

学习遗忘效应在工程项目进度计划中的应用

郝人毅, 叶春明

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在学习曲线理论和遗忘曲线理论的基础上, 结合学习遗忘效应的模型, 通过网络计划技术中的双代号网络图, 引用案例来阐述员工的学习及遗忘行为对工期及关键路径造成的影响。与不考虑学习遗忘行为的情况相比, 考虑员工的学习遗忘效应会使工期缩短、关键路径发生改变, 且不同的学习比例会带来不同的效果。

关键词: 项目管理; 进度计划; 学习遗忘效应; 双代号网络图

中图分类号: TB 11 **文献标志码:** A

Application of Learning and Forgetting Effect in Project Schedule

HAO Renyi, YE Chunming

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: On the basis of the theory of learning curve and the theory of forgetting curve, through the activity-on-arrow network, combined with the learn forget curve model of learning and forgetting effect, it can be concluded that the learning and forgetting behavior of employees cause changes both in schedule and critical path. The learning effect and the forgetting effect of employees will shorten the time limit, and change the critical path, compared with the case of not considering the learning and forgotten effect, and different learning ratios will have different effects.

Keywords: project management; schedule; learning and forgetting effect; double code arrow diagram

在项目调度中, 通过对项目中各道工序实施的先后顺序及工序间的开始与结束时间进行制定与安排, 合理分配员工的工作及休息时间, 以期达到项目生产周期最短、资源成本消耗最低、产品质量效益最高的多目标效果。以数学的视角来说, 项目调度可以表述为相关的函数问题, 它通

常由某一个或几个生产因素共同影响, 通过公式计算可得到对生产计划安排的最优解。在实际项目活动中, 每实施一项工序都一定有或紧前或紧后的限制, 如必须紧前工序完成方可完成本道工序, 或几道工序需同时实施, 有时工序间的搭接时间也必须考虑, 同时由于员工的休息而导致的

收稿日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71840003); 上海理工大学科技发展项目 (2018KJFZ043)

第一作者: 郝人毅(1992-), 女, 硕士研究生。研究方向: 项目管理、行为科学、智能算法。E-mail: 492017384@qq.com

通信作者: 叶春明(1964-), 男, 教授。研究方向: 工业工程。E-mail: yechm6464@163.com

遗忘时有存在，每位员工的生产经验也不尽相同。所以，明确项目调度带来的进度问题，严格把约束工期时间，适时加快项目进度，在生产中合理安排进度计划，是提升项目整体效益的有效方法。

项目进度管理主要是在项目调度中对时间资源进行管理，通过横道图、网络图及形象进度图等网络计划技术实现，从而对有限资源加以高效分配及协调。在进度计划这方面，李俊亭等^[1]研究了关键链多项目进度计划优化，提出了优化多项目进度计划的数学模型和启发式优先调度规则。陈迪等^[2]研究了MRO(maintenance, repair and overhaul)服务中心多技能员工优化调度模型，综合考虑员工旅行费用和工作时间成本，研究分布于不同地理位置的多技能员工的优化调度问题。王一帆等^[3]研究了求解多技能人力资源约束的项目调度问题的两阶段算法，针对项目调度与多技能人力资源分配优化问题，设计了两阶段的遗传局域搜索算法。张琦等^[4]研究了基于改进遗传算法的关键链项目进度计划优化，验证了关键链方法在研究多资源约束项目进度计划问题上的可行性。田文迪等^[5]在不确定性环境下对鲁棒性项目调度进行研究，从活动工期不确定因素和资源不确定因素两个角度对项目调度研究进行分析。于静等^[6]研究了带有活动重叠的资源受限项目调度问题的建模与求解，以最小化项目工期为目标，建立了带有活动重叠的资源受限项目调度问题的优化模型，并设计了改进的遗传算法进行求解。

相较于其他进度计划管理方法，网络图便于跟踪项目进度，有效抓住关键环节，同时逻辑清晰、条理缜密，本研究通过网络图的绘制，基于实际生产案例，着重探讨项目实施过程中员工的行为因素对进度计划的影响与改善。

