

机械精度的模糊可靠性分析

陈胜军¹, 贾 方²

(1 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

2 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 210096)

[摘要] 将可靠性的基本原理与机械精度相结合, 定义了机械精度模糊可靠性的基本概念. 建立了基于模糊数的机械精度模糊可靠性的基本模型. 实例分析表明: 机械精度模糊可靠性设计方法比普通可靠性设计方法具有更大的灵活性和实用性, 为最佳加工工艺方案的选择提供了理论依据.

[关键词] 精度可靠性, 模糊可靠性, 模型

[中图分类号] O 213.2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009) 01-0008-04

Fuzzy Reliability Analysis of Mechanical Precision

Chen Shengjun¹, Jia Fang²

(1 School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

2 School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Basic principle of reliability is combined with mechanical precision to define the basic concepts of mechanical precision fuzzy reliability. The basic models of mechanical precision fuzzy reliability which are based on fuzzy number are established. The specimen analysis shows that the mechanical precision fuzzy reliability design method has more activeness and practicability compared with ordinary reliability design methods. Theory bases for choosing best technology scheme are given.

Key words precision reliability; Fuzzy reliability; model

机械产品从设计到最终投入使用, 中间要经过许多环节. 其中每个环节的质量都对产品的最终性能产生一定的影响. 就产品的精度而言, 影响其最终使用精度的主要环节有加工、测量、装配等, 其中影响精度的最根本因素是加工环节. 反过来, 产品精度的高低对上述诸环节也提出不同的要求, 不同使用精度的产品对加工条件、测量条件、装配条件的要求也是不同的. 现有的精度设计主要是按照给定的技术要求, 采取适当的工艺手段, 使得加工后的产品在尺寸精度、形状精度、位置精度及表面粗糙度等方面满足设计要求. 由于在既定的诸条件下, 产品的精度是否满足要求, 受到许多不确定性因素的影响^[1-4], 而各种精度都有一个误差范围, 由此带来的问题是: 相同条件下加工出来的同一批产品, 虽然都合格, 但它们的实际精度可能完全不同. 因此, 同一批产品在多大程度上能够满足设计要求就是一个值得研究的问题. 考虑到诸多不确定性因素的影响, 应该研究产品的实际精度满足设计要求的可靠程度, 即精度的可靠性问题. 有关精度可靠性问题的研究并不多见^[1], 而把模糊理论应用到机械精度设计中去, 开展基于模糊数的机械精度可靠性研究更不多见. 本文介绍的方法主要体现在可以定量地揭示机械产品在加工精度、加工难度、加工成本之间的变化趋势, 为最佳方案的选择和实施提供依据.

1 机械精度普通可靠性模型

1.1 精度可靠性

精度可靠性, 就是指产品在规定的加工、测量和装配条件下, 其实际精度满足设计要求的能力, 就称为

收稿日期: 2007-04-18
基金项目: 江苏省自然科学基金 (7702002108) 资助项目.
通讯联系人: 陈胜军, 博士, 副教授, 研究方向: 机械可靠性. E-mail: shengjun.chen@163.com

产品精度的可靠性.

1.2 精度可靠度

精度可靠度,就是指产品在规定的加工、测量和装配条件下,其实际精度满足设计要求的概率,就称为产品精度的可靠性.

设产品的实际精度用 b 表示,其设计精度为 $[b]$. 考虑到上述诸环节的随机因素,其实际精度满足 $[b]$ 的要求为一随机事件 A ,则产品精度的普通可靠度模型为:

$$R = P(A) = P(b < [b]). \quad (1)$$

产品的实际精度不能满足设计要求称为失效,记为 A ,则其失效概率为: $F = P(A) = P(b \geq [b])$.

1.3 精度模糊可靠性的概念

精度模糊可靠性,就是指在精度可靠性的设计计算中,若考虑设计、制造等过程的模糊不确定性及设计精度准则的模糊性,就称为精度的模糊可靠性问题.此时,就应该进行精度的模糊可靠性设计.下面对机械制造中加工精度的模糊可靠性问题加以详细讨论.

