



基于学习曲线改进模型的服装生产计划预测

王青云^{1a}, 侯珏^{1a,1b}, 郭玲玲², 刘正^{1b,1c,1d}

(1.浙江理工大学, a.服装学院; b.浙江省服装工程技术研究中心; c.国际教育学院; d.服装数字化技术
浙江省工程实验室, 杭州 310018; 2.浙江嘉欣丝绸股份有限公司, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 针对多品种、小批量服装生产模式中计划制定不准确等问题,以某外贸服装企业实际生产数据为研究对象,分析员工技能熟练度与学习系数的相关性,结合首件工时提出了学习曲线改进模型,对服装订单生产计划进行预测。对学习曲线改进模型预测的生产时间与未改进模型和实际生产时间进行对比分析,利用相对误差检验法对模型进行验证。结果表明,改进后模型预测精确度为 94.38%,比利用相似款预测精确度提高 17.73%。该学习曲线改进模型预测方法可以更准确地预测生产时间,精确估计交货时间,为服装生产计划的制定提供思路。

关键词: 服装生产; 生产计划; 学习曲线; 学习系数; 员工技能熟练度

中图分类号: TS941.19

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)07-0476-07

引文格式:王青云,侯珏,郭玲玲,等. 基于学习曲线改进模型的服装生产计划预测[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(4):476-482.

Reference Format: WANG Qingyun, HOU Jue, GUO Lingling, et al. Prediction of garment production plan based on the modified learning curve model[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2023,49(4):476-482.

Prediction of garment production plan based on the modified learning curve model

WANG Qingyun^{1a}, HOU Jue^{1a,1b}, GUO Lingling², LIU Zheng^{1b,1c,1d}

(1a.School of Fashion Design & Engineering; 1b.Zhejiang Provincial

Research Center of Clothing Engineering Technology; 1c.School of International Education;

1d.Zhejiang Provincial Research Center of Clothing Engineering Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2.Zhejiang Jiaxin Silk Corporation, Jiaxing 314000, China)

Abstract: To solve the problem of inaccurate planning during producing multi-variety and small-batch garment, we firstly took the actual production data of a apparel trading enterprise as the research object, analyzed the correlation between employee's skill proficiency and learning coefficient, and put forward an improved learning curve model combined with the first man-hour to predict the garment order production plan. Then, we compared the production time predicted by the improved learning curve model with that predicted by the unmodified model and the actual production time, and verified the model by using the relative error test method. The results show that our model achieves 94.38% accuracy, which is 17.73% higher than the results of similar clothing forecast. The modified learning curve can be used to accurately predict production time and estimate time of delivery, and it can provide ideas for making garment production plans.

Key words: garment production; production plan; learning cure; learning coefficient; employee skill proficiency

收稿日期: 2022-10-18 网络出版日期: 2023-01-17

基金项目: 嘉兴市重点研发项目(2021BZ10001)

作者简介: 王青云(1997—),女,石家庄人,硕士研究生,主要从事数字化服装技术方面的研究。

通信作者: 刘正, E-mail: koala@zstu.edu.cn

0 引言

消费者对服装需求日益多样化与个性化,使得服装生产由单一大批量逐渐转变为多品种、小批量的生产模式^[1]。由于生产模式的转变,准确合理地制定生产计划是节省管理成本、提升生产效率的重要环节^[2]。目前,多数服装企业依据传统经验制定生产计划,这种方式主要依靠管理人员的经验实施,存在很强的主观性,易造成计划与实际生产之间的误差,从而导致流水线产能分配不均衡、无法按期交货等问题。因此,如何根据实际生产能力和市场需求准确地制定生产计划,是服装生产企业亟待解决的实际问题。

学习曲线理论被广泛用于计划制定、质量控制和投产决策等领域^[3-6],可以应用于指导服装生产管理。员工熟练率是学习曲线的重要影响因素,在服装生产过程中,随着加工时间的变化,学习曲线反映了员工技能熟练度的提高;研究人员已利用数学模型、神经网络和相似性方法等分析加工时间与员工熟练率的关系,对服装生产计划进行建模与优化研究。杨以雄等^[7]运用双对数直线方程计算员工熟练率的方法,获得服装生产时间,对生产线安排提出建议;胡少营等^[8]利用员工熟练率构建流水线节拍和计划生产天数相关模型预测生产任务,减少“起步损失”带来的影响。上述研究中,员工熟练率需用生产完成数据计算得出,从实际排产而言,这种制定生产计划的方法具有滞后性。Cao等^[9]采用BP神经网络建立服装生产周期学习曲线模型,预测服装生产时间,该方法预测需要大量的样本数据,对于批量较小、款式多变的订单预测容易产生较大的偏差。Anzanello等^[10]、朱秀丽等^[11]根据款式特征将产品分为相似组或基本库,通过与已生产服装的相似性确定未生产服装学习曲线,从而制定生产计划。利用学习曲线可以快速计算出不同批量服装生产时间,但是在目前款式多变的生产任务背景下,通过相似款学习曲线预测的生产时间无法适用于现有的服装生产模式。

