

重复性项目调度与网络模型转化方法研究^①

张立辉, 潘楚云, 邹鑫
(华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 重复性项目调度方法(repetitive scheduling method, RSM)与网络模型在项目调度领域具备各自的优势. 本文提出了一种将RSM转化为网络模型的方法, 并对RSM和转化后的网络模型在关键路线、工序关键性和时差等方面进行了比较分析. 这种转化方法建立了一套将RSM中各种类型工序和约束关系转化为网络模型的规则, 能够表示对资源连续性的要求, 解决了已有转化方法中RSM和转化后的网络模型在总工期、关键路线和时差上不一致的问题; 同时还能在网络模型中体现距离约束和项目在空间上的进度, 解决了网络模型不能表示距离约束和空间冲突的问题. 文章以一个重复性项目为例进行了说明与比较, 并通过对工序关键性的理论分析, 揭示出已有转化方法无法将RSM成功转化为网络模型的原因. 本文提出的转化方法能为项目经理提供一种沟通RSM和网络模型的工具.

关键词: 资源连续性; 转化; 控制路线; 关键路线; 时差

中图分类号: TB115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2014)06-0049-11

0 引言

重复性项目(repetitive projects)是指在工程的每个单元各个工序不断重复进行的项目, 例如高速公路、管道工程、铁道工程、隧道工程、高层建筑等. 我国现在处于基本建设大发展时期, “十二五”期间全国铁路运营里程将由现在的9.1万km增加到12万km左右, 高速公路网总里程将由“十一五”末的230万km达到450万km, 随着城市建设的发展, 其它如地铁、高楼项目如雨后春笋般涌现. 这些项目投资大、工期长, 项目的优化调度具有重要意义, 因此有必要开发出具有针对性的项目计划和调度方法. 鉴于传统网络模型在重复性项目管理领域的不足, 国外学者根据重复性项目的特点提出了诸如“重复性项目调度方法(repetitive scheduling method, RSM)”^[1], “平衡线图(line of balance, LOB)”^[2-6], “线性调度模型(linear scheduling methods, LSM)”^[7-8], “kallantzis-lam-

bropoulous 重复性项目调度方法(kallantzis-lam-bropoulous repetitive project model, KLRPM)”^[9]等, 本文中统称为重复性项目调度方法(repetitive scheduling method, RSM). RSM中将决定项目总工期的路线称为控制路线(controlling path). 很多学者提出了RSM中确定控制路线的方法^[1, 7, 10], Zhang和Qi^[10]还根据各种控制工序对总工期影响的差异, 将控制工序分为前向控制工序、后向控制工序和点控制工序.

以关键路线法(critical path method, CPM)、广义优先网络(activity networks under generalized precedence relations, GPRs)为代表的网络模型是常用的项目计划与调度方法, 能清晰表明项目各工序之间的时序关系, 功能强大, 应用范围广泛. 但是, 在应用到重复性项目领域时, 与RSM相比它存在以下缺点: (1) 网络模型无法表示资源连续性^[1, 11], 而RSM由于其内在特性可以表示资源连续性. 资源连续性是指某工序在执行过程中要

① 收稿日期: 2012-09-07; 修订日期: 2014-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271081); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13ZD08).

作者简介: 张立辉(1974—), 男, 湖南宁乡人, 博士, 教授. Email: zlh6699@126.com

求持续不间断的进行,而且效率不发生改变.重复性工程项目中经常存在资源连续性要求.(2)网络模型无法像RSM一样表示项目在空间上的进度.另外,在重复性项目中,如果多组工程队在同一地点施工,则称该处发生了交叉.若计划时发生交叉,RSM能为工程队提供施工调整的信息,以此规避交叉的发生,但网络模型无法实现此功能.(3)RSM技术可以很方便的实现调整和更新,而更新网络模型的计算量普遍很大^[12].由于重复性工程项目中每个工序的每个单元(以下简称子工序)对应着网络模型中的一个工序,一个重复性工程项目对应的网络模型往往包含成千上万个工序.当项目中某个工序或约束需要调整时,更新网络模型的工作量很大.(4)项目管理者无法像RSM那样,通过网络模型直观地了解工作效率^[13,14].RSM使用时间和空间两个变量,可以从调度结果中识别工作效率.而网络模型中只有时间这一个变量,所以不具备这项功能.综上所述,在重复性项目这个特殊领域,RSM相比网络模型具有更强的优势,方便了管理者的计划和调度工作.但是,网络模型在项目管理领域已被广泛接受和承认,该领域的研究成果能够有效解决工程实践中的诸多问题^[15-17],它甚至常常被作为项目合同的必要组成部分.而且经过多年的发展,针对网络模型已经开发出许多成熟的商业软件,便于项目管理者的使用.因此,如果能够研究出将RSM转化为网络模型的技术,项目经理就能同时利用两种方法的优点.

许多学者研究了将RSM转化为网络模型的方法.Yamin等^[12]在使用便利性、计算的精确性和关键路线方面对RSM和CPM进行比较,并用几个项目实例进行了验证.但是其使用的项目实例都过于简单,没有暴露出两种方法之间的一致性.Gransberg^[18]提出利用优先关系将RSM转化为CPM的方法,但该文献主要着重于两种方法中工序如何分解,对RSM中控制路线与CPM中关键路线是否一致并没有提及,也没有提出如何在CPM中保持工序连续性的方法.Kallantzis等^[19]提出了一种将RSM转化为优先网络模型的方法,并用25个随机产生的重复性项目对该方法进行了检验.结果显示在大多数情况下,RSM中控制路线与网络模型中关键路线都无法保持一

致.相应的,同一个项目用两种方法进行计划后的总工期也不相同.只有在去除资源连续性的要求后,RSM和网络模型才能够保持一致.该文献认为,造成不一致的原因是网络模型无法表示RSM中的资源连续性约束.

