

文章编号:1671-6833(2017)06-0039-06

考虑公差原则的三维公差分析方法研究

赵凤霞, 金少搏, 李纪峰

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对目前公差分析中普遍存在未考虑公差原则影响的现象, 提出了一种考虑公差原则的三维公差建模与分析方法. 基于 SDT 理论和模态区间方法分别建立了要素采用独立原则、包容要求、最大实体要求、最小实体要求或可逆要求时的公差模型; 利用空间矢量表示三维尺寸链, 基于空间矢量环叠加原理推导出了三维公差分析时的封闭环尺寸及其变动计算模型; 以采用不同公差原则的工程实例进行了三维公差建模和公差分析, 给出了公差分析的步骤, 验证了本文所研究方法的有效性.

关键词: 公差原则; 公差分析; 公差建模; SDT 理论; 模态区间方法

中图分类号: TH124 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.007

0 引言

装配公差分析或称装配偏差分析, 即通过已知零部件的尺寸分布和公差, 考虑公差的累积和传播, 计算装配体的尺寸分布和装配公差的过程. 公差分析为解决零件尺寸公差和几何公差对装配性能的影响提供了一个有效的评价工具. 目前, 国内外学者在公差分析领域进行了诸多研究, 并取得了丰硕的成果. Chase 等^[1]和 Gao 等^[2]通过对隐式运动学方程进行线性化, 提出了一种基于矢量环模型的直接线性化公差分析方法, 该方法可以对二维和三维装配体进行分析. Davidson 等^[3]基于单纯形和面积坐标的概念提出了 T-Map 模型, 一个 T-Map 模型将特征公差带影射到一个多维参数空间区域, 该模型只能处理简单的公差链, 目前仍处于发展阶段. Desrochers 等^[4]将机器人运动学中的 Jacobian 模型和 SDT 模型相结合提出了 Jacobian-Torsor 模型. Li 等^[5]基于 SDT (small displacement torsor) 和误差传播理论进行了公差分析. 彭和平等^[6]基于矢量环装配模型进行了考虑几何公差的二维公差分析, 吴常林等^[7]和程彬彬等^[8]利用雅可比旋量理论建立了装配功能要求与零件公差之间的三维公差数学模型, 采用蒙特卡洛方法实现了装配体三维公差统计分析. 张为民等^[9]基于雅可比旋量法进行了实际工况的公差建模. 吴兆

强^[10]研究了小位移旋量的公差建模方法, 采用齐次坐标变换进行了三维公差分析. 但是, 目前的公差分析主要是研究尺寸公差分析, 或只对装配体中零件的尺寸公差和几何公差逐个进行零件装配分析, 而不考虑尺寸公差和几何公差之间相互关系及其对零件性能的影响. 实际上, 对同一个零件而言, 尺寸公差与几何公差是共存的, 二者之间存在一定的内在联系, 零件是否能装配, 并不单独取决于尺寸公差或者几何公差, 而是取决于尺寸公差和几何公差的综合作用. 因此, 在公差分析时必须考虑公差原则对装配性能的影响.

为了研究考虑公差原则的三维公差建模与分析方法, 笔者首先基于 SDT 理论和模态区间方法建立不同公差原则下的三维公差 SDT 模型, 然后基于空间矢量环叠加原理推导尺寸链的三维公差分析模型, 最后结合工程实例给出公差分析的步骤.

1 公差分析中的公差建模

公差建模是公差分析的基础. 笔者基于 SDT 理论和模态区间方法建立不同公差原则下的公差模型.

1.1 应用独立原则时的公差模型

应用独立原则时, 尺寸公差和几何公差是相互独立的, 二者相互无关. 尺寸公差只控制要素实际尺寸的变动量, 不控制几何误差; 而几何公差只

收稿日期: 2017-02-02; 修订日期: 2017-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775515)

作者简介: 赵凤霞(1971—), 女, 河南扶沟人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事精密测量技术方面的研究, E-mail: zfx-mail@163.com.

控制被测要素的几何误差,与实际尺寸无关.因此公差分析时应分别计入尺寸公差和几何公差,其中几何公差的尺寸为0.

