

基于柔性装配偏差模型的 汽车车身薄板零件公差设计

于奎刚^{1,2}, 杨志宏^{1,2*}

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要:基于汽车车身柔性薄板零件装配建模方法,建立柔性薄板零件公差优化设计方法。根据柔性薄板零件测点装配偏差与各偏差源间的确定性模型,综合得到测点装配偏差的方差与零件制造方差和夹具定位方差之间的模型,以零件测点平均方差为公差设计函数,工序能力指数和零件制造方差比为约束函数进行零件公差优化设计,并采用车身地板装配进行应用分析。结果表明,搭接焊接结构的零件公差设计需同步进行,对接焊接结构零件公差设计各自独立进行,而角接焊接结构的零件公差设计则先进行其中对接零件公差设计,然后进行搭接零件公差设计;搭接焊接结构中零件间刚度差异比较大时,刚度小的零件公差可以取相对更大的公差。

关键词:柔性薄板;装配偏差;公差设计;公差函数;工序能力指数

中图分类号:TH162 文献标志码:A

Tolerance design of automotive body sheet metal parts based on a compliant assembly variation model

YU Kuigang^{1,2}, YANG Zhihong^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacturing (Shandong University),
Ministry of Education, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: An optimal tolerance design method of compliant sheet metal parts was proposed based on an assembly variation model of compliant sheet metal parts. The average variance model of all measurement points obtained from the determinate models of measurement points was adopted as the objective function of the tolerance design, and the process capacity index and the variance ratio of parts were the constraint functions. The rear floor assembly was used to validate the tolerance design method. The results showed that tolerance designs of parts were synchronously done in the lap welding structure, and independently done in the butt welding structure while in the corner welding structure the tolerance design of the butt part was firstly done and then that of the lap part was done. When there existed a very large rigidity difference between lap parts, the less rigidity part could adopt a bigger tolerance value.

Key words: compliant sheet metal; assembly variation; tolerance design; tolerance function; process capacity index

0 引言

零部件公差是汽车车身模具、检具、夹具制造的基础,公差设计不合理会增加模具、夹具的调整量,造成制造成本提高。车身公差设计技术是指依据车身产品功能、内饰及外覆盖件配合要求以及总体技术要求,考虑制造系统工艺能力和制造经济性,在车身设计阶段为零部件合理地设计公差。为保设计质量,国内外很多汽车公司设有尺寸管理部门,任务之一就是利用公差设计技术将装配精度目标按照车身装配层次逐级分配到各级零部件。在公差优化设计研究方面,主要存在以下几种公差设计方法:(1)面向成本最优的公差设计,是以制造成本最小进行的零件公差优化设计方法^[1-6]; (2)面向工序能力最大的公差设计,是以设计满足工序能力指标最大化的公差优化设计方法^[7-9]; (3)面向质量稳健性的公差设计,是考虑制造过程中各种变差影响,以装配质量稳健性为目标的公差优化设计方法^[10-16]; (4)面向质量最优的公差设计,是以装配质量公差最小为目标的公差设计方法^[17-19]。本研究在车身柔性薄板装配建模基础上,建立以零件综合装配质量为目标,零件制造过程能力为约束,并考虑到零件装配间偏差传递关系,实现零件公差的优化设计。

1 车身柔性薄板零件公差设计方法

1.1 车身柔性薄板零件公差设计方法

在零件装配夹具定位方案和测点方案基础上,可以利用柔性薄板零件装配偏差建模方法,建立各测点装配偏差 v_{M_i} 与各输入偏差之间的确定性关系为^[20-21]

$$v_{M_i} = v_{M_{i0}} + [\mathbf{S}_{BM_i}] \{ \mathbf{V}_B \} + [\mathbf{S}_{WM_i}] \{ \mathbf{V}_W \} + [\mathbf{S}_{fM_i}] \{ \mathbf{V}_f \}。 \quad (1)$$

式中 v_{M_i} 为测点 M_i 经过焊接装配后累积形成的装配偏差, $v_{M_{i0}}$ 为测点 M_i 初始制造偏差, $\{ \mathbf{V}_B \}$ 为装配零件所有过定位点初始制造偏差向量, $\{ \mathbf{V}_W \}$ 为装配零件所有焊点初始制造偏差向量, $\{ \mathbf{V}_f \}$ 为所有夹具定位偏差向量, $[\mathbf{S}_{BM_i}]$ 、 $[\mathbf{S}_{WM_i}]$ 、 $[\mathbf{S}_{fM_i}]$ 分别为该测点装配偏差对相应偏差源的敏感度矩阵。