RSM和网络模型还在工序关键性及时差方面存在差异.在CPM中,关键工序工期的增减与总工期的增减呈同向变化.而在RSM中,Harris等^[1]和Kallantzis等^[19]发现了一个奇异现象,即控制路线上某些子工序工期的增减与总工期的增减呈反向变化.Harmelink等^[7]甚至认为具有这种奇异性质的工序不能称作控制工序.RSM领域中有关时差的研究成果为数不多,甚至目前还没有公认的定义与计算法则.也有一些学者提出了不同于网络模型的时差概念,例如“效率时差”(rate float)^[20].但即便是“总时差”,“自由时差”和“安全时差”这些原有的概念,其定义和计算法则也与网络模型的有所不同^[21].

本文研究将RSM转化为等效的网络模型的方法.通过对GPRs加以改进,该方法力图在网络模型的框架下表示RSM中包括距离约束在内的各种约束关系,以及RSM中对资源连续性的要求,同时表示项目在时间和空间上的进程.随后通过对RSM和网络模型在项目总工期、控制路线与关键路线、工序关键性、时差方面进行对比分析,验证了这两种方法可以实现统一,也说明了本文提出的转化方法的正确性.

1 RSM转化为网络模型的方法

一般来说,RSM中存在三种类型的工序和两种约束关系.这三种工序分别为线形工序、条形工序和块形工序,两种约束关系分别为逻辑关系和优先关系.逻辑关系存在于同一工序内各单元之间,它代表各单元发生的逻辑顺序以及可能存在的资源连续性约束.而优先关系表示各工序之间的约束关系,具体包括时间约束和距离约束.本节研究如何将这三种类型的工序和两种约束关系转化到网络模型中.本文采用的网络模型是基于双代号的广义优先网络(GPRs)^[22].为了表达更清晰,本文用实弧表示工序,用虚弧表示工序之间的约束关系.

1.1 工序转化的方法

如图 1 所示, RSM 中的线形工序根据单元数量被拆分成若干个子工序. 每个子工序都将被转化为 GPRs 中的一个工序. 每个条形工序都可以转化成 GPRs 中的一个工序. 对于块形工序, 若其跨度大于一个单元, 则可被拆分成几个子工序, 然后进行转化.

在网络模型中, 工序由代表开始和结束时间的两个节点, 以及连接它们的两条方向相反的有向弧表示. 被赋予正值的正向弧代表该工序工期的最小值, 而被赋予负值的反向弧表示该工序工期的最大值. 由于 RSM 中工序工期的变化会破坏资源的连续性, 同时在 GPRs 中工序工期的变化可能导致网络不可行^[22], 因此与其它类似文献^[12, 15, 16, 19]一样, 本文假定工序的工期是固定的. 以 d_k 表示 RSM 中任意子工序 k 的工期, 则 GPRs 中对应工序的正向弧取值 d_k , 负向弧取值 $-d_k$.

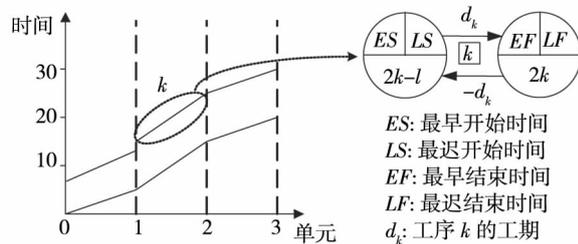


图 1 子工序的转化

Fig. 1 Conversion of sub-activity

1.2 逻辑关系转化的方法

在 GPRs 网络模型中工序之间的关系都由优先关系体现. 本文用连接两相邻工序的虚弧表示. 若虚弧由紧前工序指向紧后工序, 则其被赋予正值, 表示紧前工序与紧后工序之间的最小时间间隔; 相反, 若虚弧由紧后工序指向紧前工序, 则其被赋予负值, 表示紧前工序和紧后工序之间的最大时间间隔.

在 RSM 中, 逻辑关系存在于同一工序上各子工序之间. 逻辑关系包括各子工序发生的逻辑顺序和对该工序的资源连续性要求. RSM 中的逻辑关系转化到 GPRs 网络模型中由优先关系体现. 逻辑顺序决定子工序执行的先后次序. 通常来说, 任意一个工序中紧后子工序须在紧前子工序结束后才能开始. 这种先后顺序可由网络模型中的结束开始型 (finish-start, FS) 关系来表示.

在 RSM 中, 许多工序经常具有资源连续性的要求, 即在同一工序中紧后子工序必须在紧前子

工序结束后立即开始. 在以往的研究中, 子工序之间的资源连续性无法在网络模型中表示; 在本研究中, 利用权值为 0 的正、反两条虚弧来表示工序之间的资源连续性.

如图 2 所示, 工序 (1) 和工序 (2) 之间仅有一条正向且权值为 0 的虚弧, 表示它们之间是结束开始的关系, 但不存在资源连续性要求; 工序 (2) 和工序 (3) 之间存在两条方向相反、权值为 0 的虚弧, 表示它们之间是结束开始关系并存在资源连续性要求.

