

三维零件模型工程尺寸完备性检查算法

罗 磊, 刘 远, 郑国磊*

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)
(luolei188@126.com, zhengguolei@buaa.edu.cn)

摘 要: 三维模型定义技术的发展使得设计和制造逐渐走向三维化, 为了确保设计和加工数据的完整性, 实现三维标注尺寸完备性的自动检查, 提出一种基于参数化建模映射关系的尺寸完备性自动检查算法. 首先建立工程尺寸集和建模参数集之间的映射关系, 利用牛顿迭代法求解其映射矩阵; 其次对映射矩阵化简, 建立映射矩阵与尺寸完备性之间的关系; 最后通过分析化简后的映射矩阵来完成尺寸完备性检查判断. 在 CAITA 系统上进行实例分析测试, 验证了该算法的正确性和有效性.

关键词: 三维标注; 映射矩阵; 尺寸约束; 尺寸完备性

中图法分类号: TP391.7

DOI: 10.3724/SP.J.1089.2018.16851

Algorithm for Inspection of Engineering Dimensioning Completeness on 3D Part's Model

Luo Lei, Liu Yuan, and Zheng Guolei*

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

Abstract: With the development of 3D model definition technology, complete dimensioning plays an important role in digital product design and manufacturing. To ensure the integrity of design and processing data and achieve the automatic inspection of dimensioning completeness on 3D part's models, a novel algorithm of dimensioning completeness inspection is proposed here based on the mapping relation in the parametric modeling. First the mapping is established by analyzing the relation between sets of modeling parameters and engineering dimensions, and the mapping matrix is solved by Newton method. Then the mapping matrix is simplified by the row elementary transformations, and the judge principle of dimensioning completeness is established by mathematic methods in the analysis of the relationship between the simplified mapping matrix and the dimensioning completeness. Finally, the algorithm for inspection of dimensioning completeness is developed based on the judge principle. The correctness and effectiveness of the proposed approach is verified via the tests on some representative 3D parts based on the CAITA V5 system.

Key words: 3D dimension; mapping matrix; dimension constraint; dimensioning completeness

工程图作为产品设计和制造工艺信息传递的依据, 在制造加工过程中起着不可替代的作用. 尺寸标注作为工程图纸的重要组成部分, 是零件加工的主要依据, 其用于零件结构、精度和形状特征等的精确表达. 在工程实际中, 解决各种标注问题

占绘图工作量的 40%~60%^[1], 复杂零件的其尺寸标注过程不仅烦琐, 而且工作量大, 容易出现尺寸漏标、错标或冗余^[2]的情况.

为减少工作量, 提高工作效率和尺寸标注的准确率^[3], 国内外学者对尺寸标注及其检查技术进

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2018-01-12. 罗 磊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM; 刘 远(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM, 增材制造; 郑国磊(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为数字化制造、CAD/CAM、工装智能设计等.

建模参数集必然满足唯一性和完整性, 是一个完全约束集; 而在设计过程中, 需要对影响产品功能的关键尺寸进行修改, 而这些关键尺寸的修改往往通过更改尺寸约束的数值来实现. 因此, 对于模型 M 的建模参数集 C_p , 其对应的尺寸数值集 V_p 必然能实现这些关键尺寸的修改.

对于工程尺寸集 C_D , 由于与建模参数集是同一模型的不同约束集, 又由于 C_p 是一个完全约束集, 因此所对应的尺寸数值集 V_p 和 V_D 之间存在一定的映射关系. 郑洪涌等^[23]论证了映射关系的存在性并给出对映关系为 $V_D = H_{DP}(V_p)$.

