

DOI:10.13196/j.cims.2016.12.008

考虑学习曲线的精益生产制造系统 双重资源配置方法

肖倩乔, 李益兵⁺, 左少雄, 杜百岗, 郭顺生

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了有效配置设备与人员资源以提高车间单元化生产的产能与效率, 针对劳动力资源的消耗利用是一个复杂的认知过程, 提出一种考虑学习曲线的基于精益指标的制造系统双重资源配置方法。以产品制造单元化生产方式为主线, 将生产成本、生产时间和加工质量作为车间精益优化目标, 考虑员工学习曲线对生产过程的动态作用, 研究人机两类资源与员工学习能力的动态变化关系, 获得优化配置的数学模型, 并给出多目标优化模型的求解方法。以纺机企业锡林组件加工为例具体分析了其求解过程, 结果表明, 用所提出的模型与方法求解多目标约束下的资源配置问题是可行和有效的。

关键词: 双重资源; 学习曲线; 精益生产; 纺机企业; 多目标优化

中图分类号: TH166 **文献标识码:** A

Dual-resource configuration of manufacturing system based on lean production considering learning curve

XIAO Qianqiao, LI Yibing⁺, ZUO Shaoxiong, DU Baigang, GUO Shunsheng

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstracts: To effectively allocate the equipment and employee for improving the capacity and efficiency of workshop-unitized production, aiming at the problem that the consumption and usage was a complex cognitive process, a dual-recourse configuration of manufacturing resources based on lean indicators by considering the learning curve was put forward. The product manufacturing-unitized production was taken as the main line, and the dynamic reactive of employee learning curve on production process was considered to research the dynamic relationship between human-machine resource and employee learning capacity, in which the production-cost, production-time and production-quality were taken as the optimal objects of workshop lean production. The optimized allocation model was obtained, and the solution for multi-objective optimization configuration was suggested. The solution process of cylinder components production in textile enterprises was analyzed, and the result showed that the proposed model and method were effective for solving multi-objective constrained resources allocation problem.

Keywords: dual-resource; learning curve; lean production; textile manufacturing enterprise; multi-objective optimization

0 引言

传统的车间资源配置领域主要研究有限设备资

源约束条件下的资源配置方法,而在实际生产中面临的约束除了设备资源外,还有操作员工、工装夹具、刀具、自动物料运送车、模具和多种辅助性资源

收稿日期:2016-12-27;修订日期:2016-04-27。Received 27 Dec. 2016;accepted 27 Apr. 2016.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71171154);湖北省科技支撑计划资助项目(2014BAA032)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 71171154), and the Science and Technology Supporting Plan of Hubei Province, China(No. 2014BAA032).

的影响。随着资源配置研究的不断加深,多资源配置问题也逐步受到研究者们的热捧。在企业生产管理系统中,一般将设备和人力两种资源受限形式下的资源配置称为双重资源配置。在这种资源配置系统中,不仅要安排合理的设备作业顺序,而且需要对员工进行调度配置,使得人机协调,进而提高效率、降低成本。人力资源作为生产的执行者,资源的优劣与合理利用直接关系到整个制造系统的产能和效率。因此,合理的资源配置应考虑设备和加工人员的内在联系,实现双重资源同时规划,充分发挥人机交互的作用,实现效益最大化。

精益生产(Lean Production, LP)的核心思想是用最少的投入创造最大的价值,以客户需求为驱动,运用各种现代化管理方法和理念,保证产品准时制造,消除缺陷和浪费,追求成本、时间与质量的最优配置。单元化生产是精益生产的工具,主要包含单元构建、单元布局和单元管理^[1]。单元化制造根据现场设备、人员和生产任务确定作业现场,最终实现技术、管理和人员的最优匹配。单元化生产在根据工艺信息和产能约束进行现场规划的同时,还要推动全面生产维护、全面质量管理等精益目标的实现。设备与人员规划的有效配置决定车间单元化生产能否适应企业的实际生产运作。在刚性单元化加工生产过程中,一些面向客户的定制型制造企业面临先进设备与高级人力资源无法及时共享的问题,造成双重资源的利用率低^[2]。在产品定位明确和需求稳定的条件下,应针对不同的订单类型采用与生产匹配的精益单元式布局。

在双资源约束方面,李兢尧等^[3]针对不同生产计划下考虑生产准备时间的双资源约束多批量生产调度模型,提出了基于时窗交集调度策略的继承式混合遗传算法。陶泽等^[4]针对加工设备和劳动力资源两种约束限制下的动态调度扰动问题,研究了多种扰动灵敏度识别、分析和解决方式。陈勇等^[5]对订单不确定条件下双资源多装配线的资源配置进行了研究。黄跃龙^[6]分析了 Petri 网技术在建模、分析和控制方法上的优势,利用赋时 Petri 网对双重资源配置进行了数学建模,并分析了模型的死锁和两种资源的竞争力。梁祖红等^[7]针对面向客户的多元化定制型生产模式、单元化柔性制造系统的显著特点,建立了基于多 Agent 架构的制造系统双重资源配置仿真平台,并利用仿真实验数据进行逐步回归分析,建立了考虑平均产能和生产周期的双重资源

