

三维零件模型几何公差标注合理性检查方法^{*}

王秋森, 郑国磊

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 三维模型标注技术对产品唯一数据源进行定义, 包含产品的所有技术信息, 以代替二维图样实现无纸化设计。针对模型标注检查效率低及工作量大等实际问题, 首先对模型标注的合理性原则进行阐述并归纳模型常见的标注问题; 其次对标注问题进行分析, 提出标素模型并对标注检查准则进行总结, 在此基础上建立基准与几何公差标素模型, 根据检查准则对标注逐项检查, 并判断同一几何元素上公差值关系是否合理。最后, 基于 CATIA 平台开发了几何公差标注自动检查功能, 提高了标注检查效率。

关键词: 三维模型标注技术; 合理性; 标素模型; 检查准则; 公差值

A Method of Rational Inspection of Geometric Tolerance on 3D Part Model

WANG Qiusen, ZHENG Guolei

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The sole data source of product is defined by 3D annotating technology, which contains all technical information of product and is a substitute for 2D drawing. Firstly, to solve the problems such as low efficiency and heavy workload of annotation inspection, the rationality of annotation is expounded and the common annotation issues are concluded. Secondly, after analyzing common annotation problems, an annotation element model (AEM) is proposed and the rules of annotation inspection are summarized, then establishing the datum and geometric element of AEM, whereas the annotations are checked term by term according to the criteria, and the reasonability of the relationships between the tolerance values on the same geometric element is measured consequently. Finally, based on CATIA system, automatic inspection function of geometric tolerance annotation is developed, which improves the annotation inspection efficiency.

Keywords: 3D annotating technology; Rationality; Annotation element model; Inspection rule; Tolerance value

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.18.088

数字化设计制造技术使现代产品零件的设计手段快速发展, 产品定义模型从二维模型到三维模型经历了3个主要发展阶段^[1]: 产品几何形状等信息的二维工程图表示; 产品详细形状信息的三维模型表示, 同时二维图纸给出其他非几何信息; 三维模型, 包含制造特征在内的三维注释与标注。零件数模, 不仅包含零件的几何信息, 还包括直接表达显示的尺寸、基准、公差等标注, 三维标注信息可与一个或一组模型特征, 或某一模型特征的某一部分相关联^[2], 为零件加工和检验等工艺环节提供必要依据, 然而由于模型标注类别繁多, 会出现标注不正确或者不合理情况, 因此对零件数模检查时既要检测模型建模质量又要检查模型标注是否合理。

为了提高标注检查效率, 保证标注质量, 国内外学者对标注检查进行了大量研究。Cheng等^[3]将几何约

束对几何元素的影响转化为空间轨迹, 通过空间轨迹相交规则判定几何元素是否固定, 从而判断尺寸标注是否完备, 但是该方法仅仅是针对尺寸标注, 没有涉及尺寸公差、几何公差以及基准标注的检查; 王勃等^[4]通过轴向和径向尺寸集的构造并采用图论法和尺寸冗余度法实现尺寸集完备性的判别; 朱一舟等^[5]建立基于几何要素的“几何公差树”并用于几何公差标注公差类型的自动判别, 使用该公差判别路径图能够对几何公差类型进行自动化检查; 覃裕初等^[6]从模型几何要素之间空间关系出发, 提出了几何公差描述逻辑并给出了Tableau判定算法, 实现了装配公差类型的自动生成; 蒋科等^[7]提出几何公差推理的层次结构, 利用多色集合理论形成几何公差信息推理围道矩阵, 对几何公差类型、附加符号等进行了规范性验证, 但是没有对同一要素上的几何公差值进行合理性验证; 吴玉光等^[8]提出