尺寸公差和几何公差的特征由公差带来表征,实际要素可以在公差带内旋转或移动,这些旋转和移动可用SDT模型描述.设 ω 是旋转矢量; ε 是平动矢量; u, v, w 分别是沿 X, Y, Z 轴的平动量; $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 分别是沿 X, Y, Z 轴的旋转量,那么,公差带的SDT模型可定义为

$$\tau = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & w \\ \Delta\alpha & \Delta\beta & \Delta\gamma \end{bmatrix}. \quad (1)$$

几何公差带的形状主要有两平行平面、两平行直线、两同心圆、两同轴圆柱面、圆柱、圆、球、两平行曲线、两平行曲面等.如表1中的两平行平面公差带,平面长为 L_1 、宽为 L_2 ,两平行平面之间的距离为公差带大小 t .假设将坐标系 XYZ 置于两平行

平面中间.由新一代GPS的恒定度知^[11],平面有3个自由度,即绕 X 轴的转动 $\Delta\alpha$ 、绕 Y 轴的转动 $\Delta\beta$ 和沿 Z 轴的平动 w .因此,对两平行平面公差带建模只需确定这3个自由度的变动范围即可,由此可得其SDT模型及各矢量约束,各矢量约束采用模态区间法描述,见表1.同理,也可建立其他几何公差带的SDT模型,表1也给出了其他几种常用的几何公差带的SDT模型及其矢量约束.

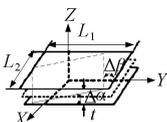
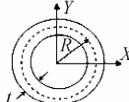
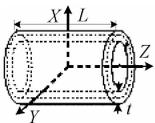
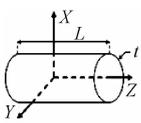
尺寸公差是允许尺寸的变动量,其公差带限制了实际偏差处于上极限偏差 T_U 和下极限偏差 T_L 区域内.根据尺寸公差的性质可知,尺寸公差带的SDT模型中只有平动矢量.假设平动发生在 X 方向上,则其SDT模型为

$$\tau = \begin{bmatrix} u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, $u = [T_L, T_U]$.

表1 常用几何公差带的SDT模型及其约束

Tab.1 SDT model and its vector description of tolerance zones

公差带	公差带形状	SDT模型	约束
两平行平面之间的区域		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ \Delta\alpha & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix}$	$w = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], \Delta\alpha = \left[-\frac{t}{L_1}, \frac{t}{L_1}\right], \Delta\beta = \left[-\frac{t}{L_2}, \frac{t}{L_2}\right]$ $ w + \left \frac{\Delta\alpha \cdot L_1}{2}\right + \left \frac{\Delta\beta \cdot L_2}{2}\right = \left[0, \frac{t}{2}\right]$
两平行直线之间的区域		$\begin{bmatrix} u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\gamma \end{bmatrix}$	$u = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], \Delta\gamma = \left[-\frac{t}{L}, \frac{t}{L}\right]$ $ u + \left \frac{\Delta\gamma \cdot L}{2}\right = \left[0, \frac{t}{2}\right]$
两同心圆之间的区域		$\begin{bmatrix} u & v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$u = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], v = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], u^2 + v^2 = \left[0, \left(\frac{t}{2}\right)^2\right]$
两同轴圆柱面内的区域		$\begin{bmatrix} u & v & 0 \\ \Delta\alpha & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix}$	$u = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], v = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], \Delta\alpha = \left[-\frac{t}{L}, \frac{t}{L}\right]$ $\Delta\beta = \left[-\frac{t}{L}, \frac{t}{L}\right]$ $\left(u + \frac{\Delta\alpha \cdot L}{2}\right)^2 + \left(v + \frac{\Delta\beta \cdot L}{2}\right)^2 = \left[0, \left(\frac{t}{2}\right)^2\right]$
圆柱面内的区域		$\begin{bmatrix} u & v & 0 \\ \Delta\alpha & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix}$	$u = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], v = \left[-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right], \Delta\alpha = \left[-\frac{t}{L}, \frac{t}{L}\right]$ $\Delta\beta = \left[-\frac{t}{L}, \frac{t}{L}\right]$ $\left(u + \frac{\Delta\alpha \cdot L}{2}\right)^2 + \left(v + \frac{\Delta\beta \cdot L}{2}\right)^2 = \left[0, \left(\frac{t}{2}\right)^2\right]$

1.2 应用包容要求时的公差模型

应用包容要求时,尺寸公差具有双重功能,既能控制实际尺寸,又能控制形状误差.尺寸要素对应的实际轮廓(实际尺寸和形状误差综合的结果)应遵守最大实体边界(MMB).因此,公差分析

时只需计入尺寸公差,而不考虑几何公差.尺寸公差的SDT模型同公式(2).

