

张 杰 余剑峰 李 原 孙 炜 / 著

三维CAD

模型的信息发掘与重用

Information Mining and Reusing for 3D CAD Models

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书重点以三维装配体为对象,详细阐述了 CAD 模型信息发掘与重用的相关原理和方法。全书共分为 4 篇:第 1 篇叙述模型信息重用的内涵和相关方法的发展现状,解析了数字化环境下可重用模型信息的主要构成;第 2 篇探讨装配体模型检索方法,分别依据离散化零件信息、考虑零件连接关系和构建空间连接骨架三类途径,阐述了装配体模型检索原理和具体算法;第 3 篇探讨装配体通用结构发掘方法,叙述了基于属性连接图和广义面邻接图两类通用结构发掘原理和算法;第 4 篇研究装配体功能结构分析与信息重用方法,分别给出了基于功能信息标注和功能概率的装配体功能结构关系挖掘方法。另外,本书引入了大量三维模型实例,对所提出的方法进行有效性验证,同时帮助读者深入理解各种方法的应用场景和效果。

本书适合作为计算机辅助设计、机械产品研制和知识工程平台建设领域的研究与工程技术人员参考书,也可作为高等院校相关专业教师、研究生和高年级本科生的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

三维 CAD 模型的信息发掘与重用/张杰等著. —北京:清华大学出版社,2022. 6
ISBN 978-7-302-60423-5

I. ①三… II. ①张… III. ①计算机辅助设计—应用软件—研究 IV. ①TP391.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 052806 号

责任编辑:戚 亚

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:曹婉颖

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:定州启航印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:11

字 数:220 千字

版 次:2022 年 8 月第 1 版

印 次:2022 年 8 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

产品编号:080974-01

前言

PREFACE

21 世纪初,我国制造企业在计算机辅助技术方面的应用深度和广度不断拓展,并与产品数据管理平台结合形成了虚拟开发环境,由此引发了以三维模型为核心的产品研制模式变革。从 2010 年开始,我们同多家航空科研院所与制造企业合作,开展了复杂产品数字化协同研制技术的研究,合作单位广泛提出了如何从已有模型资源中获取需要的三维模型信息、如何归纳产品的典型结构单元等问题。我们认为,这些问题反映了企业在新产品数字化研制体系下的信息重用需求,从而引起了对深入探索三维模型信息发掘方向的兴趣。

在现代机械产品设计中,三维模型作为产品数字化研制的重要构成要素,其应用范围从早期产品上游阶段的结构表征,逐步拓展到工艺、制造、装配和维修/维护等下游阶段,在关联和承载产品全生命周期信息方面发挥了不可替代的作用。与此同时,工程人员的主要工作从文本编辑和图纸绘制逐步过渡到围绕模型的信息定义和操作中,这不仅对人员专业水平提出了更高要求,而且极大地耗费了人们的时间和精力。因此,如何从已有模型资源中发掘可重用信息,降低模型定义和操作的复杂度,成为提升产品研制效率的关键。然而,模型信息资源的重用涉及企业信息系统架构、模型资源库构建、知识表示、流程固化以及核心算法开发等多个方面,是一项庞大的系统工程,难以一蹴而就。本书重点针对不同场景下的模型资源重用需求,以三维装配体为对象,从模型检索、通用结构发掘和模型功能结构关系发掘三个方面,探讨模型信息量化描述和相似性分析等原理和方法,进而构建相应的求解算法,为数字化研制体系下三维模型知识的获取和表达奠定基础。

本书分为 4 篇,共 9 章:第 1,3,4,7 章由张杰教授编写,第 2 章由孙炜博士编写,第 5,6 章由余剑峰副教授编写,第 8,9 章由李原教授编写。西北工业大学航空宇航智能装配技术团队的王延平博士、徐志佳博士、王攀博士、逢嘉振博士、季宝宁博士和左咪硕士,共同参与了本方向的多项科研项目研究工作,并在本书的实例整理和算法搭建等方面提供了助力。

首先特别感谢国家自然科学基金“支持多粒度重用的三维装配体多源信息融合发掘研究(51475371)”以及国防基础科研“全流程设计与仿真技术”等项目对本书研究工作的资助。

我们还要特别感谢成都飞机工业(集团)有限责任公司的余志强研究员、华南理工大学的王清辉教授,他们作为同行专家对本书的选题进行了评价。

我们还要衷心感谢西北工业大学、清华大学出版社的有关编辑、校对,有了他

们的大力支持和合作,本书才能顺利与读者见面。

我们还要特别感谢国内外诸多专著、教材和高水平论文的作者们,他们的研究成果使我们受益匪浅,为本书的编写提供了重要的支撑,也为我们继续深入探索本领域的相关问题提供了信心和动力。

由于作者学术水平和时间的限制,书中不妥和错误之处在所难免。我们衷心希望各位专家和读者不吝赐教。

张 杰
2022 年 5 月

目 录

CONTENTS

第 1 篇 三维模型信息发掘与重用基础

第 1 章 模型信息重用理论的发展分析	3
1.1 引言	3
1.2 模型信息发掘与重用的内涵	4
1.3 模型信息发掘与重用技术的发展	5
1.3.1 三维模型检索	5
1.3.2 机械工程领域的模型检索	10
1.3.3 三维模型通用结构发掘	16
1.3.4 国内外模型检索平台	17
参考文献	18
第 2 章 三维模型可重用信息构成分析	23
2.1 引言	23
2.2 三维模型信息的可重用性	24
2.3 三维模型索引信息的构成	25
2.3.1 零件信息	26
2.3.2 装配信息	27
2.3.3 功能信息	29
2.3.4 层次信息	30
2.4 模型关联的产品生命周期信息	30
参考文献	31

第 2 篇 装配体模型检索

第 3 章 基于离散化零件信息的装配体检索	35
3.1 引言	35
3.1.1 装配体信息描述空间构建	35
3.1.2 零件信息的描述	36

3.1.3 装配体模型描述符构建	38
3.2 基于空间点集匹配的装配体相似性分析	39
3.2.1 基于空间点距离的零件相似性计算	39
3.2.2 基于多对多匹配的装配体相似性计算	44
3.3 装配体模型的局部检索	46
3.4 实例分析	47
3.4.1 整体检索实例	47
3.4.2 局部检索实例	49
3.4.3 检索时间分析	51
参考文献	51
第4章 考虑零件连接关系信息的装配体模型检索	53
4.1 引言	53
4.2 零件及连接关系信息描述	54
4.2.1 基于图的装配体信息描述模型	54
4.2.2 图结构完整性判别	56
4.3 基于随机游走模型的零件结构特征分析	58
4.3.1 零件连接关系紧密度评价	58
4.3.2 装配体结构的随机游走分析	59
4.3.3 零件结构特征规范化	61
4.4 零件综合相似性分析	62
4.5 基于二分图最优匹配的装配体相似性分析	63
4.5.1 面向装配体相似性分析的二分图构建	64
4.5.2 二分图最优匹配	64
4.5.3 装配体结构相似性评价	66
4.6 实例分析	66
4.6.1 飞机襟翼相似性分析实例	66
4.6.2 轴承相似性分析实例	72
参考文献	75
第5章 基于空间连接骨架的装配体检索	76
5.1 引言	76
5.2 基于空间连接骨架的装配体模型描述	76
5.2.1 装配体的空间连接骨架	76
5.2.2 装配体的广义形状距离	78
5.2.3 装配体的广义形状描述符构建	79

5.3 装配体整体结构相似性分析	80
5.3.1 零件广义形状序列构建	80
5.3.2 零件广义形状序列匹配	82
5.3.3 基于最优匹配的装配体整体相似性度量	84
5.4 装配体局部结构相似性分析	85
5.4.1 装配体广义属性连接图构建	86
5.4.2 装配体的局部结构匹配	86
5.4.3 装配体的局部结构相似性度量	89
5.5 实例分析	89
5.5.1 装配体整体相似性分析实例	89
5.5.2 装配体局部结构相似性分析实例	90
5.5.3 检索结果分析	92
参考文献	95

第3篇 装配体通用结构发掘

第6章 基于属性连接图的装配体通用结构发掘	99
6.1 引言	99
6.2 装配体中连接属性的描述	100
6.3 融合个体差异的属性聚类分析	101
6.3.1 零件个体局部差异的融合思路	101
6.3.2 基于 DBSCAN 的零件和连接关系聚类	102
6.4 基于图描述的通用结构发掘	105
6.4.1 频繁子图的相关定义	105
6.4.2 基于 gSpan 的装配体通用结构发掘算法	106
6.4.3 基于 FFSM 的装配体通用结构发掘算法	113
参考文献	122
第7章 基于广义面邻接图的装配体通用结构发掘	123
7.1 引言	123
7.2 融合形状特征的广义面邻接图构建	123
7.2.1 广义面邻接图的定义	124
7.2.2 曲率区域的表示	124
7.2.3 几何面和几何边的信息量化	127
7.2.4 装配体零件的形状参数量化	127
7.2.5 零件间配合信息的量化	128

7.2.6 装配体描述符构建	129
7.3 广义面邻接图上的通用结构挖掘	131
7.3.1 广义面邻接图的简化处理	131
7.3.2 频繁子图结构的查找	133
7.4 实例分析	136
7.4.1 广义面邻接图构建	136
7.4.2 通用结构发掘	136
参考文献	142

第4篇 装配体功能结构分析与信息重用

第8章 基于功能信息标注的装配体功能结构关系挖掘	145
8.1 引言	145
8.2 功能结构关系的定义	146
8.3 通用结构-功能关联规则	147
8.3.1 功能相关的关联规则构建	147
8.3.2 关联规则的相关度分析	148
8.4 基于 Apriori 算法的 CDSA-F 关联规则挖掘算法	149
8.5 实例分析	151
参考文献	153
第9章 基于功能概率的装配体功能结构关系挖掘	155
9.1 引言	155
9.2 基于向量的功能属性描述方法	156
9.2.1 结构向量定义	156
9.2.2 功能向量定义	158
9.3 基于最大似然估计的功能结构关系概率描述	159
9.4 装配体核心功能集与典型结构集提取	161
9.5 实例分析	163
9.5.1 功能结构关系概率描述	163
9.5.2 核心功能集和典型结构集提取	166
参考文献	167

第 1 篇

三维模型信息发掘与重用基础

随着计算机三维建模、信息处理和互联网等技术的不断发展,制造企业以三维模型为核心,建立面向产品全生命周期的数字化协同研制体系,已经成为企业提升市场竞争力和实现转型升级的必要条件。经过多年的发展,三维模型的应用范围从最初的产品上游阶段的结构表征,逐步拓展到工艺、制造、装配和维修/维护等下游阶段,围绕模型的各项业务在企业中快速拓展,有效支撑了企业的产品研制模式革新过程。当前,在我国以智能制造带动工业转型升级的大背景下,三维模型依然是工业信息物理系统中知识重用、虚实融合和数字孪生等关键技术应用的重要构成要素。

在信息内容方面,机械工程领域的三维模型主要由计算机辅助设计平台产生的实体模型构成,并在计算机内部被转换为边界表示法(boundary representation, B-Rep)数据模型。在信息关联方面,现有的产品数字化研制体系中的三维模型广泛关联了产品全生命周期上、下游的相关信息,包括工艺设计、加工制造和维修/维护等各个方面,由此形成了极具实践意义的知识脉络。但分析发现,随着三维模型内涵和外延的不断扩展,虚拟环境中围绕三维模型的信息定义操作大幅增加,且对操作者的专业知识和经验要求也在不断提高。因此,利用已有模型的关联信息来提升业务效率,已经成为企业知识工程平台建设的核心思路。

模型信息重用理论的发展分析

1.1 引言

计算机辅助设计(computer aided design,CAD)起源于 20 世纪 50 年代后期,是以计算机为工具辅助人们完成特定领域内设计任务的理论、方法和技术。经过多年的发展,CAD 技术从早期的二维绘图软件发展为三维数字化研制体系的重要支撑,广泛应用于机械、电子、航空、航天、汽车、船舶、建筑和娱乐等各大行业,有效推动了各大领域的设计革命,成为支撑当代工业信息化发展,促进两化融合最重要、最核心的技术。现代 CAD 已经与计算机辅助制造(computer aided manufacturing,CAM)、计算机辅助工程(computer aided engineering,CAE)和产品数据管理(product data management,PDM)构成了强大的产品数字化研发技术体系,可为产品设计、仿真分析、制造、装配和检测等业务提供全方位支撑。

产品三维建模是设计人员利用 CAD 工具完成的主要设计活动之一,其本质是以数学方法描述产品零、部件结构及其空间位置关系,从而建立物理实体在虚拟空间中的精确映射。产品三维建模本身是一件冗繁复杂的创造性工作,要求设计人员具备几何造型、计算机图形学和专业产品设计领域的相关知识,该过程会耗费设计人员大量的时间和精力。通常,建模活动完成后的三维模型会存储为特定格式的数据文件,由一系列点、线、面及其空间拓扑信息构成,是产品设计信息的主要载体。由于三维模型能够立体、直观地表示尚未制造出来的产品本体,所以早期主要被用来替代二维工程图纸,在产品下游研制活动中发挥的作用非常有限。但是,随着现代产品三维数字化研制理论及体系的逐步完善,三维模型被广泛应用于产品干涉检查、数控加工、模拟装配和检验等下游的各个环节,所承载的信息从几何信息拓展到非几何信息,模型角色也从单一的几何形体表征发展为产品设计、制造和检验的重要依据。

在产品数字化研制体系的发展历程中,具有里程碑意义的是“基于模型的定义技术”(model based definition,MBD)的应用。MBD 是一种将产品的所有相关设计定义、工艺描述、属性和管理等信息都附着在产品三维模型中的数字化定义方法,通过将设计信息和制造信息共同定义到产品三维模型中,改变了三维模型和二

维工程图共存的局面,有效地保证了产品定义数据的唯一性。2003年,MBD被美国机械工程师协会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)批准为机械产品工程模型的定义标准,其核心是将三维实体模型作为唯一制造依据的标准体,并明确了产品三维模型中几何与非几何信息的类型和表达方法^[1]。从技术发展上来说,MBD从根本上改变了仅用CAD工具表达产品结构信息的情形,极大地拓展和丰富了三维模型的信息表达能力。与此同时,三维模型在数据层面已经不是一个单独的数据文件,而是以结构模型为中心关联的一系列数据文件。在产品设计阶段,设计人员将依据产品的功能需求建立三维结构模型,然后在下游的各个阶段,不同角色的研制人员相继在结构模型的基础上添加和关联工程分析、工艺、制造、装配和检验等信息。因此,在现代产品研制中,三维模型已经成为重要的智力资产,是知识累积和创新工作的关键载体。

1.2 模型信息发掘与重用的内涵

当前,随着三维模型内涵和外延的不断扩展,人们围绕三维模型的信息定义工作日益繁重。实践表明,虽然三维数字化研制体系在缩短产品研制周期、降低成本方面发挥了关键作用,但虚拟环境中的信息定义与分析验证工作量却在不断增加,并且该类工作对人们专业知识和经验的要求在不断提高。研究表明,由于资源检索工具的匮乏,在新产品的研发过程中存在大量的重复设计问题,该类问题导致研发人员搜索资料的时间占总研发时间的50%以上^[2]。

分析发现,多数新产品的研制过程都会沿用或参考已有的产品信息。例如,设计人员可以从已有的设计模型中重用部分产品结构,并参考这些结构的分析验证信息;零件加工人员可以通过新旧产品中相似的结构特征来重用加工工艺信息;装配人员可以结合零件材料和零件配合关系的相似性来重用装配工艺信息等。由于当前三维数字化研制体系中的产品信息大多围绕三维模型来组织,开展以三维模型为核心的信息重用是支撑知识工程发展的重要途径。近年来,随着产品三维数字化研制技术的不断普及,互联网和制造企业都累积了相当规模的三维模型资源,形成了有重用价值的模型库,从而为模型信息重用提供了数据支撑。

目前,对于三维CAD模型的信息发掘与重用技术,学术和工程领域并没有统一的分类标准。从目前的研究成果来看,较有代表性的一类是“三维模型检索”,即依据产品研制人员的输入信息从模型库中获取可信息重用的个体。该类应用的输入可以是某个零部件的二维图,也可以是三维模型。三维模型检索的核心在于判断输入模型信息与模型库中模型个体之间的相似性,从而辅助人们快速定位模型库中可重用的信息资源。此外,从模型库中发掘具有共性特征的“通用结构”也存在广泛的应用需求,这是因为不同三维模型单元之间具有共性意味着它们可能具

有相似的功能、制造工艺以及检测方法等。该类方法可为研制人员提供具有信息完整性的高质量可重用资源,并能够辅助制造企业建立通用结构库、典型资源库等。

已有研究表明,从模型中发掘可重用信息资源本身是一项具有挑战性的工作,尤其体现在基于模型信息的相似性分析方面。首先,不同种类重用业务所要求的相似性内容具有极大的差异,例如“形状相似”“拓扑相似”和“属性相似”等,这导致了各类业务所采用相似性判断标准和计算方法的不同;其次,三维模型本质上是设计者在三维空间中进行结构建模、标注和属性表达的信息集合,从类型上可分为几何形状信息和数值、语义等非几何信息,不同种类的信息难以直接进行量化比较。例如,当前少有可用于三维欧氏空间中几何信息的直接量化比较方法,大部分应用都需要将空间几何信息转化到不同的数值描述空间。

总体而言,在三维模型成为产品研制信息承载的主体之后,模型信息发掘作为知识重用的基本前提,对有效降低模型定义和分析的复杂度,缩短产品研制周期和降低研制成本显得尤为重要,该类应用也将成为未来 CAD 系统的重要功能之一^[3]。因此,探讨三维数字化研制体系中三维模型信息的发掘与重用方法具有重要的理论意义和应用价值。

