

三维 CAD 软件性能自动化测试与变粒度可视评价

程锦¹, 叶虎强¹, 冯劲松², 刘振宇³, 谭建荣¹

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 310058, 杭州; 2. 武汉开目信息技术股份有限公司, 430076, 武汉; 3. 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 310058, 杭州)

摘要: 针对三维 CAD 软件性能指标缺乏参照基准而难以量化、现有软件性能评价方法不够直观等不足,提出了基于自动化测试与三角变换的三维 CAD 软件性能变粒度可视评价方法。首先,开发三维 CAD 软件统一测试接口和自动化测试工具,设计测试用例,通过相同的工具和用例对各三维 CAD 软件进行统一自动化测试,获取性能数据,通过国外对标软件测试建立参照基准,实现性能指标的量化;其次,对性能测试数据进行预处理,根据各指标的重要性构造归一化数据矩阵,通过三角多项式变换分别构造粗、细粒度下三维 CAD 软件性能的调和曲线图,引入基于乐观锁思想的数形结合法,基于格拉布斯准则与数形结合法检验数据的有效性;最后,通过变粒度的调和曲线可视聚类分析,直观得出三维 CAD 软件性能的评价结果。实例结果表明:所提方法能实现国产软件与对标软件性能的差异分析,直观地获得了三维 CAD 软件性能评价结果,为用户选择合适的软件提供了直观的决策依据,并与一般的基于层次分析的评价方法进行一致性比较,验证了所提方法的可靠性和有效性。

关键词: 三维 CAD 软件;自动化测试;三角变换;变粒度;可视评价

中图分类号: N945.16 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202308010 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0092-13

Automatic Testing and Variable-Granularity Visual Evaluation of the Performance of 3D CAD Software

CHENG Jin¹, YE Huqiang¹, FENG Jinsong², LIU Zhenyu³, TAN Jianrong¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Wuhan Kaimu Information Technology Co., Ltd., Wuhan 430076, China; 3. State Key Laboratory of CAD & CG,

Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The performance indexes of 3D CAD software are difficult to quantify due to the lack of benchmarks while the existing evaluation methods for software performance are not intuitive enough. To overcome these shortcomings, a visual evaluation method for the performance of 3D CAD software is proposed based on the automatic testing and triangular transformation. Firstly, the unified interfaces and the automatic testing tool for 3D CAD software are developed and the test cases are designed. Then the unified automatic test of different types of 3D CAD software is conducted by utilizing the same testing tool and test cases to obtain the performance data. And the performance indexes are quantified based on the testing results of foreign benchmark software. Secondly, the preprocessed performance data are utilized to construct the normalized data

matrixes according to the importance of different performance indexes. And the harmonic curves of coarse and fine granularities corresponding to the performance of 3D CAD software are constructed based on the triangular transformation. The validity of the performance data is checked by both the Grubbs' Criterion and intuitive analyses, where the latter is based on the idea of optimistic lock. Finally, the performance evaluation results of 3D CAD software are obtained qualitatively through the intuitive cluster analyses of the harmonic curves in variable granularities. The results of the case study demonstrate that the proposed method can analyze the performance differences between domestic software and benchmark software and intuitively obtain the performance evaluation results of 3D CAD software, which provides users intuitive decision basis to choose an appropriate software. Besides, compared with the general evaluation method based on analytic hierarchy process, the reliability and effectiveness of the proposed method are proved.

Keywords: 3D CAD software; automatic testing; triangular transformation; variable granularity; visual evaluation

通用三维CAD软件的功能基本类似,差别主要体现在性能上,包括各类功能操作的响应时间、内存占用量、运算精度等。而这些性能指标的优劣通常是用户选择三维CAD软件产品时重点考虑的因素。但三维CAD软件的性能表现受测试环境、测试用例、测试过程等因素的影响很大,难以直接确定指标的绝对值。采用相同的测试用例、方法和工具,在统一测试环境下对多款不同的三维CAD软件进行性能对比测试并记录其相应的性能数据,根据国外对标软件测试结果建立性能指标参照基准,进而实现对各款软件的性能差异分析评价,既有助于国产三维CAD软件企业客观认识自身软件产品与国外先进软件的性能差距,又能帮助用户更好地选择符合其应用需求的三维CAD软件产品。

现有通用的软件自动化测试工具^[1-3]多采用图像识别或全局钩子的方式捕获用户对软件的操作步骤及参数输入并形成录制脚本,基于该脚本驱动被测软件执行相应操作。然而,三维CAD软件强依赖于用户交互操作,用户必须在其提供的画布区域内通过鼠标点击与移动进行模型绘制,通用的自动化测试工具难以模拟该类操作;三维CAD软件的操作对象是一个三维模型,无法直接通过图像或数据文件的比对进行结果判定;三维CAD软件的功能与性能强耦合,草图设计、实体建模等各类功能自动化测试过程中需同时监控软件响应时间、占用内存等性能特性,以分析不同软件的性能差异。因此,通用自动测试工具并不适用于三维CAD软件测试,要实现对三维CAD软件的性能评价,首先需开发针对三维CAD软件的自动化测试工具,设计测试用例,实现对不同三维CAD软件性能的统一自动化测试。

利用自动化测试工具获得的三维CAD软件执行各类测试用例时的响应时间、内存占用量、运算精度等各类性能测试数据具有不同的量纲和不同的数量级,其值难以直接反映软件性能优劣。而现有软件决策评价领域的相关研究多侧重于根据测试数据建立数学模型,并利用逼近理想解排序法^[4-5]、层次分析法^[6-7]等来评价软件优劣。Si等^[8]针对在开放网络中分布式运行的软件实体,综合考虑传统的软件指标和与质量控制措施相关的指标,提出了基于贝叶斯推理的自底向上逐层计算软件实体可靠性的方法;岳川等^[9]针对传统评价方法量化软件指标时存在的困难,引入区间数表示软件指标得分信息,借助标准化投影模型和逼近理想解排序法,提出了一种包含加权评价矩阵的软件质量评价方法;Chen等^[10]针对多状态制造系统的运行特性,提出通过扩展状态任务网络来挖掘、集成和分析系统运行质量数据,并在计算预期产品合格率的基础上,利用概率方法评估任务的可靠性。然而,上述方法所得的评价结果通常是经一系列数学处理及运算后的数据,期间因加权等操作丢失了大量反映软件性能优劣的原始数据信息,且评价结果不够直观,所以需研究从枯燥繁杂的性能测试数据中洞察其所蕴含的软件性能优劣信息的有效可视化手段。

将数据可视化技术^[11-13]引入三维CAD软件性能评价,通过直观简明的图表^[14]分析抽象数据的本质,有助于快速洞察和准确把握三维CAD软件性能优劣。目前,已有学者将可视化技术应用于决策评价领域。Chen等^[15]提出通过模糊逻辑对各种表现形式的主观评价结果进行量化,并结合证据理论改进量化结果,利用模糊神经网络训练后将系统评价结果与主观评价结果在点线图中进行对比,获得了

符合实际的评价结果;Lou 等^[16]针对现有加性模型整合评估数据时存在不一致的问题,通过灰色关联分析法减少主观偏差,并采用二次加性模糊测度进行信息集成,得到方案排序结果,最后通过敏感性雷达图分析验证了方法的稳定性;卫博雅等^[17]针对传统加权信息融合方法不能有效降低信息损失、快速做出合理判断的问题,将有序序列的数据通过可视图转换法转化到网络拓扑结构中,进行权重衡量,获得了更加客观准确的计算结果。然而,上述研究仅将可视化技术应用于评价结果的表示或验证环节,仍未能克服评价过程中原始测试数据信息被大量丢失的不足。

