

# 基于网络计划技术的制造型企业时间—成本优化研究

李立, 翟所霞, 鲁玉军

(浙江理工大学机械与自动控制学院先进制造技术研究所, 杭州 310018)

**摘要:** 针对数控机床装配过程中的时间—成本优化寻求最优工期问题, 提出了一种使用网络计划技术建立时间—成本优化模型来缩短工程时间和降低人工成本的方法。运用 WINQSB 软件中的 PERT\_CMP 模块对该模型进行研究分析。结果表明: 在机床制造型企业面对订单/需求增加时, 该模型可以使企业在成本增加最小的前提下有效地缩短工期。在此基础上, 以某精密机械制造厂的实际案例验证了所提出优化方法的可行性与实用性。

**关键词:** 网络计划技术; 数控机床; 时间—成本优化模型

**中图分类号:** TP24      **文献标志码:** A

## 0 引言

网络计划技术主要包括计划评审方法 (program evolution and review technique) 和关键路线法 (critical path method)<sup>[1]</sup>, 它们是工程计划编制和管理的有效工具。目前这两种方法实际上已合并为一种方法, 国内称为网络计划技术, 国际上称为 PERT/CPM。网络计划技术发展至今已经可以利用计算机进行网络计划绘图、计算模型优化、分析以及控制, 成为国外现代管理不可或缺的一项重要管理方法<sup>[2]</sup>。

网络计划技术通过描述各项工作之间的逻辑联系 (并行、串行) 和完成工程所需工时的“网络图”为基础, 从逻辑关系和时间关系上反映整个工程和任务全貌的数学模型和计算方法, 旨在确定对全局有影响的关键工序, 切实可行地规划整个工程进度和安排或各项任务。它不仅能广泛地应用于项目管理中时间进度的安排, 而且还能应用在时间—成本费用的优化方面<sup>[3-4]</sup>。

基于网络计划技术的时间—成本优化研究主要面向工程建筑中的赶工期问题, 电子行业也略有研究。但是, 在机械制造行业, 该技术的应用频率和效

果均一般, 尤其是生产数控机床的企业中, 很少有运用该研究模型的相关文献发表。究其原因可能在于, 一方面, 该类企业没有意识到基于网络计划技术的时间—成本优化模型的好处; 另一方面, 该模型本身存在两个难点: 在限定工期完工条件下, 如何确保所需要的费用最少; 在没有工期限定的条件下, 如何尽可能地节省费用并优化工期。这也使得企业管理人员很难去应对。本文主要以某数控机床生产企业的装配过程中的时间—成本为重点研究对象, 运用网络计划技术, 建立时间—成本优化模型, 解决数控机床生产企业在面对订单/需求增加时, 投入最少的成本并如期完工<sup>[5-8]</sup>。

## 1 数控机床装配现状分析

数控机床的装配过程共有如下步骤: 初装、精装、刮花、刮花组装、副线安装、精装与副线组装、电控布线、控制器组装、外观检验、功能检验以及封箱, 其中每个步骤都包含多个独立的作业工序。整个机器结构复杂, 完工周期较长。对此, 本文从数控机床装配的工艺流程以及精装部分各工位的标准工时进行概述。

收稿日期: 2013-01-05

基金项目: 国家自然科学基金 (60974083); 浙江省自然科学基金 (LZ12F03003, Y6110478); 浙江省重点科技创新团队项目 (2011R09018-09)

作者简介: 李立 (1988—), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要从事生产计划与控制、精益生产、制造系统工程的研究。

通信作者: 鲁玉军, 电子邮箱: luet\_lyj@zstu.edu.cn

1.1 数控机床装配工艺流程

数控机床装配的工艺流程如图1所示,各工序分别用字母A、B、C、D、E、F、G、H、I、J以及K表示。其中,B精装部分的作业工序共有21道,如图1中子工序(1)~(21),作业周期占整个机床周期的60%左右,

因此可以以B精装部分作为整个装配过程的主线。根据各个工位之间的先后装配顺序,以及便于进一步的分析,将B精装部分各工位用序号*i*(*i*=1~21)表示,并将其划分为四个装配段(*i*=1~2时为B1;*i*=3~6时为B2;*i*=7~9时为B3;*i*=10~21时为B4)。

