DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0106-05

基于三维重建技术的商品包装自动计量检测方法

刘 睿, 王家澍, 杨 青

(上海市质量监督检验技术研究院有限公司, 上海 200233)

摘 要:随着商品经济的迅猛增长,包装作为商品不可或缺的一部分,其设计和管理工作日益显得重要。过度的包装行为不仅消耗了大量的资源,而且还引发了环境污染的问题。上海市质量监督检测技术研究院针对这一现象立项,提出一种商品包装自动计量检测方法。通过三维扫描技术获取物体的三维几何信息,创建物体的点云数据,根据三维识别重建技术识别二维数据处理点云生成三维模型,通过Delaunay三角化计算出物体的体积,最后通过计算空隙率来判断是否过度包装。为验证该自动检测方法的有效性,以市售牙膏为例,对实际商品进行了全方位的三维扫描,实现点云数据的获取和三维模型的重建。在此基础上,通过Delaunay三角化计算出市售牙膏和牙膏盒的精确体积并通过空隙率判断该类市售牙膏不存在过度包装。实验结果表明:这种自动检测技术能够精确扫描出商品轮廓并计算出商品体积,可以有效降低人工干预和减少成本,也有效提高了包装检测的效率与精确度。

关键词:三维扫描;三维重建;自动检测;过度包装;Delaunay三角化;空隙率

中图分类号: TP391.41;TB932 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-106-05

Automatic measurement and inspection method for product packaging based on 3D reconstruction technology

Liu Rui, Wang Jiashu, Yang Qing

(Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: With the rapid growth of commodity economy, packaging is an indispensable part of commodities, and its design and management are becoming increasingly important. Excessive packaging behavior not only consumes a lot of resources, but also causes the problem of environmental pollution. In response to this phenomenon, Shanghai Institute of Quality Supervision and Testing Technology has proposed an automatic measurement and testing method for commodity packaging. The three-dimensional geometric information of the object is obtained through the three-dimensional scanning technology, the point cloud data of the object is created, the two-dimensional data is processed to generate the three-dimensional model according to the three-dimensional recognition and reconstruction technology, the volume of the object is calculated by Delaunay triangulation, and finally the porosity is calculated to judge whether it is over-packed. To verify the effectiveness of this automatic detection method, this paper takes commercially available toothpaste as an example and conducts a comprehensive three-dimensional scan of the actual product to obtain point cloud data and reconstruct a three-dimensional model. On this basis, the precise volume of the commercially available toothpaste and its box is calculated through Delaunay triangulation, and it is determined that there is no excessive packaging for this type of commercially available toothpaste through the porosity rate. The experimental results show that this automatic detection technology can accurately scan the contour of the commodity and calculate the volume of the commodity, which can effectively reduce manual intervention and cost, and also effectively improve the efficiency and accuracy of packaging inspection.

Keywords: 3D scanning; 3D reconstruction; automatic detection; excessive packaging; Delaunay triangulation; porosity

商品包装已不仅仅是一种保护和运输商品的物理屏障,更成为了商品市场竞争力的重要组成部分。引人注目且具有创意的包装设计能够激发消费者的兴趣,增强产品的市场吸引力,并推动销量增长[1-2]。然而,随着消费者对商品外观要求的提高,一些商家为了在市场上脱颖而出,过度追求包装的视觉效果,导致包装越来越复杂,材料越来越厚重,这种做法虽然在短期内能够吸引消费者,但从长远来看,过度包装与发展循环经济背道而驰[3]。过度包装不仅增加了商品的成本,而这些成本最终会转嫁到消费者身上,还加剧了垃圾处理的压力,对环境造成了不可逆转的损害[4-7]。

为了应对这一现象,国家相关部门出台了一系列标准,这些标准的实施,对于引导企业合理设计包装、提高包装的可回收性和可降解性具有重要意义。

收稿日期:2025-02-24;**录用日期**:2025-04-08

基金项目:上海市市场监督管理局局项目(2023-27)

作者简介:刘 睿(1987—),男,工程师,研究方向为商品量的计量检验。

引用本文:刘睿,王家澍,杨青.基于三维重建技术的商品包装自动计量检测方法[J].自动化技术与应用,2026,45(8):106-110.(Liu Rui, Wang Jiashu, Yang Qing. Automatic measurement and inspection method for product packaging based on 3D reconstruction technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 106-110.)

