



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401909

引用格式:付雷杰,王建伟,白瑀,等.定制化机械产品设计中二次开发技术的应用现状及其展望[J].科学技术与工程,2025,25(7):2637-2653.

Fu Leijie, Wang Jianwei, Bai Yu, et al. Application status and prospect of secondary development technology in customized mechanical product design[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 2637-2653.

机械、仪表工业

定制化机械产品设计中二次开发技术的应用现状及其展望

付雷杰¹, 王建伟¹, 白瑀¹, 姚慧¹, 左鹏军², 曹岩³

(1. 西安工业大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 陕西省机械研究院, 西安 712000;
3. 西安工业大学计算机科学与工程学院, 西安 710021)

摘要 设计周期是影响定制化机械产品开发的关键因素之一,应用二次开发技术是提高定制化产品开发效率的有效方法。为使二次开发技术更好地在定制化机械产品设计平台开发应用中高质量发展,在分析定制化产品生产发展历程与基于参数化设计的定制化产品设计方法的基础上,简要介绍二次开发关键技术研究进展。从不同角度分析了定制化机械产品设计中二次开发技术的研究与应用现状,总结存在的问题。最后,结合人工智能、协同设计、云技术、数字孪生等技术,对未来二次开发技术发展趋势进行了展望,并阐述国产化开发平台的重要性,为定制化机械产品设计中二次开发技术的应用与进一步发展提供参考。

关键词 定制化机械产品; 二次开发; 参数化设计; 技术集成

中图分类号 TH122; **文献标志码** A

Application Status and Prospect of Secondary Development Technology in Customized Mechanical Product Design

FU Lei-jie¹, WANG Jian-wei¹, BAI Yu¹, YAO Hui¹, ZUO Peng-jun², CAO Yan³

(1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
2. Shaanxi Machinery Research Institute, Xi'an 712000, China;
3. School of Computer Science and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

[Abstract] Design cycle is one of the key factors that influence the development of customized mechanical products (CMP). Secondary development technology (SDT) is an effective method to enhance the efficiency of CMP. To better promote high-quality development of SDT in CMP applications, first, key technological advancements in SDT were briefly introduced based on the analyzes of the evolution of customized product production and the parameterized design methods. Then, research and application status of SDT in CMP design was analyzed from different perspectives, and existing problems are summarized. Finally, the future trends of SDT were explored in conjunction with modern information technologies, such as artificial intelligence (AI), collaborative design (CD), cloud technology (CT), and digital twins (DT), and the importance of domestic development platforms was emphasized. The results provides a reference for the application and further development of SDT in CMP.

[Keywords] customized mechanical products; secondary development; parametric design; technology integration

在“中国制造2025”——智造强国的引领下,实现产品的大规模个性化定制是智能制造的主要内容和重要目标之一^[1]。市场需求日益多样化、个性化,仅靠单一或系列产品已无法适应激烈的市场竞争,

这就要求企业的产品尽可能满足用户个性化定制需求^[2]。以用户个性化需求为导向的产品设计,要求生产企业使用合理的生产资源实现产品定制化设计与制造,产品设计周期影响的市场响应速

收稿日期: 2024-03-18 修订日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(52275508); 陕西省重点研发计划(2023-YBGY-097); 陕西省创新能力支撑计划(2022PT-02); 西安市科技计划(23GXFW0031)

第一作者: 付雷杰(1982—),男,汉族,山东滨州人,博士,讲师,硕士研究生导师。研究方向:制造业信息化、知识工程。E-mail: fuleijie@xatu.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

度,为提高企业效益,如何提高定制化产品设计效率成为关键^[3-4]。

面对用户的个性化定制需求时,结构相似或组成模块相同的产品在其设计过程中存在工作重复的问题^[5]。支持个性化定制的设计方面的关键技术,以用户个性化需求分析出发,利用高效的设计方法形成个性化方案,最后依据产品性能参数调整方案^[6-7]。基于计算机辅助设计(computer aided design, CAD)平台的二次开发技术可以在定制化设计中提高设计效率、改善设计流程合理性和产品性能,其在机械工业、建筑工程、汽车工业、航空航天^[8-12]等领域的定制化机械产品设计中具有广泛的应用。二次开发技术在定制化机械产品设计中应用的目的是根据定制化机械产品中具有尺寸驱动相同、零部件结构相似、设计流程固定等特点,将设计流程进行分析并用程序语言将其表示,实现基于CAD平台的计算机辅助设计系统的定制化开发^[13]。目前,研究较多为结构简单、尺寸驱动单一的机械零件,针对结构组成较为复杂的机械产品,还存在驱动参数过多、求解工作量较大、设计结果准确性和完整度低、平台集成度和智能化不高、在产品的全生命周期应用受到一定局限等问题^[14-17]。

鉴于此,对目前定制化产品设计中二次开发技术进行综述,分别阐述定制化产品生产模式的发展和基于参数化设计的定制化产品设计流程,二次开发技术的关键技术以及定制化机械产品设计中二次开发技术应用现状;并总结现有应用中存在问题,最后结合先进技术对二次开发技术在未来定制化机械产品设计的发展趋势进行展望。

1 定制化产品设计概述

1.1 定制化产品生产发展历程

定制化的发展从传统的定制生产发展到当代的大规模个性化定制生产共经历了如图1所示的5个阶段。

(1)手工定制化生产以手工生产为主,在这时期生产者按照用户的需求单件生产,即使批量制作,也会因为手工制作的原因,大部分产品具有差异性,对于用户需求的满足度较高,但其生产效率较低,成本较高,产品的数量和种类也相对较少。

(2)大批量生产时期逐渐由手工生产向机器生产过渡,随着工业革命的发展,机器生产提高了效率,降低了成本,丰富了商品的种类和数量,但批量生产的方式使产品依据型号进行分类,用户依据产品型号满足需求,产品的定制化程度较低,无法满足用户的个性化需求。

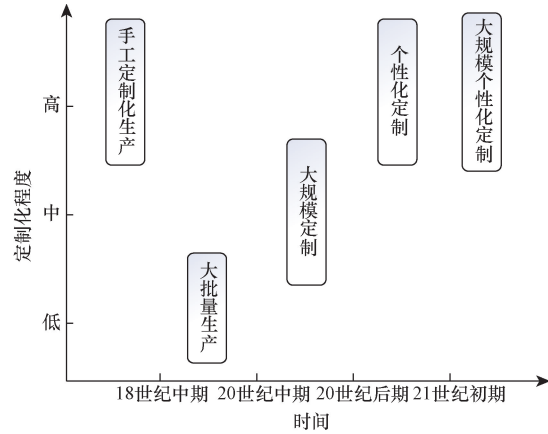


图1 定制化生产发展历程

Fig. 1 The evolution of customized production

(3)大规模定制时期随着产品品种的多样化和定制化急剧增加,为以更低成本进行定制化生产,此阶段以柔性生产技术为支撑,能够实现一定程度上的产品定制,它在一定程度上提高了定制生产效率,降低了定制产品价格,丰富了产品的种类和数量,但其本质是部件的批量生产和个性化装配,产品的个性化程度较低,不能真正满足用户的个性化需求^[18]。

(4)个性化定制时期随着用户需求的升级、生产制造等技术的进步使产品定制向更高层次的方向发展,先进设计与制造技术的发展使用户需求的产品摆脱固定型号的限制,个性化的产品生产成本适中,个性化定制可以真正满足用户的个性化的多样需求,用户在设计过程参与度较高,可以根据需求介入产品设计的过程,产品定制化程度也相对较高^[19]。

(5)大规模个性化定制为5种智能制造新模式之一^[20],其以满足客户高度个性化需求为目标,通过开放式设计平台实现客户深度参与产品价值共创,并利用韧性制造系统生产效率成本和客户满意度俱佳的个性化产品^[21]。大规模个性化定制主要依赖客户需求识别技术、产品设计技术与产品制造技术等三类关键技术。

综上所述,随着客户个性化需求多样化、市场竞争激烈化、设计与制造技术先进化,产品的个性化定制需求增多,企业的市场响应速度也需随之增加,大规模个性化定制的生产模式逐渐成为制造企业竞争的主赛道^[22-23]。大规模个性化定制的关键技术主要包括用户需求识别、产品设计技术、产品制造技术,下面主要从产品设计技术角度分析在设计过程中的二次开发技术的应用。

1.2 基于参数化的定制化产品设计流程

大规模个性化定制的方法和技术以减少产品内部多样化、增加产品外部多样化为目标,建立在相似性原理、重用性原理和全局性原理等基本原理的基础

上;参数化设计在设计结构相似、尺寸不同,设计过程中具有重复性特点的机械产品具有提高设计效率与设计质量的优势^[24]。通过上述分析,参数化设计与大规模定制化的原理具有共同点,在产品设计中将二者结合,运用二次开发技术开发出大规模个性化定制化的 CAD 设计平台可以加快大规模个性化定制的设计效率^[25],如图 2 所示为基于参数化的定制化产品设计流程。

将参数化设计与二次开发技术结合应用于个性化产品定制设计的 CAD 平台开发中对大规模个性化定制的实现具有积极的推动作用,其可以减少定制化产品设计中的重复性工作,加快定制化产品的设计效率,更好地实现客户的个性化定制需求。因此,有必要对定制化机械产品设计中二次开发技术应用现状进行综述,通过分析其应用现状,找出不足之处,并对其未来发展方向进行展望,使二次开发技术在定制化机械产品的设计平台开发中发挥更好的作用。

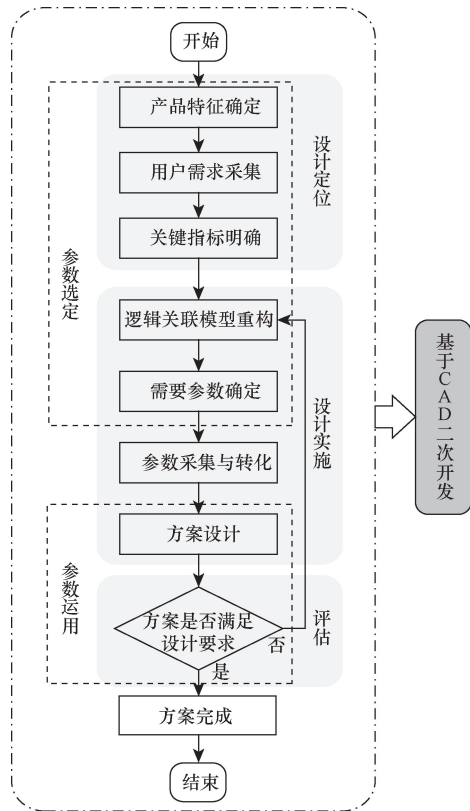


图 2 基于参数化设计的定制化产品设计流程
Fig. 2 Customized product design process based on parameterization design

