

DOI:10.13196/j.cims.2019.03.003

基于多层次复杂度的工时定额综合研究

叶正梗¹, 蔡志强¹⁺, 周福礼²

(1. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072; 2. 郑州轻工业大学 经济与管理学院, 河南 郑州 450000)

摘 要:为研究“人一机一操作”大规模定制生产模式下的工时定额, 综合分析生产过程中零件自身特征、作业要素使用和操作执行过程, 提出一种基于“零件特征—作业要素—操作者认知”多层次复杂度的工时定额计算方法。针对零件特征层, 利用拓扑结构、精度等级和切削量等参数衡量零件的拓扑结构复杂度和工艺属性复杂度; 针对作业要素层和操作者认知层, 分析了不同工艺类型下的设备、场地等作业要素和人员操作认知过程, 引入信息熵评价生产要素复杂度和操作认知复杂度。在此基础上综合考虑加工批量的影响, 通过多层次复杂度计算, 借助多元非线性回归分析研究了工时定额预测模型。针对某生产企业开展案例分析, 并与模特法进行对比实验, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:作业特征分析; 复杂度评价; 零件特征; 作业要素; 操作者认知; 工时评价

中图分类号:TH16 **文献标识码:**A

Comprehensive study on man hour estimation based on multi-level complexity

YE Zhenggeng¹, CAI Zhiqiang¹⁺, ZHOU Fuli²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Economics and Management, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To study man hour of mass customization production with “man-machine-operation”, the characteristics of parts, the use of task elements and the process of operation were analyzed. A method of calculating man hour based on multi-level complexity of “part feature-task element-operator cognition” was proposed. According to the level of parts feature, the topological structure complexity and process complexity were measured by the topological structure, the precision grade and the cutting quantity. According to the level of task elements and operator cognition, the equipment, site and personnel operation cognition process under different process types were analyzed. The information entropy was introduced to evaluate the complexity of task elements and operation cognition. Considering the impact of processing batch and multi-level complexity calculation, through multivariate nonlinear regression analysis, the prediction model of man hour quota was researched. A case study of a manufacturing enterprise and the comparative experiment with MOD verified the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: task feature analysis; complexity evaluation; part feature; task elements; operator cognition; man hour evaluation

0 引言

随着制造业对大规模定制生产模式关注度的增加, 越来越多的学者投入到对该生产模式的研究中。

大规模定制生产模式具有高度灵敏、柔性和集成的特性, 通过产品结构和制造过程的重组, 运用高新技术, 将产品的定制生产问题全部或部分转化为批量生产问题。该模式以大规模生产的成本和速度为顾

收稿日期: 2017-11-29; 修订日期: 2018-02-11。Received 29 Nov. 2017; accepted 11 Feb. 2018.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471147); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B13044)。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 71471147), and the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities, China(No. B13044).

客提供了一个很大的产品品种选择范围,实现了及时为顾客提供个性化产品的目标。实施大规模定制生产模式,要求企业能够快速、准确地确定产品的生产周期,即明确产品中每个零件的工时定额。但是大规模定制生产模式下产品具有的种类多元化、生产过程和工艺的差异化等特点,为企业寻求快速、准确的工时定额评价方法带来了新的挑战。

国内外专家学者针对工时定额的制定提出了许多新的技术方法。Cardone等^[1]在进行新零件成本估算的过程中,提出从零件结构特征类型、数量和精度要求等角度出发进行不同零件的相似性评价,并以此为基础进行成本估算。韦俊民等^[2]提出以零件形状特征分类、拓扑关系和特征参数为基础,提出零件相似性评价方法。这种以零件特征和相似性评价为基础的研究,为工时定额的评价提供了新思路。后续研究中,杨青海等^[3]提出以事物特性表来进行相似零件的识别,并提出一种以案例推理和事物特性表为基础的零件工时评价方法。任晓杰等^[4]综合考虑零件结构特征、工艺要求和精度特征等因素,通过建立工序相似系数的方法进行新设计零件与成熟零件的对比,并以工序相似系数为基础实现了工时定额的快速制定。陈友玲等^[5]从零件的定制程度出发,分析了影响零件工时的主要工艺特征因素,并以相似性原理为基础,通过分析影响工时的特征因素来估算新零件的工时定额。陈友玲等^[6]又通过对零件进行分析,找出影响零件加工时间的工艺因素,从零件拓扑关系和工艺属性着手,构建零件拓扑结构复杂度和工艺属性复杂度计算模型,并以两种复杂度为模型来估算新零件的工时定额。上述研究从零件结构、工艺特性、精度要求等角度出发,很好地反映了零件的自身特征对工时定额的影响。除了对零件自身的关注外,操作者的因素也逐渐被纳入到工时定额的研究中。Nakayama等^[7]在进行工时定额

评价时提出要精确掌握操作者个体差异和实现对操作者进行动态评价,并提出了工作成就商数法来确定标准时间。尹小庆等^[8]从操作者的角度出发,建立了员工工作积极性等级指数模型,并以此为基础建立了一套基于工作积极性、熟练程度和宽放系数的工时定额评价体系。陈友玲等^[9]从操作人员知识水平分级管理的角度出发,通过回归分析建立努力系数和宽放系数指标来实现对标准工时的修正。

