

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704007



应用 DBR 理论的网络进度计划 完工工期仿真

刘迅¹, 毕远志²

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215000;
2. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 将影响工程项目施工进度的各类风险因素视为影响工程工期中的瓶颈,将鼓-缓冲-绳子(DBR)理论中的“鼓”、“缓冲”、“绳子”3 元素加入到传统的计划评估和审查技术(PERT)网络进度计划的编制中;然后,通过识别 PERT 网络进度计划中的瓶颈工序,制定瓶颈工序的实施计划;最后,通过衡量工序的缓冲时间,计算工程网络进度计划路径的缓冲时间及投料时间,改善工程进度网络图中的工序作业任务活动之间存在的的关系及作业活动持续时间的不确定性.算例结果表明:若能够将“鼓”、“缓冲”、“绳子”3 元素充分地加以配合,能够达到降低工程施工进度风险的目的.

关键词: 工程项目管理; 计划评估和审查技术网络; 鼓-缓冲-绳子理论; 施工进度; 瓶颈工序
中图分类号: TU 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)04-0477-06

Simulation of Completion Time of Network Schedule Using DBR Theory

LIU Xun¹, BI Yuanzhi²

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China;
2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The various factors affecting the construction progress of the project are regarded as the bottlenecks affecting the construction completion time. The “drum”, “buffer” and “rope” in the drum-cushion-rope (DBR) theory are added to the traditional program evaluation and review technique (PERT) network scheduling plan; through the identification of PERT network schedule in the bottleneck process, the implementation plan of the bottleneck is obtained. Finally, by measuring the buffer time of the process, and by calculating the progress of the network planning schedule buffer time as well as the feeding time, the relationship between the operational activities of the operations in the network and the uncertainty of the duration of the operational activities are improved. Case study results show that the risk of construction progress could be reduced if the “drum”, “buffer” and “rope” are well cooperated mutually.

Keywords: project management; program evaluation and review technique network; drum-cushion-rope theory; construction schedule; bottleneck process

工程项目在施工过程中存在的风险要素往往具有相关性^[1]、传递性^[2]及非叠加性^[3],使得项目管理者在制订工程施工进度计划时需要充分考虑它们对工程进度的影响^[4].将影响工程项目施工进度的各

收稿日期: 2016-11-16
通信作者: 刘迅(1979-),男,讲师,博士,主要从事工程管理与项目管理的研究. E-mail:liuxun8127@163.com.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274105);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401016);苏州科技大学人才引进科研基金资助项目(331711105)

类风险因素视为约束理论(TOC)中的瓶颈,在工程施工项目的进度管理过程中,项目管理人员往往通过主观地增加作业活动的缓冲时间,作为吸收风险发生条件下所造成的作业活动持续时间的延迟^[5]. Goldratt^[6]提出“鼓-缓冲-绳子”(drum-cushion-rope, DBR)理论,而文献[7-9]以此理论为基础,将“鼓”、“缓冲”、“绳子”3 者应用在计划制定的过程中. 文献[10]提出一种分散式的缓冲设置方式,在保证按期完工的前提下具有良好的鲁棒性. 施骞等^[11]提出约束理论下项目不确定条件下的缓冲区设置方法,综合考虑资源紧张度、网络计划复杂度和项目经理风险偏好等影响因素. 别黎等^[12]考虑活动逐渐存在间隙的特点,针对项目计划中使用“鼓”元素的活动特点,提出分散式能力约束的设置法. 上述文献均未从系统的角度对整个工程网络进度计划完工工期的影响进行深入量化研究,进而无法得到对工程项目完工风险较为客观的分析结果. 本文将约束理论中的 DBR 进度计划技术应用在工程施工进度计划的编制中,并结合蒙特卡罗模拟方法,建立新的工程项目进度计划,以降低工程进度计划的不确定性.

1 瓶颈工序活动的识别与计划的制定

在计划评估和审查技术(PERT)网络计划的编制和实施过程中,众多的不确定性因素将影响工序作业时间^[13],而网络计划中瓶颈作业工序活动可以看作造成实际工程完工时间与计划完工时间不符结果影响最大的作业. 基于此,网络计划中瓶颈作业工序活动的识别主要有以下 4 点确认原则.