由于尺寸数值集 V_p 是完备的, 能准确地表达模型 M 的形状和位置参数, 因此尺寸集 V_D 中的每一个元素的 d_i 都可以用 V_p 中的元素来表示, 即

$$\begin{cases} H_{d_1 p}(p_1, p_2, \dots, p_n) = d_1 \\ H_{d_2 p}(p_1, p_2, \dots, p_n) = d_2 \\ \vdots \\ H_{d_m p}(p_1, p_2, \dots, p_n) = d_m \end{cases} \quad (2)$$

将上述关系看做多元函数非线性方程组, 采用牛顿迭代法求解该非线性尺寸方程组^[24]. 由于尺寸链方程的特殊性, 使得其方程都可以分解为线性方程组, 且不存在发散问题^[25]. 通过逐一对每个函数方程进行泰勒展开, 然后取其二阶展开, 舍去无穷小项, 可得到尺寸集 V_p 和 V_D 的微量之间的线性映射关系, 用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \vdots \\ \Delta d_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{d_1 p}}{\partial p_1} & \frac{\partial H_{d_1 p}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial H_{d_1 p}}{\partial p_n} \\ \frac{\partial H_{d_2 p}}{\partial p_1} & \frac{\partial H_{d_2 p}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial H_{d_2 p}}{\partial p_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial H_{d_m p}}{\partial p_1} & \frac{\partial H_{d_m p}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial H_{d_m p}}{\partial p_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, 等号右侧的雅各比矩阵为建模参数集尺寸微量到工程尺寸集尺寸微量的映射矩阵, 记为 A_{DP} .

由多元函数方程与尺寸微量之间的关系可知, 若工程尺寸集 V_p 中的尺寸 d_i 与建模参数集尺寸 V_D 中的尺寸 $p_1, p_2, \dots, p_k$ 存在函数关系, 即尺寸 d_i 可以用尺寸 $p_1, p_2, \dots, p_k$ 表示, 则对应的尺寸微量 Δd_i 必然可以用 $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_k$ 线性表示; 反之, 若尺寸微量 Δd_i 可以用尺寸微量 $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_k$ 线性表示, 则尺寸 d_i 与尺寸 $p_1, p_2, \dots, p_k$ 存在函数对映关系.

1.2 尺寸完备与映射矩阵的关系

对于一个尺素个数为 n 三维模型 M , 设建模参

数集 C_p 对应的尺寸数值集为 $V_p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 工程尺寸集 C_D 所对应的尺寸数值集为 $V_D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$. 将尺寸集 V_p 和 V_D 中的每一个尺寸看做是一个约束方程, 分别建立形同式(1)的相应尺素方程组

$$\begin{cases} F_k(g_1, g_2, \dots, g_n) = p_1 \\ F_k(g_1, g_2, \dots, g_n) = p_2 \\ \vdots \\ F_k(g_1, g_2, \dots, g_n) = p_n \end{cases} \quad (4)$$

和

$$\begin{cases} F_k(g_1, g_2, \dots, g_n) = d_1 \\ F_k(g_1, g_2, \dots, g_n) = d_2 \\ \vdots \\ F_k(g_1, g_2, \dots, g_n) = d_m \end{cases} \quad (5)$$

由于建模参数是完备的, 模型所有尺素都被唯一确定, 方程组(4)有唯一解, 因此对于该方程组中的每一个未知量 g_i , 都可以用 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 来唯一的表示. 将式(4)中 $g_1, g_2, \dots, g_n$ 的求解结果代入到式(5)中, 可得 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 关于 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的方程组, 从而可将关于 $g_1, g_2, \dots, g_n$ 的方程组转化为关于 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的方程组. 因此, 可根据关于 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 和 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的方程组的解问题判断尺寸完备性. 由于在第 1.1 节中分析论证了三维模型 M 的尺寸集 V_p 和 V_D 之间存在如式(2)的对映关系, 将其看做是关于 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的方程组, 于是可根据 V_p 和 V_D 之间的对映关系判断尺寸完备性问题. 由于尺寸集对应微量之间存在线性映射关系, 可用 A_{DP} 表示, 根据尺寸集与其微量之间的微分关系, 映射矩阵与尺寸完备性也存在间接的关系, 可根据映射矩阵来判断尺寸完备性. 下面分析 A_{DP} 与工程尺寸集完备性的关系.