1 生产过程行为

1.1 学习效应

学习效应指的是由于生产过程的重复性，员工进行重复劳动从而获得工作经验的积累，使得继续生产同一产品时，生产时间不断下降，导致产品平均成本也逐渐下降的过程。如果项目的成本不变，单位产量逐步提高，单位利润也就逐步提高，企业就会加大生产规模，增加市场供给。

学习曲线的一般表达式为

$$C = FX^{-a} \tag{1}$$

式中： C 为工序实际加工时间； F 为工序基本加工时间； X 为工件序号； a 为学习因子($-1 \leq a \leq 0$)。

现假设有3个相同的工件要在2台机器上进行加工^[7](在实际生产中各工件在各机器上的加工时间可能有所不同)，若此时学习因子 $a=-0.3$ ，则各工件实际加工时间如表1所示。

表1 工件考虑学习效应时各位置实际加工时间
Tab.1 Actual time of workpieces processing on different machines when considering the learning effect

工件序号	机器1 加工时间/d	机器2 加工时间/d
1	5	6
2	$5 \times 2^{-0.3} = 4.06$	$6 \times 2^{-0.3} = 4.87$
3	$5 \times 3^{-0.3} = 3.60$	$6 \times 3^{-0.3} = 4.32$

由表1可以看出，在同一台机器的加工过程中，越早加工的零件所花费时间越长，而越晚加工的零件所花费时间越短。由于此例假设零件在每个机器上加工时间相同，故不考虑零件排序先后的问题。在项目的实际作业过程中，因为，零件加工时间各不相同，进而导致生产效率的不同，所以，需要操作人员考虑工件的排序问题。

学习效应最早源于Wright^[8]的研究，其发现学习曲线的主要表述为：随着时间的增长，员工生产单位产品的平均时间会随着生产产量的增多而减小，这一理论成为了学习遗忘效应研究的基础，其后被众多学者广泛研究，并用于企业生产中。20世纪90年代，Biskup^[9]将学习效应首次加入到单机生产调度中，使学习因子和工件位置产生关联。Kuo等^[10]发现工件的生产时间与之前完成的工件的加工时间有关，提出了基于工件时间的另一类学习效应模型。Lee等^[11]结合Biskup与Kuo的学习效应模型，在此基础上提出了同时基于工件位置和工件时间的学习效应模型，其理念可简要描述为：工件的加工时间越长，学习效果的作用就越显著，同时对后续其他工件的影响就越强。

1.2 遗忘效应

19世纪末德国心理学家艾宾浩斯研究发现了人类的一些遗忘规律，其主要表述为：当人们记忆一些事物时会发生遗忘的现象，并且先学到的知识会以较快的速度被遗忘，其后遗忘速度逐渐

变缓, 而已经记忆了很长时间的事物, 则很难被彻底忘记。这些内容就是后来著名的“遗忘曲线”的雏形, 也被称为“艾宾浩斯曲线”。

遗忘曲线表明, 随着时间的逐渐增长, 记忆数量百分率会下降, 一开始遗忘的速度比较快, 随后会慢慢平稳。在人们的日常生产活动中, 经常有学习及遗忘的情况产生。如当人们学习一项新技能时, 那些反复被提到的知识点会深深记忆在我们的脑中, 而对于那些只记忆过一两次或者长久不再接触的知识, 则会被无意识地遗忘, 对应到企业生产过程中, 则可以表述为员工长期操作的工序会深深映入大脑, 而偶尔操作使用的步骤则可能会发生遗忘。

1.3 学习遗忘效应

在实际企业项目生产中, 科学家们主要使用 3 个遗忘曲线模型进行预测分析: VRVF 模型^[12] (variable regression variable forgetting), VRIF 模型^[13] (variable regression invariant forgetting), LFCM 模型 (learn forget curve model)。其中, 由 Jaber 等^[14]将学习曲线和遗忘曲线相结合而建立的学习遗忘曲线模型 LFCM 在实际企业项目生产中适用最广泛, 有着较高的准确性、适用性及优越度。它使得遗忘曲线的模型是变动的, 并且其遗忘率也是变动的, 这个规律较符合实际企业生产中员工的行为状态。故本文着重描述基于 LFCM 模型而计算出的对项目关键路径的影响及进度计划的改变。

