

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.023

# 基于产品设计难度系数的设计时间估计方法

谷梦瑶<sup>1,2</sup>, 陈友玲<sup>1,2</sup>, 杜萱萱<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为了快速而准确地估算产品设计时间,研究了产品设计难度与设计时间之间的关系,提出了一种基于产品设计难度系数的设计时间估算方法.该方法通过分析产品设计难度表征方式,并结合熵值法和基于相关系数和标准差的专家权重确定方法建立产品设计难度系数模型.同时基于企业数据库和编码技术,运用 Matlab 确定产品设计难度系数与设计时间之间的关系函数,建立基于产品设计难度系数的设计时间估算模型.最后,通过范例和已有算法的对比证明了该方法的实用性和有效性.研究结果表明,该方法对设计时间预测具有较高的准确性和较好的实用性.

**关键词:** 设计时间;难度系数;产品设计;熵值法;专家权重确定法;Matlab

中图分类号: TP 391 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)01-0111-05

## Method for Determining Design Time Based on Difficulty Coefficient of Product Design

GU Meng-yao<sup>1,2</sup>, CHEN You-ling<sup>1,2</sup>, DU Xuan-xuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Corresponding author: GU Meng-yao, E-mail: gmyhpf@163.com)

**Abstract:** Aiming at forecasting design time quickly and accurately, the relationship between product design difficulty and design time was researched, and a method based on the difficulty coefficient of product design was proposed. First of all, by analyzing the difficulty representation modes of product design and combining the entropy evaluation method and expert weights method based on the correlation coefficient and standard deviation, the difficulty coefficient model of product design was established. Meanwhile, based on the enterprise database and coding technology, the relationship function between difficulty coefficient and design time of product design was determined with Matlab, and then the design time estimation model based on the difficulty coefficient of product design was established. Finally, the proposed method was verified to be applicable and available by an example and comparative experiments with existing algorithms. The results showed that the proposed method has better practicability and accuracy for design time estimation.

**Key words:** design time; difficulty coefficient; product design; entropy evaluation method; expert weights determination method; Matlab

研究表明,设计阶段完成时间占产品开发总时间的70%~75%左右,同时产品设计阶段决定了产品成本的70%~80%,但其所需费用却占不到总费用的3%<sup>[1]</sup>.因此,可靠的设计时间预测对产品开发过程管理尤为重要.目前企业采用的多是经验估计等传统的设计时间估算方法,其主观

性和预测偏差均较大<sup>[2]</sup>.因此有必要研究科学的系统化的设计时间预测方法.

目前国内外学者已经对设计时间的估算方法进行了大量的研究.文献[1]提出了一种模糊神经网络模型来估算产品设计时间;文献[2]提出了一种基于元模型的产品设计时间预测方法;文

献[3]认为产品设计时间服从任意分布,并采用马尔可夫过程建立了产品研制完成时间预测模型;文献[4]将模糊回归理论与 SVM 相结合,提出了基于 FSVM 的产品设计时间预测方法;文献[5]运用设计结构矩阵构建时间计算模型,进而估算整个产品开发时间.上述研究都为产品设计时间预测提供了新的思路,但仍旧存在一定的缺陷.第一,部分设计时间预测方法的应用存在局限性,比如文献[3]主要适用于大样本情况下的设计活动;第二,部分设计时间预测方法复杂度高、不易操作,难以在企业实施和推广,比如文献[4]的FSVM模型;第三,文献[3]考虑的影响因素不全面,使预测结果偏差较大.

产品品种和产品设计的工具、流程、管理制度以及设计人员能力等的不同,都会造成不同产品设计难度上的差异.同时文献[6]认为任务设计难度的改变对产品设计时间存在显著影响.理论上,设计难度高的产品耗时较多,反之则耗时较少.

基于此,提出了一种基于产品设计难度系数的设计时间估算方法.首先确定产品设计难度表征方式,并运用熵值法和基于相关系数和标准差的专家权重确定方法计算产品设计难度系数;再次,运用 Matlab 软件分析并确定产品难度系数与设计时间之间的关系函数;最后通过范例与已有算法的对比验证该方法的合理性和可行性.