为了在产前没有相似款数据的情况下,精准、快速地制定服装生产计划,本文分析了员工技能熟练度与学习系数的相关性,结合首件工时对学习曲线模型进行了改进;在此基础上,利用学习曲线改进模型预测服装生产计划;最后将本文模型预测的生产时间与未改进模型预测结果和实际生产时间进行对比分析,并通过相对误差检验法验证模型精度。

1 学习曲线模型

在服装生产过程中,由于员工技能熟练度不断提高,服装平均加工时间会随着累计产量的增加而减少,当生产量达到一定值时,累计平均工时会逐渐趋于稳定^[12]。该变化过程可以用学习曲线表示,该模型的示意图见图1。

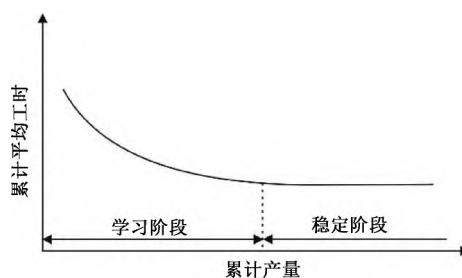


图1 学习曲线模型示意图

加工人员作为服装生产的主体,是影响生产效率的最主要因素,尤其是生产起步阶段,加工人员对服装加工工艺的熟练程度决定了生产速度。学习曲线的学习系数可以体现出员工技能熟练度。根据已知的学习曲线模型^[13],学习系数与首件工时、累计产量和累计平均工时的关系可以由式(1)表示:

$$y = ax^{-b}, 0 < b < 1 \quad (1)$$

其中: y 表示累计平均工时; x 为累计产量; a 为首件工时; b 为学习系数。其中已知学习系数 b 和学习率 c 的关系为:

$$b = -\frac{\lg c}{\lg 2} \quad (2)$$

2 基于员工技能熟练度的学习曲线改进模型构建

现有学习曲线模型是通过已生产服装数据拟合生成的,未生产服装的学习曲线只能通过与已生产服装的相似性确定。在目前款式多变的服装生产模式下,根据款式相似性确定的学习曲线不适用于预测服装生产时间。因此,本文分析员工技能熟练度,在此基础上改进学习曲线模型,在没有相似款生产数据的情况下,根据员工技能熟练度构建学习曲线改进模型,以实现服装生产时间的预测。

2.1 实验数据来源

以浙江某外贸加工企业为研究对象,从企业应用的MES系统获取已有订单的服装款式、标准工时、出勤人数、出勤时间和产量等数据,计算每款服装每天的累计产量和累计平均工时。在新款

服装达到稳定生产状态前,生产线处于转款过程,转款当天的设备、生产工艺、工序管理等因素对员工作业影响较大,造成生产数据的不稳定。转款一天后,流水线一般可以稳定运行。此时,员工技能熟练度成为影响生产作业的主要因素。为了确保实验数据的准确性,将生产第二天视为转款完成,把转款完成后的生产数据作为第一天的实验数据。

员工技能熟练度主要受员工技能水平和款式特征影响。在实际生产中,第一天累计平均工时和标

准工时分别表示员工技能水平和款式特征。标准工时与第一天累计平均工时的比值越小,表示员工第一天加工服装所用时间越长,即员工对该款服装技能熟练度越低。因此,员工对不同款服装的技能熟练度可以由式(3)表示:

$$f = \frac{S_i}{F_i} \quad (3)$$

其中: f 为技能熟练度; S_i 为第 i 款服装的标准工时; \min ; F_i 为第 i 款服装的第一天累计平均工时, \min 。采集的部分实验数据见表 1。

