

计算机应用

## 小模数齿轮注塑工艺智能驱动设计方法

孔 炎<sup>1</sup>, 张希磊<sup>1</sup>, 张光彦<sup>2</sup>, 章志兵<sup>1</sup>, 柳玉起<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 材料成型与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中山市乙之上齿轮技术有限公司, 广东 中山 528415)

**摘要:** 小模数齿轮注塑成形精度要求高, 工艺要求严格, 目前的工艺设计主要依赖于设计人员的经验, 严重影响产品开发周期和成形质量。针对这一问题, 提出了一种小模数齿轮注塑工艺智能驱动设计方法。基于定义的齿轮分区模版, 通过创建截面线, 利用自动识别算法完成齿轮数字化; 构建细化至零件层面的知识库, 在知识库中查找相似齿轮零件; 依据相似零件的成熟工艺和零件层面的知识, 对新零件的成形工艺进行驱动设计, 实现知识重用和知识驱动。最后, 在 NX 平台上实现了小模数齿轮注塑工艺智能设计系统, 并在两家注塑产品制造企业得到应用。案例分析和工业应用证明了系统的有效性, 识别检索效率提高了 97% 以上, 试模次数减少了 66%。

**关键词:** 小模数齿轮; 注塑成形; 特征识别; 智能检索; 知识驱动

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.032

**中图分类号:** TH132.41; TP29

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 02-0256-09

## Intelligent driven design method for injection molding process of small module gear

Kong Yan<sup>1</sup>, Zhang Xilei<sup>1</sup>, Zhang Guangyan<sup>2</sup>, Zhang Zhibing<sup>1</sup>, Liu Yuqi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Zhongshan City B Gear Technology Co., Ltd., Zhongshan 528415, China)

**Abstract:** The injection molding of small module gear requires high precision and strict process control, and the current process design mainly relies on the experience of designers, which significantly affects the development cycles and forming quality of product. Regarding this issue, an intelligent driven design method for the injection molding process of small module gear was proposed, and based on the defined gear partition templates, the gear was digitized by creating cross-sectional lines and utilizing an automatic recognition algorithm. Then, a knowledge base refined to the level of parts was constructed in which to search the similar gear parts. Furthermore, based on the mature processes of similar parts and the knowledge at the level of parts, the forming process for new parts was driven and designed to realize the knowledge reuse and knowledge driven. Finally, an intelligent design system for the injection molding process of small module gear was realized on the NX platform, which was applied in two injection molding product manufacturing enterprises. Case analysis and industrial applications show that the system is effective, with an increase of over 97% in the recognition and retrieval efficiency and a reduction of 66% in the number of die trials.

**Key words:** small module gear; injection molding; feature recognition; intelligent retrieval; knowledge driven

齿轮作为机械传动系统中最常用的重要基础件, 其设计制造一直受到国内外学者的关注。注塑小模数齿轮具有体积小、重量轻、传动噪声低和抗冲击等显著优势, 广泛应用于智能汽车、AI 机器人和

5G 通讯等领域<sup>[1]</sup>。传统的齿轮注塑成形流程为: 首先根据设计人员的经验设计模具, 然后通过试制反复调整模具和工艺参数, 直至成形成功再进行批量生产<sup>[2]</sup>。该过程繁琐、耗时, 且容易出错。设计的质量很大程度上取决于设计人员的技能、经验和知识<sup>[3]</sup>。因此, 通过在制造过程中实现智能设计以摆脱经验设计具有重要意义。

目前, 产品制造过程的人工智能技术主要面向生产服务, 以海量的样本点为基础, 利用神经网络、遗传算法、深度学习等方式, 通过解决生产和质检的代工问题, 提高生产效率和生产质量<sup>[4-6]</sup>。而齿

收稿日期: 2024-10-31; 修订日期: 2025-02-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2008203)

作者简介: 孔 炎 (1987-), 男, 博士研究生

E-mail: ky\_huster@foxmail.com

通信作者: 章志兵 (1978-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangzb@hust.edu.cn