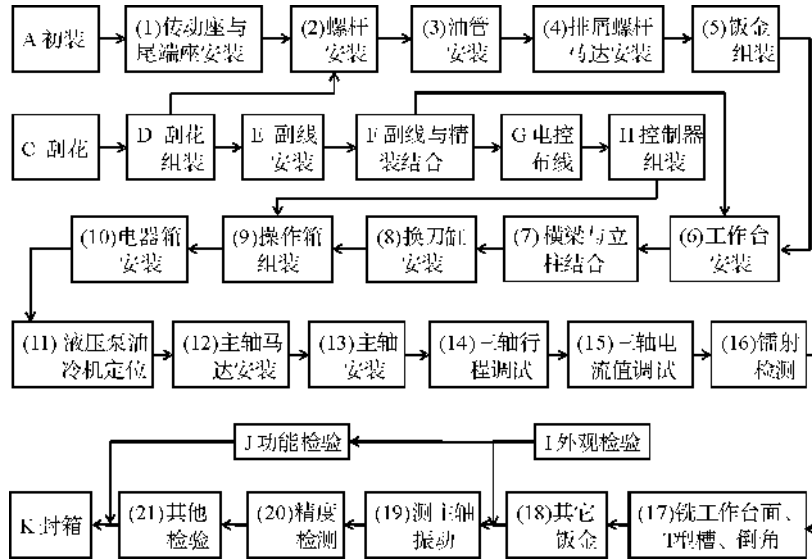


图1 数控机床装配工艺流程

1.2 精装部分各工位的标准工时

运用秒表法进行测时,得到精装部分各工位的作业时间 $CT_i$ ( $i=1,2,\dots,21$ ),如表1所示。

表1 精装部分各工位的作业时间

<i>i</i>	作业工位	标准时 间/min	配置人 员/人	工作时 间/8 h
B1:1	传动座与尾端座安装	752	1	3
B1:2	传动螺杆安装	688	1	
B2:3	油管装配	369	1	
B2:4	排屑螺杆及马达安装	425	1	5
B2:5	钣金组装	1 384	1	
B2:6	工作台安装	220	1	
B3:7	横梁与立柱结合	437	1	4
B3:8	换刀缸安装	640	1	
B3:9	操作箱组装	842	1	
B4:10	电器箱安装	143	1	8
B4:11	液压泵、油冷机的定位	268	1	
B4:12	主轴马达安装	136	1	
B4:13	主轴安装	139	1	
B4:14	三轴行程的调试	186	1	
B4:15	三轴电流值调试	214	1	
B4:16	镭射检测	362	1	
B4:17	铣工作台、T型槽、倒角	228	1	
B4:18	其它钣金	1 258	1	
B4:19	测主轴振动	268	1	
B4:20	精度检验	232	1	
B4:21	其他检验	406	1	

注:B为装配区编号;工作时间每日一班8 h。

由表1可知,整个精装部分各工位作业的总时间 $CT_B$ ,即:

$$CT_B = \sum_{i=1}^{21} (CT_1 + CT_2 + \dots + CT_i) = (752 + 688 + \dots + 406) = 9\,597 \text{ min} \approx 20 \text{ d} \quad (1)$$

利用秒表测时法并结合公式(1),亦可以得到初装、刮花、副线组装、电控通线、全功能自检以及封箱的各工位的总时间。

2 时间—成本优化模型

在编制网络计划过程中,针对时间—成本优化问题存在的两个难点:第一,在限定完工时间条件下,如何确保所需要的成本最少;第二,在没有工期限定的条件下,如何尽可能地节省成本并优化工期。针对限定工期与未限定工期两种条件,本文提出了如下两种相应的时间—成本优化模型:

a) 在限定的工期  $T$  的条件下,使所需要的成本最少。其时间—成本优化模型为:

$$\begin{aligned} \min W &= \sum_{i \rightarrow j} C_{i,j} (l_{i,j} - T_{i,j}) = \sum_{i \rightarrow j} C_{i,j} Y_{i,j} \quad (2) \\ s. t. &\begin{cases} X_j - X_i \geq T_{i,j} \\ d_{i,j} \leq T_{i,j} \leq l_{i,j} \\ X_n - X_1 \leq T \\ X_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \end{aligned}$$

工序( $i \rightarrow j$ )的费用率为  $C_{i,j}$ ,即为缩短1个单位

时间所需要的直接费用,  $d_{i,j}$  为工序完成需要的最短时间,  $l_{i,j}$  为工序完成需要的正常时间,  $T_{i,j}$  为工序完成需要的实际时间, 实际缩短的工期为  $Y_{i,j} = (l_{i,j} - T_{i,j})$ ,  $X_i$  为第  $i$  道工序的开始时间。  $T_{i,j}$ 、 $X_i$  为模型的决策变量。

