

·学科进展·

网络系统运作过程机理的研究

任世贤

(贵州省科学技术电子计算机中心, 贵阳 550002)

[摘要] 通过工程实例,介绍了网络系统运作过程机理的研究成果及其理论和实用意义。

[关键词] 界定元素逻辑关系表, 界定输入时间, 初始网络, 初始时间参数, 关联时间

国内外现行的单、双代号网络的数学模型均具有逆向计算程序, 本文将这种模型具有逆向计算程序的网络计划称为传统网络。传统网络的数学模型存在系统结构不相容的错误^[1-3]。针对这一错误, 笔者在继承传统网络计划全部研究成果的基础上, 以系统科学为指导, 以图论和网络作为数理分析的依据, 引入符号学理论, 提出了网络计划技术的专门基础理论, 并依据该理论设计了网络数学模型没有逆向计算程序的新型网络计划方法——BANT网络计划技术。传统网络属于关系线路法(CPM)网络, 其数学模型简称 CPM 算法; 相应地, 本文将 BANT网络的数学模型简称 BANT 算法。国内外现行的项目管理软件都是以传统网络计划技术为基础的, 本文称为传统项目管理软件; 相应地, 本文将 BANT网络计划技术为基础的项目管理软件称为 BANT 项目管理软件。应当指出, 传统项目管理软件同样存在系统结构不相容的错误。

受人的决策和行为影响的系统称为事理系统^[4]。网络计划是关于事理系统运作周期定量、优化和控制的工程技术。网络计划是对客体系统(事理系统)的反映和认识, 它从时间的角度描述系统的运作形态, 以工作进度为核心来统帅和推动系统在人力、物力和费用等方面的管理, 因此, 它是一种科学的现代管理方法。网络计划是一个具有确定输入和输出及确定内态的人工概念系统。传统网络和 BANT 网络均为形式系统, 本文将这种实现了公理化和形式化的网络计划技术称为网络系统。研究网络系统运作过程的机理, 就是要从理论的高度来重

新审视传统网络和 BANT 网络对客体系统(事理系统)规律已有的全部认识和定量描述。

1 网络系统运作过程机理

图 1 揭示了网络系统运作过程的内在机理。本文将结合下面的工程实例来说明这一机理。

工程实例: 在图 2 所示某工程项目单代号网络的基础上, 要求在不增加资源的前提下, 分别设计将工期压缩 2 天和 4 天的网络计划。

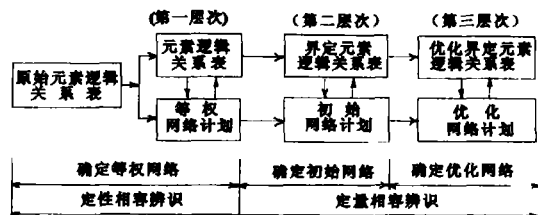


图 1 网络系统运作过程机理示意图

1.1 网络系统运作过程的构成及其特性

图 1 表明, 网络系统运作是一个系统过程, 该过程由以下三种网络系统结构形态构成:

(1) 定性网络系统结构形态。图 2 所示的单代号搭接网络是一张定性网络图。定性网络图通常是依据甲方提供的元素(工作或活动)逻辑关系表绘制的, 它可能存在逻辑关系的错误, 故本文将此表称为原始元素逻辑关系表。绘制定性网络图是为了消除原始元素逻辑关系表中可能存在的错误(例如赘联系和网络回路)。消除了逻辑关系错误的原始元素逻辑关系表称为元素逻辑关系表。

国家自然科学基金资助项目。
本文于 2000 年 5 月 29 日收到。

图 2 所示工程项目的元素逻辑关系表如表 1 所示,该表是依据图 2 绘制的。图 3 是图 2 所示工程项目的 BANT 定性网络图。图 2 中的图形符号“ $\textcircled{A} \rightarrow$ ”和图 3 中的图形符号“ $\textcircled{O} - \textcircled{A} \rightarrow$ ”、“ $\textcircled{O} \cdots \rightarrow$ ”、“ $\textcircled{O} \text{---}$ ”均具有独立的物理意义和稳定的结构,称为结构符号,通常称为绘图符号。定性网