1.3 应用最大实体要求或最小实体要求时的公差模型

应用最大实体要求(MMR)的尺寸要素对应

的实际轮廓应遵守最大实体实效边界(MMVB),此时尺寸公差可以对几何公差进行补偿,使几何公差带大小由 t 可增大到 $t + T$, T 为尺寸公差值. 当实际尺寸等于最小实体尺寸(LMS)时,几何公差得到最大的补偿值,几何公差带大小为 $t + T$. 因此,应用 MMR 的尺寸要素可等效为尺寸等于 LMS 的理想形体(公差值为 0)与公差带大小等于 $t + T$ 的变动形体的叠加,变动形体是尺寸为 0 的几何公差带,其 SDT 模型与表(1)中对应相同形状 of 模型相同,但矢量约束中的 t 替换为 $t + T$. 为了计算方便,应用 MMR 的尺寸要素进行公差分析时,可将尺寸公差和几何公差合并为尺寸等于 LMS、具有 $t + T$ 公差带大小的综合公差.

如图 1 所示是圆柱轴应用 MMR 的示例,公差分析时,计入的尺寸等于 19.98 mm,几何公差的公差带形状为圆柱,由表 1 知,其 SDT 模型为 $\begin{bmatrix} u & v & 0 \\ \Delta\alpha & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix}$,其中 $u = v = \left[-\frac{0.05}{2}, \frac{0.05}{2}\right]$, $\Delta\alpha = \Delta\beta = \left[-\frac{0.05}{100}, \frac{0.05}{100}\right]$.

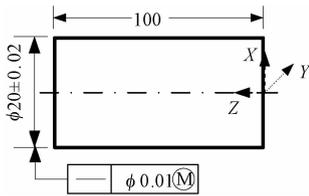


图 1 圆柱轴应用 MMR 示例

Fig.1 Example of MMR for an cylindrical feature

应用最小实体要求(LMR)的尺寸要素对应的实际轮廓应遵守最小实体实效边界(LMVB). 同理,公差分析时,将尺寸要素等效为尺寸等于 MMS 的理想形体(公差为 0)与公差带大小为 $t + T$ 的变动形体(尺寸为 0)的叠加.

1.4 应用可逆要求时的公差模型

可逆要求(RPR)是最大实体要求(MMR)或最小实体要求(LMR)的附加要求. MMR 或 LMR 附加了 RPR 后,允许尺寸和几何公差之间相互补偿;当尺寸要素具有理想形状或方向或位置时,尺寸得到最大的补偿值. 因此,与 1.3 节同理,把尺寸要素等效为尺寸一定的理想形体与公差带大小为 $t + T$ 的变动形体的叠加,变动形体的 SDT 模型与应用 MMR 和 LMR 的相同. 理想形体的尺寸与尺寸要素的形状和采用的相关要求有关,如表 2 所示是笔者推导出的应用可逆要求时理想形体尺寸的计算公式.

表 2 应用可逆要求时理想形体尺寸的计算公式
Tab.2 The formula of basic size of nominal shape when using reciprocity requirement.

相关要求	尺寸要素的形状	
	外尺寸(轴)	内尺寸(孔)
RPR 用于 MMR	MMS + t	MMS - t
RPR 用于 LMR	LMS - t	LMS + t

2 公差分析中的封闭环模型建立

三维公差分析即确定三维尺寸链中各个组成环矢量对封闭环的影响,从而确定封闭环的公差.