相似非线性整数规划模型。Lei 等^[8]对双资源约束生产单元的间隔时间处理与异构资源调度问题进行了研究。Lobo 等^[9]为减少 L-max 和作业延迟交付最大时间,通过计算启发式搜索过程(Heuristic Search Procedure, HSP)的 L-max 和下界搜索算法(Lower Bound Search Algorithm, LBSA)的下限之间的差距,对双资源约束作业车间中工人分配至设备组的合理性进行了评估。Yue 等^[10]在动态任务类型的双资源约束作业车间引入交叉训练和学习曲线模式,研究了优势技能叠加和多技能交叉培训对工人技能水平的影响。Zamiska 等^[11]针对工人学习认知过程和遗忘现象,提出了双资源约束制造系统中的双向学习和遗忘模型。

以双资源配置研究理论为基础,学者们逐步对多资源约束的车间资源调度进行了探究。孙志俊等^[12]研究了生产设备、操作员工和机器人等多种资源受限的车间调度问题,并分析比较了复杂生产环境中多资源的静态和非静态制造系统调度方式。王海燕等^[13]以产品生产周期为研究目标,建立了一种基于两级差分混合进化算法的多资源生产单元批量调度模型。Rostami 等^[14]针对大规模和多资源约束条件下的生产调度低效问题,提出了一种改进的分支界定法,并建立了员工项目完成时间最小化的目标函数模型。袁亮等^[15]研究了双重资源柔性车间中的多目标配置问题,主要包含生产成本、生产周期和设备负载三目标的优化,并创造性地提出了一种特殊改进遗传算法,以防止求解陷入局部最优。曾强等^[16]探究出同类型作业车间的多目标优化调度方法,将最短产品平均加工时间和全部产品生产周期作为优化目标,建立了一个双目标同时优化的配置模型,并根据模型特点选择阶段性混合变异的禁忌算法来求解配置模型。

在多目标资源配置方面,白俊杰等^[17]提出了一种多目标柔性配置方法,并以粒子群算法为基础,引入人员偏好因素,实现了多目标车间调度模型求解过程的阶段性分批搜索。初红艳等^[18]将生产周期、订单拖延交付时间和劳动力资源闲置时间作为目标函数的 3 个要素,构建了基于子批次的设备人员资源配置模型。崔鹏举^[19]分别对柔性生产车间确定和不确定条件下的交货满意度、产品可靠性和绿色环保性等优化目标的资源调度进行了研究,构建了只考虑设备和人员两种资源约束的多目标优化数学模型。王晓娟^[20]将产品生产周期、单元流动速度、

延迟交付时间、设备总负载、瓶颈资源负载等目标作为约束条件,构建了多约束柔性生产车间资源配置优化模型。

根据以上研究可知,将人力资源作为静态因素,可建立不同条件下的双重资源配置模型,但劳动力资源的消耗利用是一个复杂的认知过程,极大地影响了生产效率,因此在双重资源配置模型中考虑员工学习曲线具有很高的工程实践价值。因此,本文以纺机制造企业为研究对象,综合考虑人力资源学习因素对生产设备效率的影响,建立基于人力资源与设备资源的双重资源配置模型,以成本、时间和质量为精益指标,提出基于精益生产的多目标纺机制造企业双重资源配置模型,并在项目依托单位进行了验证分析,结果表明所提出的模型与求解方法可行且有效。

1 基于精益生产的双重制造资源配置研究

1.1 模型假设

根据多品种小批量生产模式和单元化生产的特点,对制造系统的双重资源配置问题做以下假设:

- (1) 订单任务量未超出本企业现有的产能上限;
- (2) 订单的需求相对稳定,不考虑临时插单、订单取消和变更;
- (3) 不考虑生产转移过程中的运输费用和时间;
- (4) 零件的工艺路线唯一确定;
- (5) 设备资源和劳动力资源不可与其他生产单元共享;
- (6) 所有设备和人员均能正常工作,不考虑设备故障和员工缺勤;
- (7) 不考虑工件的二次加工或报废;
- (8) 设备加工成本包含设备折旧成本和能源燃料成本。

1.2 精益目标的选择和度量

在实际生产中,资源配置问题优化的不是单一目标,需要同时综合考虑各种性能,以达到整体最优。与一般性的成本或时间最优的目标函数相比,由于单个目标的最优会引起其他目标的恶性化局面,多目标资源配置模型要考虑各目标间的冲突与矛盾。

精益生产管理是通过各种精益工具和方法实现的,不同企业采用不同的精益工具组合,通过这些精益手段可将混乱的管理现场规范化,从而实现降低企业生产资源占有率、提高企业管理和运营效率的