轮作为单件产品,具有不同的形状结构和材料,因而样本点不具有通用性,需要考虑基于类比设计的智能设计方法。面向对象的 KBE (Knowledge-Based Engineering) 技术通过从捕获的知识中定义描述良好的对象来解决问题,其目的是类比设计和知识重用<sup>[7]</sup>。知识工程的概念由斯坦福大学 Feigenbaum E A 教授等<sup>[8]</sup>提出,使得人工智能从学科研究逐渐走向实际应用。井维峰等<sup>[9]</sup>将有限元分析法与工艺、模具等知识推理机制相结合,开发了齿轮精锻智能设计系统,用于模具设计和工艺设计。王文波<sup>[10]</sup>采用特征技术和面向对面建模技术建立齿轮信息模型,并结合专家系统,实现了齿轮设计过程和强度分析的智能化,并开发了 PDM (Product Data Management) 和 CAD (Computer Aided Design) 集成系统,管理产品知识。李阳<sup>[11]</sup>将实例推理技术与遗传算法相结合,智能优化滚齿切削工艺参数。Es-anakula J R 等<sup>[12]</sup>利用知识工程 (KBE) 将齿轮设计 AGMA 规则融入到 CAD 设计计算和参数化建模中,有效提高了齿轮设计效率。基于 KBE 的设计流程如图 1 所示。设计者通过用户界面输入参数,结合系统的推理模块和知识库中的规范和标准,通过 CAD 模块输出 3D 模型,然后进行仿真和分析,直至产品定型,定型后的产品通过知识获取接口补充知识库<sup>[13-15]</sup>。由于在设计过程中融入技术标准和规范,该方法可以减少产品制造工艺设计中不必要的错误,避免重复工作,从而缩短设计时间。

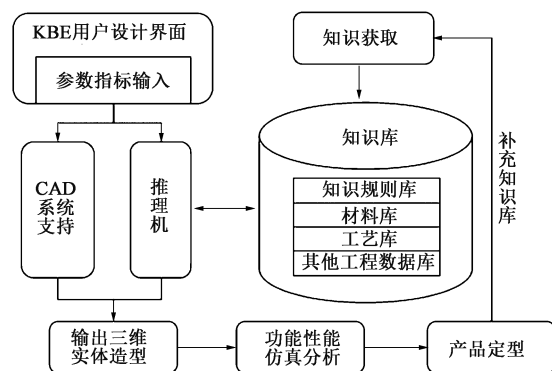


图1 基于 KBE 的设计流程

Fig. 1 Design process based on KBE

然而,目前 KBE 设计在产品实际设计生产中的应用很少,主要原因有以下两个方面:(1) 输入模块需要用户手动输入参数,这就要求设计者具有丰富的专业知识和从业经验,其本质并未解决产品设计制造过程依赖经验的问题;(2) 推理基于的知识是由规范标准和专业公式图表组成的通用知识,其

本质是专家数据库,而且重用的知识未细化至零件层面,推理设计质量低。

针对这些问题,本文提出了一种小模数齿轮注塑工艺智能驱动设计方法。通过定义圆柱直齿轮的分区模板,自动完成齿轮模型的数字化计算,进而通过基于相似度计算的智能检索算法,在知识库中找到相似的模型,最后以相似模型为基础,推理计算产品制造工艺,实现产品制造过程中的知识重用。基于该方法,在 NX 平台上集成 CAA (Computer-Aided Analysis) 技术开发了智能驱动设计系统,显著提高了产品的制造效率和质量。

## 1 智能设计方法

本文提出的小模数齿轮注塑工艺智能设计方法的目的在于摆脱经验设计,方法包括知识驱动和类比设计。知识驱动的前提是建立广义知识库,同样,类比设计的基础是建立零件制造全流程知识库,因此,构建零件层面的知识库是该方法的核心。实现类比设计的前提是相似度匹配,而实现零件间相似度计算的前提是将产品数字化,因此,该方法的关键技术包括特征识别、相似度计算和驱动设计。特征识别是实现产品的数字化,相似度计算是寻找知识库中的相似零件,驱动设计是实现模具和工艺的自动设计。

### 1.1 小模数齿轮注塑工艺智能设计流程

小模数齿轮注塑工艺智能设计流程如图 2 所示,输入模型为齿轮 3D 模型,输出为推理设计的成形工艺参数。基于系统预设的分区模版,齿轮模型通过特征识别模块自动计算齿轮的齿形特征参数、局