1.4 LFCM 模型

Wright^[8]的学习曲线模型的数理公式为

$$T_x = T_1 x^{-a} \tag{2}$$

式中: T_x 表示第 x 个产品所用的生产时间, $x=1, 2, \dots, n$; T_1 表示第一个产品所用的生产时间。

从学习曲线模型可以看出, 学习曲线在一段时间后会有一平稳的趋势, 并不会使员工单位生产的时间持续减少。

而 Carlson 等^[12]遗忘曲线的公式为

$$\hat{T}_y = \hat{T}_1 y^g \tag{3}$$

式中: $\hat{T}_y$ 表示经验中断之后生产第 y 个产品的生产时间; $\hat{T}_1$ 表示生产第 1 个产品所需要的生产时间; y 表示如果没有中断生产, 持续不断生产所能产出的最大产品数; g 表示遗忘率。

现实生活中, 实际生产的过程会遭遇员工休息、资源匮乏、机器老化故障等干扰, 仅依靠学

习曲线的预测却不考虑其他因素的影响是不准确的, 而加入遗忘曲线后, 其中的作业中断时间与员工经验等因素则较为符合现状。

图 1 是 LFCM 学习遗忘模型曲线图, 可以发现, 学习曲线以及遗忘曲线的交点, 即产品数目相同时平均单个产品生产时间相同的点。 s 表示若生产未停止, 则在停产时间内可继续生产出的产品数。在生产作业过程中, 员工停止了学习就会立即发生遗忘效应, 单个产品的生产时间会回到原始生产时间 T_1 。Jaber 等^[14]由此得到公式:

$$\lambda = q^{\frac{a+g}{a}} (q+c)^{-\frac{g}{a}} \tag{4}$$

式中: q 表示周期内共生产的产品数; λ 表示学习中断后, 下一次生产前员工保留的生产经验(以产品数目来记数); c 表示员工完全遗忘经验的停止生产时间。

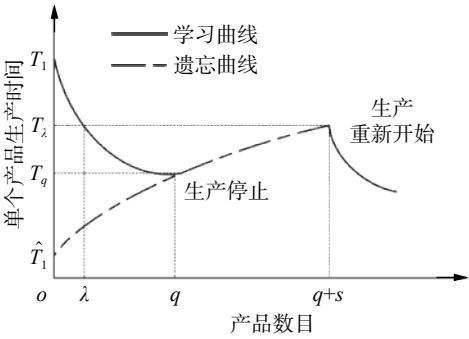


图 1 LFCM 学习遗忘曲线模型
Fig.1 Learn forget curve model

并且可以得到生产中中断后, 下一次生产第一个产品的生产时间。

$$\hat{T} = T_1 (\lambda + 1)^{-a} \tag{5}$$

式中: $\hat{T}$ 表示生产中中断后, 下一周期生产第一个产品所需要的时间; T_1 表示生产第一个周期的第一个产品所需要的时间。

LFCM 模型还得出: 遗忘率 g 并不是不变的, 它是一个与学习因子有关的函数。

$$g = \frac{a(1-a)\log q}{\log\left(1 + \frac{t_c}{t_b}\right)} \tag{6}$$

式中: t_c 表示导致员工发生完全遗忘的停产时间; t_b 表示员工没有任何生产经验的情况下生产这一周期产量 q 需要花费的时间。

观察 LFCM 模型图可知, 由于实际生产过程中有其他因素^[15](如常见的员工歇息)的干扰, 每个生产周期的首个产品的生产时间会超过前一个

生产周期结束时最后一个产品的生产时间。并且只要员工没有发生完全遗忘的情况，这一周期第一个产品的生产时间由于上一周期经验的保留，会少于上一个周期第一个产品的生产时间，即这一周期的第一个产品的生产时间会介于上一周第一个和最后一个产品的生产时间之间。