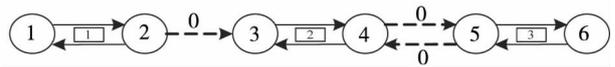


图 2 逻辑顺序

Fig. 2 Logic relations

1.3 优先关系转化的方法

网络模型中优先关系有四种, 分别是结束开始型 (finish-start, FS), 结束结束型 (finish-finish, FF), 开始开始型 (start-start, SS) 和开始结束型 (start-finish, SF). RSM 中优先关系包括时间约束和距离约束. 在将 RSM 转化为网络模型时, 时间约束容易由网络中四种优先关系来表示. 对于距离约束, 则需要先将具有约束关系的子工序进行配对, 再通过四种优先关系来表示配对后子工序之间的约束.

通过以上步骤即可建立所需的网络模型. 然后利用标号修正算法^[23] 计算各节点的最早时间参数, 再根据条件 $es_n = ls_n$ (其中 es_n 和 ls_n 分别代表结束虚节点 n 的最早结束时间和最晚结束时间), 计算各节点的最晚时间参数. 计算出时间参数后就可以确认该网络计划的关键路线.

1.4 空间进度的表示

一般的网络模型都是一维的, 仅能表示工程项目的进度. RSM 则是二维的, 能同时表示工程项目的时间和空间进度. 将 RSM 转化为网络模型后, 为了适应表示空间进程的需要, 本文中在网络图下方新增了一条带单元数的水平轴, 并使各工序与其所在单元相对应. 通过这条水平轴不仅可以识别任意工序的施工地点, 还能识别网络中的工序如何与 RSM 中的子工序对应.

在网络模型中, 如果多个工序在同一单元内发生交叉, 则称在该处发生了冲突. 如图 3 所示, 在 RSM 中, 当子工序 M_i 与 N_j 相交时, 就代表着它们在同一个空间位置会发生冲突, 由此可能造成

效率的降低从而导致总工期延误. 在一般的网络模型中, 空间位置上的冲突是无法被观察到的, 这也是其受到批评的一个方面^[18]. 而在本文网络模型中, 通过一条水平轴表示项目的空间进度且各工序都与其空间位置相对应, 可以观察到工序间在空间位置上的冲突. 对于任意工序 M_i 与 N_i , 当

以下任意一种情形下发生时, 表示它们存在空间冲突. 1) $ES_{M_i} < ES_{N_i}$ 且 $EF_{M_i} > EF_{N_i}$; 2) $ES_{M_i} < LS_{N_i}$ 且 $EF_{M_i} > LF_{N_i}$; 3) $LS_{M_i} < ES_{N_i}$ 且 $LF_{M_i} > EF_{N_i}$; 4) $LS_{M_i} < LS_{N_i}$ 且 $LF_{M_i} > LF_{N_i}$. 可见本文提出的网络模型能如 RSM 一样显示出项目在空间上的进度和冲突.

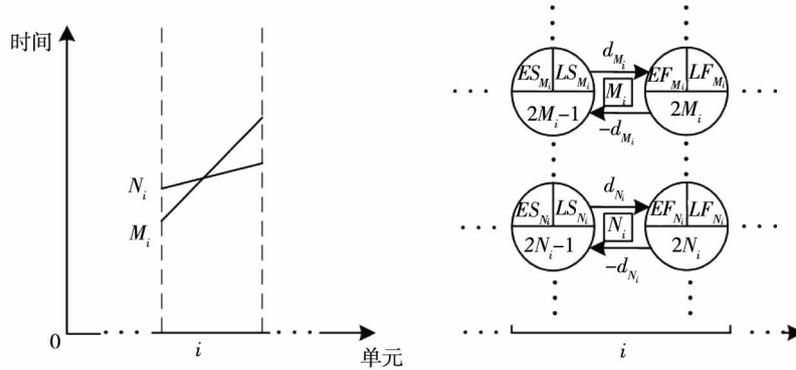


图3 空间进度上冲突的显示

Fig. 3 Display the conflict in space

2 RSM 的控制路线与网络模型的关键路线之间的比较分析

本文以文献 [19] 中的天然气管道工程为例, 具体说明 RSM 转化为网络模型的步骤, 并将 RSM 中的控制路线与网络模型中的关键路线进行比较. 该项目共 5 个单元, 每个单元依次包括 5 个重复性工序: 挖掘、铺设管道、测试管道、回填和修复, 具体工程信息如表 1 所示. 本文采用 Zhang 和

Qi^[10] 提出的方法确定 RSM 中的控制路线和控制工序. 采用 Elmaghraby 和 Kamburowski^[22] 的方法确定 GPRs 网络模型中的关键路线和关键工序.

为了更清楚地说明资源连续性要求对工程项目的影 响, 本文拟区分三种不同的资源连续性条件, 分别是: (1) 所有工序必须满足资源连续性约束(情形 1); (2) 除工序 C 以外所有工序无须满足资源连续性约束(情形 2), 即工序 C 不允许间断; (3) 所有工序都没有资源连续性约束(情形 3), 即所有工序都允许间断.