在车身零件制造过程中,同一车身零件测点特征和焊点特征制造偏差具有相关性,而零件装配夹具定位偏差间具有相互独立性,因此在本研究公差设计中,假定同一零件测点和焊点具有相同初始制造偏差,为同一偏差参数,代表该零件的制造偏差,并且设定零件各过定位点制造偏差为小偏差,忽略不计。以2个零件搭接装配结构为例,将式(1)中测点和对应零件焊点初始制造偏差参数合并,得到2个零件测点的装配偏差模型为

$$\begin{cases} v_{M_1} = (1 + \sum_{i=1}^n s_{WM1_i})v_1 + v_2 \sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM1_i} + [\mathbf{S}_{fM1}] \{ \mathbf{V}_f \}, \\ v_{M_2} = v_1 \sum_{i=1}^n s_{WM2_i} + (1 + \sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM2_i})v_2 + [\mathbf{S}_{fM2}] \{ \mathbf{V}_f \}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_{M_1} 和 v_{M_2} 分别为零件1和零件2上的测点装配偏差, v_1 和 v_2 分别为零件1和零件2制造偏差参数, s_{WM1_i} 为零件1测点对各焊点偏差的敏感度,每个零件上有 n 个焊点, $\mathbf{S}_{WM1} = \{ s_{WM1_1} \quad s_{WM1_2} \quad \cdots \quad s_{WM1_{2n}} \}$, 前 n 个为零件1测点对零件1焊点偏差敏感度,后 n 个为零件1测点对零件2焊点偏差敏感度。

考虑各偏差为随机参数,由式(2)可以得到测点装配偏差均值和方差模型为

$$\begin{cases} \mu_{v_{M_1}} = (1 + \sum_{i=1}^n s_{WM1_i})\mu_1 + \mu_2 \sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM1_i} + [\mathbf{S}_{fM1}] \{ \boldsymbol{\mu}_{V_f} \}, \\ \mu_{v_{M_2}} = \mu_1 \sum_{i=1}^n s_{WM2_i} + (1 + \sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM2_i})\mu_2 + [\mathbf{S}_{fM2}] \{ \boldsymbol{\mu}_{V_f} \}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma_{v_{M_1}}^2 = (1 + \sum_{i=1}^n s_{WM1_i})^2 \sigma_1^2 + (\sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM1_i})^2 \sigma_2^2 + [\mathbf{S}_{fM1}] \text{cov}(\mathbf{V}_f) [\mathbf{S}_{fM1}]^T, \\ \sigma_{v_{M_2}}^2 = (\sum_{i=1}^n s_{WM2_i})^2 \sigma_1^2 + (1 + \sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM2_i})^2 \sigma_2^2 + [\mathbf{S}_{fM2}] \text{cov}(\mathbf{V}_f) [\mathbf{S}_{fM2}]^T, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\mu_{v_{M1}}$ 和 $\mu_{v_{M2}}$ 分别为零件 1 和零件 2 上测点装配偏差的均值, $\sigma_{v_{M1}}^2$ 和 $\sigma_{v_{M2}}^2$ 分别为零件 1 和零件 2 上测点装配偏差的方差, μ_1 、 μ_2 、 μ_{V_f} 分别为零件 1 制造偏差、零件 2 制造偏差和各夹具定位偏差的均值, σ_1^2 、 σ_2^2 分别为

2 个零件制造偏差的方差。夹具定位偏差相互独立, 协方差矩阵 $\text{cov}(\mathbf{V}_f) = \begin{bmatrix} \sigma_{v_{f1}}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{v_{f2}}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_{fq}}^2 \end{bmatrix}$, 式中 $\sigma_{v_{fi}}^2$

为各夹具定位偏差的方差。

在公差设计中, 以装配零件的平均装配质量为目标函数, 因此对于搭接装配结构, 由式(4)得到公差设计目标函数为

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{v_{M1}}^2 + \sigma_{v_{M2}}^2) = a_1\sigma_1^2 + a_2\sigma_2^2 + a_0, \quad (5)$$

