



基于改进成本公差模型的并行公差优化设计

金 秋, 莫 帅

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘 要: 在总结传统成本公差模型的基础上,从资金的时间价值角度对传统成本公差模型进行改进,提出了改进后的成本公差模型. 利用改进后的成本公差模型,并将制造成本和质量损失成本同时应用到并行公差设计的目标函数中,实现公差的优化设计. 最后通过工程实例验证所提出的方法. 结果表明:改进的成本-公差模型更贴近现实,计算出的总成本更合理,有效反映了资金的时间价值、物价上涨等现实因素.

关键词: 成本公差模型; 质量损失; 并行公差设计

中图分类号: TP391; O221.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2010)05-0053-04

Concurrent Tolerancing Optimization Design Based on Improved Cost-Tolerance Model

JIN Qiu, MO Shuai

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: On the basis of summarizing traditional cost-tolerance model, the traditional cost-tolerance model was improved from the time value of money angle. An improved cost-tolerance model was put forward. The improved cost-tolerance model was applied, meanwhile, the cost of manufacture and quality lose cost were applied to concurrent tolerancing design object functions, concurrent tolerancing optimization design was obtained. An applied prototype was illustrated with improved cost-tolerance model. Results indicate that the data with improved cost-tolerance model is close to the realism, the total cost is reasonable, and it effectively reflects time value of money and price advancing.

Keywords: cost-tolerance model; quality loss; concurrent tolerancing design

制造成本是整个产品寿命周期成本中的一个重要组成部分,它是指制造一个零件所必需的一切费用的总和. 生产批量、加工方法、零件的形状、材料以及公差等因素对制造成本都有影响,其中公差与制造成本有着密切的关系. 随着现代科学技术的高速发展,制造一个零件可以有許多不同的实现方案,为了能够从诸多零件制造方案中选择最佳的方案,就需要对工艺路线进行技术经济评价. 一般以成本的高低作为工艺路线经济性的衡量指标.

国内外学者对此问题的研究非常重视,成果颇多^[1-6],但从考虑资金时间价值角度研究成本-公差模型并给出改进模型的却很少. 零件的加工成本由多工序的加工成本组成. 一般单工序的加工成本-公差

模型的获取方法如下:通过对生产实际的加工成本数据采用一些不同的典型加工成本-公差模型进行拟合,以确定模型中的系数,并从中选择拟合精度最高的模型作为这种加工方法的加工成本-公差模型.

本文根据不同的利率计算方法,从加工成本和公差的关系角度出发研究制造成本,并提出若干改进的成本-公差模型,对其进行实例验证,从而证明改进模型的有效性.

1 传统的加工成本-公差模型

公差在决定机加工成本时起着至关重要的作用. 一般来说,零件具有越小的公差越能保证设计功

收稿日期: 2010-06-03; 修回日期: 2010-06-28

基金项目: 天津市应用基础研究计划重点资助项目(06YFJZC00500)

作者简介: 金 秋(1975—),女(回族),吉林人,讲师, jinq@tust.edu.cn.

能要求,但必然导致较高的加工成本.下面给出我国中型机械类企业中等批量加工时,各种加工特征尺寸的加工成本公差模型^[7-8]:

外圆特征尺寸的加工成本-公差模型为

$$C(t) = 15.1138e^{(-42.2874t)} + \frac{t}{0.8611t + 0.01508} \quad (1)$$

式中, t 为尺寸公差.

内孔特征尺寸的加工成本-公差模型为

$$C(t) = 12.6691e^{(-37.5279t)} + 2.486e^{\left(\frac{-0.000978}{t}\right)} \quad (2)$$

定位特征尺寸的加工成本-公差模型为

$$C(t) = \begin{cases} 8.2369e^{(-35.8049t)} + 1.3071e^{\left(\frac{-0.0083}{t}\right)} & t \leq 0.13 \\ 1.23036 & t > 0.13 \end{cases} \quad (3)$$

平面特征尺寸的加工成本-公差模型为

$$C(t) = 5.0261e^{(-15.8903t)} + \frac{t}{0.3927t + 0.1176} \quad (4)$$

追求工艺路线的经济性是并行公差设计的最主要的理论依据,也就是说,将该经济性作为并行公差设计数学模型中的目标函数.