传统的包装检测方法主要依赖于手工测量和人工评判,精度、效率和自动化程度较低,无法满足大规模检测的需求。自动化包装检测技术对于确保商品包装的合理性具有重要的现实意义。本文提出了一种商品包装自动计量检验方法。该方法首先利用高精度的三维扫描设备获取物体的三维点云数据,然后通过三维识别重建技术将扫描到的包装二维数据转化为三维模型。基于这些二维点云数据的坐标,计算出商品及其包装的体积。最终,通过计算空隙率来判断商品包装是否符合标准。这种方法减少了人工环节,实现了商品包装的自动化测量,在精度、效率和大规模应用上都有明显优势。

1 商品包装自动计量检测技术

1.1 自动计量检测流程

包装计量检验是确保商品包装符合国家标准的必要过程,它涉及对包装尺寸的精确测量、体积精确计算。通过对商品空隙率的计算来判断商品是否过度包装。包装计量检验的主要步骤如下:

1) 使用高精度的三维扫描设备,对商品包装进行全方位的扫描。通过发射蓝色激光并捕捉反射光来测量物体表面的三维坐标,从而获取包装物的精确三维数据。

2) 扫描得到的二维数据通常包含大量的点云信息,需要利用专业的处理软件转化为三维模型进行进一步的处理,软件通过算法分析点云数据,提取包装表面的几何特征,如边缘、角点、曲面等。

3) 将提取到的几何特征网格化送入处理点云数据的软件,使用 Delaunay 三角化完成对商品与商品包装体积的计算。

4) 计算包装空隙率来判断是否过度包装。

商品包装自动化检测的流程如图 1 所示。

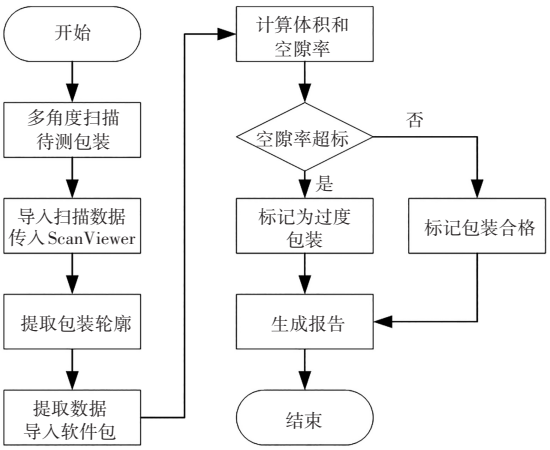


图 1 包装计量检测流程图

Fig. 1 Flowchart of packaging measurement and inspection

1.2 三维扫描技术

传统的包装测量方法主要依赖手工操作,这种方法不仅耗时费力,而且容易受到人为因素的干扰,导致测量结果的精确度不高。而三维扫描技术利用激光、白光传感器等设备迅速且精确地获取物体表面三维坐标,进而构建出物体的精确三维模型。通过计算机软件对这些数据进行处理,可以得到包装物的精确体积、尺寸和其他相关参数。这些数据对于评估包装是否符合国家标准、是否存在过度包装问题至关重要。因此,三维扫描技术在包装计量检验领域的应用将更加广泛,为包装行业的可持续发展提供强有力的技术支持[8-10]。

1.3 三维模型重建技术

1.3.1 立体视觉标定

立体视觉标定技术涉及确定三维物体的世界坐标系到摄像机图像坐标系的映射关系。立体视觉系统完成测量需要经过相机标定、同名点匹配与三维重建等步骤。相机标定是依据所采集的三维特征点及其在图像上的成像点来确定相机的各项系统参数[11]。

$$Z_c\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{R}\quad\boldsymbol{t}]\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中,Z_c 为该点在相机坐标系的 Z 轴坐标 u、v 是图像上的点坐标,(X_w,Y_w,Z_w) 是世界坐标系中的点坐标,$\boldsymbol{K}$ 是相机的内参数矩阵,$\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{t}$ 分别是相机的旋转矩阵和平移向量。