2 机械精度模糊可靠性模型

精度的高低具体体现为误差的大小.因此,如果实际误差被控制在允许的范围,就是达到了设计精度要求.考虑到加工、测量、装配等过程中诸多不确定因素的影响,包容件^[6](以下简称孔)和被包容件^[6](以下简称轴)的几何参数尺寸以及由此所定义的各种偏差、间隙、过盈量均具有模糊性,应该用模糊数^[8,9]来表示;同样,对几何参数尺寸的约束也应该用模糊数来表示.

2.1 有关模糊数的定义

(1) 尺寸误差的模糊数定义

$$\text{孔的极限尺寸模糊数: } D = [D_{\min}, D_{\max}]. \quad (2)$$

$$\text{孔的极限偏差模糊数: } E = [E_l, E_s]. \text{ 式中, } E_l = D_{\min} - D, E_s = D_{\max} - D. \quad (3)$$

$$\text{孔的公差: } T_D = |ES - EI| = |D_{\max} - D_{\min}|. \quad (4)$$

$$\text{轴的极限尺寸模糊数: } d = [d_{\min}, d_{\max}]. \quad (5)$$

$$\text{轴的极限偏差模糊数: } e = [e_l, e_s], \text{ 式中, } e_l = d_{\min} - d, e_s = d_{\max} - d. \quad (6)$$

$$\text{轴的公差: } T_d = |d_{\max} - d_{\min}| = |e_s - e_l|. \quad (7)$$

允许尺寸配合精度模糊数记为: $[b] = [b_l, b_2]$. 式中, D, d 分别为孔、轴的公称尺寸(基本尺寸); $E_l, E_s (e_l, e_s)$ 分别为孔(轴)的下极限偏差和上极限偏差.

(2) 形位公差的模糊数定义

形位公差带模糊数为: $[t] = [t_l, t_2]$. 式中, $[t]$ 表示宽度或直径的允许公差带; t_l 为其下限, t_2 为其上限.

(3) 表面粗糙度的模糊数定义

表面粗糙度模糊数为: $[r] = [r_l, r_2]$. 式中, r_l, r_2 分别为允许值的下限和上限.

2.2 精度模糊可靠性的基本模型

根据上述有关模糊数的定义,下面分别给出尺寸精度、形位精度和表面粗糙度的模糊可靠性模型.

$$(1) \text{ 尺寸精度的模糊可靠性模型: } R_b = P(b < [b]). \quad (8)$$

$F_b = P(b \geq [b]) = 1 - R_b$, 式中, R_b, F_b 分别表示尺寸精度的模糊可靠度和模糊失效概率,以下公式符号意义类推.

$$(2) \text{ 形位精度的模糊可靠性模型: } R_t = P(t < [t]), \quad (9)$$

$$F_t = P(t \geq [t]) = 1 - R_t$$

$$(3) \text{ 表面粗糙度的模糊可靠性模型: } R_r = P(r < [r]), \quad (10)$$

$$F_r = P(r \geq [r]) = 1 - R_r$$

3 实例分析

某一孔、轴配合其基本尺寸为 $\phi 45\text{mm}$, 设计要求具有 $+0.009 \sim 0.050\text{mm}$ 的间隙.

(1) 确定公差等级并选用适当的配合; (2) 进行普通可靠性分析; (3) 进行模糊可靠性分析.

解 本题数据引自文献 [6].

(1) 由文献 [6] 可知: 孔的公差等级为 7 级, 轴的公差等级为 6 级; 所选配合为 $\phi 45H7/g6$

(2) 普通可靠性分析

根据孔和轴的配合 $\phi 45H7/g6$ 可得: 最小间隙 $C_{min} = +0.009\text{mm}$, $C_{max} = +0.05\text{mm}$; 孔和轴的尺寸均值分别为: $u_D = 45.0125\text{mm}$, $u_d = 44.983\text{mm}$; 孔和轴的尺寸公差分别为: $T_D = 0.025\text{mm}$, $T_d = 0.016\text{mm}$. 令孔和轴的直径间隙为 $C = D - d$, 则 C 的均值为 $u_C = u_D - u_d = 0.0295\text{mm}$, 且 C 也服从正态分布.