2 改进的加工成本-公差模型

资金的时间价值是指一定量的资金在不同时刻的价值量的差额,是资金在使用过程中随时间的推移而发生的价值增值.因为资金时间价值的存在,在不同的时间付出或得到同样数额的资金在价值上是不相等的,即资金的价值会随着时间而发生变化.由常用利息计算公式可知,单利息为

$$F = P \times (1 + i \times n) \quad (5)$$

复利息为

$$F = P \times (1 + i)^n = P \left(\frac{F}{P}, i, n \right) \quad (6)$$

式中: P 为本金,又称现值; i 为利率; F 为本金与利息之和,又称终值; n 为计息期数,通常以一年为一期; $(1 + i)^n$ 为复利终值系数,常以 $(F/P, i, n)$ 表示,计算时,其数值可以查阅复利终值系数表直接获得.

在进行并行公差设计与产品工艺路线技术经济评价时,显然要考虑资金的时间价值,很明显现在要支付更多的费用去保证以前同样的公差.上面通用的成本-公差模型^[3]没有考虑资金时间价值问题.至今无人对此模型进行优化或修正,本文将从资金的时间价值角度对成本-公差模型进行优化.

2.1 按每次调息的实际年利率计算

由于我国从 1996 年至今多次调整利率,因此需

要准确确定利率.国家不定期出台政策进行调息,银行利率不定期发生变化.故精确的优化后的成本-公差模型为

$$C(t)_1^* = C(t)(1 + i_1)^{(x_1 - 1996)} \quad (7)$$

$$C(t)_2^* = C(t)_1^* (1 + i_2)^{(x_2 - x_1)} \quad (8)$$

$$C(t)_n^* = C(t)_{n-1}^* (1 + i_n)^{(x_n - x_{n-1})} \quad (9)$$

式中: $C(t)$ 为原始的成本-公差模型; $C(t)_1^*, C(t)_2^*, \dots, C(t)_n^*$ 为各次调息后优化的成本-公差模型; x_1, x_2, \dots, x_n 为 1996 年至要求年份之间每次调息时的年份; i_1 为 1996 年至 x_1 年间调息前的年利率; i_2 为 x_2 年至 x_1 年间调息前的年利率; i_n 为 x_n 年至 x_{n-1} 年间调息前的年利率; i_1, i_2, \dots, i_n 和 x_1, x_2, \dots, x_n 均可通过中国人民银行各次调息的历史数据得到.

2.2 按当期银行利率计算

由于每次调息的年利率变化不大,如果不考虑过去时间段银行利率变化情况对模型的影响,在确定利率时可采用当期利率,则模型简化为

$$C(t)^* = C(t)(1 + i)^{(n - 1996)} \quad (10)$$

式中: i 为要求年份当期银行年利率; n 为要求的年份,如 2010 年; $C(t), C(t)^*$ 分别为原来的成本-公差模型和修正后的成本-公差模型.

由于采用精确计算模型比较繁琐,实际中可以近似用当期银行利率模型进行简化计算.

3 实例

一齿轮组件如图 1 所示,轴是固定的,齿轮在轴上回转,齿轮端面与挡环之间要求有间隙 Y_0 (0.10 ~ 0.35 mm). 已知各组成环基本尺寸分别为 $X_1 = X_5 = 5 \text{ mm}, X_2 = 30 \text{ mm}, X_3 = 43 \text{ mm}$,有关零件的轴向加工顺序见图 2.

