

DOI: 10.7652/xjtuxb201407010

蒙特卡罗与响应面法相结合的圆柱度公差模型求解

吕程, 艾彦迪, 余治民

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 410082, 长沙)

摘要: 针对现有公差建模及模型求解方法实用性不强的问题,提出了基于小位移旋量理论的圆柱度公差建模方法,以及一种蒙特卡罗模拟与响应面方法相结合的圆柱度公差模型求解方法。首先,依据小位移旋量理论对公差进行数学表示,结合公差的数学定义建立圆柱面尺寸公差与圆柱度公差综合作用的公差变动不等式及约束关系,采用蒙特卡罗方法分别对不同的旋量参数变动顺序进行仿真试验,获得公差变动要素的实际变动区间;然后,采用响应面方法,以圆柱度公差及试验获得的公差变动要素实际变动区间带宽值为样本,建立两者之间的响应面模型,并通过复相关系数法验证响应面模型的精度;最后,通过对典型工程实例的分析,验证了该方法具有较高的建模精度,可提高机床精度设计方法的实用性,降低机床的生产成本。

关键词: 数控机床;圆柱度公差;小位移旋量法;约束不等式;蒙特卡罗模拟;响应面法

中图分类号: TH115 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0053-07

Cylindricity Tolerance Model Solution Combining Monte Carlo Simulation with Response Surface Method

LÜ Cheng, AI Yandi, YU Zhimin

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the poor practicability of existing tolerance modeling and model solution method, a new cylindricity tolerance modeling method based on small displacement screw theory is proposed, and a cylindricity tolerance model solution method based on Monte Carlo Simulation (MCS) and response surface method is presented. Firstly, the tolerance is mathematically described by small displacement screw theory, and the tolerance change inequality and constraint relationship under the comprehensive effect of cylindroid dimension tolerance and cylindricity tolerance are established using the mathematic definition of tolerance. Then, the simulation test with MCS method is conducted on the changing orders of different screw parameters to get the actual variation range of the tolerance changing factor. With the samples based on the cylindricity tolerance and the bandwidth of actual variation range obtained above, the response surface model of the relation between the tolerance and bandwidth is constructed by response surface method. Finally, a typical example is analyzed, and the result indicates that the proposed method has high modeling accuracy, can improve the practicability of machine tool precision design method, and can reduce the production cost of machine tools.

Keywords: numerically-controlled machine tool; cylindricity tolerance; small displacement screw method; constraint inequality; Monte Carlo simulation; response surface method

收稿日期: 2013-12-13。 作者简介: 吕程(1988—),女,博士生;艾彦迪(通信作者),男,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305132,51175161)。

网络出版时间: 2014-04-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140415.1152.002.html>

数控机床可用于完成多种复杂几何形状的高精度加工,应用非常普遍^[1]。随着数控机床向高速、高精度方向不断发展,机床精度性能的设计与提高变得日益重要,对建立严格定义的公差模型与合理的模型求解方法的要求也越来越迫切。公差设计是影响机床精度的重要因素。公差建模的关键是对满足公差设计的公差变动要素做出正确的解释^[2],即公差变动要素在公差域中的变动规律及公差变动要素与公差设计之间的关系。国内外学者在公差建模领域展开了大量的研究,并取得了一定的进展。文献[3-5]从 ANSI Y14.5M 出发,研究了尺寸公差、形状公差、定向公差和定位公差的数学模型,并完整阐述了尺寸公差的语义;文献[6]给出了三维公差累积运动学模型的一般表达式,研究了此模型在公差优化设计中的应用;文献[7]运用基于数学定义的公差建模方法,用变动不等式和约束不等式严谨地描述了公差变动要素与公差间的关系,建立了不同类型公差的数学模型。但是,上述研究方法都没有考虑约束条件以及公差变动要素变动顺序不确定对实际公差变动要素的影响,也没有深入研究公差变动要素实际变动区间与公差间的具体函数关系,因而无法直接用于指导精度设计。

本文在深入研究基于数学定义的公差分析方法的基础上,考虑公差原则及约束条件等因素对公差变动要素的影响,提出了一种基于蒙特卡罗模拟与响应面方法的圆柱度公差建模方法,建立了圆柱度公差变动要素实际变动区间带宽与公差间的响应面模型,对圆柱度公差的语义做出了完整、准确的解释,保证了圆柱度公差语义的唯一性。该方法对其他类型的公差建模同样具有参考价值。

