

基于模型定义的三维模型信息完备性检查技术研究

刘泉泉¹ 方喜峰^{1*} 程德俊¹ 张胜文¹ 罗兰珍² 孔俊龙¹

1.江苏科技大学机械工程学院,镇江,212100

2.镇江康飞汽车制造股份有限公司,镇江,212132

摘要:针对三维模型信息标注不规范、结构差异难诊断、尺寸冗余缺失以及人工检测效率低等问题,提出了整体的完备性检查方法。通过调用三维计算机辅助设计(CAD)软件应用程序接口(API)函数,对三维CAD软件的检查功能模块进行二次开发,完成对基于模型定义(MBD)技术中三维模型信息的检查与纠正;通过二次开发CAD软件实现对MBD模型基本方向视图的自动捕获,再通过Python调用OpenCV库,将新捕获的视图与数据库中已有模型视图利用图像结构相似性(SSIM)指标进行对比,得到最相似模型视图图像,将两者通过图像减法运算对结构差异区域进行提取并高亮显示;最后对三维模型尺寸按照分类规则分类,通过深度优先搜索(DFS)算法结合尺寸冗余缺失检查规则,完成尺寸的完备性检查。以某厢舱汽车产品为对象验证了所提方法的可行性。

关键词:基于模型定义;完备性检查;二次开发;结构相似性指标;深度优先搜索算法

中图分类号:TP391

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Information Completeness Checking Technique of 3D Model for MBD

LIU Quanquan¹ FANG Xifeng^{1*} CHENG Dejun¹ ZHANG Shengwen¹

LUO Lanzhen² KONG Junlong¹

1.School of Mechanical Engineering,Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang,Jiangsu,212100

2.Zhenjiang Kangfei Automobile Manufacturing Co.,Ltd.,Zhenjiang,Jiangsu,212132

Abstract: Aiming at the problems of non-standard information labeling, difficult diagnosis of structural differences, lack of dimensional redundancy and low efficiency of manual detection for 3D model information, a holistic completeness check method was proposed. By calling the application programming interface(API) functions of the 3D computer-aided design(CAD) software, secondary development of the inspection modules was carried out to complete the inspection and correction of 3D model information for MBD technology. Automatic capture of the basic direction view of the MBD model was realized through secondary development of CAD software, and then OpenCV library was called through Python to compare the newly captured view with the existing model view in the database by using the image SSIM, and the most similar model view image was obtained. The structural difference areas between two images were extracted and highlighted through image subtraction operation. Finally, the sizes of the 3D model were classified according to the classification rules, and the size completeness check was completed by DFS algorithm combined with the size redundancy missing check rule. The feasibility of the proposed method was verified by taking a cabin car product as an object.

Key words: model-based definition(MBD); completeness check; secondary development; structural similarity index metric(SSIM); depth-first search(DFS) algorithm

0 引言

基于模型定义(model-based definition, MBD)技术是以集成的三维实体模型完整表达产品信息的一种定义方式^[1],它摒弃以往“二维为主、三维

为辅”的设计制造模式,使三维MBD模型成为数字化制造唯一的数据源,对产品的工艺规划、加工指导的方式、生产车间的管理等产生巨大影响^[2]。具有直观、简洁、数据源唯一特性的MBD模型成为生产制造的新趋势,目前许多大型企业已经开始应用MBD技术进行全三维模式的生产,如何实现三维MBD模型的智能完备性检查成为保证生产制造的重要一环。

收稿日期:2024-04-15

基金项目:国家自然科学基金(52305060);国防基础科研项目(A0720133010);江苏科技大学2023年度研究生教育教学改革研究课题(YJG2023Z_01)

为提高完备性检查效率与准确率,国内外学者进行了大量研究,并取得了阶段性的研究成果。燕哲等^[3]针对目前三维尺寸标注完备性检验存在的冗余判断不够完整和复杂模型检查效率低等问题,提出等价尺寸集与等价节点概念,实现了一种基于等价尺寸的三维标注完备性检验算法。张胜文等^[4]针对三维 MBD 技术存在的结构复杂、人工检查难度大等问题,提出了一种尺寸标注完备性检查及尺寸链分析技术。罗磊等^[5]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,建立工程尺寸集与建模参数集之间的映射关系,利用牛顿迭代法求解映射矩阵,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。LIU 等^[6]提出了一种基于轨迹相交法识别刚体的检测方法,并通过微分轨迹法建立了基本几何元素的最小缺失维数提取过程,用于智能自动检测三维模型尺寸的完整性。

针对 MBD 模型整体的完备性检查问题,目前仍缺乏一套完整的、有效的检查方法,因此,本文提出调用三维计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)软件应用程序接口(application programming interface, API)函数^[7],对三维 CAD 软件功能模块进行二次开发以完成对 MBD 模型信息基础规范性的检查;接着通过二次开发三维 CAD 软件对 MBD 模型进行视图捕获,通过

Python 调用 OpenCV 库,运用图像结构相似性指标(structural similarity metric, SSIM)来选取数据库中最相似模型,SSIM 指标值越接近 1,表明模型结构越相似。将相似模型图像与新模型图像作图像减法^[8],得到差异区域坐标并返回三维 CAD 软件对模型相应区域进行高亮显示。当计算后的 SSIM 指标值在区间 $[0, 0.4]$ 范围内时,则认为该模型为高创新结构模型,即数据库中存在的已有模型与此模型差异过大,系统将会弹窗提示,并将所有差异区域进行高亮显示;最后将 MBD 模型尺寸按照视图捕获的方向与标注角度进行分类,将分类的尺寸进行预处理后通过深度优先搜索(depth-first search, DFS)算法结合尺寸冗余缺失检查规则完成对 MBD 模型尺寸的完备性检查。本文以某型号厢舱汽车部件为对象,结合三维 CAD 软件与自行开发的系统验证了该方法的有效性。