约束条件: 要考虑工序能否进行加班而缩短工期、缩短的时间, 以及工期  $T$  的具体要求等。各工序的实际时间应不小于完成各工序所需要的时间, 即:  $T_{i,j} \leq X_j - X_i$  (对于任何可以压缩的工序  $i \rightarrow j$ );

对于任何可能压缩的工序实际上缩短时间应不超过该工序的最大缩短时间, 即:  $d_{i,j} \leq T_{i,j} \leq l_{i,j}$  (对于任何可以压缩的工序  $i \rightarrow j$ );

加班后实际工期应该不大于工期  $T$ , 即:  $X_n - X_1 \leq T$ ;

非负约束变量, 即:  $X_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 。

该模型的目标是在既定完成时间  $T$  内, 使缩短工序完成时间所增加的成本最小。由于工序按正常时间完成的成本是一个常数, 当缩短工序完成时间所增加的费用最少, 也就是使工程完工所需要的成本最小。

b) 在没有工期  $T$  限定的条件下, 使成本最小化并优化工期。

设单位时间的间接成本为  $K$ , 计划期间的间接成本与总工期成正比, 设为  $K(X_i - X_1)$ , 则在尽可能节省成本时, 时间—成本优化模型为:

$$\min W = \sum_{i \rightarrow j} C_{i,j} (l_{i,j} - T_{i,j}) + K(X_i - X_1) \quad (3)$$

$$s. t. \begin{cases} X_j - X_i \geq T_{i,j} \\ d_{i,j} \leq T_{i,j} \leq l_{i,j} \\ X_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

表2 大型数控龙门铣床装配工序的时间—成本关系

工序	紧前工序	工期时间/d		人工成本/元		工期缩量/d	费用率 $C_{i,j}$ /(元/d)
		正常	加班	正常	加班		
A	—	6	3	480	840	3	120
B1	A	3	2	240	380	1	140
B2	B1、D	5	3	400	720	2	160
B3	B2、F	4	3	320	500	1	180
B4	B3、H	8	6	640	1 040	2	200
C	—	5	3	400	760	2	180
D	C	1	0.5	80	170	0.5	180
E	C	5	4	400	560	1	160
F	E	2	1	160	320	1	160
G	E	4	2	320	800	2	240
H	G	1	0.5	80	200	0.5	240
I	A	1	0.5	80	155	0.5	150
J	I	2	2	0	0	0	0
K	B4、J	4	2	320	520	2	100
总成本(元)				3 920	6 965		

在此模型中由于没有工程完工期  $T$  的限定, 因此成本最小的完工期就是工程完成的最佳工期。最优工期  $T$  为关键路线上的各工序最优作业时间的总和, 即

$$T = \sum_{i \rightarrow j} T_{i,j}。$$

其中  $i \rightarrow j$  为关键工序。

### 3 应用实例研究

某制造型精密机械厂专门从事大型数控龙门铣床的生产, 需要经过初装、精装、刮花、刮花组装、副线组装、副线与精装结合, 电控布线、控制器组装、外观自检、功能自检以及封箱等多道工艺流程, 生产周期较长。该企业面对订单/需求增加时, 需要组织作业员工进行加班作业才能保证准时交机到客户手中。为此, 企业安排员工进行加班作业并支付人工加班费用, 但并没有达到理想的效果。应用上文建立的时间—成本优化模型, 可以在一定程度上解决这一问题。

#### 3.1 数据的采集整理

通过调查得知, 该厂装配一台大型数控龙门铣床装配工序对应的时间—成本关系如表2所示。根据表2绘制的网络计划图如图2所示。现在该厂需要通过加班来缩短相关工序的工期, 以保证预期交货。例如: 精装工位在正常情况下的工期是20 d, 如果选择加班, 那么工期最短可为14 d。整个机床的正常的完工期限是30 d。企业需要解决的问题: 若将工期缩短到21 d, 应如何在使支付的人工加班费用最低的情况下, 编排各工位的实际完工时间。

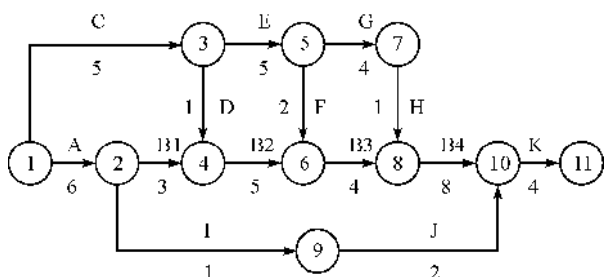


图2 大型数控龙门铣床简化的装配网络图

### 3.2 时间—成本优化模型的建立

设工序  $i \rightarrow j$  实际缩短的工期为  $Y_{i,j}$ ,  $i$  节点的实际发生时间为  $X_i$ , 且有  $X_0 = 0$ , 最后一个节点发生的时间为  $X_n$ ;  $l_{i,j}$ ,  $d_{i,j}$  分别为工序正常完成时间和最快完成时间,  $i = (1, 2, \dots, 11)$ ,  $i < j$ ,  $C_{i,j}$  为各工位的费用率, 即各工序对应的加班费(元/d)。