^{*} 基金项目: 中航工业产学研专项 (cx2013BH06)。

基本几何元素本征自由度的概念,并给出了基于本征自由度的公差标注正确性验证规则,未对几何公差标注面选择合理性进行检查;Armillotta^[9]在装配体环境中自动生成几何公差类型,进行几何公差类型选择之后,并未针对零部件进行几何公差标注检查验证;陈靖乐等^[10]对一般公差标准中线性尺寸的数据结构进行了分析,并提出了检测模型未注公差自动完善方案。本文针对几何公差标注常见问题进行归类总结,从提高标注检查效率出发,建立几何公差标素模型,结合相关国家及行业标准制定检查准则,在CATIA V5系统上开发针对零件几何公差标注的标注面、几何公差类型、附加符号以及同一要素上公差值之间关系等合理性检查功能,通过工程实例测试开发功能的有效性,最后对下一步模型标注检查工作展望。

1 几何公差标注合理性

1.1 合理性

广义上,零件设计模型的三维尺寸及公差标注是否合理,需要结合设计、工艺、制造、检验等过程进行综合性评价。模型标注的合理性包括标注的规范性和工艺性,其中规范性是指标注符合国家现行的技术标准,不出现错误标注;工艺性是指标注反映的工程语义信息符合加工定位基准选择、加工方法以及加工顺序等加工工艺要求。在标注过程中会由于人为操作失误或软件标注功能设计缺陷出现不合理的标注。为了实现对几何公差标注自动检查,将几何公差标注常见错误归纳为5类:(1)标注面选择不合理,例如垂直度所在标注面与基准不垂直;(2)几何公差类型选择不合理,例如在圆柱面上标注平面度;(3)附加符号使用不正确,例如在圆度公差标注中使用实体要求符号,而实体要求符号不适用于圆度公差;(4)基准要素定义与选择不合理,例如在手动输入形位公差基准时可能会重复定义基准及使用企业禁用的基准字母,或在几何公差控制框的基准

体系中,第2基准不与第1基准垂直或平行,第3基准分别不与第1、第2基准垂直或平行的基准不合理标注情况;(5)同一要素公差值标注不合理,例如对平面同时有平行度和平面度公差要求,但是其平面度公差值大于平行度公差值。

1.2 形式化定义与表示

几何公差标注检查主要是判断标注信息与其关联几何元素的工程语义是否匹配,将几何公差标注还原为三维数字化模型中几何元素之间的关系度量。据此,基于尺素模型^[11-12]在标注检查中提出标素的概念,利用标素模型对几何公差标注形式化定义和表示,从而辅助标注自动检查。

定义零件数模中与尺寸及公差标注相关联的几何要素或辅助几何要素称为标素,记为 r 。使用标素模型对几何公差标注检查,是基于对三维标注的工程语义思考。根据合理性检查的需求和标素的相关信息,建立标素模型如下:

$$r(k, t, g)$$

式中, k 为标素类型; t 为标素对象的系统编号; g 为标素的几何信息,标素基本类型及相应的几何信息如图1所示。

模型几何公差标注检查中,除了因几何公差定义造成的公差类型不正确和附加符号使用不规范等标注问题外,其基准体系的给定可能因基准标注的不规范出现问题,因而也需在几何公差检查之前对基准标注进行检查。为了把握标注各检查项的关系并且提供全面的检查信息,分别对基准和几何公差建立标素模型。

(1)基准标素模型。基准是与被测要素有关且用来确定其几何位置关系的理想几何要素,可由零件上一个或多个几何要素构成,其标素模型如下:

$$d(l, r, r_{av})$$

式中, l 为基准字母; r 为基准标素; r_{av} 为基准标注面。

(2)几何公差标素模型。几何公差是对几何元素

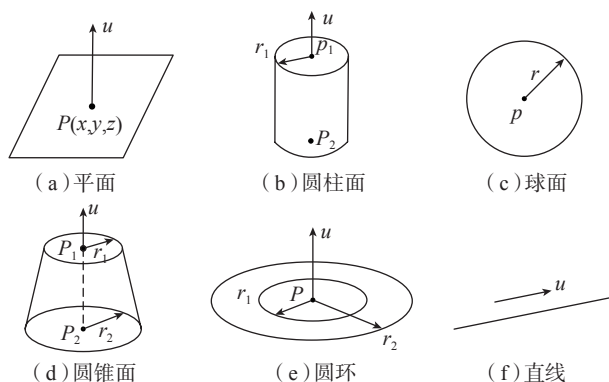


图1 标素类型及其几何信息

Fig.1 Classification and geometric information of annotation element

形状、位置、方向、轮廓和跳动的度量。几何公差标注包括公差类别、公差类型、标素、公差带大小和基准体系等其他信息,其标素模型如下:

$$\text{tol}(s, c, u, G(r_1, r_2, \dots, r_n), D(d_1, d_2, d_3), I)$$

式中, s 为几何公差类别; c 为几何公差类型; u 为公差带大小; G 为几何公差标素集; $D(d_1, d_2, d_3)$ 为公差参考基准序偶集, I 为公差值前缀修饰符、基准修饰符以及标注面等信息,其中 I 可以表示为:

$$I(p, m_u, m_d, r_n)$$

式中, p 为公差域修饰符; m_u 为公差要求修饰符; m_d 为基准要求修饰符; r_n 为几何公差标注面。根据几何公差设计的层次结构,使用几何公差标素模型提供的信息对公差标注进行合理性检查。

1.3 检查准则

(1) 基准检查准则。

基准标注检查具体包括基准是否重复定义,基准是否采用企业禁用的代号以及公差控制框中是否出现未定义基准。由基准和几何公差标素模型,建立基准定义集 $\text{DaSet}=\{l_i|i=1,2,\dots,n\}$, l_i 表示基准定义字母,公差控制框基准使用集 $\text{DRFSet}=\{p_i|i=1,2,\dots,n\}$, p_i 表示公差控制框使用字母,那么基准标注检查准则为:

准则 1 (重复基准检查准则): 记 $e_k(1 \leq k \leq n)$ 为基准定义集 DaSet 中各元素的重复度,若 $e_k=1$,则基准标注未出现重复定义,否则若 $e_k \geq 2$,则基准出现重复定义。

准则 2 (基准代号可用性准则): 已知基准不能使用代号集 $\text{NoSet}=\{E,F,I,J,M,L,O,P,R\}$, 记 InterSet 为基准定义集 DaSet 和禁用代号集 NoSet 交集,即 $\text{InterSet}=\text{DaSet} \cap \text{NoSet}$, 若 $\text{InterSet} \neq \emptyset$,则在基准定义中使用标准不能使用的代号,否则若 $\text{InterSet}=\emptyset$,那么基准标注定义正确。

准则 3 (框格基准合法性准则): 记 DifferSet 为集合 DRFSet 与基准定义集 DaSet 的减集,即 $\text{DifferSet}=\text{DRFSet}-\text{DaSet}$, 若 $\text{DifferSet} \neq \emptyset$,则公差框格中使用未定义基准,公差框格基准使用不合理,否则若 $\text{DifferSet}=\emptyset$,则框格基准定义合理。

(2) 几何公差检查准则。

几何公差标注检查具体包括标注面空间关系、几何公差类别与类型、框格基准以及修正符号、同一标素上公差值间关系。记 i 为几何公差标素集的基数,根据 GB/T 2473—2009《技术产品文件 数字化产品定义数据通则》^[13] 和 GB/T 1182—2008《产品几何技术规范 (GPS)》^[14] 等相关标准制定检查准则。

准则 4 (标注面空间关系检查准则): 已知标注面法矢 n_v 及标素法矢 n_r , 当几何公差类别 s 为形状公差时,

若 $n_v \cdot n_r=0$ 或 $n_v=n_r$,那么标注面与标素垂直、平行或共面,否则若 $n_v \cdot n_r \neq 0$ 或 $n_v \neq n_r$,则该形状公差标注面选择不合理;当几何公差类别 s 为方向或位置公差时,已知 n_r 为第一基准标素法矢,若 $n_v \cdot n_r=0$ 或 $n_v=n_r$,那么标注面与第一基准垂直或平行,即方向或位置公差标注面选择合理,否则若 $n_v \cdot n_r \neq 0$ 或 $n_v \neq n_r$,则方向或位置公差标注面选择不合理。