1 总体框架

为保证完备性检查的规范性、正确性、完整性,本文提出的三维 MBD 模型完备性检查包括三部分内容,分别为 MBD 模型规范性检查、MBD 模型差异性检查、MBD 模型尺寸完备性检查。MBD 模型完备性检查的总框架见图 1。

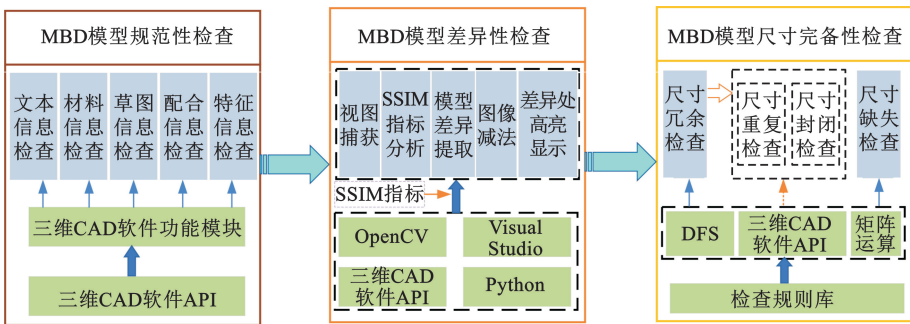


图 1 完备性检查框架

Fig.1 Completeness check framework

1) MBD 模型规范性检查。该部分保证 MBD 模型在生产中符合国家与企业的生产规范,草图、配合等基本元素不出错,避免图层、材料等信息的缺失。该模块主要是对三维 CAD 软件中检查功能模块进行二次开发,通过调用 API 函数遍历模型中所有文本信息、材料信息、草图信息、配合信息等内容,并与企业标准进行对比,不符合标准的内容进行提取并特殊显示,然后根据规范标准进行错误内容自动纠正。

2) MBD 模型差异性检查。该部分主要对新

MBD 模型与企业已投入生产的相似模型之间的结构进行差异检测^[9]。首先需要调用 API 函数完成对 MBD 模型基本视图的捕获,将捕获的视图数据处理后与 Open CV 数据库中已有模型的数据通过 SSIM 指标进行评定,SSIM 指标值越接近 1,表明捕获的视图与已有模型的视图越相似,证明待检测 MBD 模型与数据库中已有 MBD 模型越相似,从而出现结构差异的可能性越小。将两者视图图像通过图像减法得到差异区域坐标,最后返回三维 CAD 软件将检测到的差异结构在新 MBD 模型上高亮显示。

3) MBD 模型尺寸完备性检查。MBD 模型尺寸完备性检查包括尺寸的冗余检查、尺寸的缺失检查两部分,其中尺寸的冗余检查分为同一尺寸重复多次标注与尺寸标注多余形成封闭尺寸链这两种形式^[10]。此模块首先对 MBD 模型上的尺寸进行预处理,按照制定的分类方式将其分类,并以矩阵的形式进行数据存储,然后通过 DFS 算法、矩阵运算^[11]、API 函数结合制定的检查规则库完成对 MBD 模型尺寸的完备性检查。

2 关键技术

2.1 MBD 模型规范性检查

此部分主要对 MBD 模型的基本信息进行检测,包括文本格式、标注箭头格式、产品制造信息是否缺失^[12]等。规范性检查流程如图 2 所示。

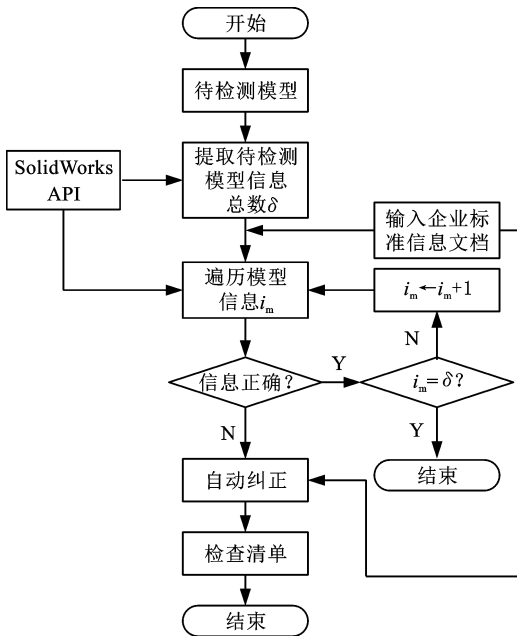


图 2 规范性检查流程

Fig.2 Normative inspection process

首先调用三维 CAD 软件的 API 来获取检查内容相关的函数,如文本格式函数 Get_Text_Format(·)、单位函数 Get_User_Unit(·)、图层函数 Get_Layer_List(·)等,按照获取函数的顺序分别遍历上述基本信息,将得到的每条信息与企业标准文档进行对比,信息格式若相同则进行下一基本信息的遍历;若不同,则进行自动纠正,并生成错误信息清单。如此循环,直至遍历完成所有基本信息内容。

2.2 MBD 模型差异性检查

在生产过程中同一类型的产品结构往往改动较小,符合客户产品要求的新模型与企业投入生产的已有模型之间可能只存在着微小的结构差

异,但对每个具有相似模型的新模型进行重新标注费时费力,未利用到已经投入生产的相似模型是对已有资源的浪费。为改变这种情况,本文提出 MBD 模型差异性检查技术,通过检查出新模型与已经投入生产的相似旧模型之间的结构差异可以快速进行各类信息的提取与应用,以减少人工检查模型结构与人工重新标注三维模型的工作量。