根据时间—成本优化模型公式(2)和数控龙门铣床装配工序表1, 其时间—成本的优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min W = & 120Y_{1,2} + 140Y_{2,4} + 160Y_{4,6} + 180Y_{6,8} \\ & + 200Y_{8,10} + 180(Y_{1,3} + Y_{3,4}) + 160 \\ & (Y_{3,5} + Y_{5,6}) + 240(Y_{5,7} + Y_{7,8}) + \\ & 150Y_{2,9} + 100Y_{10,11} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_2 - X_1 & \geq 6 - Y_{1,2} \\ X_4 - X_2 & \geq 3 - Y_{2,4} \\ X_6 - X_4 & \geq 5 - Y_{4,6} \\ X_8 - X_6 & \geq 4 - Y_{6,8} \\ X_{10} - X_8 & \geq 8 - Y_{8,10} \\ X_3 - X_1 & \geq 5 - Y_{1,3} \\ X_4 - X_3 & \geq 1 - Y_{3,4} \\ X_5 - X_3 & \geq 5 - Y_{3,5} \\ X_6 - X_5 & \geq 2 - Y_{5,6} \\ X_7 - X_5 & \geq 4 - Y_{5,7} \\ X_8 - X_7 & \geq 1 - Y_{7,8} \\ X_9 - X_2 & \geq 1 - Y_{2,9} \\ X_{10} - X_9 & \geq 2 - Y_{9,10} \\ X_{11} - X_{10} & \geq 4 - Y_{10,11} \\ 0 & \leq Y_{i,j} \leq X_j - X_i \\ X_1 & = 0 \\ X_{11} & \leq 21 \\ X_i & \geq 0 \end{aligned}$$

### 3.3 模型的求解过程及结果

#### 3.3.1 输入数据

a) 使用 WINQSB 软件中的 PERT\_CMP 模块, 将已建立的优化模型的具体数据输入到如图3所示的数据输入界面。其中, Activities Name(工序

代号)、Immediate Predecessor(紧前活动)、Normal Time(正常时间)、Crash Time(赶工时间)、Normal Cost(正常成本)、Crash Cost(赶工成本)、Actual Cost(实际成本)。

Activity Number	Activity Name	Immediate Predecessor (list number/name, separated by ',')	Normal Time	Crash Time	Normal Cost	Crash Cost
1	A		6	3	480	840
2	B1	A	3	2	240	380
3	B2	B1,D	5	3	400	720
4	B3	B2,F	4	3	320	500
5	B4	B3,H	8	6	640	1040
6	C		5	3	400	760
7	D	C	1	0.5	80	170
8	E	C	5	4	400	560
9	F	E	2	1	160	320
10	G	E	4	2	320	800
11	H	G	1	0.5	80	200
12	I	A	1	0.5	80	155
13	J	I	2	2	0	0
14	K	B4,J	4	2	320	520

图3 数据输入界面

b) 选择系统菜单 Solve and Analyze(求解与分析)的下拉菜单选项: Perform Crashing Analysis(应急赶工分析), 在如图4界面中选择第一项 Meeting the desired completion time(预定期望完工时间), 并输入期望完工时间 21 d。此外, 从图4可知, Project completion time and cost based on normal time(正常工期 30 d, 正常成本费用 3 920 元); 当对各道工位进行赶工时, Project completion time and cost based on crash time(赶工工期 19 d, 总成本费用 6 965 元)。

图4 期望工期输入界面

#### 3.3.2 求解结果

单击图4“OK”选项, 系统显示如图5所示的求解结果。

Activity	Critical Path	Normal Time	Crash Time	Suggested Time	Additional Cost	Normal Cost	Suggested Cost
1	A	Yes	6	3	\$360	\$480	\$840
2	B1	Yes	3	2	\$140	\$240	\$380
3	B2	Yes	5	3	0	\$400	\$400
4	B3	Yes	4	3	\$180	\$320	\$500
5	B4	Yes	8	6	\$400	\$640	\$1,040
6	C	Yes	5	3	\$180	\$400	\$580
7	D	Yes	1	0.5	0	\$80	\$80
8	E	Yes	5	4	\$160	\$400	\$560
9	F	Yes	2	1	0	\$160	\$160
10	G	Yes	4	2	0	\$320	\$320
11	H	Yes	1	0.5	0	\$80	\$80
12	I	no	1	0.5	0	\$80	\$80
13	J	no	2	2	0	0	0
14	K	Yes	4	2	\$200	\$320	\$520
Overall Project:				21	\$1,620	\$3,920	\$5,540

