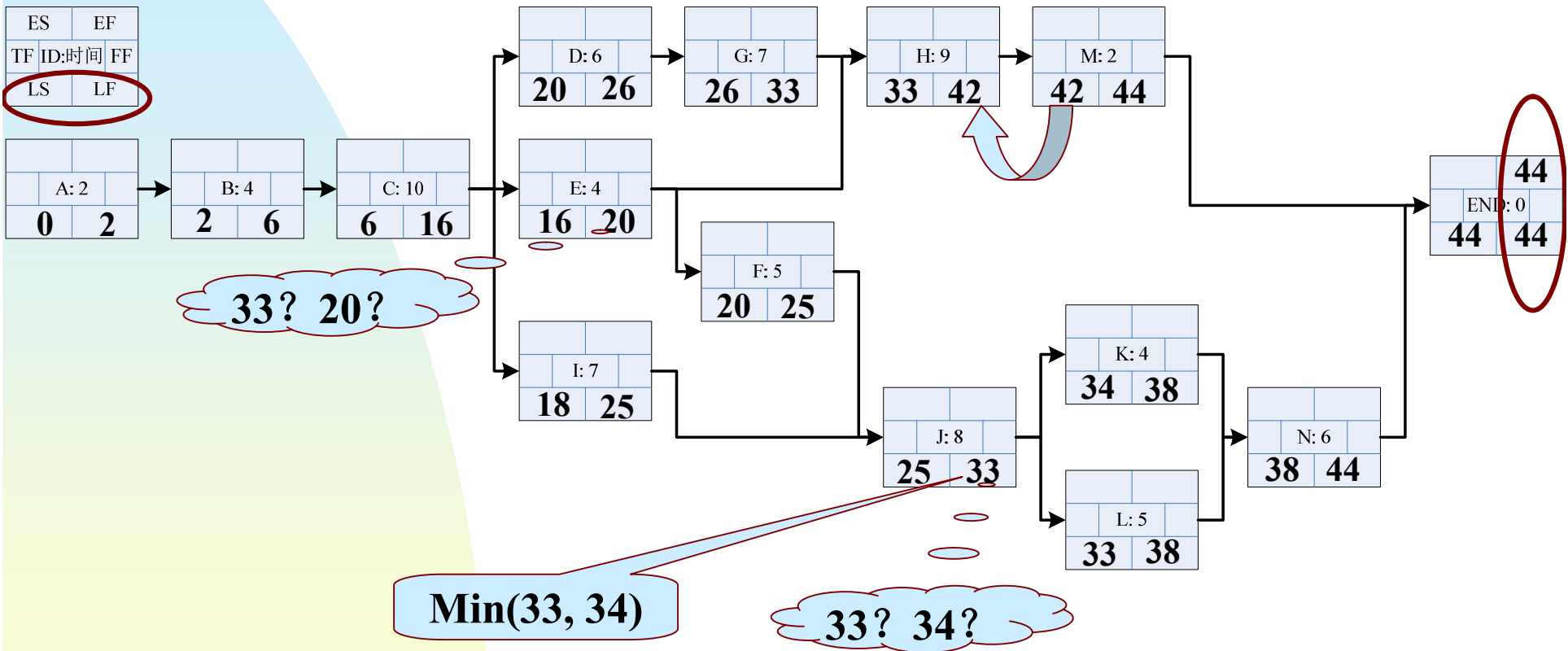
- 假设项目以后的进程中没有延误，在不影响项目总工期的前提下一个活动最晚可能开始和结束的时间；
- $LS = LF - \text{活动的工期}$
- 对于项目网络终点来说，最晚结束时间等于最早结束时间

The diagram illustrates a project network with activities A through N. Each activity is represented by a box containing its duration and calculated ES, EF, LS, and LF values. The network starts with activity A and ends with activity N. The following table summarizes the data for each activity:

Activity	Duration	ES	EF	LS	LF
A	2	0	2		
B	4	2	6		
C	10	6	16		
D	6	20	26		
E	4	16	20		
F	5	20	25		
G	7	26	33		
H	9	33	42		
I	7	18	25		
J	8	25	33		
K	4	34	38		
L	5	33	38		
M	2	42	44		
N	6	38	44		

The diagram includes callouts for calculating the minimum of two values to determine the LS value:

- Callout 1: $33? 20?$ (referring to the LS value for activity E, which is 16).
- Callout 2: $33? 34?$ (referring to the LS value for activity J, which is 25).
- Callout 3: $\text{Min}(33, 34)$ (referring to the calculation of the LS value for activity J).

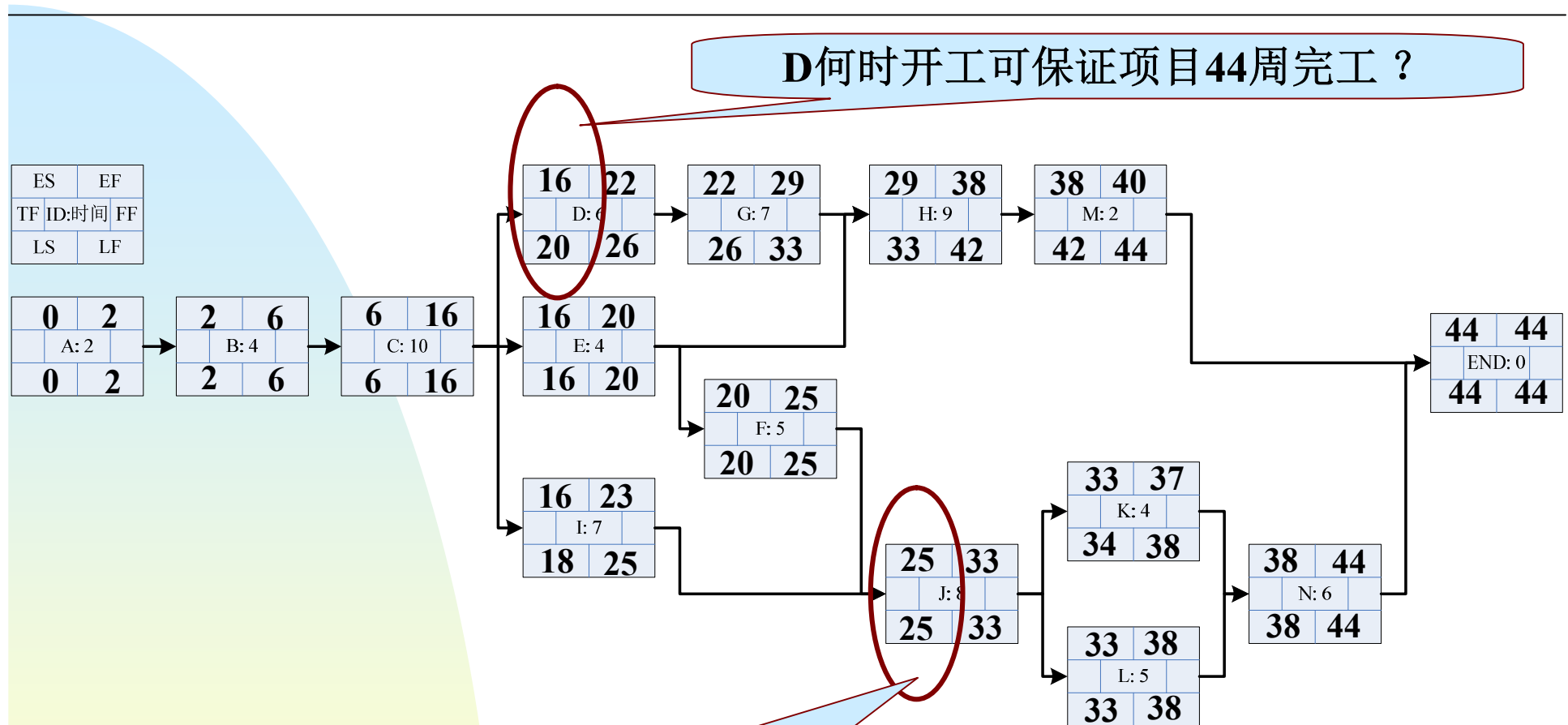


活动日程安排（2）：最晚时间

- 最晚结束时间规则：

- **LF** = 该活动的所有紧后活动的最晚开始时间（**LS**）中最小的一个；
- 从后向前计算

活动日程安排（3）：时差确定



D何时开工可保证项目44周完工？

J何时开工可保证项目44周完工？

开工时间的弹性！

活动日程安排（3）：时差确定

■ 时差的概念

- 如果某一活动的最早开始（或结束）时间与最晚开始（或结束）时间不相等，表明该活动的安排允许有时间松弛（时差）；
- 如果某一活动开始时间的推延不影响其紧后活动的开始，表明该活动的安排也存在一定的灵活性；
- 根据以上两种不同情况，分别可引入**总时差**与**单时差（自由时差）**的概念。