式中 σ_s^2 为零件 1 和零件 2 上测点装配偏差的平均方差, 因此, 搭接装配结构的所有零件公差同步设计, $a_0 = \frac{1}{2}([\mathbf{S}_{fM1}] \text{cov}(\mathbf{V}_f) [\mathbf{S}_{fM1}]^T + [\mathbf{S}_{fM2}] \text{cov}(\mathbf{V}_f) [\mathbf{S}_{fM2}]^T)$, $a_1 = \frac{1}{2}((1 + \sum_{i=1}^n s_{WM1_i})^2 + (\sum_{i=1}^n s_{WM2_i})^2)$, $a_2 = \frac{1}{2}((\sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM1_i}) + (1 + \sum_{i=n+1}^{2n} s_{WM2_i}))^2$ 。

对于对接装配结构, 焊接装配过程对零件主要面装配质量没有影响, 装配质量只受零件本身制造偏差和夹具定位偏差影响, 此时各个零件独立进行公差设计。在角接装配结构中, 其中对接结构零件的主要面装配质量不受焊接装配影响, 搭接结构零件主要面装配质量受焊接装配影响, 零件公差设计时先进行对接结构零件公差设计, 然后进行搭接结构零件公差设计。这两类公差设计模型参照前述搭接装配结构。

1.2 约束函数

(1) 工序能力约束函数

工序能力是指产品制造工序能够稳定地生产合格零件的能力, 它衡量工序能力满足技术要求的程度, 其大小用工序能力指数 C_p 来表示:

$$C_p = \frac{T_0}{6\sigma}, \quad (6)$$

式中 T_0 表示装配公差要求, 6σ 表示产品制造数据统计特性。

工序能力指数的计算基于以下条件: 工序处于统计稳定状态、每个测量值遵循正态分布、公差上下限是基于客户的要求、测量系统能力充分。工序能力指数不能过大也不能过小, 过大会造成工序能力浪费, 过小会引起工序能力不足, 在本研究公差设计中, 设定工序能力指数 $1.33 \geq C_p > 1.0$ 为公差设计约束条件, 因此 $0.1667T_0 > \sigma = T_0/(6C_p) \geq 0.1253T_0$ 。

(2) 其他约束函数

对于搭接装配结构来说, 参与装配零件的主要面公差设计参数为同一方向, 所有参与装配零件的公差同步设计, 利用相等影响原理和零件公差敏感度系数来确定不同零件公差之间的关系, 如 2 个零搭接装配, 由式(5)得到 2 个零件公差要求之间的关系为 $\sigma_1/\sigma_2 = \sqrt{a_2/a_1}$, 这与零件间的刚度大小有关系。对于对接和角接装配结构来说, 所有参与装配的零件公差设计分别进行, 零件公差间没有相互关系。

1.3 公差设计函数

建立以面向装配质量控制的公差优化设计函数如下式

$$\begin{aligned} \min \quad & \sigma_s^2 \\ \text{s. t.} \quad & 0.1667T_0 > \sigma_s \geq 0.1253T_0, \\ & \sigma_i/\sigma_k = \lambda_0, \\ & \sigma_i \in [\sigma_{i-LCL}, \sigma_{i-UCL}], \end{aligned} \quad (7)$$

式中 T_0 为装配体公差要求, $[\sigma_{i-LCL}, \sigma_{i-UCL}]$ 为零件 i 公差设计区间。

当零件间为搭接装配结构时,上述公差设计的目标函数存在 $\sigma_i/\sigma_k = \lambda_0$ 约束。对接或角接装配结构时,各个零件分别进行公差设计,不存在该约束。

2 后地板装配公差优化设计

2.1 案例描述

图1为轿车车身后地板装配总成,由横梁总成和后地板零件两部分通过搭接装配结构焊接组成,图中 $W_{11}/W_{21} \sim W_{18}/W_{28}$ 为2个零部件焊点位置。搭接装配结构使得焊接过程对2个零部件 z 向装配质量有影响。2个零部件均采用4-2-1定位,夹具初始定位方案和测点方案见图1(b)和(c)所示, P_{11} 、 P_{12} 和 P_{21} 、 P_{22} 分别为横梁总成和后地板定位销, $B_{11} \sim B_{14}$ 和 $B_{21} \sim B_{24}$ 分别为横梁总成和后地板定位块, $M_{11} \sim M_{14}$ 和 $M_{21} \sim M_{24}$ 分别为横梁总成和后地板测点。