根据几何公差定义,模型各类几何元素上能标注的合法几何公差是有限的,整理不同类型标素能标注的几何公差并制定几何公差类型检查准则。

准则 5 (几何公差类型检查准则): 已知标素对应几何公差类型集 Ω_k , 当 $i=1$ 且标素类型 k 为平面时, $\Omega_{\text{plane}}=\{\text{直线度, 平面度, 平行度, 垂直度, 倾斜度, 圆跳动, 全跳动, 线轮廓度, 面轮廓度}\}$, 若几何公差类型 $c \in \Omega_{\text{plane}}$, 则标素对应的几何公差类型 c 不合理, 否则几何公差类型 c 选择合理; 同理当标素类型 k 为圆柱面时, $\Omega_{\text{cylinder}}=\{\text{直线度, 圆度, 圆柱度, 圆跳动, 全跳动, 线轮廓度, 面轮廓度}\}$; 当标素类型 k 为圆锥面时, $\Omega_{\text{cone}}=\{\text{直线度, 圆度, 圆跳动, 全跳动, 线轮廓度, 面轮廓度}\}$; 当标素类型 k 为球面时, $\Omega_{\text{sphere}}=\{\text{圆度, 线轮廓度, 面轮廓度}\}$; 当标素类型 k 为曲面时, $\Omega_{\text{surface}}=\{\text{线轮廓度, 面轮廓度}\}$; 当标素类型 k 为点时, $\Omega_{\text{point}}=\{\text{位置度, 同轴度}\}$; 当标素类型 k 为直线时, $\Omega_{\text{line}}=\{\text{直线度, 平行度, 垂直度, 倾斜度, 同轴度, 位置度}\}$ 。当 $i=2$ 且标素类型 k_1 和 k_2 为平面, (u 和 v 分别为两标素法矢), 若几何公差类型 c 为对称度, 则几何公差类型选择合理, 否则不合理。当 $i>2$ 时, 若标素类型 $k_i(i=1, \dots, n)$ 不相同, 则标注不合理; 若标素类型相同且几何公差类型 $c \in \Omega_k$, 那么几何公差类型选择合理, 反之不合理。

准则 6 (附加符号检查准则): 已知能够使用实体符号几何公差类型集 $\text{MLSet}=\{\text{直线度, 平面度, 倾斜度, 平行度, 垂直度, 位置度, 同轴度, 对称度}\}$, 当公差要求修饰符 m_u 或基准要求修饰符 m_d 有最大或最小实体要求符号时, 若几何公差类型 $c \in \text{MLSet}$, 则实体要求符号使用不合理, 否则使用合理。当公差域修饰符 p 有公差域符号 ϕ 时, 若几何公差类型 $c \in \{\text{直线度, 平行度, 垂直度, 倾斜度, 位置度, 同轴度}\}$, 则公差域符号使用错误, 反之使用正确。

准则 7 (控制框基准检查准则): 已知几何公差控制框中基准有序集为 $D=\{d_1, d_2, d_3\}$, j 为基准有序集基数, y_1, y_2, y_3 分别为 D 中各基准标素法矢或轴线方向。当 $j=0$ 时, 若几何公差类别 s 为形状公差, 则基准自由度约束合理, 否则若 s 为方向或位置公差, 则基准使用不合理; 当 $j \neq 0$ 时, 若几何公差类别 s 为方向或位置公差, 则基准自由度约束合理, 否则若 s 为形状公差,

那么基准使用不合理。若 $y_1 \times y_2=0$ 或 $y_1=y_2$, 即第 1、第 2 基准垂直或平行, 那么基准选择正确, 若 $y_1 \times y_3=0$ 且 $y_2 \times y_3=0$, 即第 3 基准垂直于第 1、第 2 基准, 那么基准选择正确, 否则基准选择不正确。

对同一标素上有多项几何公差要求时, 若形状、方向或位置公差共存, 那么 $u_{\text{形状}} < u_{\text{方向}} < u_{\text{位置}}$, 即形状公差值 < 方向公差值 < 位置公差值。已知各几何公差标素集的集族 Γ , 称 Γ 中全体几何公差标素集的标素组成的集合为模型几何公差标素集 A , 即 A 为集族 Γ 的广义并集。设集合 SGDTSet 为同一标素几何公差集, IAGSet 为多几何公差标素集。