总体目标。在实际生产运作过程中,企业不同部门、车间和人员会出于不同的目的,对资源配置结果给予不同程度的偏好。由于企业发展方向和经营策略的不同,资源配置优化目标的选择也会存在差异。为平衡企业的局部与整体利益,一般选择生产成本、加工时间和产品质量为资源配置优化的精益指标。

(1) 生产成本

生产成本是指企业为得到各种产成品、半成品或劳务所需直接支出或消耗的生产性费用,这种费用会从产品销售收入中得到补偿。具体而言,产品生产成本包含原材料费用、工资费用、维修费、办公费、能源燃料和计提折旧等多项费用。在生产过程中如何选择设备和劳动力资源,以满足产能需求、降低两种资源的使用成本,已成为资源配置管理的首要目标。

生产成本核算方式有多种,其中成本分步法运用较广。工序成本作为一种典型的分步核算法,是以加工部门为统计单元,根据历史数据和审计规范,测定企业各生产工序的工时计费标准。具体工序成本由每台加工设备的员工工资、设备运行和能源燃料等多个费用科目组成。工序成本计算公式如下:

$$P_i = (E + Z + S)t = (bp + v/(ry) + w_p)t. \quad (1)$$

式中: P_i 为零件加工工序*i*的工序成本; E 为设备的动力燃料费用(元/h); Z 为设备的折旧费(元/h); S 为工人的工资费用(元); b 为设备能耗标准(kg/h); p 为燃料能耗单价(元/kg); v 为机器设备的购入成本(元); r 为核定每年机时定额(h/年); y 为折旧年限(年); w_p 为工人的平均小时工资(元/h)。

则产品的生产成本计算公式:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (2)$$

式中: P 为零件的生产成本; n 为零件加工所需工序数; P_i 为加工工序*i*的工序成本。

(2) 加工时间

随着客户对企业交付满意度的要求越来越高,订单交付时间不断缩小,生产部门面临着巨大的生产任务压力,在不增加生产规模的基础上,只能通过改善工艺和现场作业管理、不断压缩时间成本,才能完成交付任务。在企业生产过程中,加工时间越短,其设备运行费用越少,产品质量损失率越小,员工疲劳作业强度越低。因此缩短加工时间是企业实施精益改革的关键点。

产品加工时间主要指设备独立加工时间和人员

操作时间,具体公式如下:

$$T = T_s + T_r = \sum_{i=1}^n T_{s_i} + \sum_{i=1}^n T_{r_i} \quad (3)$$

式中: T_r 为工人装卸零件时间和辅助时间(h); T_s 为零件在机器上的加工时间(h); T_{s_i} 为完成工序 i 的机器加工时间(h); T_{r_i} 为加工工序 i 时员工装卸与辅助准备时间(h)。

(3) 产品质量

提高产品质量是保证产品和企业市场竞争力、维持可持续经营的重要手段。一个成熟的企业,不仅会增强企业创新能力,同时会努力提高产品和服务质量。制造流程各环节的质量控制是贯彻质量标准化基础,因此产品质量的最小单元是各工序质量。在工序加工过程中,工序质量不是由机器设备或员工操作水平中的某个因素决定的,而是通过两者共同配合来保证。质量损失率是指产品质量成本的损失之和与总成本之比,具体公式如式(4):

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

式中: Q 为产品质量损失率; Q_i 为加工工序 i 的质量损失率; P_i 为加工工序 i 的成本。

综上,基于精益生产的资源配置零件的总成本、总时间和总的质量损失率最小为优化目标,在满足生产单元各约束的基础上,建立成本、时间和质量的线性数学模型:

$$\begin{aligned} \min P &= \sum_{i=1}^m (CS_i(k) + CR_i(k, j)); \\ \min T &= T_s + T_r; \\ \min Q &= \sum_{i=1}^n Q_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: P 为生产单元加工总成本; T 为所有零件在单元内生产完成的总时间; Q 为零件各工序质量损失率总和; $CS_i(k)$ 为零件生产中设备 k 加工第 i 道工序的设备成本; $CR_i(k, j)$ 为零件生产中员工 j 使用 k 号设备加工工序 i 的人工成本; w 为订单中零件的总数量; T_r 为工人装卸零件和辅助时间; T_s 为零件在机器上的加工时间; m 为零件加工的总工序数; t_i 为完成工序 i 的时间,包括机器加工时间和人员操作时间。

2 考虑学习曲线的精益制造过程双重资源优化配置模型的建立

制造系统是一个复杂系统,设备资源的正常运行和合理调配需要作为生产主体的劳动力资源的有

效配合。当前,在单元车间体系中设备操作人员的影响主要体现在以下两方面:

(1) 在设备任务分配的同时对操作人员进行任务分工,在设备顺序和人员排序已知的条件下,就成本而言,可以直接计算每个人的工资。根据设备和人员的操作关系,可建立如式(6)所示的人员任务工资计算模型:

$$\sum_{i=1}^m CS_i(k, j) = \sum_{i=1}^m (CH_{ik} + \eta y_{ik} x_{kj}) \quad (6)$$

式中: CH_{ik} 为工人操作设备 k 加工工序 i 的基本工资, η 为工资等级系数, y_{ik} 为工序 i 在设备 k 的判断系数($y_{ik}=1$ 表示工序 i 在设备 k 上加工; $y_{ik}=0$ 表示工序 i 不在设备 k 上加工); x_{kj} 为员工 j 操作设备 k 的等级, $x_{kj} = \{0, 1, 2\}$ 。

(2) 因为工人反复操作是一个熟练度不断增强的学习过程,所以生产时间模型要考虑员工学习能力对工作效率的影响。

学习效应是指同一员工或生产组织在反复操作同一作业流程的过程中,工人对单个产品的加工时间会随着累计加工的产品数量的增多而逐步递减,并最终趋于一个稳定值,如图 1 所示为单位产品生产时间与所生产的产品总数量之间关系的一条曲线,其中:横轴表示练习次数(或产量),纵轴表示学习的效果(单位产品所耗时间)。该效应主要包含两个阶段:①操作时间逐步减少的学习阶段;②操作时间平稳的标准阶段。

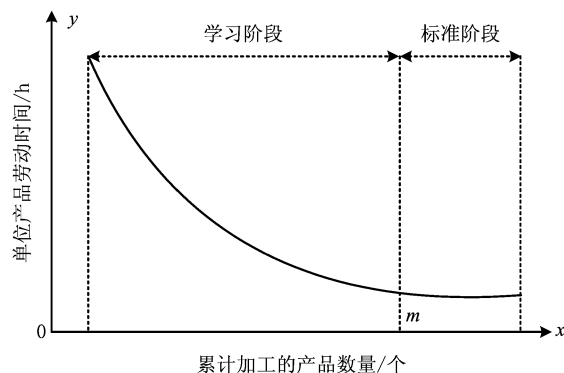


图1 学习效应图

根据图 1 所示的学习效应可知,学习曲线方程也将分为两个阶段分别描述式(7)。

$$\begin{aligned} y_x &= kx^l, x \leq m; \\ y_x &= km^l, x \geq m. \end{aligned} \quad (7)$$

式中: y_x 为加工第 x 个产品的操作时间; k 为加工第一个产品的操作时间; m 为进入标准阶段的累计

加工产品数量,其值为—常数; l 为学习系数 $l = \frac{\lg b}{\lg 2}$ (b 为学习率)。

学习率是衡量学习能力的有效标准,学习率的范围一般为 50%~100%。就作业时间而言,人机时间比越小,其学习率越大,换言之,自动化程度越高,其学习率越大、人的学习能力越差。当生产条件接近高度自动化时,学习率最大,人的学习能力最差。

综上可知员工学习过程可分为学习阶段和标准阶段,两阶段的曲线方程可整合为:

$$T_r = \sum_{i=1}^m T_{ikj} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{s=1}^{Q_{ijk}} t_{ikj} S^{-l_{ijk}} + \sum_{s=Q_{ijk}+1}^w t_{ikj} Q_{ijk}^{-l_{ijk}} \right). \quad (8)$$

式中: T_{ikj} 为员工 j 第一次操作设备 k 加工工序 i 所需时间; S 为学习阶段的底数; Q_{ijk} 为员工 j 操作设备 k 加工工序 i 时学习曲线到达标准阶段的产品数量; l_{ijk} 为员工 j 操作设备 k 加工工序 i 时的学习系数;因此,考虑学习曲线的精益制造过程双重资源优化配置模型建立如式(9):

$$\begin{aligned} \min P &= \sum_{i=1}^m (CS_i(k) + CH_{ik} + \eta v_{ik} x_{kj}); \\ \min T &= \sum_{i=1}^m (\omega TS_i(k) + \sum_{s=1}^{Q_{ijk}} t_{ikj} S^{-l_{ijk}} + \\ &\quad \sum_{s=Q_{ijk}+1}^w t_{ikj} Q_{ijk}^{-l_{ijk}}); \\ \min Q &= \sum_{i=1}^n Q_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i. \end{aligned} \quad (9)$$

3 实例分析

纺机制造企业主要按订单组织生产,其产品系列化多,功能需求变化快,单个订单的需求量不大,无法形成规模效应,故实际制造资源配置过程中需要根据订单生产任务进行相关配置,并伴随着生产计划的执行状况不断调整。以多个订单的主要产品 MB331A 系列为例进行分析,该系列主要由起毛辊传动、锡林传动和摆布组件等装配而成,各组件有专门的生产单元,由于锡林传动的锡林组件生产单元涉及到的工序设备较多,可与其他组件生产共用此单元,单元生产柔性较大,故本文将以此组件的生产为例(锡林组件的生产任务为 60 个)。锡林组件主要的工序有铸—车—钻—镗—精镗—钻—铣,下面以后 6 道工序为例进行分析,其具体零件加工工艺