针对上述问题,提出了基于统一自动化测试和三角变换的三维 CAD 软件性能变粒度可视评价方法。

1 三维 CAD 软件性能的统一自动化测试

1.1 三维 CAD 软件统一测试接口适配

目前,国内外各三维 CAD 软件所开放的二次开发接口的定义、功能和实现都有较大差异,无法直

接利用这些接口对软件进行自动化测试。但是,国内外各三维 CAD 软件均是以对象和行为概念来提供二次开发接口,其接口对象均能覆盖三维 CAD 系统的基本功能,均提供接口函数库,支持通过某种程序设计语言和相应开发工具实现二次开发,这些共同点使得不同三维 CAD 软件的公共接口表达成为可能。鉴于此,首先根据国外先进的三维 CAD 软件(CATIA、CREO、NX)二次开发技术的共同点,引入对象和行为的概念,对测试接口进行抽象,将复杂的三维 CAD 功能分解为一系列原子级功能并定义为可为外部调用的 API 接口,给出三维 CAD 软件的统一测试接口规范。然后,根据该定义对不同的三维 CAD 软件进行接口适配,如图 1 所示,以便能通过相同的测试用例脚本和自动化测试工具实现对各三维 CAD 软件的统一自动化测试,在极大提高测试效率的同时获得具有可比性的软件性能测试结果数据,并通过国外对标软件的测试建立性能指标的参照值,进而实现各国产软件性能的量化与评价。

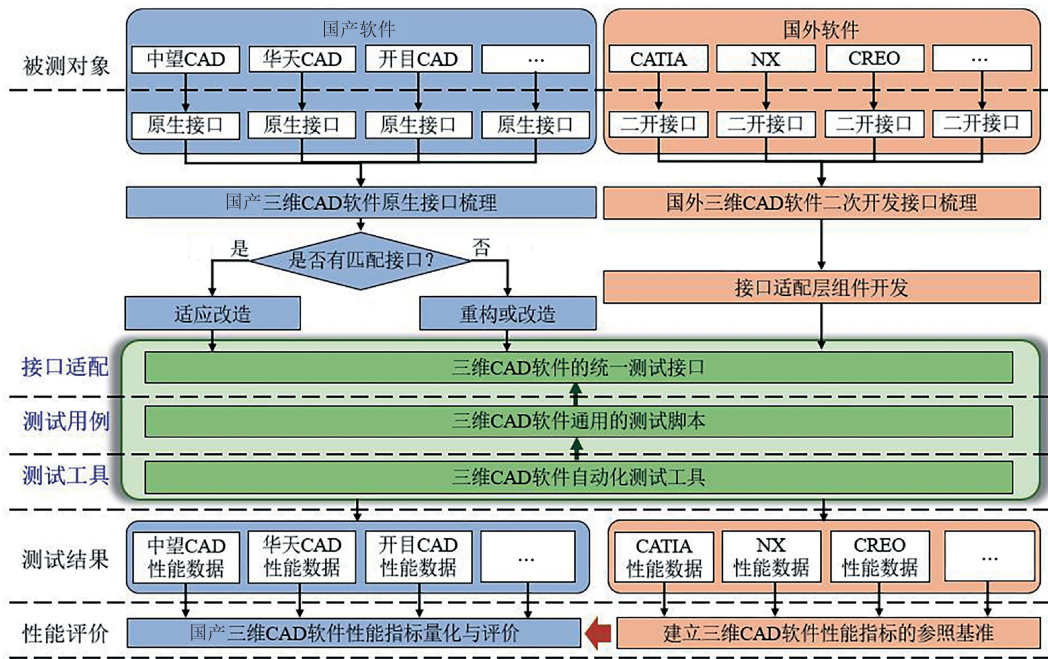


图 1 三维 CAD 软件统一接口适配与自动化测试框架

Fig. 1 Framework for the adaptation of unified interfaces and automatic testing of 3D CAD software

1.2 基于相同工具和用例的三维 CAD 软件性能测试

通过可解释 Python 脚本表达三维 CAD 软件各类性能测试用例,并以文件形式存放在本地磁盘,支持通过操作系统的目录管理功能完成对测试用例

脚本的分类管理。

基于 Python 与 C++ 的双向集成技术实现对三维 CAD 软件性能的自动化测试,如图 2 所示。一方面,通过 C/C++ 集成 Python,调用 Python 入口函数启动测试;另一方面,通过 Python 脚本集成 C/

C++测试接口,实现通过测试用例脚本调用三维 CAD 软件的标准 API 接口完成测试,创建模型并保存为 STP 模型文件,同时输出各接口的执行时间及内存等性能数据。

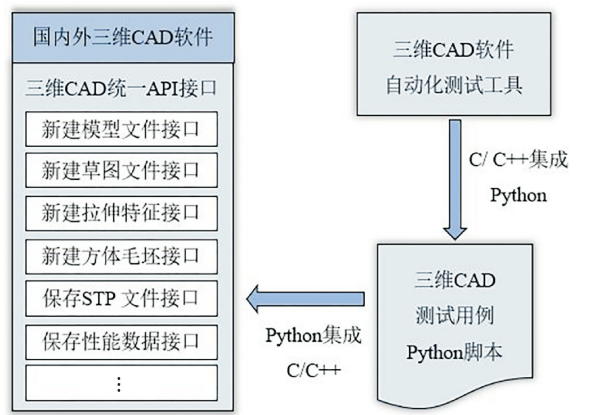


图 2 基于 Python 与 C++双向集成的自动测试
Fig. 2 Automatic testing based on bidirectional integration of Python and C++

基于 Python 与 C++双向集成技术开发的三维 CAD 软件自动化测试工具如图 3 所示。该自动化测试工具基于国内外各三维 CAD 软件的统一测试接口,通过一键式操作自动完成三维 CAD 各类建模操作。通过在测试用例库中选择草图设计、实体建模等各类测试用例脚本,在同一界面环境下切换不同的三维 CAD 软件,自动执行单个或批量的测试用例,输出测试结果文件,并记录相应的响应时间、内存占用、运算精度等性能数据。

1.3 统一自动化测试原理和工具的功能范围

结合图 1、图 2,统一自动化测试的原理如下:将国内外三维 CAD 软件的外部开发接口依据定义的统一规则进行改造或二次开发,整合出统一的调用接口,接口覆盖新建模型文件、新建草图文件、新建拉伸特征、新建方体毛坯、保存 STP 文件、保存性能数据等功能;基于 C++开发的三维 CAD 软件自动化测试工具集成 Python,并通过 Python 函数调用 Python 语言编写的测试脚本(测试用例);测试脚本集成基于 C++开发的统一测试接口,进而调用统一测试接口对需要测试的软件按照脚本中定义好参数的模型进行建模及测试;设计的底层代码通过“监测器”记录时间和内存的变化,输出相应用例的测试数据。其中,测试数据通过“测试工具→测试用例→测试接口→三维 CAD 软件”这一整套的测试流程获得。

依据三维 CAD 软件自动化测试工具所拥有的

统一接口覆盖的功能,设计并编写覆盖草图设计、实体建模、曲线曲面建模、布尔运算、装配设计、尺寸标注、工程图设计、压力测试、模型保存、模型加载等性能的测试用例,每个方面拥有个数不等的不同复杂程度的用例模型,且后续可继续按需扩展,如图 3 所示。通过在测试工具中选择需要进行测试的三维 CAD 软件,点击“启动 CAD”打开对应的三维 CAD 软件,选择结果存放目录和用例(可选择多个),点击“执行测试”,前端显示的三维 CAD 软件便会依据脚本按序进行建模过程,后端“检测器”相关代码会记录相关数据,待测试用例执行完后,结果目录中就会出现所选用例的时间消耗和内存占用等数据的 Excel 文件。点击“合并报表”可以将不同三维 CAD 软件测得的同一个测试用例的数据合并到一个表格中。

