

基于草图的产品三维 CAD 模型概念设计推送方法

张开兴¹ 刘洪豪¹ 李金凤¹ 杭晟煜¹ 刘贤喜^{1,2} 宋正河³

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对产品广义设计过程不同阶段的需求特点以及加快概念设计向详细设计的转换,提出了一种基于草图的产品三维 CAD 模型概念设计推送方法。首先,用户根据概念设计需求,利用基于 CAD 几何造型平台开发的手绘图板绘制三视草图;然后,对手绘三视草图和模型库中 CAD 模型投影得到的三视投影图提取特征信息,采用 2.5D 球面调和描述子来表示草图特征信息;最后,利用 Euclidean 距离计算通过球面调和变换获得的图形特征向量之间的距离,从而实现模型之间的相似性评价,并在农业机械装备模型库中完成算法的验证。实验结果表明,该方法能够有效帮助用户快速地具象化查询意图,发掘与产品概念设计阶段意图最相符的三维模型,并将相似性设计资源推送给设计人员,进而参考、启发和扩展设计思维,实现产品概念设计的快速响应。

关键词: 概念设计; 三视草图; 球面调和描述子; 设计资源推送

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0365-08

Conceptual Design Push Method of 3D CAD Models Based on Sketches

ZHANG Kaixing¹ LIU Honghao¹ LI Jinfeng¹ HANG Shengyu¹ LIU Xianxi^{1,2} SONG Zhenghe³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an 271018, China
3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the requirements characteristics at different stages of generalized product design process and acceleration of the transformation from conceptual design to detailed design, a method of conceptual design push of 3D CAD model of products based on sketch was proposed. First of all, according to the conceptual design requirements, a three-view sketch was drawn by using a hand drawing board based on CAD geometric modeling platform. Then, feature information was extracted from hand-drawn three-view sketch and three-view projection diagram of CAD model projection in model library, and the 2.5D spherical harmonic descriptor was used to represent the sketch feature information. Finally, Euclidean distance was used to calculate the distance of the graph feature vectors obtained by spherical harmonic transformation to realize the similarity evaluation between models and verify the algorithm in the agricultural machinery equipment model database. The experimental results showed that the method can effectively help users visualize the query intention quickly, explore the 3D model which was most consistent with the intention of product conceptual design stage, and push the similar design resources to designers, so as to reference, inspire and expand the design thinking and realize the rapid response of product conceptual design.

Key words: conceptual design; three-view sketch; spherical harmonic descriptors; design resource push

0 引言

产品设计是一个新产品诞生的复杂过程,主要

涉及如何高效地将新想法通过有序的过程转换为新产品。在该过程中,产品设计人员需要利用艺术、科学和技术等方面的知识,将消费者或市场的需求概

收稿日期: 2018-08-30 修回日期: 2018-09-23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)、山东省重点研发计划项目(2017NC212008)、山东省“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)和山东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目
作者简介: 张开兴(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业 CAD 和农业信息化研究,E-mail: kaixingzhang@139.com
通信作者: 刘贤喜(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业 CAD/CAM 和虚拟现实技术研究,E-mail: wjbliu@sdau.edu.cn

念化并做出评估,最后通过系统的方法实体化。具体来看,复杂产品的设计过程是从抽象到具体渐进演化的,往往从最初粗略的手绘草图开始,通过对产品需求和设计因素的理解,进行各子模块的逐步细化,直至每个基本组件被严格定义为止,其本质上可以分为产品概念设计、初步设计和详细设计的自顶向下广义设计过程^[1],并且各个设计阶段所处理的信息结构和设计任务都不相同。

在产品概念设计阶段,通常设计人员在脑海中只存在一些原始的、零碎的简单体现设计意图的模型,通常运用手绘草图将设计想法表达出来,继而迫切需要根据设计人员的设计意图进行产品三维 CAD 模型的快速推送。因此,对于基于草图的产品三维 CAD 模型相似性设计推送方法的研究成为实现产品概念设计阶段快速响应的重要途径,以帮助设计人员找到丰富的与概念模型相似的模型案例,通过参考启发设计思维^[2]。图形形状的相似性比较是模式识别与图形检索领域的主要研究内容,目前有多种图形形状的相似性比较算法,其中较常用的方法是利用傅里叶^[3-4]、几何不变矩^[5-7]、球面调和^[8]等函数描述子计算图形的形状特征。THOMAS 等^[9]利用傅里叶描述符生成轮廓图和手绘图,实现了一个支持多视图输入的模型推送系统,但该系统要求手绘图像的线条与模型在该视角的投影尽可能接近,不能出现过大变形和偏移;PU 等^[10]在草图上进行随机采样,计算随机点的欧氏距离并形成直方图,通过直方图之间的距离实现草图的匹配,但该方法对手绘草图输入精确度要求较高;LIANG 等^[11]在基于内容的草图检索系统中引入基于有偏 SVM 的学习机制,提出了一种面向草图检索的相关反馈方法,该方法适合于工程图形式的草图;钱露等^[12]通过体感交互设备绘制草图并实现模型推送,该方法适合于通用领域的模型检索;MICHAEL 等^[13]基于球面调和分析,提出了一种与坐标系方向无关的球面调和描述子,并且把它用于三维模型的特征计算,但球面调和分析在二维图形处理中的应用比较少。