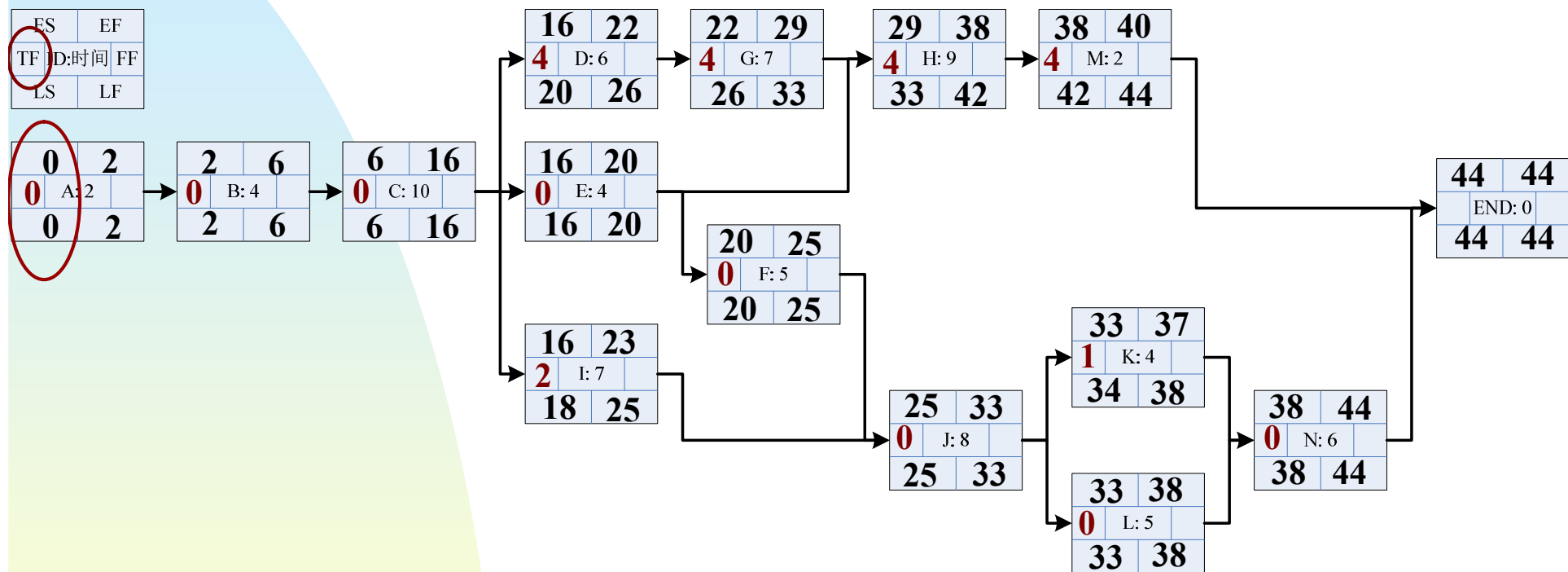
活动日程安排（3）：时差确定

■ 总时差（TF）

- 活动 i 的总时差（ $TF(i)$ ）就是在不影响项目工期条件下，该活动的开始（或结束）时间可以推迟的最大量，等于该活动最晚结束时间和最早结束时间之差（或最晚开始时间和最早开始时间之差）

$$\begin{aligned} TF(i) &= LF(i) - EF(i) \\ &= LS(i) - ES(i) \end{aligned}$$

活动日程安排（3）：时差确定



总时差 (TF)

活动日程安排（3）：时差确定

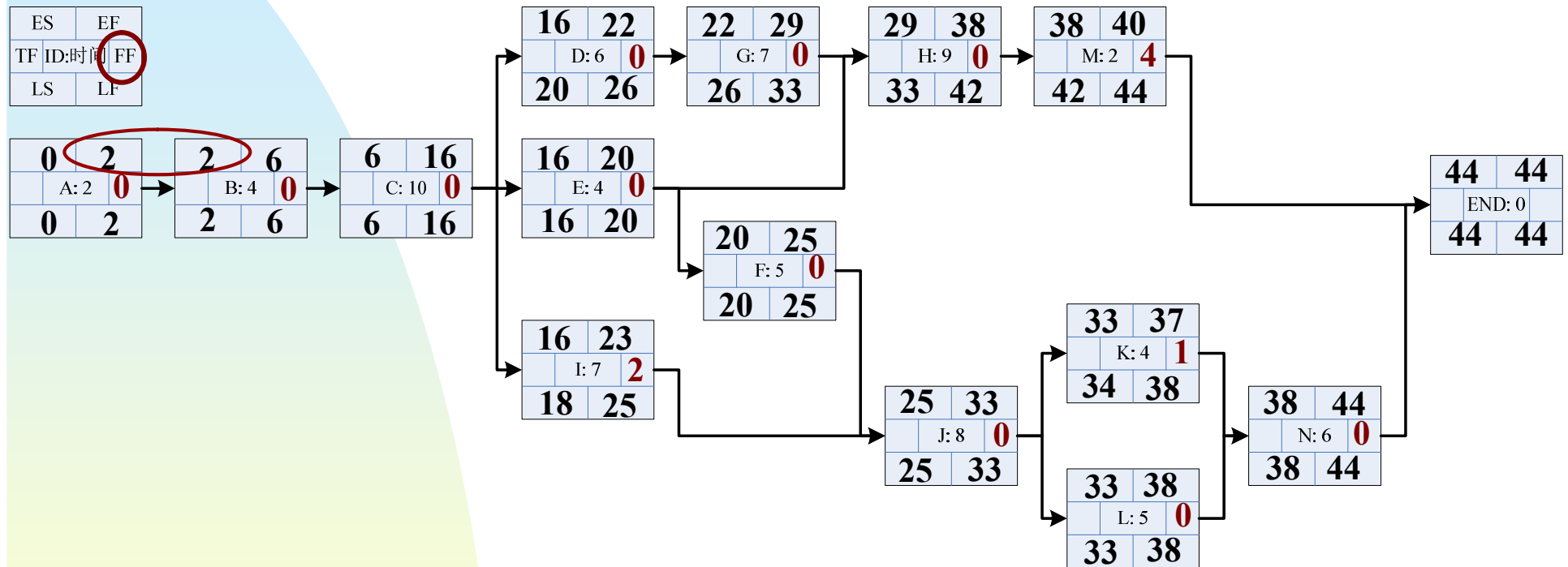
■ 自由时差（FF）

- 活动 i 的自由时差或单时差（ $FF(i)$ ）就是在不影响其所有紧后活动最早开始时间的条件下，该活动的开始（或结束）时间可以推迟的最大量，等于该活动最早结束时间和其紧后活动最早开始时间之差