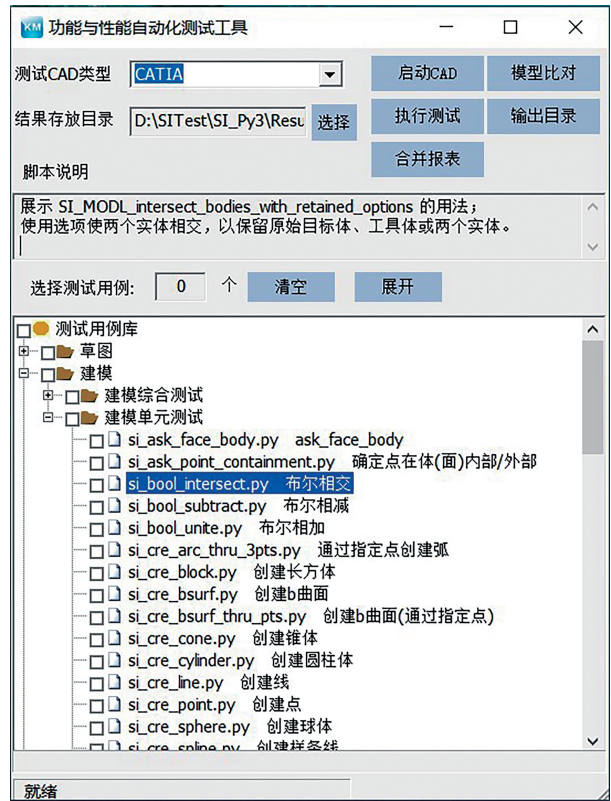


图 3 三维 CAD 软件自动化测试工具
Fig. 3 Automatic testing tool for 3D CAD software

2 三维 CAD 软件性能变粒度可视评价

2.1 基于三角变换的三维 CAD 性能测试数据可视化

设有 n 款待评价的三维 CAD 软件和一款对标软件,选取 k 个二级性能指标,通过图 3 所示的自动化测试工具,选择对应于二级指标的合适数量和测

试内容的用例,基于相同的用例对所有 $n+1$ 款软件进行重复的 m 次自动化测试,然后将所记录的性能测试数据依据统一的边界值(最大值和最小值)进行归一化处理去除量纲,最终整合出一个归一化的性能数据矩阵 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 。

三维 CAD 软件性能测试数据矩阵 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 的每一行都是一个高维的数据向量。为将高维空间中的样本点投影到二维平面上以增强数据可读性,并直观地进行性能分析,将数据矩阵 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 的每一行数据向量 $\mathbf{X}_i = (X_{i,1}, \dots, X_{i,k})$, ($1 \leq i \leq k$) 作如下三角变换

$$f_i(t) = \begin{cases} \frac{X_{i,1}}{\sqrt{2}} + X_{i,2} \sin(t) + X_{i,3} \cos(t) + \dots + \\ X_{i,k-1} \sin(\frac{k-1}{2}t) + X_{i,k} \cos(\frac{k-1}{2}t), & \text{若 } k \text{ 为奇数} \\ \frac{X_{i,1}}{\sqrt{2}} + X_{i,2} \sin(t) + X_{i,3} \cos(t) + \dots + \\ X_{i,k} \sin(\frac{k}{2}t), & \text{若 } k \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t \in [-\pi, \pi]$ 。

当 t 在规定的区间内时,数据矩阵 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 中的每一行测试数据都可以生成一条关于 t 变量的曲线,从而得到 $(n+1)m$ 条曲线,一起构成调和曲线图。式(1)中, t 前的系数越大,对应三角函数频率越大,影响波动次数,而每个三角函数前面的系数越大,则振幅越大,影响曲线纵向位置;三角变换表达式的第一项不受三角函数取值界限影响,能在很大程度上影响调和曲线的振幅;在系数的数量级相差不大时,越靠前的系数越能控制曲线的位置,越靠后的系数越能控制曲线的波动情况。鉴于曲线位置是分析调和曲线图的依据,故在安排三角变换表达式各项系数 $X_{i,j}$ ($1 \leq i \leq k$, $1 \leq j \leq (n+1)m$) 顺序时,通常将对聚类分析有重要贡献的系数放在前面,也就是将对三维 CAD 软件总体性能有较大影响的指标数据作为系数放在较前面,以使生成的调和曲线更直观地反映原始性能测试数据信息。各指标的重要性程度由通过层次分析法(AHP)获得的权重表示。为避免重复,此处假设式(1)中的系数已按重要性程度排序,即数据矩阵 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 已依据三维 CAD 软件性能指标重要性按列排序。

式(1)的三角变换可推导出如下数学性质。

性质 1 对于任意两个三维 CAD 软件性能测试数

据向量 $\mathbf{X}_p, \mathbf{X}_q$, 用 L_2 范数来度量两向量对应的调和曲线 $f_p(t), f_q(t)$ 之间的偏离程度

$$d_{f_p(t)f_q(t)}^2 = ||f_p(t), f_q(t)||_2 = \int_{-\pi}^{\pi} (f_p(t) - f_q(t))^2 dt \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),可得

$$d_{f_p(t)f_q(t)}^2 = \pi \sum_{j=1}^k (X_{p,j} - X_{q,j})^2 \quad (3)$$

用欧几里得度量来表示 k 维空间中两个样本点 $\mathbf{X}_p(X_{p,1}, X_{p,2}, \dots, X_{p,k})$ 与 $\mathbf{X}_q(X_{q,1}, X_{q,2}, \dots, X_{q,k})$ 间的欧式距离,即向量 $\mathbf{X}_p, \mathbf{X}_q$ 之间的欧氏距离为

$$d_{\mathbf{X}_p\mathbf{X}_q}^2 = \sum_{j=1}^k (X_{p,j} - X_{q,j})^2 \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知,两调和曲线偏离程度的平方恰好是其对应两向量欧式距离的平方的 π 倍

$$d_{f_p(t)f_q(t)}^2 = \pi d_{\mathbf{X}_p\mathbf{X}_q}^2 \quad (5)$$

综上,两条调和曲线之间的偏离程度与对应两行性能测试数据向量间的距离呈线性关系,可以通过两条调和曲线之间的偏离程度来表示两行测试数据样本的差距,也就得到了两次性能综合的差距。由于两条调和曲线之间的偏离程度可通过直观观察和分析定性得出,该性质使得聚类现象和离群点均可以直观地在调和曲线图中观察获得。

性质 2 由于三角函数振幅由其系数决定,故从测试数据到调和曲线的三角变换在一定程度上保持了线性,若一行测试数据向量 $\mathbf{X}_l$ 的所有数值都小于 $\mathbf{X}_p$ 而大于 $\mathbf{X}_q$, 那么 $\mathbf{X}_l$ 对应的调和曲线位于 $\mathbf{X}_p, \mathbf{X}_q$ 之间

$$\begin{aligned} & \text{若 } X_{p,j} < X_{l,j} < X_{q,j}, \quad 1 \leq j \leq k \\ & \text{则 } f_p(t) < f_l(t) < f_q(t), \quad t \in (-\pi, \pi) \end{aligned} \quad (6)$$