如表 1 所示。

表 1 锡林组件的加工工艺

工序	可加工设备代号	设备成本 P_0	设备加工时间 T_0
G1(车)	M1	190	2
	M3	140	1.5
	M4	130	4
G2(钻)	M1	160	5
	M4	120	2.5
	M5	370	1.5
	M6	130	4.5
G3(镗)	M3	120	5.5
	M4	290	2.5
	M6	150	3
G4(精镗)	M1	100	2
	M2	290	1.5
	M4	250	0.75
G5(钻)	M2	60	1.25
	M5	50	1
	M6	220	0.75
G6(铣)	M2	220	0.5
	M4	70	1
	M5	150	0.5

根据企业多年纺机加工的生产经验和数据积累,人员操作各类机器加工的基本工资费用如表 2 所示,3 类员工的学习率如表 3 所示,各类型人员操作 6 种机器时的初始装卸时间和加工合格率如表 4 所示。

表 2 人员操作机器的基本费用

设备	M1	M2	M3	M4	M5	M6
基本费用 CH/元	50	55	50	25	40	35

表 3 各类人员学习率表

人员类型	P1	P2	P3
学习率 $b/\%$	0.97	0.90	0.89

表 4 三类员工在六种设备上的操作时间和标准工时

设备	人员类型	初始装卸时间 t_{kj}/h	标准工时 t/h
M1	P1	0.55	0.49
	P2	0.35	0.23
	P3	0.2	0.13

续表 4			
M2	P1	0.6	0.53
	P2	0.55	0.37
	P3	0.3	0.20
M3	P1	0.6	0.53
	P2	0.55	0.37
	P3	0.35	0.23
M4	P1	0.25	0.22
	P2	0.20	0.13
	P3	0.1	0.07
M5	P1	0.6	0.53
	P2	0.45	0.30
	P3	0.30	0.12
M6	P1	0.40	0.35
	P2	0.30	0.20
	P3	0.20	0.13

假设员工工资等级以 50 为公差进行递增,则员工 P3 操作 M1 完成工序 1 的工资费用 $CS_1(1,3)=CH_{11}+(3-1)\times\eta=50+(3-1)\times50=150$ 。因此, P3 操作 M1 完成工序 1 需要支出 150 元的人工成本。

基于输入参数和原始数据,通过仿真运行得到锡林组件 6 道工序的成本、时间和质量表,如表 5~表 10 所示。

表 5 锡林组件工序 1 的加工成本、加工时间和加工质量表

工序	设备号	人员类型	成本 P_{ikj} /元	时间 T_{ikj} /h	合格率 Q_{ikj}
G1(车)	M1	P1	240	149.66(3.34)	0.70
		P2	290	134.50(6.5)	0.85
		P3	340	128.18(3.82)	0.95
G1(车)	M3	P1	190	122.36(3.64)	0.60
		P2	240	112.79(10.21)	0.80
		P3	290	104.32(6.68)	0.90
G1(车)	M4	P1	355	253.48(1.52)	0.60
		P2	405	248.29(3.71)	0.75
		P3	455	244.09(1.91)	0.90

注: T_{ikj} 为考虑学习效应后所需的加工时间,()内的数字为考虑学习效益后的节约时间,下同。

表 6 锡林组件工序 2 的加工成本、加工时间和加工质量表

工序	设备号	人员类型	成本 P_{ikj} /元	时间 T_{ikj} /h	合格率 Q_{ikj}
G2 (钻)	M1	P1	210	329.66(3.34)	0.70
		P2	260	314.50(6.5)	0.85
		P3	310	308.18(3.82)	0.95
	M4	P1	145	163.48(1.52)	0.60
		P2	195	158.29(3.71)	0.75
		P3	245	154.09(1.91)	0.90
	M5	P1	410	122.36(3.64)	0.70
		P2	460	108.65(8.35)	0.85
		P3	510	102.27(5.73)	0.95
G2 (钻)	M6	P1	165	291.57(2.43)	0.60
		P2	215	282.43(5.57)	0.80
		P3	265	278.18(3.82)	0.90

表 7 锡林组件工序 3 的加工成本、加工时间和加工质量表

工序	设备号	人员类型	成本 P_{ikj} /元	时间 T_{ikj} /h	合格率 Q_{ikj}
G3(镗)	M3	P1	170	362.36(3.64)	0.60
		P2	220	352.79(10.21)	0.80
		P3	270	344.32(6.68)	0.90
	M4	P1	315	163.48(1.52)	0.60
		P2	365	158.29(3.71)	0.75
		P3	415	154.09(1.91)	0.90
	M6	P1	185	201.57(2.43)	0.60
		P2	235	192.43(5.57)	0.80
		P3	285	188.18(3.82)	0.90