$$FF(i) = \min\{ES(j)\} - EF(i)$$

其中活动 j 是活动 i 的紧后活动

活动日程安排（3）：时差确定



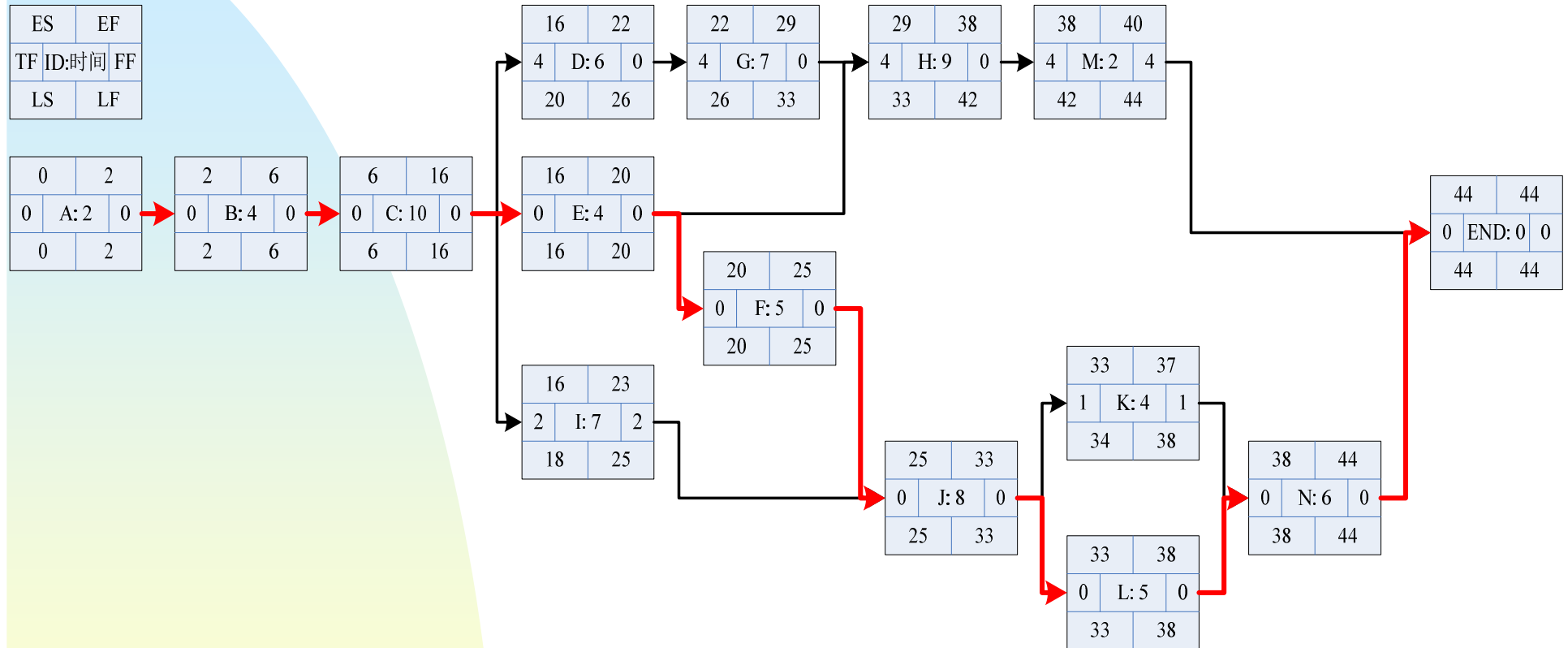
自由时差 (FF)

活动日程安排（4）：关键路径的确定

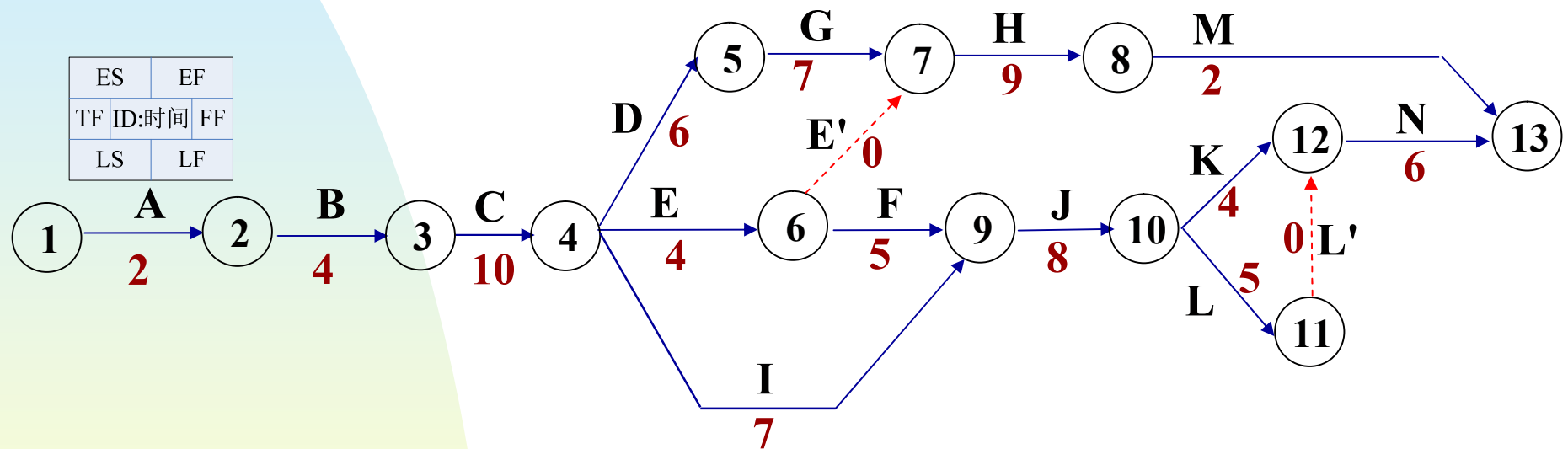
■ 关键活动和关键路径的确定

- 如果一个活动的总时差为零，表明该活动的任何延误都会影响整个项目的完成时间，属于项目中的“瓶颈”活动，称为**关键活动**；
- 所有关键活动构成了**关键路径**。
 - ✓ **关键路径**是项目网络中的最长的路径；
 - ✓ **项目工期**为项目网络中从始点到终点的最长路径的长度，也即关键路径的长度（所有关键活动时间之和）。