本文提出一种基于草图的产品三维 CAD 模型概念设计推送方法,该方法通过提取设计初期产品模型三视草图的形状特征,将二维图形映射为球面图形并采用球面调和描述子在产品模型数据库中进行相似性度量,发掘与产品概念设计阶段意图最相符的三维 CAD 模型,加快概念设计及其向详细设计的转换,进而参考、启发和扩展设计思维,并形成最终的设计方案。

1 算法原理与三视草图绘制

在机械设计领域,广泛使用三视图表达产品三维 CAD 模型,两者一一对应,即任意产品三维 CAD 模型的设计信息只需要主视图、左视图和俯视图外加一些辅助的剖视图就可以完整地表示。然而,在产品的概念设计阶段,设计人员提供的是能够表达设计初期意图,缺少部分细节信息的产品三视草图,尽管会对检索精度产生一定影响,但已经可以对产品模型进行充分描述。因此,通过提供概念设计阶段产品三视草图来检索三维 CAD 模型是可行的。

基于此,本文以产品概念设计阶段的三视草图为研究对象,提出了一种基于草图的产品三维 CAD 模型概念设计推送方法。首先,用户根据概念设计需求利用手绘图板绘制三视草图;然后,对手绘三视草图和模型库中 CAD 模型投影得到的三视投影图提取特征信息,采用 2.5D 球面调和描述子表示特征信息;最后,依据特征信息相似性度量结果,从数据库中返回目标模型并推送给用户,实现流程如图 1 所示。

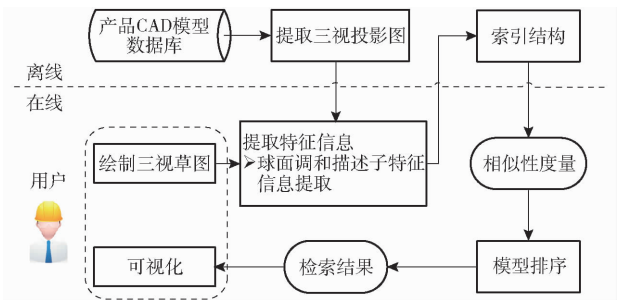


图 1 算法实现流程

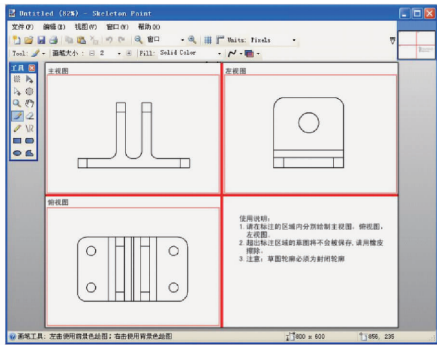
Fig. 1 Flow chart of algorithm

图 2a 所示为本团队基于 Open CASCADE 几何造型平台^[14]开发的手绘图板,并在该图版绘制产品三视草图。该图版包含常用的绘图工具,如画笔、橡皮擦和线条绘制等工具,可以在绘图区域内进行手绘草图的创作。同时,用户可以根据检索需求分别对 3 个视图的权重进行设置,权重越高,表示对应视图所反映的设计细节越重要;此外,用户可以在该对话框中指定模型的比例阈值,阈值越小,表示模型库中参加检索的模型比例越接近于草图绘制的模型比例,如图 2b 所示的对话框。

2 基于球面调和描述子的草图特征信息提取

2.1 草图的球面函数表示

FUNKHOUSER 等^[15]提出了一种在二维空间下基于球面调和函数提取一系列旋转不变量的方法,该方法把二维轮廓分为多个圆形区域,所获得的 2D



(a) 手绘图板



(b) 图板权重阈值设置

图 2 手绘图板与功能演示

Fig. 2 Hand drawing board and function demonstration

图形轮廓描述子鲁棒性较差,如图 3 所示。其局限性在于:①如果旋转图 3a 的第 2 个最外圆区域,将获得图 3b。但是经过球面调和变换后这些圆函数的特征向量是一致的,因此,图 3a 与图 3b 具有相同的描述子,它们被认为是相同的图形。但是,图 3a 与图 3b 是两个不同的图形。换句话说,基于圆形区域的方法,同一个描述子可以与多个不同的图形相对应。②如果一个二维图形轮廓由一系列圆形区域来表示,一个很小的局部扰动将导致 2 个原本相似的图形的相似度很小,如图 3c 与图 3d 所示。由于图 3c 中小的扰动,而该扰动处于不同的区域,它们不变因子差的平方比较大,通常图 3c 与图 3d 被认为是并不相似的。③仅仅考虑到图形的外轮廓,而忽视了图形内部结构信息。