表 8 锡林组件工序 4 的加工成本、加工时间和加工质量表

工序	设备号	人员类型	成本 P_{ikj} /元	时间 T_{ikj} /h	合格率 Q_{ikj}
G4 (精镗)	M1	P1	150	149.66(3.34)	0.70
		P2	200	134.50(6.50)	0.85
		P3	250	128.18(3.82)	0.95
	M2	P1	345	122.36(3.64)	0.75
		P2	395	112.79(10.21)	0.90
		P3	445	102.27(5.73)	0.95
	M4	P1	275	58.48(1.52)	0.60
		P2	325	53.29(3.71)	0.75
		P3	375	49.09(1.91)	0.90

表 9 锡林组件工序 5 的加工成本、加工时间和加工质量表

工序	设备号	人员类型	成本 P_{ikj} /元	时间 T_{ikj} /h	合格率 Q_{ikj}
G5(钻)	M2	P1	115	107.36(3.64)	0.75
		P2	165	97.79(10.21)	0.90
		P3	215	87.27(5.73)	0.95
	M5	P1	90	92.36(3.64)	0.70
		P2	140	78.65(8.35)	0.85
		P3	190	72.27(5.73)	0.95
	M6	P1	255	66.57(2.43)	0.60
		P2	305	57.43(5.57)	0.80
		P3	355	53.18(3.82)	0.90

表 10 锡林组件工序 6 的加工成本、加工时间和加工质量表

工序	设备号	人员类型	成本 P_{ikj} /元	时间 T_{ikj} /h	合格率 Q_{ikj}
G6 (铣)	M2	P1	275	62.36(3.64)	0.75
		P2	325	52.79(10.21)	0.90
		P3	375	42.27(8.73)	0.95
	M4	P1	95	73.48(1.52)	0.60
		P2	145	68.29(3.71)	0.75
		P3	195	64.09(1.91)	0.90
	M5	P1	190	62.36(3.64)	0.70
		P2	240	48.65(8.35)	0.85
		P3	290	42.27(5.73)	0.95

很显然,基于精益的生产设备和人力资源的双重配置问题是一个多目标组合优化问题,一般不存在一个解使所有目标约束同时满足,因此需要对 3 个优选目标分配权重,其权重大小表示决策者对各目标的重视程度,记为 (α,β,λ) ,其中 α,β 和 λ 分别代表总成本、时间和质量损益的权重系数,通过有效整合可将多目标求解问题简化为单目标函数进行求解。

建立总目标函数如式(10):

$$f(x) = \alpha \frac{P(x) - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} + \beta \frac{T(x) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} + \lambda \frac{Q(x) - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (10)$$

式(10)中的系数可以根据模糊层次分析法确定,运

行后的权重值: $\alpha=0.51,\beta=0.38,\lambda=0.11$ 。

为保证零件加工质量均衡,锡林组件的 6 道工序中每道工序只选用可选设备中的一种进行加工,且每种设备只选用一种等级的人员进行操作。同时根据该企业的车间生产实际情况,设定 3 个外围约束:

(1)两道钻的工序(工序 2 和工序 5)的生产成本不能超过 350 元;

(2)所有锡林组件的第 3 道工序镗的加工时间总和不能超过 190 h;

(3)前 3 道工序(车、钻、镗)的质量损失率总和不能超过 1。

基于 Lingo 8.0 进行模型运算,得到配置结果如表 11 所示。记为(A32,B41,C63,D41,E51,F41),其适应度函数值 $f(x)=0.255$,其中:A~F 代表 1~6 道工序,第二位的数字代表设备号,如 3 代表设备 M3,第三位的数字代表员工类型,如 2 代表人员类型 P2。

表 11 锡林组件加工双重资源配置结果

	设备号	人员类型	成本 P /元	时间 T /h	质量损失 Q /%
工序 1	M3	P2	240	112.79	0.2
工序 2	M4	P1	145	163.48	0.4
工序 3	M6	P3	285	188.18	0.1
工序 4	M4	P1	275	58.48	0.4
工序 5	M5	P1	90	92.36	0.3
工序 6	M4	P1	95	73.48	0.4
总和			1 130	688.77	0.27

以上权重 $\alpha=0.51$,说明此决策采用的是成本战略,即车间生产成本是第一位,要在满足加工时间和质量条件的基础上严格控制成本。设定不同策略权重系数可得到不同分配效果,在给定约束下的配置如表 12 所示。多目标关联度雷达如图 2 所示。图中每个同色三角形的 3 个角表示 3 个目标(0°方向表示成本关联度,120°方向表示时间关联度,240°方向表示质量关联度),3 个方向的坐标值越大,目标关联度越大,同时三角形面积越大,适应度值越小,方案相对最优。

