

计算机应用

知识驱动的汽车覆盖件模面智能化设计方法

李勋玮, 韦 阳, 柳玉起, 章志兵

(华中科技大学 材料科学与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为解决汽车覆盖件模面设计严重依赖经验和企业数据复用率低的问题, 提出一种知识驱动的汽车覆盖件模面智能化设计方法。该方法提取了模面设计流程中的知识, 形成“抽象模板-实例模板-分区模板”3 层知识架构的智能化模板库, 并采用关键字检索和几何相似度检索进行智能化模板匹配, 实现了知识模板的自动积累和复用。该方法总结了模面设计过程中的人工经验, 形成以规则和公式为表达形式的知识, 与智能化模板相互结合, 实现了模面的自动化设计。结合基于 UG 平台的汽车覆盖件模面设计系统, 开发了知识驱动的模面智能化设计系统, 实现了设计知识自动积累和复用, 也实现了覆盖件模面的自动化设计。实际汽车覆盖件模型测试结果证明, 所提方法可有效提高模面设计全流程的效率。

关键词: 汽车覆盖件; 模面工程; 模板; 知识工程; 知识复用

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.032

中图分类号: TG76; TP319

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0246-08

Knowledge-driven intelligent design method for die surface of automotive cover panel

Li Xunwei, Wei Yang, Liu Yuqi, Zhang Zhibing

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the problem of heavy reliance on design experience and low reuse rate of enterprise data in the die surface design of automotive panel, a knowledge-driven intelligent design method for automotive panel die surface was proposed. Then, this method extracted the knowledge in the die surface design process, an intelligent template library with a three-layer knowledge architecture of “abstract templates, instance templates and partition templates” was formed, and the intelligent template matching was achieved by keyword search and geometric similarity search to realize automatic accumulation and reuse of knowledge templates. Furthermore, this method summarized the manual experience in the process of die surface design, the knowledge expressed in the form of rules and formulas was formed, combining with the intelligent template to realize the automatic design of die surface, and the knowledge-driven intelligent die surface design system was developed by automotive panel die surface design system based on platform UG, which realized the automatic accumulation and reuse of design knowledge and the automatic design of automotive panel die surface. The actual test results of automotive panel model show that the proposed method effectively enhances the efficiency of the entire die surface design process.

Key words: automotive panel; die surface engineering; template; knowledge based engineering; knowledge reuse

车身研发是汽车制造的重要环节, 是影响汽车制造周期和质量的关键因素, 其关键内容是覆盖件冲压工艺模面的设计与优化^[1]。模面设计严重依赖设计人员经验, 并且通常参考相似产品进行类比设计, 但是其领域内的工程专业知识具有经验性、不

确定性和模糊性, 缺乏有效的归纳与整理, 知识的复用与共享性较差^[2]。知识工程 (Knowledge Based Engineering, KBE), 是面向产品全流程的计算机集成处理技术, 以知识为内核, 通过对知识的扩充、繁衍、管理及应用来解决工程实际问题^[3]。KBE 打破了领域专业知识的交流与继承的障碍, 能够实现领域专业知识的驱动设计。

对于 KBE 技术在覆盖件设计领域的研究与应用问题, 有大量文献从理论与实际应用层面给出了不同的解决方法。陈军^[4]研究了基于模板实例化的覆盖件产品冲压工艺设计, 以产品间的相似度选择冲

收稿日期: 2023-01-22; 修订日期: 2023-04-16

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2021B0101220001)

作者简介: 李勋玮 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 82788637@qq.com

通信作者: 柳玉起 (1966-), 男, 博士, 教授

E-mail: liuyq@hust.edu.cn

压工艺模板进行模板驱动设计。张华伟^[5]开发了汽车覆盖件拉伸模具 KBE 系统,采用基于实例和规则的混合推理,提高知识的重用效率与模具设计效率。孙玉等^[6]将 KBE 应用于模具型面设计中,提出基于知识的模具型面设计流程,提高了模面设计自动化与智能化程度。张明杰等^[7]基于汽车覆盖件智能化设计系统 IDF (Intelligent Die Face),实现了基于分区模块的覆盖件工艺补充设计方法。

知识推理作为 KBE 的核心部分,对动态维护与扩容知识库,实现知识的自动积累与重用有着重要作用,主要可分为基于实例的推理 (Case-Based Reasoning, CBR) 与基于规则的推理 (Rule-Based Reasoning, RBR)。CBR 侧重于对实例的利用,通过类比先前的实例来解决问题^[8],而 RBR 侧重于对规则的利用,注重基于事先定义的规则进行推理^[9]。实例提供具体案例支持,规则对实例进行概括与总结。在 KBE 实践中,实例和规则往往相辅相成,作为知识的构成基础,为知识推理提供底层支撑。