同名点匹配是匹配各相机像素之间对应点的过程,可以通过特征提取和匹配算法实现[12]。

1.3.2 三维识别重建

三维识别重建是一种通过分析和处理从不同视角拍摄的二维图像,重建出物体或场景的三维结构的技术,利用一组相机间有重叠区域的图像来计算物体在三维空间中的位置,使用激光束照射物体表面,通过测量激光反射时间或角度来获取精确的三维数据。通过匹配不同视角的图像中的对应点,计算出每个点的深度信息。可以表示为

$$d=\frac{Bf}{\Delta x}\tag{2}$$

式中,d 是点的深度,B 是相机之间的基线距离,f 是相机的焦距,Δx 是对应点在图像上的水平距离差。

对从立体匹配得到的点云数据进行处理,如去噪、滤波、配准等,以提高数据的质量,从而获得完整的三维模型[13-15]。

1.4 Delaunay 三角化计算点云数据体积

Delaunay 三角剖分是一种优化的三角剖分技术,其核心在于形成尽可能接近等边的三角形,以减少误差。在进行剖分时,Delaunay 三角剖分确保了每个三角形的外接圆内不包含其他点,这一特性被称为“空圆特性”。此外,Delaunay 三角剖分倾向于避免形成狭长的三角形,即每个三角形中的最小角不小于其他任何三角形的最小角,这有助于保证三角形的规则性。在体积计算中,Delaunay 三角化将点云数据转换为由多个四面体组成的网格,每个四面

体的体积可以被单独计算并累加以得到总体积[16-17]。

在进行 Delaunay 三角化之前,需要对点云数据进行预处理,包括去噪、滤波和配准,以确保数据的准确性和稳定性。在三维空间中,对点云数据进行 Delaunay 三角化后,每个四面体的体积可以通过其四个顶点的坐标来计算。设四个顶点的坐标分别为 $A(x_1,y_1,z_1)$,$B(x_2,y_2,z_2)$,$C(x_3,y_3,z_3)$,$D(x_4,y_4,z_4)$,则四面体的体积 V 可以通过式(3)计算,即

$$V=\frac{1}{6}\left|\det\begin{bmatrix} x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \\ x_4-x_1 & y_4-y_1 & z_4-z_1 \end{bmatrix}\right| \tag{3}$$

整个商品体积就是所有四面体的体积之和,其中 n 代表经过 Delaunay 三角化处理后,将该三维点云模型分割成的四面体的总数量,V_i 则特指分割出来的第 i 个四面体的体积。其计算公式为

$$V_{\text{total}}=\sum_{i=1}^{n}V_i \tag{4}$$

利用 Delaunay 三角化,计算商品包装体积的过程如下:

1) 通过三维扫描设备通过三维立体延伸技术扫描出商品的三维坐标并用激光点云标记。

2) 通过立体视觉标定技术采集的三维特征点匹配扫描到的点云数据。

3) 通过三维识别重建技术将扫描出的二维图像转化为三维模型,提取轮廓信息。

4) 利用获得的模型与三维坐标通过 Delaunay 三角化计算出体积[18-19]。

2 测量系统

2.1 系统构成

图像采集及软件处理系统为 SCANTECH 公司的手持式三维扫描仪,如图 2 所示。SIMSCAN 扫描仪尺寸为 203 mm×80 mm×40 mm,可以单手手持。工作时通过发射 7 束 450 nm 的蓝色交叉光线对测量物体实现精细扫描,精度可以达到 0.020 mm,足以应对商品包装表面复杂的程度。操作者或者机械臂手持扫描仪,实时调整扫描仪与被测商品之间的角度和距离,并根据被扫描物体的大小、形状以及扫描的工作环境来进行高效、精确的扫描,扫描到的信息传入到三维识别重建软件 ScanViewer。ScanViewer 是一款专业的为了配合 SIMSCAN 扫描仪使用而设计的计算机视觉处理软件,它能够接收和处理扫描仪捕获的三维点云数据,同时还提供了去噪、滤波、配准等预处理功能,以提高点云数据的质量。在点云数据的基础上,可以构造物体的三维模型,并进行漏洞修复,以得到准确的实物数字模型。

2.2 数据检验

本文以牙膏为例,通过 SIMSCAN 手持式三维扫描仪用多个角度扫描牙膏与牙膏盒的包装,获得其商品包装的三维点云数据。图 3(a)是牙膏盒包装,图 3(b)是牙膏包装。