准则 8 (同一标素公差值关系检查准则): 当 IAGSet $\neq \emptyset$, 即集合 IAGSet 中的标素上有多个几何公差要求, 若同一标素几何公差集 SGDTSet 中有形状、方

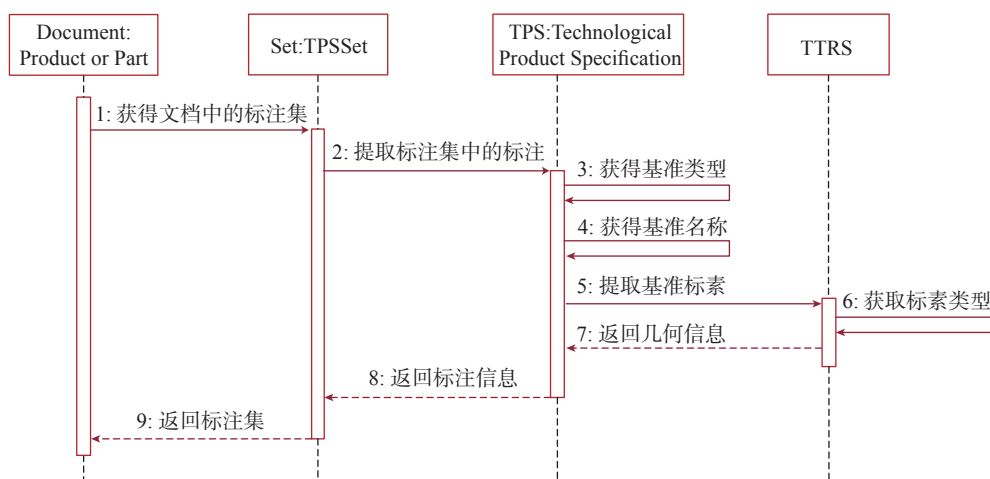
向或位置公差任意两种类型以上组合且 $u_{\text{形状}} < u_{\text{方向}}$ 或 $u_{\text{方向}} < u_{\text{位置}}$, 那么同一要素上几何公差值关系合理, 否则若 $u_{\text{形状}} > u_{\text{方向}}$ 或 $u_{\text{方向}} > u_{\text{位置}}$, 那么几何公差值关系不合理。

2 算法流程

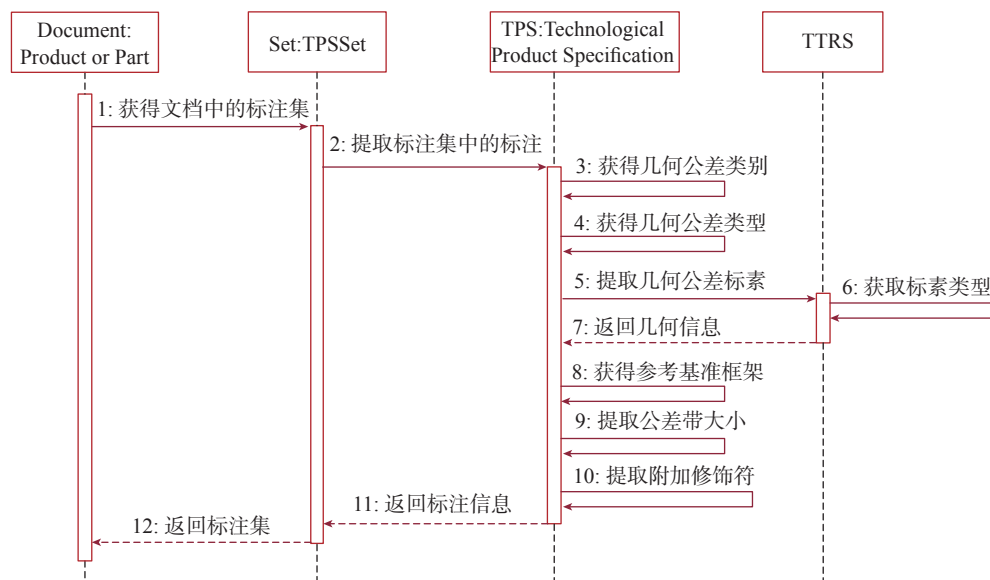
基于标素模型和检查准则, 模型几何公差标注检查过程依次为标素模型建立、基准标注检查和几何公差标注检查。首先, 对模型标注分类, 按照标注类别对标注信息和标素信息进行提取, 进而建立基准和几何公差标素模型; 其次, 依据基准检查准则, 对基准进行检查, 统计基准错误信息; 最后, 根据几何公差检查准则, 对几何公差进行检查, 记录几何公差错误信息。