表 1 工程信息

Table 1 Sample project data

活动名称 / 单元	工作效率 (km/d)					约束类型	约束量
	1	2	3	4	5		
挖掘(A)	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5		
铺设管道(B)	1/10	1/10	1/4	1/4	1/4	时间	2d
测试管道(C)	1	1	1	1	1	距离	2km
回填(D)	1/9	1/8	1/8	1/8	1/8	时间	3d
修复(E)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	距离	1km

2.1 基于情形 1 的比较分析

情形 1 中, 所有工序要求保持资源连续性. RSM 调度结果如图 4 所示, 图中加粗的路线为控制路线, 该路线决定项目总工期为 77 天. 控制路

线上的工序称为控制工序, 每个控制工序包含两个控制点: 连接紧前控制工序的前继控制点和连接紧后控制工序的后继控制点. RSM 中各工序的开始时间、结束时间和控制点如表 2 中所示.

表 2 基于情形 1 的控制路线

Table 2 The controlling path calculation in case 1

工序	开始时间	结束时间	前继控制点	后继控制点
A	0	19	(0 0)	(0 0)
B	2	34	(0 2)	(5 34)
C	31	36	(3 34)	(0 31)
D	34	75	(0 34)	(5 75)
E	67	77	(4 75)	(5 77)

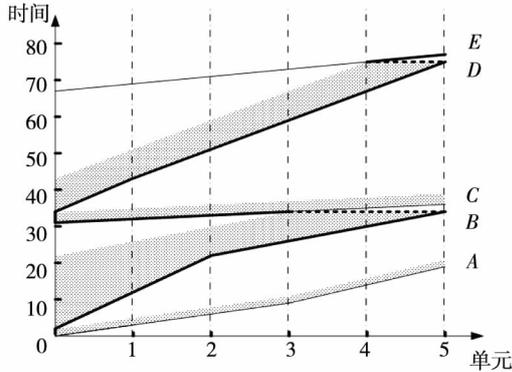


图 4 基于情形 1 的 RSM

Fig. 4 RSM in case 1

RSM 转化为网络模型的步骤如下: (1) 将 RSM 中的子工序与网络模型中的工序一一对应。(2) 考虑将 RSM 中的逻辑关系转化为网络模型中的 FS 型优先关系. 由于所有工序都要求保持资源连续性, 所以网络模型中对应的相邻工序之间用两条方向相反且权值为 0 的虚弧连接。(3) 将 RSM 的优先关系转化到网络模型中. 该项目 RSM

中既有时间约束又有距离约束, 因此需要将距离约束转化为时间约束, 然后再将时间约束通过网络模型中的优先关系表示. 由于该重复性项目只包含最小约束, 所以网络模型的工序之间由表示最小约束的正向虚弧连接. 例如工序 B 与工序 C 的约束关系为 2 km 的距离约束, 首先判断 B 的子工序如何与 C 的子工序配对, 然后再考虑配对的子工序之间的约束量. 具体来说 B_3, B_4, B_5 分别与 C_1, C_2, C_3 配对; 并且各子工序之间是 $SS \cup FF$ 的关系. 类似的, 可以转化工序 D 与 E 之间的距离约束关系. 与此相异, Kallantzis 等^[19] 提出的网络模型中, 子工序 B_2, B_3, B_4 分别与 C_1, C_2, C_3 保持 FS 型最小约束关系. 导致的结果是, 虽然在子工序 C_1 的开始处工序 B 领先于工序 C 2km, 但由于工序 C 的工作效率高, 在工序 C 开始后它们之间的距离就会小于 2 km, 即 2 km 约束量在 C 开始后就不再被满足. 而本文提出的网络模型能够始终保持工序 B 与工序 C 之间规定的距离约束量. (4) 计算网络模型的时间参数并由此确认关键路线, 计算结果如图 5 所示. 其中加粗的路线为关键路线, 该路线决定项目总工期为 77d, 与 RSM 的计划结果完全相同; (5) 在网络模型下方的水平轴表示工程项目在空间上的进度, 各工序的空间位置可以被确认. 对比图 4 与图 5 可以确认网络模型中各工序的施工地点与 RSM 中相应子工序的相同. 此外, 可以发现该网络计划没有冲突发生, 因为同一施工地点的工序没有在时间上发生交叉.

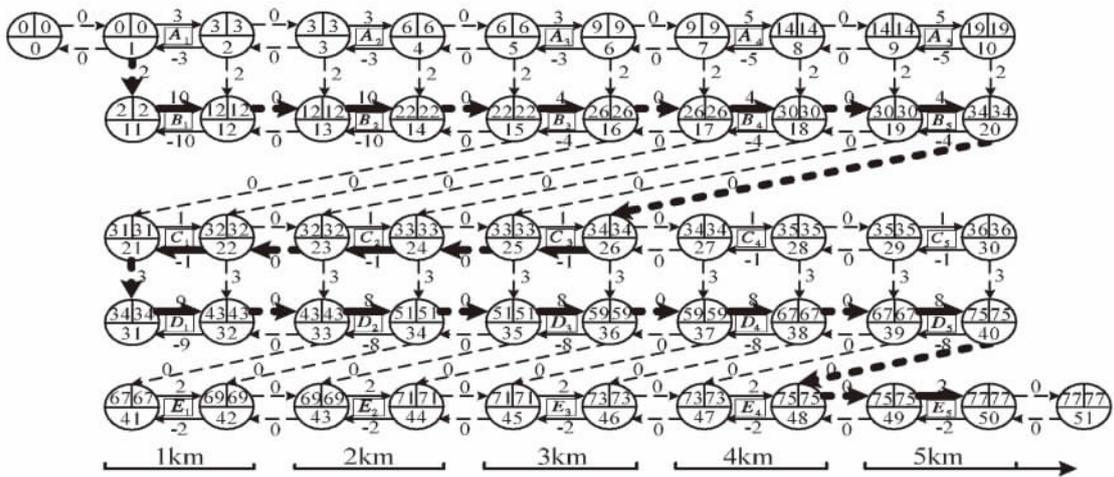


图 5 情形 1 下网络调度结果

Fig. 5 The network model in case 1

2.2 基于情形2的比较分析

情形2规定工序C必须保持资源连续性,其它工序则无此要求.该情形下的RSM调度结果如图6所示.与情形1相比,控制路线没有任何改变,总工期仍为77d.唯一的变化是工序E不处于控制路线上的单元发生了间断,开始时间都提前了.