三角变换拥有的上述优良性质及其对多维数据结构的良好适配和表达,使其非常适用于描述三维 CAD 软件多类型的性能指标数据。

将归一化性能测试数据矩阵的各行向量均通过式(1)进行三角变换,以向量内各元素值 $X_{i,j}$ ($1 \leq i \leq (n+1)m$, $1 \leq j \leq k$) 作为幅值导向,以向量内各元素位置 j ($1 \leq j \leq k$) 表征三维 CAD 软件各性能指标的重要性程度,可以得到各款软件预处理后测试数据对应的调和曲线集。在同一坐标系中,用不同颜色表示由不同三维 CAD 软件的性能测试数据生成的调和曲线集,就可以直观便捷地进行后续性能定性分析评价。

2.2 三维 CAD 软件性能评价的变粒度策略

三维 CAD 软件性能评价中需考虑的性能指标

包括利用自动化测试工具调用软件执行各测试用例过程中记录的模型加载、模型保存、实体建模等操作所需的内存、时间等数据,指标众多,且数量级和量纲各不相同,是一个复杂的综合评价问题^[18-19]。

为此,引入变粒度策略^[20-21],提出三维 CAD 软件性能的变粒度可视评价方法。所谓粒度,是指人类在解决和处理复杂问题时把大量复杂信息按其各自的特征和性能划分而成的简单信息块^[22-23]。多粒度形式概念分析是数据挖掘与知识发现的重要工具,能够在复杂问题求解、大数据挖掘和不确定性信息处理等问题上提供有力帮助。本文引入的多粒度策略主要体现在参考指标的细分程度上。

具体地,将三维 CAD 软件所有性能评价指标数据 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 的行向量进行三角多项式变换,生成调和曲线,根据其和对标软件调和曲线的偏离程度直观分析其总体性能优劣,实现对其综合性能优劣的粗粒度可视评价;同时,假设 k 个二级指标对应 g 个一级指标,将 k 列数据分为 g 份, $z_s (1 \leq s \leq g)$ 为第 s 个一级指标下二级指标的数量,得到三维 CAD 软件各一级指标对应的性能方面的数据 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times z_s} (1 \leq s \leq g)$, 将其行向量分别进行三角多项式变换函数,生成各具体一级性能指标测试数据所对应的调和曲线,根据其和对标软件相同一级性能指标测试数据所生成调和曲线的偏离程度分析各一级性能指标优劣,即各类具体性能方面的优劣,实现不同类别性能指标优劣的细粒度可视评价。明确软件具体性能的优劣方面,可以为用户在选择软件时提供具有个人性能具体方面侧重的参考。变粒度策略的引入可以完善评价过程,满足用户不同层次的需求,实现多类型指标响应数据的抽象与细化。

2.3 形数结合的性能测试数据有效性检验

鉴于三维 CAD 软件自动化测试获得的性能测试数据可能存在异常值,在对其性能数据进行可视评价前,需对测试数据的有效性进行校验,剔除异常值。同时,由于性能测试数据出现异常的概率相对较小,若直接对归一化性能数据矩阵的所有数据向量逐一进行判别,会增加很多不必要的工作量。参考乐观锁机制^[24-25]的思想,先乐观地认为数据中无异常值,进行三角多项式变换等操作,得到调和曲线图,若在图中发现明显的异常曲线,则返回到对应数据进行删除或替换等操作。

具体地,为保证测试数据的有效性并提高数据异常的检测效率,在参考乐观锁机制的基础上提出形数结合的三维 CAD 软件性能测试数据有效性检

验方法。首先,通过三角多项式变换生成不同粒度下某款三维 CAD 软件性能的调和曲线集合,若该集合中存在明显与其他曲线“不合群”的曲线,则初步判断其为离群曲线,否则认为集合中无离群曲线;然后,通过格拉布斯准则对初判为离群的曲线所对应的归一化性能测试数据向量作进一步分析,判断其是否存在异常值。

假设某款软件序号为 h ,求得该款软件 m 个数据向量 $\mathbf{X}_i ((h-1)m+1 \leq i \leq hm)$ 相对于零向量的欧式距离

$$d_{\mathbf{X}_i \mathbf{X}_0} = \sqrt{\sum_{j=1}^k \mathbf{X}_{i,j}^2}, \quad (h-1)m+1 \leq i \leq hm \quad (7)$$

式中: i 为该款软件的性能测试数据向量 $\mathbf{X}_i$ 所在数据矩阵 $\mathbf{X}_{(n+1)m \times k}$ 中的行号。

式(7)求得的所有欧式距离的算术平均值及剩余误差为

$$\bar{d} = \sum_{i=(h-1)m+1}^{hm} d_{\mathbf{X}_i \mathbf{X}_0} / m \quad (8)$$

$$v_i = d_{\mathbf{X}_i \mathbf{X}_0} - \bar{d} \quad (9)$$

由贝塞尔公式计算标准偏差估计值为

$$\hat{\sigma}(d) = \sqrt{\sum_{i=(h-1)m+1}^{hm} v_i^2 / (m-1)} \quad (10)$$

根据具体测试次数 m 和给定置信概率(通常取 0.99 或 0.95),通过格拉布斯临界值表确定格拉布斯临界值 G ,则当该款三维 CAD 软件的性能测试数据满足 $|v_i| > G\hat{\sigma}(d)$, $(h-1)m+1 \leq i \leq hm$ 时,判定其测试数据异常,需在编写的三角多项式变换程序中通过返回函数找到对应的数据向量,进行删除或替换操作,否则未发现异常值,认为当前性能测试数据集有效。

2.4 基于调和曲线聚类分析的三维 CAD 性能可视评价

针对无离群曲线的 Andrews 调和曲线集,将 n 款软件性能测试数据生成的曲线集与对标软件性能测试数据生成的曲线集分别进行两两比较。根据调和曲线的性质直观分析三维 CAD 软件性能优劣的具体方式为:若某款待评价软件和对标软件对应调和曲线集间的趋势差异和曲线间距越小(具体表现为曲线“拧在一起”的聚类现象),则两款软件的性能越接近,该待评价软件的性能越优;反之,若某款软件和对标软件对应调和曲线集之间的趋势差异和曲线间距越大,则两款软件性能相差越大,该待评价软件的性能越差。

当存在多款待评价软件对应的调和曲线集与对

标软件的调和曲线集均存在多个相互交叉点时,可通过分析待评价软件的调和曲线集与对标软件调和曲线集的相交点数目来判断其聚类程度。具体地,两组曲线集的交点数越多,则表明两款软件的性能越接近,待评价软件的性能越优。

3 三维 CAD 软件性能测试与评价流程

基于统一自动化测试和三角多项式变换的三维 CAD 软件性能变粒度可视评价方法流程如图 4 所示,具体步骤如下。

步骤 1 确定三维 CAD 软件性能评价指标集,根据三维 CAD 软件性能测试需求定义统一测试接口,对各三维 CAD 软件进行接口适配;利用自动化测试工具和测试用例(即 Python 测试脚本)对各三维

CAD 软件进行可比性测试,输出各软件的性能测试结果数据。

步骤 2 对性能测试数据进行预处理,根据各指标的重要性程度构造归一化性能测试数据矩阵。

步骤 3 采用变粒度可视评价方法,从粗、细两个粒度分别通过式(1)对归一化数据矩阵进行三角多项式变换,生成对应的调和曲线图。

步骤 4 通过式(7)~(10)判断调和曲线图中有无离群曲线。若有,则进行删除替换操作,得到无离群曲线的调和曲线图;若无,则直接进行下一步分析。

步骤 5 通过曲线间的欧式距离或曲线相交点数目对各三维 CAD 软件性能测试数据生成的调和曲线图进行可视化聚类分析,得到粗、细粒度下的三维 CAD 软件性能的可视评价结果。