根据尺寸完备性与尺素方程以及尺素方程之间的关系可得, 若工程尺寸集 C_D 对应的尺寸数值集 V_D 是完备的, 能实现模型的完全约束, 则其对应式(2)有唯一解. 又由于非线性方程组有唯一解的充分必要条件^[25]是其雅各比矩阵为非奇异矩阵, 因此若工程尺寸集完备, 则 A_{DP} (即雅各比矩阵)可逆. 反之亦成立.

因此, 对于任意三维模型 M , 工程尺寸集 C_D 完备的充分必要条件为 A_{DP} 可逆.

1.3 尺寸不完备与映射矩阵的关系

在分析尺寸不完备的问题之前, 先引入尺寸相关性的概念.

定义 2. 设尺寸集 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 中的任意一个尺寸 $c_n (i=1, 2, \dots, k)$ 都不能用其他尺寸表示, 则称尺寸集 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 不具相关性; 否则, 称该尺寸集具有相关性.

对于尺寸不完备的情况, 可将其分为尺寸冗余和尺寸缺失 2 种.

为了清晰、直观地分析 A_{DP} 与尺寸缺失和冗余及其所在位置的关系, 对 A_{DP} 进行化简处理: 先通过矩阵的初等行变换, 将 A_{DP} 化为行最简矩阵形式 A'_{DP} ; 然后将初等行变换过程中发生行交换的行逆序再次行交换; 最后得到 A''_{DP} .

下面分别对尺寸冗余和缺失与 A_{DP} 以及 A''_{DP} 的关系进行分析.

1.3.1 尺寸冗余

通过对尺寸冗余的情况分别进行分析可以得出, 尺寸冗余的根本原因是标注的尺寸之间形成闭环, 闭环尺寸链中的尺寸具有相关性, 即任一尺寸可用其他尺寸表示和代替, 造成尺寸冗余问题.

根据尺寸冗余的原因分析可得, 若尺寸集 V_D 存在尺寸冗余, 则至少存在一组尺寸之间形成闭环. 而闭环中的尺寸具有相关性, 环内任一尺寸可用其他尺寸表示和代替, 因此对应的尺寸集 $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 具有相关性, 存在尺寸 d_i 可以用其他尺寸表示. 根据尺寸之间的多元函数与尺寸微量之间的关系, 若尺寸 d_i 可用其他尺寸 $d_1, d_2, \dots, d_k$ 表示, 则对应的尺寸微量 Δd_i 必然可用尺寸微量 $\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_k$ 线性表示, 又由尺寸微量与映射矩阵的关系可得, 若 Δd_i 可用 $\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_k$ 线性表示, 则采用上述化简后的 A''_{DP} 第 i 行可被其他行抵消, 使得 A''_{DP} 第 i 行元素全为 0.

反之, 由若化简后 A''_{DP} 第 i 行元素全为 0, 亦可推得, 尺寸微量 Δd_i 可以用其他尺寸微量 $\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_k$ 线性表示, 于是尺寸 d_i 也可用其他尺寸 $d_1, d_2, \dots, d_k$ 表示, 尺寸集 $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 具有相关性, 尺寸 d_i 冗余. 因此, A''_{DP} 元素全为 0 的行对应尺寸冗余的位置.

对尺寸冗余情况的分析可知, 尺寸集中每形成一个封闭尺寸环, 就会导致一个尺寸冗余, 即对应 A''_{DP} 中 1 行元素全都为 0. 因此, 若化简后的 A''_{DP} 中有 k 行元素全为 0 则对应尺寸集中 k 个冗余尺寸.

1.3.2 尺寸缺失

通过对尺寸缺失的情况进行分析可以得出,

尺寸缺失的根本原因是模型尺寸约束集中不相关的尺寸的个数少于尺素的个数, 导致模型存在尺素不被完全约束, 模型不能被唯一确定, 造成尺寸缺失问题.