假设孔和轴的尺寸均服从正态分布, 若知道孔和轴的尺寸标准差, 就可以进行可靠性计算. 而标准差与工艺系统的工艺能力有密切的关系, 由文献 [7] 可知: $C_p = T/6s$ 其中, C_p 为工艺能力系数; T 为公差; s 为标准差. 工艺能力系数一般分 3 个等级:

一级工艺能力: 当 $C_p > 1.33$ 时, 表示工艺系统的加工精度足够保证工件的公差要求;

二级工艺能力: 当 $1.00 < C_p < 1.33$ 时, 表示工艺系统的加工精度能够满足公差要求, 当 C_p 接近 1 时, 要特别注意.

三级工艺能力: 当 $C_p < 1.00$ 时, 表示工艺系统的加工精度较差, 废品在所难免.

在进行普通可靠性分析时, 不考虑工艺系统的模糊不确定因素, 取一个确定的工艺能力系数, 求出相应的标准差, 利用有关公式计算出相应的可靠度. 对于本例, 许用精度 $[C] = [C_{min}, C_{max}]$, 取 C_p 分别为 1.4(一级)、1.2(二级)、1.0(三级) 时, 利用本文公式 (1) 可分别求得相应的可靠度如表 1 所示.

计算说明: 由 $C_p = T/6s$ 可得 $s = T/6C_p$; 根据所取的 C_p 值和已知的 T_D 和 T_d 值可以求出 s_D 和 s_d ; 再由精度标准差公式 $s_c = (s_D^2 + s_d^2)^{1/2}$ 求出间隙 C 的标准差 s_c ; 由于 C 服从正态分布, 因此 C 的概率密度函数为 $f(c) = \frac{1}{s_c \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(c - u_c)^2}{2s_c^2}\right]$; 式中小 c 是 C 的具体取值; 将本文公式 (1) 应用到本例可以得到精度

可靠度 R_c 的具体计算公式为: $R_c = \int_{C_{min}}^{C_{max}} f(c) \cdot dc$.

由表 1 计算结果可知: 工艺能力越强, 满足精度要求的概率就越大, 即废品率越低; 反之, 工艺能力越弱, 精度可靠度就越低, 即废品率越高.

(3) 模糊可靠性分析

对于多数工艺系统, 其工艺能力系数一般很难用一个确定的数值来表征, 随着时间的推移, 一个工艺系统的工艺能力也是变化的. 此时, 工艺能力系数用模糊集合表示可能更为合适.

对于本例, 若已知^[5]: $C_p = \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} \lambda [1.2 + 0.4(\lambda - 1), 1.2 + 0.4(1 - \lambda)]$, 则在不同 λ 水平下的精度可靠度如表 2 所示. 式中 λ 符号代表阈值^[2, 3].

模糊可靠度计算的基本思路为: 由 C_p 公式求出在不同 λ 值下的 C_{p1} 和 C_{p2} 值, 此时已经把模糊可靠性问题转化为普通可靠性问题, 然后再按照普通可靠性问题的求解步骤求出分别与 C_{p1} 和 C_{p2} 对应的 R_1 和 R_2 的数值. 值得注意的是, 间隙 C 仍服从正态分布, 且许用精度仍为 $[C] = [C_{min}, C_{max}]$.

表 2 结果分析:

a 随着 λ 的增加, 工艺能力系数 C_p 的下限及其对应的可靠度 R 的下限均在增加, 而 C_p 和 R 的上限变化趋势正好与其下限的变化趋势相反; 同时表明, λ 水平越高, C_p 和 R 的波动范围越小, 亦即 C_p 越稳定, 加工质量及其可靠性也越稳定.

b 当 C_p 取值为 1.0 ($\lambda = 0.5$)、1.2 ($\lambda = 1$)、1.4 ($\lambda = 0.5$) 时, 所对应的模糊可靠度与普通可靠度数值相同.