活动日程安排（4）：关键路径的确定



AOA网络的参数求解与表示

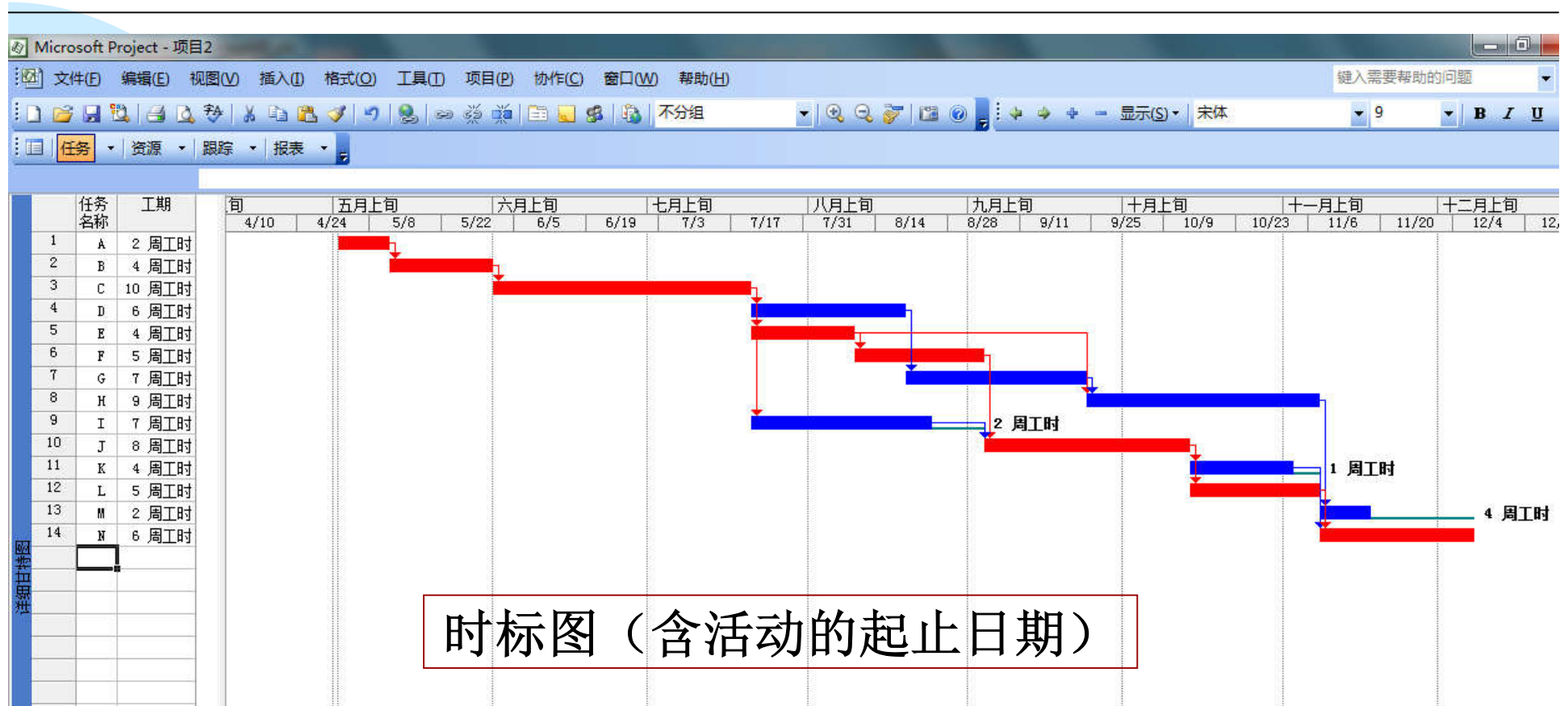


● 引例项目网络中的所有路线比较

Path	Length (Weeks)
Start→A →B →C →D →G →H →M →Finish	$2 + 4 + 10 + 6 + 7 + 9 + 2 = 40$
Start →A →B →C →E →H →M →Finish	$2 + 4 + 10 + 4 + 9 + 2 = 31$
Start →A →B →C →E →F →J →K →N →Finish	$2 + 4 + 10 + 4 + 5 + 8 + 4 + 6 = 43$
Start →A →B →C →E →F →J →L →N →Finish	$2 + 4 + 10 + 4 + 5 + 8 + 5 + 6 = 44$
Start →A →B →C →I →J →K →N →Finish	$2 + 4 + 10 + 7 + 8 + 4 + 6 = 41$
Start →A →B →C →I →J →L →N →Finish	$2 + 4 + 10 + 7 + 8 + 5 + 6 = 42$

- **关键路线**为项目网络中的最长路线;
- 关键路线上的活动为**关键活动**, 所有关键活动都是项目中的瓶颈活动, 关键活动的任何拖延都会延误项目工期。

项目进度计划的表示——项目甘特图



如何确定非关键活动的开始时间？

9.3 项目进度风险估计

- 由于每项活动的完成时间往往是不确定的，因此项目工期也具有不确定性；
 - 在实际操作中，每项活动的完成时间都是具有某种概率分布的随机变量
- 因此，项目在规定期限内完工的概率将具有十分重要的意义，它实际上表示了项目的进度风险。

PERT对活动时间的估计

● 对每个活动时间有三个估计值

➤ 最大可能估计 (m) :

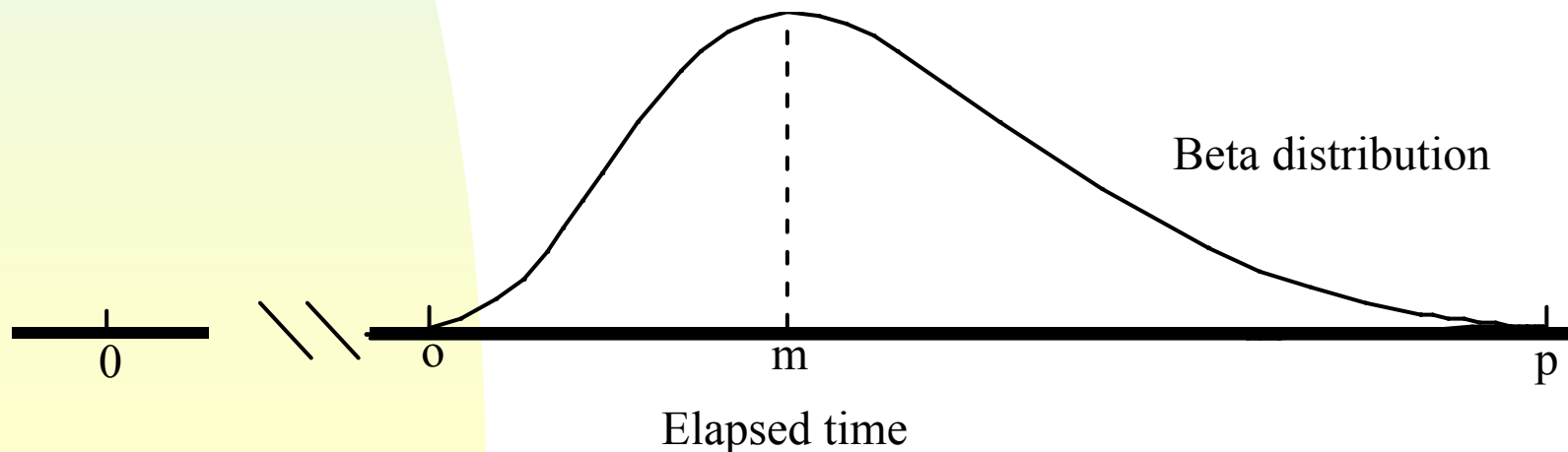
完成某项活动最可能出现的工期估计

➤ 乐观估计 (o) :

在最佳条件下完成某项活动的工期估计

➤ 悲观估计 (p) :

在最不利条件下完成某项活动的工期估计



● 引例各活动时间的三点估计

活动	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>p</i>
A	1	2	3
B	2	3.5	8
C	6	9	18
D	4	5.5	10
E	1	4.5	5
F	4	4	10
G	5	6.5	11
H	5	8	17
I	3	7.5	9
J	3	9	9
K	4	4	4
L	1	5.5	7
M	1	2	3
N	5	5.5	9

- 若用最可能时间作为活动时间，求得项目工期为多少？

43周

- 若用均值作为活动时间，求得项目工期为多少？

（即为前面所用数据）

- 若用悲观估计作为活动时间，求得项目工期为多少？

70周

★ 项目不能按期完工的概率有多大？

$$P(T_p \leq 47) = ?$$

PERT对项目按期完工概率的计算

为计算项目工期 T_p 不超过某一给定值的概率，有必要知道项目工期概率分布的信息：

- 分布均值 μ_p ;
- 分布方差 σ_p^2 ;
- 分布形式

- ★ 为得到以上信息，还需要做一些简化假设
- ★ 在项目网络中确定各活动的开始、结束时间时，应当用三点估计中的哪个值较为合适？

● 三个简化近似

- 简化近似1：假设均值关键路径是项目网络中最长的一条路径；

这个近似很粗略，因为很多活动的工期不等于其均值

- 简化近似2：假设均值关键路径上的活动工期具有统计独立性；

即一个活动的工期发生了变化也不会影响其它活动的工期
(实际中经常是有影响的)

- 简化近似3：假设项目工期的概率分布为正态分布

当关键路径上活动较多时（至少5个），这个假设较合理

三个简化近似

用活动时间的均值带入项目网络
确定关键路径

- 简化近似1: ~~假设均值关键路径就是项目网络中最长的~~
一条路径;

这个近似很粗略, 因为

由于项目工期 T_p 为各关键活动时间之和, 故 μ_p 与 σ_p^2 分别为各关键活动时间的均值与方差之和

- 简化近似2: 假设均值关键路径上的活动工期具有统计独立性;

即一个活动的工期发生了变化也不会影响其它活动的工期
(实际中经常是有影响的)

- 简化近似3: 假设项目工期的概率分布为正态分布

当关键路径上活动较多时

项目工期 T_p 服从正态分布

如何确定各活动时间的
均值与方差?

如何求 $P(T_p \leq 47)$?