将RSM转化为网络模型,调度结果如图7所示.其中关键路线并未发生改变,总工期仍为77d,与RSM的结果完全相同.需指出的是,工序A、B、D、E的子工序之间可以存在间断,只由权值为0的正向虚弧连接;而工序C的子工序之间不允许间断,由两条方向相反、权值为0的虚弧连接.工序 E_1 、 E_2 、 E_3 开始时间分别提前了.

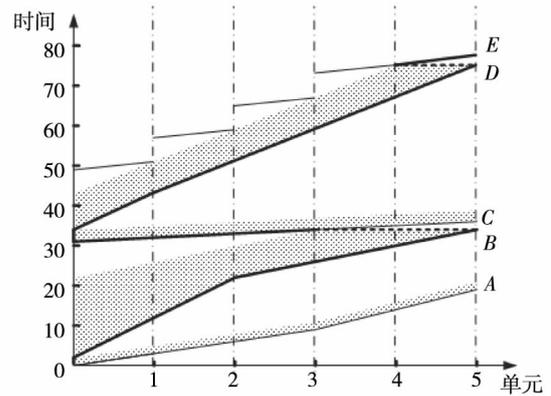


图6 情形2下RSM调度结果

Fig. 6 RSM in case 2

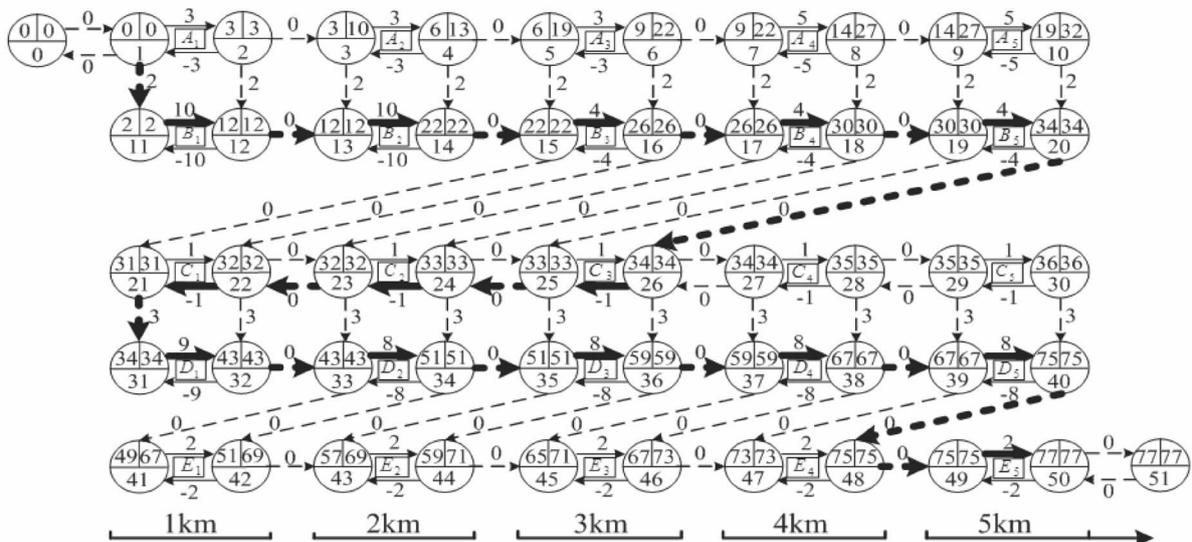


图7 情形2下网络调度结果

Fig. 7 Network model in case 2

2.3 基于情形3的比较分析

在情形3中,所有工序都没有资源连续性要求,即所有工序都可以间断.此情形下RSM的调度结果如图8所示.控制路线为图中加粗的路线,与情形1和情形2相比发生了明显的改变.工序C、E都出现了间断,C、D、E的开始时间都提前了.此情形下总工期缩短至71d.

将RSM转化为网络模型后,关键路线不同于情形1和情形2(图9),总工期为71d,与RSM的结果一致.