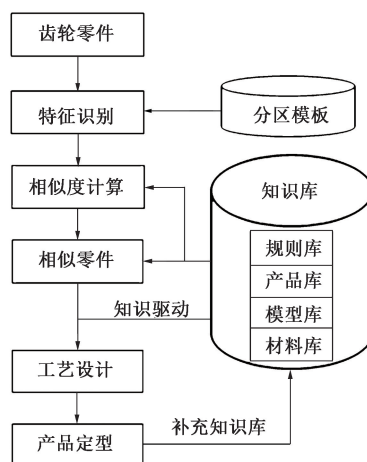


图2 小模数齿轮注塑工艺智能设计方法的流程

Fig. 2 Flow of intelligent design method for injection molding process of small module gear

部特征参数和结构特征参数；进而利用相似度计算寻找知识库中的相似模型；最后以相似模型成熟的工艺设计为基础，结合知识库中规则知识，驱动设计输入模型的成形工艺参数。

产品定型生产标志着案例设计的结束，它将被纳入数据库中，以此不断丰富和完善知识库的内容。数据库的核心功能是存储模型信息、特征数据以及工艺细节，并通过不断地增加案例确保知识重用系统的可持续性和自我完善能力。

## 1.2 知识库结构

构建广义知识库，将知识以零件为载体是本方法的核心。知识库的组织架构如图 3 所示，包括模型库、关键字库、材料库、产品库、规则库、模板库。其中，模型库中集中存储齿轮的特征参数组，以提高检索效率；关键字库存储系统进行关键字检索用到的关键字集合；材料库存储齿轮的材料信息；产品库是整个知识库的主体，存储每个产品的设计生产制造全流程信息，包括成功案例和非成功案例，并统计这些案例形成单件产品规则（ $V_{01} \sim V_{ok}$  为方案变更版本，即第 1 版~最终方案）；模板库存放知识库模板，模板库为其他子库提供信息入库模板，便于系统读取和识别信息。规则库分为通用规则库和产品规则库两个部分，其中通用规则库存储设计标准、行业规范和通用设计规则；产品规则库按照产品名称存储在产品库中相应齿轮文件夹下，存储内容为产品制造过程中产生的逻辑规则以及数据之间的对应关系，以数学函数、布尔运算、逻辑关系、图表信息、数据组合等形式存储。

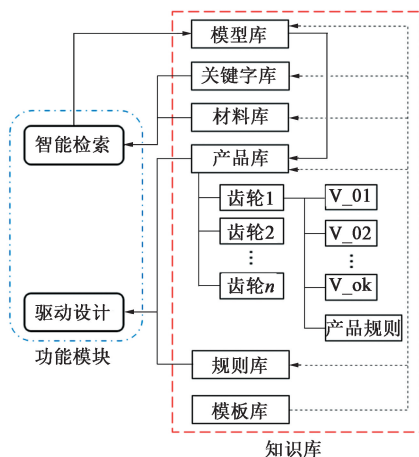


图 3 知识库结构

Fig. 3 Knowledge base structure

知识库中，关键字库和材料库为智能检索模块提供关键字信息和材料参数支持，智能检索模块利

用检索算法进入模型库中查找相似模型，根据相似模型齿轮类型和名字定位到产品库中的位置，产品库和规则库为驱动设计提供驱动信息。

## 2 关键算法

### 2.1 特征识别

特征识别是算法自动完成齿轮数字化的过程。由于齿轮是回转体结构，可以通过创建截面线进行特征识别，流程如图 4 所示。自动识别的参数包括：齿形特征参数、局部特征参数和结构特征参数。输入模型为齿轮 3D 模型，输出模型为特征参数组。具体步骤如下：