1.3 模型信息发掘与重用技术的发展

自 20 世纪 90 年代末以来,三维数字化设计方法支撑的设计重用技术得到了广泛研究。当前,在模型信息发掘与重用方面,以企业或互联网模型资源库为基础开展的研究主要分为三维模型检索和通用结构发掘两类。其中,前者关注依据设计者的检索需求从模型库中定位可重用的模型信息,后者主要识别和提取具有广泛重用意义的典型设计资源。本书结合其所涉及的重点内容,对相关理论、方法和平台的发展现状进行分析。

1.3.1 三维模型检索

从知识获取和重用的角度来看,三维模型检索的本质是分析模型间相关性的过程。早期以关键字为基础的模型检索方法,利用描述文本间的内在关联来体现模型相关性,但这种方法具有一定的主观性,难以统一表达用户的检索意图,其实际应用效果一直难以获得业界的广泛认可。相较而言,基于内容的三维模型检索能够客观地描述模型各类型的本质属性,近年来受到了业内的广泛关注。

三维模型检索过程主要包括两部分内容:离线建库和在线匹配,如图 1-1 所示。离线建库过程预先按照特定的原理和方法,将模型库中的个体转换为可量化分析的描述符,或同时建立能够支持高效搜索的索引结构。在在线匹配过程中,

用户首先通过查询接口提交查询请求,然后计算机针对用户的输入数据提取其描述符,并根据相似性度量规则计算该输入描述符与库内模型之间的相似性,最终对库内模型进行相关性排序并返回检索结果。在上述过程中,用户可提交相关反馈信息,例如根据具体需求修改相似性评价规则,或在检索结果中选择更符合需求的模型进行二次检索,并通过反复迭代提高检索结果的准确度。具体来说,可以从描述符构建、相似性度量、用户接口、检索模式和检索性能评价等方面分析三维模型检索技术的发展。

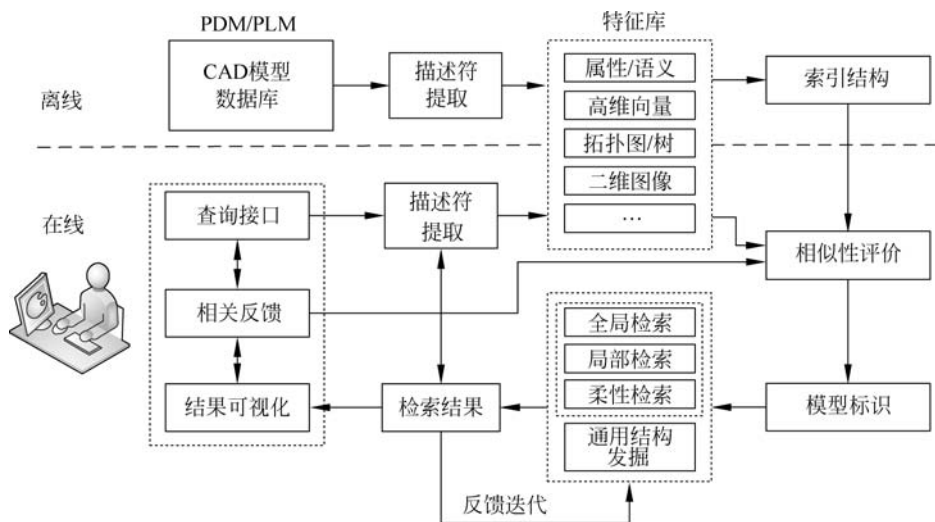


图 1-1 三维模型检索过程

1.3.1.1 描述符构建

描述符是指从三维模型中提取的能反映模型本质属性的一种量化数据,其通常以向量、图或树的形式来表示。三维模型的底层数据往往是一些支持可视化的几何属性和外观属性,因此在检索前首先需要将这些信息进行抽象与重组,并转换为能够由计算机进行相似性分析的描述符,进而支持信息发掘与重用。

描述符构建是三维模型检索的重要环节,直接决定了模型检索算法的效能。为了衡量各种描述符对三维模型特征信息的表征能力,国内外一批学者^[4-9]针对三维模型描述符提出了一系列评价标准,包括唯一性、广泛性、稳定性和敏感性等。

(1) 唯一性: 三维模型与模型描述符之间应存在较为严格的一一对应关系,即不同的三维模型应具有不同的特征,而相同类别的模型具有相似的特征,从而保证检索与索引过程的一致性。这里尤其要注意的是三维模型描述符要具有几何不变性,即能够忽略同一模型在平移、旋转和缩放等方面的差异。

(2) 广泛性: 三维模型描述符应能够描述所有类型的模型。例如,一个描述符如果仅仅能够描述平面和平面之间的垂直连接关系,那么它仅能够描述一个立方

体结构的模型而无法表示球面等曲面围成的模型,因此它不具有广泛性。

(3) 稳定性: 三维模型表面上发生小的改变不会导致其描述符发生较大的变动,从而确保相似性评价的准确性和检索结果的质量。

(4) 敏感性: 三维模型描述符能够检测出不同物体之间细微的差别,从而支持精确检索的需求。这一标准往往与稳定性彼此矛盾,同时满足这两点需求也是现有三维模型形状描述符提取中的难点问题。

1.3.1.2 相似性度量

目前的三维模型检索方法均建立在一个最基本的假设上,即“两个三维模型在全局或局部上的相似性越高,则认为这两个模型间的关联也越紧密”^[10]。这里的“相似性”可以是形状相似性、结构相似性和功能相似性等,其评价标准的建立很大程度依赖于用户想要获取的知识类型。现有的模型描述符往往使用向量、图或树的数据结构来表征三维模型,对于以向量形式表示的描述符,其相似性需要根据向量中各个分量之间的关系来确定;而对于以图或树表示的描述符,则需要采用基于图或基于树的匹配分析模型间的相似性,具体方法如下。

1. 向量相似性度量

对于多维特征向量相似性分析问题,应用较为广泛的是多维空间中满足测度公理的距离定义方法,例如闵氏距离、余弦距离等。

(1) 闵氏距离

设 n 维空间有两点 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^n$, 则其闵氏距离 L_p 定义为

$$L_p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left[\sum_{i=0}^N |x_i - y_i|^p \right]^{1/p} \quad (1-1)$$

当 $p=1$ 时, L_p 就退化为曼哈顿距离;

当 $p=2$ 时, L_p 为欧氏距离,即

$$L_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left[\sum_{i=0}^N |x_i - y_i|^2 \right]^{1/2} \quad (1-2)$$

(2) 余弦距离

除闵氏距离外,余弦距离也是向量相似性的常用测度方法。余弦距离通过两个向量之间夹角的余弦来度量其相似性: 若两个向量方向相同,则说明两个向量之间的夹角为 0° ,而相应的余弦相似性为 1; 若两个向量正交,则说明两个向量之间的夹角为 90° ,而相应的余弦相似性为 0; 若两个向量方向相反,则说明两个向量之间的夹角为 180° ,而相应的余弦相似性为 -1。余弦相似性只与向量的方向相关,与向量的幅值无关,其计算简单且结果可靠的特点使该方法在图像检索、模型检索和文本比较等方面都得到了广泛应用。

设 n 维空间有两点 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^n$, 则其余弦距离定义为

$$\cos(x, y) = \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}} \quad (1-3)$$

2. 图/树相似性匹配

图匹配算法是实现三维模型结构相似性分析的重要途径,目前已有较为深厚的研究基础。例如,Ullmann^[11]提出的基于邻接矩阵的树搜索算法是解决图同构问题的最经典方法之一,采用基于节点度的剪枝方法大幅缩减了算法在回溯查找过程的搜索空间。此外,于1999年提出的VF算法采用深度优先的树搜索策略使用了一系列高效的规则集合对搜索树进行剪枝^[12]。在此基础上,Cordelia等^[13]提出了改进的VF2算法,首先在待匹配的图中找到一个满足匹配条件的点集,然后判断新加入的点是否满足匹配条件,如果满足则寻找下一个点,否则进行回溯。

然而,图匹配问题目前已被证明是非确定性多项式问题(nondeterministic polynomially problem, NP),该类算法往往需要指数级的时间和空间。对于一些特殊的图数据或者特殊的应用场景,可以通过一些假设的过滤条件,在多项式时间内求解近似的最优解或者局部最优解,进而大幅减少算法所花费的时间。例如,文献[14]通过将模型的属性邻接图转换成面形位码来实现模型之间不同精度的相似性评价;Tao^[15]提出先进行区域分割,再进行区域属性编码匹配的特征提取和检索方法。尽管这些近似的求解方法有时并不能得到一个全局的最优解,但考虑到检索效率与效果,在工程应用中通常采用近似最优解。

1.3.1.3 用户接口

对于处于产品生命周期中不同阶段的用户而言,三维模型的检索需求往往不同。例如,面对设计需求未能明确详细设计方案的用户,希望在已有的设计知识中通过输入简单的信息快速查找相关的模型以启发其设计;而对于希望能够参考已有产品知识进行设计改进的用户,检索系统应能够快速、准确地返回与查询实例相似的模型。为了使用户能够根据需要输入不同查询信息进行检索,需要提供多样化的用户接口以满足用户的检索需求。目前在研究和应用过程中主要有文本、草图/图像和实例检索^[16]3种不同的用户接口。

3种检索接口各适用于不同的检索场景:文本检索接口对用户要求很高,具有较强的主观性;图像检索接口适用于在产品的概念设计阶段,设计人员尚未形成对于构建三维模型的清晰思路,此时可用二维草图形式表达自己的思想,并通过该类接口方式搜索视觉相似的三维模型,以启发用户灵感;实例检索接口较文本和草图方式可更加客观、明确地描述要查询的内容,更符合用户的检索习惯,因此是三维模型检索领域中使用较广的一种检索接口。实例三维模型可以通过文本检索或草图检索接口“粗略”获得的三维实例,也可以直接由商业三维造型系统构造,

不同的输入方式丰富了检索方法的适配能力,使三维模型检索能够应对更多的用户需求。

1.3.1.4 检索性能评价

随着国内外对三维模型检索技术研究的不断深入,出现了越来越多的三维模型检索新方法,合理地评价三维模型检索方法的性能优劣也越来越重要。检索方法的性能优劣主要由检索效率和检索准确性两个方面决定。其中,检索效率由输入模型的表征性能及其与库内模型的匹配效率共同决定,量化方法较为简便;而检索准确性则体现为检索结果与查询模型的相关性强弱,这里的“相关性”作为信息检索理论中的最基本概念,已具有较为深厚的研究基础^[17]。目前,三维模型检索领域的相关性评价方法均建立在查全率与查准率指标之上,主要有查全查准曲线^[18](precision & recall curve)、 F 测度(F -measure)和折损累计增益测度(discounted cumulative gain, DCG)等。

(1) 查全查准曲线

查全查准曲线是检索系统中使用较为普遍的一种评价机制。其中,查准率(precision)定义为检索结果中相关模型的数量与返回模型数量的比值,反映了检索结果的正确性;而查全率(recall)定义为检索结果中相关模型的数量与模型库中实际相关模型数量的比值,反映了检索结果的全面性,其计算方法如下:

$$\begin{cases} \text{precision} = \frac{|A \cap B|}{|B|} \\ \text{recall} = \frac{|A \cap B|}{|A|} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中: A 表示模型库内与查询模型同一类模型所构成的集合; B 表示返回的所有检索结果所构成的集合; 运算符 $|*|$ 表示集合中元素的数量。

查全查准曲线则是以查全率为横坐标,以查准率为纵坐标形成的曲线图。通常来讲,查全查准曲线是一个递减函数,随着查全率的增长,查准率总是呈下降趋势,下降速度越慢,则说明该检索系统的检索效果越好。

(2) F 测度

F 测度是反映检索系统查全率和查准率的综合指标,定义为固定数目检索结果下查全查准率的函数,其计算公式如下:

$$F = \frac{2}{\frac{1}{\text{recall}} + \frac{1}{\text{precision}}} \quad (1-5)$$

式中: F 的取值范围在 $0 \sim 1$, F 越接近于 1,说明对应检索系统的检索性能越好。

(3) DCG 测度

DCG 测度是一种综合考虑检索结果相关性与排序合理性的评价方法,只有在最相关的三维模型排在检索结果最靠前的位置时才能获得较高的 DCG 分数。在进行 DCG 测度前,首先需要基于人工标注的方法对检索结果中的每个模型对象进

行分等级的打分,例如好、一般、差等,再对每种打分依次赋予一个相应的分值。对于包含 p 个三维模型的检索结果序列,目前主流的 DCG 测度方法如下:

$$\text{DCG}_p = \sum_{i=1}^p \frac{2^{\text{rel}_i} - 1}{\log_2(i + 1)} \quad (1-6)$$

式中: rel_i 表示第 i 个位置检索结果的评分。

1.3.2 机械工程领域的模型检索

多年来,实体造型一直是数字化环境中构建产品三维模型的关键支撑技术。在现有的 CAD 工具中,设计者可以基于基本体素的交、并和差等集合运算生成零件模型,也可以围绕草图建立零件的基本特征,然后利用修饰特征的方式产生符合设计意图的形体。无论采用上述哪种模式,所产生的模型都能够完整地表征零件的几何、拓扑等信息。实体模型能够支撑计算机辅助环境中的多种运算,例如欧拉运算、物性运算和加工过程仿真等,因此是现代产品研制必不可少的基础要素。

机械工程领域的三维模型主要以实体模型为主,进一步可分为零件模型和装配体模型。零件模型是构成装配体的最小实体单元,高度集成了几何特征、功能属性和材料等重要设计信息,工程技术人员可在 CAD 建模系统的基础上通过二次开发较为方便地获取以上数据。装配体模型是多个零件模型的组合,是工程实际中绝大多数产品的存在形式,其所涵盖的几何形态、配合关系、运动约束、尺寸公差和装配顺序等信息,能够保证产品全生命周期过程中设计、规划、分析和仿真等业务的顺利进行。零件模型和装配体模型在承载信息的层次性、获取方式等方面的差异,使二者在进行相似性分析和信息重用时需要的处理手段和算法都有所不同,因此可将三维模型检索分为零件模型检索和装配体模型检索两大类。其中,前者为后者提供了丰富的理论和应用基础,而后者则是前者的进一步拓展和延伸,极大地丰富了三维模型检索理论在产品全生命周期中的应用范围。

1.3.2.1 零件模型检索

目前,针对三维零件模型检索已经出现了很多方法,根据描述符表征形式的不同,Johan 等^[19]于 2008 年将当时的三维零件模型检索方法分为 3 类:基于特征语义、基于几何信息和基于拓扑信息的检索方法。随着近年来机器学习技术在多媒体数据处理领域的快速发展,智能化方法为零件模型检索问题提供了很好的解决思路。为此,本书从基于特征语义、基于几何信息、基于拓扑信息和基于机器学习技术 4 个方面对零件模型检索方法进行了整理:

(1) 基于特征语义的零件模型检索

三维模型在工程领域中一般有特定的设计、制造或应用上下文环境,因此模型中各种建模要素、设计制造信息等数据可作为三维模型检索的重要依据。该类方法主要针对 B-Rep 模型中所包含的各类几何、非几何属性等信息,在语义分析的基

础上实现模型匹配与检索。

三维模型中广泛存在的孔、轴、凸台及凹槽等建模特征与产品设计制造领域中的特定知识或应用紧密关联,因而具有重要的工程意义^[20]。基于建模特征的零件模型检索,实际上是在模型形状分析的基础上,通过提取具有特定工程语义的几何元素来完成的。由于实际应用中的需求不同,该类特征的具体定义方式亦可能存在差异。例如,Kyprianou^[21]较早采用句法模式识别方法识别模型特征,该方法将B-Rep表示的零件模型转换为面-边结构图,并以凸起、凹进和光滑3种结构化原语分类,在此基础上构造特征语法并完成特征识别。Joshi等^[22]将B-Rep表示的零件模型转换为属性邻接图,并在属性连接图基础上定义一系列特征描述作为三维模型的特征识别依据。Ramesh等^[23]建立了零件模型特征与用户可交互加工特征库的映射机制,以特征数量、方向、尺寸及关联方向对三维模型进行表征。

CAD零件模型在全生命周期的各业务环节流通过程中产生了大量文档、文本信息,包含了产品的几何特征、加工、制造和装配工艺等信息,这些信息可作为三维模型检索的重要依据。基于产品信息的模型检索方法一般与特定工程领域的应用需求相关,例如Zhou等^[24]认为仅从模型出发难以自动提取各种应用所需信息,从而提出了CAD与计算机辅助工艺过程设计技术(computer aided process planning,CAPP)在双向整合基础上的自动参数提取、流程设计方法。Hermann等^[25]开发了基于CAPP和用户定义的三维模型相似性评价系统。该系统要求用户定义模型设计属性、工艺属性及两者间的映射函数,并由用户给定近似度比较方法完成模型比较。Zhang等^[26]提出了一种集成产品信息建模的模型描述方法,该方法能够利用功能、几何、特征、加工和用户等语义信息进行结构化建模并实现模型相似性的计算。Jeon等^[27]提出了利用设计文档进行基于语义的模型检索,利用语义和规则处理来解决设计文档与三维模型之间的语义鸿沟。随着机械零件的复杂度增加,基于产品信息的模型检索方法的检索效率会逐步降低,但与其他检索方法相比,该类方法与工程中实际业务联系紧密,仍然具有广泛的应用前景。

总体而言,基于特征语义的零件模型检索方法是在领域知识的基础上,充分利用产品的设计、制造或加工特征和上下文环境及工艺流程信息,从特征识别、预定义特征约束参数集分析、工艺信息及产品属性比较等角度完成模型比较与检索。该类方法考虑到CAD零件模型的工程应用描述,可作为面向内容的模型快速检索和设计复用的主要依据。