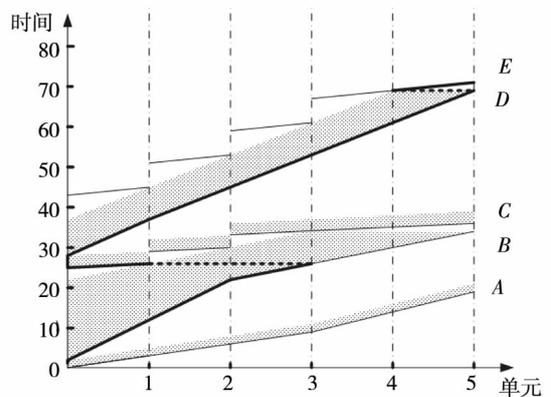


图8 情形3下RSM调度结果

Fig. 8 RSM in case 3

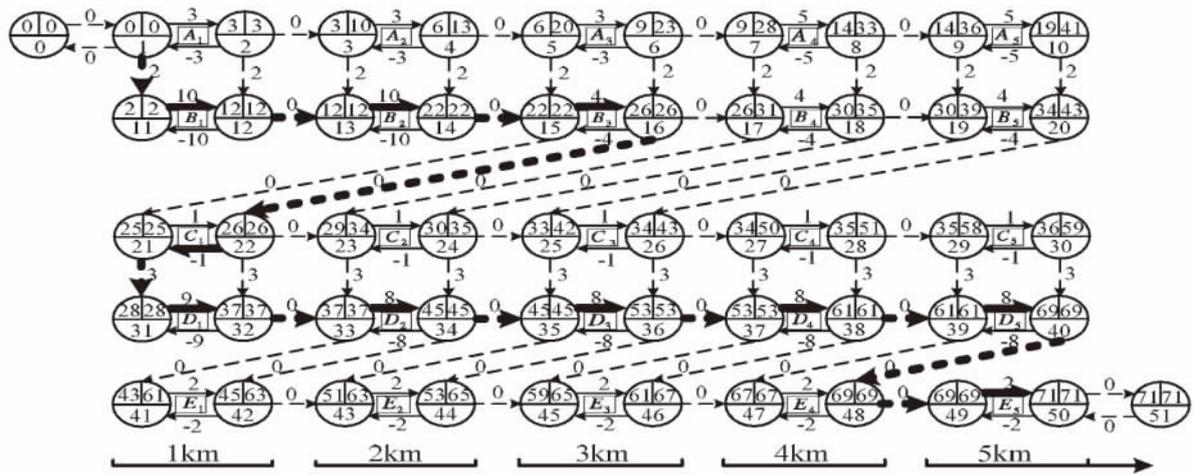


图 9 情形 3 下网络调度结果

Fig. 9 Network model in case 3

2.4 讨论

文献 [19] 中转化后的网络模型与本文所提模型相比, 差别主要体现在如下四点:

第一 能否在网络模型中表示资源连续性. 本文所提的网络模型通过用两条方向相反权值为 0 的虚弧连接两工序来表示资源连续性, 利用此方法可以将具有各种资源连续性要求的重复性项目等效转化为网络模型. 而文献 [19] 提出的方法无法表示资源连续性要求, 导致具有不同资源连续性要求的重复性项目可能会转化为相同的网络模型. 例如按照文献 [19] 提出的方法, 情形 1(图 4)、情形 2(图 4) 和情形 3(图 6) 中的重复性项目转化为网络模型后没有任何区别(与本文图 9 相似).

第二 转化前后的模型能否使关键路线和总工期保持一致. 本文提出的方法能使项目在任何资源连续性条件下, RSM 与网络模型都具有相同的关键路线和总工期. 而文献 [19] 只对情形 1 做了分析, 且结果表明 RSM 的控制路线与网络模型的关键路线不一致, 从而导致总工期也不相同.

第三 转化距离约束的方法不同. 本文在配对的子工序之间同时建立 SS 和 FF 型约束关系, 使距离约束始终得以保持, 而不会随着工程的进行减少或消失. 而文献 [19] 在配对的子工序之间只建立 FS 型约束关系, 由此产生的弊端是, 当紧后工序的工作效率大于紧前工序时, 规定的距离约束会随着工程的进行被打破. 这也是另一个导致该方法无法使两模型具有相同关键路线的原因.

第四 能否表示空间上的进度. 本文的网络模型增加了一根表示单元数的水平轴. 通过这个简单的改造, 网络模型也能像 RSM 一样展示项目在空间上的进度和可能存在的空间位置上的冲突.

3 关键性比较和转化不一致的原因分析

3.1 工序的关键性分析

Elmaghraby 和 Kamburowski^[22] 将 GPRs 网络模型的关键工序分成五种类型: 前向关键 (forward-critical) 工序、后向关键工序 (backward-critical)、双向关键 (bi-critical) 工序、开始关键 (start-critical) 工序和结束关键 (finish-critical) 工序. 在 RSM 领域, Zhang 和 Qi^[10] 通过研究各种控制工序对总工期影响的差异, 将控制工序分为前向控制 (forward-controlling) 工序、点控制 (point-controlling) 工序和后向控制 (backward-controlling) 工序. 仍以上述天然气管道工程为例, 各类型控制工序特点如下.

1) 前向控制工序

若工序前继控制点实现的时间早于后继控制点, 则将前后两控制点之间的部分称为前向控制工序. 例如图 4 中工序 B、D, 以及子工序 E₅ 都是前向控制工序. 前向控制工序的性质类似于网络模型中的正关键工序, 前向控制工序工期的增减与总工期的增减呈同向变化, 因此可以通过缩短前

向控制工序的工期压缩总工期.

2) 点控制工序

点控制工序定义为有且只有一个点位于控制路线上的工序. 该点是该工序的前继控制点和后继控制点的重合点. 点控制工序对应于网络模型中的开始关键点或结束关键点. 例如图4、图6和图8中子工序 A_1 的开始节点是点控制工序, 对应于图5、图7和图9中开始关键工序 A_1 .