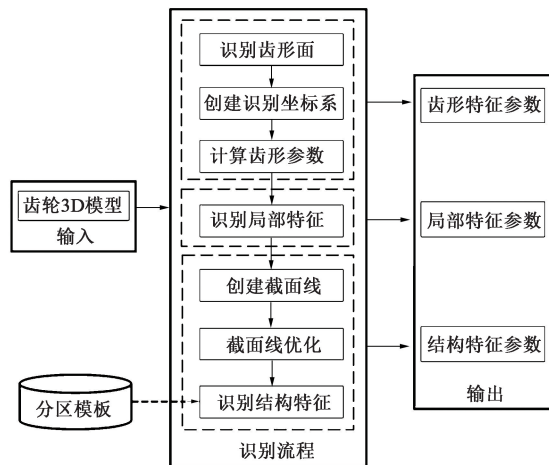


图 4 特征识别流程

Fig. 4 Flow of feature recognition

- (1) 遍历齿轮所有面，确定齿形面；
- (2) 以主齿形面中心为原点，以主齿形面法线方向为+Z 向，创建识别坐标系；
- (3) 提取主齿形面的齿形轮廓线，计算齿形特征参数；
- (4) 根据拓扑关系，识别齿轮的局部特征<sup>[16-17]</sup>，局部特征包括局部孔、局部凹槽、外接安装柱、齿轮挡板；
- (5) 根据扇形面形状，识别齿轮中的扇形面，并根据扇形面在识别坐标系下的 Z 坐标对扇形面进行分组；继而寻找扇形面重叠区域，在重叠区域避开局部特征创建截面线；若不存在局部特征和扇形面，则根据识别坐标系的 XOZ 平面创建截面线；
- (6) 对截面线进行降噪处理，包括去除圆角和倒角，去除微型凸台和凹槽，去除螺纹等；
- (7) 根据分区模版，识别齿轮结构分区，基于

分区模版，计算各分区对应的截面线参数。

本方法定义的分区模版包括：通孔区、加强区、接口区。通孔区是指齿轮以中心轴为中心的通孔，包括直孔和阶梯孔两种形式，如图 5 所示，距离中心轴最近的竖直线表示通孔区截面线。通孔区不必分区，在某些齿轮结构中，可不存在通孔区。

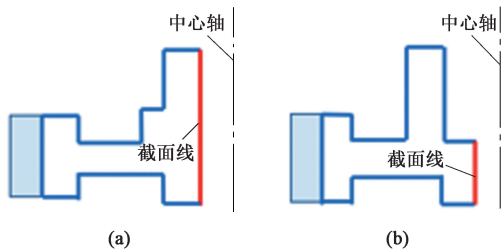


图 5 通孔区截面线  
(a) 直孔 (b) 阶梯孔

Fig. 5 Cross-sectional lines of via area  
(a) Straight hole (b) Step hole

加强区是指圆柱直齿轮中连接齿形和对外接口的区域，有 8 种类型，每种类型的截面线及对应齿轮示例如表 1 所示，两点之间的线表示加强区截面线，对应示例齿轮中中齿形与外接口之间的面。

定义齿轮中连接外部组建的区域为接口区，由槽、台阶、孔 3 种子结构组成，共 5 种类型，如图 6 所示，两点之间的线表示接口区截面线。主接口区和副接口区的分区模版相同，区别在于法向相反。接口区不必分区，有些齿轮可不存在接口区。

2.2 基于相似度计算的检索策略

注塑小模数齿轮检索过程是利用算法准确高效地识别知识库中与当前齿轮结构相似的零件，此过程的准确与否直接影响工艺知识重用和知识驱动的有效性。最近邻策略是检索中常见的一种方法，该策略通过计算目标零件与数据库中所有实例的相似度，并从中筛选出相似度最高的实例。检索流程

表 1 加强区截面线及示例

Table 1 Cross-sectional lines and examples for reinforcement area

加强区截面线	示例	加强区截面线	示例



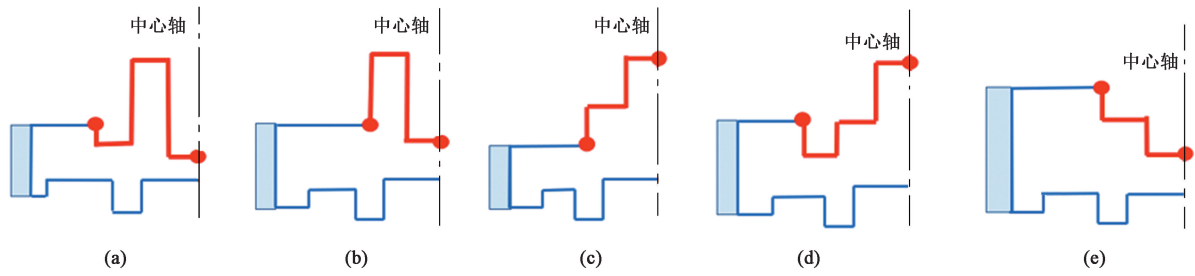


图 6 接口区截面线

(a) 槽+台阶+孔 (b) 台阶+孔 (c) 台阶 (d) 槽+台阶 (e) 孔

Fig. 6 Cross-sectional lines of interface area

(a) Groove + step + hole (b) Step + hole (c) Step (d) Groove + step (e) Hole

如图 7 所示, 针对小模数齿轮的特殊性, 计算相似度之前需要进行条件判断, 确定参与计算的两个齿轮对存在通孔区的条件是否一致, 若只有其中一个齿轮存在通孔区, 则两者的相似度为 0; 判断加强筋高度范围是否一致, 例如预设临界值为 3 mm, 算法认定加强筋高度小于等于 3 mm 为不存在加强筋; 判断主接口区和主加强区长度比值范围, 例如预设值为 1, 则比值范围分为 3 个区间, 分别为 0, (0, 1] 和 (1, +∞), 参与计算的两个齿轮的主接口区与主加强区长度比值处于不同区间, 则相似度为 0。