根据对尺寸缺失的原因分析可知, 若尺寸集 V_D 存在尺寸缺失, 则尺寸集 V_D 中不相关尺寸的个数必然小于 n . 建立如式(2)所示的方程组, 则对应不相关方程的个数小于 n . 根据尺寸微量与多元函数方程组之间的关系可得, A_{DP} 的秩 $R(A_{DP}) < n$, A_{DP} 不可逆.

反之, 若 A_{DP} 的秩小于 n , 亦可推得, 尺寸集 $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 中不具相关性的尺寸的个数小于 n , 对应尺素约束方程组的解不唯一, 模型不被唯一确定, 存在尺寸缺失.

由矩阵理论中行最简形矩阵定义及性质可知, 对于一个 m 行 n 列的矩阵, 其行最简形矩阵秩小于 n 分为 3 种情况: 存在 1 列或者多列元素全为 0; 至少存在一行有 2 个及以上元素不为 0; 以上 2 种情况同时存在.

将化简后 A''_{DP} 的秩小于 n 分为以上 3 种情况分别进行讨论, 分析其与尺寸缺失位置的具体关系.

设经过化简变换后, 式(3)中的矩阵映射关系转化为

$$\begin{bmatrix} \Delta d_1'' & \Delta d_2'' & \cdots & \Delta d_m'' \end{bmatrix}^T = A''_{DP} [\Delta p_1 \quad \Delta p_2 \quad \cdots \quad \Delta p_n]^T.$$

(1) 若 A''_{DP} 存在元素全为 0 的列. 假设 A''_{DP} 第 i 列元素全为 0, 可得尺寸微量 $\Delta d_1'', \Delta d_2'', \dots, \Delta d_m''$ 中没有与 Δp_i 对应的尺寸微量. 由于所作的都是初等行变换, 根据化简前后的对应关系不难得出, 尺寸微量 $\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_m$ 中没有与 Δp_i 对应的尺寸微量, 又根据尺寸微量与尺寸之间的关系可知, 任意修改尺寸 p_i , 尺寸集 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 中没有与之相对应的尺寸变动, 说明尺寸集 $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 中没有与尺寸 p_i 相对应的约束. 因此 p_i 对应的位置缺少约束, V_D 存在尺寸缺失. 尺寸缺失位置即为尺寸 p_i 所在的位置, 即元素全为 0 列所对应的位置.

(2) 若矩阵某行存在 2 个及以上元素不为 0. 假设 A''_{DP} 第 i 行有多个元素不为 0, 则化为最简形式映射关系的第 i 行表达式中, $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_m$ 中多个元素只对应一个化简后 $\Delta d_1'', \Delta d_2'', \dots, \Delta d_m''$ 中的一个元素 $\Delta d_i''$. 根据化简前后映射矩阵与方程组解之间的关系可知, 对式(2)进行化简求解, 则化为最简形式的方程组中第 i 个方程中包含多个未知数, 因此原方程的解不唯一, 存在尺寸缺失. 尺寸缺失

位置即为该行多个不为 0 元素所对应的位置。且根据以上分析可得, 若 A_{DP}'' 某行存在 k 个元素不为 0, 即对应 k 个尺寸只有 1 个尺寸约束, 则会导致缺少 $k-1$ 个尺寸。

(3) 若 A_{DP}'' 既存在元素全为 0 列, 也存在有 2 个及以上元素不为 0 的行, 则可将其分成以上 2 种情况分别求缺失尺寸位置, 在此不再赘述。

1.4 完备性判定准则

由以上分析可以看出, 矩阵可逆对应尺寸完备的情况, 而且每种映射矩阵不可逆的情况都对应存在尺寸不完备问题, 从而可根据映射矩阵来判断尺寸完备性。由此, 根据上述尺寸完备性与映射矩阵关系, 以及化简后的映射矩阵 A_{DP}'' , 给出尺寸完备性的具体判定准则:

(1) 尺寸完备。若化简后 A_{DP}'' 的行数与列数相等, 且矩阵中不存在元素全为 0 的行或列, 则映射矩阵可逆, 工程尺寸集是完备的; 否则, 尺寸不完备。

(2) 尺寸冗余。若化简后 A_{DP}'' 存在元素全为 0 的行, 则工程尺寸集存在冗余, 且元素全为 0 行即对应尺寸冗余的位置。

(3) 尺寸缺失。若化简后 A_{DP}'' 的秩小于矩阵的列数, A_{DP}'' 存在元素全为 0 的列或 2 个及以上元素不为 0 的行, 则工程尺寸集存在缺失, 且元素全为 0 的列和 2 个及以上不为 0 的行元素即对应尺寸缺失的位置。

2 本文算法

三维零件模型工程尺寸完备性检查算法流程如图 2 所示。该算法主要包括映射关系建立、映射矩阵化简和尺寸完备性判断 3 个部分。

2.1 映射矩阵求解

在映射关系建立过程中, 很关键的一步是映射矩阵的求解。本文采用牛顿迭代法对映射矩阵进行求解, 具体步骤如下:

Step1. 提取模型建模参数集中的关键尺寸, 得到对应的尺寸数值集 $V_P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 以及标注集中的工程尺寸, 得到相应的尺寸数值集 $V_D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 。

Step2. 取 V_P 中一个尺寸 p_1 , 修改其尺寸值, 使之增加一个微小值 Δp_1 , 其余尺寸值保持不变, 即令 $p'_1 = p_1 + \Delta p_1$, $\Delta p_1 \neq 0$, $p'_i = p_i + \Delta p_i$, $\Delta p_i = 0$, $i = 2, 3, \dots, n$ 。

Step3. 执行 Step2 后, V_D 中的相关尺寸也会随之发生变动。获取更新后的尺寸数值集 $V'_D = \{d'_1, d'_2, \dots, d'_m\}$ 。

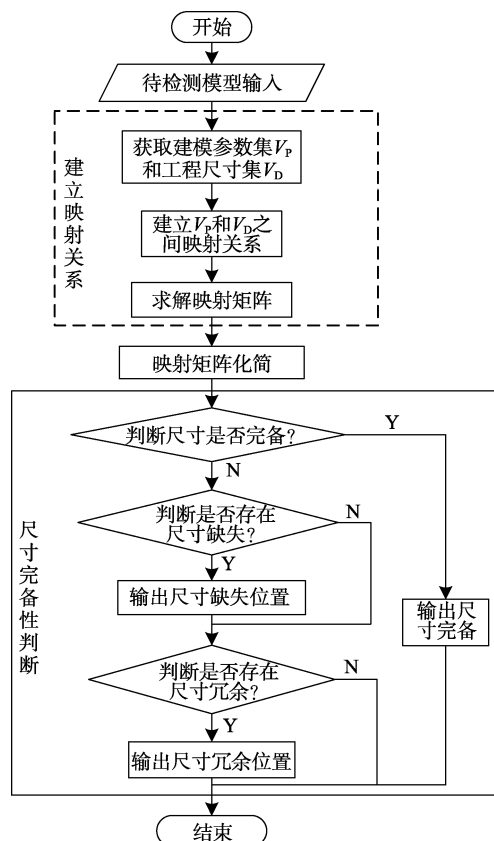


图 2 本文算法流程图

Step4. 再次修改尺寸 p_1 值, 令其减小 Δp_1 , 使之回到原初始参数值, 其余尺寸值保持不变, 更新尺寸数值集 V'_D 使之回到原始状态 V_D 。

Step5. 依次计算 V'_D 中所有的尺寸数值的变动: $\Delta d_j = d'_j - d_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

Step6. 计算 A_{DP} 第 1 列 $a_1 = [a_{11} \ a_{21} \ \dots \ a_{n1}]^T$ 中各元素的数值: $a_{j1} = \Delta d_j / \Delta p_1 (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