在三维空间中,每一个矢量的空间位置是由矢量长度 a_i 和其与三个坐标轴的夹角 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 确定,如图 2 所示,即各矢量的三维坐标为

$$A_i = [a_i \cos \alpha_i \quad a_i \cos \beta_i \quad a_i \cos \gamma_i]. \quad (3)$$

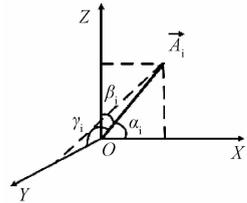


图 2 矢量的空间表示

Fig.2 the space representation of vector

假设三维尺寸链由 4 个空间组成环矢量(A_1, A_2, A_3, A_4)组成, A_0 为封闭环. 由尺寸链的特点,对各矢量环进行叠加可得封闭环尺寸的三维模型为

$$A_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 & \cos \alpha_4 \\ \cos \beta_1 & \cos \beta_2 & \cos \beta_3 & \cos \beta_4 \\ \cos \gamma_1 & \cos \gamma_2 & \cos \gamma_3 & \cos \gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

假设由于尺寸公差和/或几何公差的影响,使得各矢量的尺寸变动为 Δa_i , 与各坐标轴的夹角变动为 $\Delta \alpha_i, \Delta \beta_i, \Delta \gamma_i$, 则各组成环矢量的三维模型变为

$$A_{iv} = \begin{bmatrix} (a_i + \Delta a_i) \cos(\alpha_i + \Delta \alpha_i) \\ (a_i + \Delta a_i) \cos(\beta_i + \Delta \beta_i) \\ (a_i + \Delta a_i) \cos(\gamma_i + \Delta \gamma_i) \end{bmatrix}^t. \quad (5)$$

由于 $\Delta \alpha_i \rightarrow 0, \Delta \beta_i \rightarrow 0, \Delta \gamma_i \rightarrow 0, \Delta a_i \rightarrow 0$, 可以认为 $\cos \Delta \alpha_i \approx 1, \cos \Delta \beta_i \approx 1, \cos \Delta \gamma_i \approx 1, \sin \Delta \alpha_i \approx \Delta \alpha_i, \sin \Delta \beta_i \approx \Delta \beta_i, \sin \Delta \gamma_i \approx \Delta \gamma_i$; 且 $\Delta a_i \Delta \alpha_i \approx 0, \Delta a_i \Delta \beta_i \approx 0, \Delta a_i \Delta \gamma_i \approx 0$. 则 $\cos(\alpha_i + \Delta \alpha_i) \approx \cos \alpha_i - \Delta a_i \sin \alpha_i$,

$$\cos(\beta_i + \Delta\beta_i) \approx \cos \beta_i - \Delta\beta_i \sin \beta_i,$$

$$\cos(\gamma_i + \Delta\gamma_i) \approx \cos \gamma_i - \Delta\gamma_i \sin \gamma_i.$$

由此可得封闭环的变动模型为

$$\Delta = A_{0e} - A_0 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \\ \cos \alpha_4 & \cos \beta_4 & \cos \gamma_4 \\ -a_1 \sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ -a_2 \sin \alpha_2 & 0 & 0 \\ -a_3 \sin \alpha_3 & 0 & 0 \\ -a_4 \sin \alpha_4 & 0 & 0 \\ 0 & -a_1 \sin \beta_1 & 0 \\ 0 & -a_2 \sin \beta_2 & 0 \\ 0 & -a_3 \sin \beta_3 & 0 \\ 0 & -a_4 \sin \beta_4 & 0 \\ 0 & 0 & -a_1 \sin \gamma_1 \\ 0 & 0 & -a_2 \sin \gamma_2 \\ 0 & 0 & -a_3 \sin \gamma_3 \\ 0 & 0 & -a_4 \sin \gamma_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \\ \Delta a_4 \\ \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \\ \Delta \alpha_3 \\ \Delta \alpha_4 \\ \Delta \beta_1 \\ \Delta \beta_2 \\ \Delta \beta_3 \\ \Delta \beta_4 \\ \Delta \gamma_1 \\ \Delta \gamma_2 \\ \Delta \gamma_3 \\ \Delta \gamma_4 \end{bmatrix}$$

(6)

式(6)可扩展到 n 个组成环矢量情况.