目前,行业在同步工程的主要设计手段包括采用通用三维设计软件 (如 UG/CATIA) 以及采用专用设计软件 (如 AutoForm/DynaForm/IDF) 进行设计,但这些设计方法和软件普遍缺乏知识驱动的智能化设计方法。在 IDF 的基础上,本文提出一种知识驱动的的汽车覆盖件模面智能化设计方法。鉴于单一推理方法难以充分利用模面同步工程中各种类型的知识,故该方法采用实例和规则混合驱动的知识驱动方式,旨在让基于实例与基于规则的两种智能化设计方法相互促进与补充,能够更全面地利用领域专业知识,提高覆盖件模面设计的智能化程度。

1 基于知识的覆盖件模面智能化设计

基于知识的覆盖件模面智能化设计主要包括两部分:(1) 基于实例的智能化,运用 CBR 技术,积累历史的设计信息,可以快速复用已有设计实例,主要包括设计案例的表示、基于相似度的案例匹配和修正优化搜索到的案例等,着重于依赖过去已完成的成功案例来解决当前的问题;(2) 基于经验规则的智能化,即深度集成行业 Know-How 到软件中,行业 Know-How 指的是某一特定行业内部所积累的具有专业门槛与竞争优势的经验、规则和技术,着重于依赖预定义的经验规则集合,通过逻辑推理进行决策。

知识驱动的模面设计方法如图 1 所示,通过构建智能化模板库和集成行业 Know-How 以实现实例和规则混合驱动的覆盖件模面设计,主要包括以下部分。

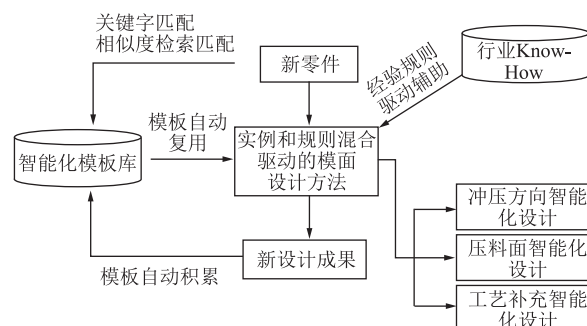


图1 实例和规则混合驱动的模面设计方法

Fig. 1 Method of die face design driven by instance and rule fusion

(1) 关键字匹配:系统依据产品名、材质和产品特征等关键字,自动化检索模板库中与输入关键字相匹配的抽象模板。

(2) 相似度检索匹配:相似度的主要评价指标如图 2 所示,一是覆盖件三维轮廓曲线离散点集的相似度,表达覆盖件产品边界的相似性;二是覆盖件轮廓曲面外切向集的相似度,表达覆盖件产品轮廓处曲面的相似性。将两者加权平均得到整体相似度。

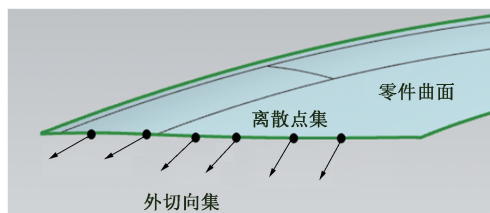


图2 相似度评价指标

Fig. 2 Evaluation index of similarity

本文提出基于不同粒度 (实例模板、分区模板) 的相似度检索匹配方式,依据覆盖件的整体或局部相似性,合理选择适配粒度进行相似度的检索匹配。相似度采用动态时间规整 (Dynamic Time Warping, DTW) 算法进行计算^[10]。DTW 是机器学习中的一种经典算法,运用动态规划的思想对时序数据进行相似度计算,主要计算对象为两规模可以不一致的离散数字序列。基于欧式距离的 DTW 相似度评估方法是一个相当准确、强大且简单有效的离散数字序列相似性度量方法^[11]。

(3) 冲压方向智能化设计:冲压方向的合理性关系到材料能否充分流动,是否会产生破裂与起皱等质量问题。冲压方向智能化设计主要采用匹配抽

象模板继承冲压方向的设计方式,能够较好地利用产品曲面特征的相似性。

(4) 压料面智能化设计:压料面设计的主要内容是依据已经确定的冲压方向,以及覆盖件模型本身的边界和轮廓信息,设计有利于材料流动与塑性变形的三维曲面^[12]。压料面智能化设计采用实例和规则混合驱动的设计方式,将匹配实例模板继承压料面数据和基于经验规则自动生成压料面两种方式相结合,综合评估模板相似度及自动化生成效果并进行选择。