1 公差的小位移旋量数学表示

公差的数学表示是进行公差分析的基础。小位移旋量(small displacement torsors, SDT)是带有 6 个运动分量的刚体产生微小位移所构成的矢量^[8]。构成物体表面的点、线、面等要素的变动亦可以用 3 个沿坐标轴方向的平动矢量和 3 个绕坐标轴的转动矢量来表示,即用 $\mathbf{d}=(u,v,w)$ 和 $\boldsymbol{\theta}=(\alpha,\beta,\delta)$ 分别表示平动与转动的微小变动矢量,其合成矢量

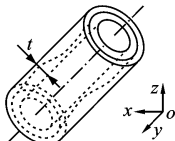
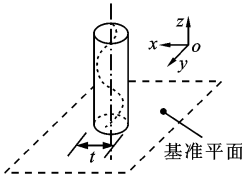
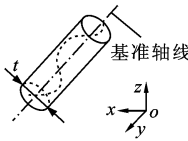
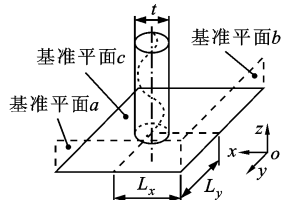
$$\mathbf{D}=(\boldsymbol{\theta},\mathbf{d})=(\alpha,\beta,\delta,u,v,w)$$

即称为小位移旋量(以下简称 SDT), $\alpha,\beta,\delta,u,v,w$ 为旋量参数。Bourdet 在 1996 年将 SDT 首次引入到公差领域,并提出了基于 SDT 的公差数学表示方法^[9],即用旋量参数来描述公差实际表面在公差域

中脱离名义表面的变动。

由于不同公差类型的公差域具有不同的形态,故其 SDT 的具体参数形式亦不同,SDT 中部分参数在某些情况下将取 0。SDT 中旋量参数取 0 的情况如下:当几何要素在公差域中沿某一个矢量方向运动(平动或转动)时,其运动轨迹不产生异于该几何要素形状的新扫掠实体,则对应的矢量参数取 0。表 1 列出了几种形位公差对应的常见公差域和 SDT(SDT 中为 0 的参数根据公差域与坐标系的具体位置方向而定)。

表 1 几种常见形位公差及其对应的公差域和 SDT

公差类型	公差	SDT
圆柱度		$(\alpha, 0, \delta, u, 0, w)$
垂直度		$(\alpha, \beta, 0, u, v, 0)$
同轴度		$(\alpha, 0, \delta, u, 0, w)$
位置度		$(\alpha, \beta, 0, u, v, 0)$

2 圆柱度公差建模

圆柱度公差是指实际圆柱面要素对其理想圆柱面的变动量,属于形状公差类型^[10]。圆柱度公差域是半径差为公差值 T_F 的两同轴圆柱面之间的区域,如图 1 所示。

矢量方程表达式为

$$||\mathbf{S}_d \times (\mathbf{S}_p - \mathbf{S}_o) | - R | \leqslant \frac{T_F}{2} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}_d$ 表示圆柱轴线方向的单位矢量; $\mathbf{S}_p$ 表示公差域内任意一点 p 的位置矢量; $\mathbf{S}_o$ 表示轴线中心点 o 的位置矢量; R 表示理想圆柱半径; T_F 为圆柱度

$\left(-\frac{l}{2}, R+\frac{T_{\text{SL}}}{2}\right)$, 将它们代入式(3)、式(4)得

$$R+\frac{T_{\text{SU}}}{2}=R+\omega_{\text{B}}+\frac{l}{2}\beta_{\text{B,max}} \quad (6)$$

$$R+\frac{T_{\text{SL}}}{2}=R+\omega_{\text{B}}+T_{\text{F}}-\frac{l}{2}\beta_{\text{B,max}} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可得

$$\beta_{\text{B,max}}=\frac{T_{\text{S}}+2T_{\text{F}}}{2l}$$

据此,可得到 $l_{\text{F,B}}$ 的旋量参数的理想变动区间如下

$$\left. \begin{aligned} -\frac{T_{\text{S}}+2T_{\text{F}}}{2l} \leq \beta_{\text{B}} \leq \frac{T_{\text{S}}+2T_{\text{F}}}{2l} \\ \frac{T_{\text{SL}}}{2}-T_{\text{F}} \leq \omega_{\text{B}} \leq \frac{T_{\text{SU}}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)称为圆柱度公差要素的变动不等式。