2.2.1 结构相似性指标

结构相似性指标(SSIM)是一种衡量两幅图像相似性的指标,分别从图像的亮度、对比度和结构三方面综合度量两幅图像之间的相似程度^[13-14],从而得到符合人眼感知的客观相似性评价^[15]。

SSIM 指标中亮度指标计算公式为

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (1)$$

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \mu_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

SSIM 指标中对比度指标计算公式为

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_y = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

SSIM 指标中结构指标计算公式为

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

将式(1)、式(2)、式(3)相乘得到 SSIM 指标的表达式为

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (4)$$

式中: l 、 c 、 s 分别为亮度指标、对比度指标及结构指标; $SSIM(x, y)$ 表示结构相似性指标,其中 x 、 y 分别为被捕获视图的图像数据和数据库中的图像数据,SSIM 指标的取值范围为 $[0, 1]$ ^[6]; μ_x 为被捕获视图图像的像素均值; μ_y 为数据库中相似图像的像素均值; σ_x 为被捕获视图的像素标准差; σ_y 为数据库图像的像素标准差; σ_{xy} 为两幅图像的像素协方差; N 为数据总数; i 为数据序号; x_i 、 y_i 分别为被捕获视图中第 i 个数据的数据值和数据库内图像的第 i 个数据的数据值; C_1 、 C_2 、 C_3 均为不为零的常数。

2.2.2 MBD 模型差异性检查流程

通过 SSIM 指标进行模型差异性检查的技术路线图见图 3,具体步骤如下。

1) 通过调用 API 函数对新 MBD 模型视图进行自动捕获,捕获视图的数量 Q 。往往需要通过零件或装配体的结构复杂程度来决定,一般情况

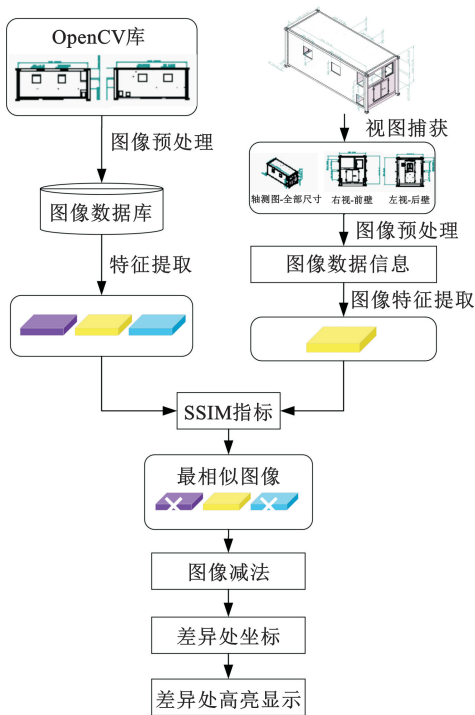


图 3 模型差异性检查

Fig.3 Model difference check

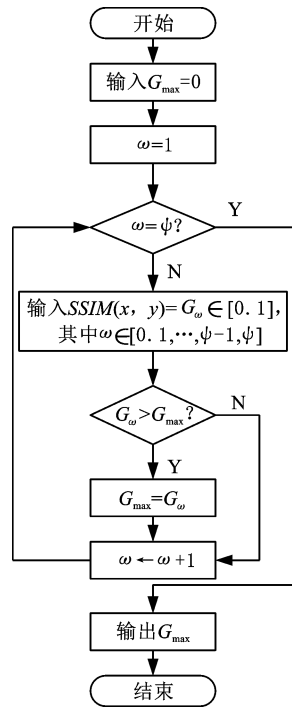


图 4 SSIM 指标判定流程

Fig.4 SSIM indicator determination process

下 $Q_c \geq 3$ 。

2) 将捕获的视图利用 OpenCV 中的 `cv2.imread('image1.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)` 函数进行加载并灰度化处理, 此函数的第二参数为 `cv2.IMREAD_GRAYSCALE`, 可直接将加载的图像灰度化, 无需二次灰度处理。

3) 调用 `image.resize(·)` 函数对模板图像及检测图像的尺寸进行重新设置^[16], 将图片调整为相同大小。

4) 将数据库中的图像按上述同样步骤进行处理后, 依据式(4)计算两个灰度图像之间的 SSIM 指标。

5) 经过 SSIM 指标判定后从数据库中选出与待检测 MBD 模型图像最相似的 MBD 模型图像^[9]。与待检测图像计算得到 SSIM 指标最大值 G_{max} 的图像为最相似图像, 如图 4 所示。

6) 调用 OpenCV 中封装的函数 `subtract(·)` 进行图像减法^[8]。在数字图像处理方面, 每张图像都被看成一个三维的矩阵, 将两张图像之间的矩阵进行相减得到差异区域。

7) 将步骤 6) 得到的差异区域使用标记函数 `cv2.rectangle(·)` 进行标记, 并应用 `plt.imshow(·)` 函数在图像上对差异区域进行高亮显示。

8) 返回到三维 CAD 软件并调用 API 函数中 `Highlight(·)` 函数对 MBD 模型中对应差异区域的差异结构进行高亮显示。

2.3 MBD 模型尺寸完备性检查

尺寸标注的主要作用是精确地描述零件的结构特征、形状特征和精度特征, 其质量将直接影响产品生命周期各个阶段的顺利运行, 因此尺寸的完备性检查也一直是计算机辅助设计/计算机辅助工艺规划 (computer aided process planning, CAPP) 领域研究的重要问题^[17]。