2 二次开发技术概述

二次开发是以交互式图形系统为主要支撑,以图形系统的用户语言为设计进程的控制者,以高级语言为系统连接及数据库转换的枢纽,开发一个集

参数化设计零件、交互式图形编辑、数据的系统管理为一体的定制化 CAD 系统^[26]。以下主要对二次开发一般方法与关键技术进行介绍。

2.1 二次开发的一般方法

定制化机械产品设计中二次开发技术的主要目的之一是参数化设计与建模功能的实现^[27]。参数化设计与建模的几何信息等属性通过约束表示出来,还保留了拓扑结构、设计知识等信息^[28]。表 1 所示为参数化设计系统开发技术对比。

参数化设计的主要特点是全尺寸约束、全数据相关以及尺寸驱动,因此二次开发技术适用于定制化机械产品设计的 CAD 系统开发^[29]。基于众多学者与企业开发的经验和工程化原则,归纳出二次开发的一般流程如图 3 所示,合理的技术路线将为开发工作带来极大便利。

表 1 参数化设计系统开发技术对比
Table 1 Comparative analysis of parametric design system development techniques

开发技术名称	特点	开发人员要求
专用参数化设计软件开发	开发工作量较大,编程复杂	丰富的软件设计与开发基础
基于 CAD 软件二次开发	工作量少、开发难度较小	掌握二次开发技术基础

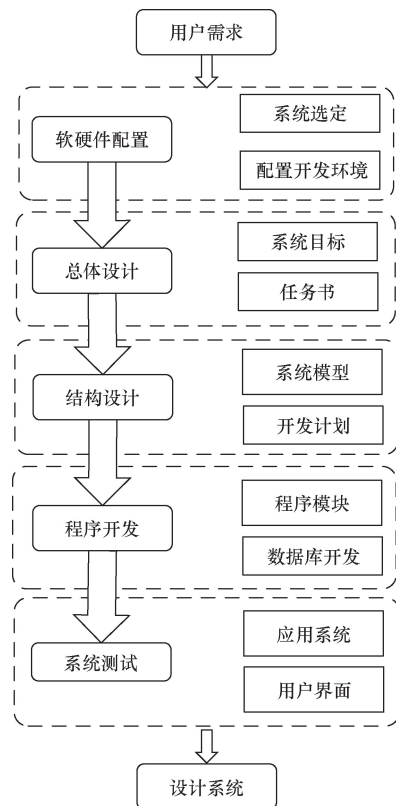


图 3 二次开发一般流程
Fig. 3 General flow of secondary development

2.2 二次开发平台与工具

基于 CAD 软件平台的二次开发目的是设计一个插件工具或软件系统来辅助工程设计人员进行设计,二次开发是基于参数化设计在已有的 CAD 软件平台进行开发,开发平台是二次开发技术的基础,开发工具是二次开发的主要手段^[30]。以下主要从国内外开发平台与工具进行比较并分析国内外 CAD 软件差距的原因。

2.2.1 二次开发平台

三维 CAD 平台在中国制造业的市场份额大多被国外中高端软件占有,其主要原因之一是中国没有先进的几何建模引擎,国外先进的几何建模内核开发时间早,经过更新迭代,性能内不断提升,现已具备高效且精确的计算能力和极为稳定的性能表现^[31-32],如 CGM、Parasolid、ACIS^[33-34]。而中国尚未

掌握几何建模内核的核心技术。国产三维 CAD 软件大多数是基于国外的几何内核研发的,如中望 Overdrive、山大华天 CRUX IV 等。具有中国自主知识产权的几何内核较少,且无法应用于其他 CAD 软件,如华天软件 DGM,其性能及稳定性与国外先进的核心组件存在较大差距,并且国产三维 CAD 软件应用程序接口(application program interface, API)不丰富并且还存在兼容度低等问题,如表 2 所示,国产 CAD 软件与国外 CAD 软件间还存在性能上的差距,开源 CAD 软件开发较少且功能单一^[35],配套软件匮乏,所以基于 CAD 软件进行二次开发的开发平台大多选用国外三维 CAD 软件,其中占比较大的有 SOLIDWORKS、UG、CATIA、Pro/E 等。

相较而言,国外三维 CAD 软件具有配套软件可为客户提供设计、仿真、制造全流程解决方案,而国产

表 2 国内外部分三维 CAD 软件特点对比

Table 2 Comparison of the characteristics of some domestic and foreign 3D CAD software

应用	特点	公司	名称	名称	公司	特点	应用
开源				Blender 	NeoGeo (荷兰)	内置了变形修改器、自动展 UV 算法、贴图绘制功能	建模、装配、动画、渲染、
				OpenSCAD 	Clifford Wolf	非交互式的命令式建模、适用于简单建模	机械设计等
				FreeCAD 	Matra Datavision (法国)	参数化建模、实现复杂模型建立、免费且开源、简单操作、支持有限单元法	建筑项目、机械工程、电气工程等
中国				外国			
机械设计 工业设计 航空航天	强大的建模功能,支持多种建模技术,如实体、曲面等	中望龙腾	中望 CAD ZWSOFT 中望软件	SOLIDWORKS 	Dassault Systemes (法国)	易学易用;强大的装配良好的文件兼容性;简单曲面建模	机械、自动化设计等
建筑设计 土木工程 制造业	提供 2D、3D 建模、绘图、分析等功能	浩辰软件	浩辰 CAD 	UG(NX) CrownCAD 	Siemens (德国)	可优化复杂的几何体;提供丰富的工具进一步操作模型	汽车、航空航天、机械、电子设计等
机械制造 汽车制造 船舶设计	高效的装配设计工具,支持自动约束和关系调整	山大华天	OstarCAD SINOVA -TION 	CATIA V5 NANOCAD 	Dassault Systemes (法国)	具有协同设计可视化、复杂智能系统建模和分布式系统开发	汽车、工程、电力、机械、航空航天等
建筑设计 电气工程 智能制造	高效的装配设计工具,支持自动约束和关系调整	数码大方	CAXA 3D 	Creo Omnific3D 	PTC (美国)	强大的参数化设计能力、装配方式;零件设计、曲面设计功能较强、响应速度快	航空航天、汽车、模具设计、能源、机械等
工业设计 产品开发 动画影视	强大的建模和渲染功能,适用于复杂产品设计	华云华天	CrownCAD SINOVIATION 	NANOCAD RhinoCeros 	Nanosoft (俄罗斯)	对企业或个人免费使用、数据互换方便、应用程序接口丰富	机械、汽车、建筑、室内设计、能源等
创意设计 艺术广告	强大渲染功能,适用于复杂产品设计	令算软件	Omnific3D CATIA 	Rhino Onshape 	McNeel (美国)	曲面建模功能流程兼容性好;使用成本较低;插件功能丰富	三维制作、机械、工业设计等
机械制造 航空航天	强大的建模、适于复杂产品设计	杭州新迪	新迪 3D CAXA 数码大方 	ouyabbe 	PTC (美国)	任意设备浏览器可使用、具有较强的云功能,可实现协同设计	产品造型、机械、模具设计等

三维 CAD 软件缺乏核心技术,研发起步晚,软件研发缺乏持续创新升级的内在驱动力,配套软件尚未发展成熟,缺乏复杂领域竞争力,性能差距与市场占有率先是影响二次开发选择 CAD 平台的关键因素^[36]。因此,中国研究二次开发的平台基本是国外三维 CAD 软件,缺乏一定的自主知识产权,需依托现有先进技术发展国产化的高端工业软件。

2.2.2 二次开发工具

二次开发工具作为进行定制化机械产品 CAD 系统开发的核心工具,国外三维 CAD 软件已实现个性化发展,以达索 CATIA 与西门子 NX(UG)为代表的高端

三维 CAD 软件和达索 SOLIDWORKS 为代表的中端三维 CAD 软件提供了丰富的二次开发工具,以 SINOVA-TION 和 CAXA 为代表的国产三维 CAD 软件提供了较为丰富的二次开发工具,其技术特点对比如表 3 所示。

3 二次开发技术应用现状

通过上述分析,二次开发技术作为定制化机械产品 CAD 系统开发的主要方法之一,分析其应用现状有助于了解最新应用前沿,总结现在存在的问题,寻找突破方向。二次开发技术应用于定制化机械产品设计中的研究历程如图 4 所示,从技术发展、

表 3 部分 CAD 二次开发工具技术特点对比

Table 3 Technical characteristics of some CAD secondary development tools

CAD 软件	二次开发工具	技术特点
CATIA	交互式定制方法 (automation API)	由一个应用通过程序接口操作另一个应用,间接地利用对象的方法和属性获取、设置及处理数据,支持自定义功能特性
	组件应用架构 (component application architecture, CAA)	面向对象的软件开发框架,通过提供的快速应用研发环境 (rapid application development environment, RADE) 和 API 完成,编译是通过多工作区应用编译器 (mkmk) 命令处理
	用户定义特征方法 (interactive user defined feature, IUDF)	面向对象设计、定制和自动化特定设计任务的功能,代码可复用,采用组件化开发思路,交互、开放、集成性良好
UG(NX)	UG /Open Grip	系统内嵌语言,通过编写脚本和应用程序对软件进行功能调用,编写的程序经专用的语言编辑器编译、链接生成可执行文件,程序架构复杂,不适用于复杂的二次开发编程
	UG/Open API	与外部程序的通用接口可以扩展和自定义软件功能,支持 Grip 灵活调用,兼容性强,便于客户通过编程语言进行专业个性化定制
SOLIDWORKS	SOLIDWORKS API	使用 API 对软件功能进行定制修改、功能扩展,建立用户订制版模块。具有集成性、拓展性以及兼容性
	宏工具	可编程的自动化工具,记录用户的操作过程,生成由 VBA 编写的宏代码,允许自行编写、自动扫描错误,可以进行组合和集成
SINOVA-TION	应用开发工具包 (accessory development kit, ADK)	包含了二次开发所需的 API,利用 ADK 可以直接在 Visual studio(VS) 环境中进行 SINOVA-TION 应用程序的开发
CAXA	ICAPI (IRONCADAPI)	ICAPI 是 CAXA 软件的 API,开发者使用编程语言 (如 C++、C#) 来自定义和扩展功能和特性,为用户提供了快速开发环境 ICAPIWizard