络图可视为以绘图符号的权值为一绘制的网络图,例如,图 2 就是以元素周期(或持续时间) $D_i = 1$ 绘制的单代号网络图。因此,定性网络又称为等权网络。等权网络系统结构形态即是等权网络关于网络系统的全部描述。

表 1 图 2 所示工程项目的元素逻辑关系

前导元素(i)	继前元素(j)	D_j	搭接条件	前导元素(i)	继前元素(j)	D_j	搭接条件
Start	A	6		C、D	F	14	C STS = 3 & FTF = 6 F D FTF = 14 F
A	B	8	A STS = 2 B	D	G	4	
A	C	14	A FTF = 4 C	F、E	H	4	F STS = 2 H E STS = 4 H
A	D	10	A FTF = 2 D	G	I	6	G FTF = 4 I
B、C	E	10	B FTS = 2 E C STS = 6 E	H、I	End		

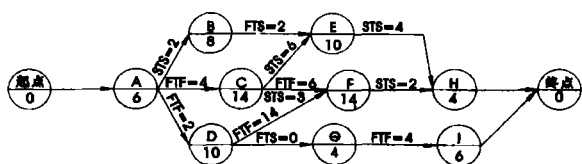


图 2 某工程项目的单代号等权搭接网络计划

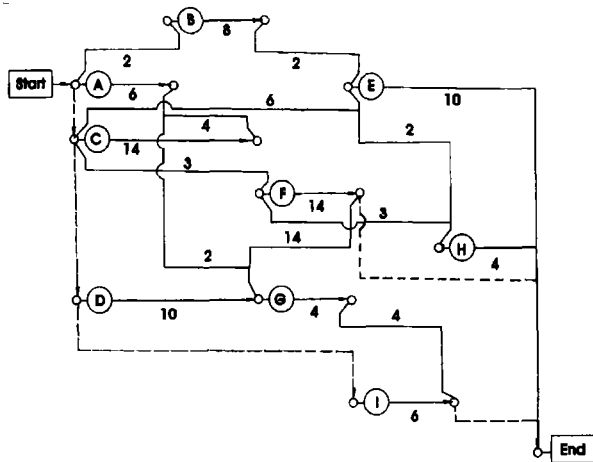


图 3 图 2 所示工程项目的 BANT 等权搭接网络计划

表 1 和图 2 及图 3 都准确表达了同一工程项目的逻辑关系,因此,可作两点阐述:第一,元素逻辑关系表与等权网络所表达的逻辑关系具有一一对应关系;第二,图 2 \equiv 图 3,即不同的网络绘图符号语言描述同一个事理系统时具有同一性。这种表与图之间一一对应关系和不同网络绘图符号语言之间的同一性统称为网络能指的同一性。元素逻辑关系表或等

权图中的时间参数称为输入时间参数,其权值称为输入时间。

综上,定性网络系统结构形态是由元素逻辑关系表和等权网络图描述的,网络能指的同一性是该运作形态的鲜明特性。定性网络系统结构形态的特性参见表 3。

(2)初始网络系统结构形态。当定性网络确定后,即可依据定性网络图(或元素逻辑关系表)对工程项目进行定量分析。依据定性网络定量界定后得到的网络系统结构称为初始赋权网络。初始网络、初始调整网络和初始临界网络(参见文献[2])统称初始赋权网络。初始网络系统结构形态即是初始赋权网络关于网络系统的全部描述。BANT 网络 and 传统网络关于初始网络的定量分析方法本质上是相同的。在本文的工程实例中,可直接依据图 2 和图 3 进行定量分析得到初始网络(图 4)。应当指出的是,初始网络和临界网络是以网络图来区分的:初始网络图中存在可以沿 Time 轴方向移动的绘图符号(参见图 4B);而临界网络图中则不存在。初始网络图和临界网络图分别由初始时间参数和关联时间参数(参见文献[3])的值界定。图 4B 是用时标网络方式表达的。在 BANT 时标网络中,网络曲线由绘图符号构成,每一个绘图符号及其运作形态都对应一个时间参数,而每一时间参数都具有对应的数学表达式,故时标网络曲线的构图(网络画法)与网络曲线的定量分析(网络算法)具有一一对应的关系。网络绘图符号与网络时间参数和网络曲线模型(网络画法)与网络数学模型(网络算法)所具有的这种一