(5) 工艺补充智能化设计:工艺补充的设计内容主要包括设计分模线与设计工艺补充曲面。分模线是指用于分隔模具及切割压料面的三维曲线。添加工艺补充曲面的目的是顺利拉延出合格的制件,主要由覆盖件边界、分模线和截面线组成的线框确定其几何造型。工艺补充智能化设计同样采用实例和规则混合驱动的设计方式,结合匹配实例模板继承工艺补充数据、匹配分区模板继承工艺补充数据和基于经验知识自动生成工艺补充 3 种方式,综合评估模板继承粒度、相似度及自动化生成效果并进行选择。

2 关键技术

为实现知识驱动的汽车覆盖件模面智能化设计方法,需要解决模板库如何组织与表达、模面设计领域中大量的专业隐形知识如何以公式及规则表达、如何依据系统各模块特性灵活运用基于实例和基于

规则的设计方法。为解决上述问题,提出以下方案。

2.1 智能化模板库

模板技术是从一组类似事物中抽象出框架性模板并构成具有可复用且带有丰富信息的功能结构单元^[13]。在覆盖件模面设计中,使用模板库技术可以帮助设计人员快速选择适用的设计模板,减少重复设计的时间,提高设计效率^[14]。本文提出智能化模板库的概念。智能化模板库是对已有覆盖件模面设计数据进行归纳总结的模板集合。这些模板可以包括不同形状、尺寸与特性的覆盖件模面设计数据及相关的工艺参数、加工要求及覆盖件特征信息。智能化主要体现在:覆盖件完成模面设计后可自动积累至模板库中;通过相似度匹配的方式选择适配模板进行模板驱动设计;支持不同数据粒度的模板积累和复用;模板库对模面设计数据进行轻量化表达与存储。

智能化模板库设计思路如图 3 所示,以下对智能化模板库中的相关概念进行解释说明,其中, n 为产品类别数量。

由于同种类型覆盖件具有一定的相似性,但是大多数情况下部分分区存在差异,在工艺补充使用模板的过程中,存在全盘复用实例模板不合理的情况,故提出分区模板的概念。实例模板包含了以往实例的工艺补充设计知识,在此基础上再进行一层划分,将实例模板基于分区划分为分区模板,这样在工艺补充复用模板的场景下,当前零件可以在不同分区中基于分区相似度检索匹配相似度高的分区模板,实现颗粒度更小的、效果更好的设计数据继

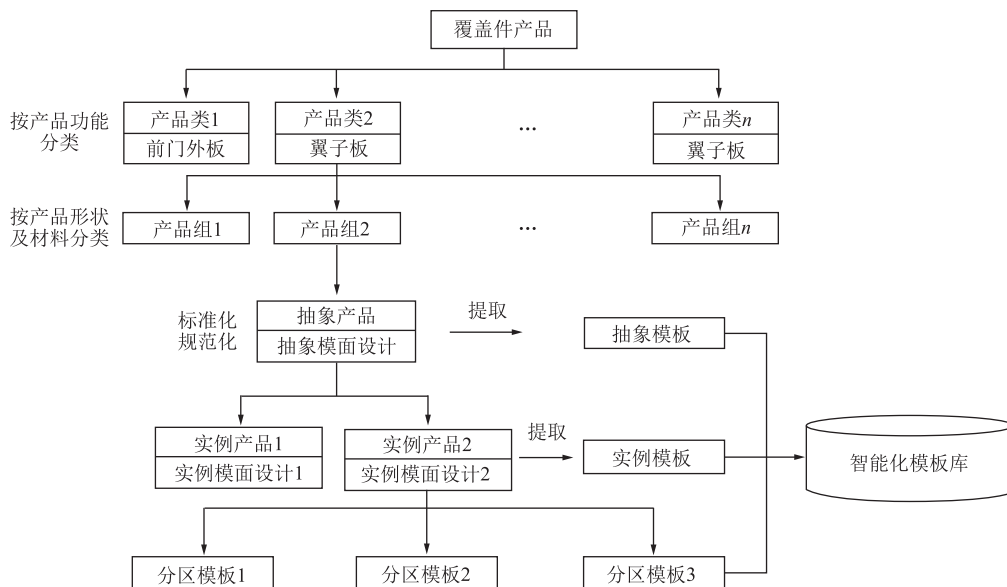


图 3 智能化模板库设计思路

Fig. 3 Design idea for intelligent template library

承。最终表示为抽象模板-实例模板-分区模板的3层模板结构。

2.2 工艺补充智能化设计

工艺补充是指为了顺利拉深成形出合格的制件，在覆盖件的基础上添加的那部分材料。工艺补充是拉深件设计的主要内容，不仅对拉深成形起着重要影响，而且对后续的修边、整形和翻边等工序的方案也有影响。工艺补充面的设计原则主要有以下几点：(1) 保证良好的塑性变形条件；(2) 外工艺补充部分尽量小；(3) 对后工序有利。