2.1 标素模型建立

建立标素模型时需要从模型标注中提取相应信息,



(a) 基准标注信息提取流程图



(b) 几何公差标注信息提取流程图

图2 标注信息提取

Fig.2 Annotation information extraction

标注有尺寸、基准、几何公差以及粗糙度等类型,其对应的属性操作包含于产品技术规范(TPS)模块之中,分为语义标注和非语义标注两种^[15]。前者是符合ISO等标准的标注,并可被下游容差分配等模块识别;后者是非常规标注,无法被下游模块识别,其中可能包含错误的公差信息。根据TPS特征关系与相关信息获取接口,基准和几何公差标素模型相关数据提取方法如下:三维模型中获取标注队列对象,先判断标注是语义还是非语义,再判断标注的基本类型是尺寸、几何公差等,然后通过基本标注类的方法提取相应的数据。若公差为复合公差时,需要逐层提取公差数据。基准和几何公差标注信息提取流程如图2所示。

2.2 基准标注检查

根据基准标注检查功能,由基准标素模型提取基准代号,建立基准定义集 DaSet,并计算基准定义集 DaSet 中基准代号元素的重复度 e_k ,根据重复基准检查准则进行基准定义重复性检查,若基准定义未重复,进行基准代号可用性检查,反之将重复定义的基准标注信息添加至基准错误标注链表 DErrList;对基准定义集 DaSet 和基准禁用代号集 NoSet 求交,若交集为空集,则说明未使用禁用代号,进行公差控制框基准定义合法性检查,反之将交集的字母代号对应的基准标注信息添加至基准错误链表 DErrList;计算公差控制框基准使用集 DRFSet 与基准定义集 DaSet 的差集,若差集为空集,则框格基准定义合理,基准标注检查结束;否则将相应的错误标注信息添加至基准错误链表 DErrList。

2.3 几何公差标注检查

由几何公差标素模型,提取几何公差类别和类型、标注面和标素的几何信息。根据标注面空间关系检查

准则,对标注面进行检查,若标注面合理,则进行公差类型检查,否则将标注面选择不合理对应的标注信息添加至几何公差错误链表 TErrList;由几何公差类型检查准则,对公差类型进行检查,若类型使用合理,进行控制框基准检查,否则将公差类型错误对应的标注信息添加至几何公差错误链表 TErrList;根据控制框基准检查准则,对控制框中基准进行检查,若基准选用正确,则进行附加符号检查,否则将基准定义错误对应的标注信息添加至几何公差错误链表 TErrList;根据附加符号检查准则,对标注中的附加符号进行检查,若附加符号选用正确,进行同一标素公差值关系检查,否则将符号使用错误对应的标注信息添加至几何公差错误链表 TErrList;查找同一标素的几何公差,依据同一标素公差值关系进行检查,若公差值间关系合理,则几何公差检查结束,否则将错误标注信息添加至几何公差错误链表 TErrList。

3 实例验证

基于CATIA V5系统开发了几何公差标注检查功能模块,并将该功能模块集成于“飞机结构件三维设计模型质量检测系统”。为了测试几何公差标注检查功能,设计了如图3(a)所示的一个框类零件的错误标注案例,标有希腊数字序号的标注存在错误,标注I的垂直度公差值大于位置度公差值,标注II为选择的几何公差类型与标素不相符,标注III是位置度未使用基准,标注IV和V是使用企业禁用的基准代号,标注VI是标注面与标素不垂直。该飞机结构件包含84个标注,其中几何公差标注16个,尺寸标注23个,基准标注8个,其余为文本标注。在传统的检测模式中,检测人员需要逐条检查几何公差标注信息,首先对标素与标注面的空间