3 公差分析步骤及工程实例

公差分析的步骤:

(1)首先对装配体上的所有零件进行分析,

识别对保证功能有影响的所有要素.

图3所示是一个机床尾座的装配简图及组成零件图.该装配体由顶尖(图3中的零件1)、立柱(图3中的零件2)、底座(图3中的零件3)组成,其装配功能要求是保证顶尖端点在垂直方向上的尺寸 FR . 顶尖与立柱的孔轴配合为 $\phi 20 \frac{H6}{n5}$,底座与立柱的配合为平面配合,其余尺寸如图示.根据工作条件可知,顶尖上的功能要素有:圆锥轴线 F_1 、 $\phi 20$ 圆柱的轴线 F_2 、 $\phi 20$ 圆柱面 F_3 .底座和立柱的功能要素见图3.

(2)对各功能要素建立坐标系.

(3)根据零件间的装配关系基于图论建立零件功能要素间的装配关系图.

图4所示是图3示例中各零件功能要素间的装配关系图.图中,每个零件内部要素之间的尺寸和方位关系在内圆中示出,零件之间的要素关系在外圆外分别实线或虚线连接,实线表示两零件要素之间的装配关系,虚线表示设计要求.各链环的矢量长度分别用 $a_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ 表示.

(4)根据各功能要素所采用的公差原则按本文第1章所述内容进行公差建模.

如顶尖零件中,要素 F_1 对要素 F_2 有同轴度要求,且采用了独立原则,由1.1节知,公差分析时计入尺寸公差和几何公差两部分.其中,尺寸及公差为0;几何公差的尺寸为0,用记号 a_i 表示,同轴度的公差带形状为圆柱,由表1可知其SDT

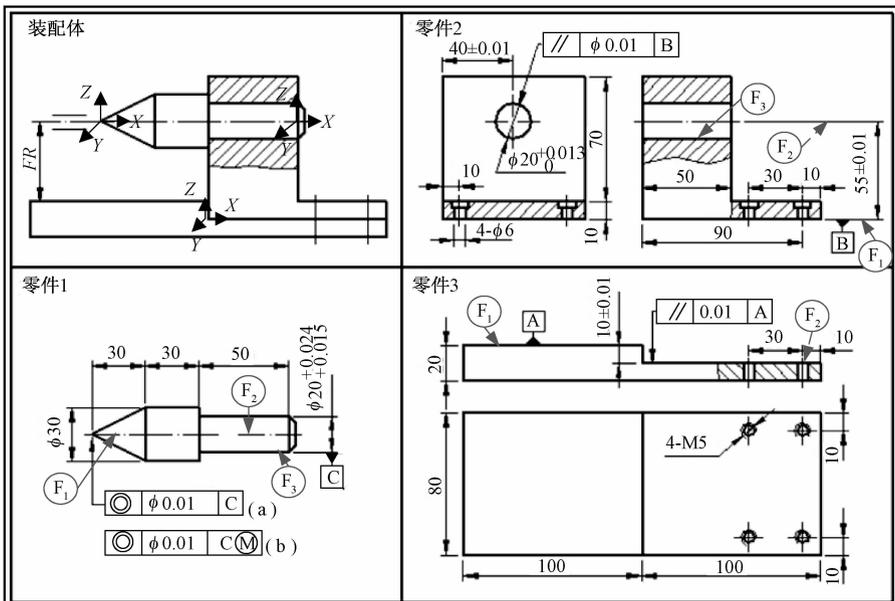


图3 机床尾座的装配简图及组成零件图

Fig. 3 Assembly drawing of machine tailstock and its parts drawing

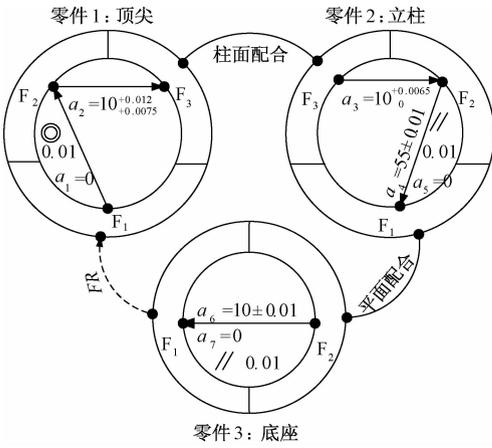


图 4 功能要素间的装配关系图

Fig. 4 The assembly graph of effective features

模型为 $\begin{bmatrix} 0 & v & w \\ 0 & \Delta\beta & \Delta\gamma \end{bmatrix}, v = w = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{2} & \frac{0.01}{2} \end{bmatrix}$,

$$\Delta\beta = \Delta\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{30} & \frac{0.01}{30} \end{bmatrix}$$