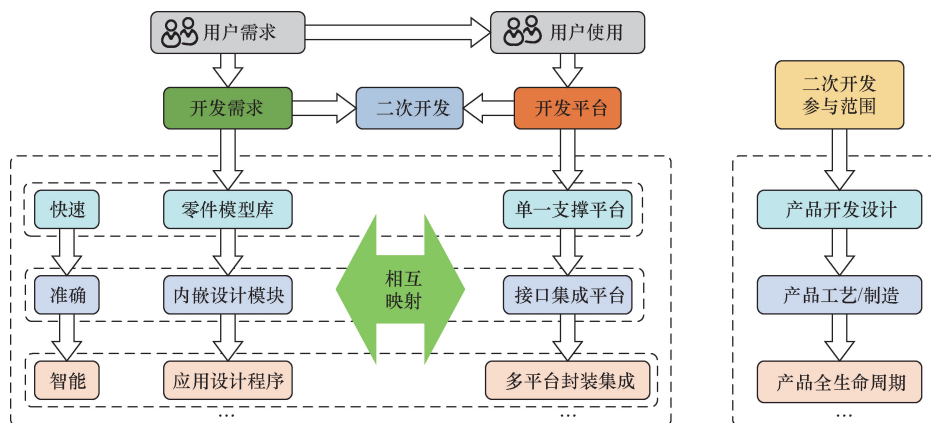


图 4 二次开发技术发展历程

Fig. 4 Development history of secondary development technology

具体需求与开发平台角度,将二次开发技术发展历程分为快速、准确以及智能三个层次,主要从其表现形式进行分析,其次将二次开发计算在产品全生命周期参与范围进行了简要分析,以期探明二次开发技术在定制化机械产品设计中的应用现状和存在的不足。

3.1 二次开发技术的表现形式

二次开发技术在定制化机械产品设计应用中具体需求决定着表现形式以及开发过程的技术路线。本部分主要从单一支撑平台、接口集成平台、多平台集成角度映射的计算机辅助设计系统的表现形式方面来分析二次开发技术在定制化机械产品设计中的研究与应用。

3.1.1 单一支撑平台的设计模块

20世纪80年代,国外CAD软件被引入中国,工程设计人员为解决使用中所发现的不足,早期CAD软件二次开发技术的研究主要解决设计标准与软件环境与国内不同的问题^[37],在此基础上开始了中国基于CAD软件的二次开发技术的发展。

机械零件模型库是使用二次开发工具在开发平台中插入的数据库,结合数据库技术来实现设计人员直接进行调用零件模型,减少重复性建模过程。某些研发部门在设计过程中会频繁使用标准件与非标准件,标准件机械零件库的大部分开发工作现已被开发平台所完成,在二维制图、三维建模软件中都有较好的应用,如AutoCAD块库、SOLIDWORKS的设计库功能等。实际设计中企业具体要求不同,标准零件库的针对性差以及种类不齐全,杜宝江等^[38]研究了以CATIA作为开发平台,利用SQL Server存储和管理标准件信息,根据企业在定制化设计中对机械零件的不同要求,从数据库中搜索到的零件调用到CATIA中进行编辑和装配,根据企业零件使用频率对CATIA标准零件库实现补充。Reddy等^[39-40]基于知识工程(knowledge-based engineering, KBE)利用SOLIDWORKS软件的二次开发技术,使用SOLIDWORKS API开发工具进行定制化开发,在支撑软件中插入设计工具,开发出了符合行业标准的直齿圆柱齿轮、轴承智能设计系统,实现定制化非标准件的快速设计与建模。

国产CAD平台在吸取国外先进CAD平台开发历程的基础上,提供了基本的标准件库的功能,但其功能相对不完善。针对此问题,吴昊等^[41]基于CAXA进行二次开发,通过算法来实现图纸标准件数据的识别、提取、整理,以及物料代码的搜索与导入等功能,经实践可有效提高设计效率。

企业在满足客户定制化需求时需要在基础产

品上依据要求的参数完成再次设计,将具体设计整合在插件工具中,可以为企业带来高效的设计效率。一些非标准机械零件具有相同的尺寸拓扑关系、工作原理和设计流程,一些学者依据此特征基于CAD软件进行二次开发完成了CAD软件的定制化开发。洪常意^[42]通过VB(visual basic)语言对CATIA进行二次开发,提取钴钨复合刀具的关键几何参数,采用参数化建模方法设计刀具结构,制作了刀具设计软件界面,实现钴钨复合刀具的定制化设计。Yang等^[43]基于VS环境在CATIA软件中,研究了曲轴的参数化设计方法,在CATIA中添加曲轴快速设计建模系统,该方法能够快速生成曲柄形状,从而减少了重复操作。杨富伟等^[44]基于VS环境C++对UG进行二次开发,利用系统内嵌语言,UG/Open Grip为工具编写代码,在编译链接后实现旋转矢量(rotary vector, RV)减速器针齿壳的参数化设计。以上学者根据定制化产品设计需求,通过支撑平台内部宏录制等功能实现二次开发的方式,实现了单一支撑软件下设计型专家系统。

随着定制化机械产品设计的多样复杂的发展趋势,对于定制化机械零件的使用率、种类需求越来越高,根据二次开发技术实现单一支撑平台的定制化机械产品设计模块的开发可以满足基本设计需求,在开发平台内嵌设计功能模块的方式,针对性较强,与支撑软件程序的融合性好、学习难度小,主要是对支撑软件程序的功能的扩展、再建模板库和界面定制等,但其功能受到限制,灵活性不足。

3.1.2 接口集成平台的设计模块

接口集成平台是通过CAD软件丰富的API与其他平台间进行数据传递,以解决定制化机械产品的尺寸拓扑关系的复杂性以及设计过程中分析计算、优化设计、仿真分析等的集成,提高产品设计效率,保证产品的性能与可靠性。目前,一些企业的产品结构复杂,导致其在分析计算过程中关联性复杂,所以通过API将其他设计计算程序与CAD平台联接,以提高设计计算的准确度。李俊文等^[45]利用MATLAB设计了独立计算板块,将定制化机械产品的设计模块独立于开发平台外,将输出的计算结果数据导入UG中,并通过API作为二次开发工具,实现UG的参数化建模,开发出轴的快速设计系统。

随着智能设计的发展,对于定制化机械产品的优化方法不断改进,依据产品性能进行仿真分析和模拟装配、制造可以检验设计的效果及结构合理性^[46],并进行优化,但定制化机械产品往往在建模或前处理工作重复性、相似性强,可以通过二次开发技术简化设计流程。刘文华等^[47]基于VS环境,

利用 C++ 语言对 SOLIDWORKS 进行二次开发,建立膜片弹簧自动建模模块,并利用 SOLIDWORKS 与 Ansys 之间良好的 API,将设计得到的三维实体模型进行有限元分析,大大提高了设计效率。企业级设计系统数据较多,更新频繁,Nasr 等^[48]以 CATIA 为平台进行二次开发,基于规则的定位系统设计了一种面向棱柱形构件的定制化夹具自动建模系统,系统由夹具规划、夹具布局和夹具装配模块组成。通过 API 集成平台实现了软件的物理集成与信息集成,集成的软件系统将不同软件有机结合,统一执行控制程序,保证信息畅通传递,提高了技术人员的工作效率和企业的生产效益。

通过 API 实现了将不同平台软件的物理集成与信息集成,集成的软件系统将不同软件有机结合,统一执行控制程序,保证信息畅通传递,充分发挥不同软件的优势,以提高设计结果的准确性为目的进行二次开发,提高了技术人员的工作效率和企业的生产效益。

3.1.3 多平台集成的应用程序

多平台封装集成是在接口集成平台的基础上,依据定制化的系列机械产品设计中关联性等特点,以提高设计效率与质量为首要目标,整合更多设计中的流程包括 CAD、计算机辅助制造(computer aided manufacturing, CAM)、计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)、和计算机辅助工艺规划(computer aided process planning, CAPP)等,更好地实现设计系统集成化、自动化、智能化。陈如云等^[49]提出一种基于 NX 进行二次开发的参数化设计方法,开发的异型滚子弧面凸轮减速机构系统可以满足用户的个性化设计需求,有助于实现异型滚子弧面凸轮减速机构设计流程的规范化、标准化。李鸿飞等^[50]利用 SOLIDWORKS API,在程序主体内添加插件,并利用 Adams 和 Ansys 进行刚柔耦合仿真分析,基于 VS 环境,使用 C++ 语言将参数化建模模型程序和有限元分析程序结合并封装插件,实现 CAD/CAE 的集成,构建整机凸轮连杆 CAD 系统。目前,使用二次开发技术对定制化机械产品设计系统进行开发,因定制化机械产品设计趋于复杂化,单一功能无法满足定制化的需求,多平台封装集成成为研究热点。随着机械化产品定制化设计需求的提高,个性化定制产品设计平台是现阶段研究重点之一,基于 CAD 三维软件开发定制化智能设计应用程序示例如图 5 所示。

杨研^[52]将企业具体需求转化为开发需求,基于 SOLIDWORKS、Ansys 为开发平台进行二次开发,完成了设计模块和分析模块的建立,实现参数化模型

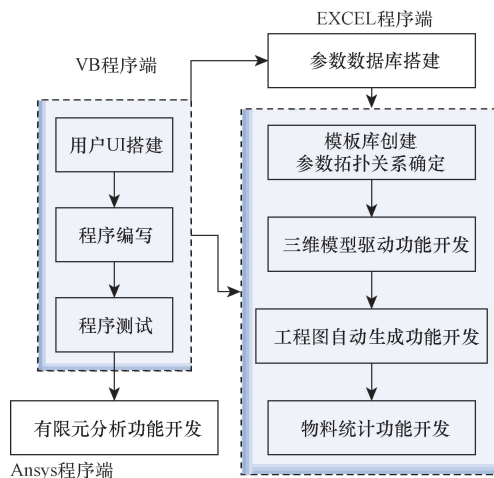


图 5 定制化智能设计应用程序体系框架^[51]

Fig. 5 Architecture framework for customized intelligent design applications^[51]