为了克服上述方法的局限性,本文提出一种 2.5D 球面调和表示法。该方法将二维手绘草图从二维空间转换到三维空间,并从中提取一系列旋转不变量。将二维图形转换到三维空间中的详细步骤如下:

(1) 给定一个手绘草图 D , 构建一个包围球 S , 该包围球 S 的中心 c 位于坐标系 xyz 的坐标原点 o , 其满足 3 个条件:①包围球 S 的中心 c 与草图 D 的

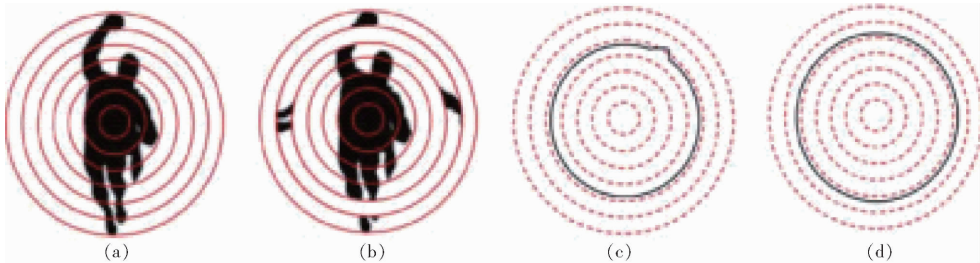


图 3 球面调和函数二维模型的局限性分析

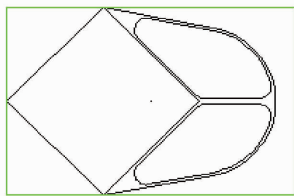
Fig. 3 Limitation analyses of spherical harmonic function in 2D space

最小包围盒 Box 的中心相对应。②包围球 S 的半径 r 为草图 D 的最小包围盒 Box 的对角线长度的 $1/2$ 。③草图 D 位于包围球 S 的赤道平面上,即其位于坐标系 xyz 的 xy 坐标平面上。

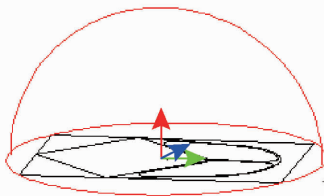
(2) 从包围球 S 的中心 c 产生一系列射线,并且计算这些射线与图形 D 的交点,这样图形 D 就可以用这些交点来近似表示,即 $D = \{p_i\}$,如图 4 所示。假设某条射线 r_i 与坐标轴 x 之间的夹角为 θ_i ,该条射

线 r_i 与图形 D 的交点 p_i 与包围球 S 的中心 c 的距离为 d_i ,则该交点 p_i 在二维空间可以表示为: $p_i = f(\theta_i, d_i)$ 。为了将工程图形 D 转换到三维空间,引入另外一个变量 φ_i ,其定义为: $\varphi_i = \arctan(d_i/r)$ 。因此,转换交点 p_i 为球面函数的形式: $p_i = f(\theta_i, \varphi_i, d_i)$,此时在三维空间中每个交点 p_i 都有唯一的 (θ_i, φ_i) 与之对应。因此,草图 D 与球面函数是一一对应的。

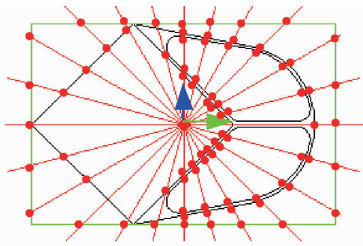
图 4 为 2.5D 球面转换法。图 4a 为图形的最小



(a) 图形 D 的最小包围盒



(b) 图形 D 的包围球



(c) 数据点采样

图 4 图形 D 的球面表示

Fig. 4 Spherical representation of graph D

包围盒,图 4b 为与之对应的包围球 S ,图 4c 为通过从最小包围盒 Box 的中心引出一系列射线,计算该射线与图形 D 的交点,并且用这些交点对图形 D 进行近似表示。

2.2 球面调和描述子的提取

为了获得手绘草图的旋转不变量,采用 HEALY 等^[16]提出的快速球面调和变换方法,在带宽为 B 的球面函数上采样 $2B$ 个 Chebyshev 数据点。手绘草图 D 的球面调和描述子的提取步骤如下:

(1)草图 D 上数据点采样:从草图 D 的最小包围盒 Box 中心引出 $2B$ 条射线,射线与草图 D 的交点为: $p_i=f(\theta_i,d_i)$,计算该采样点在三维空间的位置

$$\begin{cases} \theta_i=(i+0.5)\frac{\pi}{B} \\ \varphi_i=\arctan\frac{d_i}{r} \end{cases} \quad (i=0,1,2,\cdots,2B-1) \quad (1)$$

(2)计算采样点 (θ_i,φ_i) 的 Chebyshev 点位置

$$\begin{cases} i=i \\ j=\frac{2B\varphi_i}{\pi}-0.5 \end{cases} \quad (i,j=0,1,2,\cdots,2B-1) \quad (2)$$

则图形 D 可以用 Chebyshev 点位置 (i,j) 来表示,即

$$D=\{d_i=f(i,j)|i,j=0,1,2,\cdots,2B-1\} \quad (3)$$

(3)归一化处理:一般情况下,不同的图形具有不同的尺寸,如果两个图形形状相同而尺寸不一样,则其 $\{d_i\}$ 是不一样的。因此,需要对图形进行归一化处理。对图形 D 归一化一般是对图形 D 的最小包围盒长边或短边进行归一化,本文的归一化因子为包围球半径 r ,其归一化公式为

$$\begin{cases} S=\frac{V}{r} \\ D=\{d_iS=f(i,j)|i,j=0,1,2,\cdots,2B-1\} \end{cases} \quad (4)$$

式中 V ——预先定义的常量

(4)快速球面调和变换:采用文献[16]提出的方法进行快速球面调和变换获得图形 D 的旋转不变量描述子。对于每个频率,将获得一个与之对应的旋转不变量。

该方法能够避免一对多和由于形状扰动造成的不稳定,就此获得图形 D 的旋转不变量描述子,该描述子的鲁棒性比较好。

带宽 B 决定了采样点的密度,当 B 较小时会丢掉很多细节信息;而当 B 较大时描述图形 D 较精确,但是时间耗费比较大,因此,需要对此进行权衡考虑。通过试验得到带宽 B 为 64 时,精度为 0.005,该精度能够满足图形检索要求。因此,本文设定带宽为 64。

为了更形象直观地描述本文方法所提取的球面调和描述子,构建球面调和描述子直方图,如图 5 所示,图 5a 与图 5b 是两个相似的图形,其图形的球面描述子直方图形状很相似,并且两个图形的球面调和描述子最大分量与最小分量也比较接近。而图 5a、5b 与图 5c 图形之间的相似程度比较小,其对应的球面调和描述子直方图的形状相似程度很低。从球面调和描述子的最大分量可以看出,图 5a 与图 5b 的最大分量接近 1.5,而图 5c 的最大分量接近 1.1,本文方法具有很好的区分度。

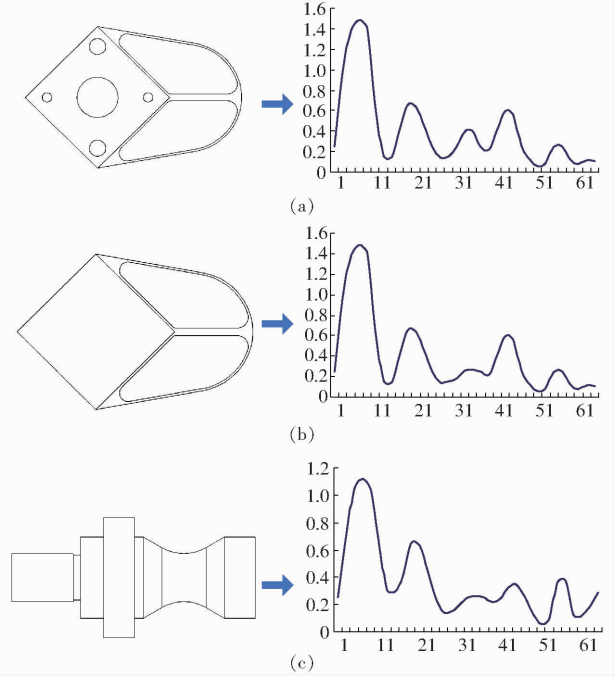


图 5 不同图形的球面调和描述子对比
Fig.5 Comparison of spherical harmonic descriptors for different graphs