IDF系统已集成基于模板参数截面线的工艺补充设计方法。全参数截面线模板如图4所示^[1]，主要分为与产品面相接的产品附加区、起过渡作用的凹筋区及凸筋区、与压料面相接的压料延伸区等。基于全参数模板，并结合生产工艺设计要求，派生

出数类子截面线模板。工艺补充设计流程如图5所示^[1]，主要包括布置截面线、构建网格、创建工艺补充面。

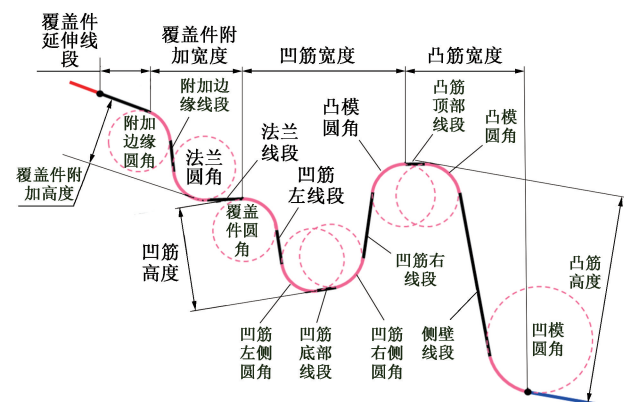


图4 全参数截面线模板

Fig. 4 Full parameter section curve template

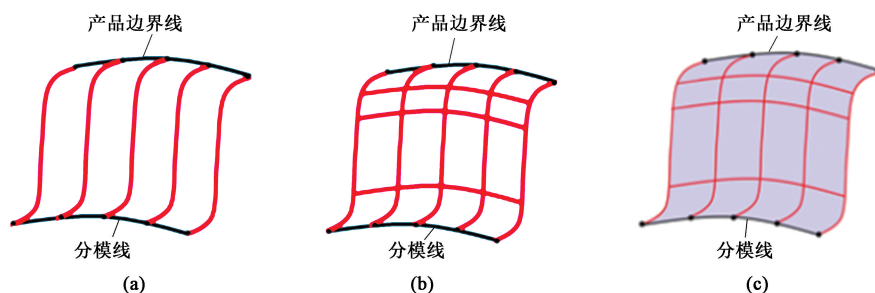


图5 工艺补充流程

(a) 截面线布置 (b) 网格构建 (c) 工艺补充面构建

Fig. 5 Process supplement flow

(a) Layout of section curve (b) Network construction (c) Addendum surface construction

2.2.1 基于规则的工艺补充智能化设计方法

覆盖件模面设计中，一般会对产品边界进行分区，再根据分区特征与工艺要求造型截面线，图6为一种翼子板分区方式与分区截面线的类型。Platform截面线与Bar截面线均派生自图4的全参数截

面线模板，在分区1处采用Platform截面线可以较好地保持工艺补充曲面与产品边界曲面的连续性，有利于材料流动；在分区2处采用Bar截面线可控制图6b中棱线的滑移，使拉延更加充分。

基于该设计原则，提出基于规则的工艺补充智能

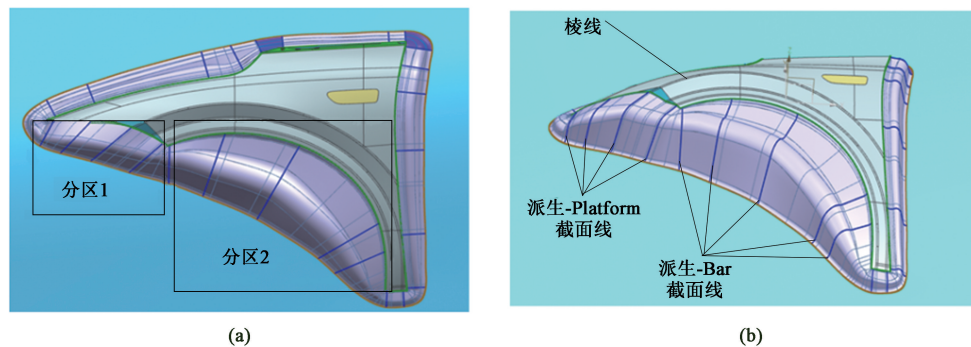


图6 翼子板分区与截面线造型

(a) 分区情况 (b) 截面线造型

Fig. 6 Fender partition and section curve modeling

(a) Partition condition (b) Section curve modeling

化设计方法,以图 7a 所示的发盖外板为例进行说明(零件对称,故以一半边界图示),方法主要流程如下。

(1) 搜索边界特征点:使用道格拉斯-普克(Douglas-Peucke, D-P)算法搜索产品边界特征点,D-P 算法是使用多边形去逼近轮廓线的算法,输入当前产品边界上一定精度的离散点集,为输入的离散点集通过递归的方式构建一个近似多边形,递归