表 1 服装生产部分实验数据

序号	款式	标准工时/min	出勤人数/人	出勤时间/h	第一天产量/件	第一天累计平均工时/min	员工技能熟练度
1	半裙	27.60	11	12	100	79.20	0.35
2	半裙	32.70	14	12	120	84.00	0.39
3	半裙	41.40	14	12	110	91.64	0.45
4	衬衣	28.20	12	12	120	72.00	0.39
5	衬衣	28.60	12	12	145	59.59	0.48
6	衬衣	51.30	17	12	60	204.00	0.25
7	裤子	40.50	13	12	75	124.80	0.32
8	裤子	64.90	13	12	50	187.20	0.35
9	裤子	36.70	12	12	90	96.00	0.38

注:该企业的标准工时根据预定动作标准时间法中的一般车缝数据动作分析确定。

根据学习曲线模型,对已生产服装的累计产量和累计平均工时进行幂函数拟合,其部分款式的学习曲线拟合数据如表 2 所示。从表 2 可以看出,拟

合学习曲线的判定系数 R^2 均大于 0.94,拟合效果较好。根据各款服装的学习曲线可得首件工时和学习系数,利用式(2)可计算出学习率。

表 2 学习曲线拟合相关数据表

序号	款式	学习曲线模型	R^2	首件工时/min	学习系数	学习率
1	半裙	$y = 177.40x^{-0.18}$	0.99	177.40	0.18	0.88
2	半裙	$y = 276.91x^{-0.21}$	1.00	276.91	0.21	0.86
3	半裙	$y = 182.74x^{-0.14}$	0.94	182.74	0.14	0.91
4	衬衣	$y = 151.06x^{-0.17}$	0.98	151.06	0.17	0.89
5	衬衣	$y = 110.32x^{-0.12}$	0.96	110.32	0.12	0.92
6	衬衣	$y = 565.58x^{-0.24}$	0.98	565.58	0.24	0.85
7	裤子	$y = 407.23x^{-0.23}$	0.94	407.23	0.23	0.85
8	裤子	$y = 374.06x^{-0.18}$	1.00	374.06	0.18	0.89
9	裤子	$y = 207.27x^{-0.17}$	0.99	207.27	0.17	0.89

2.2 改进模型的学习系数计算

利用 Pearson 法^[6]对学习系数与员工技能熟练度进行相关性分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,学习系数与员工技能熟练度相关性系数为 -0.803,其绝对值位于线性极强相关区间内 $[0.8, 1]$,表明两个变量存在较强相关性。

建立学习系数与员工技能熟练度关系式模型见

式(4):

$$b = v_1 f + v_2 \quad (4)$$

其中: v_1 、 v_2 为系数。

表 3 学习系数与员工技能熟练度相关性关系表

变量	学习系数	员工技能熟练度
学习系数	1.000	
员工技能熟练度	-0.803**	1.000

注:**在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性显著。

由于员工技能熟练度 f 是通过式(3)计算所得,其中未生产服装的第一天累计平均工时是未知量。因此,需要通过分析已生产服装数据,建立第一天累计平均工时与基本生产数据的关系,用 Pearson 法对第一天累计平均工时与出勤人数、出勤时间、标准工时进行相关性分析,结果见表4。由表4可知,第一天累计平均工时与出勤人数、出

勤时间、标准工时均存在相关性。建立第一天累计平均工时与出勤人数、出勤时间、标准工时的函数关系:

$$F = k_1 + k_2 N + k_3 T + k_4 S \quad (5)$$

其中: F 为第一天累计平均工时, min; N 为出勤人数; T 为出勤时间, h; S 为标准工时, min; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为系数。

表4 第一天累计平均工时与标准工时、出勤时间、出勤人数相关性分析表

变量	第一天累计平均工时/min	标准工时/min	出勤时间/h	出勤人数/人
第一天累计平均工时	1			
标准工时	0.627**	1		
出勤时间	0.356*	-0.014	1	
出勤人数	0.335*	0.212	-0.214	1