的建立和有限元分析自动化的完整过程,借助 C# 语言将有限元分析模块嵌入液压缸计算机辅助设计系统中,实现系统封装,开发出产品设计与工程分析一体化的液压缸计算机辅助设计系统,为定制化机械产品二次开发技术上的集成化提供了有效范例。吴强等^[53]对参数化 CAD 和 CAE 技术以及软件集成技术进行研究,得出一种基于 CAD/CAE 集成的机械零件性能参数优化的通用设计方法。该方法基于 Ansys、SOLIDWORKS,在 VS 环境下进行二次开发,使用 C++ 语言将机械零件的参数化建模程序和有限元分析程序结合并封装插件,开发了一款基于 CAD/CAE 集成的定制化机械零件从动片内环机数字化设计系统,该设计系统快速得到了三维模型和求解结果,实现了定制化机械零件设计的 CAD/CAE 有效集成,进一步探索了不同功能集成封装技术。吴强等^[54]还提出了一种基于 Txt 和 Excel 中央数据库的 CAD/CAE 集成方法,以解决目前 CAD/CAE 集成方法自动化程度低、数据单向传输和设计效率低的问题,以国产建模软件 CAXA 及 Ansys 为开发平台,通过离合器驱动器内环疲劳分析系统开发来验证该方法的可行性,为其他定制化机械产品的设计优化系统的开发提供了指导。

多平台集成的外部开发机制具有较高的集成度与自动化程度,在个性化定制产品的设计周期中具有较高的参与度,可以有效地提高个性化定制产品的设计效率,外部机制方式的多平台集成开发智能定制化设计应用程序相当于一次软件创新,要求开发人员对软件接口技术和封装有较高专业素质,所以更多的 CAD 系统开发是基于现有 CAD 软件进行二次开发。

3.2 二次开发技术的参与范围

随着机械设计制造行业数字化转型,二次开发技术在定制化机械产品全生命周期中在多领域均有应用。本部分按从二次开发在定制化产品全生命周期中的参与范围视角出发,将参与范围分为设计分析人员参与、工程技术人员参与、产品全生命周期参与三个角度来分析定制化机械产品中的二次开发技术应用。

3.2.1 设计分析人员参与

二次开发技术应用于定制化机械产品设计的初始目的是为减轻设计人员重复性工作。早期只有设计分析人员参与其中,以实现定制化产品的快速设计。现阶段,二次开发技术研究的主要方向还是设计人员参与,在定制化产品设计中应用二次开发技术是设计人员提高设计效率的主要方法之一。众多学者针对设计分析阶段的二次开发做了大量研究,此研究主要针对设计人员在减轻工作量的同时,提高定制化产品设计的准确度。Liu 等^[55]基于 3D 零件库是重用现有设计方法,基于 SOLIDWORKS 平台进行二次开发,实现设计分析人员在模具设计所需的类型及参数选择、3D 模板驱动、零件装配等功能,为设计人员提供一种定制化模具设计系统。陈俊等^[56]基于 SOLIDWORKS 二次开发技术采用 Python 对各功能模块以及 MATLAB 优化算法实现开发调用,为设计人员提供一种定制化的定制化连杆转向系统参数化设计及自动化装配的数字化设计平台,使设计人员在优化设计、建立模型、自动装配以及调整参数阶段通过人机交互方式完成设计工作。陈财^[57]根据无轨胶轮车工作制动器结构和工作原理相同,仅尺寸不同,符合定制化机械产品的特点,以 Visual C++ 为开发环境、C++ 为开发语言在 CAXA 软件中设计出一套工作制动器参数化绘图软件,在 Access 数据库管理软件中对工作制动器标准件的数据建立数据库,其实现了在界面上输入几个重要的参数,便可自动设计并出图。大大提高了工作制动器设计效率。设计分析人员参与的二次开发应用最为广泛,参与度较高,研究已较为成熟。

3.2.2 工程技术人员参与

工程技术人员作为实现“智能制造”的关键参与者之一,在设计分析人员完成设计工作后,设计结果向制造阶段的准确传递数据是关键, Saric 等^[58]学者在 VS 开发环境下使用 C# 语言对 CATIA 进行二次开发,实现了机械动力传递机构参数化建模,并建立了 CATIA 与 kmps 计算模块的连接,构建机械动力传动机构集成智能计算机辅助设计系统,

实现了设计过程的自动化,输出生成了机械动力传递机构的最终三维模型,还将所研制的 IICADkmps 系统与快速成型装置和数控机床连接起来,进一步测试和验证实际用途,该研究为工程技术人员减少了工作量,设计数据自动传递到数控机床中,有效降低了工程技术人员人为的错误率。贺尚红等^[59]以某公司压路机十字轴焊接件设计为例,研究了模型信息集成检入切换、参数驱动和元件指定操作的二次开发技术,基于 Creo 软件平台进行二次开发,结合 MFC 可视化技术搭建人机交互界面,完成集成参数化设计系统开发,并研究了一种参数检索的方法,以实现系统的参数自动更新,为工程技术人员参数检索以及反馈更新提供了便利。以上研究为二次开发技术应用于定制化产品制造阶段提供了范例,多集中在数据传递与信息检索方面,但二次开发技术在降低工程技术人员工作量、提高工作效率方面的应用较少。

3.2.3 产品全生命周期

定制化产品的全生命周期主要包括产品开发、制造、维护等阶段,其中参与人员包括了设计人员、制造人员、工程技术人员以及用户等,将二次开发技术应用于定制化产品的全生命周期中具有良好前景。其在实际使用中需要结合其他先进的设计制造技术才能实现其功能,在设计人员以及用户参与方面最先应用,主要是为了便于用户依据使用情况进行选型以及在个性化定制设计中更好的准确提取用户需求。Reddy 等^[60]提出一种知识工程的设计系统,该系统基于 SOLIDWORKS 软件进行二次开发,该系统包括专家模块和用户模块两大模块,在专家模块中,专家可以添加增加、修改数据或算法,在用户模块中,用户可以将用户需求作为输入数据提供给系统,系统可以在知识库中搜索已有的记录,并根据获取的知识进行匹配操作,生成合适的三维模型,并在此方法指导下开发出一款工业电池堆组件的 CAD 设计系统,经实验此方法可以提高设计效率及质量。冀佳奇^[61]使用二次开发工具 ICAPI 在 VS 中编写 C++ 程序代码,然后将生成的应用程序集成到 CAXA 3D 实体设计软件中,基于三维装配体模型实现了一些功能,包括零部件基本信息获取、零件在装配体坐标系下的包围盒计算、零部件之间的拆卸约束信息提取、装配体根据算法规划好的零件拆卸序列进行动态拆卸仿真,根据 CAXA 二次开发提取的拆卸约束信息,寻找最优拆卸序列提供模型,为二次开发技术产品全生命周期的后期维修环节提供了范例。产品全生命周期中应用二次开发技术的使用场景现主要为设计制造

以及用户选型方面,使用场景存在环节孤立,无法成为一个连贯的产品全生命周期管理系统。

二次开发技术在定制化产品全生命周期的参与范围视角分析中,更多的关注点在产品的设计,在产品应用阶段缺乏相应研究,结合现有先进技术实现产品全生命周期管理的智能化是二次开发技术进一步发展的新方向之一^[62]。将工程分析和加工验证结果直接反馈到设计中,进一步通过集成产品数据管理、企业资源计划等软件系统实现产品全生命周期信息集成,保障产品数据安全和可追溯性,并吸引企业价值链中的专业设计人员、分析工程师、制造人员、销售人员、维修人员等能全面参与到产品开发过程中。

通过上述二次开发技术的应用现状分析,在定制化机械产品设计中具有广泛的应用,开发人员依据具体来开发需求选择不同难度的开放平台以及工具,但开发工作具有一定难度,需要开发人员具有一定专业素质,在开发成果方面还存在智能化、集成度较低等问题,在开发平台选择上更多倾向于国外成熟的 CAD 平台,对中国 CAD 平台的开发与研究较少,这就导致了国产 CAD 平台更难以占领市场。

4 二次开发技术的发展趋势

随着人工智能、大数据、云计算、数字孪生等新一代信息技术的快速发展,结合先进技术从二次开发技术的过程、环境、需求、平台、结果方面进行展望,以期实现多重目标,使得二次开发技术更好的应用与发展,如图 6 所示为二次开发技术发展趋势的主要方向。应用先进技术对制造过程中产生的大

量数据进行分析和处理,从中提取有价值的信息,实现新一代信息技术与制造业深度融合,并结合二次开发技术,帮助设计人员更好地决策和设计,提高工程技术人员操作效率,有助于降低二次开发成本与开发难度,同时可以提高定制化机械产品 CAD 系统集成化、智能化、专业化、高效性与可靠性^[63-64]。

4.1 开发过程的深度智能化

未来基于三维 CAD 软件的二次开发将集成多种人工智能技术来拓展定制化设计系统功能以及性能。二次开发技术与人工智能技术结合的智能设计主要从提高设计系统的可靠性以及自主决策性等来提高设计人员工作效率^[65-66]。

在提升定制化设计系统可靠性方面,通过知识工程技术应用于二次开发使得设计系统更具专家化、设计结果性能更加可靠。信息和知识不再需要由设计人员收集和处理,可以通过特定的算法进行处理,可以将整个设计过程中的错误率降低^[67]。通过数据库技术和智能算法将定制化的设计系统相关设计数据进行存储并根据设计人员的设计需要实现将快速检索与智能推送。通过源代码缺陷智能检测技术以及测试用例智能调度技术应用于二次开发的开发过程中^[68],开发人员可以及时发现设计系统的代码缺陷和设计系统功能缺陷等问题。

在提高设计系统自主决策性方面,目前基于三维 CAD 软件的设计系统多为设计型专家系统,依赖于设计人员通过人机交互方式实现产品设计,智能化程度有待提高。智能算法可以为检测、分析、预测和优化提供最佳解决方案,从而为智能设计的发展提供动力^[69]。通过深度学习、大数据等技术应用