Step7. 同理, 分别单独改变 $p_2, p_3, \dots, p_n$ 的值, 令 $\Delta p_i \neq 0$, $\Delta p_j = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$, $i \neq j$, 可依次计算矩阵 A_{DP} 第 i 列 a_i 各项元素的数值。

Step8. 综合 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 的各列元素, 求得矩阵 A_{DP} , $A_{DP} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$ 。

2.2 映射矩阵化简

为了方便矩阵完备性判断时快速地找出尺寸缺失和尺寸冗余的位置, 在求得 A_{DP} 后需进行化简。首先将其化简为行最简形矩阵, 然后将行变换过程中发生交换的行换回原对应的位置。具体步骤如下:

Step1. 对 A_{DP} 进行初等行变换, 将其化为行最简形 A'_{DP} , 并记录化简过程中发生过行交换的行。即如果在化简过程中第 i 行与第 j 行发生过行交换, 则记录下第 i 行与第 j 行的位置 i, j 。

Step2. 逆序对化简过程中发生交换的行再次进行交换, 让其回到原对应的位置. 即如果在化简过程中 A_{DP} 第 i 行与第 j 行发生过行交换后, 第 j 行又与第 k 行发生行交换, 则先将 A_{DP} 第 k 行与第 j 行进行行交换, 然后将第 j 行与第 i 行进行行交换.

Step3. 完成后得到化简后的 A_{DP}'' .

2.3 尺寸完备性判断

在完成上述流程的基础上, 根据化简后的 A_{DP}'' 对尺寸完备性进行判断, 具体步骤如下:

Step1. 若 A_{DP}'' 的行数与列数相等(即 $m=n$), 且不存在元素全为 0 的行, 则判断为尺寸完备, 检查结束; 否则, 尺寸不完备, 执行下一步对尺寸冗余和尺寸缺失进行检查.

Step2. 若 A_{DP}'' 存在某行元素全为 0, 则判断存在尺寸冗余. 该元素全为 0 的行对应尺寸的位置即为冗余尺寸所在的位置.

Step3. 若 A_{DP}'' 元素不全为 0 的行数小于矩阵的列数, 则判断存在尺寸缺失. 若 A_{DP}'' 存在某列元素全为 0, 则该列对应尺寸缺失位置; A_{DP}'' 某行存在 2 个及以上非 0 元素, 则该行非 0 元素所对应尺寸的位置也为尺寸缺失位置.

3 实例分析

本文算法基于 CATIA V5 系统开发及实现, 并在多个具有不同特征的零件模型上进行测试, 验证了该算法的有效性.

算法的具体应用验证过程如下:

Step1. 载入待检查的三维零件标注模型.

Step2. 选取零件模型的参考坐标系.

Step3. 对该模型执行尺寸完备性检查. 若尺寸完备, 则弹出对话框显示“尺寸完备”; 若存在尺寸缺失或尺寸冗余, 则弹出对话框显示“尺寸缺失”和“尺寸冗余”以及所在位置, 对于冗余尺寸并在模型中用红色特殊标明其位置.

本文以图 3~图 4 中的零件为例说明尺寸完备性检查过程, 并对该算法进行分析验证. 图 3a 和图 4a 所示都是工程中典型的零件模型, 为了验证本文算法在尺寸存在缺失与冗余时检查结果的正确性, 对图 3a 的零件标注尺寸时, 设置尺寸 d_7 和 d_{21} 这 2 处尺寸冗余以及 p_6 处一个尺寸缺失. 为了验证尺寸完备时检查结果的正确性, 将图 4a 设计为一个标注完备的零件模型. 采用本文的算法对图 3a 和图 4a 所示的零件模型执行尺寸检查后, 其检查结果分别如图 3b 和图 4b 所示.