2.3 相似性度量

通过采用球面调和变换获得图形的特征向量,将图形之间的相似性比较问题转换为特征向量之间的距离度量。选用 Euclidean 距离来计算特征向量之间的距离。假设 2 个模型 f 与 g 的特征向量分别为 $f_{sh}=(|f_0|,|f_1|,\cdots,|f_B|)$ 、 $g_{sh}=(|g_0|,|g_1|,\cdots,|g_B|)$,则两个模型之间的相似性距离为

$$D(f_{sh},g_{sh})=\sqrt{\sum_{i=0}^B(|f_i|-|g_i|)^2} \quad (5)$$

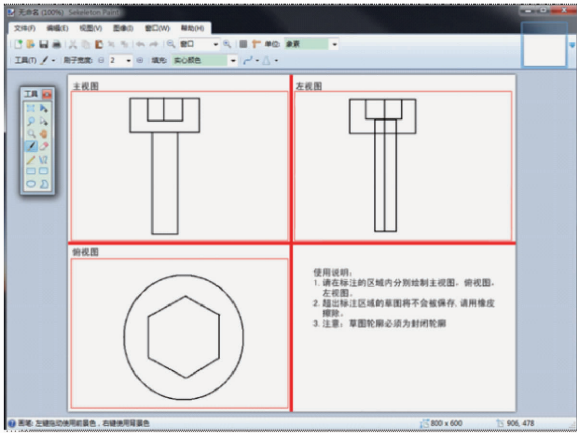
3 算法验证与讨论

为了验证算法的有效性,以 Microsoft Visual Studio 2010 为集成开发环境,Open CASCADE 为几何造型平台,实验中所使用的模型主要来自于普渡大学的 ESB 模型库^[17-18]和项目组成员根据国家重点研发计划项目“丘陵山地拖拉机关键技术研究与

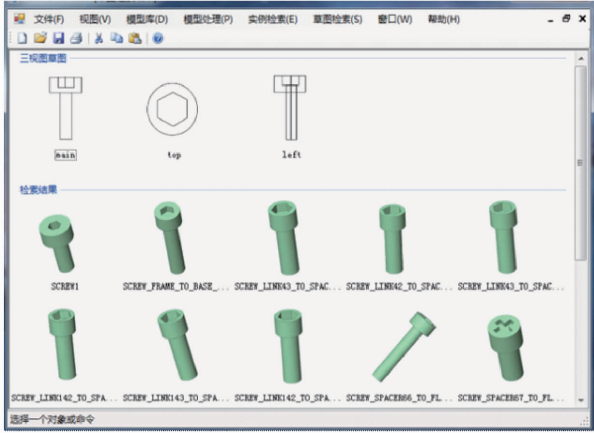
整机开发”与“农机装备智能化设计技术研究”构建的农业机械装备模型库。

3.1 算法性能测试与评价

在原型系统中,基于草图的检索功能允许用户在系统所提供的 2D 草图绘制界面对目标模型进行三视图的绘制,并以此为查询条件展开检索。



(a) 草图绘制



(b) 草图检索实例

图 6 草图绘制及检索实例

Fig.6 Sketch drawing and retrieval examples

为了充分对比算法的性能,分别对通用领域 ESB 模型库和农业机械装备模型库中的 CAD 模型进行统计测试,获得了平均查全率-查准率 (Precision-recall, PR) 曲线^[18]。从图 7 曲线可以看出,本文算法的检索性能明显优于其他两种。

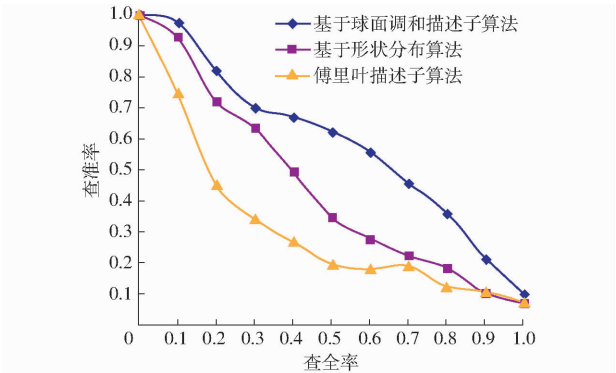


图 7 查全查准率曲线

Fig.7 Precision-recall curves

算法验证所用 CPU 为 Intel Pentium 4 CPU 3.06 GHz,内存 4 GB。表 1 统计了 3 种算法对单个模型的平均处理时间,包括特征提取时间和特征比较时间,由此可以看出,本文算法效率高于其他 2 种算法。

表 1 单个模型算法执行时间对比

Tab.1 Comparison of three algorithms execution time on individual model

算法	基于球面调和描述子算法	基于形状分布算法	傅里叶描述子算法
时间	0.471	0.937	0.826

该功能能够帮助用户快速地具象化查询意图,其适用于当用户的查询目标较为模糊的产品概念设计阶段。图 6a 为绘制的内六角螺栓三视草图,并对草图内容的描述采用了本文 2.5D 球面描述子特征,图 6b 为基于所绘制草图的一个三维模型检索实例。