以上为一个周期的生产情况下的学习遗忘模型，黄宇菲等^[16]将其推广到 n 个周期内加以应用，得出公式：

$$q_i=\left[\frac{t_{ip}(1-a)}{T_1}+(\lambda_i+1)^{(1-a)}\right]^{\frac{1}{1-a}}-\lambda_i$$

(7)

$$g_{i+1}=\frac{a(1-a)\log(q_i+\lambda_i)}{\log\left[1+\frac{t_c(1-a)}{T_1(q_i+\lambda_i)^{(1-a)}}\right]}$$

(8)

$$\lambda_{i+1}=\left[\frac{t_{ip}(1-a)}{T_1}+(1+\lambda_i)^{(1-a)}\right]^{\frac{a+g_i}{a(1-a)}}\cdot\left[\frac{(t_{ip}+t_{ic})(1-a)}{T_1}+(1+\lambda_i)^{(1-a)}\right]^{\frac{-g_i}{a(1-a)}}$$

(9)

式中： λ_i 表示第 i 周期开始时员工的生产经验（以产品个数来记数）； $q_i+\lambda_i$ 表示上一周期内共能生产的产品数量； g_i 表示第 i 周期的遗忘率； $q_i+c_i+\lambda_i$ 表示若这个周期内没有发生停止生产的情况，这个周期内所可以生产的产品总量； t_c 表示从开始生产到员工出现完全遗忘现象所需要的时间。

由式(9)可得，如果已知第 i 个周期的生产工作时间 t_{ip} ，休息时间 t_{ic} ，发生完全遗忘经验所需要的时间 t_c ，员工所具有的生产经验 λ_i 和学习因子 a ，就可以求出该周期的产量 q_i ，下一周期的遗忘率 g_{i+1} 和下一周期员工所具有的生产经验 λ_{i+1} ，可以接着求出该周期内生产第一个产品所需时间 T_{i1} 以及周期累计产量 Q 。

2 基于 LFCM 模型的项目进度网络图优化

在项目进度计划中，时间优化是对网络进度计划中时间这一特殊目标进行优化。在时间优化中，关键路径控制着整个项目的进度。所以，要优化缩短时间，首先要考虑关键线路的影响^[17]。压缩关键路径可以有效缩短工期，但其并非唯一的方法。当然也可以考虑将顺序作业且没有严密的先后逻辑关系的工序改为平行作业，这样同样可以改善工期。但本文在各工序逻辑关系已知的

情况下，仅考虑压缩各工序持续时间，并不改变工序间紧前紧后逻辑关系。现基于 LFCM 模型和双代号网络图，合理运用学习遗忘效应，可缩短工期，改变关键路径，从而更有效地对进度计划进行优化。

现在企业负责一个生产改进的项目时，要求工人完成多道工序，每道工序都需要制作多个零件，并且制作零件有严密的先后逻辑关系，理论上工人每天制造零件个数为 10 个，若完成某道工序 A 的共需零件数为 40 个，则该道工序的完成时间为 4 d，完成各工序所需的零件总数目及工序之间的逻辑关系如表 2 和表 3 所示，其中，表 2 可得各工序在不考虑行为效应时的持续时间，表 3 可得各工序间紧前紧后关系约束。

表 2 不考虑学习遗忘效应时各工序要求

Tab.2 Procedure requirements without considering the learning and forgetting effect

工序	共需零件数/个	工序	共需零件数/个
A	40	N	40
B	70	O	20
C	100	P	50
D	90	Q	50
E	50	R	10
F	30	S	30
G	100	T	20
H	90	U	60
I	60	V	40
J	40	W	90
K	50	X	110
L	30	Y	10
M	40	Z	70

现以不同批次员工来进行实验，假设同一批次的员工的学习能力水平一致，工人普遍的学习比例为 80%~90%，因此，考虑这个范围内的学习遗忘效应的影响以及不考虑学习遗忘效应的影响等多种情况。将某工程的进度计划以双代号网络图的形式表示，并在箭线下方标注由表 2 所得的每个工序在不考虑学习遗忘效应情况下的作业时间，如图 2 所示。