由独立原则可知,线 $l_{\text{F,B}}$ 上任意一点的 z 向坐标值都必须在区间 $\left(R+\frac{T_{\text{SL}}}{2}-T_{\text{F}}, R+\frac{T_{\text{SU}}}{2}\right)$ 内,代入式(3)得以下不等式

$$\frac{T_{\text{SL}}}{2}-T_{\text{F}} \leq \omega_{\text{B}}+x\beta_{\text{B}} \leq \frac{T_{\text{SU}}}{2} \quad (9)$$

式(9)称为圆柱度公差要素的约束不等式。显然,当 $x=-\frac{l}{2}$ 、 $x=\frac{l}{2}$ 时, z_{B} 取得极值。因为极值满足不等式,故直线上的所有点均会满足不等式。

$l_{\text{F,B}}$ 和 $l_{\text{F,T}}$ 只确定了 l_{F} 分布域的上、下边界,但是 l_{F} 在分布域中的具体分布情况仍不确定。为此,本文采用线性回归法拟合求解 l_{F} 的旋量参数(即圆柱度公差变动要素),基本思路为:已知 $l_{\text{F,B}}$ 和 $l_{\text{F,T}}$ 的方程,在 x 方向上的 $-\frac{l}{2} \sim \frac{l}{2}$ 区间内均匀设置 t 个取样点,通过随机模拟法对每个取样点在 $l_{\text{F,B}}$ 、 $l_{\text{F,T}}$ 范围内取 z 值,得到 t 个圆柱度公差域内的模拟点,再根据这些模拟点的值,采用线性回归算法拟合求解公差变动要素。具体表达式如下

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z})}{\sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x})^2}; \quad \omega = \bar{z} - \beta\bar{x}$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t x_i$; $\bar{z} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t z_i$ 。

经圆柱度公差分析,确定了圆柱度公差域边界的变动范围及公差变动要素的表示方法,但此时依然无法确定公差变动要素的实际变动区间。

3 蒙特卡罗模拟法求解公差变动要素的实际变动区间

蒙特卡罗模拟法也称为随机模拟方法,是一种

以概率统计理论为指导、通过对随机变量的统计实验和随机模拟来求解问题近似解的方法。它具有适应性强、计算方法简单、方便程序实现、求解误差与问题维数无关等优点^[11]。因多种因素综合作用的影响,公差的实际变动在公差域内具有随机性,因此,公差对应的 SDT 旋量参数也是随机量^[12]。

由第2节可知,变动不等式确定了圆柱度公差域边界 $l_{\text{F,B}}$ 、 $l_{\text{F,T}}$ 的理想变动区间。 $l_{\text{F,B}}$ 、 $l_{\text{F,T}}$ 的位置确定后,可通过线性回归方法求解圆柱度公差的变动要素。然而,由于约束不等式的存在,边界的旋量参数不可能同时取最大值,所以参数的实际变动区间会小于理想变动区间。由式(8)、式(9)可知,不同的边界旋量参数变动顺序会导致其变动区间最终的取值不同。如果按边界旋量参数的理想变动区间求解圆柱度公差变动要素的变动区间,将导致求解精度较低,并会提高零件加工精度要求,增加制造成本。

本文根据圆柱度公差的变动不等式和约束不等式,运用蒙特卡罗模拟法,按给定的公差域边界旋量参数分布类型和旋量参数变动顺序进行模拟抽样试验,生成相应的参数随机数用来模拟圆柱度公差域的变动情况,保留满足约束条件的随机数,剔除不满足约束条件的随机数,然后通过线性回归方法求解圆柱度公差变动要素,当产生足够多公差变动要素样本后,对样本进行分析,求出变动要素的变动区间带宽,再根据变动区间带宽和均值得到圆柱度公差变动要素的实际变动区间。具体求解步骤如下。