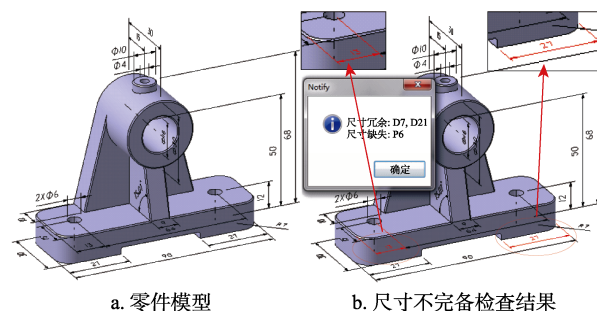


图 3 尺寸不完备的零件模型及检查结果

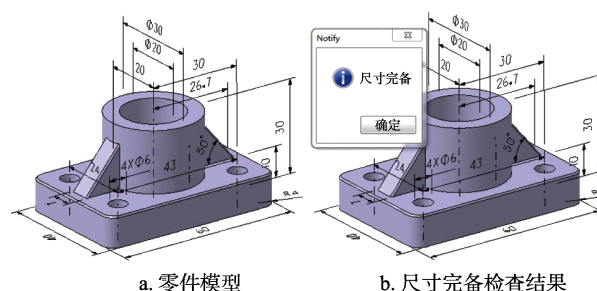


图 4 尺寸完备的零件模型及检查结果

从图 3~图 4 可以看出, 在执行对图 3a 所示的零件检查后, 弹出了对话框显示尺寸缺失和冗余及其对应位置, 并用红色特殊标记出冗余的尺寸, 说明对尺寸缺失和冗余的检查结果正确; 在执行对图 4a 所示的零件检查后, 弹出了对话框显示尺寸完备, 检查结果正确.

由测试结果可以看出, 本文算法能够实现尺寸完备性的自动检查, 且所检查出来的尺寸缺失和尺寸冗余的结果与实际标注存在的问题相符, 检查结果正确, 验证了该算法的正确性和有效性.

4 结 语

为实现三维尺寸标注完备性的自动检查, 本文提出了基于参数化建模映射关系的三维尺寸完备性检查算法, 根据映射矩阵与尺寸完备性之间的关系将尺寸完备性问题转化为映射矩阵问题, 通过分析化简后的映射矩阵判断尺寸完备性. 实例测试结果表明, 该算法能正确地检查出三维标注中的尺寸缺失和冗余问题, 并能准确地找到缺失和冗余尺寸的位置. 本文算法目前尚无法正确实现对具有如螺纹、齿轮等由标准参数生成的特征的尺寸完备性检查, 以及对简化标注中存在复合尺寸标注的零件模型的完备性检查, 对这些问题还有待进一步研究.

参考文献(References):