对于结构复杂的零件或装配体, 三维空间尺寸标注非常复杂, 对整体模型实现一次性完备性检查比较困难, 计算机识别压力较大, 因此本文提出三维 MBD 模型尺寸转化的方法, 即将三维模型尺寸转化为各基本平面视图方向的尺寸^[17], 并按规则将尺寸进行分类的方法。

首先将 MBD 模型的尺寸进行转化, 将遍历后的尺寸集按制定的分类规则分类后进行存储, 获取分类后的尺寸数据与尺寸节点^[11]坐标值, 并以矩阵形式存储数据值; 获取转化后的尺寸节点坐标值后, 利用深度优先搜索 (DFS) 算法结合制定的尺寸完备性检查规则对同类型尺寸进行冗余缺失检查; 最后将检查到的问题尺寸进行反馈。尺寸完备性检查流程如图 5 所示。

2.3.1 MBD 模型尺寸转化

将三维尺寸标注转化在模型基本视图平面区域上, 根据尺寸转化规则, 使用计算机记录为多个 z 阶尺寸矩阵, 并根据矩阵的特性将尺寸的位置和大小映射到相应的矩阵内, 如图 6 所示。

MBD 模型尺寸转化按照模型视图方向将尺寸

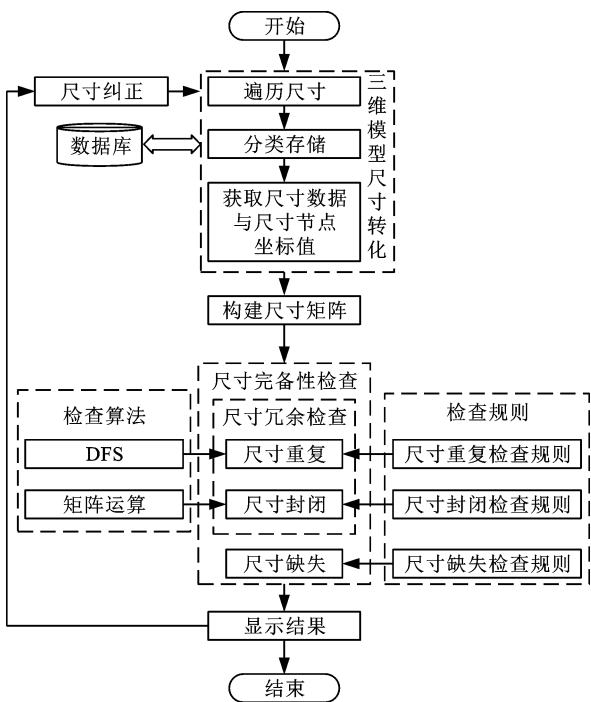


图 5 尺寸完备性检查流程

Fig.5 Dimensional completeness check procedure

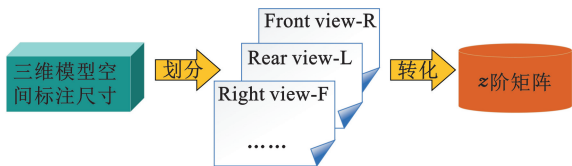


图 6 MBD 模型尺寸转化流程

Fig.6 MBD model size conversion process

分别划分在 Front view(前视)、Rear view(后视)、Right view(右视)等基本视图平面内,转化后的尺寸将视为在单视图区域进行尺寸完备性检查。

2.3.2 非线性尺寸分解

尺寸类型可分为线性尺寸、非线性尺寸两种类型^[17],其中线性尺寸有长度尺寸、宽度尺寸、高度尺寸等,非线性尺寸有角度尺寸^[18](图 7a)、直径尺寸(图 7b)等。针对非线性尺寸,需要通过虚拟分解的方式转化为线性尺寸进行判断。

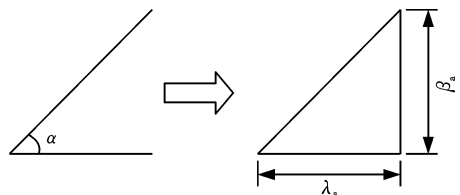
MBD 模型上的非线性尺寸经过虚拟分解后,待查尺寸总数表示如下:

$$L = M + \sum_{e=1}^t N_e \quad (5)$$

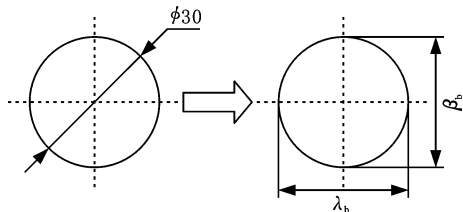
式中: L 为所有待查尺寸的数量; M 为原有线性标注尺寸的数量; e 为非线性尺寸号; N_e 为第 e 个非线性尺寸分解转化后的数量; t 为非线性标注尺寸的数量。