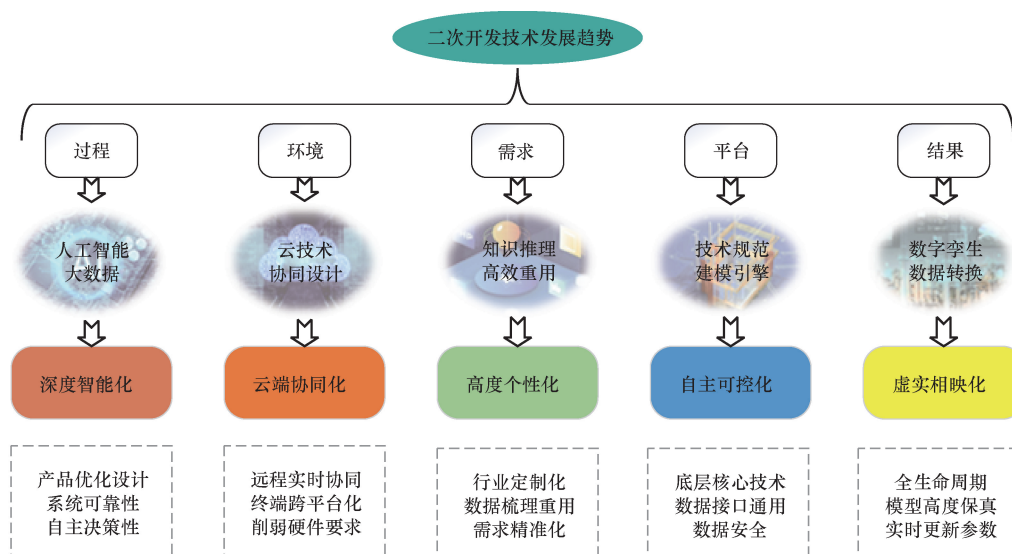


图 6 二次开发技术发展趋势

Fig. 6 Development trend of secondary development technology

于二次开发中将设计系统智能化显著提升,使其具备动态识别用户操作并自主决策与设计结果智能分析优化^[70-72]。通过人工智能技术自学习、自进化的特点,以大量二次开发系统的实例,训练其实现二次开发过程的智能化,可以根据需求实现自动生成相关设计代码、功能组件、操作界面等,提高开发人员工作效率,使二次开发的专家型推理思维具有创新性。

目前,国外三维 CAD 软件与人工智能技术结合已实现高效设计。例如, NX(UG)利用机器学习和人工智能技术监视用户操作情况,提供正确的命令和界面,并利用自学习所得的用户界面操作知识来智能配置个性化操作环境;Creo 添加了人工智能组件,向用户智能推送有效建议和解决方案。将上述应用实例借鉴于二次开发中,可以更好地设计出定制化智能设计系统。

4.2 开发环境的云端协同化

协同设计是一种创新化的先进服务模式,依靠网络化技术的优势,将分散的制造资源整合分配,给设计人员提供一个灵活、可扩展的协同式“云”平台^[73-75]。网络化协同设计的重点则是并行、协同对产品进行设计^[76]。二次开发技术与协同设计技术相结合可以将制造资源高度服务化、集中化,同时发挥出两者在设计过程中的优势,即保证了设计过程的可靠性和高效性,网络化协同设计提供异地分工协作、数据共享的优势^[77]。

协同设计主要体现在以下两方面:一方面是实现设计人员的协同设计,将定制化的设计系统部署于云端,设计人员在“云”平台进行定制化产品的协同设计,在云端实时计算、实时更新、实时存储,使整个设计团队都能同步获得最新数据,提高设计人员沟通效率与设计效率^[78]。设计人员共同协作设计,改变了以往产品的设计模式,提高了产品的竞争力。同时,将设计系统“云端”化不仅可以节约设计成本,也保证了安全性;另一方面是实现开发人员的协同设计,CAD 软件的二次开发过程进行协同操作,开发者可以在云端环境中运行和测试应用程序,将开发数据共享,及早发现开发过程中的功能缺陷及错误,加快二次开发的效率。赵飞宇^[79]总结了云架构 CAD 平台的关键技术和应用现状,并分析了其所面临的挑战与趋势,其中典型的云架构 CAD 软件如图 7 所示,Onshape 实现了 CAD 功能与数据管理、协作工具和实时分析结合在一起部署在云端,实现异地多端实时协作设计^[80]。中国“云”CAD 平台已有具体商用,如上海新迪数字技术有限公司自主研发的新迪云天工 CAD^[81],面向产品研发设计

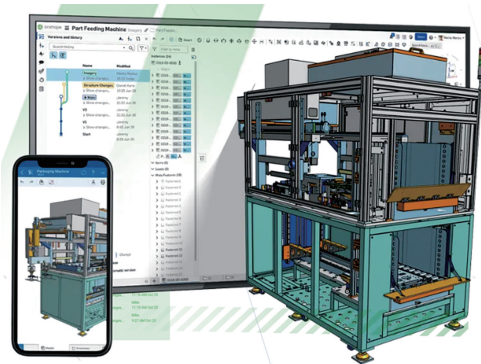


图7 Onshape 的云端协同化
Fig. 7 Onshape's cloud collaboration

过程,满足三维设计、数据管理、协同共享等“端到端”应用需求,实现数据云端存储并进行实时在线的协同交流和评审。

目前,制造业中协同设计以及云端化应用广泛。例如,李伯虎等^[82]提出了“智能+”时代的新智能制造系统——云制造系统 3.0。基于云制造系统 3.0 体系,在边缘制造、基于大数据的人工智能服务、虚实结合的协同制造等相关领域的研究基础上设计了航天云网,并初步开发了一些云制造系统 3.0 雏形的典型应用,验证了云制造系统 3.0 理念的可行性。而协同设计、云端化与二次开发技术结合应用较少,具有代表性的是刘力维等^[83]基于模糊规则推理的专家系统,实现对飞机结构件的选型,利用 CATIA CAA 二次开发工具实现基于尺寸和特征的参数化的飞机结构件建模,基于实例推理对最佳相似零件进行检索,通过变型设计得到目标实例,并对目标实例进行实例评价与学习,以此完成飞机结构件的人机协同智能设计,为两种技术的结合提供了可行的方案。

4.3 开发结果的虚实相映化

随着数字孪生技术的兴起,数字孪生模型已被逐渐认为是一种可以在虚拟空间实现与产品物理实体数字化映射的仿真模型^[84],它是实物对象的虚拟表示,是一个随着物理对象状态、工作条件、产品几何结构和资源状态等的变化而不断更新和变化的活体模型^[85]。数字孪生将传统意义上彼此独立的产品设计、分析、制造、使用、维护等产品生命周期中的不同阶段变成一个整体,实现了物理空间与虚拟空间中产品全生命周期数据的双向无缝传输。通过实际使用中的数据感知、分析、预测、反馈对产品进行实时改进,避免了传统不可逆设计方法实施过程中发现设计缺陷所带来的损失,大大提高了产品迭代优化的效率^[86-88]。

将数字孪生技术与二次开发技术深度融合,提

高定制化产品全生命周期各个环节模型的高保真性成为关键,基于数字孪生的复杂产品环形设计框架^[89]成为研究的重点之一。数字孪生模型的优势在于实时性强,在模型建立的基础上,融合实时数据进行驱动,实时更新实体状态。在产品制造阶段与数字孪生技术结合可以将其应用于预生产阶段,使自动化制造系统的快速重新配置^[90],并将制造资源整合,优化制造流程以提高制造效率^[91-92],加快个性化产品的设计与生产。但在产品设计阶段应用数字孪生技术研究较少,使用二次开发技术参数化建模时结合数字孪生技术是未来研究方向之一,可以根据改变的数据进行参数化建模,实现实体模型能够随设计数据实时更新,可有效提高仿真准确度。例如,基于三维 CAD 软件进行二次开发,增加数据接口,整合物理信息、行为信息、规则信息,建立基产品数字化全生命周期运维平台。

王亚彬等^[93]提出了一种基于有限状态的工装数字孪生几何模型建模方法,通过实时数字孪生技术与二次开发技术结合,实现了动态参数化建模,所建孪生模型能基本映射物理实物,验证了两种技术结合的有效性。Lu 等^[94]通过 CATIA 的定制化开发,整合关键信息,集成了多维等速关节数字孪生模型,形成了从设计、制造到运行的闭环数字孪生系统,提高产品的质量和生产效率,将两种技术结合应用于实例。

4.4 开发平台的自主可控化

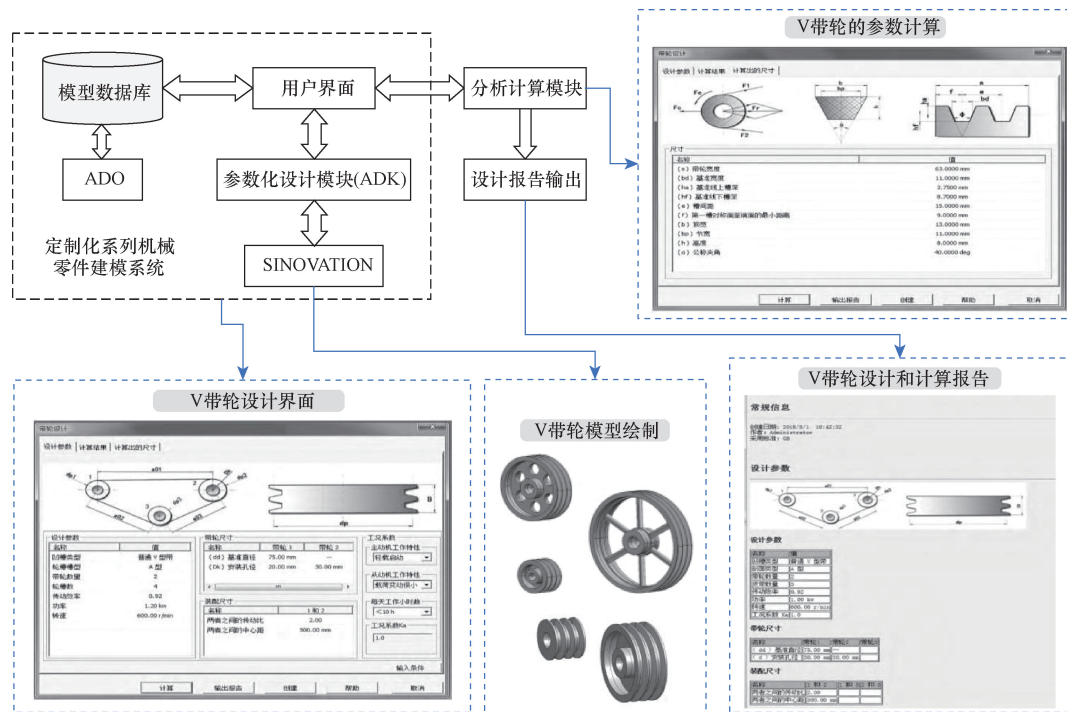
随着设计行业对计算机辅助设计工具需求的不断增加,CAD 平台的自主可控化显得愈发重要。国家“十四五”智能制造发展规划指出:联合开发面向产品全生命周期和制造全过程的核心软件,研发嵌入式工业软件及集成开发环境,研制面向细分行业的集成化工业软件平台^[95]。通过对二次开发应用现状的分析,三维 CAD 软件作为进行二次开发重要的基础平台,目前中国外研究人员在开发平台的选择上,大多选择国外成熟、可靠的三维 CAD 软件。