● 活动时间的均值和方差

■ 方差的近似估计

$$\sigma^2 = \left(\frac{p - o}{6} \right)^2$$

■ 均值的近似估计

$$\mu = \frac{o + 4m + p}{6}$$

对于 β 分布，绝大多数样本点分布在 $\mu - 3\sigma$ 到 $\mu + 3\sigma$ 之间（也即 6σ 的范围内）。

● 引例各活动时间的均值和方差

活动	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>p</i>	均值	方差
A	1	2	3	2	$1/9$
B	2	3.5	8	4	1
C	6	9	18	10	4
D	4	5.5	10	6	1
E	1	4.5	5	4	$4/9$
F	4	4	10	5	1
G	5	6.5	11	7	1
H	5	8	17	9	4
I	3	7.5	9	7	1
J	3	9	9	8	1
K	4	4	4	4	0
L	1	5.5	7	5	1
M	1	2	3	2	$1/9$
N	5	5.5	9	6	$4/9$

参数计算

➤ 根据简化近似1可求得：

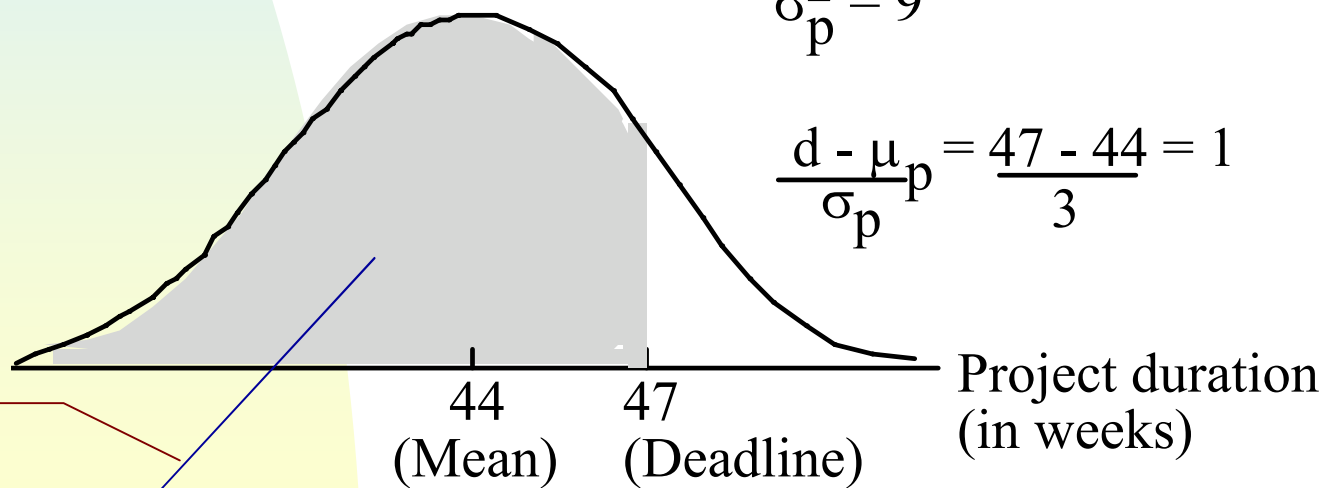
$$\mu_p = \text{各关键活动的工期均值之和} = 44$$

➤ 根据简化近似1和简化近似2可求得：

$$\sigma_p^2 = \text{各关键活动的工期方差之和} = 9$$

$$\sigma_p^2 = 9$$

$$\frac{d - \mu_p}{\sigma_p} = \frac{47 - 44}{3} = 1$$



查表

$$P(T \leq 47) = 0.84$$

对问题的进一步思考

- 由于使用了近似1，实现目标的概率经常被夸大；
- 由于提前完成项目可以得到奖励（15万美元），但同时又会增加成本，因此有必要在二者之间加以权衡，故须研究将项目完成时间控制在40周以内所需的额外费用。

★得到初始进度计划后，应考虑可否进一步加以改进

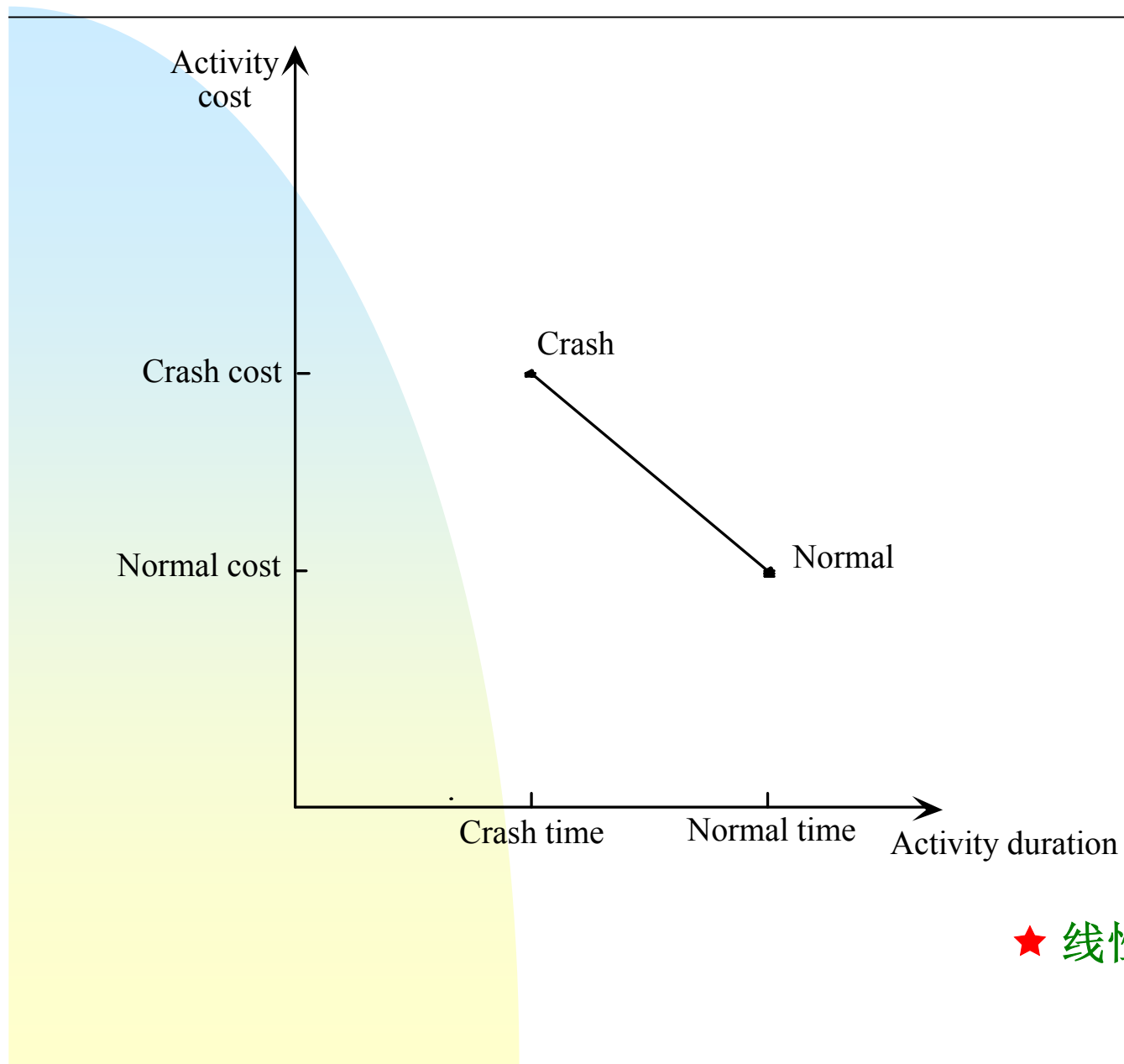
9.4 对初始进度计划的优化

- 对初始进度计划通常可从两个方面加以优化
 - 进一步有效压缩工期（时间优化）
 - 平衡资源负荷（资源优化）

9.4.1 时间优化

- 若进度风险较高，应考虑进一步压缩工期；
- 由于提前完成项目可以得到奖励（15万美元），但同时又会增加成本，因此有必要在二者之间加以权衡（如何以最小成本将项目完成时间控制在40周以内）；
- 每项活动有多种处理方式；
 - 如正常完成、应急完成（不同程度的应急水平）等
 - 缩短工期的途径有：加班、增加临时工、采用特殊设备等
- 不同的完成方式有不同的成本；
- 可利用优化技术在时间和成本之间寻求平衡。

● 各活动的时间-成本关系



★ 线性假设

● 各活动的时间-成本数据

活动	时间（周）		成本		最大时间缩减	每周应急成本
	正常	应急	正常	应急		
A	2	1	\$180,000	\$280,000	1	\$100,000
B	4	2	320,000	420,000	2	50,000
C	10	7	620,000	860,000	3	80,000
D	6	4	260,000	340,000	2	40,000
E	4	3	410,000	570,000	1	160,000
F	5	3	180,000	260,000	2	40,000
G	7	4	900,000	1,020,000	3	40,000
H	9	6	200,000	380,000	3	60,000
I	7	5	210,000	270,000	2	30,000
J	8	6	430,000	490,000	2	30,000
K	4	3	160,000	200,000	1	40,000
L	5	3	250,000	350,000	2	50,000
M	2	1	100,000	200,000	1	100,000
N	6	3	330,000	510,000	3	60,000