- 1) 工程完工时间受到总时差为零的主关键路径或者次关键路径的影响,若关键路径中的作业完成时间与计划完成时间不符,将使后续作业开始时间或者工程完工时间发生变化.
- 2) 将 DBR 进度计划管理技术应用于工程进度计划的编制过程中时,由于瓶颈作业活动必然为降低工程完工时间确定性的限制作业,因此,瓶颈作业必然存在于关键路径之中. 作业时间不确定性的程度,可以作为选择瓶颈作业的标准,作业时间的标准差越大,其可能成为瓶颈作业的机会就越高.
- 3) 由于关键路径有时不止一条,且每条关键路线可能存在着对工程完工工期概率分布的影响,选择瓶颈作业活动除考虑作业活动持续时间的标准差,还需考虑到关键路线完成时间的标准差.
- 4) 当存在多个瓶颈时,需考虑工程网络进度计划内,由于靠近汇合点的作业对计算工期的影响高于其他作业,因此,应选择最靠近作业汇合点的作业.

由于瓶颈作业活动的计划影响了整个项目的工程进度,进度计划的制定必须要提供足够多人力、机械及施工材料等资源,以确保瓶颈作业任务能够在期望的时间开始,并在计划的时间内完成. 所以,瓶颈的作业时间计划以作业活动最可能的完成时间作为瓶颈作业活动的完成时间. 另一方面,瓶颈作业工序安排的同时应与其他进度计划元素的计算提供依据,如 buffer 及 rope 的计算. 瓶颈作业活动生产计划的制定以降低瓶颈作业时间的不确定性,并提供非瓶颈作业时间延迟或提早的判断依据为目的.

2 瓶颈作业活动缓冲时间的确定

作业活动没有明确且固定的缓冲保护时间,不同的作业活动因具有不同的特性而存在差异,所以缓冲时间的设定不适合采取全部相同的比率. 采用动态缓冲量化作业活动时间发生延迟的可能并计算作业活动的缓冲时间,运用作业活动缓冲时间的大小表示作业风险的情况,随着作业时间的延迟,缓冲时间将以延迟的程度而减少. 在 DBR 理论中,存在 3 种不同的时间缓冲,如图 1 所示.

缓冲的决定是为了提供保护给缓冲区前的作业产生变化时,不至于影响瓶颈作业及后续作业活动. 因此,作业完成时间若超过预定时间,缓冲时间就会相应地减少,作业活动任务能以期望完成时间执行,令后续作业无闲置时间,将更有助于项目管理人员对工程资源加以合理的安排. 缓冲时间可以视为作业活动持续时间的不确定性程度,作业活动持续时间的不确定性程度越高,代表缓冲时间设置的越大. 从另一方面来说,风险的发生是对工程项目在规定工期内完成具有负面影响的可能性. 据此,风险的发生所造成

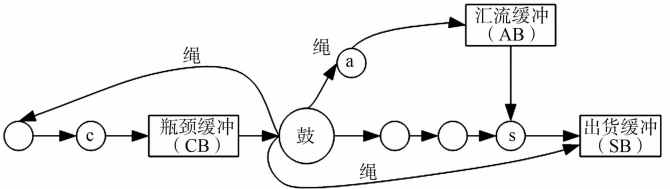


图 1 DBR 理论示意图

Fig.1 DBR theory diagram

的冲击存在于作业悲观完成时间与作业期望完成时间之间,故衡量缓冲时间的公式为

$$CB_c = \frac{T_{cb} - T_{ce}}{2}, \quad c \in S_{CB}, \tag{1}$$

$$AB_a = \frac{T_{ab} - T_{ae}}{2}, \quad a \in S_{AB}, \tag{2}$$

$$SB_s = \frac{T_{sb} - T_{se}}{2}, \quad s \in S_{SB}. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: CB_c, AB_a, SB_s 分别为瓶颈、汇流和出货的缓冲时间; T_{cb}, T_{ce} 分别为瓶颈缓冲前先行作业路径的悲观完成时间和期望完成时间; T_{ab}, T_{ae} 分别为汇流缓冲前先行作业路径的悲观完成时间和期望完成时间; T_{sb}, T_{se} 分别为出货缓冲前先行作业路径的悲观完成时间和期望完成时间; S_{CB}, S_{AB}, S_{SB} 分别为瓶颈、汇流和出货缓冲前先行作业的集合。