表 1 普通可靠度计算

Table 1 Calculation for ordinary reliability			
C_p	1.40	1.20	1.00
s_c	3.53×10^{-3}	4.12×10^{-3}	4.95×10^{-3}
R_c	1.0	0.999 999	0.999 983

表 2 模糊可靠度计算

Table 2 Calculation for fuzzy reliability				
λ	C_{p1}	C_{p2}	R_1	R_2
0	0.80	1.60	0.999 543	1
0.10	0.84	1.56	0.999 748	1
0.20	0.88	0.52	0.999 866	1
0.30	0.92	1.48	0.999 932	1
0.40	0.96	1.44	0.999 965	1
0.45	0.98	1.42	0.999 976	1
0.50	1.00	1.40	0.999 983	1
0.60	1.04	1.36	0.999 992	1
0.70	1.08	1.32	0.999 997	1
0.80	1.12	1.28	0.999 998	1
0.90	1.16	1.24	0.999 999	1
1.00	1.20	1.20	0.999 999 4	0.999 999 4

由此说明:普通可靠性只是模糊可靠性在 λ 取特定值的特例,模糊可靠性是普通可靠的推广.

c 当 C_p 取值超过一定数值时,加工系统的加工质量及可靠性将保持在一个相当高的水平.此时,若用提高 C_p 的方法来提 高 R 将是不经济的.对于同一问题,适当降低加工精度,例如,将孔的公差由 0.025 扩大为 0.035 将轴的公差由 0.016 扩大为 0.025,工艺能力系数模糊集合同前.在保证配合性质不变的情况下,分别取 λ 为 0.5 和 1.0 其相应的可靠度分析结果如表 3 所示.表中的 R_1 和 R_2 分别是与 C_{p1} 和 C_{p2} 对应的可靠度数值.

表 3 不同工艺能力下的可靠度计算

Table 3 Calculation for reliability in different technology ability

λ	C_{p1}	C_{p2}	R_1	R_2
0.5	1.00	1.40	0.995911 2	0.999936 8
1	1.20	1.20	0.999396 5	0.999396 5

由表 3 可知:公差扩大后,在相同的 λ 水平和相同的工艺能力系数 C_p 下,可靠性均有所下降,若可靠性的下降不超过可接受的程度,则是可行的.其好处是降低了加工难度和加工成本.

4 结 语

- (1) 机械精度模糊可靠性设计方法比普通可靠性设计方法具有更大的灵活性和实用性,它为人们选取最佳加工方案提供了理论依据.其关键是确定合适的工艺能力系数模糊集合,这需要实践经验的不断积累和总结.
- (2) 在实际问题中,可根据本例计算结果所揭示的变化趋势,根据具体情况在可靠性要求、加工精度、加工难度和加工成本及加工工艺能力之间加以权衡,选取最佳的加工方案.

[参考文献] (References)

[1] Burgazzi Luciano Reliability prediction of passive systems based on probability distributions[J]. NuclearTechnology, 2008 161(1): 1-7

[2] Pucha R V. Design-for-reliability tools for highly integrated system-on package technology[C] // International Conference on Thermal Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems 2007: 242-253

[3] Kosko B. NeuralNetwork and Fuzzy Systems[M]. New York: PrenticeHallPress, 1992: 32-42

[4] 陈胜军. 基于隶属函数的疲劳寿命预测模型[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2007, 7(2): 6-9.
Chen Shengjun Fatigue lifetime prediction models based on membership function[J]. Journal of Nanjing Normal University Engineering and Technology Edition, 2007, 7(2): 6-9. (in Chinese)

[5] 陈胜军. 模糊随机可靠性广义理论与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 1998: 34-56
Chen Shengjun Research on fuzzy-random reliability broad theory and application[D]. Nanjing Southeast University, 1998 34-56 (in Chinese)

[6] 陈宏杰. 公差与测量技术基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 1991: 32-64
Chen Hongjie Technology Foundation of Business Trip and Measure[M]. Beijing Science and Technology Press, 1991 32-64

[7] 郑志达. 仪器制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 95-113
Zheng Zhida Instrument Manufacture Technology[M]. Beijing Mechanical Industry Press, 1994: 95-113 (in Chinese)

[8] 王立新, 王迎军. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 36-48
Wang Lixin Wang Yingjun A Course in Fuzzy Systems and Control[M]. Beijing Tsinghua University Press, 2003: 36-48 (in Chinese)

[9] 姜长元, 朱庆保. 基于 T-S 逻辑的新型模糊神经网络模型[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2006 6(3): 51-55.
Jiang Changyuan, Zhu Qingbao A new fuzzy neural network model based on T-S Logic[J]. Journal of Nanjing Normal University Engineering and Technology Edition, 2006, 6(3): 51-55. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]