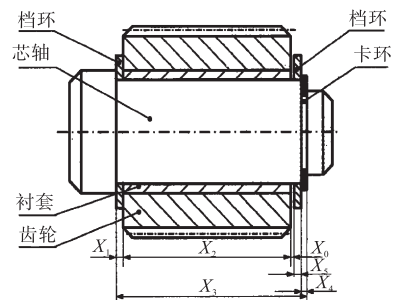


图 1 齿轮组件

Fig.1 Gear subassembly

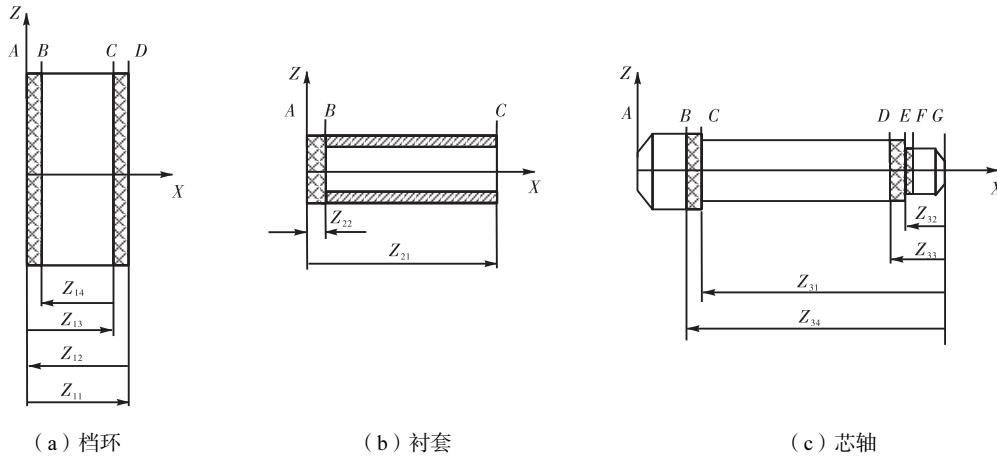


图 2 零件的轴向加工规划

Fig.2 Processing procedure of parts along axial direction

在该轴向装配尺寸链中, 弹簧卡环属于标准件, 其公差为 $t = 50 \mu\text{m}$, 其他与组成环设计尺寸有关的档环、齿轮衬套和经简化后的轴向尺寸加工均为端面加

工. 经分析, 档环采用磨削加工方法, 齿轮衬套和轴均采用车削加工方法. 表 1 给出了零件的轴向加工规划、零件加工经济公差范围.

表 1 相关零件的轴向加工工艺规划

Tab.1 Processing procedure of relevant parts along axial direction

加工工件	加工序号	加工名称	测量基准	被加工面	工序尺寸	工序公差	公差/ μm
档 环	11	粗磨右面	A	D	Z_{11}	t_{11}	36 ~ 90
	12	粗磨左面	D	A	Z_{12}	t_{12}	36 ~ 90
	13	精磨右面	A	C	Z_{13}	t_{13}	22 ~ 58
	14	精磨左面	C	B	Z_{14}	t_{14}	18 ~ 48
衬 套	21	截断	C	A	Z_{21}	t_{21}	62 ~ 160
	22	精车左面	A	B	Z_{22}	t_{22}	14 ~ 40
芯 轴	31	粗车台阶	G	C	Z_{31}	t_{31}	62 ~ 160
	32	粗车台阶	G	E	Z_{32}	t_{32}	36 ~ 90
	33	精车台阶	G	D	Z_{33}	t_{33}	27 ~ 70
	34	精车台阶	G	B	Z_{34}	t_{34}	46 ~ 120

为了保证产品制造成本和质量损失成本最小, 要求分配零件最优工序公差^[9]. 并假设当装配尺寸 Y_0 偏离其目标值 $w^{(1)} = [w_1^{(1)}, 0]^T = [0.125, 0]^T$, 将导致产品失效并造成 150 元的质量损失. 这两个功能要求的目标值分别为 $Y_0 = 0.225 \pm 0.125 \text{ mm}$.

假设加工尺寸服从正态分布, 分布中心和工序尺寸的名义值重合. 不难求出装配功能函数方程为

$$Y_0 = X_3 - X_1 - X_2 - X_5 - X_4 \quad (11)$$

将每个装配尺寸的方差表示为其组成环零件, 设计尺寸的方差为

$$\text{var}(w_{Y_1}) = \sigma_{X_3}^2 + \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2 + \sigma_{X_5}^2 + \sigma_{X_4}^2 \quad (12)$$

对于标准零件卡环 4, 它的尺寸 X_4 和公差 t_4 是事先给定的, 与标准件相关的质量损失被忽略. 所以装配尺寸参数的变动的方差为

$$\text{var}(w_{Y_1}) = \sigma_{X_3}^2 + \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2 + \sigma_{X_5}^2 \quad (13)$$

产品期望外部损失^[10]为

$$L_{\text{整体}}(w_{Y_1}) = \text{Trace}[KV(w_{Y_1})] = (\sigma_{X_3}^2 + \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2 + \sigma_{X_5}^2) K_{11} \quad (14)$$

其中

$$K_{11} = A_1 / (w_1^{(1)})^2 = 150 / 0.125^2 = 9600 \quad (15)$$

加工方程为

$$X_1 = X_5 = Z_{14}$$

$$X_2 = Z_{21} - Z_{22}$$

$$X_3 = Z_{34} - Z_{33}$$

$$\sigma_{X_1} = \sigma_{X_5} = \frac{t_{14}^2}{36} \quad (16)$$

$$\sigma_{X_2} = \frac{t_{21}^2 + t_{22}^2}{36} \quad (17)$$

$$\sigma_{X_3} = \frac{t_{34}^2 + t_{33}^2}{36} \quad (18)$$

$$L_{\text{整体}}(W_{Y_i}) = \frac{1}{36} [K_{11}(t_{14}^2 + t_{14}^2 + t_{21}^2 + t_{22}^2 + t_{34}^2 + t_{33}^2)] = 266.67(2t_{14}^2 + t_{21}^2 + t_{22}^2 + t_{34}^2 + t_{33}^2)$$