2.3.3 MBD 模型尺寸分类与数据存储

将转化后的单视图区域作为父节点、标注尺寸角度作为子节点进行尺寸分类,如图 8 所示。然后按照尺寸类型进行尺寸遍历,获取尺寸的基



(a)角度尺寸分解



(b)直径尺寸分解

图 7 尺寸分解示意图

Fig.7 Dimensional decomposition diagram

本信息并构建尺寸矩阵,最终尺寸信息以矩阵的形式进行数据存储,可表示为

$$H_{m-q} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1f} & \dots & a_{1z} \\ a_{21} & 0 & \dots & a_{2f} & \dots & a_{2z} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{w1} & a_{w2} & \dots & a_{wf} & \dots & a_{wz} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{z-1} & a_{z-2} & \dots & a_{z-f} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,矩阵 H_{m-q} 的存储形式以第 m 个视图区域、第 q 个标注尺寸角度为例,阶数 z 为第 m 个视图区域的第 q 个标注尺寸角度的尺寸总节点数,矩阵内元素 a_{wf} 为第 w 、 f 两节点间标注尺寸的具体数值大小。矩阵对角线元素 $w=f$ 没有意义,赋值为 0。主对角线两旁的次对角线元素数值上相同,即 $a_{wf} = a_{fw}$ 。

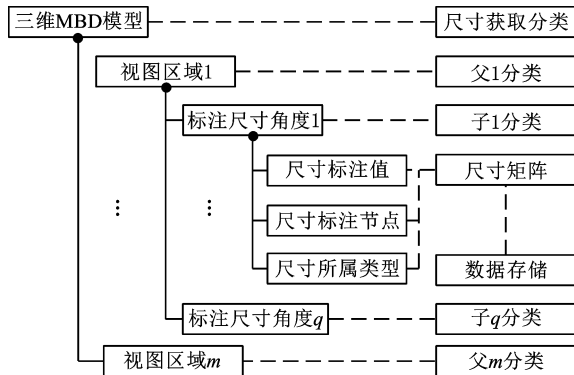


图 8 尺寸分类存储结构

Fig.8 Size sort storage structure

2.3.4 深度优先搜索算法

深度优先搜索(DFS)算法是一种用于遍历或搜索树或图的算法,它从起始节点开始,尽可能深地探索每个分支,直到达到目标节点或是不能再继续深入为止^[19]。DFS 算法通常采用递归或栈

的方式实现,其步骤如下:

- 1) 选择起始节点。从图或树中选择一个起始节点作为搜索的起点。
- 2) 标记节点。标记起始节点为已访问。
- 3) 搜索相邻节点。从当前节点开始,探索与其相邻的未被访问的节点。
- 4) 递归或栈操作。如果采用递归实现,则递归地对相邻节点进行深度优先搜索;如果采用栈实现,则将相邻节点压入栈中,并选择其中一个节点作为当前节点后,继续探索。
- 5) 回溯。当无法继续深入时,回溯到上一个节点,继续探索其他未被访问的分支。
- 6) 重复步骤 3)~步骤 5),直到遍历完所有可达节点或找到目标节点为止。

2.3.5 尺寸冗余检查规则

尺寸的冗余检查分为同一尺寸重复多次标注、尺寸标注多余形成封闭尺寸链这两种形式^[6],下文对两种情况分别讨论。

2.3.5.1 尺寸重复

每个非线性尺寸分解后与线性尺寸皆对应两个节点,对于同一类型尺寸,多个同类型尺寸若存在标注节点相同的情况,则可视为尺寸间存在重复标注的情况^[20]。判别流程如图 9 所示,具体步骤如下。

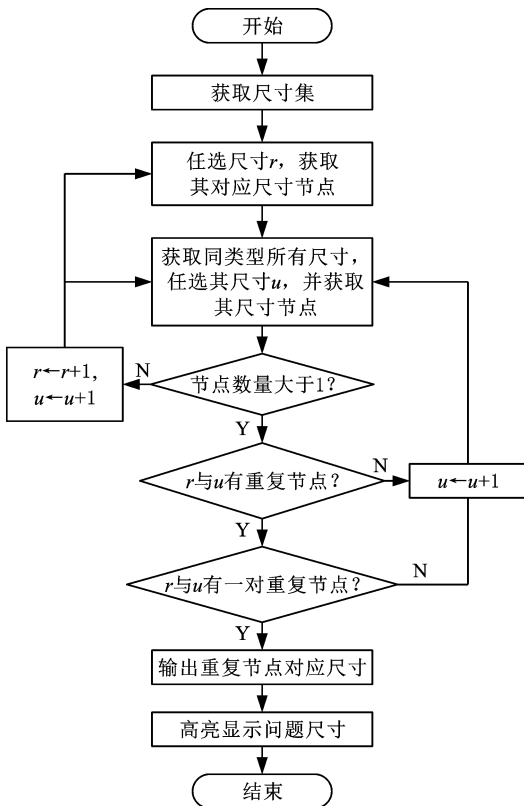


图 9 尺寸重复检查流程

Fig.9 Dimensional repeat check process

- 1) 获取所有尺寸数据集并在其中任选尺寸 r , 获取 r 尺寸对应的节点。
- 2) 获取与 r 同类型的所有尺寸并从中任选尺寸 u , 获取 u 尺寸对应的节点。
- 3) 判断尺寸 r 与尺寸 u 的节点数量是否大于 1, 节点数量大于 1 的尺寸进行步骤 4), 节点数量小于或等于 1 的尺寸返回步骤 2) 进行下一尺寸节点数量的判断。
- 4) 判断尺寸 r 与尺寸 u 是否有重复节点, 若有重复节点, 则进行步骤 5), 若没有重复节点, 则进行其他同类型尺寸的遍历。
- 5) 判断尺寸 r 与尺寸 u 是否有一对重复节点, 若有一对重复节点, 则此对重复节点对应的尺寸即为重复尺寸; 若没有一对重复节点, 则进行其他同类型尺寸的判断, 如此循环。
- 6) 将输出的重复尺寸进行高亮显示。