上述方法深入分析了零件生产的某种关键因素,但主要着重于零件制造过程的局部研究,虽然反映了零件本身的加工难易程度,却忽略了整个零件生产过程的系统性。零件的生产是一个涉及人、机、料、法、环的复杂过程,其工时不仅受到零件特征的影响,还与制造过程中的操作者等各类生产资源息息相关。另外,大规模定制生产模式下工时定额的分析普遍采用数学模型法,该方法对原始统计数据的全面性和准确性具有较高的要求。因而,为缩小工时偏差、提高整个工时评价系统的准确性,对大规模定制生产模式下新零件的工时定额进行系统分析,不仅要考虑加工过程中零件的特征,还要综合分析操作者及其作业过程,以提高工时的系统性和适应性^[10]。基于大规模制造环境下工时定额评价的系统性和准确性需求,本文提出一种以零件特征、作业要素和操作过程为基础,以复杂度指标为载体的工时定额评价方法。

1 工时定额影响因素分析

在实际生产过程中,零件的加工制造涉及多个维度,可概括为3个相互交叉的过程(如图1所示):①零件物理或化学形态发生改变的过程,即零件形状特征、表面积和精度等发生变化的过程;②现有制造条件下不同作业要素交替使用的过程;③一个复杂的信息交互过程,操作者在作业过程中不断地接

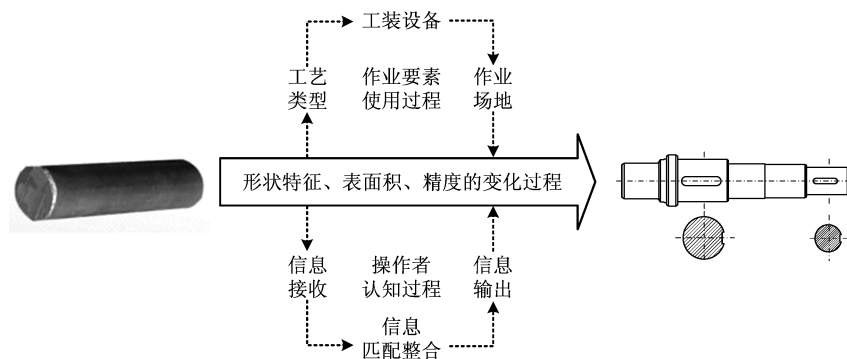


图1 零件加工过程的综合模型

收作业信息并进行匹配和整合,指导自身完成特定的操作行为,从而实现零件的物理或化学形态的变化。基于零件加工过程的这种综合性,进行工时定额评价也应从系统性的角度出发,综合分析零件几何形状、材料去除量、工艺方案、加工设备、工序种类、厂房布局、操作者等因素^[11],即综合考虑零件特征、作业要素特征和操作者认知特征 3 类特征。因而,本文从零件制造过程的 3 个维度出发对其工时定额进行综合分析。

另外,为快速评估不同产品的工时定额,为大规模定制生产模式下企业生产效率的改善提供依据,企业必须制定有效且具有通用性的评价指标来对零件制造过程中 3 类特征进行衡量和评价。复杂度分析是任务特征研究的一种方法,目前在工业技术领域已经得到了广泛应用。Liu 等^[12]通过总结任务复杂度的最新研究成果,指出复杂度是影响任务所有特征的集合,并提出要从不同方面综合进行复杂度评价。Ham 等^[13]从任务的设计和复杂度的维度出发,提出从功能性、行为性和结构性 3 个层次分析任务的特征。孔繁森等^[14]从作业的执行过程和认知心理过程两个方面出发,采用复杂度指标对作业过程的可操作性进行了描述和评价,为进行作业要素和作业过程特征评价提供了借鉴。综上所述,复杂度是一个综合考虑任务过程中各方面特征因素的综合评价指标,对于涉及 3 个维度的零件加工任务来讲,该指标能够实现工时定额评价的系统性需求。除此之外,Mowshowitz 等^[15]在研究中提出以信息熵来衡量网络图的复杂度,为复杂度指标的量化提供了借鉴。同时,何非^[16]结合任务复杂度理论和信息熵理论,从零件的装配关系和工艺等方面综合评价了装配制造系统的结构复杂度,实现了复杂度指标在工业制造领域的量化分析。对于大规模定制生产而言,复杂度作为一项通用性的可量化的综合评价指标,能有效降低零件多样性对工时定额评价的不利影响。因而,本文将通过制定相应的复杂度评价体系来对大规模定制生产模式下零件的工时定额进行分析。

综上所述,进行工时定额评价应从零件特征、作业要素特征和操作者认知特征 3 个方面出发,建立复杂度评价指标。针对零件的加工过程,本文拟建立三级复杂度评价体系,实现对零件工时定额的综合评价,如图 2 所示。首先,从零件固有特征的角度出发,建立拓扑结构复杂度和工艺属

性复杂度评价指标,分别对零件形状特征以及加工表面积和精度特征进行评价。其次,综合考虑作业要素特征,建立作业要素复杂度评价指标,实现对制造过程中的各类生产资源要素的评价。最后,综合考虑操作者作业过程中的认知特征,建立操作复杂度评价指标,实现对操作者信息交互过程的评价。本文通过对上述 3 类特征进行分析,建立拓扑结构复杂度、工艺属性复杂度、作业要素复杂度和操作过程复杂度 4 类评价指标,从而实现对工时定额全面而有效的分析。

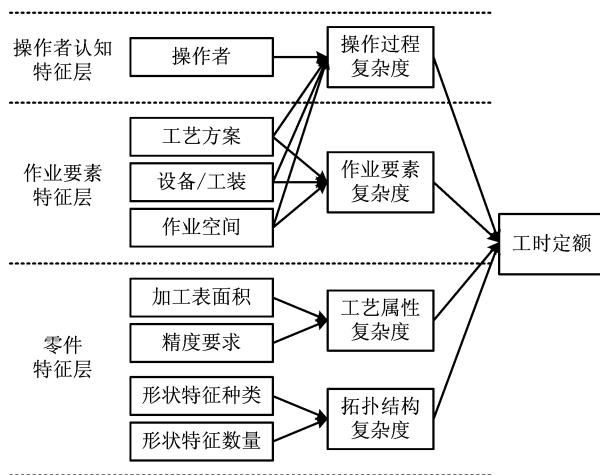


图2 工时定额评价三级模型

2 工时定额影响因素的复杂度指标评价

2.1 零件特征层的复杂度评价

关于零件特征对工时的影响,陈友玲等^[6]提出以零件复杂度衡量零件在制造过程中相对于某一标准的难度值,定义了零件的拓扑结构复杂度 G 和工艺属性复杂度 C_s 两个指标对其进行衡量分别如下:

(1) 拓扑结构复杂度 C_T :

$$C_T = \frac{1}{S(AL)} \quad (1)$$

式中 $S(AL)$ 为零件与毛坯的拓扑结构相似程度,

$$S(AL) = \frac{1}{M+N} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i f_i + \sum_{j=1}^n \beta_j r_j \right) \quad (2)$$

式中: $M = G_f + H_f - m$, $N = G_r + H_r - n$; G_f 和 G_r 分别表示毛坯的形状特征数量和特征关系数量, H_f 和 H_r 分别表示对应零件的形状特征数量和特征关系数量; m 和 n 分别为零件和毛坯相对应的形状特征个数和相对应的特征关系数量; f_i 和 r_i 分别为对应特征类型之间的相似属性值和对应特征关系的相似

属性值,即重要程度权重; α_i 和 β_i 为形状特征之间的相似系数。

(2)工艺属性复杂度 C_s 。从特征加工精度、特征加工表面积和特征加工体积3方面进行衡量,即

$$C_s = \sum_{i=1}^m T_i \times S_i \times V_i。 \quad (3)$$

式中: m 含义同上; T_i 为零件形状特征 i 的公差等级取值,即从 $IT18 \sim IT0$ 和 $IT01$ 分别对应取值 $1 \sim 19$ 和 20 ; S_i 为零件形状特征 i 在加工过程中的特征表面积; V_i 为零件形状特征 i 的加工体积。

2.2 作业要素层的复杂度评价

在生产系统中,信息是保证任务准确、快速完成的关键。基于作业要素在零件生产加工过程的应用特征,本文将零件生产过程中的作业要素信息归纳为工艺类型(*Process*)信息 X_1 、工装设备(*Tool/Machine*)信息 X_2 和作业场地(*Field*)信息 X_3 三类。工艺类型信息是指完成零件加工任务所需的工艺种类和数量;工装设备信息是指完成零件加工所需要刀具、工装、设备等的种类和数量;作业场地信息则是指完成零件加工所涉及工作区域的类别和数量。

基于零件制造过程的特征,生产要素属于零件加工过程中大量信息的一部分。因而可以应用信息熵理论对零件制造过程中的作业要素的复杂度进行评价,称为作业要素复杂度。信息熵是信息论中用于度量信息量的一个概念,其大小反映了系统的不确定性,即信息熵越大,系统的不确定性越高^[16]。对于任意离散型随机变量 X 具有 n 个可能的取值 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,每个取值的概率分别为 (p_1, p_2, \dots, p_n) ,则 X 的信息熵

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i。 \quad (4)$$

式中 p_i 为变量 x_i 的取值概率。

本文将生产要素归纳为工艺类型、工装设备和作业场地3类,生产过程中各类作业要素之间具有复杂的关联性,如加工工艺顺序、工装器具的使用顺序、工作场地的作业先后顺序等,这种关联性的复杂程度影响着作业的复杂度。对于任意生产要素变量 X 具有 n 个可能的取值 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,若生产过程中两个生产要素变量之间具有关联性,则关系量 $r=1$,否则 $r=0$,即 $r=(\text{关联}, \text{无关联})=(1, 0)$ 。假设生产要素与自身具有关联性,记 L_j 为第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个生产要素变量与其他变量的关系量之

和, L 为所有生产要素变量的关系量之和,记生产要素变量 X 的信息熵 $H(X)$ 为:

$$H(X) = - \sum_{j=1}^n q_j \log_2 q_j。 \quad (5)$$

式中 $q_j = \frac{L_j}{L}$ 为生产要素 j 的关系量之和占该类生产要素关系总量的比例,且 $L = \sum_{j=1}^n L_j$ 。

假设对于特定作业过程,存在工艺变量 $X_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n_1})$ 、工装设备变量 $X_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n_2})$ 、作业场地变量 $X_3 = (x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n_3})$,则作业过程的生产要素复杂度

$$\begin{aligned} C_X &= H(X_1) + H(X_2) + H(X_3) \\ &= - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} \log_2 q_{ij}。 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: n_i 为第 i 类信息的数量, q_{ij} 为第 i 类的第 j 个信息关系和占 i 类信息关系总量的比例。对于零件的加工,作业要素的信息熵 $H(X)$ 越大,其不确定性就越高,即该零件的作业过程中生产要素信息越复杂,相应的作业难度也会增加。

2.3 操作者认知层的复杂度评价

综上所述,零件的加工过程是操作者从信息的接收、处理到指导操作的一系列认知过程,主要包含3个阶段(如图3所示):第1阶段,操作者从零件特征和作业要素中接收相关信息,即获取零件结构、工艺类型、工装设备和作业场地信息;第2阶段,操作者对所获取的4类信息与现有知识进行匹配和整合,以形成能够指导具体操作行为的信息组合;第3阶段,根据所整合的信息组合,指导具体操作行为,即信息输出过程。因而,操作者作业中的认知过程是一系列的信息整合和传递过程,即信息组合是认知难易的关键。本文定义该类信息组合为生产要素的有效信息链,即一组能够明确零件结构、工艺类型、工装设备和作业场地的信息组合。实际生产过程中,每个操作行为均由特定的有效信息链来指导,且有效信息链须包含上述4类有效信息,即能明确操作行为的对象、方法、工具和发生场所。