注:**在置信度(双侧)为0.01时,相关性显著;*在置信度(双侧)为0.05时,相关性显著。

结合式(3)~(5)得出改进模型的学习系数表达式为:

$$b = v_1 \frac{S}{k_1 + k_2 N + k_3 T + k_4 S} + v_2 \quad (6)$$

2.3 改进模型的首件工时计算

经过长时间对工厂生产实际情况的观察,发现首件工时主要受到员工学习能力的影响。图2为首件工时和学习率所对应的散点图,显示了首件工时与学习率存在幂函数关系。因此,本文由此建立首件工时与学习率的幂函数关系式:

$$a = n_1 c^{n_2} \quad (7)$$

其中: n_1 、 n_2 为系数。

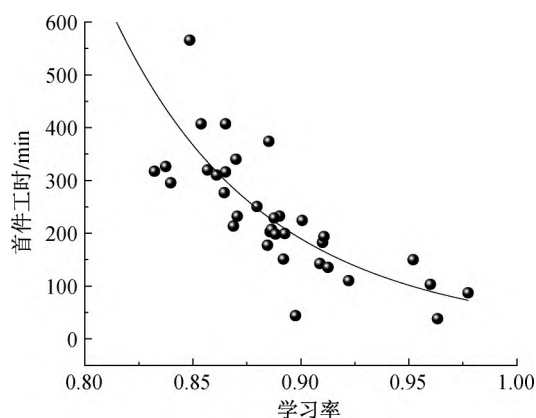


图2 首件工时与学习率散点图

将式(2)、式(6)~(7)进行联立,得到改进模型的首件工时计算公式为:

$$a = n_1 2^{-\left(\frac{v_1 k_1 + k_2 N + k_3 T + k_4 S}{v_1 k_1 + k_2 N + k_3 T + k_4 S} + v_2\right) n_2} \quad (8)$$

根据学习曲线理论,在求得改进模型的学习系数与首件工时的基础上,得到学习曲线改进模型为:

$$y = n_1 2^{-\left(\frac{S}{v_1 k_1 + k_2 N + k_3 T + k_4 S} + v_2\right) n_2} x^{-\left(\frac{S}{v_1 k_1 + k_2 N + k_3 T + k_4 S} + v_2\right) n_2} \quad (9)$$

3 学习曲线改进模型求解与检验

3.1 改进模型的系数求解

3.1.1 改进模型的学习系数求解

对学习系数与员工技能熟练度进行线性回归,可得到线性方程(10):

$$b = -0.495f + 0.359 \quad (10)$$

该方程的判定系数 R^2 为0.716,表明拟合效果较好。

对第一天累计平均工时与出勤人数、出勤时间、标准工时进行线性拟合,因变量为第一天累计平均工时,得判定系数 R^2 为0.83,其拟合效果较好。线性回归方程如式(11),其对应的回归系数见表5。由表5可知,标准工时、出勤时间和出勤人数各项的方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)均小于10,表示3个变量之间不存在多重共线性。

$$F = 6.692N + 9.981T + 2.553S - 179.761 \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),得到改进模型的学习系数计算公式为:

$$b = -0.495S / (6.692N + 9.981T + 2.553S - 179.761) + 0.359 \quad (12)$$

对改进模型的学习系数与通过式(1)拟合学习曲线的学习系数进行误差分析,其部分数据如表6所示。表6显示,误差基本控制在6%以内,表明通过改进模型计算出的学习系数可信度高。

表 5 第一天累计平均工时方程回归系数表

模型*	非标准化系数		标准系数		t	显著性	共线性统计	
	B	标准错误	贝塔				容许	VIF
常量	-179.761	20.629			-8.714	0.000		
标准工时	2.553	0.137	0.777		18.678	0.000	0.989	1.011
出勤时间	9.981	1.300	0.327		7.680	0.000	0.942	1.062
出勤人数	6.692	0.827	0.347		8.091	0.000	0.932	1.073

注：*表示模型中的参数为方程回归系数分析表自动输出时的命名，不同于本文的“学习曲线改进模型”。

表 6 学习系数计算误差分析表

序号	款式	改进模型 学习系数	曲线拟合 学习系数	误差/%
1	半裙	0.19	0.18	5.65
2	半裙	0.21	0.21	0.00
3	半裙	0.14	0.14	0.00
4	衬衣	0.17	0.17	0.00
5	衬衣	0.12	0.12	0.00
6	衬衣	0.23	0.24	0.00
7	裤子	0.24	0.23	4.39
8	裤子	0.19	0.18	5.68
9	裤子	0.17	0.17	0.00

表 7 服装改进学习曲线模型系数列表

v_1	v_2	k_1	k_2	k_3	k_4	n_1	n_2
-0.932	-0.029	-179.761	6.692	9.981	2.553	56.163	11.552