(2) 基于几何信息的零件模型检索

基于几何的三维零件模型检索方法的本质是将主观层面的几何特征信息转换为计算机可识别的特征数据,进而为发掘几何信息背后具有重用价值的设计知识和经验提供技术支撑。目前,该类方法主要包括统计、数学变换和视图投影等,研究重点是在符合人对三维对象视觉相似性直观判断的基础上,建立三维空间中的几何形状描述规则。

通过采样统计描述模型空间几何信息方法的主要思路是利用统计学的思想,利用具有一定形状辨识能力和空间分布意义的统计量,构成统计直方图或统计分布曲线来表征模型的形状特征。在目前的研究成果中,大部分基于统计的形状描述方法都可以归结为基于统计直方图的形状描述符。形状直方图最早来源于文献[28]中检索二维多边形的截面编码技术。较为经典的方法是由 Osada 等^[29]在 2001 年提出的形状分布直方图,通过在模型表面上的随机采样计算采样点间距离函数的值,并将函数值的概率分布表示为直方图以描述模型的形状特征。由于其计算简单、鲁棒性高和识别率较高等特点,这种方法逐渐成为三维模型检索领域较为通用的方法,因此其他学者在此基础上提出了多种改进算法。例如, Liu 等^[30]首先根据一定的分布决定采样方向,在每个方向上通过一系列平行光线与模型相交获得模型的厚度,根据厚度的值获得方向直方图。Gal 等^[31]提出了一种局部直径函数,在模型表面点生成与表面法向相反的圆锥,在圆锥内生成多束射线与模型表面相交,计算各个交点与圆锥轴线的直径来获得局部直径分布直方图。基于采样统计描述的零件模型检索方法原理简单且检索速度较快,因而得到了广泛而深入的研究。

基于数学变换的形状表征方法最早起源于图像处理领域的二维傅里叶变换处理图像信号,它是将三维模型的空域信息通过数学变换方法变换为频域信息,用变换系数表征模型的形状特征。目前,用于三维模型形状比较的数学变换描述符主要有傅里叶变换、球面调和变换和小波变换。例如 Vranić 等^[32]将三维模型规范化和体素化,对体单元进行三维傅里叶变换并取复数系数的实数部分构成特征向量对模型进行描述,最后通过向量的 L1 范式或 L2 范式实现相似性计算。相比于傅里叶变换,球面调和变换具有多分辨率表征模型形状特征的特性,因而在三维模型检索领域得到了更为广泛的应用。Kazhdan 等^[33]将三维模型体素化为一个 $64 \times 64 \times 64$ 的网格体单元,并以网格的中心为球心,使用半径分别为 1~32 的同心球将网格分解成 32 个球面函数,经过球面调和变换将每个球面函数分解成频率由低到高的 16 个球面调和函数的和。以上两种基于傅里叶变换和球面调和变换所建立的描述符一般只能应用于三维模型的全局检索,而不能用于模型的局部形状比较,小波变换则能同时应用于模型整体和局部形状的分析。例如 Pastor 等^[34]用三维小波多分辨率描述三维模型,通过计算一个中间网格满足细分连通性要求,以便进行小波变换计算;接着用一个迭代变形过程调整网格以适应不同的输入数据;最后计算球形小波变换得到三维模型的多分辨率描述。由于采用了不同于空间域的频域分析方法,基于数学变换的形状描述子与其他形状描述子有着良好的互补效果。它能提供模型的多分辨率描述,实现从粗到精的模型形状特征表征,但在进行数学变换前一般要对模型进行规范化,数学计算较为复杂,因此在一定程度上影响了该类方法的效率和可行性。

基于视图投影进行零件模型形状表征的理论依据是:对于相似的两个三维模

型,从任意视角看它们都应该是相似的。因此,基于视图投影的三维模型检索方法通常是将模型转换成多角度二维投影图像,利用图像处理领域的相关理论基础分析三维模型间的相似性。这种思想可以将目前成熟的图像处理技术应用到三维模型的匹配中,并能够有效简化整个三维模型的检索匹配过程。例如 Funkhouser 等^[35]将三维模型在 13 个视角上进行投影并得到投影的二维视图,通过距离变换将视图转换成灰度图像并离散到一组同心圆上,利用傅里叶变换得到这些视图的描述符。随后的研究从局部可视特征^[36]、视图对称性^[37]和形状轮廓描述^[38]等方面对该算法进行了改进,极大地拓展了该方法对三维零件模型几何特征的识别性能。视图投影方法利用了目前较为成熟的图像处理技术,但在从三维向二维转换的过程中会造成部分细节信息的缺失(例如模型间干涉、遮挡和包含等空间关系),因此需要对模型提取多个投影视图,通常需要耗费较大的计算时间。

(3) 基于拓扑信息的零件模型检索

在计算机辅助几何造型领域,通常用拓扑来表示模型中基本元素或基本几何体之间的相互连接关系^[39]。拓扑是三维模型中各几何特征在空间中的关联关系,不随模型时空的变化而发生改变,是三维模型自身固有的一类特征属性,这一性质使拓扑结构在模型的形状描述、匹配检索、形状分析与理解等应用中具有重要作用。三维模型的拓扑结构以图或树的形式进行表达,进而将三维模型检索问题转换为图或树结构的匹配问题。一般情况下,树匹配过程比图匹配过程更简单,匹配速度更快,但相当多的三维模型并不能用树结构来表达,使基于图的三维模型描述方法得到了广泛的应用。随着 21 世纪初期图论相关算法的迅速成熟,部分学者受此启发开始研究基于骨架图、Reeb 图等图数据的三维模型拓扑描述方法。

骨架图是一种直观的表达三维模型拓扑结构的描述形式,它对模型形状的微小变化不敏感,因此能够有效保存三维模型的矩不变、几何和体素化等参数。Sundar 等^[40]较早地利用骨架图作为形状描述子对三维模型的几何和拓扑信息进行编码,该方法在对三维模型几何空间进行体素化后,通过细化参数控制基于细化算法的距离变换得到骨架节点,每个节点对应模型中的一个几何特征向量,并应用最小生成树算法将骨架点连接成描述模型形状的骨架图。另有一些研究^[41]提出了具有创新性的骨架生成方法并将其用于三维模型的相似性比较。这些研究所形成的骨架图能够对三维模型进行非常直观的描述,且能够支持全局和局部检索,但获取模型骨架所需的计算量通常较大,且对噪声比较敏感。

Reeb 图是由高度函数、曲率函数和测地距离函数等连续函数确定的三维模型骨架,用来表达三维模型的拓扑结构信息。它的顶点通常表示模型空间中具有特定特征属性的区域,边的连通性表示特征区域之间的邻接关系,进而通过图论的相关算法对三维模型间的相似性进行度量。Reeb 图的概念最早由 George Reeb 针对模型的拓扑结构的表述问题提出,由于具有较少的数据量却能保留三维模型的重要的拓扑信息,同时具有旋转、平移和缩放不变性的特性,在三维模型检索领域

得到了广泛的应用。随后的研究分别在 Reeb 图生成和匹配方法等关键问题上进行了大量拓展,例如 Hilaga^[42]和 Mohamed^[43]分别提出通过测地距离和混合距离函数获得用于描述模型的拓扑结构的分辨率 Reeb 图;Tierny^[44]通过搜索表示两个模型的 Reeb 图所包含的最大共有子图实现了模型的局部检索;Barra 等^[45]在扩展 Reeb 图的基础上生成了最短路径的集合来表示模型,通过基于核的匹配方法获得模型之间的相似性。与骨架图一样,Reeb 图能够从拓扑结构的角度对三维模型进行直观的描述,但 Reeb 图的构造是基于映射函数的,映射函数的选择会对描述结果产生较大影响。

一般而言,拓扑结构包含了模型的各特征元素及其相互关系,同时在一定程度上可用于描述模型内部结构^[46],并可进一步结合实际应用、融合其上下文环境,以进一步提高检索效率,因此该类方法是实现机械工程领域零件模型检索的重要手段之一。

(4) 机器学习在零件模型检索中的应用

近年来,随着人工智能算法与框架的迅速发展,机器学习技术在二维图像处理领域已经获得十分成熟的应用,受此启发,一些学者也开始尝试使用机器学习方法进行三维模型的识别和匹配。

在机器学习模型中,输入数据(包括训练样本集和测试样本集等)是能够描述模型几何特征的模型描述符,其数量和质量对系统检索效率有着至关重要的影响。目前用于机器学习的 CAD 模型表征方法主要有视图投影和形状变换两种。例如,Shi 等^[47]基于模型多视图投影描述符提出了用于三维模型检索的深度神经网络模型“DeepPano”,首先利用视图投影方法将每个三维模型转换为全景视图,然后通过深度神经网络从视图学习中提取图像中具有不变特性的描述信息,并最终实现三维模型的分类和检索;Wang 等^[48]结合卷积神经网络(convolutional neural network,CNN)、极端学习机提出了面向三维模型特征识别的学习框架,该方法采用体素和距离场两种三维形状描述数据为输入,其中体素数据用于描述空间结构信息,而距离描述三维模型形状的局部细节,并通过训练学习模型提取三维形状的局部特征和全局特征实现三维模型检索。虽然实验证明基于深度学习的检索方法对于某一类三维对象具有较高的检索准确度,但需要大量的时间来训练大量的三维模型。此外,如果查询的三维模型不属于经过训练的三维模型数据库,则对查询的三维模型进行特征提取将花费大量的时间。

1.3.2.2 装配体模型检索

两个及两个以上的零件按特定约束连接在一起形成装配体,装配体即表征产品的局部和整体结构,也是功能、性能、制造工艺和产品维护等各类设计意图的集中体现。绝大部分工业产品不以单个零件的方式存在,而是由特定数量的零件装配形成的。在产品设计中,通常采用若干零件的组合来实现特定的功能,因此装配体包含更加丰富的设计信息。从产品建模的角度来说,装配体模型无法独立存在,

必须由零件模型基于装配约束产生。围绕装配体的数字化定义业务是产品研制的重要组成部分,包括装配约束构建、装配作业仿真、装配工艺设计、质量检测和维修维护等。由此发现,与零件模型相比,以装配体模型为对象开展模型信息发掘与重用研究具有更普遍的应用价值。为了能够对当前多种装配体检索方法进行直观的理解,Lupinetti^[49]对装配体模型检索方法的发展和面临的挑战进行了全面的讨论,将装配体检索方法按照描述符的内容分为基于几何信息和融合拓扑信息的装配体检索两类。

(1) 基于几何信息的装配体检索

在数字化产品研制体系中,围绕装配体模型所展开的研发设计工作贯穿于产品的整个生命周期,影响到产品的仿真分析、制造和装配等各个方面^[50]。Natraj Iyer^[51]在研究中指出,模型的几何信息是影响产品设计与分析的重要因素。随着人们对三维模型空间形状认识与研究的日益深刻,基于几何信息的装配体模型重用理论研究正成为工程设计领域的新焦点^[52]。

利用几何信息进行装配体检索的主要思路是将装配体离散为零件信息的集合,通过建立零件表征空间将装配体映射为空间中的点集,在此基础上实现装配体模型的检索。例如,针对轻量化的装配体模型,Hu等^[53]提出了一种基于向量空间模型的检索方法,该方法将装配体分解成零件集合后,借助向量空间模型将装配体表示成向量形式,利用余弦距离计算方法对不同装配体向量间的相似性进行度量。文献^[54]提出了一种考虑装配体空间结构的装配体相似性计算方法,利用空间特征点集表示装配体模型,并能够在综合零件属性相似性、零件空间位置相似性的基础上进行空间点集的匹配。实验表明,这种不考虑零件装配关系的检索方式在检索速度上具有一定的优势;同时这种检索方法对用户比较友好,允许输入单个零件模型或输入装配体中的所有零件模型。

(2) 融合拓扑结构信息的装配体检索

对于装配体的设计和制造等过程,零件间复杂多变的拓扑结构信息是进行各类业务的重要依据。目前CAD系统中装配体拓扑结构的描述形式通常是层次结构和装配结构^[55],前者记录了零件、组件和部件等不同层次模型信息的从属关系信息,通过产品功能聚合使每个部分成为执行特定功能的单元。后者主要记录不同零件的接触、运动等装配约束关系,反映产品如何进行工艺规划、制造及组装等。在装配体不同的层次结构和装配关系耦合下,多个独立的零部件最终组合为一个紧密联系的功能实体。因此,装配体的拓扑结构是设计意图和经验知识的集中体现,同时也是产品装配工艺规划、结构分析等业务的重要参考依据。从拓扑结构角度进行的装配体检索,将能够更好地获取模型中具有更高重用和借鉴价值的信息。

目前,基于拓扑特征的装配体模型表征方法在装配工艺规划领域,特别是在装配顺序规划方面有了广泛的研究基础,例如关系图模型、装配关系矩阵等。在这些已有成果的基础上,部分研究学者利用图或树在表达拓扑结构方面的优势来解决

装配结构相似性分析问题。其中,图能够较好地对装配体中零件的连接关系进行表征,而树则更加侧重于装配体的层次关系。例如,Deshmukh 等^[56]较早地针对装配体检索问题给出了一个基于内容的装配体检索系统,利用配合图组织装配体所包含的零件和装配信息,并详细给出了相关的检索条件、检索算法和检索策略。唐韦华^[57]提出了基于树图匹配的装配体模型评价方法,将规模较大的图匹配问题转换为相互关联的一个树匹配和一个规模较小的图匹配问题,从而缩减了匹配空间并提高了算法效率。

为了保证检索结果能够符合预期范围,仅依赖于拓扑信息往往是不够的,因此多数方法主要以拓扑结构为基础,依托其中各元素对装配体各类属性信息的承载能力,实现装配体拓扑结构信息与零件形状、语义和运动等特征信息的多样性描述,进而采用相关匹配算法实现相似性的综合度量。例如 Chen 等^[58]提出了装配体多层次描述规则,涵盖了装配体拓扑结构、装配语义、几何形状和功能等从高层到低层的各类信息,并将各类信息按照装配体层次结构组织成树的形式。Miura^[59]以装配连接图描述装配体结构信息,节点对应于装配体中的一个组件,每一条弧对应于组件间的接触、干涉或几何约束关系,通过求解两图间的稳定匹配问题实现装配体结构相似性检索。Tao^[60]等在装配体模型中引入了与运动功能密切相关的接触面信息,通过零件接触面的数量、几何类型、凹凸性和接触面之间的关系等描述和分析零件的相似性。Chu 等^[61]提出了一种集成多种模型信息的装配体检索方法,涉及多个描述符,包括特征邻接图、拓扑图和形状分布。Zhou^[62]等提出了装配体模型的局部匹配方法,构造了装配模型的属性邻接图,通过比较组件之间的连接关系来评估组件之间的相似性。

上述的研究可以看出,国内外众多研究学者主要从装配体零件构成与拓扑结构角度出发,结合几何形状、运动特性、接触关系和层次结构等多种信息,对装配体模型信息检索与重用问题进行了广泛的研究,以满足装配体检索的多样化应用需求。然而,相较于零件模型检索,目前针对装配体模型检索的研究成果依旧较少。

1.3.3 三维模型通用结构发掘

20 世纪 90 年代以来,随着信息技术和计算机制造技术的发展,模块化设计、标准化设计、系列化设计和网络化协同设计等创新方法和理念成为推动产业结构调整 and 升级的革命性力量。工程技术人员在开发具有多种功能的不同产品时,往往将整个产品划分为多个具有功能结构独立性和标准接口的模块,再通过网络将各个模块的设计制造工作分配至每个部门或外部厂家。据统计,目前的机械产品中有 30%~70% 的零部件是标准件或标准模块^[63]。在一些具有近似功能的产品中,某些模块往往是普遍存在的,这类频繁出现的模块在模型信息发掘领域被称为“通用结构”,它代表着多个产品间的共性设计知识,是新产品、新工艺等开发过程中重要的可重用信息。因此,以不同产品的三维模型为研究对象,找出其中的通用

结构,可以得到具有较高借鉴意义和重用价值的经验和知识。通过对模型资源中的通用结构进行发掘,可以在设计之初就向设计者主动推送具有信息完整性和通用性的高质量重用资源,将极大地提升新产品开发过程的模型重用水平。

通用结构挖掘问题侧重于模型中结构性知识的检索,其一般思路是:首先,参照三维模型检索中图描述符的构建方法,通过一定的前处理和后处理步骤将三维模型的结构、形状与装配关系等信息转换为图的表征形式;然后,以多个模型的图描述符为输入,运用频繁子图挖掘的相关算法进行分析计算并提取三维模型中的常用局部结构。例如,马铁强^[64]等提取零件的特征关系建立有向特征关系图,由海量三维零件模型构建有向特征关系图库,并通过频繁子图与零件库之间的映射关系获取典型零件结构。Ma 等^[65]根据三维模型的面以及面之间的连接关系得到表示模型的面邻接图,将通用结构发掘问题转换为频繁子图挖掘。Lupinetti 等^[66]将结构、形状、接触面和统计数据进行编码构建了装配体多层次描述模型,该模型能够描述部件和组件级别的结构,并最终将装配模型之间的通用结构挖掘转换为多个图之间的子图同构问题。

上述研究表明,通用结构发掘可以看作三维模型局部检索的一种扩展,局部检索是在两个模型之间搜索公共的部分,而通用结构发掘是在多个模型之间获取具有相同结构特征的部分。然而,目前三维模型通用结构发掘的相关研究成果主要针对零件模型,面向装配体模型的通用结构发掘和重用方法仍然需要深入研究。

1.3.4 国内外模型检索平台

近年来,国内外科研机构和企业对三维模型信息发掘与重用技术进行了不同程度的实践性探索,搭建了相应的平台系统。分析发现,基于内容的三维模型检索系统主要面向形状、连接关系、功能结构等信息对模型库资源进行检索与重用。与广泛应用的文本检索技术相比,对用户的检索意图具有更强的描述能力,因此在工程设计、工业设计、影视特效和生物化学等领域具有广泛而深远的意义。目前比较有代表性的三维模型检索系统有:

(1) 3D Model Search Engine^[67]

该平台由普林斯顿大学于 2004 年开发完成,旨在促进利用标准化的数据集和评价方法来研究三维模型的分类、聚类、匹配和识别技术。该平台数据库主要涵盖针对游戏、工业设计和影视特效等行业中广泛使用的三维网格模型,适合用户进行角色和场景模型的相似性检索,同时为用户提供了多种用户查询接口,包括关键字、草图和模型实例检索。

(2) LINKable^[68]

该平台联合超过 400 家国内外公司建立了涵盖数百万产品零部件、标准件和外观件的模型库,全面支持包括 AutoCAD, CATIA, UG, PROE 和 Creo 等在内的各大主流三维设计软件,因而在机械、电气自动化等多个领域应用广泛。它还提供

关键字、变量、2D 草图和模型实例的用户查询接口,允许用户在平台下属的三维模型库中利用关键字、草图等方式粗略查找符合设计需求的三维模型,并将检索结果直接作为实例精确检索的输入以获取更为相关的三维模型。

(3) AIM@SHAPE^[69]

该平台由欧盟 14 个大学或机构联盟开发的模型共享数据库,支持关键词检索、语义检索和几何检索 3 种方式,允许用户上传 stl 格式自定义模型文件,作为基于实例检索的输入。该平台注重对三维模型形状、拓扑结构、色彩和纹理等语义信息的数字化表达,在表达模型对象的视觉外观的同时确定该模型在给定知识领域的意义或功能。

(4) 其他

除了上述各具特色的三维模型检索平台外,德国莱比锡大学 Graphicslab 实验室的 Vranic 博士将基于模型文件的查询方式应用到了其研究成果中;日本国家多媒体教育学院实现的检索平台能够实现对模型进行局部匹配的功能,用户可以通过手机等移动终端查询、操作模型。国内虽然目前尚未出现较为成熟的 Web 检索系统和商业软件系统,但是一些研究机构针对算法的研究,开发了相应的原型系统来验证所提出算法的有效性。例如浙江大学针对提出的异构三维模型的语义、转换和多层次检索开发了原型系统^[70];中科院是较早开展三维模型检索的研究机构,主要通过提取模型的矩、球面调和等几何特征实现模型检索并开发了算法验证的原型系统^[71];华中科技大学开展了 CAD 方面的基于属性邻接图的检索算法研究^[72],并利用图的方法实现了装配体模型检索。

综上所述,产品研制模式的变革引发了三维模型信息挖掘内涵的不断变化。在发掘内容方面,从单一的功能或结构发掘向多维信息综合发掘发展;在发掘对象方面,从三维零件模型向三维装配体模型发展;在应用范围方面,从设计阶段的结构信息重用向仿真实验、工艺设计和维修维护等下游阶段发展。本书后续内容将重点围绕产品结构中的装配体模型展开。

参考文献

- [1] QUINTANA V, RIVEST L, PELLERIN R, et al. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry [J]. Computers in Industry, 2010, 61(5): 497-508.
- [2] Aberdeen Group, The design reuse benchmark report[R]. [S. l.: s. n.], 2007.
- [3] SCHERER A. Reuse of CAD design objects by a neural-network approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1996, 9(4): 413-421.
- [4] MARR D, NISHIHARA H K. Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1978, 200(1140): 269-294.
- [5] WOODHAM R J. Stable Representation of Shape[M]. Vancouver: University of British

- Columbia,1987.
- [6] BINFORD O T. Survey of model-based image analysis systems[J]. The International Journal of Robotics Research,1982,1(1): 18-64.
 - [7] BRADY M. Criteria for Representations of Shape[J]. Human and Machine Vision,1983:39-84.
 - [8] HARALICK R M,MACKWORTH A K,TANIMOTO S L. Computer-Vision Update[M]. Handbook of artificial intelligence. Addison-Wesley,1989: 519-582.
 - [9] MOKHTARIAN F and MACKWORTH A K. A Theory of Multiscale Curvature-based Shape Representation for Planar Curves[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1992,14(81): 789-805.
 - [10] 白静. 面向设计重用的三维 CAD 模型检索[D]. 杭州: 浙江大学,2009.
 - [11] ULLMANN J R. An algorithm for subgraph isomorphism[J]. Journal of the ACM,1976, 23(1):31-42.
 - [12] CORDELLA L P, FOGGIA P, SANSONE C, et al. Performance evaluation of the VF graph matching algorithm [C]//International Conference on Image Analysis & Processing. IEEE Computer Society,1999.
 - [13] CORDELLA L P, FOGGIA P, SANSONE C, et al. A (sub)graph isomorphism algorithm for matching large graphs [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2004,26(10): 1367-1372.
 - [14] 马露杰,黄正东,吴青松. 基于面形位编码的 CAD 模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2008(1): 21-27.
 - [15] TAO S Q,HUANG Z D,MA L J, et al. Partial retrieval of CAD models based on local surface region decomposition[J]. Computer-Aided Design,2013,45(11): 1239-1252.
 - [16] THOMAS F,PATRICK M,MICHAEL K, et al. A search engine for 3D models[J]. ACM Transactions on Graphics,2003,22(1): 83-105.
 - [17] BORLUND P. The concept of relevance in IR[J]. Journal of the American Society for Information Science & Technology,2003,54(10): 913-925.
 - [18] PATEL N V,SETHI I K. Video shot detection and characterization for video databases [J]. Pattern Recognition,1997,30(4): 583-592.
 - [19] TANGELDER J W H, VELTKAMP R C. A survey of content based 3D shape retrieval methods[J]. multimedia tools & applications,2008,39(3): 441-471.
 - [20] QIANG J, MICHAEL M, et al. Machine interpretation of CAD data for manufacturing applications[J]. Acm Computing Surveys,2002,29(3): 264-311.
 - [21] KYPRIANOU L K. Shape classification in computer-aided design [microform] [D]. Cambridge: University of Cambridge,1980.
 - [22] JOSHI S,CHANG T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann,1988.
 - [23] RAMESH M,YIP-HOI D,DUTTA D. Feature based shape similarity measurement for retrieval of mechanical parts [J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering,2001,1(3): 245-256.
 - [24] ZHOU X,QIU Y,HUA G, et al. A feasible approach to the integration of CAD and CAPP [J]. Computer Aided Design,2007,39(4): 324-338.
 - [25] HERRMANN J W, INGH G. Design similarity measures for process planning and design

- evaluation[J]. [S. l. : s. n.],1997
- [26] 张开兴,张树生,白晓亮,等. 一种属性图同构的三维 CAD 模型局部匹配算法[J]. 西安: 西安交通大学学报,2010,44(11): 56-60.
- [27] JEON S M,LEE J H,HAHM G J,et al. Automatic CAD model retrieval based on design documents using semantic processing and rule processing[J]. Computers in Industry, 2016,77: 29-47.
- [28] STEFAN B, DANIEL A K, KRIEGEL H P. Section coding: Ein verfahren zur ähnlichkeitssuche in CAD-Datenbanken[M]//Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft, Berlin: Springer Berlin Heidelberg,1997.
- [29] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics,2002,21(4): 807-832.
- [30] LIU X G, SU R, KANG S B, et al. Directional Histogram Model for Three-Dimensional Shape Similarity[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press,2003.
- [31] GAL R, SHAMIR A, COHEN O D. Pose-Oblivious Shape Signature [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics,2007,13(2): 261-271.
- [32] VRANIC D V, SAUPE D, RICHTER J et al. Tools for 3D-object retrieval: Karhunen-Loeve transform and spherical harmonics [C]//2001 IEEE Fourth Workshop on Multimedia Signal Processing,Cannes,2001.
- [33] KOBBELT L, SCHRDER P, Kazhdan M, et al. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors [J]. Eurographics Symposium on Geometry Processing,2003,43(2): 156-164.
- [34] PASTOR L, ANGEL R, GUEZ A, et al. 3D wavelet-based multiresolution object representation[J]. Pattern Recognition,2001,34(12): 2497-2513.
- [35] THOMAS F, PATRICK M. A search engine for 3D models[J]. Acm Transactions on Graphics,2003,22(1): 83-105.
- [36] OHBUCHI R, OSADA K, FURUYA T, et al. Salient local visual features for shape-based 3D model retrieval [C]//Shape Modeling and Applications, 2008. SMI 2008. IEEE International Conference on. Piscataway: IEEE Press,2008.
- [37] CHEN D Y, TIAN X P, SHEN Y T, et al. On visual similarity based 3D model retrieval [J]. Computer Graphics Forum,2010,22(3): 223-232.
- [38] WANG F, LIN L, TANG M. A new sketch-based 3D model retrieval approach by using global and local features[J]. Graphical Models,2014,76: 128-139.
- [39] 马露杰. 三维 CAD 模型形状结构分析方法[D]. 武汉: 华中科技大学,2009.
- [40] SUNDAR H, SILVER D, GAGVANI N, et al. Skeleton based shape matching and retrieval [C]//Shape Modeling International. Piscataway: IEEE Press,2003.
- [41] LOU K, JAYANTI S, IYER N. A reconfigurable 3D engineering shape search system: Part II, ultiresolutional similarity assessment and retrieval of solid models based on DBMS [M]. [S. l. : s. n.],2003.
- [42] HILAGA M, SHINAGAWA Y, KOMURA T, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes[C]//Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York: ACM Press,2001.

- [43] MOHAMED W, HAMZA A B. Reeb graph path dissimilarity for 3D object matching and retrieval[J]. Visual Computer, 2012, 28(3): 305-318.
- [44] TIERNY J, VANDEBORRE J P, DAOUDI M. Partial 3D shape retrieval by reeb pattern unfolding[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(1): 41-55.
- [45] BARRA V, BIASOTTI S. 3D shape retrieval using Kernels on extended Reeb graphs[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(11): 2985-2999.
- [46] 万丽莉, 赵沁平, 郝爱民. 一种基于部件空间分布的三维模型检索方法[J]. 软件学报, 2007(11): 240-251.
- [47] SHI B, BAI S, ZHOU Z, et al. DeepPano: Deep Panoramic Representation for 3D Shape Recognition[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(12): 2339-2343.
- [48] WANG Y, XIE Z, XU K, et al. An Efficient and effective convolutional auto-encoder extreme learning machine network for 3D feature learning[J]. Neurocomputing, 2015, 174(PB): 988-998.
- [49] LUPINETTI K, GIANNINI F, MONTI M, et al. Multi-criteria retrieval of CAD assembly models[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2018, 5(1): 41-53.
- [50] KUNWOO L. CAD/CAM/CAE 系统原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [51] IYER N, JAYANTI S, LOU K, et al. Shape-based searching for product lifecycle applications[J]. Computer Aided Design, 2005, 37(13): 1435-1446.
- [52] ATTENE M, BIASOTTI S, MORTARA M, et al. Computational methods for understanding 3D shapes[J]. Computers & Graphics, 2006, 30(3): 323-333.
- [53] HU K M, WANG B, YONG J H, et al. Relaxed lightweight assembly retrieval using vector space model[J]. Computer Aided Design, 2013, 45(3): 739-750.
- [54] 伍英杰, 高琦. 产品装配体模型的空间结构相似性检索方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014(1): 115-122.
- [55] TOCHE B, HUET G, MCSORLEY G, et al. A Product lifecycle management framework to support the exchange of prototyping and testing information[C]//ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference. New York: ASME Press, 2010.
- [56] DESHMUKH A S, BANERJEE A G, GUPTA S K, et al. Content-based assembly search: A step towards assembly reuse[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(2): 244-261.
- [57] 唐韦华. 基于高效图匹配的三维 CAD 模型相似评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [58] 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.
- [59] MIURA T, KANAI S. 3D Shape Retrieval considering Assembly Structure: Similarity measure including constraint conditions between components [C]//JSPE Semestrial Meeting. [S. l.]: The Japan Society for Precision Engineering, 2009.
- [60] Tao S Q, HUANG Z D. Assembly model retrieval based on optimal matching[M]//Software engineering and knowledge engineering: Theory and practice. Berlin: Springer, 2012.
- [61] CHU C H, HSU Y C. Similarity assessment of 3D mechanical components for design reuse[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(4): 332-341.
- [62] ZHANG X T. Research on assemblies retrieval and indexing based on bipartite graph[J].

- Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005(9): 2106-2111.
- [63] 朱春生. 基于UG的飞机工装标准件库技术的研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [64] 马铁强, 徐成荫, 刘颖明. 基于频繁子图挖掘的典型零件结构获取方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(11): 34-38, 42.
- [65] MA L J, HUANG Z D, WU Q. Extracting common design patterns from a set of solid models[J]. Computer Aided Design, 2009, 41(12): 952-970.
- [66] LUPINETTI K, GIANNINI F, MONTI M, et al. Multi-criteria retrieval of CAD assembly models[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2018, 5(1): 41-53.
- [67] Princeton 3D Model Engine. [EB/OL]. [2022-01-27]. <http://shape.cs.princeton.edu/search.html>.
- [68] 三维CAD零部件在线模型库. [EB/OL]. [2022-01-27]. <https://linkable.partcommunity.com>.
- [69] The Aim@Shape Shape Repository. [EB/OL]. [2022-01-27]. <http://shapes.aim-at-shape.net/index.php>.
- [70] 陈磊. 异构CAD产品模型的数据分层表示及重用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [71] 刘玉杰, 李宗民, 李华, 等. 三维U系统矩与三维模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006(8): 29-34.
- [72] 陶松桥, 黄正东. 基于属性邻接图匹配的装配体模型搜索方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(2): 290-297.

三维模型可重用信息构成分析

2.1 引言

在三维 CAD 建模系统出现之前,二维工程图是制造业产品设计、加工与装配等环节的通用语言。二维工程图由于缺少三维空间信息,在信息传递的过程中需要用户综合多种视图来理解产品的几何外观与技术要求信息,在信息上下游传递的过程中容易存在二义性。相比较而言,三维模型在准确地反映设计意图、促进产品研制人员的信息沟通方面具有显著优势。因此,在三维 CAD 建模系统应用初期,制造企业在相当长的一段时间内采用了“3D 模型+2D 标注”的产品研制模式,即利用 CAD 软件构建产品的三维模型,然后通过投影、消隐生成二维工程图后进行必要的修改和标注,再将二维工程图和三维模型同时作为交付物向下游环节传递。在该模式中,三维模型的几何特征信息表现能力得到充分发挥,但由于缺乏有效的制造工艺和检验信息的三维表示方法,致使加工制造中几何结构、制造要求等重要信息的共享与传递仍依赖于二维工程图。

进入 21 世纪,MBD 已成为 CAD 技术发展的重要趋势之一,它改变了传统的以二维工程图纸为主的研制模式^[1-2],充分利用三维模型开发了用户更容易理解的设计制造一体化表达方式。在 MBD 技术的支撑下,三维模型通过系统集成的方式,能够完整表达包括几何结构、制造工艺、装配误差和质量要求等的产品全生命周期信息,并最终成为产品设计、生产和制造等生命周期过程中的唯一数据来源,使产品结构、工艺与工装设计和产品制造与检验等环节形成了高度集成的信息共享机制,促进制造业真正实现了无纸化的生产模式。

分析发现,随着 CAD 技术的不断发展和成熟,以三维模型为主要媒介所承载和关联的产品研制信息日趋多样化,这些信息包括文本、图形、视频和数据库文件等各种形态,在产品研制过程中扮演着重要的角色。与此同时,产品研制模式的变革也带动了信息重用模式的变革,围绕三维模型发掘和组织可重用信息,进而开展知识工程平台建设成为提升研制效率的关键途径。本章重点分析三维模型信息的可重用性,明确模型信息的分类和构成,为本书后续内容奠定基础。

2.2 三维模型信息的可重用性

三维模型信息的可重用性是指三维模型关联的产品全生命周期数据在新产品研制过程中能够被再次使用的能力,对新产品设计、制造和维护等业务效率的提升有重要意义。三维模型的可重用信息内容包括狭义和广义两个层面:①狭义上的可重用信息指的是在三维CAD系统中产生的信息,包括产品的设计意图、几何外观、功能以及层次结构等,因此狭义上的模型信息重用指产品零部件结构信息的重用;②广义上的可重用信息是指在产品数据管理技术的支撑下,在产品各生命周期的不同阶段产生,并与三维模型关联的各类历史数据,包括设计需求、技术原理、工艺文档、质量要求和使用维护指导等。例如,通过参考已有产品的技术标准及质量要求进行新产品的标准化设计属于广义三维模型信息的信息重用。

虽然在产品全生命周期中会产生大量有价值的数据,但其中部分数据并不能被工程人员有效重用。例如,车间生产及排产计划等数据与企业订单数量、库存等状态相关联,因此在企业持续变动的生产状态下将会很快失效。为了更好地认识和管理三维模型的可重用信息,本书对影响三维模型信息可重用性的因素进行讨论,主要包括模型所承载信息的正确性、完备性、功能共性、可获取性以及可修改性等。

(1) 信息正确性

信息正确性是指三维模型经过产品设计的实践检验,被证明可以满足一定的功能需求,且这种满足需求的能力在相同约束条件下能够继续维持。在产品研制的初始阶段,设计者很难保证产品设计的正确性,只有在完成产品详细设计并经过严谨的验证之后,这种正确性才能够得到确认。

(2) 信息完备性

信息完备性是指三维模型承载设计结果信息和关联设计过程信息的能力。从信息重用的角度来说,单一的设计结果信息对新产品研制人员的可复用价值有限,其设计结果背后关联的需求分析、设计原理、仿真计算和制造工艺等信息能够用于追溯整个设计过程。例如,若研制人员仅能够获取已有三维模型的结构信息,而无法利用对应的过程信息来帮助理解产品的设计意图,则无法促进新产品研制效率的有效提升。