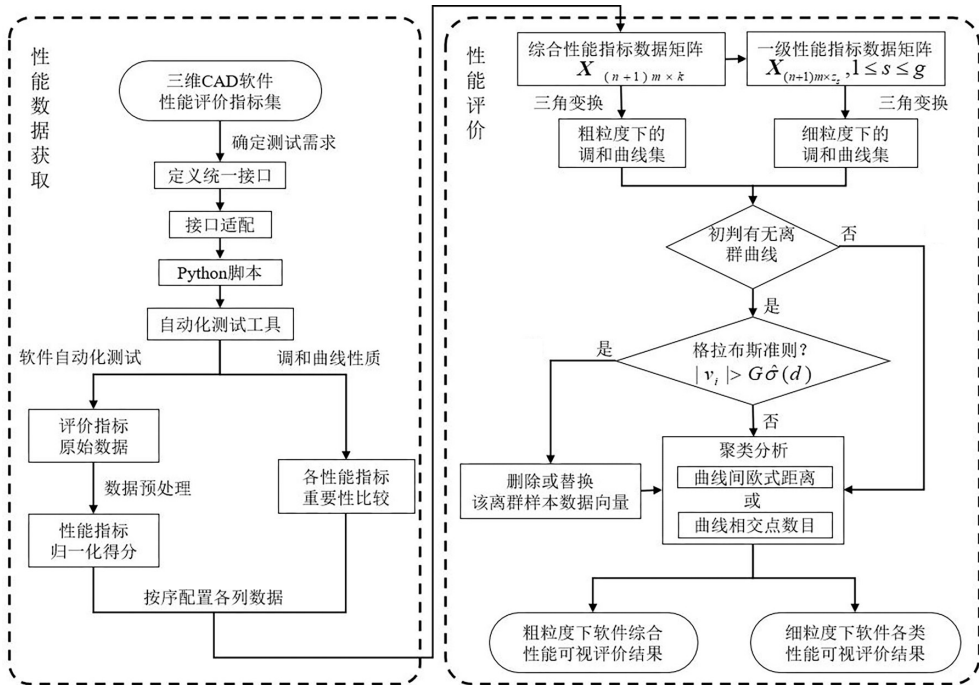


图 4 提出方法的流程图
Fig. 4 The flowchart of the proposed method

4 应用实例

以国内外 3 款典型的三维 CAD 软件 CATIA、ZW3D、KM3DCAD(分别用 A、B、C 表示)性能评价为例,验证提出的三维 CAD 软件性能可视评价方法的可行性与有效性。其中 CATIA 拥有法国达索公司自研的 CGM 几何建模内核,性能极强,3 款中性能最优,为公认的对标软件。

4.1 三维 CAD 软件性能测试数据获取

选择实体建模、布尔运算、模型加载、模型保存

作为三维 CAD 软件性能评价一级指标,各一级指标又由其对应的时间消耗和内存占用量组成,故共有 8 个二级性能指标,各二级性能指标数据直接由自动化测试获得。通过相同的测试用例和基于统一接口的自动化测试工具,在相同测试环境下调用 3 款软件进行自动化测试。具体环境配置如下:处理器为 Intel Xeon Gold 6226R,CPU 主频率为 2.9 GHz,内存为 8 GB,硬盘为 1 TB,操作系统为 Windows 10 专业版 64 位,开发环境为 Python 2.7,QT 版本为 5.9.9,编译环境为 Visual Studio 2005、Visual Studio 2012。

具体地,为避免单个用例测试存在的偶然性,针对四个一级性能指标分别选取 3 个不同的用例,实体建模用例模型如图 5 所示,布尔运算用例模型如图 6 所示,模型加载和保存选取的用例模型相同,如图 7 所示;分别将执行 3 个测试用例所需的时间消耗和内存占用量求和,获得 8 个测试数据,这 8 个测试数据即为一组行向量锥形;同时,基于相同的用例对各款软件均执行 10 次重复性测试,记录相应的性能测试数据。

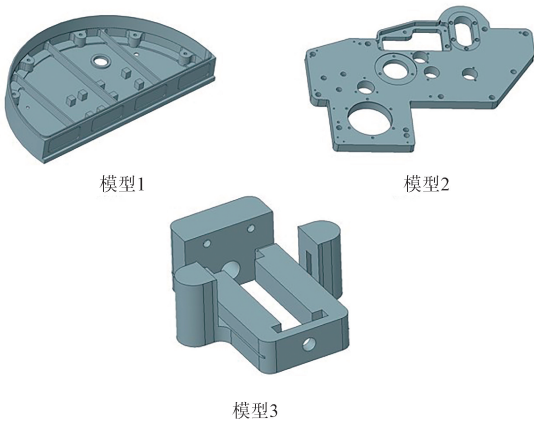


图 5 实体建模用例模型
Fig. 5 Three cases of entity modeling

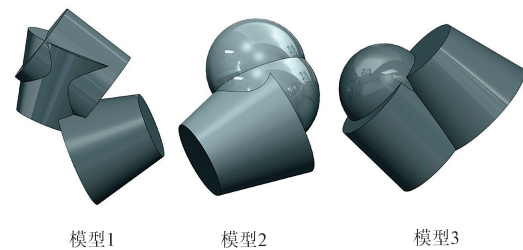


图 6 布尔运算用例模型
Fig. 6 Three cases of Boolean operation

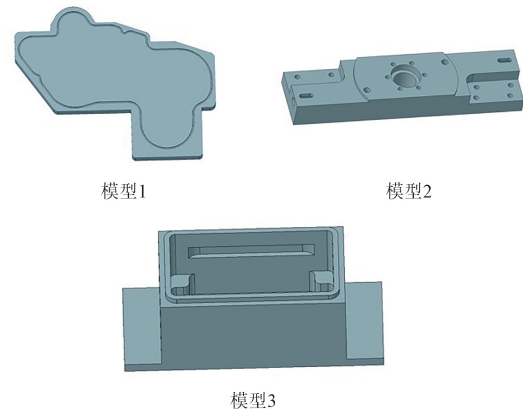


图 7 模型加载与保存用例模型
Fig. 7 Three cases of modeling loading and saving

4.2 三维 CAD 软件性能测试数据三角变换

通过层次分析法(AHP)依据各性能指标的重要性程度确定各指标权重,先对每个一级指标的相对重要性进行两两比较。在使用三维 CAD 软件时,实体建模能力无疑是用户最关心的,所以实体建模指标比其他 3 个一级指标更重要;在剩下的 3 个指标中,模型加载和保存在使用中是操作频率较小的,所以布尔运算相对这两个指标来说更重要;模型加载和模型保存都是“一次点击”的操作,但用户对于保存的耐心程度一般是大于加载的,所以模型加载比模型保存稍微重要一些。依据上述分析所得的相对重要性程度给各一级指标通过 1-9 标度法进行标度赋值,然后建立重要性判断矩阵,矩阵通过一致性判断后进行归一化处理获得各一级指标的重要性系数,以此作为其权重,各一级指标具体权重如表 1 所示。各一级指标对应各组二级指标重复上述操作,最终获得的各二级指标具体权重如表 2 所示。

表 1 三维 CAD 软件性能评价一级指标权重	
Table 1 Weight of primary indexes of 3D CAD software	
一级指标	权重值
实体建模 P_1	0.549
布尔运算 P_2	0.221
模型加载 P_3	0.123
模型保存 P_4	0.107