的终止条件是当前近似多边形到产品边界离散点集的所有欧式距离均小于给定误差值,输出为产品的边界特征点集 P_1 ^[15],如图 7b 所示。由于 D-P 算法寻找出的 P_1 特征点集多位于边界曲线曲率较大处及拐角处,翻边面线长通常较短,对后续流程有影响,故再增加相邻特征点的中间曲线参数点作为新的特征点加入集合,输出新的特征点集 P_2 ,如图 7c 所示。

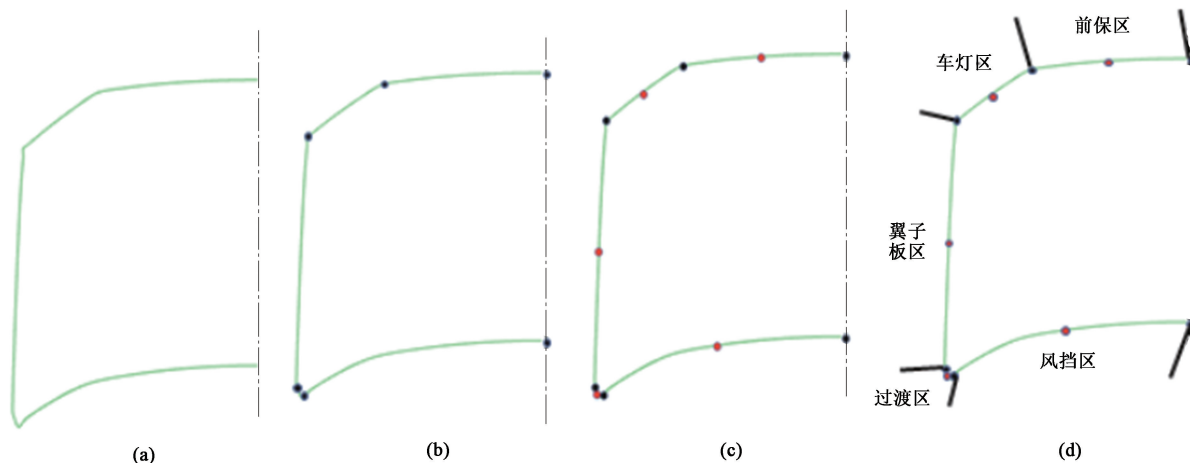


图 7 搜索边界特征点与边界分区

(a) 原始边界 (b) 边界特征点集 P_1 (c) 边界特征点集 P_2 (d) 边界分区

Fig. 7 Feature points and boundary partition of search boundary

(a) Original boundary (b) Boundary feature point set P_1 (c) Boundary feature point set P_2 (d) Boundary partition

(2) 边界分区:基于产品特征规则对特征点集 P_2 进行分区。分区方式是将边界曲线沿冲压方向投影到与冲压方向垂直的二维平面上,然后求取投影线的二维包容盒,再以所求包容盒为参照,依据特征点集 P_2 的坐标特征寻找分区划分点,即可确定边界分区。如图 7d 所示,将产品边界划分为前保区、车灯区、翼子板区、过渡区和风挡区共 5 个分区。

(3) 计算分模线位置点:依据经验规则为各分

区给予造型规则,预置符合该分区工艺要求的模板截面线类型,并为其中部分关键参数,比如凸模圆角、凹模圆角等分配经验值,而后遍历各个分区中的特征点。起始约束为截面线的起始方向与此处产品面外切向一致,中间约束为预分配参数值彼此之间的装配与制约关系,终止约束为落点在压料面上,如图 8a 所示,计算出如图 8b 所示分模线位置点集 P_3 。