(3) 功能共性

功能共性是指在特定行业领域内相同的产品结构应承载相同的功能需求。三维模型信息在保证信息正确性和完备性的前提下,若能够满足行业领域范围内的功能共性,则可在没有颠覆性更改的情况下指导新产品的开发工作,因此该特性是决定三维模型信息可重用范围大小的关键因素之一。

(4) 可获取性

可获取性是指研发人员通过技术手段获取所期望的三维模型信息的能力。三

维建模相关的标准规范、模型的存储方式以及产品数据的管理模式对信息获取都有至关重要的影响。一般来说,信息获取本身需要消耗企业资源,若其代价过高则失去了信息重用的意义。企业数字化产品研制体系的标准化和模型资源的统一管理将为信息重用奠定坚实的基础。

(5) 可修改性

可修改性是指可重用模型信息能够被研制人员方便地修改,并可在新的需求环境中被再次使用。在修改过程中,原有的信息单元不断地吸取新的知识从而具有更高的可重用性,同时能够修正原有信息的设计错误或适应性。模型信息的可修改性依赖于企业知识工程平台的建设,需要通过信息重用的流程固化和标准接口来保证。

从上述分析可以看出,三维模型信息的可重用性涉及的方面众多,不仅受到模型及其关联信息的影响,而且与企业的数字化平台建设直接相关。只有将模型信息重用作为知识工程的重要组成部分,开展具有体系性的规划与部署工作才能发挥预期的效能。

2.3 三维模型索引信息的构成

为了能够确定可重用模型信息的范围并筛选出研制人员需要的结果,通常需要构建用于信息查询的索引,使产品研制人员能够方便高效地获取知识。三维模型的索引信息是指能够被计算机识别,并可用于建立相似性索引机制的可重用信息,包含功能、结构、加工和装配等各种类型。近年来,随着国内外众多科研单位、制造企业对信息发掘与重用的持续关注,三维模型检索领域的新理论、新方法得以迅速发展,使模型中越来越多的信息可以被用于建立信息索引结构。

通过对模型信息发掘需求的分析发现,产品的三维模型索引信息应包含零件信息、装配信息、功能信息和层次信息 4 部分内容,各类信息的构成如图 2-1 所示。

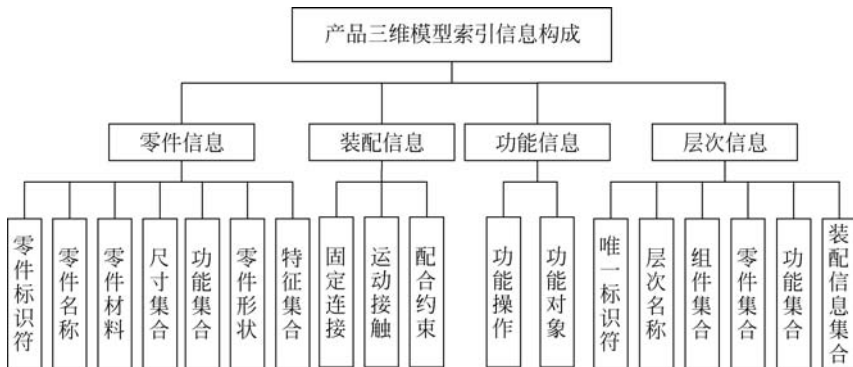


图 2-1 产品模型索引信息构成

2.3.1 零件信息

零件作为构成产品的最基本单元,所包含的信息反映了设计人员对零件的全部设计意图。在目前的研究应用中,一般认为零件信息大致可分为非几何信息和几何信息两类^[3]。考虑到零件信息与工程应用的关联关系,这里将其称为“基础语义信息”和“形状特征信息”。

1) 基础语义信息

基础语义信息主要由一系列具有工程意义的文本、数值等字节数据构成,这类信息在三维模型和数据管理系统中完整地保存,能够从全局角度对零件模型进行描述。由于字节的索引计算对计算资源的占用非常小,该类信息适用于在大规模数据库中进行三维模型的非精确检索和对低价值对象的快速过滤。基础语义信息主要包括零件名称、类型、尺寸、功能及材料等方面。

(1) 零件名称

零件名称是对零件的简要语义描述,工程技术人员能够通过零件的名称快速获知零件的一部分信息。在目前的三维模型检索系统中,通过零件的文件名称快速定位相关资源的做法较为普遍。

(2) 零件类型

零件类型可根据零件的相关设计文档得到,一般由企业中有经验的设计人员按行业约定俗成的标准进行标注。企业可按照零件类型的不同建立支持信息发掘的结构化模型库,使工程技术人员在模型检索过程中能够通过零件类型快速过滤与检索意图不相关的模型,进而提高模型检索效率。

(3) 物理特征

物理特征由描述零件中具有特定物理意义的数值构成,包括表面积、体积、转动惯量和包络体尺寸等,一般可从CAD系统中直接获得。由于数据获取与计算方式较为便捷,信息检索与重用过程中可以通过零件物理特征信息来快速过滤低价值信息,进而降低计算成本。

(4) 零件功能

零件功能是零件设计意图的重要表达方式,其表示方法将在2.3.3节中进行详细介绍。

(5) 零件材料

零件材料是零件的重要属性,对产品研发过程的影响主要体现在零件功能设计和加工制造等方面,是进行设计重用时需要考虑的因素之一。

2) 形状特征信息

形状特征信息主要由描述零件几何形状和工程特征的高维向量、图像等数据构成。在当前的零件模型检索方法中,形状特征的量化表达与匹配计算是研究重点。该类方法对三维模型的形状特征描述较为精确,因此可用于在特定检索范围

内的三维模型精确匹配。分析发现,目前支持零件模型相似性分析与检索的形状特征可分为几何形状信息与几何特征信息两类:

(1) 几何形状信息

几何形状信息是通过一定的技术手段,将三维空间视觉图形抽象为可进行量化分析的结构化数据,是三维模型相似性判断的重要依据。近年来,随着三维模型检索技术的发展,众多学者对零件空间形状的量化描述方式进行了深入探究。1.3.2.1节已经对各种描述方法进行了详细介绍,该类方法一般将零件的几何形状信息量化为高维向量的形式,在工程应用中根据实际情况选取一种满足需求的描述方式即可。

(2) 几何特征信息

工程特征是零件上一组相互关联的几何实体所构成的特定功能外形,通常具有特定的设计或制造意义,例如孔、轴、凹槽、凸台及腔体等,是产品研发过程中确定公差分布、规划加工及装配工艺的重要依据。其中,各类特征又可根据具体功能和形状的不同分为若干小类,例如孔可包括通孔、盲孔、螺纹孔和沉头孔等。这些特征能够通过模型特征分解以及机器学习等技术进行获取,进而支持零件特征信息的管理操作。目前,在三维模型检索领域的相关研究中,零件中的几何特征信息(PFeature)大多用图的形式进行组织与描述:

$$PFeature = \{V, E\} \quad (2-1)$$

式中: V 表示图的顶点集合,每个顶点对应于零件模型中一个几何特征; E 表示图中边的集合,两个顶点间的连接边表示对应的几何特征间存在接触关系。

由上述分析可知,零件模型中的索引信息由基础语义信息和形状特征信息两部分构成,可分别用 PAInfo 和 PSInfo 表示:

$$\begin{cases} Part = \{PID, PAInfo, PSInfo\} \\ PAInfo = \{PName, PType, PFuncSet, PSizeSet, PMaterial\} \\ PSInfo = \{PShape, PFeature\} \end{cases} \quad (2-2)$$

式中: PID 表示零件的唯一标识,可用包含数字和字母的字符串表示。从某种程度上说, PID 是零件模型在检索计算过程中的抽象性表达,它与零件存在一一对应的关系,能够在完成相似性计算后通过文本检索技术快速识别和定位零件所在的位置,因此可以利用 PID 建立零件的快速索引和分类机制; PName, PType, PMaterial, PFuncSet, PSizeSet, PShape, PFeature 分别表示零件的名称、类型、材料、功能集合、尺寸集合、几何形状和几何特征信息。

2.3.2 装配信息

装配信息主要反映产品各独立零部件之间如何通过特定的关联关系满足产品的设计意图,是工程技术人员在进行工艺设计、装配仿真及生产线规划等业务中的主要依据,包括机械产品零部件之间的配合定位、相对运动关系以及由此导出的各

种约束关系等。可将产品装配信息分为3类:固定连接、运动接触和配合约束。

(1) 固定连接

固定连接是指采用连接件或通过自身外形特征,将两个或多个零件进行连接最终形成整体稳定的一种连接方式。根据《机械设计手册》^[4]的一般知识,产品中常见的固定连接形式包括:螺纹连接、键和花键连接、销连接和联轴器连接等类型。在两个零部件实现固定连接的过程中,可能会涉及一些标准连接件,例如铆钉、螺钉和螺栓等。因此,工程技术人员可以在进行装配信息描述时预先建立标准连接件的模型库,使其能够随时从模型库中获取连接件的类型信息进而提高效率。

(2) 运动接触

运动接触是指以运动副的形式存在于两个零件之间的一种接触方式,它通过对零件自由度进行限制从而使产品获得特定形式的运动特征。与固定连接不同,运动接触所关联的两个零件相互直接接触并能够产生相对运动,因此在信息表达中无需考虑连接件的构成。运动接触在配合约束的作用下使产品零部件的运动方式都有规律可循。在产品开发过程中,产品的运动特征往往隐含表达了工程设计人员的产品设计意图^[4],并对装配工艺具有重要的影响意义。《机械设计手册》^[5]中给出了机械设计中常用的运动副,例如转动副、移动副、螺纹副、圆柱副和凸轮副等,在实际应用过程中可在此基础上根据具体的需求进行拓展。

(3) 配合约束

配合约束是具有固定连接或运动接触关系的零件中几何特征间的接触约束关系,它描述了两个相互配合的零件如何通过若干几何特征的相互接触实现相互联系。配合约束决定了零部件在产品最终装配结构中的空间位置与姿态,是产生产品装配顺序和评价可装配性的重要依据。配合约束是一种几何性质上的约束,但不同于一般几何意义上定义的约束关系,例如平面贴合、平面对齐(同向)、直线对齐(共线)、角度关系和平行关系等,这种约束必定存在零件之间的表面接触。配合关系一般包括平面与平面贴合、柱面贴合(公称尺寸相同下的同轴)、平面与回转面相切和点面接触等类型。

在配合约束中,配合面是零件配合约束信息的重要载体,它是指一个零件模型中与其他零件存在配合约束关系的模型边界面。由于需要和其他零件保持接触关系,产品研制过程中通常会在配合面上附加众多制造信息,例如加工精度、表面粗糙度和制造工艺等,因此配合面是零件模型中具有重要重用价值的对象。在产品研发过程中,为了保证配合面的可制造性要求,配合面通常由一个或多个配合面元素构成,例如平面、柱面和球面等。多个配合面元素通过一定的拓扑关系能够实现配合面的量化表达,进而支持产品装配信息的匹配分析与检索。

在上述的三类装配关系中,配合约束是其他装配关系的基础,用于描述较低抽象层次的装配关系语义,即装配关系的具体体现,被装配零件正是通过零件之

间的相互配合来实现产品的装配。配合的实现需要产品零部件构成一个相互连接的整体,限制了零件之间的相互运动,保证产品能够按照设计师的意图完成产品功能。

由上述的分析可知,产品的装配信息可以分解为固定连接、运动接触和配合约束,可分别用 FAssPair, KAssPair, CAssPair 进行描述:

$$\begin{cases} \text{FAssPair} = \{\text{FID}, \text{FForm}, \text{FPartSet}, \text{FConPartSet}\} \\ \text{KAssPair} = \{\text{KID}, \text{KForm}, \text{KPartSet}, \text{KFreeSet}\} \\ \text{CAssPair} = \{\text{CID}, \text{CForm}, \text{CPartSet}, \text{CFeatureSet}\} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中: FAssPair, KAssPair, CAssPair 分别表示装配体模型中固定连接、运动接触和配合约束的信息集合; FID, KID, CID 分别表示装配体模型中固定连接、运动接触和配合约束的唯一标识; FForm, KForm, CForm 分别表示装配体模型中固定连接、运动接触和配合约束的形式,可由字符串表示; FPartSet, KPartSet, CPartSet 分别表示装配体模型中完成固定连接、运动接触和配合约束所需连接件的集合,该集合中的元素可由 2.3.1 节的 PID 构成; FConPartSet 表示装配体模型中完成固定连接所需连接件的集合; CFeatureSet 表示装配体模型中构成配合约束关系的配合面集合。

2.3.3 功能信息

产品的功能信息包含了大部分设计意图^[6],对于理解产品的结构、用途以及设计思路具有十分重要的作用,是产品设计活动的核心概念。因此,准确的功能描述有助于在可重用信息发掘时对已有三维模型的设计特性进行有效捕获。文献[7]在对产品功能特征进行层次化分析的研究基础上,提出可将功能描述为“动词+名词”的形式,通过动词和名词所组成的词组表达产品的设计功能,例如传递动力、改变方向等。这种描述方式实际上是一种“操作+对象”的模式,即利用动词和名词分别表示操作和操作对象,因此功能信息可以表示为

$$\text{Function} = \{\text{Foperate}, \text{Fbbject}\} \quad (2-4)$$

式中: Foperate 表示功能中的操作; Fobject 表示功能中的对象。

按照三维模型层次关系,功能信息可以分解为产品功能、组件功能和零件功能,分别 Afunc, Cfunc 和 Pfunc 进行描述:

$$\begin{cases} \text{Afunc} = \{\text{AFoperate}, \text{AFobject}\} \\ \text{Cfunc} = \{\text{CFoperate}, \text{CFobject}\} \\ \text{Pfunc} = \{\text{PFoperate}, \text{PFobject}\} \end{cases} \quad (2-5)$$

式中: Afunc, Cfunc, Pfunc 分别表示产品功能、组件功能和零件功能; AFoperate, CFoperate, PFoperate 分别表示产品功能、组件功能和零件功能中的操作; AFobject, CFobject, PFobject 分别表示产品功能、组件功能和零件功能中的对象。

2.3.4 层次信息

机械产品通常是由具有明显层次关系的零部件所组成的系统,往往能自上而下分解成若干个部件,部件还可以再分解为若干更下层的零件和子部件。这种层次关系能够描述产品的组合形式、装配结构、装配关系和装配顺序,其目的是为了便于工程设计与制造等活动的组织实施,使与产品相关的工程技术人员能够对产品的结构和功能更直观地理解。模型层次信息与人们的装配设计、规划和分析活动紧密关联,是产品中各类信息组织和使用的关键。在信息检索与重用领域中,层次信息大多与装配信息结合,以对产品的组织结构进行描述,用于实现局部结构与通用设计单元的发掘。

在考虑三维模型层次信息的描述时,文献[8]认为不仅需要用适当的数据结构处理装配信息之间的联系,还需要从这种组织结构的层次性出发,分析多应用领域和不同信息抽象粒度对各方面装配信息的影响。为了保证产品信息在检索过程中的正确、有效和一致,需要以层次结构为基础建立各类产品信息的维护规则或方法。三维模型的层次信息可以用式(2-6)中的 Structure 进行描述:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Structure} = \{ \text{AID}, \text{AName}, \text{AComSet}_i, \text{APartSet}, \text{AFuncSet}, \text{AAssSet} \} \\ \text{AComSet}_i = \{ \text{AID}, \text{AName}, \text{AComSet}_{i+1}, \text{APartSet}, \text{AFuncSet}, \text{AAssSet} \} \\ \text{APartSet} = \{ \text{Part}_1, \text{Part}_2, \dots, \text{Part}_n \} \\ \text{AFuncSet} = \{ \text{Function}_1, \text{Function}_2, \dots, \text{Function}_n \} \\ \text{AConSet} = \{ \text{Assembly}_1, \text{Assembly}_2, \dots, \text{Assembly}_n \} \end{array} \right. \quad (2-6)$$

式中: AID, AName 分别表示当前层次装配体模型的唯一标志符与模型名称。与零件信息中的 PID 与 PName 类似,模型标志符与名称信息在检索中主要用于建立模型资源的快速索引和分类机制,工程技术人员能够快速过滤与检索意图不相关的内容。AComSet, APartSet, AFunSet, AAssSet 分别表示当前层次下装配体模型中组件、零件、功能信息与装配信息所构成的集合。其中, AComSet_{i+1} 是构成 AComSet_i 的所有子装配体。在上述 4 个集合中, AComSet 所描述的层次信息将各个层次装配体模型中的零件信息、装配信息与功能信息按照产品的设计结构有机地组织起来。若将层次信息看成树干,那么零件信息、装配信息和功能信息则是树干上的叶子。Part, Function, Assembly 分别表示特定的一组零件、功能和装配信息,其描述方法分别在 2.3.1 节、2.3.2 节、2.3.3 节中进行了详细叙述。

2.4 模型关联的产品生命周期信息

从 20 世纪 90 年代开始,随着计算机辅助技术在制造业中的普及应用,产品从设计生产到维护的整个过程发生了根本性变化,极大地提高了产品的研制效率和

质量。在企业的多种硬件平台上,运行了 CAD,CAE,CAM 及各类文档软件系统,每天都在产生大量有关产品的各式各样的数据信息。面对计算机技术发展带来的海量数据,需要一个统一的数据管理系统对产品的各类信息进行控制性管理,产品数据管理 (product data management, PDM) 与产品生命周期管理 (product lifecycle management, PLM) 技术应运而生。PDM/PLM 系统能够对设计、制造和生产过程中需要的大量数据进行跟踪与支持,使三维模型与其所关联的各类数据在企业各级部门中自由共享,成为实现数字化设计制造的重要保障。

为了提高工程技术人员对产品信息利用效率,目前主流的数据管理系统能够以多种方式支持分类和检索功能,零件、文档和其他项目数据可以通过这些功能模块按照各自的特性进行查找。例如,分类技术是实现快速查询的支持技术之一,它与面向对象的技术相结合将具有相似特性的数据划为一类,并赋予其一定的属性和方法,保证用户能够在分布式环境中高效地查询文档、零件和工作流等数据。PDM/PLM 同时也提供了三维模型数据的分类管理功能,通过系统定义和管理零件分类结构的柔性能力,实现具有层次化的分类结构,即“零件族树”的概念,为工程技术人员方便地使用产品全生命周期数据提供了一个良好的途径。

随着面向三维模型的信息发掘与重用技术理论逐渐成熟,若能将其与 PDM/PLM 技术对产品数据的管理能力相结合,则可能进一步提升工程技术人员对产品数据的应用能力。一方面,随着模型信息重用理论的创新与发展,模型信息的获取方式、表达方法日趋多样化,越来越多的信息能够被用于发掘与重用,进而保证了检索结果的准确性;另一方面,在 PDM/PLM 高度集成化的产品数据管理框架下,三维模型与各类文档数据、产品配置数据以及工作流等数据被紧密联系起来,将使信息重用理论在企业中的应用范围被进一步拓展。例如,若工程技术人员通过三维模型检索技术定位目标产品的三维模型,也就意味着能够在 PDM/PLM 系统中获取该模型所关联的全生命周期数据。

信息发掘技术与 PDM/PLM 技术的融合将能够产生新的数据管理模式:工程技术人员可以通过零部件搜索引擎快速获取目标零部件模型的网络位置,然后根据各自的业务需求对检索到的目标零部件进行任何被允许的操作,或进一步查找 PDM/PLM 系统中与模型所关联的其他数据信息。这种新模式将能够显著地提高产品研制效率,有效地促进和提高零部件的通用化、标准化程度。

参考文献

- [1] 成彬,田莹莹,白茜.基于 MBD 的三维模型信息标注与管理[J].煤矿机械,2015,36(11): 276-278.
- [2] ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1): 1-14.