由图 2 双代号网络图可以看出，在没有任何学习遗忘效应的影响下，关键路径为 A-D-H-K-N-Q-U-W，工期为 45 d。

表 3 某工程各工序逻辑关系

Tab.3 Logical relationships between different production processes

逻辑关系	紧前工序	逻辑关系	紧前工序
A	—	N	I,K
B	—	O	L
C	A	P	M
D	A	Q	J,N,T
E	B	R	O
F	B	S	L
G	C	T	S
H	D,E	U	Q
I	D,E,F	V	P
J	G,H	W	P,R,U
K	H	X	R
L	I	Y	V
M	J	Z	X

现重点分析学习遗忘效应模型的影响。假设员工一天工作 10 h, 下班后休息 14 h, 即 $t_{ip}=10$, $t_{ic}=14$ 。无经验的员工生产第一个产品的时间为 1 h, 即日产量为 10 个。此外, 若休息时间为 1 200 h, 则会发生完全遗忘的情况。取学习比例为 90%, 此时的学习因子 $a=0.152$, 运用 LFCM 模型, 首先初始经验 $\lambda_1=0$, 初始遗忘率 $g_1=0$, 根据 $t_{ip}=10$, $a=0.152$, $T_1=1$ 等条件, 根据式(7)~(9), 可以计算出每个周期所需的数据。最后将产量 Q 与员工获得经验取四舍五入值, 遗忘率取 3 位小数, 可以计算出各周期的数据如表 4 所示。

结合表 2, 原来工序 A 的 40 个零件数需 4 d 才能完成, 现在由表 4 可见, 员工的每天生产零件个数增多, 在第 3 d 时即可完成 49 个零件, 因此, 工序 A 的持续时间变为 3 d, 以此类推, 可计算得到员工在学习比例为 90% 时各工序加工天数并向上取整, 此时双代号网络图发生改变, 如图 3 所示。

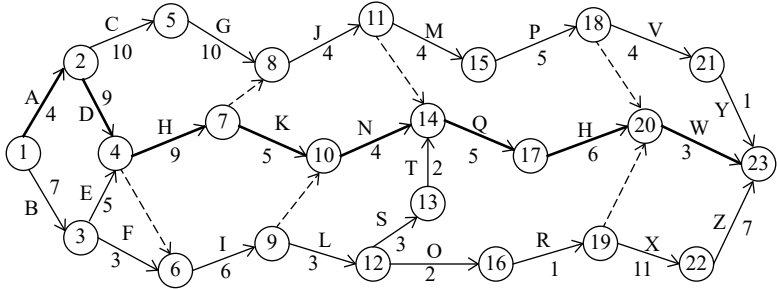


图 2 不考虑学习遗忘效应的双代号网络图

Fig.2 Double code network diagram of logical relationships for procedures without considering the learning and forgetting effect

表 4 学习因子 $a=0.152$ 时各周期产量及其他数据

Tab.4 Output and other factor of each cycle when the learning factor $a=0.152$

序号	q_i	g_i	λ_i	Q
1	14	0	0	14
2	17	0.072	14	31
3	18	0.110	24	49
4	18	0.127	30	67
5	19	0.136	34	86
6	19	0.143	37	105
7	19	0.147	39	124
8	19	0.149	40	143

可以发现, 此时双代号网络图的关键路径发生了改变, 并且增加为 2 条, 为 A-D-H-K-N-Q-U-

W 与 B-E-H-K-N-Q-U-W, 工期缩减为 32 d。可见, 取学习比例为 90% 的情况下, 也就是在员工有学习遗忘效应的影响下, 项目的实际进度会加快许多, 并且关键路径也有可能发生改变, 可见员工的学习遗忘能力与项目的进度紧密相关。

现降低学习比例来研究不同学习比例对进度和关键路径的影响, 取学习比例 85%, 即 $a=0.234$ 时的情况来计算, 结果如表 5 所示。此时双代号网络图又发生了如图 4 所示的变化。如图 5 所示, 关键路径变为 5 条, 但与学习比例为 90% 的情况相比, 关键路径及其条数发生了变化, 关键路径变为 B-E-H-K-N-Q-U-W, B-E-I-K-N-Q-U-W, B-E-I-L-S-T-Q-U-W, B-E-I-L-O-R-X-Z, B-E-I-L-O-R-W, 工期缩减为 24 d。