即目标模型的特征参数设定值为  $x$ ,  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , 库模型的特征参数设定值为  $y$ ,  $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ , 则通过公式 (1) 计算他们之间的相似度  $sim$ 。

$$sim = \sum_i a_i \times \left[ \sum_j b_j \times sim(x_j, y_j) \right] \quad (1)$$

式中:  $a_i$  为第  $i$  个参数组对应的权重, 参数组包括材料参数组、齿形特征参数组、局部特征参数组和结构特征参数组, 即分别对应  $i=1, 2, 3, 4$ ;  $b_j$  为第  $j$  个参数对应的权重, 权重采用专家评分法确定具体值;  $x_j$ 、 $y_j$  分别为目标模型和库模型第  $j$  个特征参考设定值;  $sim(x_j, y_j)$  为目标模型与库模型第  $j$  个参数的相似度,  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为目标模型和库模型的特征参数数量。

$sim(x_j, y_j)$  可根据公式 (2) 计算。

$$sim(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_j - y_j|}{\max(x_j, y_j)}, & x_j \neq 0 \text{ 且 } y_j \neq 0 \\ 1, & x_j = y_j = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\max(x_j, y_j)$  为求  $x_j$  和  $y_j$  最大值的运算公式。

通过上述方法进行智能检索, 首先筛选出满足结构要求的库模型, 继而计算模型间的相似度, 最后将相似度最高的库模型作为目标模型的匹配模板。

### 2.3 知识驱动设计

小模数齿轮金属注塑工艺参数众多且不固定, 参数之间存在相互依赖和相互影响的关系, 这些均增加了工艺参数推理设计的难度。本文提出的基于知识驱动的小模数齿轮注塑工艺参数设计方法, 其流程如图 8 所示, 设计人员可以基于相似零件的成熟工艺进行知识重用和知识推理, 从而快速确定适用于新齿轮零件的成形工艺参数。这不仅能提高设计效率, 还能减少试验成本, 并提高最终产品的质量和一致性。