上述 3 种缓冲时间的衡量方式相近,但缓冲时间考虑的先行作业数量不同,也形成缓冲时间长度不同的情形. 瓶颈、汇流和出货工序活动缓冲前的作业保护时间,是根据不同缓冲前每个作业悲观完成时间与工程期望完成时间的比例分配各作业的缓冲时间,如

$$BT_c = \frac{b_c}{T_e} \times CB_c, \quad c \in S_{CB}, \tag{4}$$

$$BT_a = \frac{b_a}{T_e} \times AB_a, \quad a \in S_{AB}, \tag{5}$$

$$BT_s = \frac{b_s}{T_e} \times SB_s, \quad s \in S_{SB}. \tag{6}$$

式(4)~(6)中: BT_c, BT_a, BT_s 分别为瓶颈、汇流和出货工序活动缓冲前各作业的保护时间; T_e 为工程期望完工时间; b_c, b_a, b_s 分别为瓶颈、汇流和出货缓冲前各作业的悲观完成时间。

考虑到缓冲时间的设置由每个工序作业活动共同提供,缓冲区的设置将各个作业中多余的安全保护时间移除管理. 借由缓冲管理对工程项目的进度状态进行监控,以提升项目完工进度的可靠度,即有

$$\bar{b}_c = b_c - BT_c, \quad \bar{b}_a = b_a - BT_a, \quad \bar{b}_s = b_s - BT_s. \tag{7}$$

式(7)中: $\bar{b}_c, \bar{b}_a, \bar{b}_s$ 分别为瓶颈、汇流和出货缓冲前各作业未包含保护时间的悲观完成时间。

3 工序作业活动的瓶颈缓冲管理

考虑到缓冲时间的设置是由每个作业活动共同提供的实际情况,缓冲区的设置是将各个作业中多余的安全保护时间移除并集中管理,同时通过缓冲管理监控工程项目的进度状态. 以瓶颈缓冲管理为例,若先行作业实际完成时间超过扣除保护时间的先行作业期望完成时间加上警戒区时间,使得完成时间在赶工区内,则表示工程实际完成时间可能与计划完成时间不符. 因此,必须采取适当的管理措施,诸如通过增加资源投入、施工加班、增加施工班组等措施来确保瓶颈作业活动达到如期开始的目标。

当然,缓冲时间的消耗情况完全视先行作业悲观与期望时间的分布情况,如果先行作业完成时间不确定性高,则很可能会发生延迟,造成先行作业实际完工时间超过赶工区. 若瓶颈缓冲前的作业实际完成时间是在忽略区,则表示有足够的时间提供施工项目管理用以防预可能发生的不确定性. 相对的情况是,如果作业活动的完成时间是在警戒区内,项目管理人员必须需要密切注意工程的进行,避免工程进度落入到赶工区内,如 $\bar{T}_{ce} = \max\{t_i + (a_i + 4m_i + \bar{b}_c)/6\}$. 其中: \bar{T}_{ce} 为瓶颈缓冲前先行作业路径为包含作业缓冲时间的期望完成时间; t_i, a_i, m_i 分别为作业 i 的开始时间、乐观完成时间和可能完成时间; \bar{b}_c 为瓶颈缓冲前 c 作业未包含保护时间的悲观完成时间。

rope 的控制机能可以通过从建立资源的开始到施工现场的详细计划而达到,其主要功能在于决定建立正确的物料达到施工活动现场的适当时间. rope 控制的目的在于确保生产物料总是足够能够支援瓶颈作业任务活动的不断进行. 故可知 rope 的目的在于决定施工资源物料订单的开始时间,使资源物料能平顺地经过非瓶颈作业任务活动,以达到支援瓶颈作业,保证瓶颈作业活动如期完成的目的. 由此可以看出,瓶颈作业的开始或瓶颈作业的前置作业集合的完成时间,可以视为 rope 的大小. 在实际开工后瓶颈任务活动前的所有先行作业完成时间将以投料进度计划为里程碑,务求使所有先行作业的完成

时间小于或等于投料开始时间,以配合缓冲管理确保瓶颈工序活动如期开工.

4 案例验证与分析

4.1 工程案例

某水电站位于黄河干流上,属于大型梯级电站,水库设计库容量为 6.2 亿 m³,为日调节水库.该电站的主要任务是发电,兼顾灌溉及供水等,主要水工建筑物由混凝土面板堆石坝、左岸泄洪洞、左岸溢洪道、右岸泄洪洞、引水发电系统及厂房组成,总投资 66 亿元.参照该水电站混凝土面板堆石坝工程施工总进度网络计划图(发包阶段研究报告)中规定的工序之间的逻辑组织关系,绘制出施工总进度的网络图计划,如图 2 所示.