## 1 基于产品设计难度系数的设计时间估算路线

建立基于产品设计难度系数的设计时间估算路线,如图 1 所示.

## 2 基于产品设计难度系数的设计时间预测模型

### 2.1 产品设计难度表征方式

产品设计难度系数可以定义为设计某产品以达到预设标准的难易程度值.文献[1-2,4-5]认为影响设计时间的因素包括产品特征、设计过程、设计环境和设计团队四项;文献[7]认为影响产品设计的因素包括产品设计者的整体知识水平、设计对象的复杂性、企业的硬件建设、企业软环境、企业原始资料的完整性等.对于同一企业而言,企业软硬件环境通常保持不变,而文献[7]研究发现产品复杂度和设计者能力水平对设计时间

存在显著的影响.因此综合国内外学者的研究成果和企业设计人员经验,并结合重要性、简洁性和可用性等原则,获得产品设计难度评价树如图 2 所示,而具体细分需要具体化到各个产品.

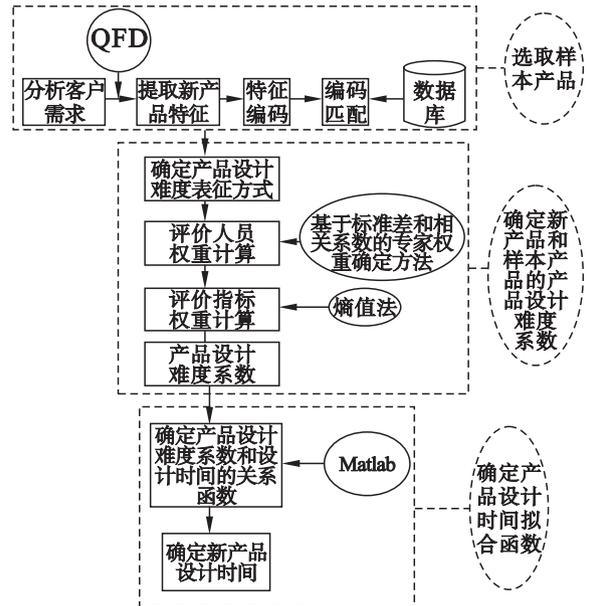


图 1 基于产品设计难度系数的设计时间估算路线  
Fig. 1 Estimating route of design time based on difficulty coefficient of product design

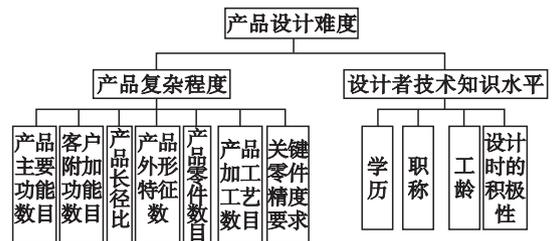


图 2 产品设计难度评价树  
Fig. 2 Difficulty evaluation tree of product design

### 2.2 产品设计难度系数的确定

#### 2.2.1 确定评价人员权重

在群决策中有必要通过专家权重以避免专家自身偏好等对决策结果的影响.文献[8]中的基于相关系数和标准差的专家权重确定方法既考虑了专家个体评价结果与其他专家间的相关性,又兼顾了专家对各指标评价值的差别性,从而提高了专家权重的客观性.其计算过程如下:

设专家  $k$  的个体评价向量  $\mathbf{Y}_k = (y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{km})$ ,  $k = 1, 2, \dots, s$ ; 专家  $l$  的个体评价向量  $\mathbf{Y}_l = (y_{l1}, y_{l2}, \dots, y_{lm})$ ,  $l = 1, 2, \dots, s$ , 其中  $m$  为评价指标总数,  $s$  为评价专家总数. 则相应的相关系数为

$$r_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^m (y_{ki} - \bar{y}_k)(y_{li} - \bar{y}_l)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ki} - \bar{y}_k)^2 \cdot \sum_{i=1}^m (y_{li} - \bar{y}_l)^2}}, \quad (1)$$

$$\bar{y}_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ki}; \bar{y}_l = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{li}. \quad (2)$$

其中  $r_{kl}$  越接近 1, 则专家  $k$  与专家  $l$  的评价结果越近似,  $r_{kl}$  越接近 -1, 则专家  $k$  与专家  $l$  的评价结果越不同. 因此  $\sum_{l=1}^s (r_{kl} + 1)$  越大, 专家  $k$  的权重越大, 反之专家  $k$  的权重越小.