图 2 三维扫描仪 SIMSCAN

Fig. 2 3D scanner SIMSCAN

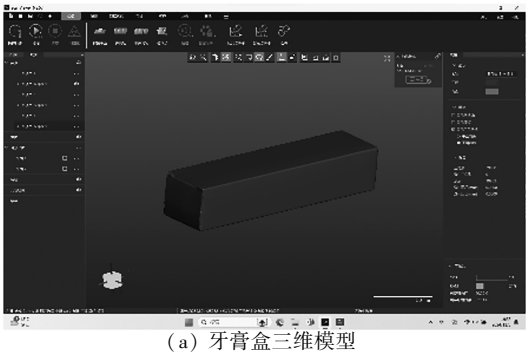


(a) 牙膏盒 (b) 牙膏

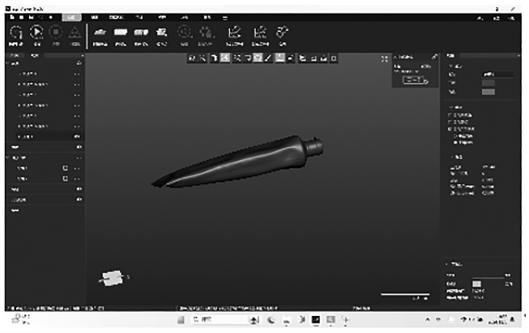
图 3 牙膏盒和牙膏包装

Fig. 3 Toothpaste box and toothpaste packaging

扫描得到的点云数据通过 ScanViewer 界面显示出来,界面对该数据进行去噪,滤波,配准,形成三维轮廓模型。图 4(a)为牙膏盒的三维模型,图 4(b)为牙膏的三维模型。



(a) 牙膏盒三维模型

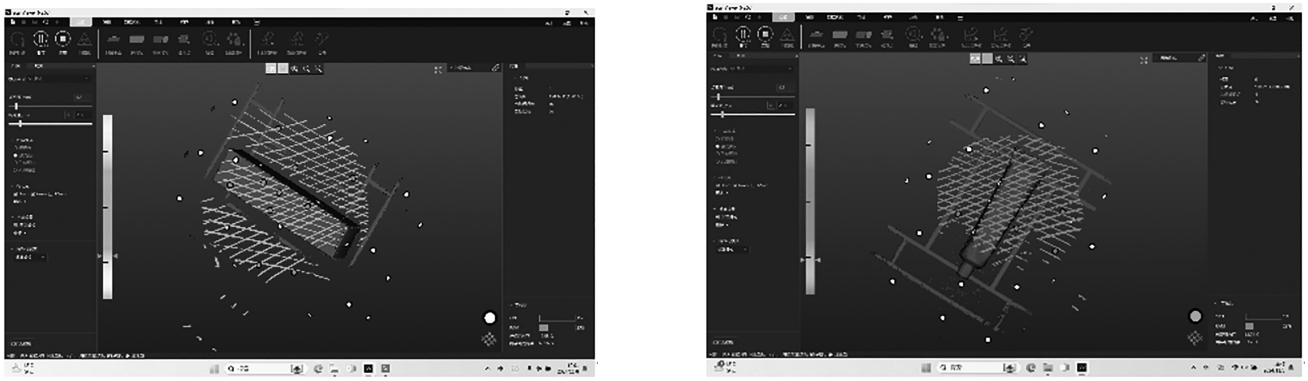


(b) 牙膏三维模型

图 4 牙膏盒与牙膏的三维模型

Fig. 4 3D models of toothpaste box and toothpaste

通过点云数据生成图像的三维模型,使用 Scanviewer 实现三维模型网格化。图 5(a)为 Scanviewer 将牙膏盒模型网格化的图。图 5(b)为牙膏模型网格化图。