表 2 三维 CAD 软件性能评价二级指标权重	
Table 2 Weight of secondary indexes of 3D CAD software	
一级指标	权重值
实体建模时间 P_{11}	0.857
实体建模内存 P_{12}	0.143
布尔运算时间 P_{21}	0.756
布尔运算内存 P_{22}	0.244
模型加载时间 P_{31}	0.875
模型加载内存 P_{32}	0.125
模型保存时间 P_{41}	0.875
模型保存内存 P_{42}	0.125

将表 2 所列三维 CAD 软件一级性能指标权重与对应的各二级指标权重相乘后进行比较排序,得到各二级性能指标重要性关系序列由大到小为:实体建模时间 P_{11} (0.470)、布尔运算时间 P_{21} (0.167)、模型加载时间 P_{31} (0.108)、模型保存时间 P_{41} (0.094)、实体建模内存 P_{12} (0.079)、布尔运算内存 P_{22} (0.054)、模型加载内存 P_{32} (0.015)、模

型保存内存 $P_{42}(0.013)$ 。由此直接列出对应的调和曲线三角变换公式为

$$f_i(t) = \frac{X_{i, P_{11}}}{\sqrt{2}} + X_{i, P_{21}} \sin(t) + X_{i, P_{31}} \cos(t) + X_{i, P_{41}} \sin(2t) + X_{i, P_{12}} \cos(2t) + X_{i, P_{22}} \sin(3t) + X_{i, P_{32}} \cos(3t) + X_{i, P_{42}} \sin(4t) \quad (12)$$

式中 P_{11} 、 P_{21} 、 P_{31} 、 P_{41} 、 P_{12} 、 P_{22} 、 P_{32} 、 P_{42} 分别对应性能测试数据矩阵的第 1~8 列。

通过自动化测试获得的三维 CAD 软件各类操作所需时间和内存性能二级指标原始数据含义及数量级存在显著差异,考虑其均为望小型指标,通过如

下公式进行预处理

$$X_{i, j} = \frac{p_{i, j}^{\max} - p_{i, j}}{p_{i, j}^{\max} - p_{i, j}^{\min}} \quad (13)$$

式中: $p_{i, j}^{\max}$ 、 $p_{i, j}^{\min}$ 分别为原始性能测试数据中的最大值、最小值; $p_{i, j}$ 为第 i 个软件的第 j 个二级性能指标的原始测试数据值。

3 款软件测试所得最大消耗时间为 2 300 ms,最小消耗时间为 150 ms,最大占用内存为 32 000 KB,最小占用内存为 400 KB。经预处理后,3 款三维 CAD 软件 A、B、C 的各 10 组测试数据的归一化值如表 3~表 5 所示。

表 3 A 软件 10 组性能测试响应数据归一化得分

Table 3 Normalized value of 10 groups of performance test data of A

测试 组号	软件各指标归一化值							
	P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{41}	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{42}
A1	0.714	0.983	0.903	0.786	0.981	0.900	0.938	0.998
A2	0.663	0.968	0.927	0.813	0.998	0.970	0.936	0.996
A3	0.743	0.961	0.912	0.804	0.998	0.961	0.948	0.996
A4	0.656	0.970	0.895	0.782	0.994	0.943	0.947	0.996
A5	0.684	0.970	0.893	0.776	0.982	0.955	0.942	0.997
A6	0.670	0.986	0.898	0.787	0.989	0.945	0.948	0.996
A7	0.620	0.961	0.887	0.787	0.968	0.915	0.945	0.997
A8	0.663	0.976	0.920	0.778	0.992	0.916	0.947	0.996
A9	0.670	0.971	0.903	0.782	0.999	0.899	0.934	0.998
A10	0.707	0.970	0.887	0.769	0.992	0.957	0.940	0.999

表 4 B 软件 10 组性能测试的各指标响应数据归一化得分

Table 4 Normalized value of 10 groups of performance test data of B

测试 组号	软件各指标归一化值							
	P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{41}	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{42}
B1	0.250	0.518	0.735	0.751	0.770	0.133	0.827	0.613
B2	0.272	0.605	0.726	0.742	0.770	0.171	0.832	0.645
B3	0.269	0.557	0.707	0.738	0.770	0.014	0.835	0.621
B4	0.201	0.599	0.743	0.721	0.766	0.013	0.830	0.636
B5	0.255	0.516	0.700	0.727	0.770	0.056	0.818	0.557
B6	0.217	0.611	0.733	0.751	0.767	0.055	0.835	0.582
B7	0.239	0.574	0.733	0.743	0.766	0.137	0.829	0.577
B8	0.184	0.583	0.743	0.753	0.767	0.146	0.817	0.613
B9	0.227	0.517	0.717	0.724	0.766	0.094	0.820	0.611
B10	0.262	0.565	0.744	0.743	0.770	0.105	0.823	0.592

表 5 C 软件 10 组性能测试的各指标响应数据归一化得分

Table 5 Normalized value of 10 groups of performance test data of C

测试 组号	软件各指标归一化值							
	P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{41}	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{42}
C1	0.205	0.496	0.315	0.902	0.752	0.684	0.700	0.781
C2	0.074	0.422	0.281	0.895	0.744	0.854	0.705	0.784
C3	0.205	0.452	0.286	0.907	0.745	0.894	0.702	0.806
C4	0.198	0.392	0.298	0.909	0.777	0.819	0.693	0.799
C5	0.321	0.421	0.293	0.903	0.755	0.818	0.705	0.774
C6	0.023	0.393	0.306	0.916	0.648	0.784	0.692	0.777
C7	0.051	0.439	0.266	0.900	0.593	0.843	0.704	0.793
C8	0.053	0.449	0.310	0.913	0.781	0.841	0.707	0.786
C9	0.096	0.455	0.310	0.913	0.745	0.845	0.690	0.781
C10	0.096	0.475	0.307	0.895	0.743	0.753	0.707	0.778

4.3 三维 CAD 软件性能变粒度可视评价

4.3.1 粗粒度可视评价

将表 3~表 5 的测试数据整合之后,得到反映三维 CAD 软件综合性能指标的数据矩阵 $\mathbf{X}_{30 \times 8}$ 。将其输入三角变换函数,得到各款三维 CAD 软件粗粒度下的性能测试数据调和曲线集,如图 8 所示。