- [3] 许国玉. 回转体零件特征建模方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [4] 南风强, 汪惠芬, 郝翠霞, 等. 网络协同数字化预装配系统关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 724-730, 745.
- [5] 机械设计手册编委会. 机械设计手册. 第5卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] UMEDA Y, TOMIYAMA T. FBS modeling: Modeling scheme of function for conceptual design[J]. [S. l. : s. n.], 1995.
- [7] 唐敦兵, 康与云. 功能建模驱动的产品设计方案求解方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [8] 王波, 唐晓青, 耿如军. 机械产品装配关系建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 036(1): 71-76.

第 2 篇

装配体模型检索

在当前的数字化研制体系中,产品研制业务的组织主要围绕产品结构展开,而各类业务所产生的信息主要由三维模型承载和关联。因此,研制过程中工程人员获取已有设计资源信息的问题可转换为模型检索问题。检索是通过已知需求发现并获取符合检索意图的可用信息的过程,其实施基础是已经整理好的模型资源库。装配体中所包含的零件及其拓扑结构等信息作为产品信息的主要载体,是产品研制人员专业知识和经验的重要体现。通常,产品从设计、制造到维护的全生命周期过程都会涉及装配相关的业务,包括可装配性分析、工艺设计、装配仿真和维修维护等。因此,以装配体模型及其关联的研制信息为对象进行检索,将能够支持工程实际应用中多类业务的高效开展,对加速产品研制过程具有重要的实践意义。

装配体模型本身所包含信息的复杂性导致其检索难度比零件检索更大。围绕不同的检索需求,装配体检索方法所处理的信息类型具有较大的差异。例如,若仅考虑装配体的整体外形信息,则可利用一些已有的零件模型检索方法,但这种未考虑装配体内部零件构成的方法应用范围极其有限,很难满足实际的工程应用需求。将零件之间的拓扑信息和相关的属性信息纳入检索的相似性分析过程,在装配体检索中具有一般意义。因此,目前的检索方法已经开始从考虑单一的形状信息向多信息融合发展。

在装配体模型检索中,模型信息量化和描述符构建方法的不同,会导致后续所采用的检索算法具有较大的差异。本篇围绕不同应用场景中的检索需求,从离散化零件信息、零件与连接关系的综合信息以及装配体空间结构信息 3 个角度,分别阐述对应的模型描述符构建原理和检索算法。第 3 章将装配体离散为零件集合,从语义和形状两个方面分析模型的相似性,完成基于离散化零件信息的装配体模型检索。第 4 章围绕装配体中零件及其连接关系,从结构特征角度分析模型的相似性,完成综合零件属性及连接关系的装配体模型检索。第 5 章利用装配体中零件个体的空间结构信息,抽象定义了装配体模型的空间连接骨架,在集合序列匹配与子图同构的基础上完成装配体模型检索。通过上述方法的阐述,希望读者能够从中发现各类方法的特点和适用领域。

基于离散化零件信息的装配体检索

3.1 引言

在信息检索中,输入的查询信息越全面则所能获取的查询结果越准确,但由此消耗的检索资源也会增加。为了降低检索成本,围绕检索对象所包含的关键信息来获取期望的结果是一种有效途径。零件是机械产品构成的基本元素,同一种功能需求总是利用相同或相似的零件来实现,而含有一个或多个相似零件的装配体则具有一定的设计共性。因此,对装配体来说,零件包含的信息即关键信息之一。基于上述分析,本章认为可以适当削弱装配体的整体概念,将其离散化为零件构成的集合,并围绕零件个体信息来开展装配体检索工作。已有实践表明,在不考虑零件连接关系的情况下能够得到更多的检索结果,并可适当简化模型描述符构建和检索输入信息的组织工作。

本章的主要思路如下:首先,将装配体离散化为多个零件的集合形式,利用多种零件信息建立装配体模型描述符;其次,围绕零件对象建立单个类型信息的相似度计算方法,并采用多特征融合思路实现零件综合相似性分析;最后,通过零件集合要素的多对多匹配实现装配体模型的整体相似度计算。

3.1.1 装配体信息描述空间构建

三维空间中的装配体模型不能直接用于相似性计算,而是需要将其转换为描述装配体的一种可计算形式,且这种形式应该与装配体一一对应。为实现该目的,需要将装配体模型中可进行相似性分析的信息映射至统一的描述空间中,进而支持后续装配体相似性的综合评价。

本章中装配体模型检索方法的基础是零件信息描述,因此首先考虑如何在描述空间中对零件模型进行表示,具体使用的零件信息类型可参考 2.3.1 节中的相关内容。装配体模型的信息描述空间是一个多维信息空间,该空间中的每个零件被表示为一个“点”,而每一个维度表示一类零件信息。依据上述思路,零件包含的各类信息将被映射至描述空间,而装配体被转换为描述空间中的离散点集。如图 3-1 所示,滚花螺母的信息可映射为描述空间中的一个点,而整个壁板装配卡板

则映射为描述空间中的离散点集。



图 3-1 模型信息在描述空间中的转化

在使用上述描述空间之前,有必要首先对其合理性和有效性进行分析。为满足常用的装配体检索场景,描述空间应满足以下条件:①能够区分出不同的零件;②能够对零件之间的相似性进行度量;③能够对装配体之间的相似性进行度量。这三个条件是相互关联的,每一个条件都以前面的条件为基础。针对上述条件做如下分析:

(1) 利用空间中点所处的位置来区分零件

两个不同的零件在形状与语义信息方面必然存在一定的差异。当零件映射至描述空间之后,这些信息差异会体现为对应信息维度上的位置差异。

(2) 通过空间中点的距离来度量零件相似性

描述空间的每一维表示零件的一类信息,两个点在某个维度上的距离越近,则说明这两个点所表示的零件信息越相似。例如,若某一维度表示零件的名称,对于“普通螺栓”“高锁螺栓”和“箱盖”三者,“普通螺栓”和“高锁螺栓”的距离近而“普通螺栓”和“箱盖”的距离远。因此可以判定“普通螺栓”和“高锁螺栓”之间的相似性大于“普通螺栓”和“箱盖”之间的相似性。上述论断对于每一维度都是适用的。由于两个点之间的距离由点在各个维度上的距离综合决定,因此通过描述空间中两个点的距离就可以得到对应零件的相似性。

(3) 通过空间中点集的距离来度量装配体相似性

在将零件映射为描述空间中的点之后,相应的装配体就转换为描述空间中的点集。由零件相似性计算可知,若两个装配体相似度较高,则表示装配体的两个点集之间的距离接近,反之两个点集之间的距离较远。

此外,点集的形式可以实现多对多匹配,进而得到更准确的相似性计算结果。在进行装配体比较时,需要找出其中零件的对应匹配关系。本章将在完成最相似零件的匹配之后,再根据对应关系将零件的相似性汇总为装配体的相似性,这样获得的相似度才是合理的结果。使用点集的形式可以很容易地实现上述目的,同时,使用点集进行相似性计算可以避免采用图同构和图匹配等方法进行相似性计算所带来的算法复杂度高的问题,满足检索对时间的要求。

3.1.2 零件信息的描述

由 2.3.1 节可知,零件信息包括形状特征信息和工程语义信息,本章抽取以下 5 类信息构建装配体描述空间,包括零件 PID、零件名称 PName、零件功能

PFunctSet 和零件材料 PMaterial 4 类语义信息,以及零件形状信息 PShape。此处未考虑零件尺寸和几何特征等信息的原因在于:①尺寸和特征信息作为一种几何形状已经在零件形状中得到了体现;②尺寸对于形状表达能力较为有限,同时特征信息更多的是作为一种从功能角度出发对零件局部形状的强调,这种强调是设计者根据设计需要作出的而不是强制规定必须存在的。本章后续将在上述 5 个维度信息量化的基础上完成描述空间的构建。

形状信息表征问题已经涌现多种方法,Osada^[1]通过统计模型表面随机采样点的距离分布概率来表示模型的形状,将形状匹配问题转换为概率分布的比较问题,实验证明该类方法对三维模型旋转、平移和缩放具有鲁棒性。该方法计算简单、识别率较高,已逐渐成为三维模型检索领域较为通用的方法。因此,本书选择形状分布作为形状信息的描述方法。

通常,模型表面随机采样点的距离概率分布可以用直方图表示,每一组的频率会随着零件形状的不同而改变。因此,可提取直方图所有组的频率来构造能够描述零件形状的形状向量。设一个由 n 个零件构成的装配体模型为 a ,生成其第 i 个零件的形状向量描述符 $\mathbf{PShape}_{a,i}$ 的过程如图 3-2 所示,具体包含如下步骤:

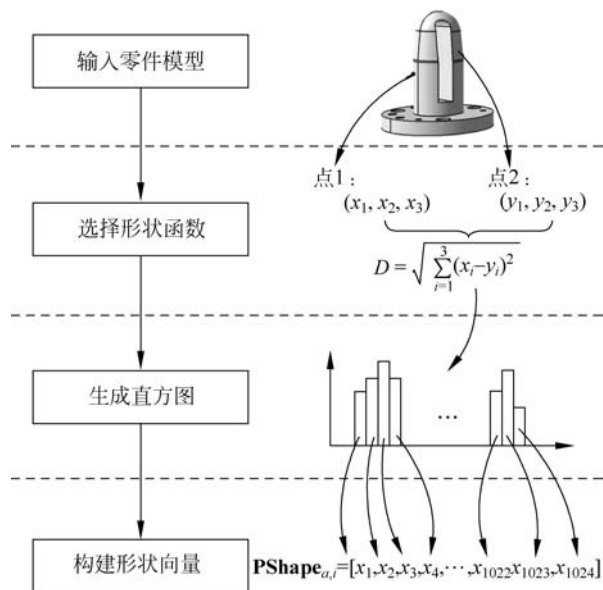


图 3-2 零件形状向量构建方法

步骤 1: 输入第 i 个零件的三维模型数据($1 \leq i \leq n$)。

步骤 2: 在零件模型表面随机采集两个点,计算两点之间的欧氏距离。形状分布的特点决定了较少的采样次数会导致模型描述的不准确。因此,上述过程应重复足够的次数以保证描述的准确性。根据已有研究^[1],此处取 1024^2 作为采样的次数。

步骤 3: 通过构建一个组数为 1024 的直方图来表示采样距离值的分布。这里采用等组距连续直方图,其组距 d 为:

$$d = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{1024} \quad (3-1)$$

式中: $D_{\max}$ 表示距离的最大值; $D_{\min}$ 表示距离的最小值。

直方图中每个组的高度为:

$$\begin{cases} h_u = \frac{N_u}{1024^2} \\ \sum_{u=1}^{1024} h_u = 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中: N_u 表示第 u 组的频数; h_u 表示落在第 u 组中的距离值的频率。

步骤 4: 由步骤 3 中的直方图生成 1024 维形状向量描述符 $\mathbf{PShape}_{a,i}$,每一维的值即直方图对应组的频率:

$$\begin{cases} \mathbf{PShape}_{a,i} = [x_1, x_2, \dots, x_{1024}] \\ x_u = h \end{cases} \quad (3-3)$$

通过以上步骤就可以得到零件形状描述向量,对于不同的零件,其直方图每组的频率不同,从而达到了对零件形状进行描述的目的。

3.1.3 装配体模型描述符构建

在装配体描述空间及零件信息描述的基础上,通过将装配体 a 中所有零件都转换为点,就可以构建描述该装配体的点集,最终构建基于离散化零件信息的装配体模型描述符,如图 3-3 所示。

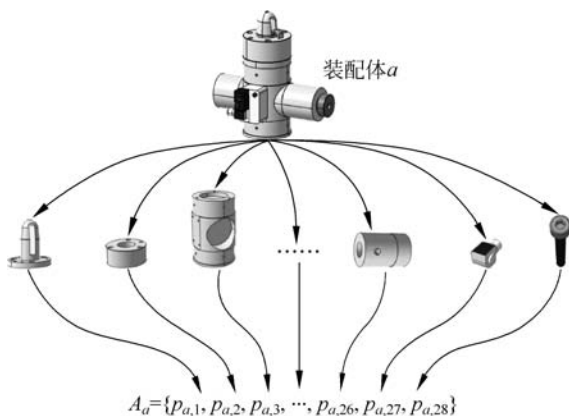


图 3-3 基于离散化零件信息的装配体描述符

对于装配体 a ,其在装配体描述空间中表示为

$$\begin{cases} A_a = \{P_{a,1}, P_{a,2}, \dots, P_{a,n}\} \\ P_{a,i} = \{PID_{a,i}, PName_{a,i}, PFuncSet_{a,i}, PMaterial_{a,i}, PShape_{a,i}\} \end{cases} \quad (3-4)$$

式中: A_a 表示描述装配体 a 的点集; n 表示装配体中包含零件的个数; $P_{a,i}$ 表示点集 A_a 中的一个点, 对应装配体 a 中的一个零件。

在本装配体模型描述方法的实际应用中, 不一定需要所有种类的信息, 例如在相同材料的装配体模型检索中, 就可以忽略零件的材料语义信息。因此可根据检索需求对 $P_{a,i}$ 内包含的各类信息进行调整, 以支持后续针对装配体的描述和检索。

3.2 基于空间点集匹配的装配体相似性分析

装配体模型最终被离散化表征为若干个由形状和语义构成的零件信息集合。形状和语义信息对零件模型的描述能力在一定程度上是相互补充的。例如, 形状不相似的两个螺栓在类型、材料和功能等方面可能是一致的。因此, 在三维模型相似性分析过程中, 综合考虑多种信息能够在一定程度上提升检索结果的准确性^[2], 本节将讨论通过融合多类零件信息的装配体相似性分析方法。

3.2.1 基于空间点距离的零件相似性计算

零件相似性计算是装配体相似性计算的基础, 在将装配体转换为描述空间中的点集之后, 零件的相似性就表现为描述零件的点之间的距离。同时, 点集匹配需要计算点之间的距离, 因此本节主要讨论空间点距离计算方法。

3.2.1.1 相似性计算流程

在零件描述时将 ID 引入描述符, 其目的是通过 ID 对点是否相同进行判断。因此, 在距离计算之前首先对点的 ID 进行判断, 若 ID 一致则说明所对应的零件相同, 两点间距离可以无需计算而直接指定为 0。这种方式避免了对相同点的距离进行计算, 能够有效提高检索效率。

除点的 ID 之外, 还需考虑名称、功能、形状和材料 4 个维度的信息, 其中形状属于形状信息, 名称、功能和材料属于语义信息。由于信息类型的不同, 需要对多类型信息的相似性进行融合, 完成零件间的综合相似性分析, 计算流程如图 3-4 所示:

步骤 1: 输入两个来自不同空间点集的点 $P_{a,t}$ 和 $P_{b,k}$;

步骤 2: 判断两个点的 ID 是否相同。若相同, 则 $P_{a,t}$ 和 $P_{b,k}$ 之间的距离 $\text{Dis}(P_{a,t}, P_{b,k}) = 0$, 转步骤 5; 否则, 转步骤 3;

步骤 3: 分别计算 $P_{a,t}$ 和 $P_{b,k}$ 之间的名称距离、功能距离、形状距离和材料距离;

步骤 4: 通过给定各个距离的权值, 计算各个距离加权后的 $P_{a,t}$ 和 $P_{b,k}$ 之间的距离 $\text{Dis}(P_{a,t}, P_{b,k})$;