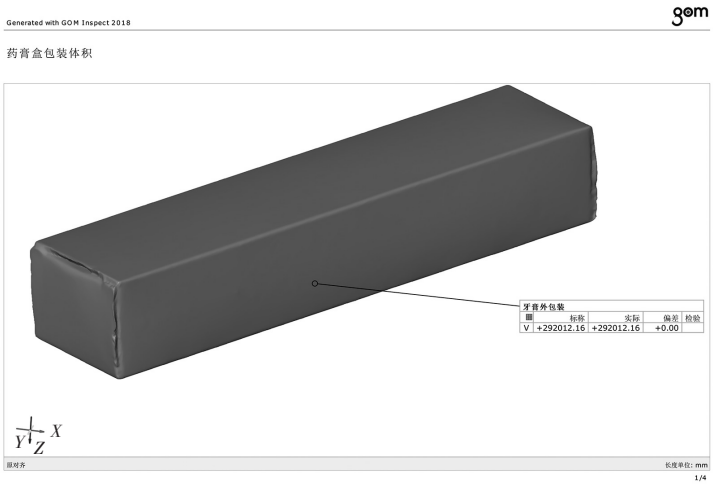


（a）牙膏盒模型网格化　　（b）牙膏盒模型网格化

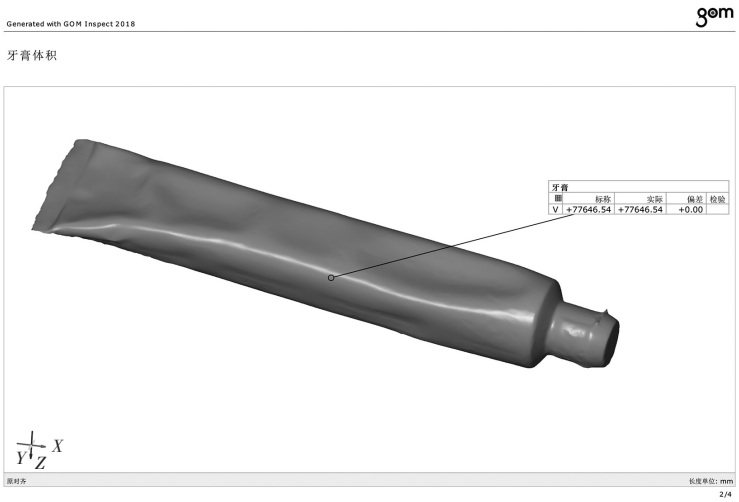
图 5　牙膏与牙膏盒模型网格化

Fig. 5　Meshed models of toothpaste and toothpaste box

将 Scanviewer 得到的网格化后的激光点云数据转入专门处理点云数据的软件 GOM Inspect 中，GOM Inspect 根据激光点云坐标能够从三维扫描仪获取的数据中提取精确的几何尺寸和形状信息，处理点云数据，通过 Delaunay 三角化计算出的商品与商品包装体积。图 6（a）是通过 GOM Inspect 使用 Delaunay 三角化计算从 Scanviewer 处理牙膏盒得到的点云数据计算出其三维模型的体积。图 6（b）则是牙膏的体积。其中牙膏盒的体积为 292 012.16 mm^3，牙膏的体积为 77 646.54 mm^3。



（a）牙膏盒体积



（b）牙膏体积

图 6　牙膏盒和牙膏包装体积

Fig. 6　Volumes of toothpaste box and toothpaste packaging

2.3 结果分析

为了衡量包装是否合理,国家计量技术规范 GB23350—2021《限制商品过度包装要求 食品和化妆品》的规定提供了一套明确的标准,其中包装空隙率是一个关键指标。表1是食品和化妆品的包装空隙率[19]。

表1 食品和化妆品包装空隙率

Tab. 1 Packaging porosity of food and cosmetics

单件净含量(Q)/ mL 或 g	空隙率 X/ %
≤1	≤85
1< Q ≤ 5	≤70
5< Q ≤ 15	≤60
15< Q ≤ 30	≤50
30< Q ≤ 50	≤40
>50	≤30

包装间隙率的计算公式如下,即

$$X = \frac{[V_n - \sum K \times V_0]}{V_n} \times 100\% \tag{5}$$

式中,X 为包装间隙率,V_n 为商品包装体积,V_0 为商品体积,K 为商品的必要空间系数,它是1个根据商品特性和包装要求确定的系数,用于计算商品所需的最小空间。牙膏商品属于气雾剂类,净含量为 140 g,根据 GB23350—2021《限制商品过度包装要求 食品和化妆品》,K 值取5。通过式(3)计算出商品包装的间隙率 X = -32.95% ≤ 30%,所以牙膏不存在过度包装[20-22]。也可以通过计算包装的最大体积来判断是否存在过度包装。公式如下,即

$$V_{nmax} = \frac{K \times V_0}{1 - X_{max}} \tag{6}$$

由表1知包装间隙率的最大体积 X_{max} 取 30%,根据式(6)计算出满足牙膏空隙率的最大体积为 V_{nmax} = 554 618.14 mm^3 > V_n = 292 012.16 mm^3,即本文检测的牙膏不存在过度包装现象。