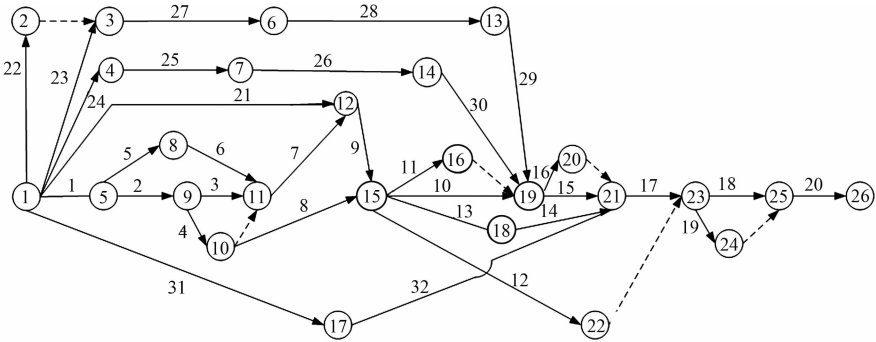


图 2 混凝土面板堆石坝施工双代号网络图

Fig. 2 Double code network diagram of concrete face rockfill dam

工序的详细信息、网络进度计划各活动完成时的 3 点估计值,以及作业活动期望完成时间、方差和标准差等数据,如表 1 所示.表 1 中:工期估计 a, m, b 分别表示工序程序时间的乐观完成时间、最可能完成时间及悲观完成时间,其值由原数据修改而得.

表 1 工程施工工序信息明细表

Tab. 1 Detailed table of engineering construction process information

编号	工序名称	紧前工序	$a, m, b/d$	作业期望 完工时间/d	作业完工时 间标准差	完工时间 方差
1	两岸坝肩水上部分▽1 901 以上开挖	—	170,230,260	225.00	15.00	225.00
2	戗堤填筑闭起、基坑排水	1	40,55,70	55.00	5.00	25.00
3	基坑开挖	2	50,70,90	70.00	6.67	44.44
4	坝后截水墙基础开挖	2	30,40,55	40.83	4.17	17.36
5	上、下游围墙基础防渗施工	1	40,55,60	53.33	3.33	11.11
6	上、下游围堰填筑施工	5	30,45,50	43.33	3.33	11.11
7	▽1 901 m 以下趾板及基础混凝土浇筑	3,4,6	8,15,25	15.50	2.83	8.03
8	坝后截水墙混凝土浇筑	4	55,70,90	70.83	5.83	34.03
9	▽1 955 m 以下坝体上游临时断面填筑	7,21	140,165,185	164.17	7.50	56.25
10	▽1 955 m 以下坝体下游临时断面填筑	8,9	130,150,185	152.50	9.17	84.03
11	左岸坝轴线冲沟砌石回填	8,9	90,120,145	119.17	9.17	84.03
12	坝后干砌石	8,9	455,495,560	499.17	17.50	306.25
13	一期面板混凝土浇筑	8,9	45,60,80	60.83	5.83	34.03
14	表层止水安装	13	45,60,75	60.00	5.00	25.00
15	▽1 955 m 至坝顶全断面填筑	10,11,29,30	160,195,215	192.50	9.17	84.03
16	坝前▽1 940 m 以下压坡体填筑	10,11,29,30	100,120,145	120.83	7.50	56.25
17	二期面板混凝土浇筑	14,15,16,32	75,90,115	91.67	6.67	44.44
18	坝顶防浪墙及坝顶道路施工	12,17	85,120,150	119.17	10.83	117.36
19	下游围堰拆除	12,17	70,90,115	90.83	7.50	56.25
20	坝顶填筑、浆砌石	18,19	48,60,75	60.50	4.50	20.25
21	两岸坝肩锚喷支护	—	280,330,400	333.33	20.00	400.00