要素 F_2 为基准 C, 当同轴度采用图 3 中 (a) 方式标注时, 即 C 后面无 \textcircled{M} , 根据基准的建立准则可知^[12], 此时基准 C 相当于采用了包容要求. 由 1.2 节知, 公差分析时, 只计入 F_2 到 F_3 的尺寸及公差 $a_2 = \phi 10^{+0.012}_{+0.0075}$, 其 SDT 模型及其约束见表 3. 当同轴度采用 (b) 方式标注时, C 后面有 \textcircled{M} , 即基准 C 采用了最大实体要求. 由 1.3 节知, 公差分析时, F_2 到 F_3 的尺寸及公差为 $a'_2 = \phi 10.0075 \pm 0.00225$. 同理, 也可得立柱和底座各功能要素的公差模型, 结果见表 3.

(5) 用公式 (4) 和公式 (6) 计算得到封闭环的尺寸及其变动.

表 3 各矢量环的 SDT 模型及其约束

Tab. 3 The SDT modals and its vector description of the vectors

各环尺寸及其 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$	SDT 模型	约束
$a_1 = 0$ $\alpha_1 = 90^\circ, \beta_1 = 90^\circ, \gamma_1 = 0^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & v & w \\ 0 & \Delta\beta & \Delta\gamma \end{bmatrix}$	$v = w = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{2} & \frac{0.01}{2} \end{bmatrix}$ $\Delta\beta = \Delta\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{30} & \frac{0.01}{30} \end{bmatrix}$
$a_2 = 10^{+0.012}_{+0.0075}$ $\alpha_2 = 90^\circ, \beta_2 = 90^\circ, \gamma_2 = 180^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$w = [0.0075, 0.012]$
$a'_2 = 10.0075 \pm 0.00225$ $\alpha_2 = 90^\circ, \beta_2 = 90^\circ, \gamma_2 = 180^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$w = [-0.00225, 0.00225]$
$a_3 = 10^{+0.0065}_0$ $\alpha_3 = 90^\circ, \beta_3 = 90^\circ, \gamma_3 = 0^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$w = [0, 0.0065]$
$a_4 = 55 \pm 0.01$ $\alpha_4 = 90^\circ, \beta_4 = 90^\circ, \gamma_4 = 180^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$w = [-0.01, 0.01]$
$a_5 = 0$ $\alpha_5 = 90^\circ, \beta_5 = 90^\circ, \gamma_5 = 180^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & v & w \\ 0 & \Delta\beta & \Delta\gamma \end{bmatrix}$	$v = w = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{2} & \frac{0.01}{2} \end{bmatrix}$ $\Delta\beta = \Delta\gamma = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{50} & \frac{0.01}{50} \end{bmatrix}$
$a_6 = 10 \pm 0.01$ $\alpha_6 = 90^\circ, \beta_6 = 90^\circ, \gamma_6 = 0^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$w = [-0.01, 0.01]$
$a_7 = 0$ $\alpha_7 = 90^\circ, \beta_7 = 90^\circ, \gamma_7 = 0^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & w \\ \Delta\alpha & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix}$	$w = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{2} & \frac{0.01}{2} \end{bmatrix}$ $\Delta\alpha = \Delta\beta = \begin{bmatrix} -\frac{0.01}{100} & \frac{0.01}{100} \end{bmatrix}$

将表 3 中的内容分别代入公式 (4) 和公式 (6), 用模态区间运算法则进行计算^[13], 得到 FR 在 Z 方向的尺寸为 45 mm, 当同轴度采用方式 (a) 标注时, 变动为 $[-0.047, 0.034]$; 当同轴度采用方式 (b) 标注时, 变动为 $[-0.0475, 0.036]$. 对比计算结果可以看出, 采用的公差原

则不同, 公差分析结果亦不相同, 因此在实际工作中不能忽视公差原则的影响.