- [1] Ni Jianhong. The study and realization of several key technologies in 3D dimensioning[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005(in Chinese)
(倪健红. 三维尺寸标注中若干关键技术的研究及其实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2005)
- [2] Tan Zhen. Study on completeness testing of dimensioning in 2D drawing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008(in Chinese)
(谭 祯. 二维工程图尺寸完备性检查的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008)
- [3] Xu Jinglin, Zheng Guolei, Wang Bo. Rapid three-dimensional annotation based on GB/T 24734[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(5): 138-142(in Chinese)
(许璟琳, 郑国磊, 王 勃. 基于 GB/T24734 的三维尺寸快速标注技术[J]. 图学学报, 2013, 34(5): 139-143)
- [4] Zhang Shuyou, Zhuo Yong. The research on logical coordinate-based redundancy of dimensions in multi-views[J]. Journal of Engineering Graphics, 1997, 18(4): 66-70(in Chinese)
(张树有, 卓 勇. 基于逻辑坐标的多视图尺寸冗余性判别[J]. 工程图学学报, 1997, 18(4): 66-70)
- [5] Ji Yangjian, Zhang Shuyou, Tan Jianrong. Completeness testing of dimensioning in multi-views based on space coordinate transformation[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2001, 13(6): 561-565(in Chinese)
(纪杨建, 张树有, 谭建荣. 基于空间坐标转换模型的多视图尺寸完备性检查[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(6): 561-565)
- [6] Zhou Wanmin, Yu Minzhi. One method of completely marking and checking dimensions[J]. Mechanical Engineer, 2002(3): 39-40(in Chinese)
(周万民, 于敏之. 完全标注、检查尺寸的新方法[J]. 机械工程师, 2002(3): 39-40)
- [7] Liu Cantao, Wang Shuchun. A new algorithm for testing the dimension closure[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 1997, 9(5): 467-471(in Chinese)
(刘灿涛, 汪叔淳. 尺寸封闭性检验的新算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1997, 9(5): 467-471)
- [8] Cheng Bin, Wang Yongping. Study on completeness testing of multi-view dimension based on merger of directed graph[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2004, 36(2): 246-249(in Chinese)
(成 彬, 王永平. 图归并的多视图尺寸完备性判别方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2004, 36(2): 246-249)
- [9] Liu Ming, Dou Zhongqiang. An algorithm about dimensions closure inspection[J]. Journal of Engineering Graphics, 2005, 26(6): 31-35(in Chinese)
(刘 铭, 窦忠强. 检验工程图中尺寸封闭的算法[J]. 工程图学学报, 2005, 26(6): 31-35)
- [10] Sui T Z, Tan Z, Wang L, *et al.* A method for completeness testing of dimensioning in 2D drawing[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 319: 351-355
- [11] van der Meiden H A, Bronsvoort W F. A constructive approach to calculate parameter ranges for systems of geometric constraints[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(4): 275-283
- [12] Hidalgo M, Joan-Arinyo R. Computing parameter ranges in constructive geometric constraint solving: implementation and correctness proof[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(7): 709-720
- [13] Cheng Y L, Ni Z H, Liu T Y, *et al.* An intelligent approach for dimensioning completeness inspection in 3D based on transient geometric elements[J]. Computer-Aided Design, 2014, 53(8): 14-27
- [14] Liu X J, Xing J L, Cheng Y L, *et al.* An inspecting method of 3D dimensioning completeness based on the recognition of RBs[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 42(1): 271-288
- [15] Chen K Z, Feng X A, Lu Q S. Intelligent location-dimensioning of cylindrical surfaces in mechanical parts[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(3): 185-194
- [16] Yang Bo. Dimension maturity check-up and automatic calculation to engineering drawing based on restriction theory and CR graph[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2004(in Chinese)
(杨 勃. 基于约束原理和 CR 图的工程图尺寸信息完备性检验和自动计算[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2004)
- [17] Tang Jie. Research on key technologies of 3d intelligent dimensioning and automatic generation of dimension chain[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014(in Chinese)
(唐 杰. 三维尺寸自动标注及尺寸链提取关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014)
- [18] Hoffmann C M, Sitharam M, Yuan B. Making constraint solvers more usable: overconstraint problem[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(4): 377-399
- [19] Luisa Martínez M, Féliz J. A constraint solver to define correctly dimensioned and overdimensioned parts[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(13): 1353-1369
- [20] Podgorelec D, Žalik B, Domiter V. Dealing with redundancy and inconsistency in constructive geometric constraint solving[J]. Advances in Engineering Software, 2008, 39(9): 770-786
- [21] Cheng Yalong, Liu Xiaojun, Liu Jinfeng, *et al.* Completeness testing of three-dimensional dimensions using rigid solid recognition[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(2): 351-361(in Chinese)
(程亚龙, 刘晓军, 刘金锋, 等. 利用刚性体识别的三维尺寸标注完备性检查[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(2): 351-361)
- [22] 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(in Chinese)
(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)
- [23] 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(in Chinese)
(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)
- [24] Zhang Xu. Some iterative methods for solving system of non-linear equations[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014(in Chinese)
(张 旭. 求解非线性方程组的几种迭代方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014)
- [25] He Jingxi. The theory and application of complex dimensional chain analyses and calculation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003(in Chinese)
(何景熙. 复杂尺寸链分析计算理论及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2003)