步骤 5: 结束。

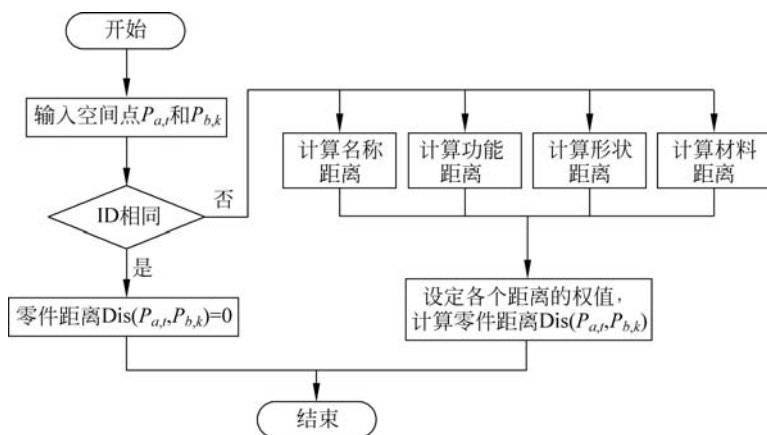


图 3-4 零件信息综合相似性计算流程

3.2.1.2 形状相似性计算

在零件信息描述中,本章最终将零件形状表征为向量形式,一般可采用余弦相似度来对两个向量的相似性进行度量。余弦相似性方法计算简单且结果可靠,可将相似性的值控制在 $-1\sim 1$,在图像检索和文本比较等方面都得到了广泛应用^[3]。

对于两个形状向量 $\mathbf{PShape}_{a,i} = [x_1, x_2, \dots, x_{1024}]$ 和 $\mathbf{PShape}_{b,j} = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_{1024}^*]$,其相似性可表示为距离 $\text{Dis}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j})$:

$$\text{Dis}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j}) = 1 - \text{Sim}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j}) \quad (3-5)$$

式中: $\text{Sim}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j})$ 表示形状向量 $\mathbf{PShape}_{a,i}$ 和 $\mathbf{PShape}_{b,j}$ 的余弦距离,其计算方法见 3.1.2 节。

由于使用的形状向量中每个元素都大于 0,计算所得的 $\text{Sim}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j})$ 结果在 $0\sim 1$ 。相应地,以式(3-5)计算形状距离也保证了结果在 $0\sim 1$:若 $\text{Dis}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j}) = 0$,则表示两个零件的形状属性完全相同;若 $\text{Dis}(\mathbf{PShape}_{a,i}, \mathbf{PShape}_{b,j}) = 1$,则表示两个零件的形状属性完全不同。

3.2.1.3 语义相似性计算

与形状信息不同,名称、功能和材料这三种语义信息需通过自然语言来表达,在实际的使用过程中,它们具体表现为“词汇”的形式,需从语义层面对彼此之间的相似性进行度量。语义相似性计算分为基于本体的计算、基于语料库的计算和基于搜索引擎的计算三类^[4],基于本体的计算是较为常用的方法。在这类方法中,对于英文语义相似性的计算,大多是基于 WordNet 进行的,而对于中文语义相似性的计算,则一般需要基于知网进行。相比于 WordNet,知网有以下两点优势:①知网使用一系列公认的基本词汇来描述复杂词汇,描述方式更符合人类实际思维,大量研究验证了知网在中文语义分析方面具有的优势,能够较好地支持中文语义分析;②知网具备良好的可扩展性,新概念的增加只需要通过知识系统描述语



图 3-5 壁板装配卡板

言(knowledge database mark-up language, KDML)对概念进行描述即可,且不需要维护概念之间的关系。

在知网中,概念可映射为一系列存在相互关系的义原,且通过 KDML 来描述。在实际使用过程中, KDML 提供了一系列规定和符号,以图 3-5 中壁板装配卡板为例,图 3-6 和表 3-1 为装配卡板中所包含各个零件的信息,各个零件可通过以“DEF=”为起始的表达式来描述,如表 3-2 所示。

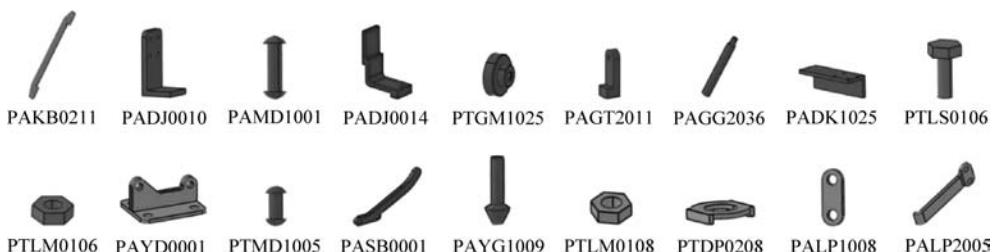


图 3-6 壁板装配卡板中的零件

表 3-1 壁板装配卡板中的零件

序号	PID	PName	数量	序号	PID	PName	数量
1	1PAKB0211	卡板	1	10	PTLM0106	螺母	8
2	PADJ0010	定位角材	6	11	PAYD0001	压紧器底座	2
3	PAMD1001	铆钉	12	12	PTMD1005	铆钉	8
4	PADJ0014	定位角材	2	13	PASB0001	手柄	2
5	PTGM1025	滚花螺母	4	14	PAYG1009	压紧杆	2
6	PAGT2011	钩形螺栓头	4	15	PTLM0108	螺母	4
7	PAGG2036	钩形螺栓杆	4	16	PTDP0208	垫片	4
8	PADK1025	定位块	2	17	PALP1008	连接片	4
9	PTLS0106	螺栓	8	18	PALP2005	连接片	4

表 3-2 壁板装配卡板 KDML 描述示例

序号	概念	KDML 描述
1	滚花螺母	DEF={nut 螺母;{knurled 滚花}}
2	定位块	DEF={locator 定位件;purpose={position 定位},modifier={FormValue 形状值;block 块}}
3	卡板	DEF={locator 定位件;purpose={position 定位;PartOfTouch={part 部件;PartPosition={skin 皮}},whole={product 产品}},modifier={FormValue 形状值;board 板}}
4	垫片	DEF={washer 垫片;purpose={spread 使分散;patient={force 力},instrument={~}}

目前基于知网的语义相似性计算研究较多,而文献[5]中提出的算法是其中具有代表性的算法,具体如下:

对于两个概念 c_1 和 c_2 ,其之间的语义相似性 $\text{Sim}(c_1, c_2)$ 为

$$\text{Sim}(c_1, c_2) = \sum_{i=1}^4 \beta_i \prod_{u=1}^i \text{Sim}_u(\text{se}_1, \text{se}_2) \quad (3-6)$$

式中: $\text{Sim}_u(\text{se}_1, \text{se}_2)$ 表示两个义原 se_1 和 se_2 之间的相似性: 当 $u=1$ 时,表示第一独立义原相似性; 当 $u=2$ 时,表示其他独立义原相似性; 当 $u=3$ 时,表示关系义原相似性; 当 $u=4$ 时,表示符号义原相似性; $\beta_i (1 \leq i \leq 4)$ 表示可调节参数,反映了 $\text{Sim}_1(\text{se}_1, \text{se}_2)$ 到 $\text{Sim}_4(\text{se}_1, \text{se}_2)$ 对于总体相似性的影响程度,其中 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1, \beta_1 \geq \beta_2 \geq \beta_3 \geq \beta_4$ 。

在式(3-7)的基础上,给出语义类信息距离 $\text{Dis}(c_1, c_2)$ 的计算方法:

$$\text{Dis}(c_1, c_2) = 1 - \text{Sim}(c_1, c_2) \quad (3-7)$$

已知语义相似性计算结果 $\text{Sim}(c_1, c_2)$ 在 $0 \sim 1$ 。相应地,以式(3-7)计算语义距离也保证了结果在 $0 \sim 1$: 若 $\text{Dis}(c_1, c_2) = 0$,表示 c_1 和 c_2 的语义属性完全相同; 若 $\text{Dis}(c_1, c_2) = 1$,表示 c_1 和 c_2 的语义属性完全不同。

3.2.1.4 零件信息综合相似性计算

经过上述的计算处理,能够将零件间名称、功能、形状和材料 4 个维度信息的相似性分别量化为可比较分析的数值形式。由于各类信息对零件综合相似性的影响程度具有一定的差异性,后续将考虑如何对不同类型信息的相似性进行融合。

在形状和语义两类信息的相似性计算方法确定以后,就可以根据空间点各个信息的具体类型获取属性的距离。对于空间中的两个 $\text{pn}_{a,t}$ 和 $\text{pn}_{b,k}$,其各个维度距离计算为

(1) 名称

名称是对零件的简要语义描述,利用式(3-8)可给出名称距离 $\text{Dis}(\text{PName}_{a,t}, \text{PName}_{b,k})$ 的计算方式:

$$\text{Dis}(\text{PName}_{a,t}, \text{PName}_{b,k}) = 1 - \text{Sim}(\text{PName}_{a,t}, \text{PName}_{b,k}) \quad (3-8)$$

(2) 材料

与名称属性计算方法一致,利用式(3-9)可给出材料距离 $\text{Dis}(\text{PMaterial}_{a,t}, \text{PMaterial}_{b,k})$ 的计算方式:

$$\text{Dis}(\text{PMaterial}_{a,t}, \text{PMaterial}_{b,k}) = 1 - \text{Sim}(\text{PMaterial}_{a,t}, \text{PMaterial}_{b,k}) \quad (3-9)$$

(3) 功能

功能是由“操作”和“对象”两部分组成的,这两部分都会对功能产生影响。在进行功能属性距离计算时,不能像名称和材料一样直接计算,而是需要将操作和对象分开考虑,分别计算操作和对象的语义相似性,将两项计算结果相乘获得功能语

义相似性:

$$\text{Sim}(\text{Pfunc}_{a,t,i}, \text{Pfunc}_{b,k,u}) = \text{Sim}(\text{POperate}_{a,t,i}, \text{POperate}_{b,k,u}) \times \text{Sim}(\text{PObject}_{a,t,i}, \text{PObject}_{b,k,u}) \quad (3-10)$$

其次,直接与零件关联的是“功能集合”(PFuncSet),也就是说一个零件实际上可能对应多个功能。相应地,在计算两个点的功能距离时,应当对所有的功能属性都加以考虑。对于本问题,采用如下策略:对两个点所包含的功能属性进行两两比较,取相似性最大的一对值作为功能属性的相似性。因此,功能相似性 $\text{Sim}(\text{PFuncSet}_{a,t}, \text{PFuncSet}_{b,k})$ 表示为

$$\begin{aligned} & \text{Sim}(\text{PFuncSet}_{a,t}, \text{PFuncSet}_{b,k}) \\ &= \max_{1 \leq i \leq n} (\max_{1 \leq u \leq m} (\text{Sim}(\text{Pfunc}_{a,t,i}, \text{Pfunc}_{b,k,u}))) \end{aligned} \quad (3-11)$$

根据以上分析,功能距离 $\text{Dis}(\text{PFuncSet}_{a,t}, \text{PFuncSet}_{b,k})$ 即

$$\text{Dis}(\text{PFuncSet}_{a,t}, \text{PFuncSet}_{b,k}) = 1 - \text{Sim}(\text{PFuncSet}_{a,t}, \text{PFuncSet}_{b,k}) \quad (3-12)$$

(4) 形状

形状是由向量描述的,利用式(3-13)可给出形状距离 $\text{Dis}(\text{PShape}_{a,t}, \text{PShape}_{b,k})$ 的计算方式:

$$\text{Dis}(\text{PShape}_{a,t}, \text{PShape}_{b,k}) = 1 - \text{Sim}(\text{PShape}_{a,t}, \text{PShape}_{b,k}) \quad (3-13)$$

通过以上步骤可获得空间点之间各个分量的距离。为了获取零件之间的相似性,还需进一步计算获得空间点之间的距离。根据 1.3.1 节,目前空间点距离的计算方法通常有曼哈顿距离和欧氏距离。有研究表明,在检索方面,曼哈顿距离相对于欧氏距离更加有效^[6-9]。因此,此处采用加权曼哈顿距离来度量两个空间点 $p_{a,t}$ 和 $p_{b,k}$ 之间的距离 $\text{Dis}(p_{a,t}, p_{b,k})$:

$$\begin{aligned} \text{Dis}(p_{a,t}, p_{b,k}) &= \omega_n \times \text{Dis}(\text{PName}_{a,t}, \text{PName}_{b,k}) + \\ & \quad \omega_u \times \text{Dis}(\text{PFuncSet}_{a,t}, \text{PFuncSet}_{b,k}) + \\ & \quad \omega_s \times \text{Dis}(\text{PShape}_{a,t}, \text{PShape}_{b,k}) + \\ & \quad \omega_m \times \text{Dis}(\text{PMaterial}_{a,t}, \text{PMaterial}_{b,k}) \end{aligned} \quad (3-14)$$

式中: $\omega_X (X=n, u, s, m)$ 表示权重系数,且满足以下条件:

$$\begin{cases} \sum_X \omega_X = 1 \\ \omega_X \geq 0 \end{cases} \quad (3-15)$$

权重系数体现了各个维度信息对于零件相似性的影响。若从距离计算的角度来看,不同的系数设置可以理解各个维度的尺度不同:在不加系数的情况下,表示默认将各个维度的距离同等对待;通过系数的调节,可以放大或缩小某一个或几个维度的作用。实际使用中,可以在满足式(3-15)的条件下通过调节各个系数改变各个属性对最终结果的影响。

由于每个距离分量都是在 $0 \sim 1$ 的,且系数满足式(3-15)的条件,可知最终计算所得的距离值 $\text{Dis}(p_{a,t}, p_{b,k})$ 也在 $0 \sim 1$: 若 $\text{Dis}(p_{a,t}, p_{b,k}) = 0$, 表示 $p_{a,t}$ 和 $p_{b,k}$ 完全相同; 若 $\text{Dis}(p_{a,t}, p_{b,k}) = 1$, 表示 $p_{a,t}$ 和 $p_{b,k}$ 完全不同。

3.2.2 基于多对多匹配的装配体相似性计算

装配体包含的零件数量不同,相对应的点集规模也不同。为了实现装配体相似性计算,目前的多对多匹配算法具有较好的适用性,包括豪斯多夫距离(Hausdorff distance, HD)、向量空间模型(vector space model, VSM)算法和搬土距离(the earth movers distance, EMD)等。这类算法的计算过程不要求两个进行匹配的集合大小相同,也就是说对相比较的两个集合所包含的元素数量没有要求,因此能够保证集合元素变动情况下装配体相似性分析的顺利进行。

与其他多对多匹配算法相比,EMD 算法通过线性规划的方式一次就能够得到点集最优的匹配,保证每个零件都参与到装配体相似性的计算中,能够对装配体的零件进行综合考虑。基于 EMD 算法的装配体匹配过程如图 3-7 所示,首先依据 3.1 节所述的方法将两个装配体转换为描述空间中的两个点集,然后以点集为对象通过 EMD 即可获得两个装配体的相似性,下面详述计算过程。

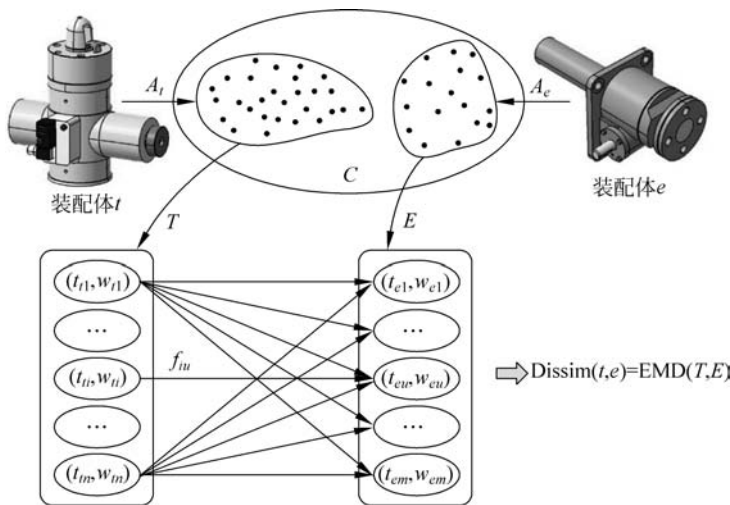


图 3-7 基于 EMD 的装配体相似性计算

设两个装配体 t 和装配体 e , 其对应的空间点集分别为 $A_t = \{p_{t,1}, p_{t,2}, \dots, p_{t,n}\}$ 和 $A_e = \{p_{e,1}, p_{e,2}, \dots, p_{e,m}\}$, 构建对应的集合 T 和 E :

$$\begin{cases} T = \{(t_1, w_{t1}), (t_2, w_{t2}), \dots, (t_n, w_{tn})\} \\ E = \{(e_1, w_{e1}), (e_2, w_{e2}), \dots, (e_m, w_{em})\} \end{cases} \quad (3-16)$$

式中: n 表示 T 中元素的个数; $t_{ti} (1 \leq i \leq n)$ 表示 T 中第 i 个点的位置; $w_{ti} (1 \leq i \leq n)$ 表示 T 中第 i 个点的质量; m 表示 E 中元素的个数; $t_{ej} (1 \leq j \leq m)$ 表示 E

中第 j 个点的位置; $w_{ej} (1 \leq j \leq m)$ 表示 E 中第 j 个点的质量。

在 EMD 中, 匹配问题最终会转换为运输问题, 因此点的质量是重要的影响因素, 即 $w_{ti} (1 \leq i \leq n)$ 和 $w_{ej} (1 \leq j \leq m)$ 必须得到合适的定义。实际上, 在构建装配体描述空间时考虑了各类有用信息, 也就是说, 利用点的位置差异已经能够区分不同的零件, 而点之间的距离也可以度量零件之间不相似的程度。

针对装配体检索来说, 一方面没有合适的信息来标定点的质量; 另一方面, 若进一步通过点的质量对点进行区分, 在计算点的相似性时很难判断是点的位置还是质量对相似性产生了影响, 或者两者之间哪一项对相似性的影响较大。基于以上考虑, 本章不再从质量上对点进行区分, 而是将所有点的质量统一对待, 即

$$w_{ti} = w_{ej} = 1 (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m) \quad (3-17)$$