3 结论

本文提出一种商品包装自动计量检测技术,通过三维扫描技术获取激光点云数据,利用三维识别重建技术将扫描得到的数据转化为三维模型,获得其中点云的坐标,将坐标导入到专门处理激光点云数据的软件完成体积的计算,最后根据空隙率公式判断商品包装是否合格。这种方法相比于传统的人工方法更精确,自动化程度也更高。这种商品包装自动计量检测技术,显著提高了包装检测的效率和准确性,减少了人工操作的误差和劳动强度,有效降低了检测的成本。为包装行业的合理化设计提供了技术支持,可以促进现代高科技、高精尖设备与信息化系统支撑的计量工作新格局,有助于减少过度包装现象,从而节约资源并减少环境污染,符合可持续发展的要求。

参考文献

[1]万柯彤. 传统与现代色彩在文化主题包装设计中的融合研究[J]. 色彩,2025(6):146-148.

[2]康琼艳. 商品包装应回归实用[N]. 经济日报,2023-04-03(2).

[3]Guopeng Q, Lin W, Feng Y X, et al. Effect of excessive packaging of product design on friendly environment and purchasing intention[J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2020,21(1):126-134.

[4]罗娜,侯胜一. 绿色理念与商品包装设计融合探析[J]. 环境工程,2022,40(10):286-287.

[5]Georgakoudis E D, Tipi N S. An investigation into the Issue of overpackaging-examining the case of paper packaging[J]. International Journal of Sustainable Engineering,2021,14(4):590-599.

[6]陈墨. 纸包装在个性化商品包装中的设计创新与应用[J]. 纸和造纸,2025,44(2):25-27.

[7]冀阳,彭迪. 浅析绿色包装设计发展趋势[J]. 绿色包装,2024(10):172-176.

[8]刘玉玺,刘睿锋,李长龙,等. 基于三维激光扫描的H型钢尺寸误差与接长精度技术研究[J]. 港口航道与近海工程,2024,61(6):118-123.

[9]林丛浩. 基于三维激光扫描技术的建筑物三维模型构建方法研究[J]. 中国建设信息化,2024(20):64-67.

[10]刘颖,刘宝华. 基于相移的三维扫描数据自动配准方法研究[J]. 自动化技术与应用,2024,43(1):39-43.

[11]何嘉良. 动态双目立体视觉自标定技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.

[12]田昊,刘春萌. 基于双目立体视觉的标定技术及应用[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2020,38(2):227-235.

[13]李柏雄,刘俊杰,刘建青,等. 基于非接触式的三维重建技术综述[J]. 机电工程技术,2024,53(5):1-5,42.

[14]章立,彭涛,黄焕,等. 基于点云的柔性线缆模型三维重建方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(4):133-139.

[15]普怡. 一种基于摄影测量的便携非接触式路面纹理检测方法[J]. 国防交通工程与技术,2024,22(6):72-76.

[16]冯琦帏. 基于Delaunay和前沿推进耦合的自适应曲面网格生成技术研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2024.

[17]王禹童. 基于点云轮廓的机械零件三维建模方法研究[D]. 吉林:东北电力大学,2024.

[18]钟阳弟. 距离梯度法和Delaunay三角化法在三维激光探伤检测中的探析[J]. 矿山测量,2020,48(6):97-100.

[19]宋小鹏,古小敏,何秀锦,等. 基于Delaunay算法含定解条件的三角单元网格生成[J]. 计算机时代,2020(12):29-32.

[20]中华人民共和国工业和信息化部. 限制商品过度包装要求食品和化妆品:GB 23350-2021[S]. 中国标准出版社,2021.

[21]全国法制计量管理计量技术委员会. 食品和化妆品包装计量检验规则:JJF1244-2010[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2010.

[22]谢丹. 食品定量包装计量问题分析及对策[J]. 食品安全导刊,2022,(18):142-144.