工艺参数的驱动设计包括知识重用和知识驱动

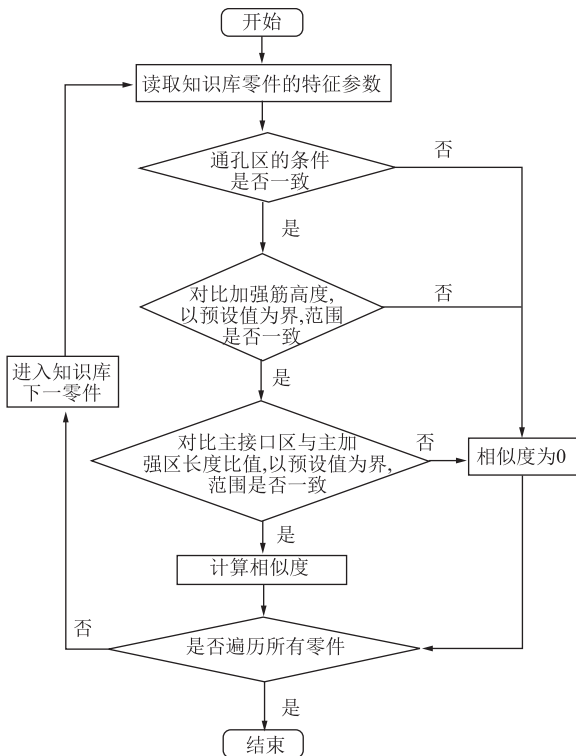


图 7 检索流程

Fig. 7 Flow of retrieve

目标模型与库模型的相似度采用加权法计算,

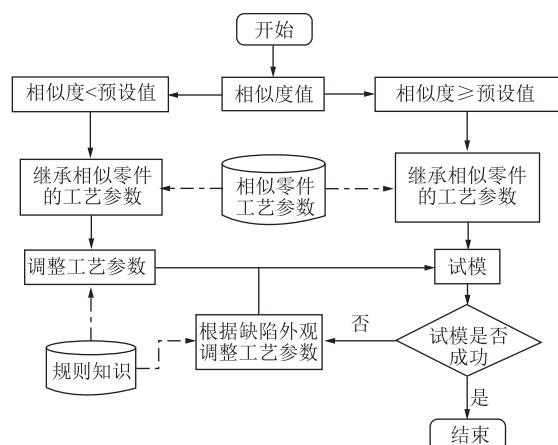


图8 驱动设计流程

Fig. 8 Flow of driven design

两个部分：当齿轮与知识库中某个齿轮的相似度大于等于预设值时，则该齿轮可以完全继承相似齿轮的工艺参数，实现知识重用；当该齿轮与知识库中某个齿轮的相似度低于预设值时，其工艺参数需要进行知识驱动设计。第1步，齿轮先继承相似齿轮（知识库中与目标齿轮相似度最高的齿轮）的工艺参数；第2步，结合通用知识和经验知识，推理计算零件的工艺参数。驱动设计的工艺参数进行试模验证，试模不成功，则根据缺陷外观，结合规则知识调整工艺参数。

小模数齿轮注塑成形工艺参数分为3类，如图9所示：（1）关键参数，即需要推理计算的参数，包括各段开合模压力、各段开合模速度、各段注射压力、各段注射温度、各段保压压力、各段保压速度、各段保压时间、模具各部分温度、溶胶压力、溶胶速度、溶胶时间、溶胶背压、冷却时间等；（2）被动参数，即根据关键参数调整而调整的参数，主要是位置参数，包括开合模位置、注射位置、溶胶位置、抽胶位置、顶针位置等；（3）固定参数，即无需调整的参数。

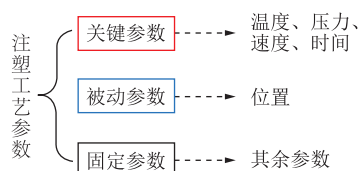


图9 参数分类

Fig. 9 Classification of parameters

工艺参数的影响因素包括材料和尺寸，相似计算的前提在于材料相似性，因此，驱动计算考虑的是产品尺寸对工艺参数的影响，计算公式如式（3）所示。

$$\begin{cases} x_a = x_0 + \mu_s \times \Delta x_s \\ x_a \in [x_{\min}, x_{\max}] \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x_a$ 为目标零件的待设计工艺参数； $x_0$ 为相似零件对应的工艺参数； $\Delta x_s$ 为参数调整幅度； $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 为统计知识库中所有相似零件的对应工艺参数值得到的最大值和最小值； $\mu_s$ 为产品尺寸的影响因子，与产品直径 $D$ 、产品高度 $H$ 和产品体积 $V$ 相关。

$\mu_s$ 的计算公式如式（4）所示：

$$\mu_s = (-1)^m \times \frac{1}{3} \left( \frac{H - H_0}{H_0} + \frac{D - D_0}{D_0} + \frac{V - V_0}{V_0} \right) \times \alpha_s \quad (4)$$

式中： $m$ 为反馈指数，取值为0或1，若工艺参数随着产品尺寸增大而增大，则为正反馈， $m=1$ ，若工艺参数随着产品尺寸增大而减小，则为负反馈， $m=0$ ； $H_0$ 为相似零件的高度； $D_0$ 为相似零件的直径； $V_0$ 为相似零件的体积； $\alpha_s$ 为尺寸影响权重，根据工艺参数不同而不同，采用专家赋值法确认。

定义 $S_s$ 为尺寸变化幅度，根据经验建立产品尺寸、 $S_s$ 和 $\Delta x_s$ 对应关系表，式（3）中 $\Delta x_s$ 的取值根据 $S_s$ 值在对应关系表中选取。 $S_s$ 的取值如式（5）所示：

$$S_s = \max \left( \frac{H - H_0}{H_0}, \frac{D - D_0}{D_0}, \frac{V - V_0}{V_0} \right) \quad (5)$$