2.3.5.2 尺寸封闭

判断尺寸是否封闭时,需将遍历的同类型尺寸的标注节点进行编号,如图 10 所示。

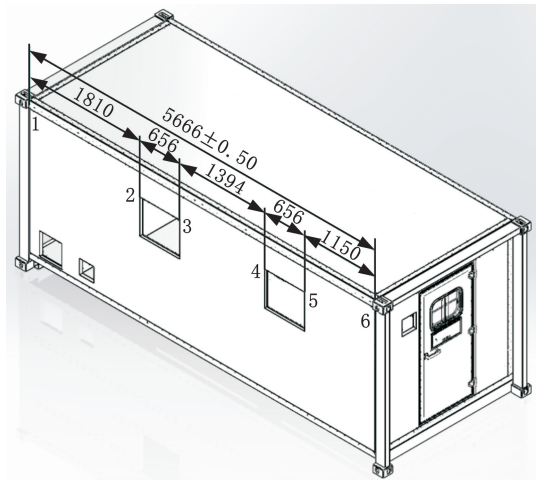


图 10 尺寸封闭示意图

Fig.10 Dimensional closure diagram

将舱带窗面作为视图区域 1、水平标注角度作为标注尺寸角度 1,将尺寸数据以矩阵 H_{1-1} 的形式进行展示与存储。若生成矩阵的次对角线元素之和与此矩阵的最左下元素或最右上元素的数值相同,则证明此尺寸链冗余,并显示为审查尺寸。生成的 6×6 矩阵如图 11 所示。

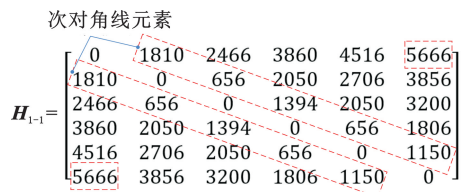


图 11 矩阵运算示意图

Fig.11 Matrix operation diagram

此方法仅用于条形尺寸闭合链的快速检测，对环形的尺寸闭合不起作用。环形尺寸标注闭合需要根据闭合尺寸链中各尺寸标注节点首尾相接的特性来制定检查规则。假设某平面有环形尺寸闭合链，则任选链中一尺寸作为遍历的起始尺寸，选择该尺寸的任一标注节点作为封闭环的起始点，利用 DFS 算法搜索与该起始标注点首尾连接的尺寸，标记每条搜索路线的终点，以此循环，若有某条路线的终点与起始点重合，则此路线为环形封闭链。

2.3.6 尺寸缺失检查规则

三维标注尺寸缺失是指在三维标注过程中漏标、错标尺寸，使零件模型缺少形状尺寸导致此零件无法生产或装配体模型缺失位置尺寸导致无法进行装配与定位的情况。针对 MBD 模型标注尺寸缺失的情况，本文按照前文节点数量关系来创建公式从而进行尺寸缺失的判断。

假如某标注平面区域有 k 个标注节点，则在不存在尺寸标注冗余的情况下，应有 $k - 1$ 个尺寸对其进行完全约束^[21]，故尺寸缺失数目的判断如下：

$$\left. \begin{aligned} v - p < k - 1 & \quad d = k - 1 - v + p \\ v - p = k - 1 & \quad d = 0 \\ v - p > k - 1 & \quad \text{情况不存在} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： v 为总尺寸数量； p 为冗余尺寸数量； d 为缺失尺寸数量。

该检查方法可以计算出同类型尺寸链所缺失的尺寸数量，如果尺寸有缺失，则将该尺寸链虚化显示，方便缺失尺寸的查找。以图 12 所示的舱体壁板为例具体说明（为方便具体尺寸链展示，此 MBD 模型隐藏其他标注信息）。

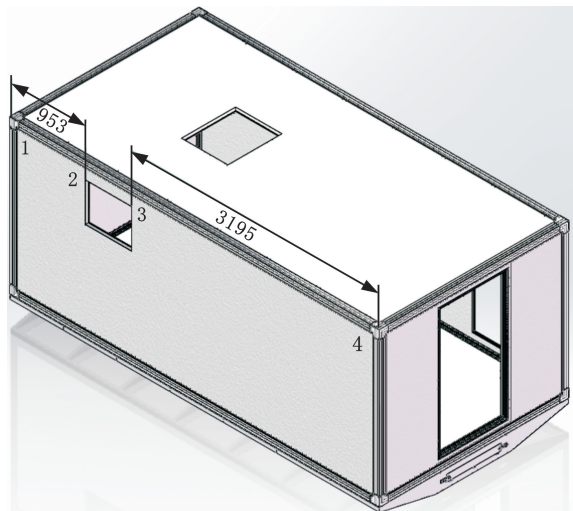


图 12 尺寸缺失示意图

Fig.12 Missing dimension diagram

首先对此 MBD 模型的尺寸进行预处理，遍历每个尺寸后按照标注平面区域与标注尺寸角度对尺寸进行分类，获取待测类型尺寸数量与对应的标注节点，对每个标注节点由 1~4 进行编码，由于该模型没有需要进行尺寸分解的非线性尺寸，并且也没有冗余尺寸的存在，所以 $p = 0, k = 4, v = 2$ 。由此可计算出 $d = 4 - 1 - 2 + 0 = 1$ ，且由计算结果得知该舱体壁板长度尺寸链存在尺寸缺失的情况，且缺失数量为 1。如图 12 所示，该舱体壁板缺少一个窗的长度尺寸或壁板的总长度尺寸。

3 实验验证

本文模型以某型号厢舱货车底架为例，三维 CAD 软件以 SolidWorks 为例，通过 Visual Studio 调用 SolidWorks API 函数，结合 Python 与 Open CV 库完成了对此厢式货车底架 MBD 模型的基本信息规范性检查、结构差异性诊断以及尺寸的完备性检查，如图 13 所示。