假设操作者作业过程中上述有效信息链的4类信息共有 I 种,即 $I = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$,其中 n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 分别为工艺类型、工装设备、作业场地和零件结构对应包含的作业信息数量。对于任意信息要素 i ,假设其在零件操作过程的有效信息组中出现的频次为 g_i 。定义有效信息总量 Y 为作业过程中4类

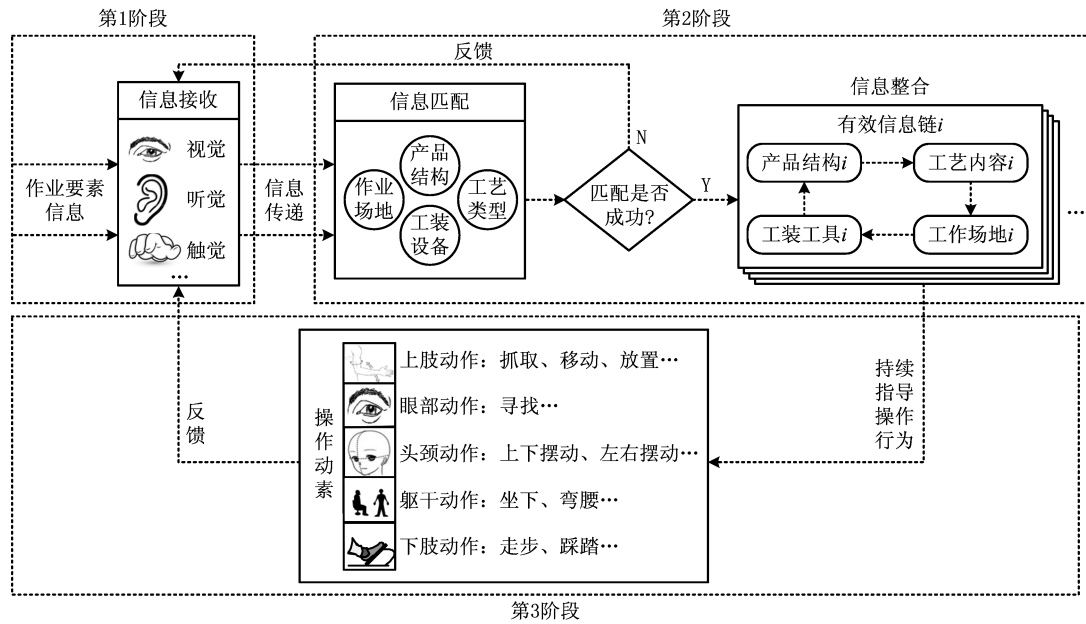


图3 作业中的操作认知过程

生产要素在有效信息组中出现的频次之和, 即 $Y = \sum_{i=1}^I g_i$ 。基于此, 本文定义下述指标评价操作者作业中的操作过程复杂度:

$$C_Y = H(Y) = - \sum_{i=1}^I y_i \log_2 y_i = - \sum_{i=1}^I \frac{g_i}{Y} \log_2 \frac{g_i}{Y} \quad (7)$$

式中: $y_i = \frac{g_i}{Y}$ 为操作过程中信息 i 的使用频率; G_Y 越高, 则零件加工过程中操作者需要关注的信息越分散, 即种类多、使用频率低, 因而可操作性越差, 即操作复杂度越高。

3 基于复杂度指标的工时分析

工时定额的制定方法主要包括经验统计类、直接时间研究类、动作分析类、数学模型类, 以及计算机辅助类^[10], 其中数学模型法适用于加工规律性强且具有大量统计数据的生产系统。大规模定制生产模式下, 成组技术的应用和相似零件工时定额数据的累积, 为采用数学模型进行工时分析提供了有利条件。在工程实践过程中分析多个变量之间的关系时, 回归分析是一个非常有效的方法。常用的回归分析软件有 SPSS、MATLAB、R 软件、ECXEL 等, 本文拟选用 SPSS 对复杂度指标下工时定额进行拟合分析。

在大规模定制生产模式下, 企业以往生产的数据信息, 如产品设计文件、工艺过程文件等, 为新零件工时定额的计算奠定了基础。对于某新设计零

件, 依据其新的产品设计文件和工艺过程文件, 可计算得到新零件的拓扑结构复杂度 C'_T 、工艺属性复杂度 C'_S 、作业要素关联复杂度 C'_X 和操作过程复杂度 C'_Y 。另外, 依据其产品设计文件和工艺过程文件亦可从数据库筛选相似零件组, 通过分析原相似零件组的特征和加工过程特征, 确定原零件组中零件的工时定额 $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ 、拓扑结构复杂度 $C_T = (C_{T1}, C_{T2}, \dots, C_{Tn})$ 、工艺属性复杂度 $C_S = (C_{S1}, C_{S2}, \dots, C_{Sn})$ 、作业要素关联复杂度 $C_X = (C_{X1}, C_{X2}, \dots, C_{Xn})$ 和操作过程复杂度 $C_Y = (C_{Y1}, C_{Y2}, \dots, C_{Yn})$, 其中 $t_i, C_{Ti}, C_{Si}, C_{Xi}, C_{Yi}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为原零件 i 的工时定额、拓扑结构复杂度、工艺属性复杂度、作业要素关联复杂度和操作过程复杂度, n 为所选择的原零件组中的零件数量。