在本例子中, 仅需考虑和装配尺寸有关的工序尺寸的制造成本, 其他工序可以采用最经济的加工公差, 而且这些工序公差和产品的质量损失无关. 对于标准件(卡环 4), 它的成本认为是一个不变的常量, 不记入公差优化设计的总成本, 则模型公差优化综合模型表示为

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{P_i} C_{ih}(t_{ih}) + L_{\text{整体}}(w_{Y_i}) \quad (19)$$

式中需要考虑的这部分制造成本和产品期望外部损失的总和为

$$c = 2c_{14} + c_{21} + c_{22} + c_{33} + c_{34} + 266.67(2t_{14}^2 + t_{21}^2 + t_{22}^2 + t_{34}^2 + t_{33}^2)$$

$$c_{ih}(t_{ih})^* = (5.0261 e^{-15.8903 t_{ih}} + \frac{t_{ih}}{0.3927 t_{ih} + 0.1176})(1+i)^{(2010-1996)} \quad (20)$$

式中, i 为计算时中国人民银行的存款年利率. 中国人民银行决定, 自 2010 年 3 月 15 日起上调金融机构人民币存贷款基准利率, 金融机构一年期存款基准利率上调 0.27 个百分点, 由现行的 2.25% 提高到 2.52%, 所以取 $i = 2.52\%$. 根据已知条件可以计算出装配尺寸 Y_0 的公差上限为 $t_{Y_0}^+ = 0.35 - 0.1 = 0.25$, 得到下式:

$$0 = t_{Y_0}^- \leq t_{33} + t_{34} + t_{14} + t_{21} + t_{22} + t_{14} + t_4 \leq t_{Y_0}^+ = 0.25$$

式中, $t_{Y_0}^-$ 和 $t_{Y_0}^+$ 分别为装配尺寸 Y_0 的公差下限和上限, 对于标准件(卡环 4), 给定公差为 $t_4 = 50 \mu\text{m}$, 方程变为

$$0 \leq 2t_{14} + t_{14} + t_{21} + t_{22} + t_{33} + t_{34} \leq 0.2$$

每道加工 t_{ih} 的经济公差范围约束见表 1. 运用 Matlab 优化工具箱进行优化, 优化结果见表 2 第一行. 为验证所提方法的有效性, 利用改进后的成本-公差模型的计算结果见表 2 第二行.

由表 2 可以看出, 利用改进后的成本-公差模型, 在公差总和不变的情况下, 总成本有较大的上升, 更贴近现实成本.

表 2 考虑质量损失时两种方法的优化结果

Tab.2 Optimal results under two methods with quality loss

方法	总成本/		公差/ μm					
	元		t_{14}	t_{21}	t_{22}	t_{33}	t_{34}	总和
$C(t) + L_{\text{整体}}$	21.74		22.5	62.0	19.9	27.0	46.0	177.4
$C(t)^* + L_{\text{整体}}$	29.90		22.7	62.0	19.7	27.0	46.0	177.4

4 结 语

本文从资金的时间价值角度提出了一种改进的成本-公差模型, 并将制造成本和质量损失成本同时用于并行公差设计的数学模型中. 实例证明, 改进的成本-公差模型更贴近现实, 计算出的总成本更合理, 有效反映了资金的时间价值、物价上涨等现实因素.

参考文献:

- [1] 付颖斌, 江平宇, 刘道玉. 多工序尺寸及公差优化[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 142-146.
- [2] 匡兵, 黄美发, 钟艳如. 尺寸公差与形位公差混合优化分配[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(2): 398-402.
- [3] 杨将新, 吴昭同. 机械加工成本-公差建模技术的研究[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 1996, 30(5): 517-522.
- [4] Huang Meifa, Zhong Yanru. Dimensional and geometrical tolerance balancing in concurrent design[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(7/8): 723-735.
- [5] 陈冰冰, 方红芳, 宋明瑜. 公差分析技术的综述[J]. 中国纺织大学学报, 2000, 26(1): 116-119.
- [6] 蒋庄德. 机械精度设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 155-161.
- [7] 方红芳, 吴昭同. 一种设计和工序公差计算机辅助并行设计方法的研究[J]. 中国机械工程, 1996, 6(6): 25-27.
- [8] 杨将新. 基于装配成功率的公差设计系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1996: 42-50.
- [9] 张晶, 黄美发, 钟艳如, 等. 基于加工因素和信噪比质量损失的并行公差设计[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(z2): 195-198.
- [10] Lee C L, Tang G R. Tolerance design for products with correlated characteristics[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(12): 1675-1687.