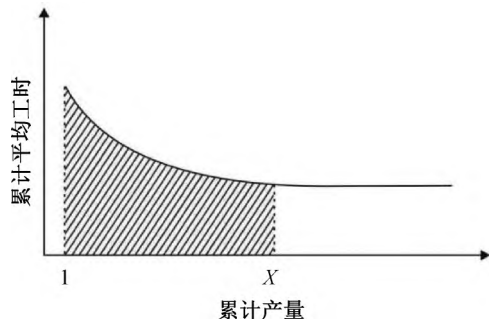


图 3 某款服装学习曲线

3.2 改进模型预测实例与精度检验

通过求解服装学习曲线积分,可求得服装批量生产时间值(见图3)。图3阴影部分面积代表某款服装批量为 X 的总生产时间 τ ,可以通过式(15)——(16)计算。为了便于企业计划排产和预估交货时间,在出勤时间和出勤人数相对稳定的情况下,通过式(17)能够计算出生产某款服装的计划生产天数。

因为

$$\tau = \int_1^X ax^{-b} dx \quad (15)$$

所以,求解积分得批量生产时间为:

$$\tau = \frac{a}{1-b} (X^{1-b} - 1) \quad (16)$$

通过批量生产时间可得计划生产天数为:

3.1.2 改进模型的首件工时求解

对首件工时与学习率进行幂函数拟合,判定系数 R^2 为0.886,拟合所得首件工时与学习率的函数关系式为:

$$a = 56.163c^{-11.552} \quad (13)$$

将式(12)、式(13)与式(2)联立,得到改进模型的首件工时计算公式:

$$a = 56.163 \times 2^{(0.495 \frac{s}{6.692N+9.981T+2.553S-179.761} - 0.359) \times 11.552} \quad (14)$$

综上所述,得到式(9)中服装改进学习曲线模型系数(见表7)。

$$d = \frac{\tau}{N \times T \times 60} \quad (17)$$

结合式(16)和式(17)得到服装生产计划预测表达式为:

$$d = \frac{a(X^{1-b} - 1)}{(1-b) \times N \times T \times 60} \quad (18)$$

其中: d 为计划生产天数, X 为服装批量值; τ 为服装批量生产时间,min。

现有新的裤子订单,该款服装订单量为824件、标准工时为55.6 min、工序数为99道,安排到有14名员工、每天工作12 h的流水线生产,通过上述改进模型可以快速制定出该批订单的生产计划。将已知新款服装基本数据代入学习曲线改进模型中,求得学习系数为0.13,首件工时为176.26,将其代入服装生产计划预测公式中,可知这批裤装安排在该小组计划7.4 d可以制作完成。跟踪这批裤装生产,订单实际制作所用时间为7 d。

为了进一步验证模型预测的准确性,将学习曲线改进模型与利用相似款预测生产时间的方法^[11]进行对比。本文采用两种方法分别对12款服装进行生产计划的预测,并跟踪其实际生产数据,结果如表8所示。从表8数据得出,本文模型预测值与实际值相差最小为0 d,最大为1 d,利用相似款预测值

与实际值相差最小为 0.3 d,最大为 4.7 d。

通过柱状图将两种方法预测的结果与实际生产

时间进行直观展示,结果如图 4 所示,表明本文模型

预测结果更接近实际生产时间。

表 8 生产计划预测表

序号	款式	相似款学习曲线	标准工时/min	出勤人数/人	出勤时间/h	批量/件	改进模型预测生产时间/d	利用相似款预测生产时间/d	实际生产时间/d
1	半裙	$y=464.630x^{-0.29}$	32.10	10	12	342	4.8	5.9	5
2			37.50	15	12	975	8.3	8.3	8
3	衬衣	$y=169.78x^{-0.17}$	32.80	14	12	758	7.3	5.1	7
4			37.30	12	12	516	8.8	4.3	9
5			35.70	16	12	1235	9.5	6.7	10
6			31.60	14	12	854	8.0	5.6	7
7			42.30	13	12	578	6.0	4.4	6
8			34.00	16	12	1226	9.4	6.7	9
9	裤子	$y=207.27x^{-0.17}$	36.70	11	12	713	8.1	7.2	8
10			40.10	10	12	390	5.3	4.8	6
11			41.80	12	12	355	4.3	3.7	5
12			33.30	14	12	712	6.9	5.7	7