而个体评价向量  $Y_k$  的标准差为

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{ki} - \bar{y}_k)^2}. \quad (3)$$

其中  $\sigma_k$  越大, 专家  $k$  对各个评价指标的评价值相差越大, 则专家  $k$  的权重越大, 反之专家  $k$  的权重越小.

综上所述, 得到专家  $k$  的权重为

$$\lambda_k = \frac{D_k}{\sum_{k=1}^s D_k}. \quad (4)$$

其中,  $D_k = \sigma_k \sum_{l=1}^s (r_{kl} + 1)$ .

### 2.2.2 确定各指标因素权重

熵值法能够真实地反映指标信息熵值的效用价值, 进而避免由于主观因素造成的偏差, 同时, 还可以根据指标间的差异程度, 利用信息熵对各指标的初始权重进行调整, 即所谓的动态赋权<sup>[9]</sup>. 因此本文运用熵值法计算指标权重.

### 2.2.3 计算产品设计难度系数

综上所述, 产品设计难度系数的计算公式为

$$U = \sum_{i=1}^m w_i \left( \sum_{f=1}^s \lambda_f t_{if} \right). \quad (5)$$

式中:  $s$  表示评价人员的数目;  $m$  表示评价指标数;  $w_i$  表示第  $i$  个指标的权重值;  $\lambda_f$  表示第  $f$  个评价人员的权重值;  $t_{if}$  表示第  $f$  个评价人员对第  $i$  个指标的评估值.

## 2.3 设计时间预测模型构建

工程实践中, 常通过数据拟合的方法以求得变量间的关系函数. 传统通过编程求解拟合曲线的方法工作量大且效率低, 而 Matlab 曲线拟合工具箱功能强大, 使用方便, 可以快速且准确地实现多种类型的线性或非线性曲线拟合. 因此本文利用 Matlab 曲线拟合工具箱进行曲线拟合, 求解产品设计时间与设计难度系数之间的关系函数, 而具体的曲线拟合步骤如图 3 所示.

## 3 算 例

S 公司是一家集研发、设计与制造为一体的机械制造公司. 某客户要求设计并生产一批能承

受交变载荷, 加工精度为 6 ~ 7 级的机床主轴, 而且要求提供具体的交货期. 为了准确地估算交货期, 并安排下游生产活动, 需要预先估算主轴设计所需时间. 目前 S 公司所采用的设计时间预测法为判断分析法, 即设计管理人员依靠经验分析预测设计任务所需的时间<sup>[1]</sup>, 但该方法误差率较高, 需改进. 而且公司积累了大量轴类零件的设计工时数据和设计人员信息等资料, 这为本文方法的运用提供了条件.



图 3 基于 Matlab 的曲线拟合步骤  
Fig. 3 Curve fitting steps based on Matlab

### 3.1 产品设计难度系数确定

结合新产品特征因素, 从 S 公司的历史产品数据库中获取 25 组与新产品相似且有完整而精确的设计时间、设计人员信息等的轴类零件. 其中 15 组用作数据拟合分析, 剩余 10 组用于模型检验.

#### 3.1.1 确定评价人员权重

依据图 2 所示的产品设计难度评价树制定评价表, 并请有关专家进行评价, 然后依据评价值, 由式(1) ~ 式(4)计算评价专家权重  $\lambda$ , 如表 1 所示.

表 1 评价专家权重  
Table 1 Weights of evaluation personnel

参数	评价专家序号				
	1	2	3	4	5
$\sigma$	0.277	0.181	0.123	0.193	0.064
$D$	14.879	11.078	9.105	12.143	5.894
$\lambda$	0.279	0.208	0.171	0.229	0.111

#### 3.1.2 确定评价指标权重

而后运用熵值法计算指标权重  $w$ , 如表 2 所示.