(1)根据研究对象的具体情况,确定旋量参数的理想概率分布模型。假定旋量参数的分布函数均为正态分布

$$\phi(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x = \beta_{\text{B}}, \omega_{\text{B}}$$

(2)根据式(8)确定各旋量参数理想分布的均值与方差。圆柱度公差域边界 $l_{\text{F,B}}$ 的 SDT 中非零的旋量参数为 β_{B} 、 ω_{B} , 由于正态分布曲线的有效分布范围为 6σ (变量位于区间 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 内的概率达 99.73%), 分布中心与变动区间中心重合, 由式(8)可知, 各旋量参数理想分布的均值 μ 与标准差 σ 为

$$\left(0, \frac{T_{\text{S}}+2T_{\text{F}}}{6l}\right)_{\beta_{\text{B}}} \text{ 和 } \left(\frac{T_{\text{SU}}+T_{\text{SL}}-2T_{\text{F}}}{2}, \frac{T_{\text{S}}+2T_{\text{F}}}{12}\right)_{\omega_{\text{B}}}$$

(3)根据抽样规则对旋量参数进行抽样。 $l_{\text{F,B}}$ 的 2 个非零旋量参数有 2 种变动顺序, 为了使模拟效果能尽量反映实际加工情况, 分别对 2 种变动顺序进行抽样。以变动顺序 $\beta_{\text{B}} \rightarrow \omega_{\text{B}}$ 为例, 其抽样流程如图 4 所示。

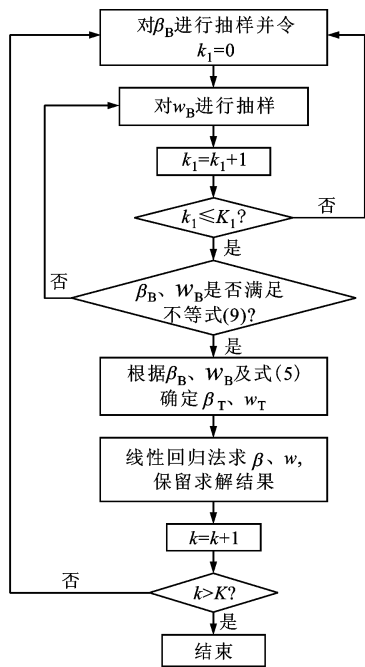


图 4 抽样流程

图 4 中: k 是用来记录满足条件的样本数量的参数,初始值为 0; K 为要求抽取的合格样本数,为保证模拟的精度,取 $K > 20\,000$; K_1 为常量,根据具体研究对象而定。设置判别式 $k_1 \leq K_1$ 的目的是为了防止前面的参数抽样值过大,导致后面的参数无论取何值都无法满足约束方程,进入死循环。

由式(8)、式(9)可知,公差变动要素实际变动区间的带宽只与公差值有关,而与上、下偏差的大小无关,因此在抽样的过程中令 $|T_{SL}| = |T_{SU}|$ 。分别按 2 种变动顺序编程进行抽样后,得到 $2K$ 组 β 、 w 值的样本。

(4)进行公差变动要素实际分布函数的假设检验。由于约束不等式(9)的限制,变动要素的实际分布类型并非完全与理想分布类型相同,所以需对实际分布类型进行假设检验。本文采用 χ^2 拟合检验法,以参数 β 为例,其基本思路为:在 β 分布未知时,先根据抽样获得的观测值对 β 的分布类型作出假设

$$H_0: F(\beta) = F_0(\beta)$$

式中: $F_0(\beta)$ 为 β 分布的假设函数。

将实数轴分为 m 个互不相交的区间 $(a_i, a_{i+1}]$ ($i=1, 2, \dots, m$), a_1, a_{m+1} 可分别取 $-\infty, +\infty$, 区间的划分视具体情况而定。在 H_0 假设下计算概率

$$p_i = F(a_{i+1}) - F(a_i) = P, \quad a_i < \beta \leq a_{i+1}$$

因 β 的样本容量为 $2K$, 故理论频数为 $2Kp_i$ 。计算样本观测值落入区间 $(a_i, a_{i+1}]$ 中的数量,即实际频数 f_i ($i=1, 2, \dots, m$)。