表 12 不同权重(精益指标)分配方案的配置结果表

	α	β	λ	最优解	P /元	T /h	质量损失 Q /%	$f(x)$
方案 1	0.51	0.38	0.11	A32,B41,C63,D41,E51,F41	1 130	688.77	0.27	0.255
方案 2	0.8	0.1	0.1	A31,B41,C63,D11,E51,F41	955	789.52	0.26	0.166

续表 12

方案 3	0.4	0.50	0.10	A32,B41,C63,D41,E52,F41	1 180	675.06	0.29	0.253
方案 4	0.15	0.70	0.15	A33,B43,C43,D43,E53,F53	1 805	576.13	0.09	0.16
方案 5	0.30	0.20	0.50	A33,B42,C63,D13,E52,F53	1 450	699.89	0.11	0.243
方案 6	0.15	0.15	0.70	A13,B43,C63,D13,E53,F53	1 600	713.17	0.07	0.124
方案 7	0.35	0.35	0.30	A33,B42,C63,D43,E52,F43	1 480	642.62	0.12	0.238

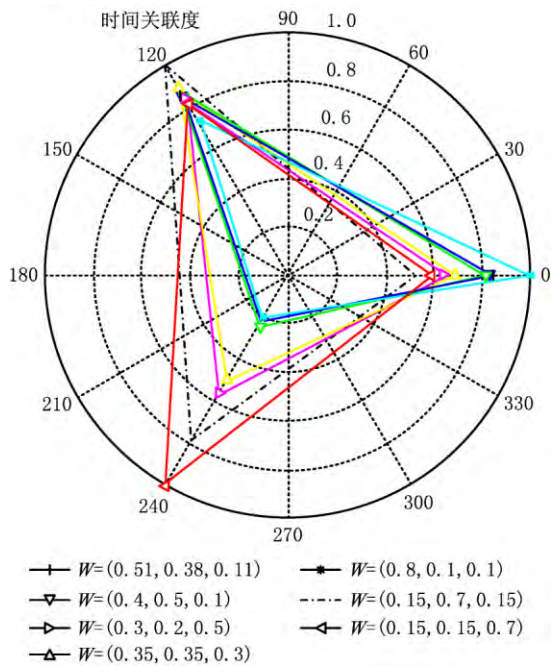


图2 七种方案多目标雷达图

4 结束语

本文针对车间设备和人员双重资源约束的制造系统,考虑人力资源学习因素对生产效率的影响,选择成本、时间和质量 3 个精益目标,构建了基于学习曲线的双重资源配置模型,实现了基于多目标规划的双重资源配置。为验证模型的有效性,以纺机企业锡林组件加工为算例对模型进行求解,对比分析了多种权重分配方案下的配置结果,表明本文提出的考虑学习效应曲线的制造系统双重资源配置方法行之有效,能为决策者提供有利的决策信息和策略方案。

在下一步研究中,将综合考虑生产过程中的订单不确定性等因素,并综合考虑人员利用率、产品交货期等约束条件,以优化制造资源配置的模型与参数,从而更有效地服务于生产实践。

参考文献:

[1] KIZIL M. A holistic approach for the problem of storage space

allocation in cellular manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2010,48(9-12):1031-1043.

[2] LIANG Zuhong, CHEN Qingxin, MAO Ning. Manpower planning for multi-type staff collaboration with contract period considered[J]. Industrial Engineering,2012,15(4):78-82(in Chinese). [梁祖红,陈庆新,毛宁.考虑合同期的多类人员协同工作人力资源计划[J].工业工程,2012,15(4):78-82.]

[3] LI Jingyao, SUN Shudong, HUANG Yuan, et al. Research on dual resource constrained job shop scheduling based on time window[J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(16):150-129(in Chinese). [李兢尧,孙树栋,黄媛,等.基于时窗的双资源约束车间调度研究[J].机械工程学报,2011,47(16):150-129.]

[4] TAO Ze, LI Xiaojun, LIU Xiaoxia. Petri net and GA based approach for dynamic multi-objective JSP[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2011(10):5-9(in Chinese). [陶泽,李小军,刘晓霞.基于 Petri 网和 GA 的多目标动态优化调度问题研究[J].组合机床与自动化加工技术,2011(10):5-9.]

[5] CHEN Yong, WU Yunxiang, WANG Yaliang, et al. Multi-assembly line robust scheduling of double resource constraints under uncertain orders[J]. China Mechanical Engineering,2014,25(12):1567-1573(in Chinese). [陈勇,吴云翔,王亚良等.订单不确定下双资源约束多装配线鲁棒调度[J].中国机械工程,2014,25(12):1567-1573.]

[6] HUANG Yuelong. Dual-resources job-shop scheduling based on Petri nets and hybrid genetic algorithm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010(in Chinese). [黄跃龙.基于 Petri 网和混合遗传算法的双资源车间调度[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.]