一对应关系,称为网络能指与网络所指的同一性。这就是 BANT 网络具有时标网络的理论根据。表 2 是依据图 4B 所示的 BANT 初始网络绘制的元素逻辑关系表,称为界定元素逻辑关系表。表 1 和表 2 的逻辑关系是相同的,但二者的输入时间不相同。界定元素逻辑关系表或初始网络中的时间参数称为界定输入时间参数,其输入时间称为界定输入时间(以下类推)。

综上,初始网络系统结构形态是由界定元素逻辑关系和初始网络图描述的,网络能指和网络所指的同一性是该结构形态的鲜明特性。初始网络系统结构形态的特性参见表 3。

(3)优化网络系统结构形态。当初始网络确定后,即可依据初始网络图(或界定元素逻辑关系表)对工程项目(或事理系统)进行优化分析。BANT 网络在继承传统网络关于工期优化和资源优化全部研究成果的基础上,将网络计划优化严格划分为网络

优化调整和网络优化设计两部分,前者不改变初始网络的系统结构,后者则将改变初始网络的系统结构。初始网络的系统结构是由逻辑关系和界定输入时间确定的。逻辑关系反映了事理系统结构的基本属性,故逻辑关系是不允许改变的。可见,网络优化设计实际上改变的是界定输入时间。依据初始网络的系统结构,改变界定输入时间得到的网络系统结构称为优化赋权网络。优化赋权网络由优化网络、优化调整网络和优化临界网络构成。优化网络系统结构形态就是优化赋权网络的关于网络系统全部描述。初始赋权网络和优化赋权网络统称为称赋权网络。

综上,优化网络系统结构形态是由优化界定元素逻辑关系表和优化网络图描述,同初始网络系统结构形态一样,网络能指和网络所指的同一性也是该结构形态的鲜明特性。优化网络系统结构形态的特性参见表 3。

表 2 图 2 所示工程项目的界定元素逻辑关系表

前导元素(i)	继前元素(j)	D _j	搭接条件	前导元素(i)	继前元素(j)	D _j	搭接条件
Satrt	A	6		C、D	F	14	▲C STS = 10 & FTF = 6 F D FTF = 14 F
A	B	8	A STS = 2 B	D	G	4	
Start, A	C	14	A FTF = 4 C	F、E	H	4	▲F STS = 6 H E STS = 4 H
Start, A	D	10	A FTF = 2 D	G	I	6	G FTF = 4 I
B、C	E	10	B FTS = 2 E ▲C STS = 12 E	H、I	End		注:▲表示已经改变的搭接条件

表 3 三种网络系统结构形态比较表

i \ j	网络系统结构构成	网络系统的时间系数	网络能指、网络能指和网络所指的同一性	所在层次
定性网络系统结构形态	等权网络	输入时间参数	元素逻辑关系表和等权网络图描述的逻辑关系具有一一对应的关系	第一层次
初始网络系统结构形态	初始网络	界定输入时间参数	图由界定输入时间参数和关联时间参数界定,图与数之间具有一一对应关系	第二层次
	初始调整网络 始临界网络	初始时间参数 初始关联时间参数	图由界定输入时间参数和初始时间参数界定,图与数之间具有一一对应关系	
优化网络系统结构形态	优化网络	优化界定输入时间参数	图由优化界定输入时间参数和优化初始时间参数界定,图与数之间具有一一对应的关系	第三层次
	优化调整网络	优化初始时间参数		
	优化临界网络	优化关联时间参数	图由优化界定输入时间参数和关联时间参数界定,图与数之间具有一一对应关系。	

通过对构成网络系统运作过程的三个网络系统结构形态的分析,本节得到以下结论:

(i)等权网络是由逻辑关系确定的,初始网络和优化网络(参见图 6)则分别由界定输入时间和优

化界定输入时间确定。

(ii)等权网络是生成初始网络的根据,而初始网络则是生成优化网络的根据。

(iii)确定等权网络是一个定性相容辨识的过

程,而确定初始网络和优化网络则是一个定量相容辨识的过程(参见第 1.4 节)。

1.2 网络系统运作过程的层次结构特性

网络系统运作过程具有层次结构的特性,依据图 1 说明如下:

(1)三种网络系统结构形态分别处于第一、第二和第三层次上,构成网络系统运作的全过程。

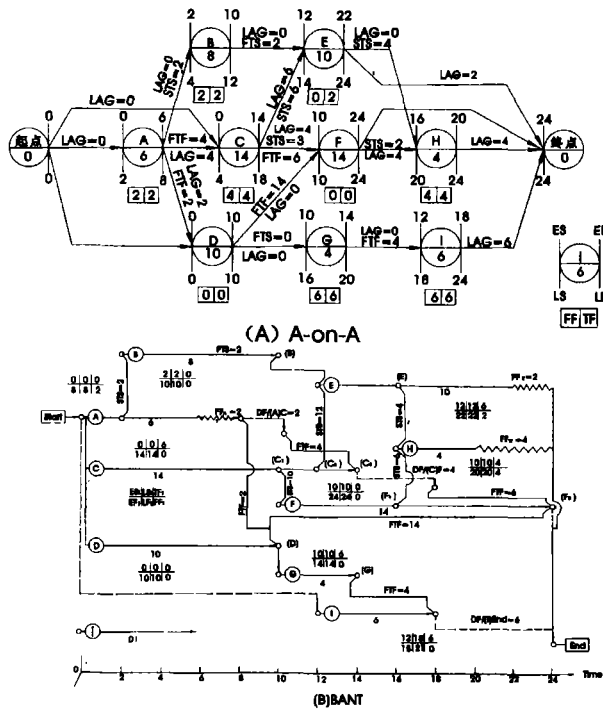


图 4 图 2 所示工程项目的初始搭接网络计划

(2)高层次的网络系统结构形态具有低层次网络系统结构形态的基本属性和特性。例如,逻辑关系确定等权网络的系统结构,这是定性网络系统结构形态的基本属性,在网络系统运作的全过程中,事理系统的逻辑关系始终保持不变,表明初始网络系统结构形态和优化网络系统结构形态保留了定性网络系统结构形态的基本属性。又例如,在 BANT 网络中,网络能指和网络所指的一性是初始网络的鲜明特性,BANT 算法同样适用于优化网络,表明优化网络也具有这一特性。

(3)较高层次的网络系统结构形态的运作方式总是优于较低层次的网络系统结构形态。例如,从等权网络到初始网络是一个系统结构的优化过程,该过程是应用特定的网络算法(例如 CPM 算法或 BANT 算法)实现的;从初始网络到优化网络则是一个更高层次的系统结构的优化过程,在 BANT 网络中,这种优化不再通过特定的算法,只需要改变界定

输入时间即可实现(参见第 1.4 节)。

1.3 网络系统运作过程的相容特性

在网络系统运作全过程的三个层次上,对于每一层次上的网络系统结构形态,除都具有网络能指的一性外,在初始网络和优化网络这两个层次上,还具有网络能指和网络所指的一性。这两种一性表现为不同层次之间的联系,它们是网络系统运作的内在动力。因此,本文将同一层次上网络能指的一性、网络能指和网络所指的一性统称为网络系统运作过程的一性(或相容性、或协调性或统一性),简称网络系统的相容性。应当指出,由于初始网络和优化网络是一个定量分析的概念,因此,界定元素逻辑关系表和优化界定元素逻辑关系表与初始网络和优化网络之间一一对应的关系,不仅体现了网络能指(表与图)的一性,更主要的是还体现了网络能指和网络所指(表、图与算法)的一性。

1.4 网络系统运作过程的优化特性

消除网络系统中的赘联系和网络回路,是确定元素逻辑关系表(或等权网络图)要解决的两个问题,这是一个定性相容辨识的过程。初始网络是依据元素逻辑关系表(或等权网络图)按照特定的网络算法计算后产生的。输入时间是统计数据或经验数据或人为确定的数据,因此,输入时间之间存在着不协调性。网络教学模型应在消除输入时间之间的不协调性后,确保输出时间(即输出时间参数的值)之间的相容性。可见,网络计算的过程是一个定量相容辨识的过程。初始网络是网络优化的根据。在进行资源优化时,应首先进行网络系统结构的优化。在 BANT 初始网络中,由于界定元素逻辑关系表与初始网络图具有同一性,故可以直接通过改变界定输入时间实现初始网络系统结构的优化。