表 2 评价指标权重  
Table 2 Evaluation index weights

评价指标参数	$h$	$w$
产品主要功能数目	0.644	0.094
客户附加功能数目	0.843	0.123
产品长径比	0.449	0.065
产品外形特征数目	0.989	0.144
产品零件数目	0.543	0.079
产品加工工艺数目	0.329	0.048
精度要求	0.684	0.100
学历	0.341	0.050
工龄	0.668	0.097
职称	0.905	0.132
设计时的积极性	0.479	0.070

### 3.1.3 计算产品设计难度系数

结合评价指标值、指标权重和人员权重,运用式(5)计算得新产品的的设计难度系数为 0.689.

### 3.2 设计时间预测模型构建

同理,计算 15 组拟合样本的产品设计难度系数,如表 3 所示.

表 3 产品设计难度系数

Table 3 Difficulty coefficient of product design

序号	工时/h	设计难度系数
实例 1	22	0.641
实例 2	31	0.707
实例 3	32	0.709
实例 4	18	0.593
实例 5	23	0.649
实例 6	35	0.718
实例 7	30	0.698
实例 8	25	0.667
实例 9	29	0.693
实例 10	43	0.749
实例 11	52	0.812
实例 12	37	0.723
实例 13	29	0.687
实例 14	48	0.789
实例 15	57	0.843

运用 Matlab 曲线拟合工具箱绘制产品设计难度系数与设计时间的散点图,并依据散点图进行曲线拟合分析.拟合结果显示三阶傅里叶函数的拟合度最高(拟合度  $R^2$  为 0.998),因此本文选用三阶傅里叶函数模型,如图 4 所示.

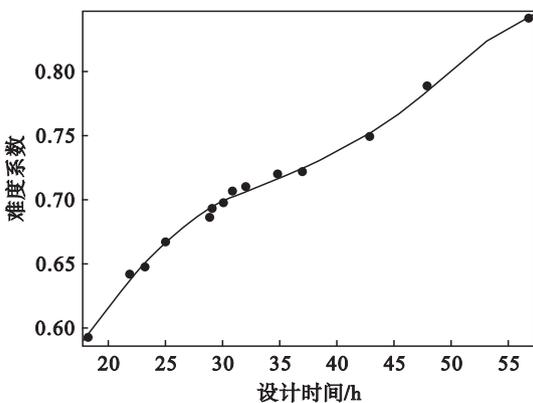


图 4 S 企业产品设计难度系数与设计时间的拟合曲线  
Fig. 4 Fitting curve of difficulty coefficient and design time of product design in enterprise S

确定产品设计难度系数  $U$  和设计时间  $T$  的关系函数为

$$T = 36.86 - 10.84\cos(18.23U) + 13.98\sin$$

$$(18.23U) + 4.956\cos(36.46U^2) - 1.268\sin(36.46U^2) - 2.553\cos(54.69U^3) - 0.8132\sin(54.69U^3). \quad (6)$$

由产品设计难度系数的求解模型可得  $U_{(\text{新})} = 0.689$ ,代入式(6)即可求得  $T_{(\text{新})} = 28.34$  h.

### 3.3 模型合理性验证

研究表明文献[4]中的基于 FSVM 的设计时间预测方法具有较好的预测效果.考虑到基于 FSVM 的设计时间预测方法的有效性与准确性,本文选用其与 S 企业原有方法——判断分析法进行实验.运用本文模型和上述两种方法依次计算剩余 10 组检验样本的设计时间,并分别与实际设计时间进行对比,计算结果如表 4 所示.

表 4 不同算法结果对比

Table 4 Result comparison of different algorithms

样本序号	实际设计时间/h	S 企业原有方法所得设计时间/h	基于 FSVM 所得设计时间/h	本文方法所得设计时间/h
1	24	32	27.52	25.54
2	35	48	32.23	36.83
3	42	60	46.72	44.56
4	15	24	18.94	16.13
5	33	48	38.61	32.45
6	25	36	33.46	27.23
7	48	60	53.67	50.18
8	51	72	62.74	53.57
9	29	42	34.28	28.55
10	46	54	50.85	48.72

由表 4 知,运用本文方法所得产品设计时间基本与实际设计时间以及另外两种方法所得设计时间接近,由此说明本文方法所得设计时间是合理的.同时相比于另外两种方法,本文方法所得设计时间整体上更接近于实际设计时间,由此说明本文方法所得设计时间更加准确.