续表

Continue table

编号	工序名称	紧前工序	$a, m, b/d$	作业期望完工时间	作业完工时间标准差	完工时间方差
22	本标段辅体系统施工	—	135,165,195	165.00	10.00	100.00
23	垫层料加工系统改造	—	85,105,115	103.33	5.00	25.00
24	药水沟Ⅱ区料场规划和道路修筑	—	25,30,45	31.67	3.33	11.11
25	坡积碎石土及强风化岩剥离	24	100,120,145	120.83	7.50	56.25
26	过渡料开采爆破试验	25	12,15,20	15.33	1.33	1.78
27	垫层试验料加工	22,23	35,45,50	44.17	2.50	6.25
28	一期垫层料加工	27	48,60,80	61.33	5.33	28.44
29	二期垫层料加工	28	105,135,160	134.17	9.17	84.03
30	过渡料垫层料开采	26	195,240,280	239.17	14.17	200.69
31	灌浆试验	—	72,90,118	91.67	7.67	58.78
32	左、右岸趾板灌浆与浇筑	31	300,360,420	360.00	20.00	400.00

4.2 案例模拟

运用 Crystal Ball Version 商业软件,各项作业活动的工期的概率分布设定为三角分布. 设定模拟次数为 2 万次,藉以随机数产生器(0-1)及作业 3 时分布取得每个作业活动的完成时间并计算工程项目的完成时间及完成时间的概率分布情况.

DBR 计划技术元素包含了“鼓”、“缓冲”、“绳子”3 个基本元素,在排列组合上具有 7 种模式,加上传统的 PERT 模式,共有 8 种模式可进行几者之间的相互比较. 通过对这 8 种进度计划模式进行相互比较,能够找到比较合适的工程项目进度计划,将工程施工项目完工的风险降至最低. 进度计划模式建立后,即可将进度计划模式置入进度计划模式暂存区,记录每一进度计划的模式,所包含的进度计划元素、相关数据资料等. 设定蒙特卡罗模拟次数并根据作业活动任务 3 时及随机数产生器决定每一次模拟所得到的作业活动持续时间. 当每一次模拟的作业活动时间确定后,依据关键路径法计算工程项目的完成时间,直至达到设定的模拟次数.

4.3 结果与讨论

该案例在传统 PERT 网络进度计划下的模拟结果,以及考虑 DBR 进度计划技术下的各种不同元素的组合模拟结果数据对比,如表 2 所示.

表 2 各种组合仿真不确定性比较表

Tab. 2 Comparison table of simulation uncertainty of various combinations

序号	进度计划控制元素	平均工期	标准差	最乐观完成时间/d	最悲观完成时间/d	与传统 PERT 比较不确定性减少
1	PERT	1 211.63	33.56	1 092.29	1 348.92	—
2	drum	1 180.04	29.76	1 083.51	1 288.12	3.80
3	buffer	1 284.64	16.78	1 220.30	1 344.39	16.78
4	rope	1 227.07	26.59	1 132.12	1 322.37	6.97
5	drum-buffer	1 255.15	11.40	1 213.72	1 303.21	22.16
6	drum-rope	1 196.19	23.11	1 117.47	1 271.83	10.45
7	buffer-rope	1 188.46	9.18	1 152.89	1 216.75	24.38
8	drum-buffer-rope	1 184.25	7.92	1 156.38	1 212.46	25.64

不同组合仿真下的工程网络进度计划的完工工期(t)分布和完工概率(P)比较,如图 3 所示. 由图 3 可知:虽然传统经典的 PERT 进度计划技术的工程平均完工时间并不是最长的完工时间,但利用该方法计算所得到完工时间的不确定性程度却是最高的. 工程完工工期的不确定性程度越高,往往越有可能产生额外的作业闲置时间,以及作业资源分配波动较大的不合理等其他管理上的失效的现象产生.

在“鼓”、“缓冲”、“绳子”元素独立应用的条件下,相对于 PERT 技术而言均能够在一定的程度上减少进度计划的不确定性程度. 然而,实际的情况是,有可能在较大的程度上造成延长工程完工时间的发生,就减低工程进度的不确定性而言,并不是最佳的处理方式. 同样地,在“鼓”、“缓冲”、“绳子”相互应用