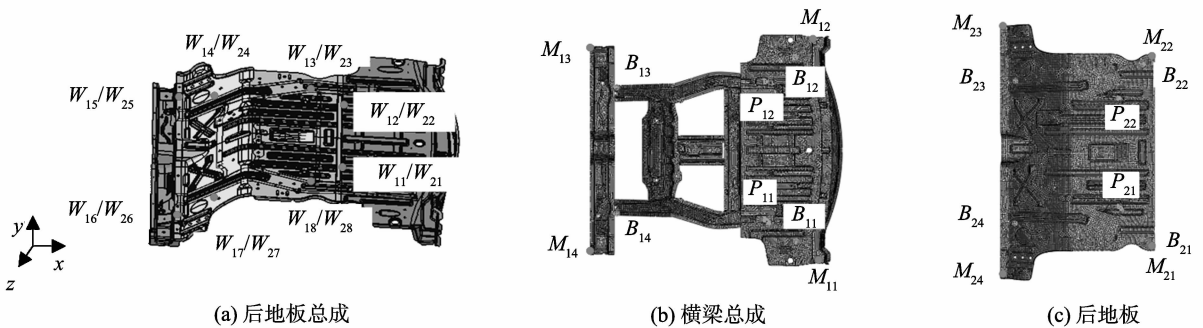


图1 后地板装配总成
Fig. 1 Rear floor assembly

2.2 零件公差优化设计

建立测点 $M_{11} \sim M_{14}$ 和 $M_{21} \sim M_{24}$ 各测点装配偏差模型如下:

$$\{U_z\} = \{U_0\} + [S_f]\{V_f\} + [S]\{V_w\}, \quad (8)$$

式中 $\{U_z\} = \{u_{M_{11}} \quad u_{M_{12}} \quad u_{M_{13}} \quad u_{M_{14}} \quad u_{M_{21}} \quad u_{M_{22}} \quad u_{M_{23}} \quad u_{M_{24}}\}^T$, $\{U_0\}$ 为相应测点初始制造偏差, $\{V_f\} = \{v_{B_{11}} \quad v_{B_{12}} \quad v_{B_{13}} \quad v_{B_{14}} \quad v_{B_{21}} \quad v_{B_{22}} \quad v_{B_{23}} \quad v_{B_{24}}\}^T$, $\{V_w\} = \{v_{W_{11}} \quad \dots \quad v_{W_{18}} \quad v_{W_{21}} \quad \dots \quad v_{W_{28}}\}^T$, 各矩阵为

$$[S_f] = \begin{bmatrix} 1.4645 & -0.2486 & 0.0177 & -0.2335 & 0.1097 & -0.0083 & 0.0585 & -0.0886 \\ -0.0203 & 1.2461 & 0.0243 & -0.2502 & -0.0059 & 0.2129 & 0.1389 & -0.0233 \\ -0.1926 & -0.0483 & 1.3611 & -0.1203 & -0.0067 & -0.0015 & 0.1099 & -0.0436 \\ -0.2374 & -0.0034 & -0.3401 & 1.5809 & -0.0145 & 0.0005 & -0.0802 & 0.1320 \\ 0.2920 & -0.0757 & 0.0532 & -0.1820 & 1.5763 & -0.0350 & 0.0035 & -0.5447 \\ -0.0841 & 0.1937 & 0.0864 & -0.1392 & -0.0371 & 1.5825 & -0.5456 & 0.0002 \\ -0.0881 & -0.1177 & 0.2442 & -0.0446 & 0.0284 & -0.2838 & 1.7011 & -0.4457 \\ -0.0761 & -0.1329 & -0.0403 & 0.4657 & -0.2731 & 0.0141 & -0.4299 & 1.6889 \end{bmatrix},$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0.2493 & 0.1840 & -0.1522 & -0.1365 & -0.1146 & -0.1484 & 0.1741 & 0.1871 & 0.0278 & 0.0184 & -0.0126 & -0.0128 & -0.0148 & -0.0170 & 0.0422 & 0.0124 \\ 0.1960 & 0.2687 & -0.1406 & -0.1483 & -0.1446 & -0.1116 & 0.1606 & 0.1765 & 0.0188 & 0.0361 & -0.0172 & -0.0168 & -0.0182 & -0.0167 & 0.0169 & 0.0392 \\ -0.0961 & -0.1118 & 0.1735 & 0.2482 & 0.1777 & 0.1689 & -0.0944 & -0.1170 & -0.0166 & -0.0068 & 0.0291 & 0.0357 & 0.0450 & 0.0158 & -0.0360 & -0.0161 \\ -0.1158 & -0.0948 & -0.1442 & 0.1929 & 0.1579 & 0.1933 & 0.1848 & -0.0619 & -0.0026 & -0.0231 & -0.0278 & 0.0167 & 0.0171 & 0.0557 & 0.0351 & -0.0266 \\ 0.0842 & 0.0731 & -0.0276 & -0.0148 & -0.0141 & -0.0094 & 0.0920 & 0.0630 & 0.1511 & 0.1122 & -0.1416 & -0.1599 & -0.1285 & -0.1140 & 0.1243 & 0.1488 \\ 0.0947 & 0.0650 & -0.0107 & -0.0060 & -0.0326 & -0.0113 & 0.0744 & 0.0859 & 0.1436 & 0.1581 & -0.1291 & -0.1498 & -0.0558 & -0.1396 & 0.0904 & 0.1205 \\ -0.0034 & -0.0066 & 0.0750 & 0.0901 & 0.0818 & 0.0716 & -0.0162 & -0.0184 & -0.1233 & -0.0853 & 0.0896 & 0.1370 & 0.1716 & 0.1335 & -0.1549 & -0.0804 \\ -0.0086 & -0.0042 & -0.0338 & 0.0673 & 0.0899 & 0.0755 & 0.0983 & -0.0237 & -0.0847 & -0.1464 & -0.0845 & 0.1544 & 0.1293 & 0.1569 & 0.1074 & -0.1154 \end{bmatrix}.$$