系统结构相容辨识是网络计划优化的实质。网络系统运作的全过程即是一个从定性相容辨识到定量相容辨识的过程,这是一个网络系统结构优化的过程。

2 网络系统运作过程机理研究成果的意义

网络系统运作过程机理研究是网络计划专门基础理论的一个重要课题,其研究成果对该专门基础理论的建立、网络计划技术的研究、网络计划软件的研制等方面都具有基础性意义。限于篇幅,本文对其理论方面的意义不作论述,仅对其应用方面的意义作以下简介。

2.1 在网络算法设计中的应用

网络系统运作过程机理的研究成果(以下简称机理研究成果)指出,网络系统的相容性是网络算法设计的理论根据。按照本文第 1.2 节(2)的论述,应依据初始网络的相容性来设计网络算法。

(1)CPM 算法逆向程序系统结构不相容错误的一个理论根据

CPM 算法在计算本文工程实例的初始时间参数时,表 1 所示元素逻辑关系表的输入时间已经发生了改变(参见表 2)然而,CPM 算法逆向程序在计算初始关联时间参数时应用的仍然是表 1 中的输入时间,这显然是错误的。同理,CPM 算法逆向程序在计算优化关联时间参数时,同样也犯了相同的错误。应当指出的是,此时,CPM 算法在经过了初始时间参数和优化初始时间参数的两次计算后,本文工程实例中输入时间参数的值已经由输入时间改变为界定输入时间(参见表 2)最终改变为优化界定输入时间。CPM 算法的设计是由传统网络系统运作过程规定的(图 5)。将图 1 和图 5 比较后可以看出,传统网络系统没有建立初始网络和优化网络的能指和所指的相容性层面,亦即未建立界定元素逻辑关系表和优化界定元素逻辑关系表与初始网络图和优化网络图之间的一一对应关系。网络系统的相容性,可认为是网络算法设计的原理或必须遵循的基本规则。因此,违背了网络系统的相容性是造成 CPM 算法逆向程序系统结构不相容错误的理论原因。

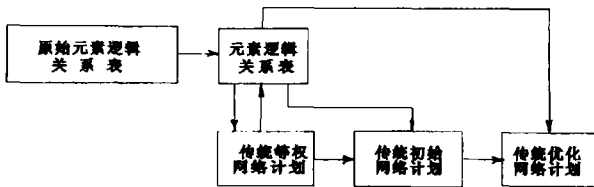


图 5 传统网络系统运作过程示意图

(2)BANT 算法的系统设计

BANT 算法是依据初始网络的相容性设计的。亦就是说,在 BANT 算法中,是应用界定输入时间来计算初始时间参数的。应当指出,BANT 算法(参见文献[3])的成功设计还在于系统地解决了以下具体问题:

(i)赋予各种 BANT 网络计划类型以时标网络的表达方式。初始网络是一个关于定量分析的概念。BANT 初始网络能指和所指的相容性,在网络曲线模型的表达方式上体现为典型的时标网络。

(ii)建立了虚元素的基础理论,解决了虚元素定量分析的问题^[5]。

(iii)提出了关联时差^[6]的数学表达式,这是建立没有逆向计算程序的 BANT 算法的关键。

BANT 算法不仅适用于初始网络,而且也适用于优化网络(参见图 6)。

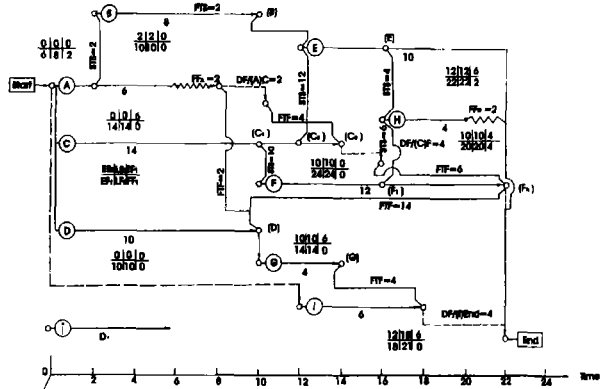


图 6 图 2 所示工程项目的 BANT 优化搭接网络计划(工期压缩 2 天)