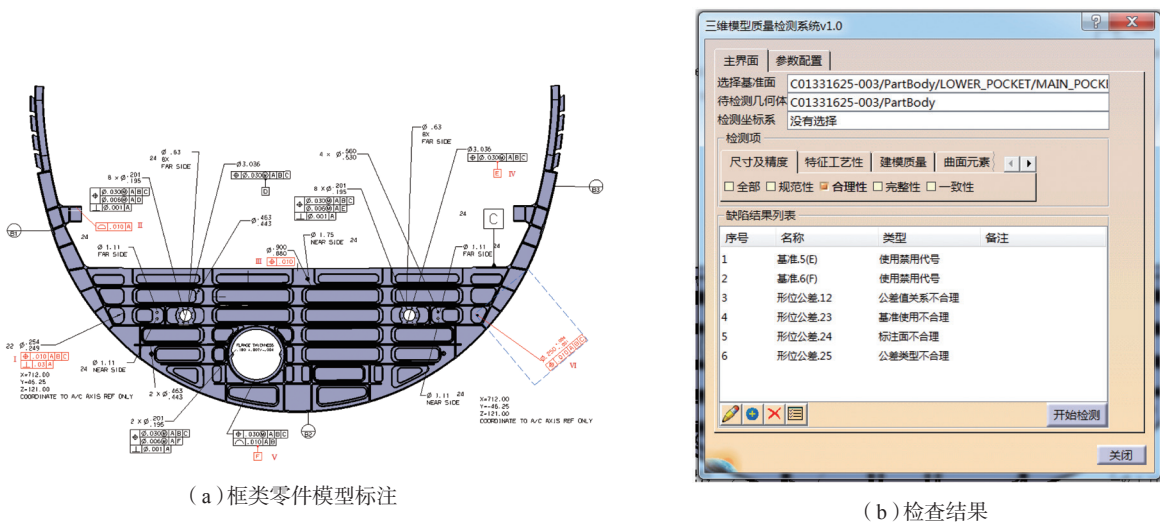


图3 几何公差标注检查实例
Fig.3 Example of geometric tolerance annotation inspection

位置关系检查,其次对基准和标注各项进行检查,记录下出错标注及其原因,并高亮显示。根据现场测试,检测人员对该零件完成整个几何公差标注检查过程耗时 279.5s,鼠标单击 42 次,视图缩放旋转 48 次。通过该检测功能模块,点击“开始检测”按钮,对标注进行自动检测,得到的标注检查结果如图 3(b)所示,实测检测人员完成相同的标注检查过程耗时 24.93s,鼠标单击 0 次,视图缩放旋转 0 次。在“标注检查结果”列表中选择某个标注,对应的不合理标注就会在模型上高亮显示,同时可点击报告生成按钮,生成结果列表中标注的详细信息报告(.html 格式)。

4 结论

为了提高标注检查效率,对常见标注错误分类归纳,提出基准与几何公差标素模型,根据国家及行业标准制定对基准标注和几何公差标注的检查准则。结合标素模型与检查准则,对几何公差标注的几何公差类型,附加符号的使用,基准选择,标注面合理性进行检查,同时对同一标素上的几何公差值之间关系检查,保证不同类别公差值之间的大小关系合理,但是未对尺寸公差值进行考虑,因此下一步考虑要对尺寸及几何公差标素规范化,并将尺寸公差值考虑入同标素公差值大小关系检查之中。