[7] LIANG Zuhong, CHEN Qingxin, MAO Ning, et al. Dual-resource near-optimal configuration method of manufacturing systems with production capability constraints[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2013,19(6):1263-1271(in Chinese). [梁祖红,陈庆新,毛宁,等.考虑生产能力约束的制造系统双重资源近似优化配置[J].计算机集成制造系统,2013,19(6):1263-1271.]

[8] LEI Deming, GUO Xiuping. An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective[J]. International Journal of Production Economics,2015,159(1):296-303.

[9] LOBO B J, WILSON J R, THONEY K A, et al. A practical

- method for evaluating worker allocations in large-scale dual resource constrained job shops[J]. IIE Transactions(Institute of Industrial Engineers), 2014, 46(11): 1209-1226.
- [10] YUE H, SLOMP J, MOLLEMAN E, et al. Worker flexibility in a parallel dual resource constrained job shop[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(2): 451-467.
- [11] ZAMISKA J R, JABER M Y, KHER H V. Worker deployment in dual resource constrained systems with a task-type factor[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3): 1507-1519.
- [12] SUN Zhijun, ZHU Jianying, PAN Quanke. Genetic algorithm based approach to the intelligent optimum scheduling of multi-resources in the dynamic environment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(4): 120-125 (in Chinese). [孙志峻, 朱剑英, 潘全科. 基于遗传算法的多资源作业车间智能优化调度[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 120-125.]
- [13] WANG Haiyan, ZHAO Yanwei, WANG Wanliang, et al. New parallel algorithm based on DE for batch splitting job shop scheduling under multiple-resource constraints[J]. Control and Decision, 2010, 25(11): 1635-1644 (in Chinese). [王海燕, 赵燕伟, 王万良, 等. 两级差分进化算法求解多资源作业车间批量调度问题[J]. 控制与决策, 2010, 25(11): 1635-1644.]
- [14] ROSTAMI M, MORADINEZHAD D, SOUFIPOUR A. Improved and competitive algorithms for large scale multiple resource-constrained project-scheduling problems [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(5): 1261-1269.
- [15] RUAN Liang, YUAN Yiping, YUAN Zhiling, et al. Research on multi-objective scheduling optimization for flexible job shop with dual-resource[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(12): 149-152 (in Chinese). [袁亮, 袁逸萍, 袁志玲, 等. 双资源柔性车间多目标调度优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(12): 149-152.]
- [16] ZENG Qiang, YANG Yu, WANG Xiaolei, et al. Multi-objective optimization method for equal lot scheduling problem of job shop with parallel machines[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(4): 816-825 (in Chinese). [曾强, 杨育, 王小磊, 等. 并行机作业车间等量分批多目标优化调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(4): 816-825.]
- [17] BAI Junjie, GONG Yiguang, WANG Ningsheng, et al. Multi-objective flexible job shop scheduling with lot-splitting[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(2): 396-403 (in Chinese). [白俊杰, 龚毅光, 王宁生, 等. 多目标柔性作业车间分批优化调度[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 396-403.]
- [18] CHU Hongyan, SHAO Changyun, FANG Juan, et al. Research on dual-resource scheduling for manufacturing cell based workshop[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(1): 129-132 (in Chinese). [初红艳, 绍长运, 方娟, 等. 单元型制造车间的双资源调度研究[J]. 制造技术与机床, 2009(1): 129-132.]
- [19] CUI Pengju. Research on dual-resource multi-objective flexible job shop scheduling problem[D]. Xi'an: Xidian University, 2011 (in Chinese). [崔鹏举. 双资源多目标柔性作业车间调度问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.]
- [20] WANG Xiaojuan. Research on methods for multi-objective flexible job shop scheduling problem[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011 (in Chinese). [王晓娟. 多目标柔性作业车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.]
- [21] SU Kaikai, XU Wensheng, LI Jianyong. Manufacturing resource allocation method based on non-cooperative game in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(8): 2228-2239 (in Chinese). [苏凯凯, 徐文胜, 李建勇. 云制造环境下基于非合作博弈的资源优化配置方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2228-2239.]
- [22] LI Fachao, XU Lida, JIN Chenxia. Random assignment method based on genetic algorithms and its application in resource allocation[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(15): 12213-12219.

作者简介:

肖倩乔(1988—),女,湖北荆州人,硕士生,研究方向:企业信息化, E-mail: 775105492@qq.com;

李益兵(1978—),男,安徽桐城人,博士,副教授,研究方向:企业信息化、质量管理等,通信作者, E-mail: ahlyb@whut.edu.cn;

左少雄(1991—),男,湖北武汉人,硕士生,研究方向:企业信息化;

杜百岗(1987—),男,湖南桃源人,博士,讲师,研究方向:数字化制造与智能制造。