根据式（3）~式（5）驱动设计关键参数，并根据注塑工艺通用公式更新被动参数。缺陷外观包括流纹、融接线、批锋、缺胶等常见缺陷，根据注塑工艺通用知识调整工艺参数。

### 3 应用实例

根据某企业在小模数齿轮注塑制造过程中使用的一个实际零件作为案例进行详细分析，如图10所示。该案例的目标是设计零件的注塑工艺，这一过程传统上依赖人工操作，不仅耗时，而且容易出错。为了提高设计效率和精度，采用本文的智能驱动设计方法，将案例零件进行数字化处理，然后快速找到与其相似的齿轮，并参考该齿轮的工艺进行目标案例的工艺设计。

利用2.1节中介绍的方法对案例模型进行特征识别，识别齿形面并创建识别坐标系，通过识别扇形面创建截面线，自动识别结果如图11所示。

在智能设计系统的知识库中，已有多个齿轮零件的成熟案例，每个案例均附有详细的工艺信息和

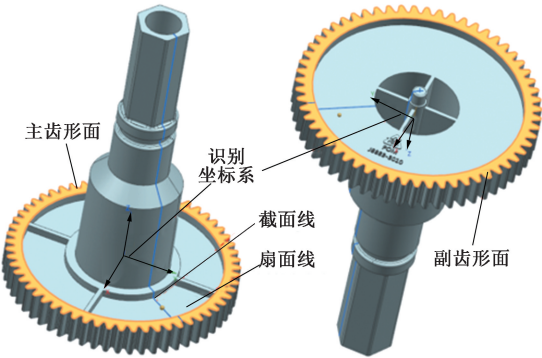


图 10 案例模型

Fig. 10 Case model

设计参数。在本案例中，选择了系统计算最近似的

两个零件作为参考，如图 12 所示。根据 2.2 节介绍的相似度计算方法，零件 A 与案例模型的相似度为 75.87%，零件 B 与案例模型的相似度为 71.92%，故选择零件 A 为相似零件。

以零件 A 的工艺方案为基础，通过知识驱动系统对目标零件进行工艺设计。目标模型和相似模型的尺寸如表 2 所示。

将数据代入式 (4) 计算尺寸影响因子 $\mu_s$ 的值：

$$\mu_s = (-1)^m \times \frac{1}{3} \times \left( \frac{82.5 - 69.1}{69.1} + \frac{65 - 48.5}{48.5} + \frac{17773.5 - 9925.6}{9925.6} \right) \times \alpha_s = (-1)^m \times 0.443 \times \alpha_s \tag{6}$$