再取学习比例为 80% 的情况下, 即学习因子

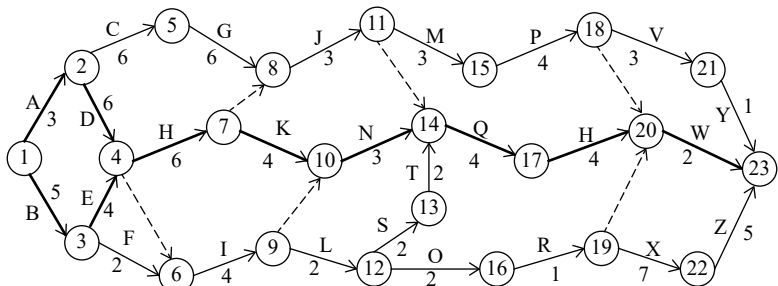


图3 考虑学习遗忘效应（学习比例90%，即 $a=0.152$ ）的双代号网络图

Fig.3 Double code network diagram considering the learning and forgetting effect (learning ratio 90%, i.e. $a=0.152$)

$a=0.322$ 的情况来计算各个工序的生产情况如表6所示。双代号网络图如图6所示。

表5 学习因子 $a=0.234$ 时各周期产量及其他数据
Tab.5 Output and other data of each cycle when the learning factor $a=0.234$

序号	q_i	g_i	λ_i	Q
1	17	0	0	17
2	23	0.109	17	40
3	25	0.165	29	65
4	26	0.189	37	91
5	27	0.202	43	118

此时，关键路径数量为3条，即A-D-I-L-S-T-Q-U-W，B-E-I-L-S-T-Q-U-W，B-F-I-L-S-T-Q-U-W，工期缩减为20 d。

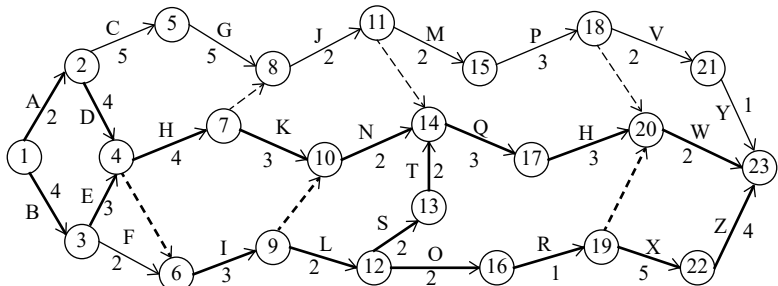


图4 考虑学习遗忘效应（学习比例85%，即 $a=0.234$ ）的双代号网络图

Fig.4 Double code network diagram considering the learning and forgetting effect (learning ratio 85%, i.e. $a=0.234$)

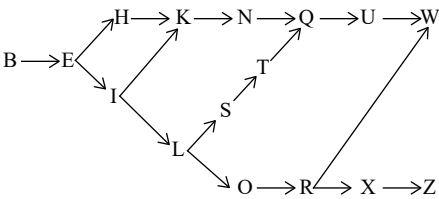


图5 考虑学习遗忘效应（学习比例85%，即 $a=0.234$ ）的关键路径

Fig.5 Key path considering the learning and forgetting effect (learning ratio 85%, i.e. $a=0.234$)

可对整体工期进度及关键路径产生影响，是工程项目中应该考虑的重要因素。

由表7可以发现，学习比例为90%，85%和80%的情况下，项目总工期均不相同，并且关键路径的数量也有所差异。同时，学习比例越小，学习因子(可以表述为员工学习的能力水平)就越大，故工程项目受到学习遗忘效应的影响越大，工期缩短也越大，进度计划更短，企业投入成本就越小。90%的学习比例情况下时间缩短了13 d，而85%的情况比90%的情况时间缩短了8 d，最后80%的情况比85%的情况只缩短了4 d。所以，结合几个案例可以发现，学习遗忘效应会因为学习比例的不同而产生不同的影响，但是，一直减少学习比例，即增加学习因子，项目工期的缩短时间会越来越不显著。但是，仍然可以看出，在学习遗忘效应影响下，关键路径会由于学习比例的变化而发生变化。因此，学习遗忘效应