参考文献

- [1] 张宝源,席平. 三维标注技术发展概况[J]. 图学学报, 2011, 32(4): 74-79.
- [2] ZHANG Baoyuan, XI Ping. The state of the art of 3D annotating technology[J]. Journal of Graphics, 2011, 32(4): 74-79.
- [3] 曲直,田宪伟,李春威. MBD 技术在飞机设计中的应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 103-106.
- [4] QU Zhi, TIAN Xianwei, LI Chunwei. Application of MBD technology in aircraft design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 103-106.
- [5] CHENG Y, NI Z, LIU T, et al. An intelligent approach for dimensioning completeness inspection in 3D based on transient geometric elements[J]. Computer-Aided Design, 2014, 53(5): 14-27.
- [6] 王勃,郑国磊,段丽华. 轴类零件三维尺寸自动标注算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 829-834.
- [7] WANG Bo, ZHENG Guolei, DUAN Lihua. Automatic dimensioning for 3D model of shaft-like parts[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 829-834.
- [8] 朱一舟,张为民,李国伟. 三维 CAD 中几何公差自动判别技术研究[J]. 现代制造工程, 2011(3): 9-12.
- [9] ZHU Yizhou, ZHANG Weimin, LI Guowei. The automatic identification for geometric tolerance function in 3D-CAD[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(3): 9-12.
- [10] 覃裕初,钟艳如,常亮,等. 基于几何公差描述逻辑的公差类型的自动生成[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(7): 1490-1499.
- [11] QIN Yuchu, ZHONG Yanru, CHANG Liang, et al. Automatic generation of tolerance types based on geometric tolerance description logic[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(7): 1490-1499.
- [12] 蒋科,刘检华,宁汝新,等. 基于多色集合理论的几何公差信息推理及其规范性验证[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3): 593-605.
- [13] JIANG Ke, LIU Jianhua, NING Ruxin, et al. Geometric tolerance reasoning and its specification verification based on polychromatic sets theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(3): 593-605.
- [14] 吴玉光,刘玉生. 面向公差技术的几何要素自由度表示与操作及其应用[J]. 中国机械工程, 2015, 26(11): 1509-1515.
- [15] WU Yuguang, LIU Yusheng. DOF representation and operation of geometric feature and its applications for tolerance technology[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(11): 1509-1515.
- [16] ARMILLOTTA A. A method for computer-aided specification of geometric tolerances[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45: 1604-1616.
- [17] 陈靖乐,杜宝瑞,叶柏超,等. 基于 UG 的检测模型未注公差自动完善研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(17): 90-92.
- [18] CHEN Jingle, DU Baorui, YE Baichao, et al. Research on automatic improvement of undeclared tolerance of inspection model based on UG[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(17): 90-92.
- [19] 赵皇进,郑国磊,段丽华. 数字化环境下装配尺寸链分析的几何方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(1): 104-108.
- [20] ZHAO Huangjin, ZHENG Guolei, DUAN Lihua. A geometric method for assembly dimension chain analysis in digital environment[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(1): 104-108.
- [21] 郑洪涌,郑国磊,赵皇进. 三维公差分析中工程尺寸驱动原理与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(1): 138-142.
- [22] ZHENG Hongyong, ZHENG Guolei, ZHAO Huangjin. Principle and application of functional dimension driving in 3D tolerance analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(1): 138-142.
- [23] GB/T 24734.1~11—2009 技术产品文件数字化产品定义数据通则[S].
- [24] GB/T 24734.1~11—2009 Technical product documentation—Digital product definition data practices[S].
- [25] GB/T 1182—2008 产品几何技术规范(GPS)几何公差—形状、方向、位置和跳动公差标注[S].
- [26] GB/T 1182—2008 Geometric product specifications(GPS) Geometrical tolerancing—Tolerances of form, orientation, location and runout[S].
- [27] 陈卓宁,秦宁,徐同明. 面向三维机加工工艺规划系统的 CATIA 模型 MBD 数据提取和应用[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(9): 213-218.
- [28] CHEN Zhuoning, QIN Ning, XU Tongming. Extraction and application of CATIA model MBD data oriented to three-dimensional machining process planning system[J]. Computer System & Applications, 2014, 23(9): 213-218.

通讯作者: 郑国磊, 博士、教授, 主要研究方向为智能 CAD、工装智能设计, E-mail: zhengguolei@buaa.edu.cn.

(责编 大漠)