夹具定位偏差取 ± 0.1 , 得到这8个测点装配方差模型为

$$\begin{cases} \sigma_{M_{11}}^2 = 1.5446\sigma_1^2 + 0.0019\sigma_2^2 + 0.0025, \\ \sigma_{M_{12}}^2 = 1.5791\sigma_1^2 + 0.0018\sigma_2^2 + 0.0019, \\ \sigma_{M_{13}}^2 = 1.8198\sigma_1^2 + 0.0025\sigma_2^2 + 0.0021, \\ \sigma_{M_{14}}^2 = 1.7218\sigma_1^2 + 0.0020\sigma_2^2 + 0.0030, \\ \sigma_{M_{21}}^2 = 0.0607\sigma_1^2 + 0.9848\sigma_2^2 + 0.0032, \\ \sigma_{M_{22}}^2 = 0.0673\sigma_1^2 + 1.0781\sigma_2^2 + 0.0032, \\ \sigma_{M_{23}}^2 = 0.0750\sigma_1^2 + 1.1835\sigma_2^2 + 0.0036, \\ \sigma_{M_{24}}^2 = 0.0680\sigma_1^2 + 1.2477\sigma_2^2 + 0.0037. \end{cases} \quad (9)$$

取各测点平均方差为公差设计的质量指标,得到公差优化设计目标函数为

$$\sigma_s^2 = 0.8670\sigma_1^2 + 0.5628\sigma_2^2 + 0.0029. \quad (10)$$

取装配公差要求 $T_{z0} = 3$, 优化各零件标准差为 $\sigma_1 = 0.2825$, $\sigma_2 = 0.3506$, 因此横梁总成和后地板 z 向面轮廓度公差分别取 1.7 和 2.1, 这与横梁总成刚度相比后地板零件刚度大情况相符。

2.3 结果分析

(1) 与传统公差设计方法设计结果比较

应用本案例, 与以制造成本为公差设计目标函数, 装配质量为约束函数的公差设计方法进行比较, 公差设计函数如下

$$\begin{aligned} \min \quad & \left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} \right) \\ \text{s. t.} \quad & 0.1667T_0 > \sigma_s \geq 0.1253T_0, \\ & \sigma_i \in [\sigma_{i-LCL}, \sigma_{i-UCL}]. \end{aligned} \quad (11)$$

当 $T_0 = 3$ 时, 经过优化计算后得到各零件标准差设计结果为 $\sigma_1 = 0.391$, $\sigma_2 = 0.451$, 得到横梁总成和后地板 z 向面轮廓度公差分别取 2.3 和 2.7。与前述公差设计结果比较能看出, 由于本研究提出的公差设计方法更重视装配质量和制造工序能力, 所以所得公差设计结果值相对较小, 得到的装配质量最优, 工序能力更高。

(2) 零件公差与零件刚度分析

当 2 个零件装配结构为搭接时, 刚度大的零件比刚度小的零件对装配体质量影响更大, 在本研究提出的薄板零件公差设计方法中, 以零件装配关系为约束, 所得公差设计结果表明零件刚度大的公差取值较小, 刚度小的零件可以取相对更大的公差值, 符合刚度小的零件公差在装配过程中被刚度大的零件消融特性。

3 结论

搭接焊接结构的零件公差设计需同步进行, 对接焊接结构零件公差设计各自独立进行, 而角接焊接结构的零件公差设计则先进行其中对接零件公差设计, 然后进行搭接零件公差设计; 搭接焊接结构中零件刚度差异比较大时, 刚度小的零件公差可以取相对更大的公差。