表6 学习因子 $a=0.322$ 时各周期产量及其他数据
Tab.6 Output and other data of each cycle when the learning factor $a=0.322$

序号	q_i	g_i	λ_i	Q
1	21	0	0	21
2	33	0.143	21	54
3	38	0.217	39	92
4	40	0.252	51	132

从表4~6的数据中可以看出，在学习及遗忘效应的影响下，员工平均每周的产量会高于不考

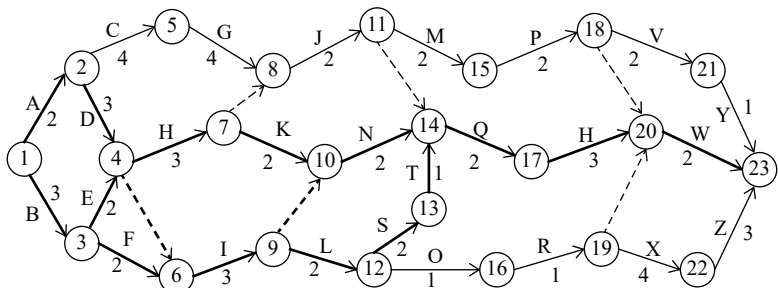


图6 考虑学习遗忘效应(学习比例80%,即 $a=0.322$)的双代号网络图

Fig.6 Double code network diagram considering learning and forgetting effect (learning ratio 80%, i.e. $a=0.322$)

考虑学习遗忘效应时的产量。并且,员工平均每周的生产数量呈现一个递增的状态,但是,随着生产周期或生产时间的增长,生产数量并不会一直大量增加,而是如图7所示会渐渐趋于稳定。

由此可见,在生产过程中,尽管有因为休息等原因造成的遗忘效应的影响,但是,员工的生产水平总体还是逐渐熟练的,并且会达到一个比较稳定的水平,而不会一直增长^[18]。这个结论在图7中主要表现为员工每周期的生产产量逐渐增加,但会趋于一个稳定的状态,即虽然员工有流失的生产经验,也有增加的生产经验,流失的生产经验会少于增加的生产经验,导致连续周期下总的经验依旧是增加的。学习遗忘效应的影响可以有效地缩短生产周期,加快进度计划。故随着时间的推移,由于学习遗忘效应的存在,员工能够对一个产品的长期生产状态从陌生到熟练,逐渐加快生产速度,并且能够对项目进度产生重要的影响。

结合案例可以发现,学习遗忘效应的研究对员工生产有着较积极的影响,合理地结合实际情况运用学习及遗忘效应,可以使企业良好地把控项目调度问题中的生产进度计划、人员调配、资

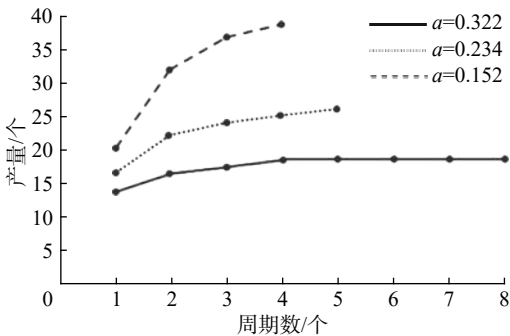


图7 不同学习因子下员工各周期产量趋势图

Fig.7 Output trend chart of each cycle under different learning factors

源划分等问题。

3 结 论

a. 运用学习遗忘效应的 LFCM 模型,选取双代号网络图,选取不同学习比例进行比较分析,研究表明,在学习遗忘效应影响下,关键路径发生改变,项目工期逐渐缩短并最终趋于平缓。

b. 虽然时间优化至关重要,但在现实项目中,很多工序缩短是受客观限制的,不只是员工工作效率问题,如资源限制、环境限制等都是实际存在的,因此。通过资源、质量、环境综合均衡优化,在不拖延工期的条件下对进度计划加以改善,应成为未来行为因素在项目调度中广泛应用的研究重点。

c. 本文假设员工学习能力相同,而在实际生产实施中,学习能力会因个体差异有所偏差。企业对于员工的培训需要耗费一定的财力与时间,正确选取培训员工的方法,也是行为运作管理的内容。