另外, 在大规模定制生产模式下, 不同零件的加工批量存在差异性, 且批量的波动对实际生产过程中单件加工时间亦会产生影响。董丰收等^[17]在进行典型工序工时定额制定方法的研究中指出, 基准工时的制定规则不仅要考虑零件的尺寸、形状、结构等自身特点和工装、设备、技术要求等条件约束, 还要将加工批量考虑在内。因此, 为了实现多层次复杂度下工时定额评价的准确性, 加工批量是一个不能忽略的重要因素。本文假设 n 种所选择的数据库中原零件以往生产记录的批量分别为 $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)$, 新设计零件的加工批量为 l 。

如图 4 所示, 根据现有零件的拓扑结构复杂度

$C_T = (C_{T1}, C_{T2}, \dots, C_{Tn})$ 、工艺属性复杂度 $C_S = (C_{S1}, C_{S2}, C_{Sn})$ 、作业要素关联复杂度 $C_X = (C_{X1}, C_{X2}, \dots, C_{Xn})$ 、操作过程复杂度 $C_Y = (C_{Y1}, C_{Y2}, \dots, C_{Yn})$ 、加工批量 $L = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ 以及工时定额 $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$, 本文拟采用3种典型的多元非线性曲线拟合函数进行拟合分析:

(1) 对数函数: $T = a + \sum_{i=1}^5 b_i \ln X_i$ 。

(2) 指数函数: $T = AB_1^{X_1} B_2^{X_2} B_3^{X_3} B_4^{X_4} B_5^{X_5} \Rightarrow t = a$

+ $\sum_{i=1}^5 b_i X_i$ 。其中: $t = \ln T, a = \ln A, b_i = \ln B_i$ 。

(3) 多项式函数: $T = a + \sum_{i=1}^5 b_i X_i + \sum_{i=1}^5 c_i X_i^2 + \sum_{i=1}^5 d_i X_i^3$ 。

根据 SPSS 软件回归分析模块, 分别建立上述3种模型, 分析得到的模型的决定系数 $R^2 = 1 - \frac{\text{残差平方和}}{\text{校正平方和}}$ 值, 选取最优的拟合模型。

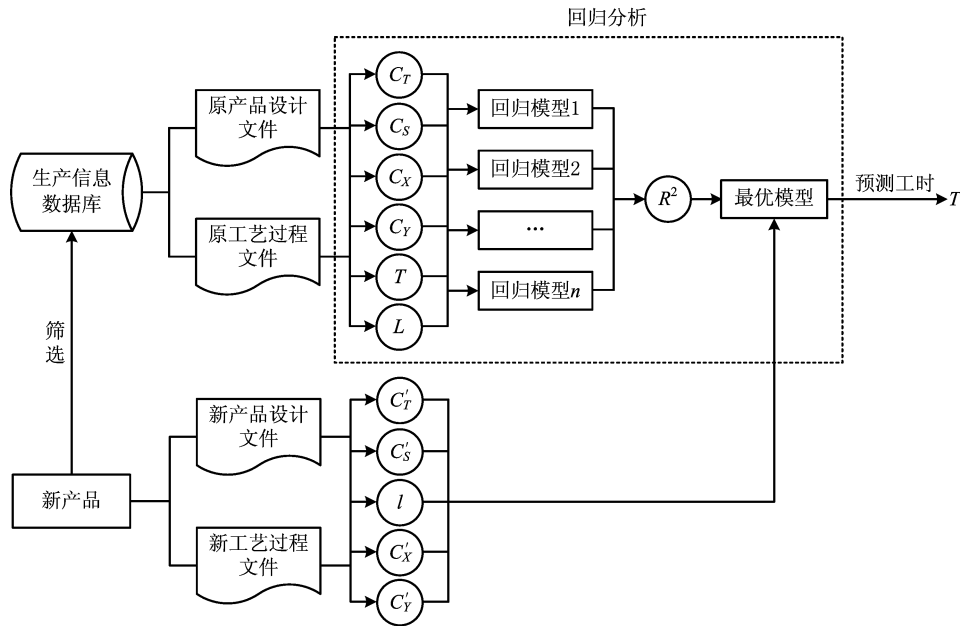


图4 工时定额分析模型

基于本文建立的指标评价体系, 分析新零件的4项复杂度指标 C'_T, C'_S, C'_X, C'_Y 以及批量因素 l , 并在此基础上根据拟合得到的最优模型进行新零件工时定额的预测。

4 实例验证

4.1 背景

本文选取某制造部门新设计的回转类零件“滚轮”作为工时定额分析案例, 已知该零件的加工批量 $l=96$ 件, 其零件图如图5所示。毛坯为 $\phi 45$ 棒料, 由零件图可知: 产品结构特征共有6处, 即 $\phi 42$ 外圆、 $\phi 36$ 外圆、 $\phi 23$ 内孔、 $\phi 26$ 内孔以及两处 C1 倒角, 基于图纸公差要求可得相应形状特征的精度等级, 即可计算得到该零件的拓扑结构复杂度

$$C_T = \frac{1}{S(AL)} = \frac{M+N}{\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i f_i + \sum_{j=1}^n \beta_j r_j\right)}$$

$$= \frac{(1+6-1) + (0+7-0)}{1 \times 1 + 0 \times 1} = 13。$$

工艺属性复杂度为

$$C_S = \sum_{i=1}^6 T_i \times S_i \times V_i = 7 \times S_{01} \times V_{01} + 10 \times S_{02} \times V_{02} + 7 \times S_{03} \times V_{03} + 7 \times S_{04} \times V_{04} + 12 \times S_{05} \times V_{05} + 7 \times S_{06} \times V_{06} = 410.77。$$