中国早期的 CAD 系统开发与应用的进程与国际同步,基础研究起步较早,经过系统研究在 20 世纪 90 年代也推出了不少商用 CAD,如白玉兰 CAD、高华 CAD 等,经过国产 CAD 发展的黄金时期,由于性能与市场战略等因素,后来大多销声匿迹^[96]。现阶段三维 CAD 关键技术的中几何建模引擎的研究是通过先引进国外成熟技术开始的。Overdrive 内核由中望软件^[97]从美国 VX 公司收购,虽经过多年的优化升级,但与 CGM、ACIS、Parasolid 等相比仍有进步空间。华天软件在日本 UEL 公司 CADmeister 内核的基础上开发了 CRUX I 内核,并基于该内核开发了三维 CAD 软

件 SINOVISION^[98]。目前,中国尚无独立于软件平台、可商业化推广、性能稳定且高效的几何建模内核^[36]。经过众多软件厂商与学者的多年努力,三维 CAD 关键技术已有突破,具有代表性的厂商有华天软件与中望软件,其中华天软件^[99]完全自主可控支持跨平台的三维几何建模引擎 DGM 和约束几何求解器 DCS,已在其旗下商用产品 CrownCAD 中应用,具有完全自主性,并且 CrownCAD 还支持协同设计,华天软件还推出了 SView 工业产品体验营销、创新设计和智能制造的 3D 协同创新平台,三维可视化方案覆盖了营销、研发、制造、服务整个过程,针对不同的业务场景提供 3D 可视化方案,同时能够适配各种终端设备,华天软件为开发平台的自主可控化提供了多样的软件生态。新迪数字研发的“新迪 3D 轻量化引擎 V7.0”适配国产麒麟操作系统,满足通用兼容性要求及性能、可靠性要求、用户的关键性应用需求^[100]。但基于国产三维 CAD 软件进行二次开发研究较少,景然等^[101]基于国产 SINOVIATION 软件分别从定制化机械产品设计软件开发以及铸造工艺 CAD 开发两方面,对 SINOVIATION 进行二次开发,如图 8 所示为基于 SINOVIATION 二次开发的设计软件体系示例^[102]。中国在二次开发中缺乏一定的自主性,容易受到相关制约以及安全性问题。三维 CAD 软件功能繁杂,性能指标众多,应用领域广泛,且不同行业应用需求有所差别。

中国作为制造业大国,长期以来在国产工业软件方面与国外先进的工业软件存在一定差距,要实现在二次开发中使用国产化开发平台必须找出存在差距的原因。三维 CAD 软件开发难度大,投资风险,中国研发起步晚,未完全掌握底层核心技术,如尚未拥有独立于 CAD 软件的商用几何约束求解器、建模引擎不够先进、与产业联系不紧密、缺乏三维 CAD 技术规范与标准、缺乏用户反馈等原因^[103-104],使得研发缺乏持续创新升级的内在驱动力。这些均为导致国产三维 CAD 软件的性能与国外先进软件存在差距的原因。

在二次开发技术方面,国产三维 CAD 软件应统一接口规范重构或改造三维 CAD 软件接口,以保证基于接口的数据传输精度,改善不同国产 CAD 软件间基于特征的数据交换技术,避免数据交换中模型数据的丢失^[105]。统一接口并改善数据交换技术可以更好支持二次开发,用户只需编写一套代码即可在不同的三维 CAD 软件中运行。因此,统一接口可为国产三维 CAD 软件与 CAE、CAPP、CAM 等工业软件的集成奠定良好的基础,也可为构建国产三维 CAD 生态环境基础平台,将核心技术掌握在自己手里,不受制于人。

图8 基于 SINOVIATION 二次开发的设计软件体系^[102]Fig. 8 Design software system based on secondary development of SINOVIATION^[102]

4.5 开发需求的高度个性化

现有基于三维 CAD 运用二次开发技术进行定制化机械产品设计系统的开发还因用户需求不够明确、技术限制等问题,在专业定制化、高度个性化方面存在一定的不足,针对特定行业的个性化定制需求成为二次开发技术发展的新趋势之一。

在开发平台自主可控化的条件下,使用国产化平台进行高度个性化的设计系统开发,使得国产三维 CAD 软件更具有竞争力。目前,国外先进三维 CAD 软件对通用系统进行深度专业化定制以满足特定行业的需求,如 Creo、NX、Onshape 等提供增材制造模块以使用户能直接通过其软件连接 3D 打印机,实现同一环境下的模型设计与增材制造;CATIA 为波音公司定制的零件模型库以满足其部分零件的特殊装配需求。中国在进行企业专业 CAD 软件方面有了一定的发展,如中望软件与沪东中华合作开发的船舶专用软件——HDSPPD。

为使二次开发技术更好实现需求的高度个性化,将其与基于知识库的知识推理与知识重用进行结合,即通过梳理已有行业知识,对专业领域数据进行挖掘,提取产品设计知识,构建层次化模块化设计知识库^[106],并应用于二次开发中,从而实现特定领域产品设计知识的高效重用,进而准确地挑选出符合客户需求的最佳候选组件,帮助用户大幅提高产品设计效率与设计质量^[107],实现开发需求的高度定制化。但是

基于数据挖掘与知识重用构建的知识库还存在数据质量影响决策准确性、知识库的时效性低与维护遗漏、大规模知识库中技术资源限制、知识表示的准确与语义理解深度还存在一定的挑战^[108-109]。

5 结论

(1)合理地利用基于三维 CAD 软件的二次开发技术可以有效地加快企业设计效率,降低设计成本,提高产品的竞争力。

(2)现有二次开发技术在定制化产品设计中的集成化、智能化方面有待提高,二次开发过程较为复杂且周期长,针对复杂定制化机械产品设计还存在一定困难。

(3)未来应将二次开发技术与人工智能技术、协同设计技术、数字孪生技术等新一代信息技术深度融合,提高定制化设计系统的智能化、集成化、云端化以及高度保真性和安全性,提高产品性能与设计效率。

(4)《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》指出:打造自主可控的标识解析体系、标准体系、安全管理体系,加强工业软件研发应用,培育形成具有国际影响力的工业互联网平台,推进“工业互联网+智能制造”产业生态建设。加强国产开发平台的研发,攻克核心技术,提高软件的性能以提高市场占有率,使得国产三

维 CAD 软件经过用户与厂商的迭代后达到先进水平,实现国产三维 CAD 的良性循环发展。构建良好的国产三维 CAD 软件生态环境平台,使二次开发技术具有自主性,实现二次开发技术的高质量发展。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. “中国制造 2025” 发展战略 [EB/OL]. (2015-05-19) [2023-07-02]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9782.htm.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. “Made in China 2025” development strategy [EB/OL]. (2015-05-19) [2023-07-02]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9782.htm.
- [2] He C, Li Z K, Wang S, et al. A systematic data-mining-based methodology for product family design and product configuration [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 48: 101302.
- [3] Zhang S Y, Xu J H, Gou H W, et al. A research review on the key technologies of intelligent design for customized products [J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 631-640.
- [4] Qiu L M, Zhou H F, Wang Z L, et al. Customized product design information feedback technology based on tentative design chain reconstruction [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 12(36): 6123-6133.
- [5] 聂静, 常涛, 刘维, 等. 基于聚类分析的个性化异构数据发布 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(14): 5813-5821.
Nie Jing, Chang Tao, Liu Wei, et al. Personalized heterogeneous data publishing based on clustering analysis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14): 5813-5821.
- [6] Kamrani A, Smadi H, Salhi S. Two-phase methodology for customized product design and manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2012, 23(3): 370-401.
- [7] 肖人彬, 林文广, 赖荣桑, 等. 数据驱动的产品大规模个性化设计研究 [J]. *机械设计*, 2021, 38(10): 1-14.
Xiao Renbin, Lin Wenguang, Lai Rongshen, et al. Research on the data-driven product design for mass personalization [J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(10): 1-14.
- [8] 魏闯, 韩志仁, 刘宝明. 基于 ANSYS Workbench 的航空导管橡胶成形系统开发及成形性能分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(22): 9702-9710.
Wei Chuang, Han Zhiren, Li Baoming. Development of aviation connector tube rubber forming system and analysis on forming performance based on ANSYS Workbench [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(22): 9702-9710.
- [9] 陈妮, 闫博, 袁媛, 等. 微铣刀参数化设计系统研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(23): 185-192.
Chen Ni, Yan Bo, Yuan Yuan, et al. Research on parametric design system of micro-mills [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(23): 185-192.
- [10] Shivegowda M D, Boonyasopon P, Rangappa S M, et al. A review on computer-aided design and manufacturing processes in design and architecture [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, 29(6): 3973-3980.
- [11] 陈泽云, 陈鑫, 谈丽华, 等. 基于 Revit 平台的隔震支座快速建模模块开发与应用 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(2): 706-714.
Chen Zeyun, Chen Xin, Tan Lihua, et al. Development and application of rapid modeling module for isolators based on revit platform [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(2): 706-714.
- [12] 韩志仁, 马志友, 车剑昭, 等. 基于 CATIA/CAA 的数控弯管模具快速设计 [J]. *航空制造技术*, 2022, 65(19): 107-113.
Han Zhiren, Ma Zhiyou, Che Jianzhao, et al. Rapid design of CNC tube bending die based on CATIA/CAA [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(19): 107-113.
- [13] Michael R, Maximilian K, Carsten B, et al. Methodology for the design of interdisciplinary modules for mechatronic modular product platforms [J]. *Procedia CIRP*, 2023, 119: 675-680.
- [14] Necdet G, Osman O A, Ertu U, et al. Automated sizing of automotive steering ball joints in parametric CAD environment using expert knowledge and feature-based computer-assisted 3D modeling [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 52: 101630.
- [15] Long X J, Li H T, Du Y F, et al. A knowledge-based automated design system for mechanical products based on a general knowledge framework [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 178(15): 114960.
- [16] Pranay P, Rajan B S, Navanth P. Development of an automated CAD modeling system for a four-stroke four cylinder IC engine crankshaft [C]//2022 Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. Singapore: Springer, 2023: 605-615.
- [17] Kuo C C, Chang C H. Cloud-based design system for customized electrical enclosures [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(1/2): 573-588.
- [18] 崔杰生, 余隋怀, 周宪. 面向客户的大批量定制设计方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2006(16): 2561-2564.
Cui Jiesheng, Yu Suihuai, Zhou Xian. Study on design method of mass customization production to clients [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006(16): 2561-2564.
- [19] 魏宏静, 李少波. 云制造中产品个性化定制研究综述 [J]. *工程设计学报*, 2018, 25(1): 12-17.
Wei Hongjing, Li Shaobo. Study of product personalized customization based on cloud manufacturing [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2018, 25(1): 12-17.
- [20] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能制造大规模个性化定制设计要素要求: GB/T 42199—2022 [S]. 北京: 北京中国标准出版社, 2022.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Intelligent manufacturing large-scale personalized customization design requirements: GB/T 42199—2022 [S]. Beijing: Beijing China Standard Press, 2022.
- [21] 肖人彬, 赖荣桑, 李仁旺. 从大规模定制化设计到大规模个性化设计 [J]. *南昌工程学院学报*, 2021, 40(1): 1-12.
Xiao Renbin, Lai Rongshen, Li Renwang. From design for mass customization to design for mass personalization [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2021, 40(1): 1-12.
- [22] 谭建荣, 冯毅雄. 大批量定制技术: 产品设计、制造与供应链 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020: 57-64.
Tan Jianrong, Feng Yixiong. Mass customization technology: product design, manufacturing and supply chain [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020: 57-64.
- [23] 肖人彬. 大规模个性化定制: 大规模个性化的新发展 [J]. 计