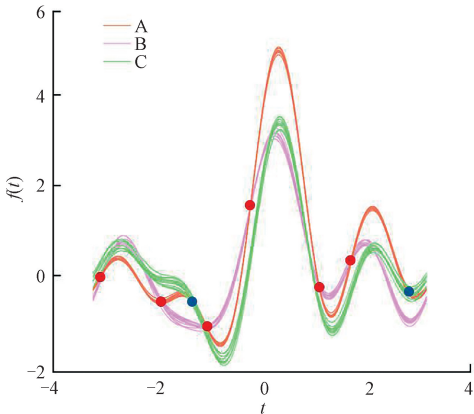


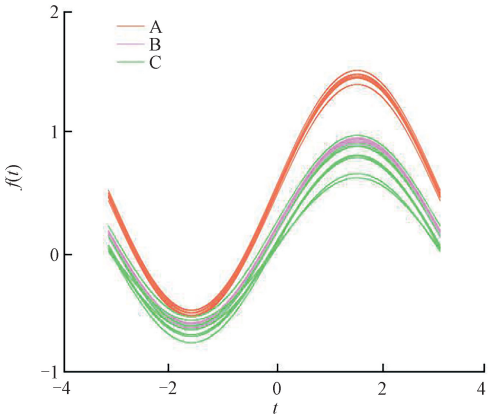
图 8 综合性能测试数据调和曲线图

Fig. 8 Harmonic curves of comprehensive performance test data

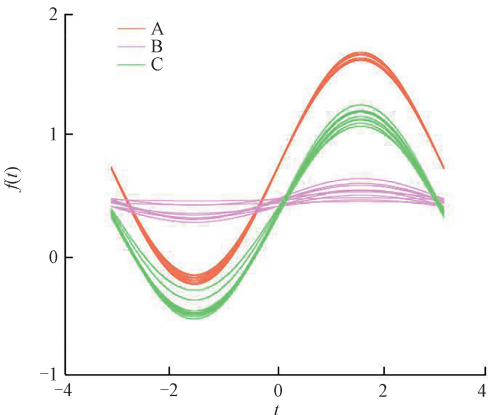
由图 8 可知,该调和曲线图中无离群曲线,且适合通过相交点数目进行聚类分析。图 8 中紫色调和曲线集(B)与橙色调和曲线集(对标软件 A)的交点有 6 个,而绿色调和曲线集(C)与橙色调和曲线集(对标软件 A)的交点只有 2 个,即 B 对应的调和曲线集与对标软件 A 对应调和曲线集更加“拧成股”,从而可以根据 Andrews 调和曲线性质,定性地推断出 B 与 A 性能更接近,C 与 A 性能相对差距较大。因此,两款待评价软件中,B 软件的性能比 C 软件性能更佳。

4.3.2 细粒度可视评价

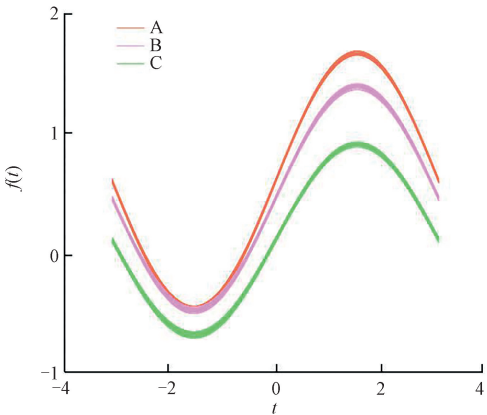
利用实体建模、布尔运算、模型加载、模型保存 4 个一级性能指标下的二级性能指标规范化后的测试数据,分别构造 4 个 $\mathbf{X}_{30 \times 2}$ 的性能测试数据矩阵。将各数据矩阵分别输入三角变换函数,生成反映 4 类性能指标优劣的细粒度的三维 CAD 软件性能测试数据调和曲线图,如图 9 所示。



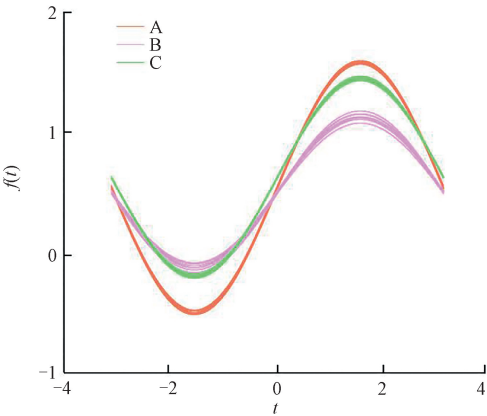
(a) 实体建模



(b) 布尔运算



(c)模型加载



(d)模型保存

图 9 3 款软件各一级性能指标测试数据生成的调和曲线图
Fig. 9 Harmonic curves of test data of each specific performance index

由图 9 可知:各调和曲线图中均无离群点,且适合通过调和曲线集之间的偏移距离进行聚类分析;在实体建模方面,B 软件对应的调和曲线集更加贴近对标软件 A 对应的曲线集,所以其实体建模能

力较 C 软件好;在布尔运算方面,C 软件对应曲线集更加贴近对标软件对应的曲线集,故其布尔运算能力较 B 软件好;在模型加载方面,B 软件对应的调和曲线集更加贴近对标软件对应的曲线集,故其模型加载能力较 C 软件好;在模型保存方面,C 软件对应曲线集更加贴近对标软件对应曲线集,故其模型保存能力较 B 软件好。

4.3.3 评价方法的一致性分析

通过 AHP 对相同的预处理数据进行量化分析,得到评价结果,将其与由本文方法得到的结果进行对比,以验证提出的变粒度可视评价方法的一致性。

首先对 A、B、C 软件的 10 次重复测试数据求各指标的平均值,以此作为软件性能指标评价得分,结果如表 6 所示;然后将 A 软件的各二级指标得分分别与对应的二级指标权重相乘再求和,得到 A 软件的性能一级指标得分,B、C 软件重复上述操作,具体数据结果如表 7 所示;接着,继续将 A 软件的性能一级指标得分与对应的一级指标权重相乘再求和,得到 A 软件的性能综合得分,B、C 软件重复上述操作,具体数据结果如表 7 所示。上述分层的加权求和具体过程的数学描述为

$$T(P) = \sum_{i=1}^{N_P} \omega_{P_i} a_{P_i}$$
$$a_{P_i} = \sum_{j=1}^{N_{P_i}} \omega_{P_{ij}} a_{P_{ij}} \tag{14}$$

式中: $a_{P_{ij}}$ 为二级指标得分; $\omega_{P_{ij}}$ 为二级指标权重; N_{P_i} 为一级指标数; a_{P_i} 为一级指标得分; ω_{P_i} 为一级指标权重; N_P 为二级指标数; $T(P)$ 为性能综合得分。

表 6 A、B、C 3 款软件的各指标数据平均值

Table 6 The average value of each index of the three kinds of software A, B and C

软件 编号	软件各指标数据平均值							
	P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{41}	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{42}
A	0.679	0.972	0.903	0.786	0.989	0.936	0.943	0.997
B	0.238	0.565	0.728	0.739	0.768	0.092	0.827	0.605
C	0.132	0.439	0.297	0.905	0.728	0.814	0.701	0.786

表 7 A、B、C 3 款软件的一级性能指标得分和综合性能得分

Table 7 The value of primary performance indexes and comprehensive performance of the three kinds of software A, B and C

软件 编号	软件各一级性能指标得分和综合性能得分				
	P_1	P_2	P_3	P_4	$T(P)$
A	0.723	0.963	0.908	0.813	0.809
B	0.313	0.449	0.740	0.722	0.440
C	0.217	0.531	0.348	0.890	0.375

由表7可得:A的各一级性能指标得分以及综合性能得分均高于B和C,确为对标软件;B在 P_1 (实体建模)、 P_3 (模型加载)以及 $T(P)$ (综合性能)的得分优于C;C在 P_2 (布尔运算)和 P_4 (模型保存)这两个指标上的得分优于B。

由AHP得到的一般评价结果与由提出的变粒度可视评价方法得到的评价结果高度一致,所提变粒度可视评价方法的可靠性和有效性得到了验证,用户选择软件时一般不需要了解具体性能数据的差异,或者说对于数据并不是很敏感,不能快速便捷地从数据中挖掘出自己选择产品的有效信息依据,而粗粒度的可视评价为用户提供了软件综合性能的相对优劣信息,细粒度的可视评价为用户提供了软件具体性能方面的相对优劣信息,足够辅佐用户进行三维CAD软件的选择。