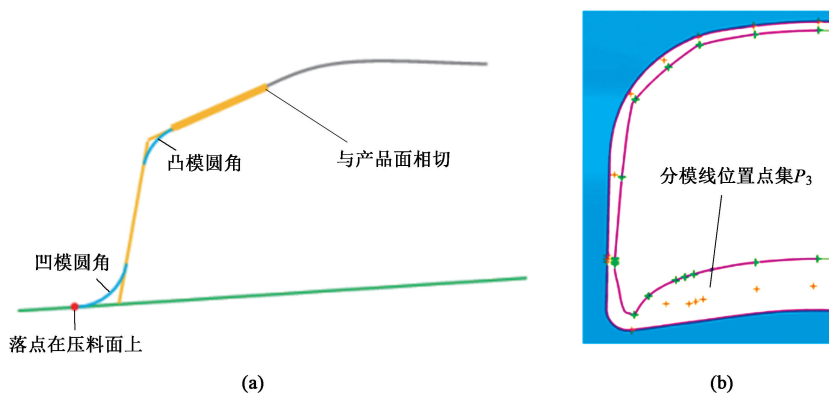


图 8 计算分模线位置点集

(a) 约束关系 (b) 计算结果

Fig. 8 Calculation of parting line position point set

(a) Constraint relation (b) Calculation result

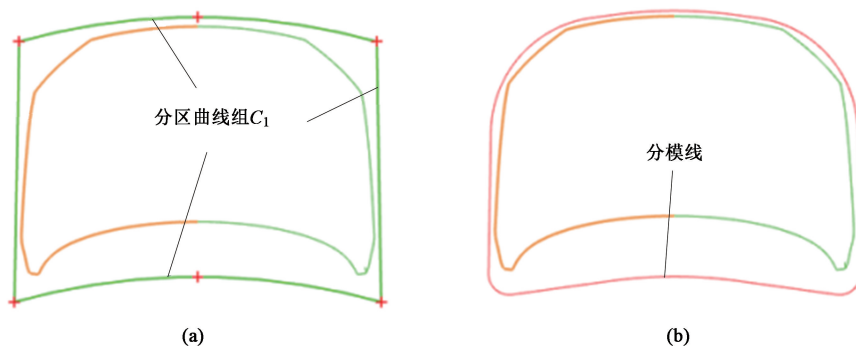


图9 构建分模线

(a) 计算偏置曲线组 C_1 (b) 分模线构建结果

Fig. 9 Parting line construction

(a) Calculation of offset curve group C_1 (b) Construction result of parting line

(4) 构建分模线：遍历分区，基于分区中的特征点以及分区形状特征生成分区曲线组，依次向外侧偏置得到偏置曲线组 C_1 (图 9a)。要求曲线组 C_1 中的每条偏置曲线刚好位于步骤 (3) 中计算出的分模线位置点集 P_3 外侧，有利于减小工艺补充曲面的面积，提升材料利用率。对曲线组 C_1 中顺序相接的曲线进行过渡连接以及角部光顺，得到分模线 (图 9b)。

(5) 构建工艺补充面：D-P 算法与参数插值得到的边界特征点集 P_2 可以部分代表产品边界的几何特征，出于构建效果更佳的工艺补充的目的，在点集 P_2 的基础上，基于经验规则添加部分经验点并筛选，组成截面线候选插入点集作为输入部分，按照前文介绍的布置截面线-构建网格-创建工艺补充面的流程进行工艺补充的创建。

2.2.2 基于实例的工艺补充智能化设计方法

前文已介绍了智能化模板库的架构、3 层模板设计思路，以及相似度检索匹配的相关内容，基于此本文提出基于实例的工艺补充智能化设计方法。

将实例模面设计提取为实例模板存储入库时，出于优化模板复用效果的目的，实例模面设计会被提取为实例模板，并按照分区拆分为数个分区模板，按不同数据粒度统一存储入模板库中，如图 10 所示。后续使用时既可以以整体形式使用实例模板，也可以以分区形式使用该实例模板的部分或全部，这种设计方式使得模板的使用复用更加灵活。分别以实例及分区为单位，自动检索计算模板库中相似度高的模板，综合评估实例模板与分区模板的相似度，选择相似度更高、继承粒

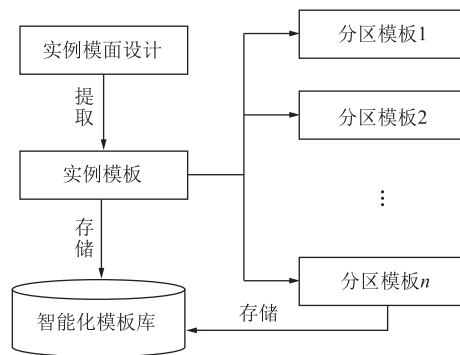


图10 实例模板与分区模板的存储

Fig. 10 Storage of instance templates and partition templates

度更加适配的模板。

确定模板粒度并绑定好模板后，当前工艺补充的模板驱动设计均会以已绑定模板为参照进行，模板中主要存储 3 种数据：截面线参数、产品边界参数和分模线参数。这些数据分为依赖坐标表达的相对数据与不依赖于坐标系表达的绝对数据。在进行模板继承之前，需要将模板中的点与向量的相对坐标基于绑定模板与当前产品的坐标系进行变换，再进行模板继承。模板继承的输入数据是变换后的相对数据与原有的绝对数据，输出是依据中间数据构造的分模线与截面线，按照前文介绍的布置截面线-构建网格-创建工艺补充面的流程进行工艺补充的创建。新的实例模面设计完成后，将自动被提取为新的实例模板及下属分区模板，自动积累至模板库中，完成知识的自动复用与积累。