计算统计量

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(f_i - 2Kp_i)^2}{2Kp_i}$$

当样本容量 $2K \geq 50$ 时,统计量 χ^2 近似服从自由度为 $m-r-1$ 的 χ^2 分布(r 为 $F_0(\beta)$ 表达式中被估计参数的数量,若 $F_0(\beta)$ 为正态分布,则 $r=2$)。

取显著性水平 ϵ 为 0.05, 确定临界值 $\chi_{\epsilon}^2(m-r-1)$, 如果 $\chi^2 > \chi_{\epsilon}^2(m-r-1)$, 则假设 H_0 不成立;反之,则 H_0 成立。

(5)采用极大似然估计法估计实际分布函数的参数。若经步骤(4)验证 β 属于正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 则采用极大似然估计法估计 β 分布函数的参数,得到 μ 与 σ^2 的极大似然估计量为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^{2K} \beta_i; \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^{2K} (\beta_i - \bar{\beta})^2$$

式中: $\bar{\beta}$ 为 β 样本的均值。由于变动不等式与约束不等式均具有对称性,所以变动要素实际分布的均值近似等于理想分布的均值。

(6)求解变动要素的实际变动区间。根据参数的实际分布函数类型与均方差,查表得到参数的实际变动区间带宽

$$F^x = \frac{6\hat{\sigma}_x}{G}, \quad x = \beta, w$$

式中: G 为相对分布系数,正态分布时取 1。变动要素的实际变动区间为

$$-\frac{F^{\beta}}{2} \leq \beta \leq \frac{F^{\beta}}{2}$$

$$-\frac{F^w}{2} + \frac{T_{SU} - T_{SL}}{2} \leq w \leq \frac{F^w}{2} + \frac{T_{SU} - T_{SL}}{2}$$

4 公差变动要素实际变动区间与公差间的响应面函数

响应面方法(response surface method, RSM)是一种统计回归计算方法,是利用统计学的综合试验技术解决复杂系统输入与输出关系的方法^[13]。它依据试验设计原则选定设计空间中的试验点,用多组试验点及其对应的响应值拟合响应面曲面,从而构造具有明确表达形式的显示函数^[14-15]。

在进行圆柱度公差建模时,需综合考虑尺寸公差对圆柱度公差的约束作用。已知尺寸公差与圆柱度公差,可通过蒙特卡罗模拟法获得公差与变动要素实际变动区间带宽之间的响应值,但却无法获得两者之间明确的函数关系。因此,本文采用响应面方法,通过建立公差与变动要素实际变动区间带宽

之间的响应面模型,来确定公差与变动要素实际变动区间带宽之间的函数关系,为后续精度分析与精度分配的研究打下基础。建模的步骤如下。

(1)根据具体的研究对象确定尺寸公差 T_S 和圆柱度公差 T_F 的最大变动范围 $(T_S^{\min}, T_S^{\max})$ 、 $(T_F^{\min}, T_F^{\max})$ 。采用正交试验法,在 $(T_S^{\min}, T_S^{\max})$ 、 $(T_F^{\min}, T_F^{\max})$ 内分别等间隔取 n_S 、 n_F 个值,得到 $n(n=n_S n_F)$ 组 $(T_{S,i}, T_{F,i})(i=1,2,\dots,n)$ 的值,并以 $(T_{S,i}, T_{F,i})$ 作为研究对象的尺寸公差和形位公差,采用蒙特卡罗模拟法求解变动要素 β 、 w 的实际变动区间带宽 $F_{\beta,i}$ 、 $F_{w,i}(i=1,2,\dots,n)$ 。试验完成后,每个变动要素均得到 n 个实际变动区间带宽的响应值。

(2)以公差 T_S 、 T_F 为设计变量,变动要素实际变动区间带宽 $F_m(m=\beta, w)$ 为待求目标函数, $(T_{S,i}, T_{F,i}, F_{m,i})(i=1,2,\dots,n; m=\beta, w)$ 为建模样本,运用不含交叉项的二次型多项式构造 F_m 与 T_S 、 T_F 之间的响应面函数

$$F_m = c_0 + c_1 T_S + c_2 T_F + c_3 T_S^2 + c_4 T_F^2, \quad m = \beta, w$$

式中: $c_i(i=0,1,\dots,4)$ 为待求系数。

采用最小二乘法求解 $C = [c_0 \quad c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4]^T$ 的无偏估计

$$\hat{C} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

式中

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_{S,1} & T_{F,1} & T_{S,1}^2 & T_{F,1}^2 \\ 1 & T_{S,2} & T_{F,2} & T_{S,2}^2 & T_{F,2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{S,n} & T_{F,n} & T_{S,n}^2 & T_{F,n}^2 \end{bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} F_{m,1} \\ F_{m,2} \\ \vdots \\ F_{m,n} \end{bmatrix};$$