3.2 基于手绘草图的产品模型推送实例

3.2.1 变速箱体概念设计

履带式联合收获机底盘变速箱主要由箱体、轴类零件、齿轮、轴承及键等组成^[20],如图 8a 所示。在变速箱的设计过程中,首先根据收获机功率、转速等设计要求得到变速箱的设计参数,并计算得出所需要的齿轮、轴类等零件,同时结合收获机底盘传动系统布置方案规划该类零件的空间位置;然后根据其空间位置要求设计变速箱箱体。其中,轴类零件结构简单,齿轮、轴承及键等一般是标准件,不需要进行单独设计,而变速箱箱体形状复杂、不规则,存在重复设计的现象。

若设计人员需要设计一款如图 8a 所示的变速箱,其三维 CAD 模型如图 8b 所示,其对应的三视图如图 8c 所示;由于变速箱箱体形状复杂,在产品概念设计中,设计人员习惯根据变速箱已设计零件的尺寸以及空间位置绘制三视草图来表达自己的思想^[21-22],如图 8d 所示。表 2 所示为在农机装备模型库中的产品概念设计推送结果,可以发现,应用本文方法能够在农机装备模型库中将三视草图相似性较高的 5 款零件检索出来。本文方法可以通过绘制变速箱箱体草图将相似性设计资源推送给设计人员,实现产品概念设计的快速响应。

3.2.2 L 型关节壳体详细设计

丘陵山地拖拉机转向机构主要由主动轴、主动轴套、L 型关节壳体、从动轴、从动轴侧盖、齿轮、轴

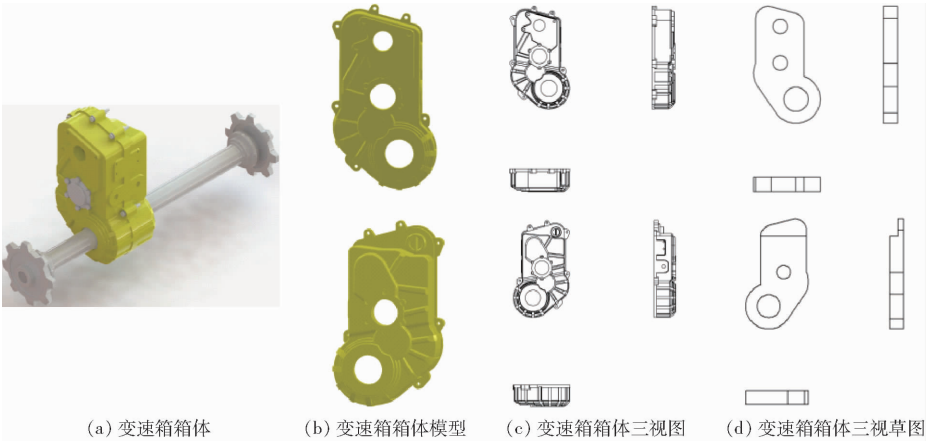


图 8 产品概念设计思路

Fig. 8 Ideas of product conceptual design

表 2 产品概念设计推送结果 (1)

Tab.2 Push result of product conceptual design

输入手绘草图	产品模型推送结果				
	1	2	3	4	5

承及键组成^[23],如图 9a 所示。其中,轴类零件结构简单,齿轮、轴承及键等一般是标准件,不需要进行单独设计;而主动轴套、L 型关节壳体、从动轴侧盖等壳体类零件形状复杂,存在重复设计的现象。下面以丘陵山地拖拉机底盘转向机构 L 型关节壳体(图 9b)为例进行产品详细设计的应用验证。

在概念设计阶段,设计人员通常根据转向机构 L 型关节已设计零件尺寸以及空间位置,得到如图 9c 所示的 L 型关节壳体简单设计模型;并通过手绘草图将产品初期设计意图表达出来,如图 9d 所示;设计人员在系统草图绘制界面对产品概念设计手绘草图进行绘制,如图 9e 所示。此时,通过基于草图的产品三维 CAD 模型概念设计推送方法得到

丰富的相似性设计参考,表 3 为在模型库中得到的相似度前 6 位的推送结果。通过分析和比较推送结果模型,由人工再选出与转向机构 L 型关节壳体基本外形、结构、功能最相似的模型进行下一阶段的设计重用。

产品初步设计阶段需要丰富的整体级可重用设计成果,可以直接提交概念设计得到的相似性产品推送模型,利用 PDM 系统在产品模型库中发掘与概念设计阶段更多的相似模型,进而结合丘陵山地拖拉机底盘传动系统布置方案规划与转向机构 L 型关节已设计零件的尺寸以及空间位置,优中选优,通过参考以启发设计思维,完成产品初步设计。