本文基于学习遗忘效应的进度计划研究只是一个切入点,较为适用于员工筛选、培训、激励

表7 不同学习比例情况下的总结

Tab.7 Summary of the cases with different learning ratios

情况	学习比例	学习因子	关键路径	关键路径数量/条	工期/d
1			A-D-H-K-N-Q-U-W	1	45
2	90%	0.152	A-D-H-K-N-Q-U-W B-E-H-K-N-Q-U-W B-E-I-L-O-R-W B-E-I-L-O-R-X-Z	2	32
3	85%	0.234	B-E-I-K-N-Q-U-W B-E-H-K-N-Q-U-W B-E-I-L-S-T-Q-U-W A-D-I-L-S-T-Q-U-W	5	24
4	80%	0.322	B-E-I-L-S-T-Q-U-W B-F-I-L-S-T-Q-U-W	3	20

等方面的应用及员工休息时间的选择与安排,随着企业项目的逐步扩大,有关人的行为因素问题将日益凸显,因此,未来仍需要进行更多的研究分析。

参考文献:

- [1] 李俊亨,杨睿娟. 关键链多项目进度计划优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 631-640.
- [2] 陈迪,孙福权,刘士新. MRO 服务中心多技能员工优化调度模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(7): 927-930.
- [3] 王一帆,刘士新,陈迪. 求解多技能人力资源约束的项目调度问题的两阶段算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 184-189.
- [4] 张琦,廖良才,王卫威. 基于改进遗传算法的关键链项目进度计划优化[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(4): 1-5.
- [5] 田文迪,胡慕海,崔南方. 不确定性环境下鲁棒性项目调度研究综述[J]. 系统工程学报, 2014, 29(1): 135-144.
- [6] 于静,徐哲,李洪波. 带有活动重叠的资源受限项目调度问题建模与求解[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(5): 1236-1245.
- [7] 徐佳敏,叶春明. 基于智能水滴算法的学习效应生产调度研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(7): 1167-1171, 1181.
- [8] WRIGHT T P. Factors affecting the cost of airplanes[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1936, 3(4): 122-128.
- [9] BISKUP D. Single-machine scheduling with learning considerations[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 115(1): 173-178.
- [10] KUO W H, HSU C J, YANG D L. Worst-case and numerical analysis of heuristic algorithms for flowshop scheduling problems with a time-dependent learning effect[J]. *Information Sciences*, 2012, 184(1): 282-297.
- [11] LEE W C, LAI P J, WU C C. Erratum to 'Some single-machine and m-machine flowshop scheduling problems with learning considerations'[J]. *Information Sciences*, 2010, 180(6): 1073.
- [12] CARLSON J G, ROWE R G. How much does forgetting cost?[J]. *Industrial Engineering*, 1976, 8(9): 40-47.
- [13] ELM'AGHRABY S E. Economic manufacturing quantities under conditions of learning and forgetting (EMQ/LaF)[J]. *Production Planning & Control*, 1990, 1(4): 196-208.
- [14] JABER M Y, BONNEY M. Production breaks and the learning curve: the forgetting phenomenon[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1996, 20(2): 162-169.
- [15] 曹拯. 学习遗忘曲线模型在 S 公司生产培训中的应用与研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012: 14.
- [16] 黄宇菲,汪应洛. 基于学习遗忘曲线模型的员工生产率研究[J]. *管理学报*, 2011, 8(9): 1325-1331.
- [17] 李丽. 我国工程项目进度管理研究综述[J]. *科学之友*, 2011(2): 71-72.
- [18] YE C M. A new model of production scheduling based on learning effect[J]. *Enterprise Economy*, 2015(4): 15.

(编辑: 石 瑛)