根据零件工艺要求和现有制造条件, 可得如下集合: 工艺类型 $X_1=(车)$ 、工装设备 $X_2=(车床, 扳手, 外圆刀, 内孔刀, 切槽刀)$ 和作业场地 $X_3=(物料区, 作业区, 刀具区, 工装区)$ 。由此可知滚轮的作业要素复杂度为

$$C_X = H(X_1) + H(X_2) + H(X_3) = -\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} \log_2 q_{ij} = 0 + (0.52 + 0.34 + 0.47 + 0.47 + 0.47) + (0.42 + 0.53 +$$

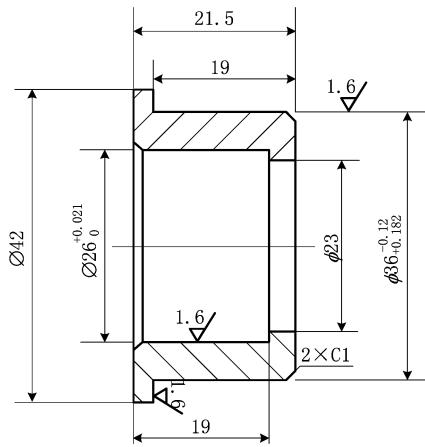


图5 滚轮零件图

$0.42 + 0.42) = 4.05。$

另外,零件结构信息为 $X_4 = (\phi 42 \text{ 外圆}, \phi 36 \text{ 外圆}, \text{倒角 } C1-1, \phi 23 \text{ 内孔}, \phi 26 \text{ 内孔}, \text{倒角 } C1-2)$, 则 4 类信息共有 $I = 1 + 5 + 4 + 6 = 16$ 种;根据滚轮新工艺文件可知其生产过程中存在 6 条有效信息链(如表 1)。由此可得全部有效信息链中每条信息的出现频次 g_i ,并计算得到作业过程的有效信息总量为 $Y = \sum_{i=1}^{16} g_i = 44$ 。因而可得操作过程复杂度

$$C_Y = H(Y) = - \sum_{i=1}^{16} y_i \log_2 y_i$$
$$= - \sum_{i=1}^{16} \frac{g_i}{Y} \log_2 \frac{g_i}{Y} = 3.61。$$

4.2 工时回归分析

通过对比制造部门原有的生产信息数据库,选择其他 17 种回转类零件作为分析参考零件,根据产品设计文件和工艺过程文件资料,可以计算出相应零件的复杂度参数,如表 1 所示。另外,由于选用零件为已经批产的正式零件,可以从数据库系统直接查询得到所选用零件的额定工时,如表 2 所示。

表 1 滚轮生产作业过程有效信息链

信息链编号	零件结构信息	工艺信息	工装信息	作业场地信息
①	$\phi 42$ 外圆	车	/	物料区
			扳手	工具区
			车床	作业区
②	$\phi 36$ 外圆	车	外圆刀	刀具区
			车床	作业区
③	倒角 C1-1	车	车床	作业区
			外圆刀	刀具区
			切槽刀	刀具区
④	$\phi 23$ 内孔	车	扳手	工具区
			车床	作业区
			内孔刀	刀具区
⑤	$\phi 26$ 内孔	车	车床	作业区
			内孔刀	刀具区
⑥	倒角 C1-2	车	车床	作业区
			外圆刀	刀具区
			扳手	工具区

表 2 回转零件清单

序号	零件名称	毛坯规格	L	C_T	C_S	C_X	C_Y	额定工时/min
1	销轴	$\phi 16$	4	9	226.10	4.06	3.51	22.50
2	滚轮内缘	$\phi 35$	360	10	51.03	4.47	3.67	23.80
3	衬套	$\phi 20$	360	5	10.03	4.27	3.50	12.25
4	销轴	$\phi 16$	190	13	198.05	4.64	3.74	21.00
5	套筒	$\phi 20$	180	7	83.99	4.27	3.49	15.30
6	挡圈	$\phi 30$	8	3	1.59	4.27	3.50	11.25
7	定位环	$\phi 20$	8	3	0.41	4.27	3.50	10.25
8	套筒	$\phi 20$	4	7	76.58	4.27	3.49	14.50
9	衬套	$\phi 40$	12	8	198.8	4.16	3.21	19.50
10	滚子	$\phi 30$	144	11	62.06	4.87	3.37	15.80
11	垫片	$\phi 20$	500	4	98.09	3.64	3.14	8.00
12	链销轴	$\phi 30$	72	9	103.69	4.07	3.19	17.30
13	轴	$\phi 45$	2	15	381.59	4.37	3.20	31.25
14	垫片	$\phi 16$	420	3	0.41	4.27	3.50	12.25
15	定位销	$\phi 20$	350	7	96.58	4.37	3.51	17.50
16	曲柄销	$\phi 45$	128	12	397.58	4.15	3.71	36.50
17	摇杆销	$\phi 40$	128	8	287.36	4.05	3.61	26.00

通过对数据库选用的 17 种回转类零件进行上述 3 种非线性回归分析,可以得到 3 种模型的系数分别为:

- (1)对数函数: $R^2=0.819$;
- (2)指数函数: $R^2=0.894$;
- (3)多项式函数: $R^2=0.999$;

因此,多项式函数能够很好地拟合复杂度指标与工时定额的关系,与陈友玲等^[4,17]的研究结论相同^[4,18]。最终得到统一的工时定额模型如下:

$$T = 28\,868.044 + 0.004L + 9.663 \times 10^{-6} \times L^2 - 4.735 \times 10^{-8} \times L^3 - 5.894C_T + 1.165 \times C_T^2 - 0.054 \times C_T^3 - 0.061 \times C_S + 4.868 \times 10^{-4} \times C_S^2 - 5.434 \times 10^{-7} \times C_S^3 - 2\,205.42 \times$$

$$C_X + 535.318 \times C_X^2 - 42.908 \times C_X^3 - 22\,535.785 \times C_Y + 6\,538.517 \times C_Y^2 - 631.437 \times C_Y^3。$$