3) 后向控制工序

若工序前继控制点实现的时间晚于后继控制点, 则将前后两控制点之间的部分称为后向控制工序. 例如图4和图6中的子工序 C_1, C_2, C_3 以及图8中的子工序 C_1 都是后向控制工序. Harris等^[1]和Kallantzis等^[19]发现了后向控制工序带来的奇异现象, 但并未作进一步的研究. Harmelink等^[7]甚至不认为具有这种性质的工序是控制工序. Zhang和Qi^[10]则首次定义了后向控制工序, 并将其与前向控制工序、点控制工序一起, 作为决定重复性项目总工期的关键因素.

后向控制工序有一个特殊的性质, 其工期的增减与总工期的增减呈反向变化, 因此可以通过延长后向控制工序的工期压缩总工期. 产生这种性质是因为, 在不打破与前继工序约束关系的前提下, 当后向控制工序的工期延长时, 后继控制点的实现时间可以提早, 因而紧后工序也会随之提早开始, 继而项目也会因此提前结束. 后向控制工序与网络模型中的后向关键工序对应.

网络模型中的双向关键工序产生于同时存在多条关键路线且前向关键和后向关键工序互相重合的情形之下. 在RSM中, 这种情况相对比较少见, 在此不作进一步的讨论.

3.2 RSM向网络模型转化不一致的原因分析

研究表明, 后向控制工序是解释Kallantzis等^[19]提出的方法无法使RSM中的控制路线与网络模型中的关键路线保持一致的关键原因. 当包含两个以上连续子工序的后向控制工序转化到无法表示资源连续性的网络模型时, 这些工序会产生间断. 例如, 不考虑两种转化方法在距离约束转化方面的差异. 根据Kallantzis等^[19]提出的方法, 情形1(图4)和情形2(图6)中的后向控制工序 C_1, C_2, C_3 将被转化为情形3(图9)中的工序 C_1, C_2, C_3 . 显然图9中 C_1, C_2, C_3 之间不再具有连续

性, 且工序 C_2, C_3 不在关键路线上. 换个角度来说, 在情形1(图5)、情形2(图7)下工序 C 需要保持资源连续性, 因而工序 C_1 的开始时间由工序 C_2, C_3 决定, 而工序 C_3 由工序 B_3 决定. 但在情形3(图9)中, 由于没有资源连续性要求, 工序 C_1 的开始时间由工序 B_3 决定, 导致开始时间提早了6d, 总工期也因此缩短了6d.

若RSM中不存在包含两个以上连续子工序的后向控制工序, 这种差别就不会产生. 根据文献^[19]的研究结论, 在其随机生成的25个项目中, 除第11个项目之外, 其它项目转化为网络模型后都出现了两种模型的总工期和关键路线不相同的情况. 但是该文献无法解释产生这一现象的原因. 研究发现, 除第11个项目之外, 其它24个项目都存在包含两个以上连续子工序的后向控制工序. 而唯有项目11(见图10)不存在这种情况. 在Yamin等^[12]提出的简单项目实例中, 也正是恰巧由于其不存在包含两个以上连续子工序的后向控制工序, 才使得RSM的控制路线与网络模型的关键路线能够保持一致.

4 时差分析

在网络模型中常用的时差包括以下三种: 总时差(total float, TF)、自由时差(free float, FF)、安全时差(safety float, SF). Elmaghraby和Kamburowski^[22]给出了工期固定情况下GPRs网络中的时差定义. 总时差为在不推迟总工期的前提下该工序开始时间最多可以推迟的量; 自由时差为在其他工序都以最早开始时间开始的前提下, 该工序开始时间最多可推迟的量; 安全时差为在其他所有工序都以最晚开始时间开始的前提下, 该工序开始时间最多可推迟的量. 对于工序工期不固定的情况下的时差, 他们并未进行讨论, 也未见相关的研究.

在RSM中, 除了总时差、自由时差、安全时差、干扰时差等概念和计算法则与网络模型的不同之外, 研究者还提出了效率时差(rate float)、独立时差(independent float)等概念^[17, 18]. 事实上, 由于这些概念计算复杂, 并未在项目管理中得到应用. 本文研究表明, RSM中的时差概念与GPRs网络模型中的时差概念完全一致, 应该区分

5 结束语

作为计划和调度工具,RSM和网络模型各有优缺点.在重复性项目管理领域,RSM更具针对性且更直观,而网络模型已被广泛接受和认可,且已有许多针对网络模型开发的项目计划和控制软件.本文提出一种将RSM转化为网络模型的方法.与现有方法相比,该方法主要有如下优点:(1)能够表示资源连续性,因此能使RSM中的控制路线和网络模型中的关键路线保持一致;(2)能够显示项目在空间上的进度和可能的空间位置上的冲突;(3)能够正确转化距离约束.在关键性

分析部分,揭示了后向控制工序是导致已有文献中RSM的控制路线和网络模型的关键路线不一致的原因.在时差分析部分,在两种模型中定义了相同的时差概念,通过计算和比较发现无论在何种资源连续性条件下,网络模型和RSM的各对应工序具有相同类型和数量的时差.本文通过对网络模型的改造,使其在重复性项目调度领域的劣势得到一定程度上的弥补,如表示资源连续性、表示空间进度、表示距离约束等.但是,从直观性、更新的复杂性等方面来看,RSM在重复性工程领域的优势依然非常明显.因此,本文提供将RSM转化为网络模型的工具,使项目管理者能够根据工程实际对两种调度方法取长补短、灵活运用.