5 结 论

为实现对三维CAD软件性能的客观评价并直观展现软件性能优劣差异,提出了一种基于统一自动化测试与三角变换的三维CAD软件性能变粒度可视评价方法。通过开发三维CAD软件的统一测试接口和基于统一接口的自动化测试工具,基于相同的测试用例和工具,实现对不同三维CAD软件性能的统一自动化测试,获取各性能评价指标的测试结果数据。将经规范化预处理的性能测试数据作为三角变换函数系数,构造粗细不同粒度下三维CAD软件性能的调和曲线图,通过基于乐观锁思想的形数结合的方法检验数据有效性,进而通过基于调和曲线的聚类分析给出三维CAD软件综合性能和某类别细分性能的定性评价结果。

通过自主研发的基于统一接口的三维CAD软件自动化测试工具和通用的测试用例,在相同测试环境下对不同的三维CAD软件进行可比性测试,通过对标软件测试获得性能指标的参照值,通过基于测试数据三角变换的变粒度可视化聚类分析直观展现待测软件与对标软件的性能差异,评价结果客观可信。提出方法实现了对不同三维CAD软件性能差异的量化分析,为用户选择合适的软件提供了直观的决策依据。

参考文献:

[1] 张洪春. 嵌入式移动终端软件自动化测试技术研究[J]. 计算机与网络, 2012, 38(19): 68-71.

ZHANG Hongchun. Research on automatic test technology of embedded software in mobile terminal [J]. Computer & Network, 2012, 38(19): 68-71.

[2] CHENG Y P, KUO J W, CHENG Ben, et al. A non-intrusive, platform-independent capture/replay test automation system [C]//2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1122-1127.

[3] ALÉGROTH E, NASS M, OLSSON H H. JAuto-mate: A tool for system-and acceptance-test automation [C]//2013 IEEE Sixth International Conference on Software Testing, Verification and Validation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 439-446.

[4] 孙延浩, 许伟, 张涛, 等. 考虑决策者心理行为的软件质量评价方法 [J]. 计算机应用, 2022, 42(8): 2528-2533.

SUN Yanhao, XU Wei, ZHANG Tao, et al. Software quality evaluation method considering decision maker's psychological behaviors [J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(8): 2528-2533.

[5] RAFI S, AKBAR M A, YU Wu, et al. Exploration of DevOps testing process capabilities: an ISM and fuzzy TOPSIS analysis [J]. Applied Soft Computing, 2022, 116: 108377.

[6] ZIMMERMANN E, MEZGEBE T T, BRIL EL HA-OUZI H, et al. Multicriteria decision-making method for scheduling problem based on smart batches and their quality prediction capability [J]. Computers in Industry, 2021, 133: 103549.

[7] ATTAJER A, DARMOUL S, CHAABANE S, et al. An analytic hierarchy process augmented with expert rules for product driven control in cyber-physical manufacturing systems [J]. Computers in Industry, 2022, 143: 103742.

[8] SI Guannan, XU Jing, YANG Jufeng, et al. An evaluation model for dependability of Internet-scale software on basis of Bayesian Networks and trustworthiness [J]. Journal of Systems and Software, 2014, 89: 63-75.

[9] 岳川, 彭小红. 带有区间信息的软件质量评价模型 [J]. 计算机科学, 2019, 46(10): 209-214.

YUE Chuan, PENG Xiaohong. Evaluation model of software quality with interval data [J]. Computer Science, 2019, 46(10): 209-214.

[10] CHEN Zhaoxiang, HE Yihai, ZHAO Yixiao, et al.

- Mission reliability evaluation based on operational quality data for multistate manufacturing systems [J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(6): 1840-1856.
- [11] 席奂, 李明佳, 何雅玲, 等. CE图:一种余热利用循环及工质选择的定量评价方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9): 8-15.
- XI Huan, LI Mingjia, HE Yaling, et al. CE diagram: a quantitative evaluation criterion for waste heat recovery power system and working fluids with applications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9): 8-15.
- [12] ZITOUNI M S, SLUZEK A, BHASKAR H. Visual analysis of socio-cognitive crowd behaviors for surveillance: a survey and categorization of trends and methods [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 82: 294-312.
- [13] CHENG Jin, LÜ Hao, WANG Rong, et al. Visualized performance evaluation of 3D CAD software based on the characterization of test data by cloud model [C]//International Conference on Cloud Computing, Internet of Things, and Computer Applications. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2022: 123030U.
- [14] NG P S, KHOO M B C, SAHA S, et al. A variable sampling interval EWMA t chart with auxiliary information: robustness study in the presence of estimation error [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(8): 6043-6059.
- [15] CHEN Gang, ZHANG Weigong. Comprehensive evaluation method for performance of unmanned robot applied to automotive test using fuzzy logic and evidence theory and FNN [J]. Computers in Industry, 2018, 98: 48-55.
- [16] LOU Shanhe, FENG Yixiong, LI Zhiwu, et al. Two-additive fuzzy measure-based information integration approach to product design alternative evaluation [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 25: 100247.
- [17] 卫博雅, 寿业航, 蒋雯. 一种可视化的加权平均信息融合方法 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(4): 145-149, 157.
- WEI Boya, SHOU Yehang, JIANG Wen. A visibility graph information fusion method with weighted average [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(4): 145-149, 157.
- [18] 赵国平, 李晖, 李旭祥, 等. 神府煤田风沙区采煤塌陷地表环境动态变化的综合评价 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(5): 137-142.
- ZHAO Guoping, LI Hui, LI Xuxiang, et al. Fuzzy model assessment on over-ground environment development of Shenfu mining subsidence area [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(5): 137-142.
- [19] 文凯, 张琦, 王晓坡. 钢铁企业蒸汽动力系统经济环境多目标优化 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(11): 66-76.
- WEN Kai, ZHANG Qi, WANG Xiaopo. Economic-environmental multi-objective optimization of steam power system in iron and steel enterprises [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(11): 66-76.
- [20] 李金海, 贺建君. 多粒度形式背景的不确定性度量与最优粒度选择 [J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1299-1308.
- LI Jinhai, HE Jianjun. Uncertainty measurement and optimal granularity selection for multi-granularity formal context [J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1299-1308.
- [21] 代劲, 张磊, 王国胤. 基于云模型的煤矿安全大数据多粒度表示方法及应用 [J]. 控制与决策, 2021, 36(10): 2359-2368.
- DAI Jin, ZHANG Lei, WANG Guoyin. Multi-granularity representation method of big data in coal mine safety based on cloud model and its application [J]. Control and Decision, 2021, 36(10): 2359-2368.
- [22] 张燕平, 张铃, 吴涛. 不同粒度世界的描述法--商空间法 [J]. 计算机学报, 2004, 27(3): 328-333.
- ZHANG Yan ping, ZHANG Ling, WU Tao. The representation of different granular worlds: a quotient space [J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(3): 328-333.
- [23] 程锦, 谭建荣, 魏巍. 基于变粒度的注塑模流道多目标优化设计 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 170-175.
- CHENG Jin, TAN Jianrong, WEI Wei. Multi-objective runner optimization of injection mold based on variable-grain strategy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 170-175.
- [24] 顾芒芒, 吴铭程. 基于 Spring Cloud 实现任务调度微服务化的设计与实现 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(3): 117-119.
- GU Mangmang, WU Mingcheng. Task scheduling microservice based on Spring Cloud [J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(3): 117-119.
- [25] 郝娉婷, 胡亮, 姜婧妍, 等. 基于多管理节点的乐观锁协议 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 227-234.
- HAO Pinting, HU Liang, JIANG Jingyan, et al. Optimistic lock protocol of multi-managed nodes [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 227-234.

(编辑 赵炜)