● 初步分析

- 所有活动按正常水平执行，则：
 - 项目工期为44周；项目成本为\$455万
- 所有活动按应急水平执行，则：
 - 项目工期为28周；项目成本为\$615万
- 几个重要参考点：
 - 项目总预算为 \$540万；
 - 超过47周完成则罚款\$30万；
 - 40周以内完成则奖励\$15万
- ★ 显然对所有活动都应急处理是不合适的。
- ★ 关键是：要把项目工期压缩到40周以内，应对哪些活动作应急处理才能使所增加的成本最少？

● 边际成本分析

- 可通过边际成本分析寻找减少项目完成时间的最经济的途径：

— 在关键路径上缩短具有最小边际成本的活动时间

列出项目网络中的所有路径及其长度！

		路径长度					
		ABCDGHM	ABCEHM	ABCEHJKN	ABCEHJLN	ABCIJKN	ABCIJLN
应急活动	应急成本	40	31	43	44	41	42

- ◆ 找出关键路径；
- ◆ 在关键路径上找出边际成本最低的活动；
- ◆ 缩减该活动的时间（应急处理）

● 边际成本分析

		路径长度					
		ABCDGHM	ABCEHM	ABCEFJKN	ABCEFJLN	ABCIJKN	ABCIJLN
应急活动	应急成本	40	31	43	44	41	42
J	\$30,000	40	31	42	43	40	41

● 边际成本分析

		路径长度					
		ABCDGHM	ABCEHM	ABCEFJKN	ABCEFJLN	ABCIJKN	ABCIJLN
应急活动	应急成本	40	31	43	44	41	42
J	\$30,000	40	31	42	43	40	41
J	\$30,000	40	31	41	42	39	40

注意，此时J已经不能再缩减，因为其最大缩减量只有两周！

● 边际成本分析

		路径长度					
		ABCDGHM	ABCEHM	ABCEFJKN	ABCEFJLN	ABCIJKN	ABCIJLN
应急活动	应急成本	40	31	43	44	41	42
J	\$30,000	40	31	42	43	40	41
J	\$30,000	40	31	41	42	39	40
F	\$40,000	40	31	40	41	39	40

● 边际成本分析

应急活动	应急成本	路径长度					
		ABCDGHM	ABCEHM	ABCEFJKN	ABCEFJLN	ABCIJKN	ABCIJLN
		40	31	43	44	41	42
J	\$30,000	40	31	42	43	40	41
J	\$30,000	40	31	41	42	39	40
F	\$40,000	40	31	40	41	39	40
F	\$40,000	40	31	39	40	39	40

项目时间已缩减至40周，增加成本14万元。

最终方案：活动J与F完全应急处理，其他活动正常执行。

● 边际成本分析

- 怎样才能不用列出所有可能路径求出最佳压缩量？



● 利用线性规划进行边际成本分析

- **问题描述：** 如何安排项目进度，使得在项目工期小于或等于给定水平的条件下，总成本（包括由应急带来的额外成本）最低

- **目标函数：** 总成本

- **约束：** 各活动的先后次序；

- 活动的开始时间 \geq 其所有紧前活动的结束时间

- 项目完工期；

- 期望工期 \geq 项目完工期 \geq 所有最后活动的完工期

- 应急能力

- 各活动工期的缩减量 \leq 该活动工期的最大缩减量

- **决策变量：** 每个活动的开始时间；

- 每个活动的缩减时间（应急程度）

为方便建模，将项目完工时间作为一个附加决策变量。

求解过程见Reliable CPM Time-Cost.xls

Excel模型

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3						Maximum	Crash Cost			
4		Time		Cost		Time	per Week	Start	Time	Finish
5	Activity	Normal	Crash	Normal	Crash	Reduction	saved	Time	Reduction	Time
6	A	2	1	\$180,000	\$280,000	1	\$100,000	0	0	2
7	B	4	2	\$320,000	\$420,000	2	\$50,000	2	0	6
8	C	10	7	\$620,000	\$860,000	3	\$80,000	6	0	16
9	D	6	4	\$260,000	\$340,000	2	\$40,000	16	0	22
10	E	4	3	\$410,000	\$570,000	1	\$160,000	16	0	20
11	F	5	3	\$180,000	\$260,000	2	\$40,000	20	2	23
12	G	7	4	\$900,000	\$1,020,000	3	\$40,000	22	0	29
13	H	9	6	\$200,000	\$380,000	3	\$60,000	29	0	38
14	I	7	5	\$210,000	\$270,000	2	\$30,000	16	0	23
15	J	8	6	\$430,000	\$490,000	2	\$30,000	23	2	29
16	K	4	3	\$160,000	\$200,000	1	\$40,000	30	0	34
17	L	5	3	\$250,000	\$350,000	2	\$50,000	29	0	34
18	M	2	1	\$100,000	\$200,000	1	\$100,000	38	0	40
19	N	6	3	\$330,000	\$510,000	3	\$60,000	34	0	40
20										
21										Max Time
22						Project Finish Time		40	<=	40
23										
24						Total Cost		\$4,690,000		

决策变量

附加决策变量

= StartTime + NormalTime - TimeReduction

=SUM(NormalCost)+SUMPRODUCT(CrashCostPerWeekSaved,TimeReduction)

Excel模型

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3						Maximum	Crash Cost			
4		Time		Cost		Time	per Week	Start	Time	Finish
5	Activity	Normal	Crash	Normal	Crash	Reduction	saved	Time	Reduction	Time
6	A	2	1	\$180,000	\$280,000	1	\$100,000	0	0	2
7	B	4	2	\$320,000	\$420,000	2	\$50,000	2	0	6
8	C	10	7	\$620,000	\$860,000	3	\$80,000	6	0	16
9	D	6	4	\$260,000	\$340,000	2	\$40,000	16	0	22
10	E	4	3	\$410,000	\$570,000	1	\$160,000	16	0	20
11	F	5	3	\$180,000	\$260,000	2	\$40,000	20	2	23
12	G	7	4	\$900,000	\$1,020,000	3	\$40,000	22	0	29
13	H	9	6	\$200,000	\$380,000	3	\$60,000	29	0	38
14	I	7	5	\$210,000	\$270,000	2	\$30,000	16	0	23
15	J	8	6	\$430,000	\$490,000	2	\$30,000	23	2	29
16	K	4	3	\$160,000	\$200,000	1	\$40,000	30	0	34
17	L	5	3	\$250,000	\$350,000	2	\$50,000	29	0	34
18	M	2	1	\$100,000	\$200,000	1	\$100,000	38	0	40
19	N	6	3	\$330,000	\$510,000	3	\$60,000	34	0	40
20										
21										Max Time
22						Project Finish Time	40	<=		40
23										
24						Total Cost	\$4,690,000			

最终方案：活动J与F完全应急处理，其他活动正常执行。

项目时间缩减至40周，增加成本Total Cost – SUM(Normal Cost) = 14万元。

是否应按此方案执行？

结论

- 由于采用应急方案后只有**50%**的概率能够在**40**周内完工，因此在一开始就采用应急方案以获取额外奖金是不妥当的；
- 如果在项目执行过程中很顺利（至少在**F**之前没出现任何延误），采用应急措施后能以很大可能性在**40**周内完工，则此时再采用应急方案是比较合适的；
- 更重要的是要避免项目无法在**47**周内按期完成，因此应急方案可以作为一个重要的后备方案，若在**F**之前项目拖期严重，则启动该方案。

故最终决策为：按正常进度方案实施；应急方案为后备方案，视前期执行情况而决定是否启用。

9.4.2 资源优化

■ 目的

在保持项目工期不变的条件下，均衡地利用资源

■ 具体操作过程

- 优先安排**关键活动**所需要的资源；
- 利用**非关键活动**总时差，错开各活动开始时间，避免在同一时区内集中使用同一资源，以免出现高峰；
- 在确实受到资源制约，或在综合权衡经济效益条件下认为可接受时，也可适当推迟工程工期，实现错开高峰的目的。