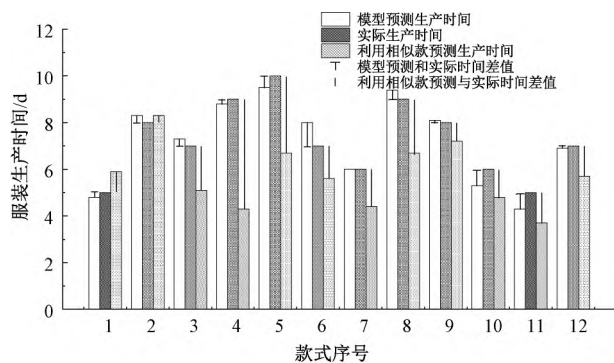


图 4 服装生产时间预测值和实际值

对表 8 中改进模型预测的生产时间与利用相似款预测结果和实际生产时间,采用相对误差检验法^[14]检验模型,步骤如下:

计算相对误差:

$$rel(k) = \frac{d(k) - d'(k)}{d(k)} \times 100\%, k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

其中: $d(k)$ 表示第 k 款服装预测生产天数; $d(k)$ 表示第 k 款服装实际生产时间。

计算平均相对误差:

$$\bar{e}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k |rel(k)| \quad (20)$$

得出精度:

$$p = 1 - \bar{e}(k) \quad (21)$$

检验证明,基于改进学习曲线预测生产计划的精度为 94.38%,利用相似款预测生产时间精度为 76.65%,学习曲线改进模型比利用相似款预测精度提高 17.73%。结果表明,相较于普通学习曲线方

法,改进模型显著提高了预测精度。

4 结 论

本文利用服装企业生产数据,分析员工技能熟练度和学习系数相关性,结合首件工时构建学习曲线改进模型。在此基础上,利用改进前后的学习曲线模型预测 12 款服装生产时间,采用相对误差检验法验证模型精度。结果显示本文模型的预测精度为 94.38%,大幅度提升了预测的准确性。服装企业通过本文模型能够快速、准确地计算出生产时间,可以避免主观因素对流水线进度估计造成的误差,帮助企业交货期内保质完成订单,为服装企业制定生产计划提供一定的理论参考。

参考文献:

- [1] 杨剑锋,李永梅,李秀,等.基于数据融合的多品种小批量产品质量预测方法[J].统计与决策,2021,37(9):33-36.
- [2] 丁珈,万国华.企业生产计划与调度的实践研究述评:社会技术系统视角[J].管理科学学报,2020,23(12):110-123.
- [3] Smunt T L, Watts C A. Improving operations planning with learning curves: overcoming the pitfalls of 'messy' shop floor data[J]. Journal of Operations Management, 2003, 21(1): 93-107.
- [4] 曾昭君,韩庆兰,王玉辞.基于学习曲线效应的企业质量成本模型研究[J].湖南工业大学学报,2016,30(2):77-83.
- [5] 李细枚,张湘伟,张毕西,等.基于“学习曲线”理论的

- 投产量决策模型研究[J]. 系统科学学报, 2018, 26(4): 53-57.
- [6] 刘银浩, 胡洛燕, 王秋平, 等. 基于服装生产数据的批量系数研究[J]. 针织工业, 2017(9): 60-64.
- [7] 杨以雄, 陆晓敏, 顾庆良. 熟练率在制定服装生产计划中的运用[J]. 中国纺织大学学报, 1994, 20(1): 40-44.
- [8] 胡少营, 张龙琳, 张文斌. 采用熟练率的服装流水线节拍设计模型[J]. 纺织学报, 2015, 36(5): 133-138.
- [9] Cao H Q, Ji X F. Prediction of garment production cycle time based on a neural network[J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2021, 29(145): 8-12.
- [10] Anzanello M J, Fogliatto F S. Learning curve modelling of work assignment in mass customized assembly lines [J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(13): 2919-2938.
- [11] 朱秀丽, 杭小刚, 吴春胜. 服装生产台产量的学习曲线及应用[J]. 纺织学报, 2007, 28(7): 125-128.
- [12] 杨以雄. 服装生产管理[M]. 2 版. 上海: 东华大学出版社, 2011.
- [13] 叶宁, 阎玉秀. 多品种小批量服装生产的工时定额制定方法[J]. 纺织学报, 2012, 33(6): 101-106.
- [14] 耿黎, 钟铭. 集装箱港口群的吞吐量预测及运价博弈决策改进模型[J]. 中国航海, 2022, 45(2): 100-108.

(责任编辑:张会巍)