参考文献:

- [1] Harris R B, Ioannou P G. Scheduling projects with repeating activities [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1998, 124(4): 269 - 278.
- [2] Arditi D, Tokdemir O B, Suh K. Effect of learning on line-of-balance scheduling [J]. *International Journal of Project Management*, 2001, 19: 265 - 277.
- [3] Arditi D, Tokdemir O B, Suh K. Scheduling system for repetitive unit construction using line-of-balance technology [J]. *Engineering Construction and Architectural Management*, 2001, 8(2): 90 - 103.
- [4] Arditi D, Tokdemir O B, Suh K. Challenges in line-of-balance scheduling [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2002, 128(6): 545 - 556.
- [5] Lam K C, Lee D, Hu T. Understanding the effect of the learning-forgetting phenomenon to duration of projects construction [J]. *International Journal of Project Management*, 2001, 19: 411 - 420.
- [6] Mohammad A A. Integrated LOB and CPM method for scheduling repetitive projects [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000569.
- [7] Harmelink D J, Rowings J E. Linear scheduling model: Development of controlling activity path [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1998, 124(4): 263 - 268.
- [8] Ipsilandis P G. Multiobjective linear programming model for scheduling linear repetitive projects [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2007, 133(6): 417 - 425.
- [9] Kallantzis A, Lambropoulos S. Discussion of "Comparison of linear scheduling model and repetitive scheduling model." [J]. *Journal of Composites For Construction*, 2004, 8(3): 463 - 467.
- [10] Zhang Lihui, Qi Jianxun. Controlling path and controlling segment analysis in repetitive scheduling method [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, (ASCE) 2012, 138(2) 10.1061/CO.1943-7862.0000535.
- [11] Huang R Y, Sun K S. System development for non-unit based repetitive project scheduling [J]. *Automation in Construction*, 2005, 14: 650 - 665.
- [12] Yamin R A, Harmelink D J. Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM) [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2001, 127(5): 374 - 381.
- [13] Hsie M, Chang C J, Yang I T, et al. Resource-constrained scheduling for continuous repetitive projects with time-based production units [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18: 942 - 949.
- [14] Lucko G. Productivity scheduling method compared to linear and repetitive project scheduling methods [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008, 134(9): 711 - 720.
- [15] 乞建勋, 李星梅, 王强. 等效子网络构建的理论与方法 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13(1): 40 - 44.

- Qi Jianxun , Li Xingmei , Wang Qiang. Theories and methods of creating equivalent sub-network [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2010 , 13(1) : 40 - 44. (in Chinese)
- [16] 李星梅, 乞建勋, 苏志雄. 自由时差定理与 k 阶次关键路线的求法 [J]. *管理科学学报* , 2009 , 12(4) : 98 - 104.
Li Xingmei , Qi Jianxun , Su Zhixiong. Free float theorem and algorithm of seeking the k-th order critical path [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2009 , 12(4) : 98 - 104. (in Chinese)
- [17] 张立辉, 乞建勋. CPM 网络节点时差的特性与应用 [J]. *中国管理科学* , 2008 , 16(5) : 128 - 133.
Zhang Lihui , Qi Jianxun. Properties of node slack and applications in CPM networks [J]. *Chinese Journal of Management Science* , 2008 , 16(5) : 128 - 133. (in Chinese)
- [18] Gransberg D D. Converting linear schedules to critical path method precedence [C]. *2007 AACE International Transaction* , 2007 , 05. 1 - 05. 4.
- [19] Kallantzis A , Soldatos J , Lambropoulos S. Linear versus network scheduling: A critical path comparison [J]. *Journal of Construction Engineering and Management* , 2007 , 133(7) : 483 - 491.
- [20] Harmelink D J. Linear scheduling model: Float characteristics [J]. *Journal of Construction and Management* , 2001 , 127 (4) : 255 - 260.
- [21] Lucko G , Orozco A A P. Float types in linear scheduling analysis with singularity functions [J]. *Journal of Construction and Management* , 2009 , 135(5) : 368 - 377.
- [22] Elmaghraby S E , Kamburowski J. The analysis of activity networks under generalized precedence relations (GPRs) [J]. *Management Science* , 1992 , 38(9) : 1245 - 1263.
- [23] Ahuja R K , Magnanti T L , Orlin J B. *Network Flows* [M] // in: Nelhauser G L , Rinnooy Kan A H G , Todd M J. Eds. *Handbooks in Operation Research and Management Science* , Amsterdam: Elsevier , 1989: 258 - 263.

A method for converting repetitive scheduling models to network model

ZHANG Li-hui , PAN Chu-yun , ZOU Xin

College of Economics and Management , North China Electric Power University , Beijing 102206 , China

Abstract: Repetitive scheduling method (RSM) and the network models have their own advantages in project scheduling. This paper proposes a method for converting the RSM to the network model and compares the two methods in terms of critical paths , activity criticality and floats. The proposed method establishes a rule for converting all kinds of activities and constraints in RSM to the network model. It can represent the resource continuity which could avoid the difference between RSM and the converted network model in total durations , critical paths and floats in literatures. Besides , it can also display the distance constraint and progress in space and resolves the problem that the network model could not show distance constraints and space conflicts. A repetitive project is used as an example of conversion and comparison. The analysis of activity criticality reveals the reason why existing methods could not completely convert the RSM to network models. This method can provide the project managers with a convenient tool to transfer the RSM into the equivalent network model.

Key words: resource continuity; conversion; controlling path; critical path; floats