该厢式货车底架 MBD 模型的竖直方向有三个不同标注区域的尺寸链，水平方向有两处不同标注角度的尺寸链，按分类方法对尺寸链依次遍历，检查尺寸标注问题。首先对模型中所有标注信息进行遍历并与制定的企业标准文档进行对比，将不符合条件的基本信息及其格式进行检查并自动纠正；然后按照基本视图方向对 MBD 模型进行视图捕获，利用 SSIM 指标从数据库中得到已经投入生产的最相似 MBD 模型，提取最相似 MBD 模型视图图像与前面捕获的新 MBD 模型视图图像作图像减法，以此找出结构差异区域，并调用 SolidWorks API 函数返回 SolidWorks 软件对差异区域结构进行高亮显示，如图 13 所示；最后将此模型的所有尺寸进行遍历，按照模型标注区域与标注角度两元素对尺寸进行分类，获取同类型尺寸数与标注节点数，并以矩阵的形式进行数据存储，按照上述检查规则对同类型尺寸进行遍历，分别用高亮尺寸线、显示审查尺寸、虚线来表示尺寸重复、封闭、缺失三种错误尺寸，检查信息显示在文档中，并以 Excel 形式将检查详细信息导出，如图 14 所示。图 13 中，(f) 尺寸具有重复标注节点，为尺寸重复的标注错误；(H5)、(H9)、(f) 组成的尺寸链经矩阵运算检查出尺寸封闭的错误；(H2)、(H4)、(f) 尺寸链通过式 (7) 中 $d = k - 1 - v + p = 6 - 1 - 4 + 0 = 1$ 计算出缺失尺寸数为 1。

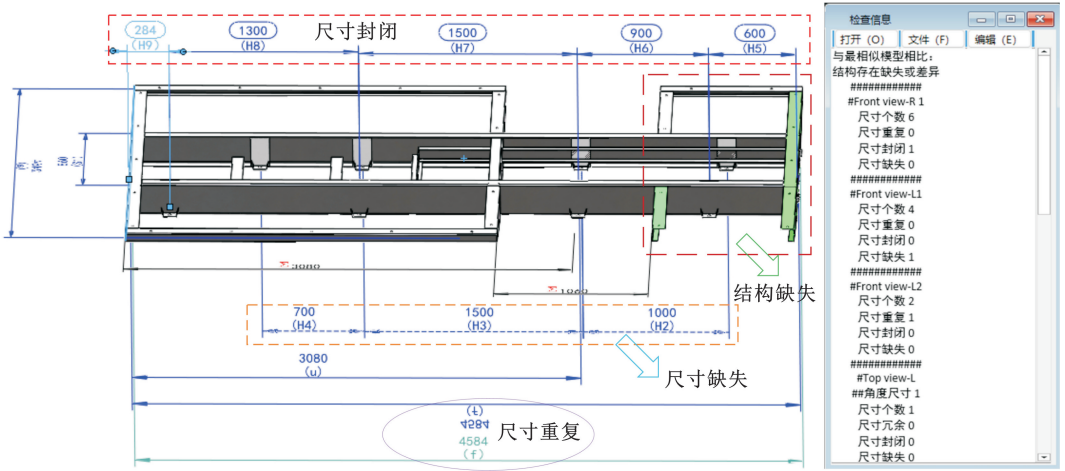


图 13 完备性检查实例

Fig.13 Completeness check example

	A	B	C	D	E	F	G
1	视图	角度	尺寸个数	节点个数	尺寸重复	尺寸封闭	尺寸缺失
2	Front view-R1		6	6	0	1	0
3	Front view-L1		4	5	0	0	1
4	Front view-L2		2	2	1	0	0
5	Top view-L	1	1	2	0	0	0
6	Top view-L	2	1	2	0	0	0
7	Top view-F	1	1	2	0	0	0
8	Top view-F	2	1	2	0	0	0

图 14 详细信息表格

Fig.14 Detailed information form

4 结论

本文面对基于模型定义(MBD)模型的完备性检查问题提出了一套系统的解决方法,该方法贯穿三维 CAD 软件二次开发的同时结合相应算法、数学模型以及提出的检查规则,解决了 MBD 模型的基本信息规范性问题、模型结构诊断问题以及尺寸的完备性检查问题。得到如下结论:

1)通过 Visual Studio 平台调用应用程序接口(API)函数对三维 CAD 软件 MBD 模块的检查功能进行二次开发,对照企业已有的标准文件进行检查与纠正,实现了对 MBD 模型基本信息的完备性检查。

2)通过结构相似性(SSIM)指标判断并找到与新模型最相似的已有模型案例,然后结合图像减法找到两者结构的差异区域,最后调用 API 函数返回三维 CAD 软件作出标记。

3)对 MBD 模型尺寸预处理后进行分类并以矩阵的形式存储数据,通过提出的尺寸冗余缺失检查规则结合深度优先搜索算法与矩阵运算方法完成了对 MBD 模型的尺寸完备性检查。

参考文献:

[1] WAN N, MO R, LIU L, et al. New Methods of Creating MBD Process Model: on the Basis of Machining Knowledge [J]. Computers in Industry, 2014, 65(4):537-549.

[2] RUEMLER S P, ZIMMERMAN K E, HARTMAN N W, et al. Promoting Model-based Definition to Establish a Complete Product Definition[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(5):051008.