图5 模型求解结果

在该运行结果中,可以知道如下信息:

On Critical Path(关键线路):“yes”为关键线路、“No”为非关键线路,只有工位 I, J 为非关键工位,其他工位都是关键工位。

Suggested Time(建议的时间):表示工序完成实际需要的时间。

工序 A 工期缩短为 3 d, 工序 B1 工期缩短为 2 d, 工序 B3 工期缩短为 3 d, 工序 B4 工期缩短为 6 d, 工序 C 工期缩短为 4 d, 工序 E 工期缩短为 4 d, 工序 K 工期缩短为 2 d, 就可以实现将整个装配工期缩短到 21 d。

Additional Cost(增加的成本):表示某些工序因加班缩短工期而增加的费用;

工序 A 增加成本 360 元, 工序 B1 增加成本 140 元, 工序 B3 增加成本 180 元, 工序 B4 增加成本 400 元, 工序 C 增加成本 180 元, 工序 E 增加成本 160 元, 工序 K 增加成本 200 元, 因缩短工期到 21 天而增加的最小成本共为 1 620 元。

Suggested Cost(建议的成本):表示实际成本, 即正常成本与增加的成本之和。

正常成本 3 920 元与增加的最小成本 1 620 之和即为所支付的最少人工成本为 5 540 元。

### 3.4 应用分析

由实例可知,在规定的工期完成时间  $T$  的条件下需要的成本最少问题。在没有运用时间—成本优化模型的情况下,企业往往是对制品的每道工序都安排加班作业,从图 4 可知,该安排方式需要 19 d 就能完工,但企业支付的人工成本为 6 965 元。然而,运用时间—成本优化模型,只需要对该作业工位中的某几

道安排加班作业,既可保证企业在限定的 21 d 工期完工,又能将支付的人工成本控制在最低 5 540 元。

## 4 结 论

通过网络计划技术,建立时间—成本优化模型,可以事先对某项目或工程进行完工时间的模拟,在限定工期的条件下,研究出最节省成本的生产安排方案。在制造型企业面对订单/需求增加时,时间—成本优化模型能指导企业在成本支出最少的前提下,有效地进行生产安排,保证在限定工期完成订单,为企业带来较好的经济效益。

### 参考文献:

- [1] 党耀国, 朱建军, 李帮义. 运筹学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012(2): 172-215.
- [2] Forstmeier M, Goer s B, Wozny G. Water network optimization in the process industry—case study of a liquid detergent plant [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(5): 495-498.
- [3] 唐秋华, 肖 飞, 张子强. 基于网络计划技术的维修计划制定及研究[J]. 湖北工业大学学报, 2007(3): 48-52.
- [4] 夏开忠. 对网络计划技术中“工期-费用优化问题”教学方法的改进[J]. 中国电力教育, 2007(S2): 402-404.
- [5] 梁 云, 左小德, 薛声家. 用线性规划方法求网络计划的最低成本日程[J]. 数学的实践与认识, 1999(8): 24-29.
- [6] 董文勇, 刘 进, 丁建立, 等. 最优化技术与数学建模[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 176-277.
- [7] 杜 红. 应用运筹学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010. 02: 89-176.
- [8] 胡 颖. 网络计划时间-费用优化方法的探讨[J]. 管理工程学报, 1989, 3(3-4): 108-115.

## Research on Time-Cost Optimization of Manufacturing Enterprises Based on Network Planning Technology

LI Li, ZHAI Suo-xia, LU Yu-jun

(Advanced Manufacturing Technology Research Institute, Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To seek for the optimal time limit for time-cost optimization in the assembling process of numerically controlled machine tool, this paper puts forward a method of using network planning technology to establish time-cost optimization model to shorten engineering time and reduce labor cost and uses PERT\_CMP module in WINQSB software to study and analyze this model. The result shows that this model can effectively shorten the time limit for project under the premise of minimum cost increase of enterprises when numerically controlled machine tool manufacturing enterprises face increased order/demand. Finally, this paper verifies the feasibility and practical applicability of the optimization method proposed with the actual case of a precision machinery manufacturing plant.

**Key words:** network planning technology; numerically controlled machine tool; time-cost optimization model (责任编辑: 张祖尧)