- 算机集成制造系统, 2023, 29(12): 4215-4226.
- Xiao Renbin. Massive personalized customization: New development of mass personalization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(12): 4215-4226.
- [24] 张寒. 基于参数化设计的产品个性化定制平台设计研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- Zhang Han. Research of product personalized customization platform design based on parametric design[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [25] 邓体立, 容芷君, 曹云飞. 基于客户需求的产品平台设计研究[J]. 机械设计与制造, 2019(5): 34-37.
- Deng Tili, Rong Zhijun, Cao Yunfei. Research on product platform design based on customer demands[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(5): 34-37.
- [26] 刘向尧, 曾超, 刘梅玲. 基于数字化工程的大型客机起落架缓冲器快速设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 356-362.
- Liu Xiangyao, Zeng Chao, Liu Meiling. Rapid design for large civil airplane's landing gear shock absorber based on digital engineering[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 356-362.
- [27] Camba D J, Contero M, Company P. Parametric CAD modeling: an analysis of strategies for design reusability[J]. Computer-Aided Design, 2016, 74(5): 18-31.
- [28] Ma H Y, Zhou X H, Liu W, et al. A feature-based approach towards integration and automation of CAD/CAPP/CAM for EDM electrodes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9): 2943-2965.
- [29] 樊晓健. 基于相似理论的同类机械产品定制化设计技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- Fan Xiaojian. Study of similar mechanical product seriation design Technology base on similarity theory[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [30] Sarikonda T K, Nikhila P, Jayakiran R E. Development of a preliminary automated cad modeling system for different types of rivets [C]// 2022 Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. Singapore: Springer, 2023: 517-527.
- [31] Fu J, Chen X, Gao S M. Automatic synchronization of a feature model with direct editing based on cellular model[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2017, 14(5): 680-692.
- [32] Lu D C, Wu L, Liu W, et al. Third party testing and evaluation of 3D geometric modeling kernels [C]//International Conference on Computer Network Security and Software Engineering. Zhuhai: SPIE, 2022: 80-85.
- [33] Yang Y Y, Fu C Y, Xu H Y. Development of strength calculation program for arbitrary section based on BIM technology [C]//Journal of Physics: Conference Series. Nanning: IOP Publishing, 2021: 012124.
- [34] Niemann J, Pisl A, Niemann J, et al. Siemens PLM platform structure [C]//Life-Cycle Management of Machines and Mechanisms. Berlin: Springer, 2021: 355-380.
- [35] Castro H, Putnik G, Castro A, et al. Open design initiatives: an evaluation of CAD open source software [C]//2019 Procedia CIRP. Netherlands: Elsevier, 2019, 84: 1116-1119.
- [36] 程锦, 叶虎强, 谭建荣, 等. 三维 CAD 技术研究进展及其发展趋势综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(23): 158-185.
- Cheng Jin, Ye Huqiang, Tan Jianrong, et al. Review of research progress and development trends of 3D CAD technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(23): 158-185.
- [37] 周伶俐. 基于 AutoCAD 二次开发的转子轮槽半精铣刀波刃型线参数化绘制方法研究[J]. 兵工自动化, 2023, 42(8): 10-14.
- Zhou Lingli. Research on parametric drawing method of rotor groove semi-finishing cutter wave edge profile based on AutoCAD secondary development [J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(8): 10-14.
- [38] 杜宝江, 郑飞飞, 李传磊, 等. CATIA 标准零件库的开发[J]. 电子科技, 2017, 30(9): 34-36, 41.
- Du Baojiang, Zheng Feifei, Li Chuanlei, et al. Development of CATIA standard parts library [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(9): 34-36, 41.
- [39] Reddy E J, Rangadu V P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear; an approach[J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(4): 3139-3149.
- [40] Reddy E J, Sridhar C, Rangadu P. Research and development of knowledge based intelligent design system for bearings library construction using SOLIDWORKS API[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, 385: 311-319.
- [41] 吴昊, 苏瑞东, 项陆, 等. 基于 CAXA 二次开发的标准件数据管理工具实现[J]. 机械工程与自动化, 2022(3): 89-91.
- Wu Hao, Su Ruidong, Xiang Lu, et al. Implementation of standard parts data management tool based on CAXA secondary development[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(3): 89-91.
- [42] 洪常意. 铝合金叠层结构钻铤复合刀具设计与切削参数优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- Hong Changyi. Design and cutting parameters optimization of the drilling-countersinking integrated tool for aluminum alloy laminated structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [43] Yang H G, Wang S J, Xie Y R. Parametric design of crankshaft based on CATIA secondary development platform [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602: 287-290.
- [44] 杨富伟, 郑智贞, 李浩, 等. 基于 UG 二次开发的 RV 减速器参数化设计[J]. 煤矿机械, 2018, 39(10): 168-171.
- Yang Fuwei, Zheng Zhizhen, Li Hao, et al. Parametric design of RV-reducer based on UG secondary development[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(10): 168-171.
- [45] 李俊文, 陈玉莲. 减速器轴的快速设计系统研究与开发[J]. 制造技术与机床, 2022(2): 145-150.
- Li Junwen, Chen Yulian. Research and development of rapid design system in reducer shaft[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(2): 145-150.
- [46] 秦闯, 刘战强, 叶洪涛, 等. 基于 UG 二次开发技术 CAD / CAE / CAM 软件集成方法研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(9): 141-144.
- Qin Chuang, Liu Zhanqiang, Ye Hongtao, et al. Research on integration methods of CAD/CAE/CAM software based on redevelopment of UG technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(9): 141-144.
- [47] 刘文华, 刘夫云, 余汉红, 等. 满足工程约束条件的膜片弹簧

- 参数化设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 23-25.
- Liu Wenhua, Liu Fuyun, Yu Hanhong, et al. Parameterized design of diaphragm spring satisfying engineering constraints [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(1): 23-25.
- [48] Nasr E A, Al-Ahmari A, Khan A A, et al. An automatic fixture modeling system using search strategy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(9): 1-15.
- [49] 陈如云, 龚青山, 曹占龙, 等. 异型滚子弧面凸轮减速机构参数化设计及系统开发[J]. 机械传动, 2023, 47(10): 55-62.
- Chen Ruyun, Gong Qingshan, Cao Zhanlong, et al. Parametric design and system development of different types of rollers globoidal cam deceleration mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(10): 55-62.
- [50] 李鸿飞, 赵方超, 李军念, 等. 基于 SW 的整机凸轮连杆 CAD 系统开发[J]. 包装工程, 2021, 42(23): 199-206.
- Li Hongfei, Zhao Fangchao, Li Junnian, et al. CAD system development of whole machine cam linkage system based on SW[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(23): 199-206.
- [51] 平亮. 基于 SolidEdge 的欧式起重机参数化设计系统开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- Ping Liang. Implementation of the european crane parametric design system based on SolidEdge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [52] 杨妍. 液压缸计算机辅助设计系统研究与开发[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
- Yang Yan. Research and development of computer aided design system for hydraulic cylinder[D]. Shenyang: Shenyang Architecture University, 2021.
- [53] 吴强, 刘夫云, 胡汝凯, 等. 基于 CAD/CAE 集成的机械零件性能优化方法研究[J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1504-1509.
- Wu Qiang, Liu Fuyun, Hu Rukai, et al. Research on performance optimization method of mechanical parts based on CAD/CAE integration[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(6): 1504-1509.
- [54] 吴强, 刘夫云, 余汉红, 等. 一种基于 Txt 和 Excel 中心数据库的 CAD/CAE 集成方法[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 211-214.
- Wu Qiang, Liu Fuyun, Yu Hanhong, et al. A CAD/CAE integration method based on Txt and Excel central database[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(2): 211-214.
- [55] Liu W, Zhou X H, Niu Q, et al. A convenient part library based on SOLIDWORKS platform[J]. International Journal of Mechanical Volume, 2014, 12(8): 1851-1854.
- [56] 陈俊, 兰希, 康绍鹏, 等. 基于 Python 的多轴线连杆转向系统数字化平台设计[J]. 制造技术与机床, 2022(9): 82-89.
- Chen Jun, Lan Xi, Kang Shaopeng, et al. Design of digital platform for multi axis linkage steering system based on Python[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(9): 82-89.
- [57] 陈财. 矿用胶轮车工作制动器的参数化设计的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- Chen Cai. Investigation on parametric design of working brake of the mining rubber_tired vehicle[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [58] Saric I, Muminovic A, Colic M, et al. Development of integrated intelligent computer-aided-design system for mechanical power-transmitting mechanism design[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(7): 1-16.
- [59] 贺尚红, 黄诗辉, 周振华. 机械产品设计中基于多模型集成的二次开发技术研究[J]. 现代制造工程, 2022(7): 83-89.
- He Shanghong, Huang Shihui, Zhou Zhenhua. Research on secondary development technology based on multi-model integration in mechanical product design [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(7): 83-89.
- [60] Reddy J E, Venkatachalapathi N, Rangadu P V. Development of an approach for knowledge-based system for CAD modelling[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(5): 13375-13382.
- [61] 冀佳奇. 基于改进免疫算法的风电机组选择性拆卸序列规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- Ji Jiaqi. Selective disassembly sequence planning for wind turbines based on the improved immune algorithm [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [62] Se K Y. Customer experience design for smart product-service systems based on the iterations of experience-evaluate-engage using customer experience data[J]. Sustainability, 2022, 15(1): 686.
- [63] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- Zhou Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [64] 张映锋, 张党, 任杉. 智能制造及其关键技术研究现状与趋势综述[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(3): 329-338.
- Zhang Yingfeng, Zhang Dang, Ren Shan. Survey on current research and future trends of smart manufacturing and its key technologies[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(3): 329-338.
- [65] Zheng P, Wang H H, Sang Z Q, et al. Smart manufacturing systems for industry 4. 0: conceptual framework, scenarios, and future perspectives [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(2): 137-150.
- [66] Guo R. Application and effect evaluation of deep learning and computer aided design in product design[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2024, 21(S14): 63-76.
- [67] Jenis J, Ondriga J, Hreck S, et al. Engineering applications of artificial intelligence in mechanical design and optimization[J]. Machines, 2013, 11(6): 577.
- [68] 吴蕾, 刘务, 黄俊澄. 基于缺陷知识库的三维 CAD 源代码智能检测技术[J]. 机电工程技术, 2023, 52(6): 102-108.
- Wu Lei, Liu Wu, Huang Juncheng. Intelligent detection technology of 3D CAD source code based on a defect knowledge database [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2023, 52(6): 102-108.
- [69] Zhang M, Tao F, Zuo Y, et al. Top ten intelligent algorithms towards smart manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 71: 158-171.
- [70] Wang J, Ma Y, Zhang L, et al. Deep learning for smart manufacturing: methods and applications [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 144-156.
- [71] Sharp M, Ak R, Hedberg T. A survey of the advancing use and development of machine learning in smart manufacturing[J]. Jour-