➡ **确定非关键活动开始时间的原则**

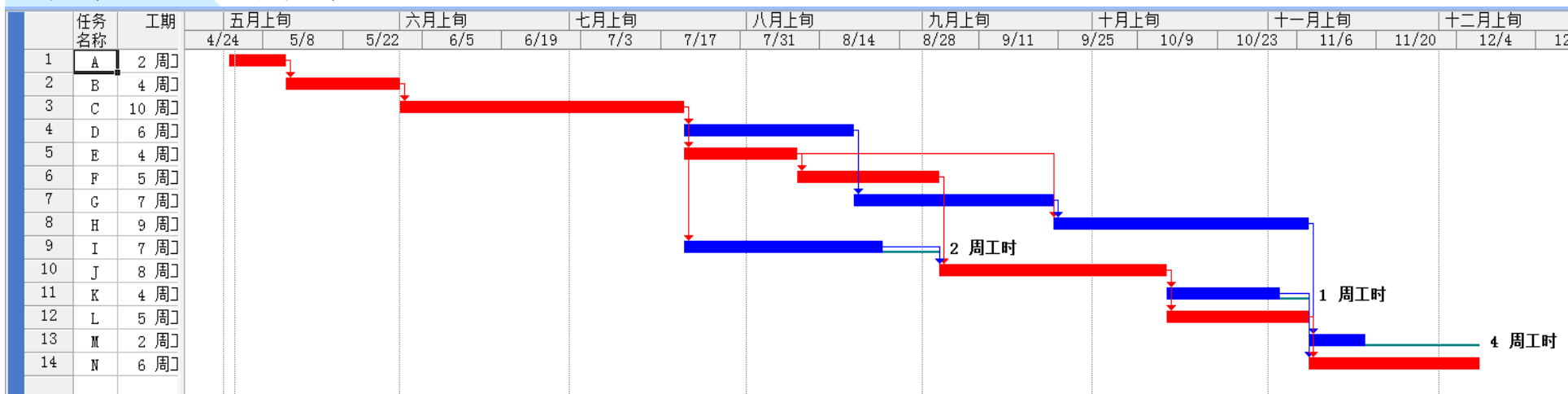
● 资源需求

活动	A	B	C	D	E	F	G
资源数	12	10	15	5	8	4	4

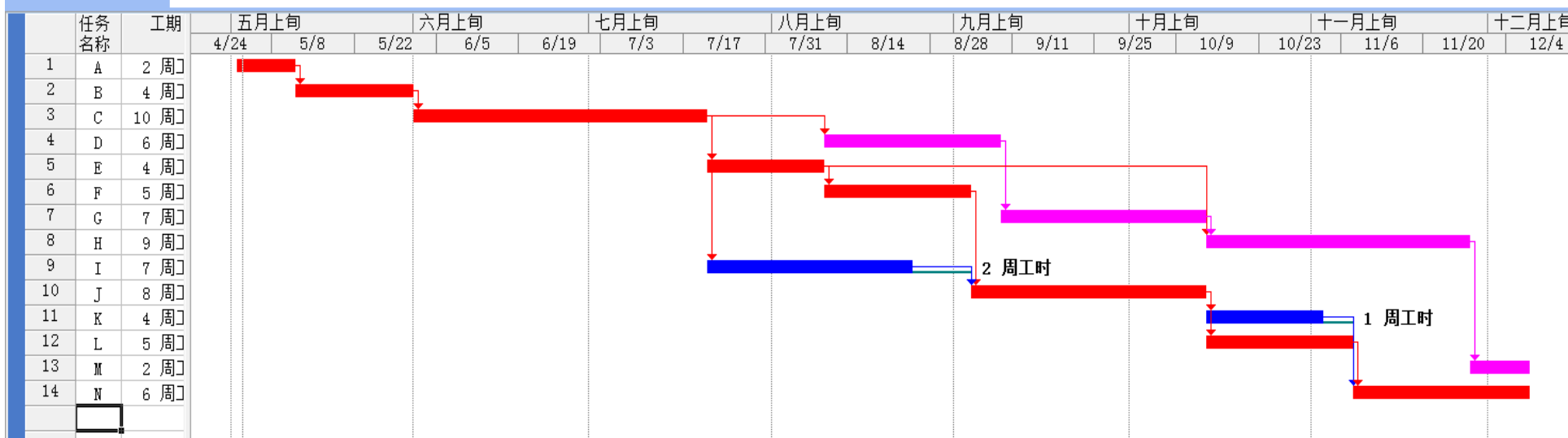
活动	H	I	J	K	L	M	N
资源数	5	3	4	4	5	3	4

方案对比

方案1（原方案）

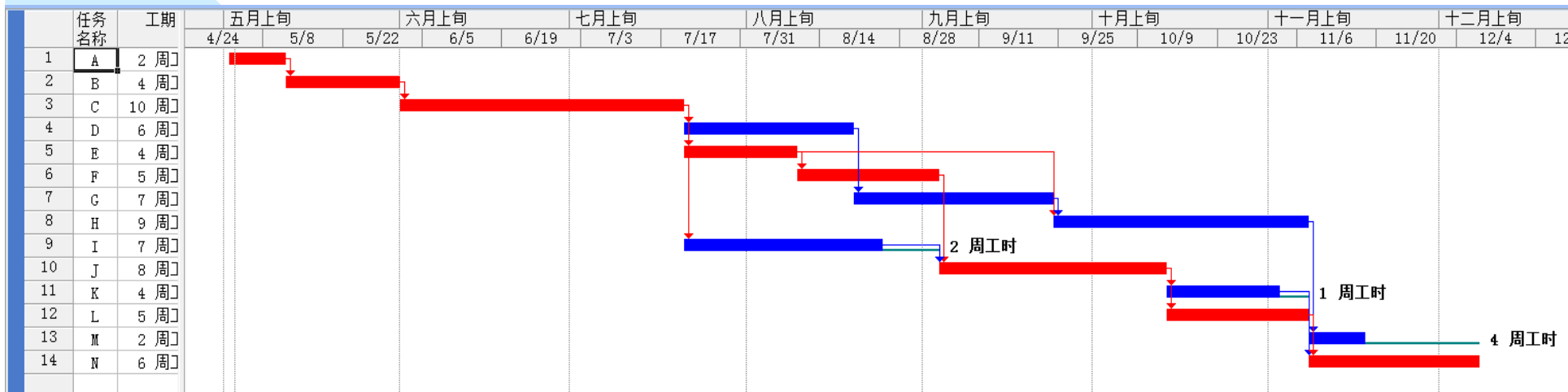


方案2（活动D后移4周）



方案对比

方案1 资源负荷

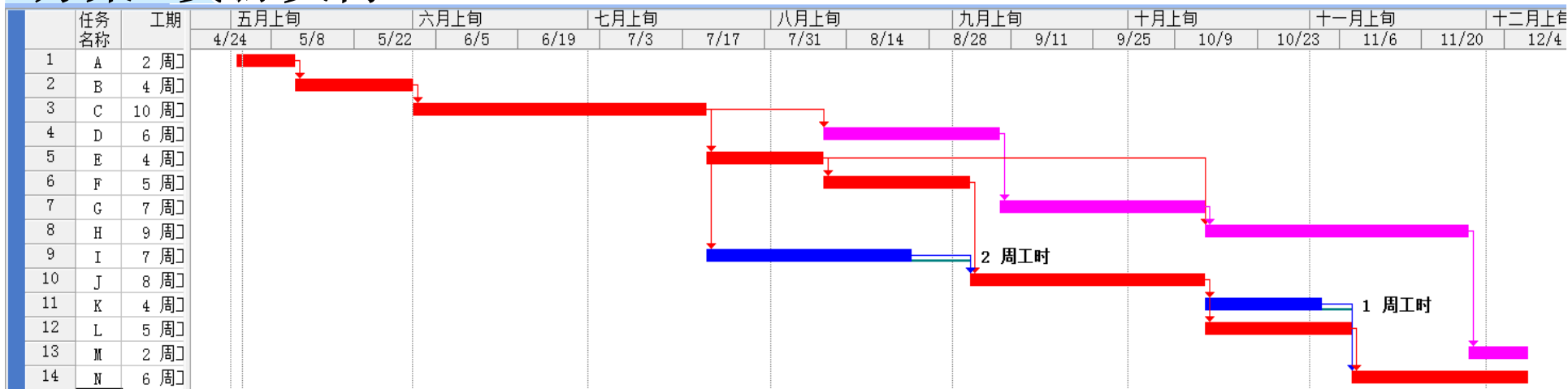


时间段：16~20		时间段：20~22		时间段：22~23		时间段：23~25		时间段：25~29	
参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源
D	5	D	5	G	4	G	4	G	4
E	8	F	4	F	4	F	4	J	4
I	3	I	3	I	3				
资源数	16		12		11		8		8