$\hat{C} = [\hat{c}_0 \quad \hat{c}_1 \quad \hat{c}_2 \quad \hat{c}_3 \quad \hat{c}_4]^T$ 为 C 的无偏估计量。

(3)响应面生成后,采用复相关系数 R^2 对响应面模型进行验证,其表达式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{F}_{m,i} - \bar{F}_m)}{\sum_{i=1}^n (F_{m,i} - \bar{F}_m)}, \quad m = \beta, w$$

式中: $\hat{F}_{m,i}$ 、 $F_{m,i}$ 分别表示第 i 个试验点对应的响应面预测值与试验计算值; $\bar{F}_m$ 为试验计算值的均值。复相关系数 R^2 代表了响应面预测值与真值之间的差异程度,在 $0 \sim 1$ 之间取值,值越大表示差异度越小,模型精度越高。

5 实例分析

如图3所示,设 $l=50$,且旋量参数的理想概率均服从正态分布, T_S 、 T_F 的最大变动范围分别为 $0.5 \sim 1$ mm 和 $0.05 \sim 0.5$ mm。在最大变动范围内

分别等间隔取 10 个值,即得到 100 组试验点 $(T_{S,i}, T_{F,i})(i=1,2,\dots,100)$ 。根据第3节所述求解变动要素实际变动区间带宽的步骤,基于 MATLAB 进行数学建模,编写计算程序,得到每个试验点对应的变动要素实际变动区间带宽值 $F_{m,i}(i=1,2,\dots,100; m=\beta, w)$ 。以残余误差作为理想变动区间带宽与实际变动区间带宽的差值,将这 2 种带宽进行对比分析,结果如图5、图6所示。

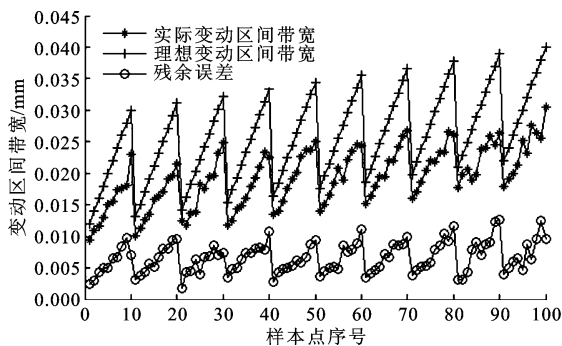


图5 β 的变动区间带宽

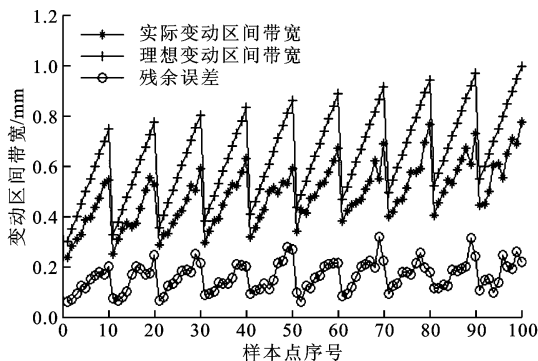


图6 w 的变动区间带宽

令残余误差下降比率 = 残余误差/理想变动区间带宽。下降比率的均值为 100 个试验点对应的下降比率的均值,用于反映将蒙特卡罗模拟法应用于公差建模时提高模型技术经济性的效果。

考虑约束条件及参数变动顺序的影响后,运用蒙特卡罗模拟法求解得到的变动要素 β 和 w 的实际变动区间带宽比理想变动区间带宽分别平均下降了 25.17% 和 24.51%,说明采用蒙特卡罗模拟方法后公差模型的技术经济性得到了显著的提高,可使公差设计更符合工程实际。