- nal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 170-179.
- [72] Ayush R, Christopher M, Jonathan C. Learning to design from humans; imitating human designers through deep learning[J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(11): 111102.
- [73] Delaram J, Houshamand M, Ashtiani F, et al. A utility-based matching mechanism for stable and optimal resource allocation in cloud manufacturing platforms using deferred acceptance algorithm[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 60: 569-584.
- [74] Leng J W, Jiang P Y. Evaluation across and within collaborative manufacturing networks: a comparison of manufacturers interactions and attributes[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(15): 5131-5146.
- [75] Xiao Y, Li C D, Song L I, et al. A multidimensional information fusion-based matching decision method for manufacturing service resource[J]. IEEE Access, 2021, 9: 39839-39851.
- [76] Abtahi A R, Abdi F. Designing software as a service in cloud computing using quality function deployment[J]. International Journal of Enterprise Information Systems, 2018, 14(4): 16-27.
- [77] 闫萌, 李涛, 杨晨, 等. 面向机电产品绿色设计与评价协同的生命周期评价参数计算方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(12): 1453-1464.
- Yan Meng, Li Tao, Yang Chen, et al. Calculation method of LCA parameters for green design and assessment collaboration of electromechanical products[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(12): 1453-1464.
- [78] 魏宏静, 李少波. 云制造中产品个性化定制研究综述[J]. 工程设计学报, 2018, 25(1): 12-17.
- Wei Hongjing, Li Shaobo. Study of product personalized customization based on cloud manufacturing[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2018, 25(1): 12-17.
- [79] 赵飞宇. 云架构 CAD 软件及其关键技术与应用综述[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 959-978.
- Zhao Feiyu. Key technologies and applications for cloud CAD software[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(4): 959-978.
- [80] Wu D, Terpeny J, Schaefer D. A survey of cloud-based design and engineering analysis software tools[C]//Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. New York: ASME, 2016: 59341.
- [81] 新迪数字. 云天工 CAD 产品介绍 [EB/OL]. [2024-10-12]. https://www.yuncad.com/tgy_ent.html.
- Xindi Digital. Yuntiangong CAD product introduction. [EB/OL]. [2024-10-12]. https://www.yuncad.com/tgy_ent.html.
- [82] 李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 云制造系统 3.0——一种“智能+”时代的新智能制造系统[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 2997-3012.
- Li Bohu, Chai Xudong, Hou Baocun, et al. Cloud manufacturing system 3.0 — new intelligent manufacturing system in era of “Intelligence +” [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 2997-3012.
- [83] 刘力维, 郝博, 汪万炯. 飞机结构件智能协同设计方法与技术[J]. 工具技术, 2024, 58(2): 54-60.
- Liu Liwei, Hao Bo, Wang Wanjiang. Intelligent collaborative design method and technology of aircraft structure parts[J]. Tool Engineering, 2024, 58(2): 54-60.
- [84] Behrang A, Michael W. Digital twin of manufacturing systems; a case study on increasing the efficiency of reconfiguration[J]. At-Automatisierungstechnik, 2020, 68(6): 435-444.
- [85] Lu Y Q, Liu C, Wang I K, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61(2): 1-14.
- [86] Liu Q, Leng J W, Yan D X, et al. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 52-64.
- [87] Zhao R L, Yan D X, Liu Q, et al. Digital twin-driven cyber-physical system for autonomously controlling of micro punching system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 9459-9469.
- [88] 黄彬彬, 张映锋, 黄博, 等. 数字孪生驱动的复杂产品智能运维服务体系与核心技术[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 250-260.
- Huang Binbin, Zhang Yingfeng, Huang Bo, et al. Architecture and key technologies of digital-twin-driven intelligent operation & maintenance services for complex product[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 250-260.
- [89] 李浩, 陶飞, 王昊琪, 等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1320-1336.
- Li Hao, Tao Fei, Wang Haoqi, et al. Integration framework and key technologies of complex product design-manufacturing based on digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1320-1336.
- [90] Leng J W, Liu Q, Ye S D, et al. Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 63: 101895.
- [91] Leng J W, Zhang H, Yan D X, et al. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 1155-1166.
- [92] Liu Q, Zhang H, Leng J W, et al. Digital twin-driven rapid individualized designing of automated flow-shop manufacturing system [J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3903-3919.
- [93] 王亚彬, 王帅, 王金桐, 等. 基于数字孪生的装备保障关键技术研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12233-12241.
- Wang Yabin, Wang Shuai, Wang Jinguo, et al. Review on key technology of equipment support based on digital twin[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12233-12241.
- [94] Lu Y J, Zhao Z C, Wang W, et al. Digital twin product lifecycle system dedicated to the constant velocity joint[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 93: 107264.
- [95] 中华人民共和国工业和信息化部. “十四五”智能制造发展规划[EB/OL]. (2021-12-28)[2023-07-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664996.htm.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. “14th Five-Year Plan” intelligent manufacturing

- development plan [EB/OL]. (2021-12-28) [2023-07-02].
https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664996.htm.
- [96] 何援军. 国产 CAD 软件重启之路[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(11): 3057-3075.
 He Yuanjun. Road to restart domestic CAD software[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(11): 3057-3075.
- [97] 孙娟, 何祎. 中望软件: All-in-One CAX 自主研发与发展战略[J]. 软件导刊, 2022, 21(10): 243-245.
 Sun Juan, He Wei. ZW software: lindependent research and development strategy of All-in-One Cax[J]. Software Guide, 2022, 21(10): 243-245.
- [98] 华天软件市场部. 华天软件 CAPP 产品介绍[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2013(5): 44-45.
 Huatian Software Marketing Department. Huatian software CAPP product introduction[J]. CAD/CAM and Informatization of Manufacturing industry, 2013(5): 44-45.
- [99] CrownCAD. CrownCAD 软件介绍 [EB/OL]. [2024-10-12].
<https://www.crowncad.com/#/>.
 CrownCAD. CrownCAD software introduction [EB/OL]. [2024-10-12]. <https://www.crowncad.com/#/>.
- [100] 新迪 3D. 新迪 3D 轻量化引擎成功适配麒麟软件国产操作系统! [EB/OL]. [2024-10-12]. <https://www.xindi3d.com/thread-1129-1-1.html>.
 XinDi 3D. XinDi 3D lightweight engine is successfully adapted to Kirin Software's domestic operating system! [EB/OL]. [2024-10-12]. <https://www.xindi3d.com/thread-1129-1-1.html>.
- [101] 景然. 基于 SINOVIATION 的垂直分型铸造工艺 CAD 系统的开发[D]. 济南: 山东大学, 2019.
 Jing Ran. Development of vertical parting casting technology CAD system on SINOVIATION[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [102] 朱建峰, 徐志刚, 苏开远, 等. 基于 SINOVIATION 二次开发的 V 带轮参数化设计[J]. 现代制造工程, 2019(5): 104-109, 121.
 Zhu Jianfeng, Xu Zhigang, Su Kaiyuan, et al. Parametric design of V belt pulley based on secondary development of SINOVIATION [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(5): 104-109, 121.
- [103] Fowler P W, Guest S D, Owen J C. Applications of symmetry in point-line-plane frameworks for CAD[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2021, 8(2): 615-637.
- [104] Florian S, Susan L, Ali T. Improving aircraft conceptual design through parametric CAD modellers—a case study for thermal analysis of aircraft systems[J]. Computers in Industry, 2021, 130: 103467.
- [105] Venu B, Komma R V, Srivastava D. STEP-based feature recognition system for B-spline surface features[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(4): 500-512.
- [106] 吴铭臻. 工业大数据驱动定制生产优化的方法及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
 Wu Mingzhen. Industrial big data-driven custom production optimization's method and practical use[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [107] Zhou H F, Zhang S Y, Qiu L M, et al. A factorisation-based recommendation model for customised products configuration design[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(19): 6381-6402.
- [108] 曹勇. 基于数据挖掘的工艺知识发现与重用研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
 Cao Yong. Research on process knowledge discovering and reusing based on data mining[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [109] 来骥, 马跃, 吴舜, 等. 基于语义分析的运维数据关联知识库构建方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 218-223.
 Lai Ji, Ma Yue, Wu Shun, et al. Constructing operational data association knowledge base based on semantic analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 218-223.