通过以上步骤, 结合 3.2.1 节计算所得的零件信息综合相似性, 就可以得到最终的计算结果。求解的过程实际上是线性规划问题的求解, 利用单纯形法等方法可以很容易地获得最终结果, 本书不再详细展开。由于 EMD 实际上计算的是不匹配的程度, 获得的实际上是装配体之间的“不相似性”, 对于装配体 t 和 e 它们之间的不相似性为 $\text{Dissim}(T, E)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Dissim}(t, e) = \min \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} f_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij}} \\ f_{ij} \geq 0 \\ \sum_{j=1}^m f_{ij} \leq w_{ti} \\ \sum_{i=1}^n f_{ij} \leq w_{ej} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} = \min \left(\sum_{i=1}^n w_{ti}, \sum_{j=1}^m w_{ej} \right) \\ 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m \end{array} \right. \quad (3-18)$$

式中: d_{ij} 表示 t_{ti} 和 t_{ej} 之间的距离; f_{ij} 表示 t_{ti} 和 t_{ej} 之间的质量流; $f_{ij} \geq 0$ 表示保证了质量从 T 移动到 E , 而不能反向移动; $\sum_{j=1}^m f_{ij} \leq w_{ti}$ 表示保证了移出的质量不大于 T 已有的质量; $\sum_{i=1}^n f_{ij} \leq w_{ej}$ 表示保证了移入的质量不大于 E 可接受的质量; $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} = \min \left(\sum_{i=1}^n w_{ti}, \sum_{j=1}^m w_{ej} \right)$ 表示保证了尽可能多的移动次数。

虽然这里计算的是不相似性,但与计算相似性具有同样的效果,即不相似性越小,两个装配体越相似。同时,相对于不相似性的值,更重要的是不相似性的相对顺序。计算结束后,只需要将不相似性按照升序排列就可以得到检索结果,且最小值对应的装配体即查询最相似的装配体。

3.3 装配体模型的局部检索

从本质上分析,装配体检索是指工程人员从装配体构成的模型资源库中获得想要的信息,而并未要求检索输入必须为装配体。在实际应用中,工程人员依据零件搜索已有装配体模型的情况大量存在,而输入零件的数量具有不确定性。本章重点面向以下两种情况。

(1) 检索输入为一个零件

显然,输入一个零件作为查询会将“多对多匹配”变成了“一对多匹配”。通过对 EMD 算法进行分析可以发现,EMD 是为多对多匹配而设计的,但它对集合中元素的个数并没有要求,也就是说,EMD 中的“多”可以为“一”。因此,基于离散化零件信息的装配体检索方法在这种情况下可以直接使用。

(2) 检索输入为多个零件

在实际应用中,有时工程人员需要获取多个零件在以往设计方案中的使用情况,此时的零件组合不是具有连接关系的组件,而是离散存在的零件个体组合。此时,基于离散化零件信息的装配体检索方法依然适用于这种情况,原因在于:①本方法将装配体作为离散零件的集合,对装配体和零件的描述都不涉及零件之间的关系;②这种情况下的装配体相似性度量仍然是“多对多匹配”问题,已有的计算方法仍然适用。

以上分析表明,本章所提的装配体检索方法具有一定的柔性。输入可表示为包含 $r(r \geq 1)$ 个零件的零件集合 t' ,则其相应的点集和集合为 $A_{t'} = \{p_{t',1}, \dots, p_{t',r}\}$ 和 $T' = \{(t'_{i1}, w_{t'_{i1}}), \dots, (t'_{in}, w_{t'_{in}})\}$ 。通过式(3-18)就可以获得 t' 与装配体 e 两者之间的不相似程度 $\text{Dissim}(t', e)$,而通过 $\text{Dissim}(t', e)$ 可以知道输入的零件是否包含在检索所得的装配体中,且存在以下两种情况:

(1) 若 $\text{Dissim}(t', e) = 0$, 则 t' 中的零件都包含在装配体 e 中

根据零件描述方法,代表两个相同零件的点会在描述空间中占据同一个位置,则两者之间的距离为 0。根据 EMD 计算方法,两个点之间距离为 0 表示两点之间不存在质量流动,则最终计算结果必将为 0。因此, $\text{Dissim}(t', e) = 0$ 表示了输入零件集合中的每一个零件,都能够在所得装配体中找到同样的零件,也就是说输入的零件包含在所得的装配体中。

(2) 若 $\text{Dissim}(t', e) \neq 0$, 则 t' 中存在零件不包含在装配体 e 中

由 EMD 可知,若两个相匹配的点之间距离不为 0,则最终计算结果必将不为

0。因此,对于 t' 中的任意一个零件,若无法在装配体找到相同的零件,则必定会导致结果不为0。而 $\text{Dissim}(t',e) \neq 0$ 时又存在两种情况:① t' 中有部分零件包含在所得装配体中;② t' 中所有零件都不包含在所得装配体中。仅从计算结果无法判断属于上述哪一种情况,在当前情况下,只有通过进一步的人工判断才能获取更加精确的结果。

最后,对装配体柔性检索的分析表明本方法同样适用于零件检索:若式(3-18)中 $n=m=1$,则装配体 t 和装配体 e 都变成了零件,同时装配体检索也相应地变成了零件检索。在此过程中检索方法可以无须做出改变而直接使用,因此这也是本方法的优势所在。

3.4 实例分析

为了验证上述装配体检索算法,本书构建了装配体模型库。模型库共包含502个装配体,由6812个零件构成,可将其分为10大类,部分装配体如图3-8所示。在该模型库的基础上,分别进行了整体检索实验和局部检索实验。



图 3-8 实例分析所使用的部分装配体

3.4.1 整体检索实例

在整体检索过程中,输入和输出都为独立装配体。本章在模型库中选择支架、螺旋传动器、控制器、锁紧器、阀门和模座六组模型开展实验。检索结果按照升序排列并且给出了其中8个顺序靠前的装配体和它们各自对应的不相似度的值,实验结果如图3-9所示。从检索结果可以看出,支架、控制器、阀门和模座都有很好的检索效果,检索所得的都是相似的装配体,即准确率达到了100%。相比较而言,图3-9显示了在螺旋传动器的检索结果中存在2个不理想的结果,而在锁紧器的检索结果中存在3个不理想的结果,即两者的准确率分别为75%和62.5%。

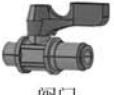
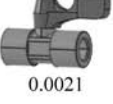
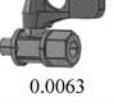
 支架 (a)	 0.0166  0.0211	 0.0175  0.0234	 0.0200  0.0238	 0.0207  0.0251
 螺旋传动器 (b)	 0.0210  0.0238	 0.0216  0.0240	 0.0220  0.0242	 0.0231  0.0243
 控制器 (c)	 0.0025  0.0155	 0.0069  0.0196	 0.0078  0.0228	 0.0093  0.0236
 锁紧器 (d)	 0.0145  0.0198	 0.0170  0.0216	 0.0187  0.0217	 0.0189  0.0220
 阀门 (e)	 0.0014  0.0048	 0.0021  0.0056	 0.0042  0.0063	 0.0044  0.0143
 模座 (f)	 0.0014  0.0068	 0.0016  0.0101	 0.0022  0.0108	 0.0048  0.0113

图 3-9 装配体检索实例

为了更好地对装配体检索方法的效果进行验证,给出了图 3-9 中的 6 个输入装配体的查全查准曲线,如图 3-10 所示。其中,查全率是指从模型库内检出的相关的模型与模型总量的比率,查准率是指检出的相关模型与检出的全部模型的百分比。所有曲线在一开始都接近水平,且准确率为 1。螺旋传动器曲线从查全率为 0.3 附近开始下降,在经历了两次短暂的上升之后继续下降,最终在查全率达到 1 时停留在准确率为 0.64 处。锁紧器和阀门对应的曲线有类似的趋势,在查全率达到 1 时分别停留在准确率为 0.625 和 0.68 处。相比较而言,支架、控制器和模座的曲线一直保持水平,在查全率为 1 时仍然能够保证准确率为 1。

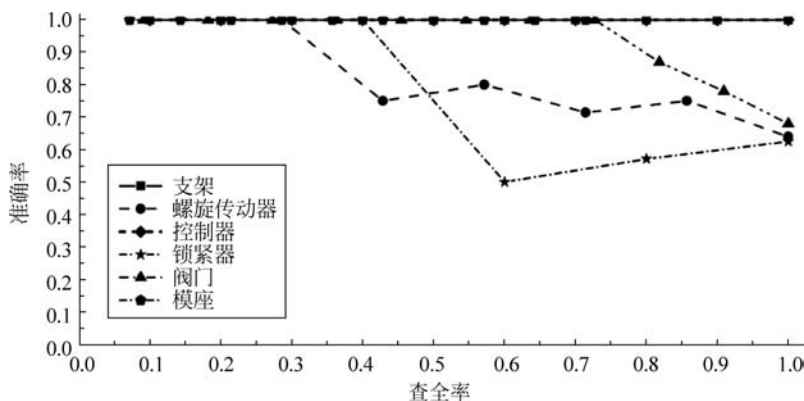


图 3-10 查全查准曲线

3.4.2 局部检索实例

在局部检索过程中,输入为组成装配体的某些零件,输出为独立装配体,局部检索结果如图 3-11 所示。其中,左侧一列是输入零件,右侧一列是检索结果。在检索结果中,不仅给出了检索所得的装配体和与之对应的不相似性的值,而且给出了装配体中与输入零件相匹配的零件。按照分析的两种局部检索情况,a 组实验选择某一个锁紧器中的销作为输入进行查询。检索结果显示,包含这个销的锁紧器排在第一,且准确率为 1,其他装配体的匹配零件则是与输入零件相似的销。在 b 组实验中,添加了其他 3 个零件作为输入,且 4 个零件都来自不同的装配体。结果显示这样的检索方式同样可以获得相关的装配体。进一步地,在 c 组实验中将 b 组中 4 个输入零件中的两个进行了替换,同时保证这 4 个零件来自不同的装配体,这样仍然能够得到与 b 组类似的结果。3 组不同的实验说明,装配体检索方法可以用于局部检索,并且能够得到很好的结果。

图 3-11 的结果在验证局部检索方法可行性的同时,还具有以下两个特点:

(1) 在增加输入零件后不相似性的值会显著增大。

在 a 组中最大的不相似性值为 0.0025,而 b 组中最小的不相似性值已经达到了 0.0039,输入更多的零件意味着更多的零件会参与到匹配中。例如,a 组中的装

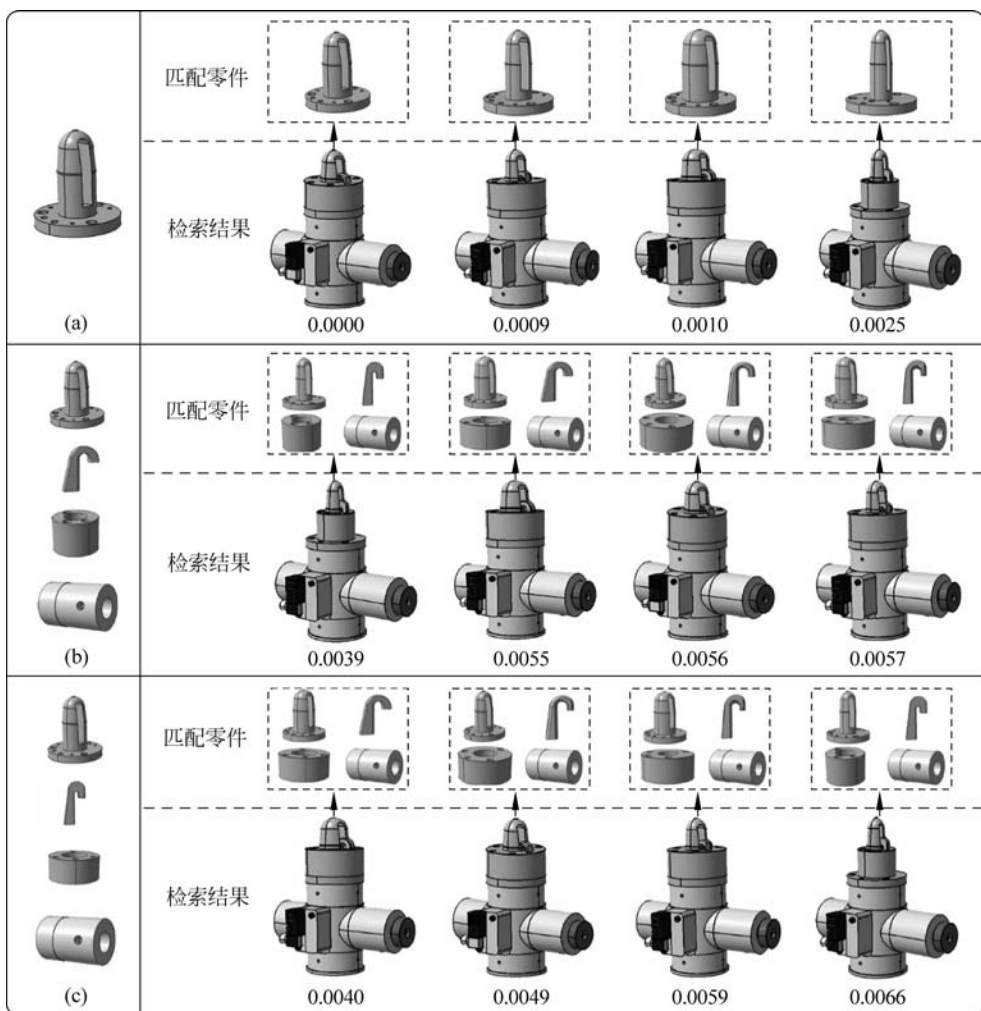


图 3-11 装配体局部检索

配体只有一个零件与输入进行匹配,而 b 组中的装配体则会有 4 个零件与输入进行匹配。根据 EMD 的计算方法,最终结果是综合每对匹配零件的不相似程度得到的,而更多的输入零件必定会导致更大的不相似性。

(2) 输入不同零件会导致检索所得装配体的顺序变化。

b 组和 c 组都是输入 4 个同类型的零件,而检索所得的装配体顺序发生了变化。检索方法实际上是在对所有零件进行综合考虑的基础上得到的最优化的匹配方案,根据匹配方案获得最终的不相似的程度。输入不同的零件会产生不同的匹配方案,而不相似性也会随之变化,带来的则是所得装配体顺序的变化。实验结果说明了检索方法在获得匹配方案的过程中对所有零件进行了综合考虑,可以保证获得的检索结果是较好的。

3.4.3 检索时间分析

检索时间是评价检索方法的一个重要指标,一个好的检索方法应该能够在较短的时间内得到检索结果。检索时间实验选择了 12 个装配体,分别包含 5,6,13,17,19,22,27,30,34,38,40,46 个零件。以这些装配体作为检索的输入,记录获得检索结果的时间。为了保证结果的准确性,每个装配体的检索时间都是运行 100 次的平均时间,结果如图 3-12 所示。

结果表明,检索时间会随着输入装配体包含零件个数的增加而增加,且最长时间(9.66s)超过了最短时间的(1.01s)的 9 倍。同时,图 3-12 所示的时间增长趋势是非线性的,随着输入装配体包含零件个数的增加,时间的增长速度会加快,这与 EMD 算法的时间复杂度相符^[10]。检索所需要的时间由两部分构成,一部分用来计算空间点之间的距离,另一部分用来求解线性规划。其中,零件个数的增加会导致零件信息综合相似性计算的时间增加,而这种时间增加是有限的;通过单纯形法求解线性规划,在一定范围内求解时间确实会呈非线性增长,但单纯形法作为一种有效的线性规划求解方法,在一般情况下的时间复杂度达不到指数级别。

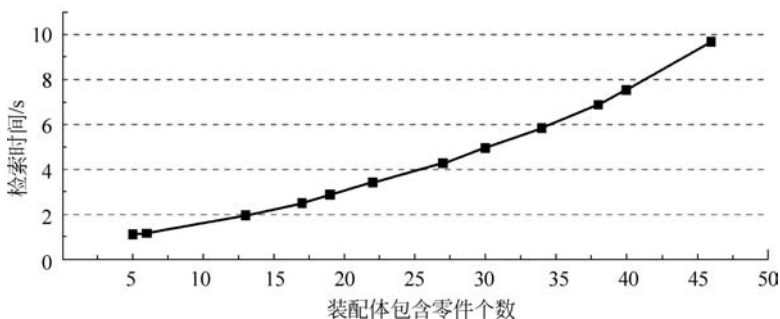


图 3-12 检索时间

参考文献

- [1] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.
- [2] BU S, WANG L, HAN P, et al. 3D shape recognition and retrieval based on multi-modality deep learning[J]. Neurocomputing, 2017, 259.
- [3] YE J. Cosine similarity measures for intuitionistic fuzzy sets and their applications[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2011, 53(1-2): 91-97.
- [4] 郭勇. 基于《知网》的词语相似性计算研究及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [5] 张硕望, 欧阳纯萍, 阳小华, 等. 融合《知网》和搜索引擎的词汇语义相似度计算[J]. 计算机应用, 2017, 37(4): 1056-1060.
- [6] LING H, OKADA K. An efficient earth mover's distance algorithm for robust histogram

- comparison[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2007, 29(5): 840-853.
- [7] FREEMAN W T, PASZTOR E C, CARMICHAEL O T. Learning low-level vision[J]. International journal of computer vision, 2000, 40(1): 25-47.
- [8] TONES D G, MALIK J. A computational framework for determining stereo correspondence from a set of linear spatial filters[M]. Berlin: Springer, 1992.
- [9] DARABIHA A, ROSE J, MACLEAN J W. Video-rate stereo depth measurement on programmable hardware[C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2003.
- [10] RUBNER Y, TOMASI C, GUIBAS L J. The earth mover's distance as a metric for image retrieval[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(2): 99-121.