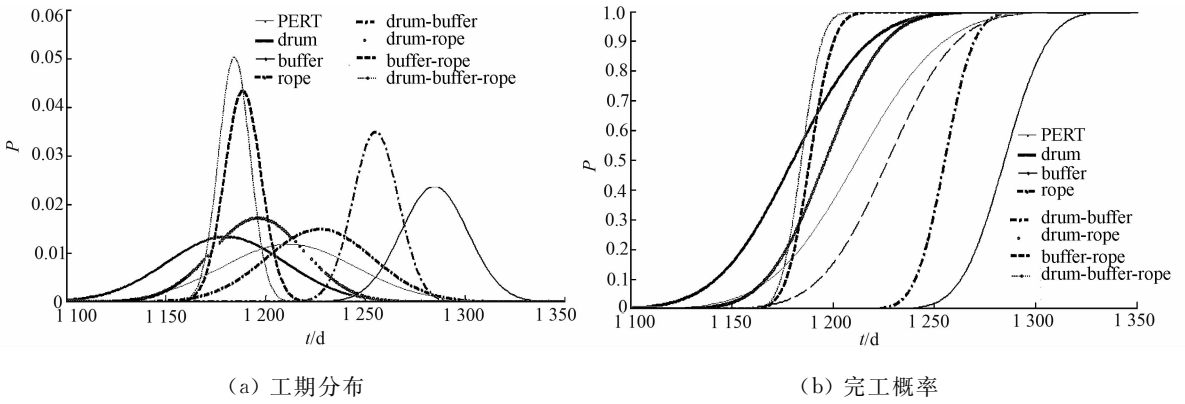


图3 不同组合仿真下的工程网络进度计划比较

Fig. 3 Comparison of engineering project network schedule under different combinations of simulation

的情况下,该种组合技术可以在一定的程度上降低了减少工程完工工期计划的不确定性的情况,但是同样也有可能造成工程完工时间的增加的现象产生.在“鼓”、“缓冲”、“绳子”元素3者的共同应用下,虽然在降低工程网络计划的不确定性上并不是最佳的选择,但是同时也没有增加工程完工的时间.在衡量工程进度计划的不确定性与工程完工时间的条件下,将“鼓”、“缓冲”、“绳子”元素3者的共同应用进度计划控制技术应用到工程进度计划的编制中,能够得到较为适合工程实际的进度计划的制定效果.

5 结束语

采用 DBR 理论所提出建立的工程进度计划编制方法,并应用于实例分析.仿真结果表明:DBR 理论进度计划与管理技术中的每一个元素的应用都能够有效地降低工程完工工期的不确定,其中,将“鼓”、“缓冲”、“绳子”3 元素的结合运用能够最有效地降低工程完工工期不确定的程度.因此,如果管理者在制定进度计划时将“鼓”、“缓冲”、“绳子”3 者充分地加以配合,能够使 DBR 的进度计划与控制技术的效益能够更有效地显现出来.这样就可使管理者准确地控制施工过程中各活动的进度,从而有效地指导施工进度计划的具体实施.

参考文献:

[1] 刘俊艳. 基于 BN-CPM 的工程进度风险因素相关性分析[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 199-203.

[2] 赵道致, 王元明. 基于 PERT 的项目工期风险传递机制[J]. 工业工程, 2008, 11(4): 14-18.

[3] 刘俊艳, 王卓甫. 工程进度风险因素的非叠加性影响[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 30(8): 1517-1523.

[4] IZMAILOV A, KORNEVA D, KOZHEMIKIN A. Project management using the buffers of time and resources[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 235(11): 189-197. DOI: 10. 1016/j. sbspro. 2016. 11. 014.

[5] 罗福周, 刘静. 基于建设项目多目标综合优化的关键链缓冲区研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(6): 902-906.

[6] GOLDRATT E M. Critical chain[M]. Great Barrington: North River Press Publishing Corporation, 1997: 181.

[7] 张国辉. DBR 理论求解柔性作业车间调度问题[J]. 运筹与管理, 2016, 25(1): 53-58.

[8] 周峰. DBR 管理模式的生产计划与控制机制探讨[J]. 中国管理科学, 2000, 8(1): 17-21.

[9] IZMAILOV A, KORNEVA D, KOZHEMIKIN A. Effective project management with theory of constraints[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 229(8): 96-103. DOI: 10. 1016/j. sbspro. 2016. 07. 118.

[10] GOLMOHAMMADI D. A study of scheduling under the theory of constraints[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 165(7): 38-50.

[11] 施骞, 王雅婷, 龚婷. 项目缓冲设置方法及其评价指标改进[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1739-1746.

[12] 别黎, 崔南方, 赵雁, 等. 关键链多项目调度中分散式能力约束缓冲设置法[J]. 管理工程学报, 2013, 27(2): 148-153.

[13] 张清河, 张云波. 不确定性网络计划的工序作业时间研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2002, 23(2): 142-146.