为了验证模型的精度,现以 100 组 $(T_{S,i}, T_{F,i}, F_{m,i})(i=1,2,\dots,100; m=\beta, w)$ 值为样本,分别建立变动要素实际变动区间带宽 $F_m(m=\beta, w)$ 与公差 T_S 、 T_F 间不含交叉项的二次型多项式响应面模型,具体表达式如下

$$F_{\beta} = 0.020\ 9T_S - 0.001\ 6 + 0.024\ 9T_F - \\ 0.002\ 8T_S^2 + 0.000\ 4T_F^2 \\ F_w = 0.080\ 7 + 0.21T_S + 0.56T_F + \\ 0.138T_S^2 + 0.161T_F^2$$

采用复相关系数 R^2 来验证响应面模型的精度,求得的 R^2 值均大于 0.985,表明本文建立的圆柱度公差响应面模型具有很高的精度。

6 结 论

本文结合蒙特卡罗模拟法求解随机问题的优势与响应面方法在模型处理方面的优点,提出了一种基于蒙特卡罗模拟与响应面方法的圆柱度公差模型求解方法。在深入研究尺寸公差域与形状公差域变动关系的基础上,考虑了实际生产中公差要素变动的随机性,基于蒙特卡罗模拟法求解了公差与公差变动要素变动区间之间的响应关系,再运用响应面法建立了两者之间的响应面数学模型。典型实例的分析结果表明,本文提出的方法可显著提高圆柱度公差模型的技术经济性。本文方法有望进一步应用于机床的精度设计,从而提高机床精度设计方法的实用性,降低机床的生产成本。

参考文献:

- [1] 栗时平,李圣怡,王贵林. 多轴数控机床的通用运动学综合空间误差模型 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4): 45-50.
- SU Shiping, LI Shengyi, WANG Guilin. A universal synthetic volumetric error model of multi-axis NC machine tool based on kinematics [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(4): 45-50.
- [2] 吴昭同,杨将新. 计算机辅助公差优化设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999: 8-23.
- [3] MUJEZINOVIC A, DAVIDSON J K, SHAH J J. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to polygonal faces [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 504-518.
- [4] GOU J B, CHU Y X, LI Z X. A geometric theory of form, profile, and orientation tolerances [J]. Precision Engineering, 1999, 23(2): 79-93.
- [5] ROY U, LI B. Representation and interpretation of geometric tolerances for polyhedral objects: I Form tolerances [J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(2):

151-161.

- [6] 胡杰,吴昭同,杨将新. 基于旋量参数的三维公差累积的运动学模型 [J]. 中国机械工程, 2003, 14(2): 127-130.
- HU Jie, WU Zhaotong, YANG Jiangxin. Kinematic model of 3D tolerance accumulation based on screw parameter [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(2): 127-130.
- [7] 刘玉生,吴昭同,杨将新,等. 基于数学定义的平面尺寸公差数学模型 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 12-17.
- LIU Yusheng, WU Zhaotong, YANG Jiangxin, et al. Mathematical model of size tolerance for plane based on mathematical definition [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(9): 12-17.
- [8] 吴兆强. 基于小位移旋量的公差模拟建模及公差分析 [J]. 机械设计与制造, 2010(1): 205-207.
- WU Zhaoqiang. Simulated tolerances modeling based on small displacement torsors and tolerances analysis [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(1): 205-207.
- [9] VIGNAT F, VILLENEUVE F. 3D transfer of tolerances using a SDT approach: application to turning process [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(3): 45-53.
- [10] SHAH J J, YAN Y, ZHANG B C. Dimension and tolerance modeling and transformations in feature based design and manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1998, 9(5): 475-488.
- [11] 董银月. 基于蒙特卡洛方法和改进 PSO 算法的装配公差优化设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [12] ZHONG Xin, YANG Ruqing, ZHOU Bing. Accuracy analysis of assembly success rate with Monte Carlo simulations [J]. Journal of Donghua University, 2003, 20(3): 128-131.
- [13] 贺新峰. 基于等效静态载荷和响应面法的搅拌车副车架疲劳设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [14] KIM S H, NA S W. Response surface method using vector projected sampling points [J]. Structural Safety, 1997, 19(1): 3-19.
- [15] KAYMAZ I, MCMAHON C A. A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 11-17.

(编辑 葛赵青)