[3] 燕哲,董玉德,何金鑫,等.面向三维模型 的尺寸标注完备性检查算法[J].中国机械工程, 2023, 34(16):1967-1974.

YAN Zhe, DONG Yude, HE Jinxin, et al. Dimensioning Completeness Checking Algorithm for 3D Models[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(16):1967-1974.

[4] 张胜文,尤炎炎,李滨城,等.数字化设计与制造 三维 MBD 模型尺寸完备性检查及分析技术研究 [J].图学学报,2020,41(4):599-605.

ZHANG Shengwen, YOU Yanyan, LI Bincheng, et al. Dimensional Completeness Checking and Analysis of 3D MBD Models for Digital Design and Manufacture[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(4): 599-605.

[5] 罗磊,刘远,郑国磊.三维零件模型工程尺寸完备 性检查算法[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(9):1748-1754.

LUO Lei, LIU Yuan, ZHENG Guolei. Algorithm for Inspection of Engineering Dimensioning Completeness on 3D Part's Model [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(9):1748-1754.

[6] LIU X, XING J, CHENG Y, et al. An Inspecting Method of 3D Dimensioning Completeness Based on the Recognition of RBs[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 42:271-288.

[7] 李中凯,殷文卫.基于 3D CAD 模型的设计结构矩 阵自动化生成系统[J].计算机工程与科学,2020,

- 42(3):483-492.
- LI Zhongkai, YIN Wenwei. An Automatic Design Structure Matrix Generation System Based on 3D CAD Model[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(3):483-492.
- [8] 胡将胜, 侯建华. 基于区域标注的车牌提取算法研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(2):378-382.
- HU Jiangsheng, HOU Jianhua. Research on Vehicle License Plate Extraction Algorithm Based on Region Annotation[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(2):378-382.
- [9] 郭亮, 沈文平, 杨滔, 等. 面向 MBD 模型的相似匹配方法研究[J]. 现代制造工程, 2023(8):99-107.
- GUO Liang, SHEN Wenping, YANG Tao, et al. Research on Similarity Matching Method for MBD Model [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(8):99-107.
- [10] 尤炎炎. 船用柴油机关键件尺寸完备性检查及公差优化设计技术研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2020.
- YOU Yanyan. Research on Dimensional Completeness Check and Tolerance Optimization Design Technology of Key Parts of Marine Diesel Engine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [11] 杨波, 尚俊芝, 马宁, 等. 尺寸关联更改传播路径生成方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13):1530-1538.
- YANG Bo, SHANG Junzhi, MA Ning, et al. Generation Method of Dimension Correlation Change Propagation Paths[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(13):1530-1538.
- [12] 朱广涛. 基于三维模型的 PMI 信息提取及应用技术研究[D]. 廊坊:北华航天工业学院, 2018.
- ZHU Guangtao. Research on PMI Information on Extraction and Application Technology Based on 3D Model[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2018.
- [13] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-612.
- [14] TANG Y, REN F, PEDRYCZ W. Fuzzy C-Means Clustering through SSIM and Patch for Image Segmentation[J]. Applied Soft Computing Journal, 2020, 87:105928.
- [15] BAKUROV I, BUZZELLI M, SCHETTINI R, et al. Structural Similarity Index (SSIM) Revisited: a Data-driven Approach [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 189:116087.
- [16] 尹玉梅. 基于感知哈希的图像相似检索算法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.
- YIN Yumei. Research on Image Similarity Retrieval Algorithm Based on Perceptual Hashing [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [17] 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(6):561-565.
- JI Yangjian, ZHANG Shuyou, TAN Jianrong. Completeness of Dimensioning in Multi-views Based on Space Coordinate Transformation [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2001(6):561-565.
- [18] 付超凡, 陈卓宁, 彭义兵, 等. 一种基于 MBD 的三维尺寸完备性审查方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(6):1-6.
- FU Chaofan, CHEN Zhuoyu, PENG Yibing, et al. A Inspection Method for 3D Dimension Completeness Based on MBD[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(6):1-6.
- [19] RODRIGUES G P W, COSTA L H M, FARIAS G M, et al. A Depth-first Search Algorithm for Optimizing the Gravity Pipe Networks Layout[J]. Water Resources Management, 2019, 33(13):4583-4598.
- [20] 程亚龙, 刘晓军, 刘金锋. 基于轨迹相交的三维顺序尺寸标注完备性检查[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(8):1799-1806.
- CHENG Yalong, LIU Xiaojun, LIU Jinfeng. Completeness Testing of 3D Sequential Dimensions Based on Locus Intersection[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(8):1799-1806.
- [21] 侯增选, 李林, 黄磊, 等. 三维工艺模型标注尺寸构造方法研究[J]. 图学学报, 2018, 39(5):843-848.
- HOU Zengxuan, LI Lin, HUANG Lei, et al. Research on Dimensional Construction Method of 3D Process Model[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(5):843-848.

(编辑 胡佳慧)

作者简介:刘泉泉,男,2000年生,硕士研究生。研究方向为数字化设计与制造、智能制造。E-mail:3294632957@qq.com。方喜峰*(通信作者),男,1971年生,教授。研究方向为数字化设计与制造、数控加工、并联数控制造设备。获授权专利40余项。发表论文80余篇。E-mail:xffang2006@163.com。

本文引用格式:

刘泉泉,方喜峰,程德俊,等.基于模型定义的三维模型信息完备性检查技术研究[J].中国机械工程,2025,36(5):1035-1043.

LIU Quanquan, FANG Xifeng, CHENG Dejun, et al. Research on Information Completeness Checking Technique of 3D Model for MBD[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):1035-1043.