时间段：29~33		时间段：33~37		时间段：37~38		时间段：38~40		时间段：40~44	
参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源
H	5	H	5	H	5	M	3		
J	4	K	4			N	4	N	4
		L	5	L	5				
	9		14		10		7		4

方案对比

方案2 资源负荷



时间段:16~20		时间段:20~23		时间段:23~25		时间段:25~26		时间段:26~33	
参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源
		D	5	D	5	D	5	G	4
E	8	F	4	F	4	J	4	J	4
I	3	I	3						
资源数	11		12		9		9		8

时间段:33~37		时间段:37~38		时间段:38~42		时间段:42~44	
参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源	参与活动	所需资源
H	5	H	5	H	5	M	3
K	4	L		N	4	N	4
L	5		5				
	14		10		9		7

9.5 项目成本的安排和控制

- 如何对项目成本进行计划、安排和控制，以将成本控制在预算之内
 - PERT/Cost技术
- 基本假设
 - 完成一个活动所需的成本，在整个活动的工期内以固定的比例随时间增加（线性假设）

● Reliable公司项目预算

活动	估计工期（周）	估计成本（\$）	每周成本（\$）
A	2	180,000	90,000
B	4	320,000	80,000
C	10	620,000	62,000
D	6	260,000	43,333
E	4	410,000	102,500
F	5	180,000	36,000
G	7	900,000	128,571
H	9	200,000	22,222
I	7	210,000	30,000
J	8	430,000	53,750
K	4	160,000	40,000
L	5	250,000	50,000
M	2	100,000	50,000
N	6	330,000	55,000

安排项目成本

根据现有资金情况，决定项目活动（非关键活动）的开始时间。

● 利用Excel算出每周成本情况

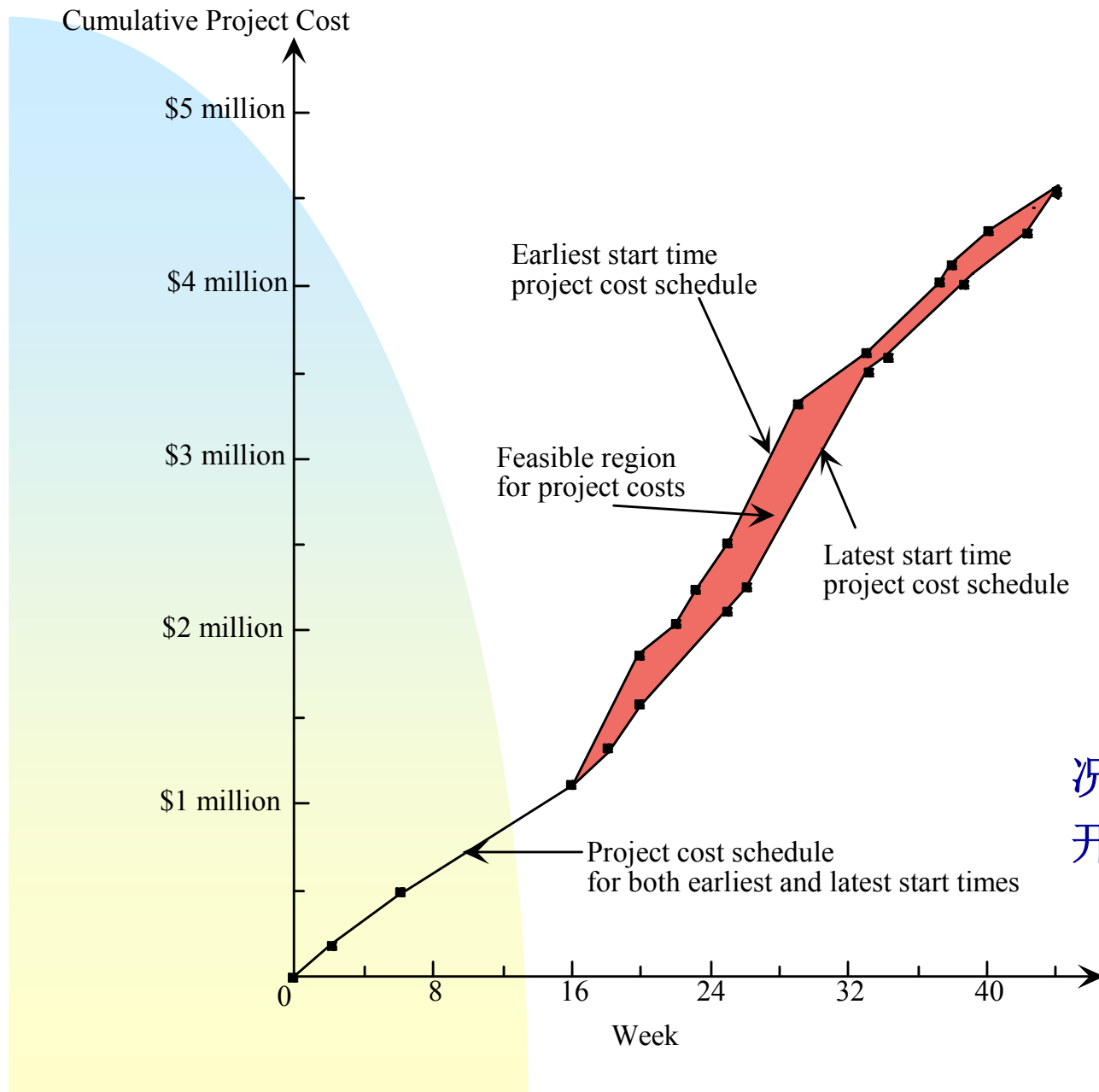
- 最早开工时间下的成本情况见：

Reliable ES Cost Schedule.xls

- 最晚开工时间下的成本情况见：

Reliable LS Cost Schedule.xls

● 绘出成本随时间变化的曲线（预算曲线）



根据可用资金的情况，可选择早开工还是晚开工。

项目成本的控制

监控成本的一条重要途径，就是每天将实际成本与预算曲线的上界进行比较。

此外，为找出问题所在，还需要了解单个活动成本状况的信息。

● 第22周后的PERT/Cost报表

活动	预算总成本	完成比例	完成金额	实际成本	成本超出量
A	180,000	100%	\$180,000	\$200,000	\$20,000
B	320,000	100	320,000	330,000	10,000
C	620,000	100	620,000	600,000	-20,000
D	260,000	75	195,000	200,000	5,000
E	410,000	100	410,000	400,000	-10,000
F	180,000	25	45,000	60,000	15,000
I	210,000	50	105,000	130,000	25,000
合计	\$2,180,000		\$1,875,000	\$1,920,000	\$45,000

从上表中可以看出，实际发生的成本（\$1920000）远小于预算曲线中的预算成本（2042000），表面看来项目预算执行很好，但实际上不难发现，**F和I的成本超预算十分严重。**

这是由于当前活动晚于项目预期进度，而在预算曲线中无法反映。**通过对单个活动的研究可以及时发现和解决超支成本。**

9.6 PERT/CPM方法存在的问题

- 工期均值和方差的近似处理
 - 对于乐观时间估计和悲观时间估计是十分困难的（稀有事件）
- 按期完工概率的近似处理
 - 实际中，很有可能存在其它路径比均值关键路径长，这将使得到的结果过于乐观
- 没有处理重叠活动
 - 优先日程图法（PDM）提供了重要补充
- 没有考虑有限资源约束
 - 如何分配资源使项目完工时间最短或成本最小

本章小结

- 项目网络的建立;
- 根据项目网络确定项目的进度安排与关键路径;
- 项目按期完工的概率;
- 时间与成本的优化平衡;
- 资源优化平衡;
- 项目成本的安排与控制。