由此计算可得滚轮的工时定额 $T=38.32\text{ min}$ 。

4.3 可行性分析

基于上述分析,鉴于模特法(Modular Arrangement of Pre-determined Time Standard, MOD)在工时定额评价过程中的有效性^[19],本文另外采用 MOD 法对所选用 17 种零件进行分析,得到其 MOD 法计算的工时数据,如表 3 所示。根据所得的工时数据,可以分别计算得到回归模型工时和 MOD 法工时与系统中额定工时的误差并得到额定工时与回归分析工时和 MOD 法工时误差图,如表 3 和图 6 所示。

表 3 回归分析工时和 MOD 法工时误差分析

序号	零件名称	毛坯规格	额定工时/min	MOD 法/min	回归模型		
					计算值/min	误差(额定工时)/%	误差(MOD 法)/%
1	销轴	φ16	22.50	22.97	22.497	0.01	2.07
2	滚轮内缘	φ35	23.80	22.94	23.784	0.07	-3.66
3	衬套	φ20	12.25	11.74	12.240	0.08	-4.30
4	销轴	φ16	21.00	21.27	21.006	-0.03	1.26
5	套筒	φ20	15.30	14.87	15.280	0.13	-2.74
6	挡圈	φ30	11.25	10.63	10.716	4.75	-0.79
7	定位环	φ20	10.25	10.95	10.786	-5.23	1.47
8	套筒	φ20	14.50	15.27	14.509	-0.07	4.97
9	衬套	φ40	19.50	18.90	19.486	0.07	-3.13
10	滚子	φ30	15.80	15.07	15.799	0.01	-4.81
11	垫片	φ20	8.00	8.10	7.999	0.01	1.29
12	链销轴	φ30	17.30	17.66	17.316	-0.09	1.97
13	轴	φ45	31.25	31.50	31.248	0.01	0.80
14	垫片	φ16	12.25	13.07	12.251	-0.01	6.27
15	定位销	φ20	17.50	18.57	17.530	-0.17	5.59
16	曲柄销	φ45	36.50	37.30	36.503	-0.01	2.15
17	摇杆销	φ40	26.00	26.49	26.501	-1.93	-0.04

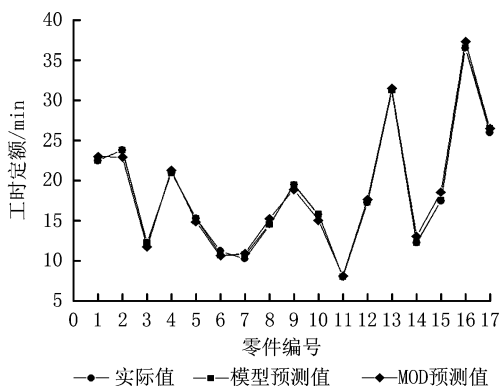


图6 额定工时与回归分析工时和MOD法工时误差图

由表 3 和图 6 可知,在考虑加工批量的基础上,基于 4 种复杂度指标回归模型的预测值与额定工时的误差普遍偏小,说明该模型与额定工时之间具有良好的拟合效果;另外,基于加工批量和 4 种复杂度指标的回归模型与 MOD 法所得工时数据具有良好的相合性,鉴于 MOD 法进行工时评价的科学性,可以认定基于 4 种复杂度指标的回归分析模型能够很好地进行工时定额的拟合分析。

5 结束语

本文从大规模制造环境下工时定额快速、准确

评价的需求出发,针对现有工时评价方法的局限性,提出一种综合考虑零件结构、工艺特性、作业要素的使用以及操作者认知过程的系统性评价方法。在零件拓扑结构复杂度和工艺属性复杂度研究的基础上,将作业要素的使用和操作者的认知特征纳入工时定额的影响因素中,并定义了生产要素复杂度和操作过程复杂度两种指标。本文结合零件生产过程中作业要素和操作者作业过程的特征,提出从信息的视角考虑作业过程中的复杂特征,并建立了以信息熵为衡量指标的复杂度评价体系,实现了生产要素和操作过程复杂性特征的量化,为工时定额的系统性评价提供了技术支持。此外,通过对某公司生产零件的 SPPS 回归分析,确定了4种复杂度指标与工时定额的多元非线性的关系类型,并通过将基于复杂度指标的回归分析模型与额定工时和 MOD 法工时进行误差分析和对比,证明了其与两者良好的相合性,从而证明了本文建立的综合考虑生产要素复杂度和操作过程复杂度的工时定额评价体系的有效性。

工时定额的评价是一项复杂的系统工程,尤其在当前产品更新换代迅速的时代背景下,准确、快速地掌握新产品的生产作业时间,不仅有助于企业把握制造系统性能^[20],对企业提高订单按时交付率和赢得客户亦至关重要。为实现这一目标,在未来仍有几个方向需要深入研究。首先,基于零件特征和工艺路线的复杂度自动识别技术的开发。对于新设计零件,如何在本文提出的复杂度评价方法的基础上建立复杂度自动识别技术,对该理论的实际应用和推广具有重要意义。其次,基于零件特征的工时定额数据库技术的发展。未来在大规模定制条件下,随着定制产品的累积,会产生大量的产品数据,而能够对这些产品特征和工时数据进行高效分类、存储和调用的数据库技术的应用,将有助于基于复杂度的工时定额评价技术的实施。

参考文献:

- [1] CARDONE A, GUPTA S K, DESHMUKH A, et al. Machining feature-based similarity assessment algorithms for prismatic machined parts[J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(9):954-972.
- [2] WEI Junmin, JIN Sun, LIN Zhongqin, et al. Evaluating the similarity of components for product family design[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(8):1218-1222 (in Chinese). [韦俊民, 金隼, 林忠钦, 等. 产品族设计中的零件相似性评价方法[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(8):1218-1222.]
- [3] YANG Qinghai, QI Guoning, HUANG Zheren, et al. Evaluation method of machine hour of part based on case-based reasoning and SML[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(5):99-105 (in Chinese). [杨青海, 祁国宁, 黄哲人, 等. 基于案例推理和事物特性表的零件工时估算方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(5):99-105.]
- [4] CHEN Youling, REN Xiaojie. Time-quota computing method based on similarity coefficient of process[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(4):866-872 (in Chinese). [陈友玲, 任晓杰. 基于工序相似系数的工时计算方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(4):866-872.]
- [5] CHEN Youling, LI Yi. Study on time-quota based on degree of part customization in MC environment[J]. *Application Research of Computers*, 2015, 32(2):443-446 (in Chinese). [陈友玲, 李 伟. MC 环境下基于零件定制程度的工时定额研究[J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(2):443-446.]
- [6] CHEN Youling, WANG Yao, XIE Shuhong. Labor hour estimation in mass customization based on part complexity model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(2):477-484 (in Chinese). [陈友玲, 王 尧, 谢淑红. 大规模定制环境下基于零件复杂度模型的工时估算[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(2):477-484.]
- [7] NAKAYAMA S I, NAKAYAMA K I, NAKAYAMA H. A study on setting standard time using work achievement quotient[J]. *International Journal of Production Research*, 2002, 40(15):3945-3953.
- [8] YIN Xiaoqing, ZHANG Di, HUANG Wen. Standard time research based on staff's work enthusiasm level index[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(8):1980-1986 (in Chinese). [尹小庆, 张 迪, 黄 文. 基于员工工作积极性等级指数的标准时间研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(8):1980-1986.]
- [9] CHEN Youling, GU Mengyao, WANG Jianbin. Method for determining standard time based on staff's knowledge level index[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(10):2768-2776 (in Chinese). [陈友玲, 谷梦瑶, 汪建斌. 基于员工知识水平等级指数的标准时间制定方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(10):2768-2776.]
- [10] ZOU Shuliang, YU Xiaoren, XIANG Hong, et al. A review of methods for setting standard working hours in manufacturing industry[J]. *Journal of University of South China: Social Science Edition*, 2014, 15(4):61-65 (in Chinese). [邹树梁, 余潇虹, 向 虹, 等. 制造业标准工时制定方法研究现状及展望[J]. *南华大学学报:社会科学版*, 2014, 15(4):61-65.]
- [11] LIU Changqing, LI Yingguang, WANG Wei, et al. Feature based man-hour forecasting model for aircraft structure parts NC machining[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(10):2156-2162 (in Chinese). [刘长青, 李迎光, 王 伟, 等. 基于特征的飞机结构件数控加工工时预测模

- 型[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2156-2162.]
- [12] LIU Peng, LI Zhizhong. Task complexity: a review and conceptualization framework[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(6): 553-568.
- [13] HAM D H, PARK J, JUNG W. Model-based identification and use of task complexity factors of human integrated systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 100: 33-47.
- [14] KONG Fansen, YE Zhenggeng. Research on evaluation method framework model of production job operability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 198-208(in Chinese). [孔繁森, 叶正梗. 生产作业可操作性评价理论方法框架模型研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 198-208.]
- [15] MOWSHOWITZ A, DEHMER M. Entropy and the complexity of graphs revisited [J]. Entropy, 2012, 14(3): 559-570.
- [16] HE Fei. Complexity of assembly manufacturing system with its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010(in Chinese). [何非. 装配制造系统复杂特性建模及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.]
- [16] LI Yajie, HE Weiping, DONG Rong, et al. Man-hour forecasting and evolution based on MES data collection[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(11): 2810-2818(in Chinese). [李亚杰, 何卫平, 董蓉, 等. 基于制造执行系统数据采集的工时预测与进化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(11): 2810-2818.]
- [17] DONG Fengshou, ZHANG Zhenming, JIA Xiaoliang, et al. The standard time calculation based on typical operation[J]. Machine Design & Manufacture, 2006, 10(10): 174-176(in Chinese). [董丰收, 张振明, 贾晓亮, 等. 基于典型工序的工时定额制定方法[J]. 机械设计与制造, 2006, 10(10): 174-176.]
- [18] CHEN Youling, RAN Jian, WANG Yao. Method for determining labor hour in mass customization based on complexity of product structure[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(6): 1703-1706(in Chinese). [陈友玲, 阮键, 王尧. 大规模定制环境下基于产品结构复杂度的工时定额制定研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(6): 1703-1706.]
- [19] YE Zhenggeng, CUI Jiachao, ZHOU Fuli. Man-hour Estimation model based on standard operation unit for flexible manufacturing system [EB/OL]. [2018-01-16]. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/14/mateconf_gcmm2017_02017.pdf.
- [20] ZHOU Fuli, WANG Xu, LIN Yun. Production effectiveness-based system reliability calculation of serial manufacturing with checking machine[J]. Journal of Computers, 2016, 27(3): 201-211.

作者简介:

- 叶正梗(1989—), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 研究方向: 工时定额评价、复杂系统建模, E-mail: yezhenggeng@outlook.com;
- + 蔡志强(1981—), 男, 湖南衡阳人, 教授、博士生导师, 研究方向: 系统建模与优化, 通信作者, E-mail: caizhiqiang@nwpu.edu.cn;
- 周福礼(1991—), 男, 河南洛阳人, 讲师, 研究方向: 系统可靠性建模、质量管理。