2.2 对项目管理软件研制的意义

项目管理软件都是以网络计划技术为基础的。目前国际上最流行的六个项目管理软件是传统项目管理软件的典型代表^[7]。其中,美国 Primavera 公司的 P3(Primavera Project Planner)是集传统项目管理软件之大成者。笔者的《BANT 综合网络计划技术软件》(以下简称 BANT1.0)已经获得中华人民共和国国家版权局颁发的《计算机软件登记证书》(登记号为 980146)。P3 存在 CPM 算法逆向程序系统结构不相容的错误,BANT1.0 不存在这一错误。本节将用这两个软件进行比较,说明机理研究成果对项目管理软件研制的具体指导意义。

(1)网络系统结构是网络优化的根据

在不增加资源的情况下,如何将图 4 所示的初始网络的工期压缩 2 天和 4 天呢?

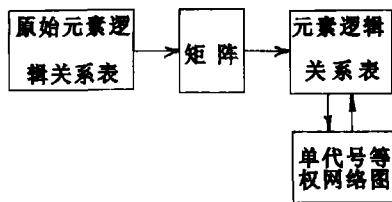
BANT 网络是典型的时标网络。从图 4B 可以看出,将界定输入时间 STS/CF = 10 和 STS/FH = 6 改为 STS/CF = 8 和 STS/FH = 8 后,即可得到符合要求的压缩 2 天的网络计划。在 BANT1.0 中,只需要在图 4B 上修改 STS/CF 搭接链的权值后,计算机就可以自动处理一切,生成图 6 所示的优化网络。依据图 4B,用同样的方法,计算机可以自动生成符合要求的压缩 4 天的网络计划。机理研究成果指出:网络系统结构是网络优化的根据。BANT1.0 据此设计优化程序:先在初始网络系统结构优化的基础上进

行资源优化;再以资源优化后的网络系统结构为根据实现网络系统结构的优化设计。

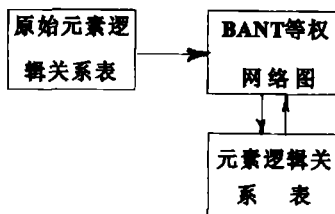
在 P3 中,单代号网络没有自身符号体系的时标网络,现行的单代号时标网络本质上是横道计划,而横道计划不能反映网络系统结构。另外,前面已经述及,传统网络没有建立初始网络和优化网络的能指和所指的相容性层面。因此,P3 不能像 BANT 软件这样来完成符合本文工程实例要求的设计。

(2)实现定性相容辨识的途径

用矩阵和等权网络图均可描述同一工程项目的逻辑关系,称为等权网络和矩阵具有同一性。应用此同一性可鉴别原始元素逻辑关系表中存在的网络回路。修正后的原始元素逻辑关系表即为元素逻辑关系表。项目管理软件实现网络算法可视化的现行作法有两种(图 7):一是应用矩阵手段,由原始元素逻辑关系表先生成元素逻辑关系表后再生成等权网络图,这是传统项目管理软件的作法^[8](例如 P3);二是应用网络构图规则,由原始元素逻辑关系表先生成等权网络图,并同时(在内部)生成元素逻辑关系表,这是 BANT 项目管理软件的作法(例如 BANT1.0)。显然,P3 用矩阵方法鉴别网络回路的编程工作量是相当大的,并且,绘制单代号等权网络图的工作同样要做。应当指出,P3 不可能采用 BANT1.0 实现定性相容辨识的方法,这是因为传统网络没有实现结构符号化。网络曲线模型的结构符号化应做好两点:一是赋予各种网络计划类型的系统要素以统一的绘图符号;二是解决好绘图符号之间构图的协调性。



(A) P3 软件



(B) BANT1.0 软件

图 7 项目管理软件实现定性相容辨识的两种方法

(3)关于网络算法的可视化

科学计算可视化是计算机学科的一个新兴的分支领域,其任务是将计算机关于工程项目计算出的庞大而难以理解的数据信息,转换为计算机图形信息或图像信息,以便正确地理解和把握计算机中的各种现象和结果。网络图由绘图符号构成,而绘图符号携带网络信息,故网络曲线是一种图形信息。时标网络是一种在时间座标中绘制的定量图形,这是一种典型的网络图形信息。从表面上看,BANT1.0 和 P3 都是将依据等权网络计算出的数据转换为时标网络的,但是,机理研究成果指出,二者关于实现网络算法可视化的方法具有本质的不同。现作如下论述:

BANT 时标网络是典型的时标网络,其画法(网络能指)和算法(网络所指)之间具有一一对应的关系,绘制 BANT 时标网络的过程就是用 BANT 算法进行定量分析的过程。在 BANT1.0 中,实现 BANT 算法可视化的具体作法是:在绘制 BANT 等权网络计划程序的基础上,编制相应的绘制 BANT 时标网络计划的程序。单代号网络没有反映虚元素的功能(参见文献[5]);并且,单代号网络的绘图符号在 Time 轴上的投影为一点,故单代号网络没有自身符号体系的时标网络的表达方式。横道计划是一种最低层次的符号语言。例如,在 BANT 网络中,用表 4 和表 5 中的绘图符号即可用时标网络表达肯定型网络和非肯定型网络的各种网络计划类型,横道计划不可能做到这一点。在 P3 中,实现 CPM 算法可视化的具体作法是:依据单代号等权网络图,先按 CPM 算法计算出初始网络(或工程项目)的初始时间参数和关联时间参数,然后按最早时间参数(ES_i和 EF_i)的值绘制单代号时标网络(横道计划)并标定相关的初始时间和关联时间。显然,尽管 BANT1.0 和 P3 都是用编制一个独立程序的方法实现其网络算法的,但二者实现网络算法可视化的方法却具有本质的不同:前者是一个与 BANT 算法等价(或具有同一性)的、按照 BANT 时标网络的构图

表 4 BANT 肯定型网络的绘图符号

网络类型	绘图符号	绘图符号之间的关系
基本网络	○— —○	
搭接网络	○—○	
流水网络	○— — —○	
有时限网络	○	
综合网络	由以上绘图符号构成	

表5 BANT非肯定型网络的绘图符号

BANT-DCPM 网络计划		↑	<ul style="list-style-type: none"> • 非肯定型网络的元素绘图符号, 表示周期具有不确定性的元素(工作或活动)。 • 由单枝发向多枝发展。 • 对于多枝元素, 只要其中一枝实现, 则该元素的周期即实现。 • 不是采用概率算法, 而是用特定的方法对元素周期的不确定性进行处理后, 按关键线路法进行网络定量分析。
BANT-SPA 网络计划			
BANT-PERT 网络计划			

规则和读值方法编制的时标网络程序;后者编制的是一个与 CPM 算法不等价(或不具有同一性)的、用按照 CPM 算法计算出的时间参数绘制单代号时标网络图(横道计划)的程序。应当指出的是,网络算法可视化首先是一个网络理论问题,其次才是计算机实现手段问题。图与数,图与矩阵和图与计算机语言的同一性,是网络能指和网络所指同一性的具体表现方式,网络算法可视化要解决的则是计算机语言与时标网络的同一性问题。

参 考 文 献

[1] 任世贤. 单、双代号网络算法系统结构不相容的揭示. 系统工程

理论与实践,1995,(4):1-9.

[2] 任世贤. 传统网络总时差计算方法的商榷. 系统工程理论与实践,1997,17(11):130-140.

[3] 任世贤. CPM 算法逆向计算计算错误的原因. 系统工程理论与实践,1999,19(7):45-51.

[4] 许国志. 论事理. 系统工程论文集. 北京:科学出版社,1981

[5] 任世贤. 论虚元素. 系统工程理论与实践,1999,19(1):69-78

[6] 任世贤. 论关联时差. 贵州科学,1992,10(1):15-22.

[7] 王守清编. 建筑工程管理微机软件及应用. 北京:中国建筑工业出版社,1996.

[8] 冯允成. 活动网络分析. 北京:北京航空航天大学出版社,1991.

RESEARCH ON PROCESS PRINCIPLE OF NETWORK SYSTEM

Ren Shixian

(Computer Center of Science and Technology of Guizhou Province, Guiyang, 550002)

Abstract Based on engineering example, this paper introduced the positive result and pragmatic significance about the research of process principle of the network system

Key words logical relations form of activity after calculation, entering time after calculation, network about earliest time, initial time parameter, dependent time