3 实例效果展示

在汽车覆盖件模面智能化设计系统 IDF 基础上，

基于 NX 平台, 验证提出的知识驱动的汽车覆盖件模面智能化设计方法, 选取经典覆盖件产品发盖外板进行模面全流程设计。

依据关键字检索, 示例零件使用材料为铝, 对称平面为 XOZ , 模板库自动检索出相匹配的抽象模板, 并展示该抽象模板的冲压工艺和工艺规划内容, 进行抽象模板的绑定。抽象模板采用对称非镜像工艺, 对称面选取 XOZ , 工序规划只设置一道 OP10 拉延工序。在该抽象模板的存储文件中, 如图 11 所示, 可以看到其拉延工序下冲压坐标轴原点坐

[冲压工艺]	
Process=	Symmetrical
Mirror=	Unmirrored
SymmetricalPlane=	XOZ
RotationOrder=	XYZ
OffsetDistance=	0
[工序规划]	
OP10=	Draw;Infor
[冲压方向]	
OP10=	-420, 0, 830; 0, -9, 0

图 11 抽象模板数据存储文件

Fig. 11 Data store file of abstract template

标为 $(-420, 0, 830)$, 旋转角度分别为绕 X 轴旋转 0° 、绕 Y 轴旋转 -9° 、绕 Z 轴旋转 0° 。

在当前零件进行冲压工艺、工艺规划和冲压方向等的设计时, 会依据当前绑定的抽象模板进行智能提示, 直接选择使用抽象模板数据。

基于经验规则自动生成压料面。如图 12 所示, 可以看出自动生成的压料面是单曲面类型, 其型面随型效果较好, 有利于材料的塑性变形流动, 可有效减小成形难度。

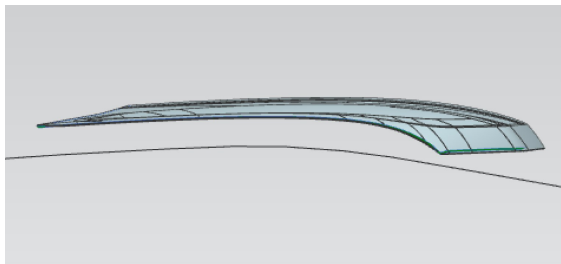
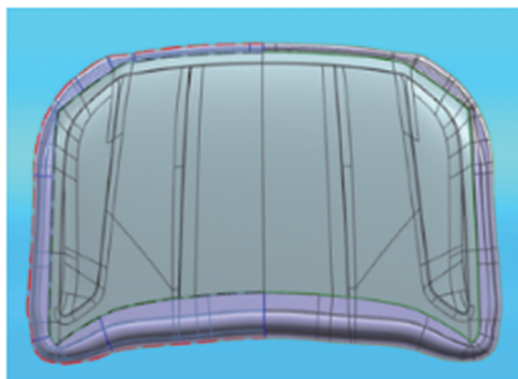


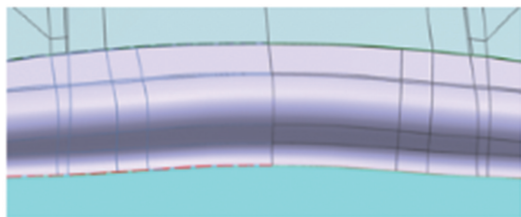
图 12 压料面知识驱动设计结果

Fig. 12 Knowledge-driven design result of binder surface

基于经验规则自动生成分模线与工艺补充。如图 13 所示, 可以看出自动生成的截面线形状尺寸比



(a)



(b)

图 13 工艺补充知识驱动设计结果

(a) 工艺补充总览 (b) 工艺补充局部

Fig. 13 Knowledge-driven design result of process supplement

(a) Overview of process supplement (b) Local of process supplement

较合理, 工艺补充面光滑饱满, 曲面质量与精度符合要求。从图 14 所示的基于 FASTAMP 的 CAE 仿真结果可以看出, 产品区域为安全区域, 符合模面同步工程设计要求。

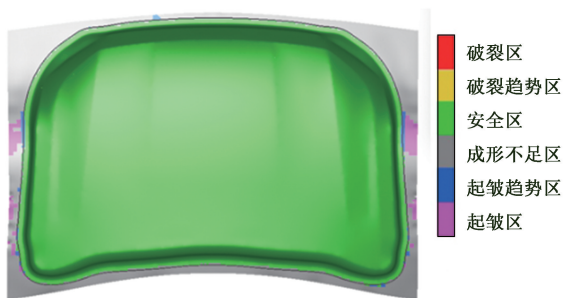


图 14 拉延工序模拟成形极限图

Fig. 14 Forming limit diagram of drawing process simulation

将经典覆盖件翼子板与发盖外板的模面同步工程知识驱动设计时间与 UG11.0 原生功能手动设计时间、IDF 系统设计时间统计记录并加以比较, 如表 1 所示。结果显示, 知识驱动的汽车覆盖件模面智能化设计方法在设计效率上明显高于 UG11.0 原生功能手动设计方法与 IDF 系统设计方法。