根据表 3 中 SDT 模型各矢量变动的特点, 也可假设各环的分布状态 (如假设 A_2, A_3 中的矢量呈均匀分布, 其他各环中的矢量呈正态分布) 采用蒙特卡洛方法或其它方法进行分析, 笔者不再

赘述.

4 结论

笔者研究了考虑公差原则的三维公差分析问题,得到了在公差分析时应用不同公差原则的尺寸公差和几何公差的计入方法,并基于 SDT 理论和模态区间方法分别建立了要素应用不同公差原则时的公差模型;基于空间矢量环叠加原理推导出了三维公差分析时的封闭环尺寸及其变动计算模型;结合工程实例给出了公差分析的具体步骤,并进行了公差分析的实例应用.研究表明,公差原则对装配精度的影响较大,在实际工作中是不能忽视的,考虑公差原则的三维公差分析结果更为精确.笔者的研究为准确且符合工程实际进行三维公差分析提供了技术支撑.

参考文献:

- [1] CHASE K W, GAO J, MAGLEBY S P. General 2D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments [J]. *J Des Manuf*, 1995, 5 (4):263 - 274.
- [2] GAO J, CHASE K W, MAGLEBY S P. Generalized 3D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments [J]. *IIE transactions*, 1998, 30(4):367 - 377.
- [3] DAVIDSON J K, MUJEZINOVIC A, SHAH J J. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to round faces [J]. *J Mech Des*, 2002, 124: 609 - 621.
- [4] DESROCHERS A, GHIE W, LAPERRIERE L. Application of a unified Jacobian-torsor model for tolerance analysis [J]. *J Comput Inf Sci Eng*, 2003, 3 (1):2 - 14.
- [5] LI H, ZHU H P, LI P G, et al. Tolerance analysis of mechanical assemblies based on small displacement torsor and deviation propagation theories [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, 72:89 - 99.
- [6] 彭和平,刘晓军. 考虑形位公差的二维装配公差分析[J]. *机械传动*, 2008, 32(3):75 - 82.
- [7] 吴常林,黄美发,程彬彬,等. 基于雅可比旋量模型的装配体公差统计分析[J]. *机械设计与研究*, 2015, 31(6):97 - 100.
- [8] 程彬彬,王志越,黄美发,等. 装配体三维公差建模及分析研究[J]. *机械设计与制造*, 2016(4):76 - 79.
- [9] 张为民,陈灿,李鹏忠,等. 基于雅可比旋量法的实际工况公差建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(1):77 - 83.
- [10] 吴兆强. 基于小位移旋量的公差建模及公差分析 [J]. *机械设计与制造*, 2010(1):205 - 207.
- [11] 方东阳,李秀明,张琳娜,等. 基于 GPS 的形位公差项目分析和设计 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2005, 26(3):73 - 75.
- [12] Geometrical product specifications (GPS)-geometrical tolerancing-datums and datum systems;ISO 5459:2011 (E) [S].
- [13] SAINZ M A, ARMENGO J, CALM R, et al. Modal interval analysis: new tools for numerical information [M]. Berlin:Springer, 2014.

Research on the Method for 3D Tolerance Analysis Considering Tolerance Principle

ZHAO Fengxia, JIN Shaobo, LI Jifeng

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A method of considering tolerance principle for three dimensional tolerance analysis was put forward. Based on small displacement torsor (SDT) theory and modal interval arithmetic, the tolerance models of size tolerance and geometrical tolerance of the feature of size apply independent principle, envelope requirement, maximum material requirement, least material requirement or reciprocity requirement, were established respectively. By using the space vector to represent 3D dimension chain, a mathematical model was built to calculate the closed loop tolerance based on space vector loop stack principle. The application of the proposed method was illustrated through presenting an example, the tolerance analysis steps were given, and the availability of the proposed method was proved successfully.

Key words: tolerance principle; tolerance analysis; tolerance modeling; small displacement torsor theory; modal interval arithmetic