参考文献:

- [1] 凌芸, 姬舒平, 马玉林, 等. 一种基于模糊综合评判的设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(1):86-92.
LING Yun, JI Shuping, MA Yulin, et al. A new design method of tolerance allocation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2000, 6(1):86-92.
- [2] DUPINET E, BALAZINSKI M, CZOGALA E. Tolerance allocation based on fuzzy logic and simulated annealing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1996, 7(6):487-497.
- [3] JI S, LI X, MA Y, et al. Optimal tolerance allocation based on fuzzy comprehensive evaluation and genetic algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(7):461-468.
- [4] 郑丞, 金隼, 来新民, 等. 基于非合作博弈的公差分配优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10):159-165.
ZHENG Cheng, JIN Sun, LAI Xinmin, et al. Tolerance allocation optimization based on non-cooperative game analysis[J].

- Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10):159-165.
- [5] LI Yonghua, LI Wei, GE Zailin. Research of optimizing cost model of tolerance based on robust design[C]//Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2011 International Conference on. New Jersey: IEEE Press, 2011:26-29.
- [6] PIEPEL G F, ÖZLER C, ŞEHIRLIOĞLU A K. Optimum tolerance design using component-amount and mixture-amount experiments[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9-12):2359-2369.
- [7] 黄平捷, 杨将新. 基于工序能力指标的工序公差优化设计研究[J]. 工程设计, 2000, 7(3):48-50.
HUANG Pingjie, YANG Jiangxin. A study of optimal process tolerance design based on process capability index[J]. Engineering Design, 2000, 7(3):48-50.
- [8] 徐先懂, 宋述稳. 基于最大工序能力的工序公差优化方法[J]. 装备制造技术, 2003(4):3-5.
XU Xiandong, SONG Shuwen. An optimal approach to process tolerance based on maximum capability[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2003(4):3-5.
- [9] 林巨广, 杨兰和, 刘明周, 等. 基于工序能力指数的零件选配优化模型[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4):136-140.
LIN Juguang, YANG Lanhe, LIU Mingzhou, et al. Study on optimization model of matching parts assembly based on the process capability index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):136-140.
- [10] ZHANG C, WANG H. Robust design of assembly and machining tolerance allocations[J]. IIE Transactions, 1998, 30(1):17-29.
- [11] FENG C, KUSIAK A. Robust tolerance synthesis with the design of experiment approach[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(3):520-527.
- [12] LI Z, IZQUIERDO L, KOKKOLARAS M, et al. Multiobjective optimization for integrated tolerance allocation and fixture layout design in multistation assembly[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(4):0445011-0445016.
- [13] 郑丞, 金隼, 来新民. 基于合作博弈的公差稳健设计方法[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(11):1587-1591.
ZHENG Cheng, JIN Sun, LAI Xinmin. Robust tolerance design method based on cooperative game[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(11):1587-1591.
- [14] HUANG Xianzhen, ZHANG Yimin. Robust tolerance design for function generation mechanisms with joint clearances[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(9):1286-1297.
- [15] TSAI Jinntsong, LEE Kuoming, CHOU Jyhhong. Robust evolutionary optimal tolerance design for machining variables of surface grinding process[J]. Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 2013, 10(1):301-312.
- [16] MENG J, ZHANG C, WANG B, et al. Integrated robust parameter design and tolerance design[J]. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2010, 5(2):159-189.
- [17] LI Hai, ZHU Haiping, LI Peigen, et al. Tolerance analysis of mechanical assemblies based on small displacement torsor and deviation propagation theories[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1-4):89-99.
- [18] LIU Liyi, LI Shiyun, TONG Xiaotian. Study and application of three-dimensional assembly tolerance analysis[C]//Proceedings of the 2012 Third International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Washington: IEEE Computer Society, 2012:2902-2905.
- [19] BO Chaowang, YANG Zhihong, WANG Linbo. A comparison of tolerance analysis models for assembly[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1-4):739-754.
- [20] YU Kuigang, JIN Sun, LAI Xinmin. Modeling and analysis of compliant sheet metal assembly variation[J]. Assembly Automation, 2008, 28(3):225-234.
- [21] 于奎刚. 车身柔性薄板产品装配建模及工艺稳健设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
YU Kuigang. Assembly modeling and robust technology design research of automotive body compliant sheet metal products [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.

(编辑:陈燕)