产品详细设计阶段大量的设计重用则是在更细

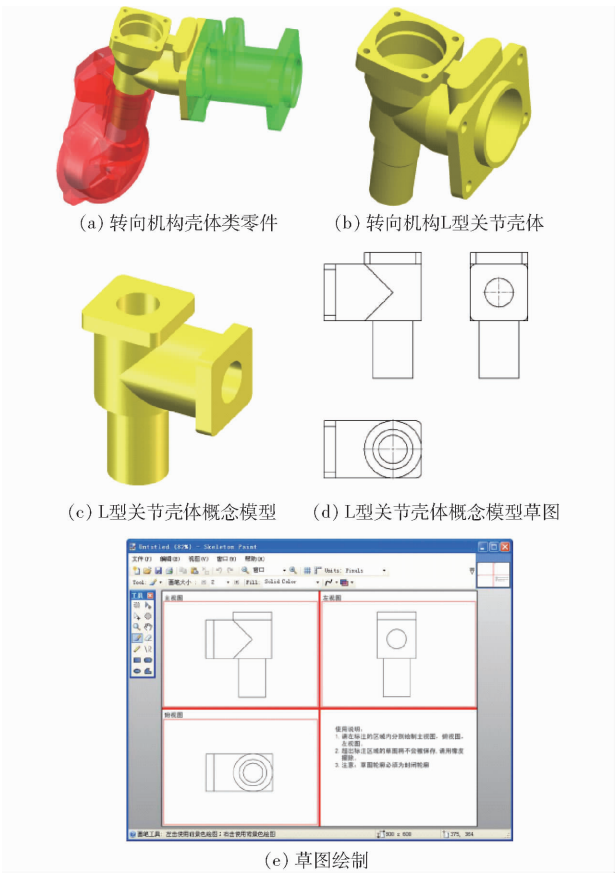


图 9 L 型关节产品概念设计

Fig.9 Conceptual design of L type joint product

表 3 产品概念设计推送结果(2)

Tab.3 Push result of product conceptual design

输入手绘草图	产品概念设计推送结果					
	1	2	3	4	5	6

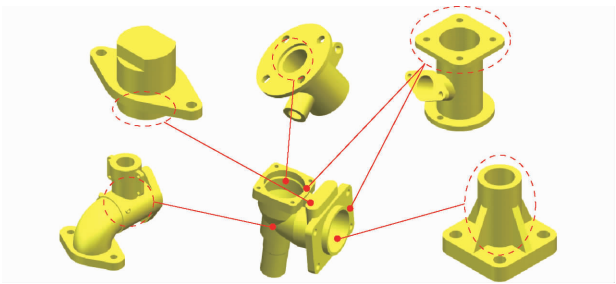


图 10 L 型关节产品详细设计

Fig.10 Detailed design of L type joint product

对话框中对指定模型比例阈值进行限定,实现客观控制与主观优化的有效融合,有助于用户快速地具象化查询意图。

(2)采用快速球面调和变换方法能够获得鲁棒性较高的 CAD 模型旋转不变量描述子,避免一对多和由

观的零部件内部特征和典型结构上,在模型库中对产品初步设计检索结果的设计特征与典型结构进行挖掘,经过一系列修订或变型,快速生成当前的详细设计。图 10 为在详细设计过程将 5 个隐含典型结构的 CAD 模型推送给设计人员。

3.2.3 变速箱箱体广义设计

图 11 为丘陵山地拖拉机底盘变速箱箱体的广义设计过程。在这个设计过程中可以清楚地看到,设计人员根据变速箱已设计零件(轴类零件、齿轮、轴承及键等),考虑其尺寸以及空间位置,确定变速箱箱体的设计意图;然后,根据制造需求,将变速箱箱体细化为 3 个组件,并进行递归设计;进而从最初粗略的手绘草图开始,通过对产品需求和设计因素的理解,进行各组件的逐步细化,依次实现变速箱箱体产品概念设计、初步设计和详细设计的自顶向下广义设计;至此完成最终设计,变速箱装配体 CAD 模型详细设计成果可以在 CAD 系统中很方便地由其中每个组件的详细模型装配而成。