表 1 知识驱动设计时间与其他方式设计时间对比 (min)
Table 1 Comparison of knowledge-driven design time with other method design time (min)

产品名称	设计时间		
	手动设计	IDF 系统设计	知识驱动设计
翼子板	478	156	20
发盖外板	130	40	8

4 结语

针对覆盖件模面设计具有复杂性、经验性与模糊性的特点，提出了知识驱动的汽车覆盖件模面智能化设计方法。将该方法集成至汽车覆盖件模面智能化设计系统 IDF 中，实现了知识的高效复用，提高了模面全流程设计效率，对汽车覆盖件的智能化设计具有重要意义。

参考文献：

[1] 王振. 汽车覆盖件模面智能化设计方法研究与应用 [D]. 武汉：华中科技大学，2023.
Wang Z. Research and Application on Intelligent Design Method for Die Face of Automobile Covering Panels [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

[2] 王祥刚. 基于 UG 的汽车覆盖件模具模板化设计系统的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2010.
Wang X G. Study on the Template Design System of Automobile Panel Dies Based on UG [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2010.

[3] 袁国铭，李洪奇，樊波. 关于知识工程的发展综述 [J]. 计算机技术与自动化，2011 (1)：138-143.
Yuan G M, Li H Q, Fan B. Overview of the development of knowledge engineering [J]. Computing Technology and Automation, 2011 (1)：138-143.

[4] 陈军. 基于模板的汽车覆盖件冲压工艺快速设计关键技术研究 [D]. 天津：天津大学，2004.
Chen J. Study on Key Techniques of Template Based Rapid Design for Automobile Panel Stamping Process [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

[5] 张华伟. 汽车覆盖件拉深模具设计中知识推理技术的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015.
Zhang H W. Research on Knowledge Reasoning Technology of Drawing Die Design for Auto Body [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.

[6] 孙玉，王义林. 汽车覆盖件模具型面设计方法的研究 [J]. 锻压装备与制造技术，2007 (1)：83-86.
Sun Y, Wang Y L, Research on the design method of the automo-

bile panel die face [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2007 (1)：83-86.

[7] 张明杰，柳玉起，章志兵，等. 基于特征分区的汽车覆盖件工艺补充智能模块化设计方法研究 [J]. 模具工业，2023，49 (5)：11-17.
Zhang M J, Liu Y Q, Zhang Z B, et al. Research on intelligent modular design method for process supplement of body cover panel based on feature partition [J]. Die & Mould Industry, 2023, 49 (5)：11-17.

[8] 文家富，郭伟，邵宏宇. 基于领域本体和 CBR 的案例知识检索方法 [J]. 计算机集成制造系统，2017，23 (7)：1377-1385.
Wen J F, Guo W, Shao H Y. Case retrieve methodology based on domain ontology and case-based reasoning [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23 (7)：1377-1385.

[9] Wei X B, Yuan H, Wang H, et al. Intelligent design for automotive interior trim structures based on knowledge rule-based reasoning [J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21: 1149-1167.

[10] Huang L, Gong L, Chen Y T, et al. Trajectory similarity matching and remaining useful life prediction based on dynamic time warping [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022 (1)：5344461.

[11] 陈海燕，刘晨晖，孙博. 时间序列数据挖掘的相似性度量综述 [J]. 控制与决策，2017，32 (1)：1-11.
Chen H Y, Liu C H, Sun B. Survey on similarity measurement of time series data mining [J]. Control and Decision, 2017, 32 (1)：1-11.

[12] 史刚. 汽车覆盖件拉延件设计 [J]. 模具技术，2004 (5)：35-39.
Shi G. Design of automotive panel drawing parts [J]. Die and Mould Technology, 2004 (5)：35-39.

[13] 周超. 支持快速设计的产品模型重用技术研究及平台构建 [D]. 武汉：武汉大学，2015.
Zhou C. Research on Product Model Reuse Technology and Platform Construction Supporting Rapid Design [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.

[14] 张智霞. 基于 CATIA 平台的稳健模板模面关联结构设计研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2017.
Zhang Z X. Research of Die-face Related Structure Design Method of Stable Template Based on CATIA [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[15] 张胜，朱才连，钟世明. Douglas-Peucker 算法的改进及应用 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)，2005 (5)：671-674.
Zhang S, Zhu C L, Zhong S M. Improvement and application of douglas-peucker algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2005 (5)：671-674.