为了进一步证明本文方法具有较高精确度,运用式(7)分别计算三种方法的平均预测误差,如表 5 所示.其中本文方法的平均预测误差最小,说明本文方法得到的设计时间总体更精确,更接近于实际设计时间,也进一步说明基于产品设计难度系数的设计时间估算具有一定的应用价值.

$$MPE(RL_{o_j}) = \frac{1}{e} \sum_{j=1}^e |PRL_{o_j}(RL_{o_j}) - RL_{o_j}|. \quad (7)$$

其中:  $MPE(RL_{o_j})$  为样本  $j$  在实际设计时间为  $RL_{o_j}$  时的平均预测误差;  $e$  为检验样本的个数(本实验中  $e = 10$ );  $PRL_{o_j}(RL_{o_j})$  为样本  $j$  在其实际设计时间为  $RL_{o_j}$  时的预测设计时间.

表 5 不同算法的平均预测误差

Table 5 Average prediction errors of different algorithms

算法名称	S 企业原有方法	基于 FSVM 的设计时间预测方法	本文方法
平均预测误差	11.60	5.756	4.066

同时本文算法与上述两种算法相比存在以下优势：①判断分析法主观性较强致使预测偏差较大，而本文算法既不需要对设计者与设计任务进行直接而细致的观测，而且通过建立数学模型估算设计时间，客观性更强，准确性更高；②与基于 FSVM 的产品设计时间预测方法相比，本文方法简单易懂，易于操作，便于在企业中推广。

## 4 结 语

针对传统设计时间预测方法日益无法满足企业需求这一问题，本文对产品设计时间预测方法进行了研究，并提出了产品设计难度的概念，研究了基于产品设计难度系数的设计时间估算方法，并建立基于产品设计难度系数的设计时间估算模型。通过 S 企业的实际案例，以及与已有算法的比较验证了该方法的合理性和可行性。研究表明，与传统及现存设计时间预测方法相比，本文所提出的基于产品设计难度系数的设计时间估算方法具有较高的准确性和较好的实用性。

### 参考文献：

[1] Xu D, Yan H S. An intelligent estimation method for product

design time [ J ]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(7/8) : 601 - 613.

- [2] Zhang K L, Guo B. Application of meta model approach in product development process [ J ]. *Journal of Computational Information Systems*, 2010, 6(7) : 2159 - 2166.
- [3] Bashir H A, Vince T. Models for estimating design effort and time [ J ]. *Design Studies*, 2001, 22(2) : 141 - 155.
- [4] Yan H S, Xu D. An approach to estimating product design time based on fuzzy  $\nu$ -support vector machine [ J ]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2007, 18(3) : 721 - 731.
- [5] Yan H S, Wang B, Xu D, et al. Computing completion time and optimal scheduling of design activities in concurrent product development process [ J ]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 2010, 40(1) : 76 - 89.
- [6] Rubio S, Diaz E, Martin J, et al. Evaluation of subjective mental workload: a comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods [ J ]. *Applied Psychology—An International Review*, 2004, 53(1) : 61 - 86.
- [7] 段战国. 面向订单设计知识劳动度量方法研究 [ D ]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
(Duan Zhan-guo. Study on the method of knowledge work measurement for ETO [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2008.)
- [8] 赵娜, 魏翠萍, 毕艳昭. 基于相关系数和标准差的专家权重确定及其灵敏度分析 [ J ]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2013, 39(2) : 25 - 32.  
(Zhao Na, Wei Cui-ping, Bi Yan-zhao. Determining expert weights and its sensitivity analysis based on the correlation coefficient and the standard deviations [ J ]. *Journal of Qufu Normal University(Natural Science)*, 2013, 39(2) : 25 - 32.)
- [9] Dong Q X, Gao C C. Knowledge engineering, intellectual capital of creative industry park based on multi-objective decision-making and entropy methods [ J ]. *Systems Engineering Procedia*, 2012, 3(1) : 326 - 332.