4 结论

(1)基于 Open CASCADE 几何造型平台开发的手绘图板可实现 CAD 模型草图创作,用户可以根据检索需求分别对 3 个视图的权重进行设置,可在交

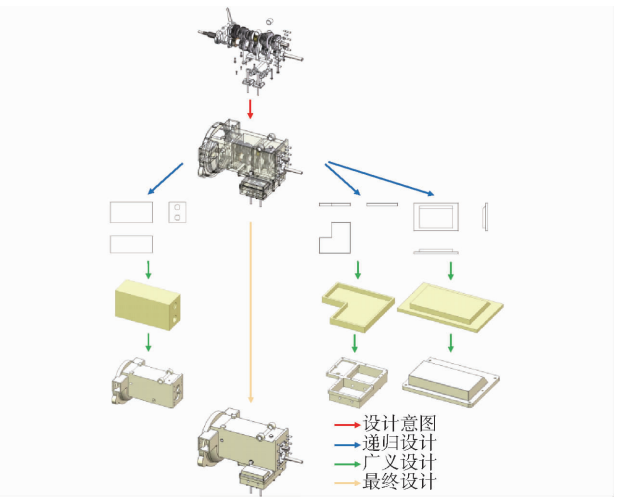


图 11 变速箱箱体产品广义设计

Fig.11 Generalized design of transmission housing

于形状扰动造成的不稳定干扰,此外,采样带宽 B 为 64 时,精度为 0.005,该精度能够满足图形检索要求。

(3) 基于草图的产品三维 CAD 模型概念设计推送方法能够为设计者在概念设计阶段提供方便、

灵活的查询方式,帮助其利用简单的手绘草图查找满足设计重用需求的三维 CAD 模型,进而参考、启发和扩展设计思维,并形成最终的设计方案,为设计过程提供一种新的支持手段。

参 考 文 献

- [1] CHEN X, GAO S, GUO S, et al. A flexible assembly retrieval approach for model reuse[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(6):554-574.
- [2] 张开兴,黄瑞,刘贤喜. 基于距离-夹角形状分布的三维 CAD 模型检索算法[J/OL]. 农业机械学报,2014, 45(4):317-320. ZHANG Kaixing, HUANG Rui, LIU Xianxi. 3D CAD model retrieval algorithm based on distance and angle distributions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):317-320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140450&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.050. (in Chinese)
- [3] STEPHANE D. Robust and efficient Fourier-Mellin transform approximations for gray level image recognition[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 83(1):57-78.
- [4] LIN S F, WU C C, HSU C Y, et al. An efficient 3D model retrieval based on principal axes analysis and feature integration[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2011, 25(4):583-604.
- [5] YUN G E, SHU H Z, LUO L M. A new way of linear registration using the legendre orthogonal moment and application in 2-value image data[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(1):54-56.
- [6] NOVOTNI M, KLEIN R. Shape retrieval using 3D Zernike descriptors[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(11):1047-1062.
- [7] LIU A A, SHI Y, NIE W Z, et al. View-based 3D model retrieval via supervised multi-view feature learning[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(3):3229-3243.
- [8] KAZHDAN M, FUNKHOUSER T, RUSINKIEWICZ S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors[C]//Proceedings of ACM/Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2003:167-175.
- [9] THOMAS F, PATRICK M, MICHAEL K, et al. A search engine for 3D models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(5):172-181.
- [10] PU J, LOU K, RAMANI K. A 2D sketch-based user interface for 3D CAD model retrieval[J]. Computer-Aided Design and Applications,2005,2(6):717-725.
- [11] LIANG Shuang, SUN Zhengxing. Sketch retrieval and relevance feedback with biased SVM classification[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(12):1733-1741.
- [12] 钱露,樊亚春,周明全,等. 基于 Leap Motion 的三维模型草图检索[J]. 图学学报,2017, 38(2):267-277. QIAN Lu, FAN Yachun, ZHOU Mingquan, et al. Sketch-based three-dimensional model retrieval based on Leap Motion[J]. Journal of Graphics, 2017, 38(2):267-277. (in Chinese)
- [13] MICHAEL K, THOMAS F, SZYMON R. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors[C]//Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, 2003:156-164.
- [14] Open CASCADE S. A. S. Open CASCADE technology, 3D modeling & numerical simulation[EB/OL]. (2017-09-11) [2018-06-10]. <http://www.opencascade.org/>.
- [15] FUNKHOUSER T, MIN P, KAZHDAN M, et al. A search engine for 3D models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(1):83-105.
- [16] HEALY D, KOSTELEK P, MOORE S. FFTs for the 2-sphere-improvements and variations[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2003, 9(4):341-385.
- [17] JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, IYER N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9):939-953.
- [18] SHILANE P, MIN P, KAZHDAN M, et al. The princeton shape benchmark[C]//The Shape Modeling International 2004 (SMI'04),2004:167-178.
- [19] HUANGFU Z M, ZHANG S S, YAN L H. A method of 3D CAD model retrieval based on spatial bag of words[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(6):8145-8173.
- [20] 赵秀艳,宋正河,张开兴,等. 基于多属性决策的农机专业底盘实例推理方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):370-377. ZHAO Xiuyan, SONG Zhenghe, ZHANG Kaixing, et al. Evaluation method of agricultural machinery professional chassis' cases based on multiple attributes decision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(2):370-377. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170250&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.050. (in Chinese)
- [21] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4):807-832.
- [22] KIM H, CHA M, MUN D. Shape distribution-based retrieval of 3D CAD models at different levels of detail[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(24):15867-15884.
- [23] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):1-17. XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180801&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)