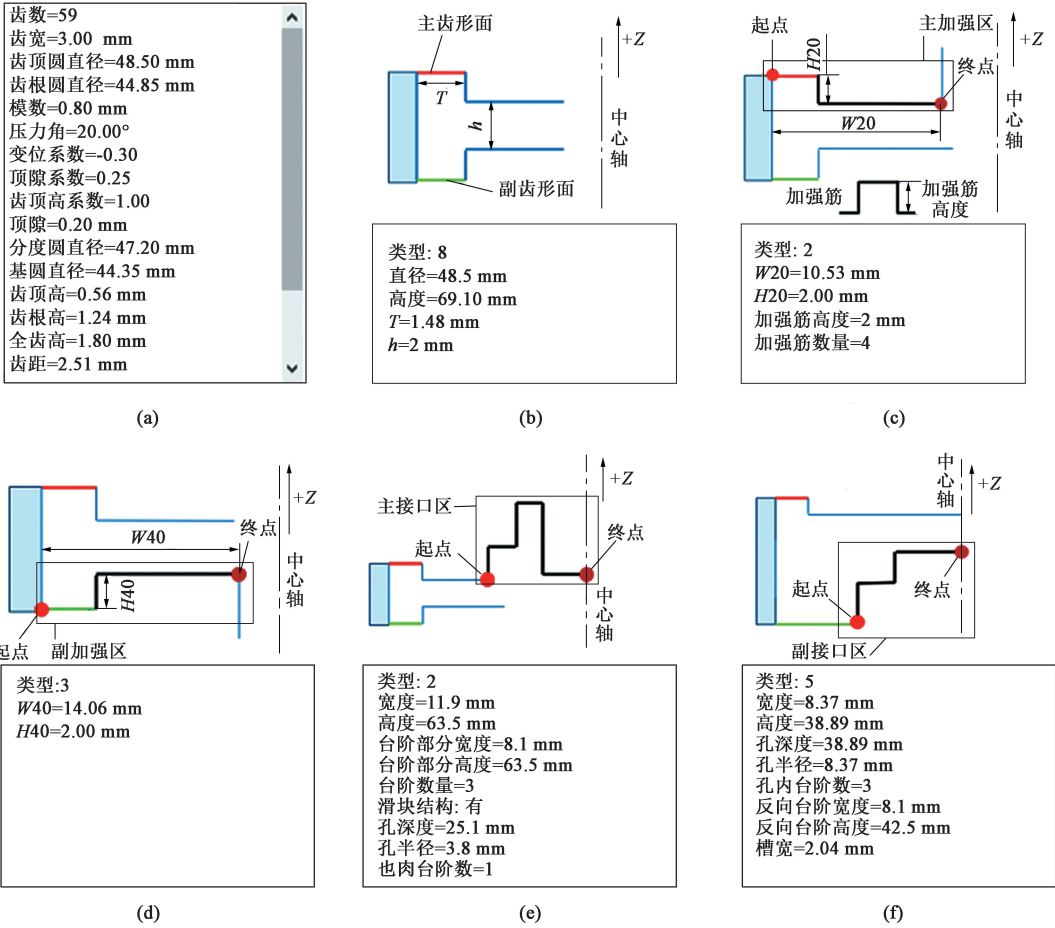


图 11 特征识别结果

(a) 齿形 (b) 总体结构 (c) 主加强区 (d) 副加强区 (e) 主接口区 (f) 副接口区

Fig. 11 Results of feature recognition

(a) Tooth shape (b) Overall structure (c) Main reinforcement area (d) Vice reinforcement area (e) Main interface area (f) Vice interface area

以参数注射压力为例，对应的  $m$  取值为 1， $\alpha_s$  取值为 0.35，则  $\mu_s$  取值为 0.155。

根据式 (5)，尺寸变化幅度  $S_s$  的取值为 0.8。在对应关系表中选取  $\Delta x_s$  值为 130。根据式 (3)，

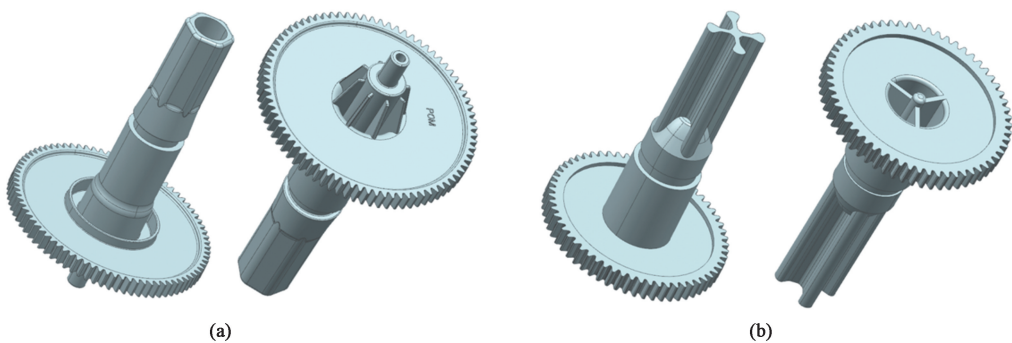


图 12 知识库中的成熟案例模型  
(a) 零件 A    (b) 零件 B  
Fig. 12 Mature case models in knowledge base  
(a) Part A    (b) Part B

表 2 尺寸统计			
Table 2 Dimensional statistics			
模型	高度/mm	直径/mm	体积/mm <sup>3</sup>
目标模型	69.1	Φ48.5	9925.6
相似模型	82.5	Φ65.0	17773.5

目标模型和相似模型的注射压力关系如下：

$$x_a = x_0 - 20 \tag{7}$$

相似模型的 1 段注射压力为 115 kN，2 段注射压力为 95 kN，则目标模型的 1 段注射压力为 95 kN，2 段注射压力为 75 kN。根据同样的方式，计算其余参数，结果如表 3 所示。

根据驱动设计的参数进行试模制造，成品如图 13 所示。设计结果不仅满足了工艺设计的要求，而且减少了对设计人员经验的依赖，大大缩短了设计周期，降低了成本，并减轻了设计人员的劳动强度，统计结果如表 4 所示。

系统在国内两家注塑产品企业开展应用，并通过 110 个零件进行实际设计，最终满足设计人员要求的零件达到 97.3%，验证了该系统设计的准确性。

#### 4 结语

本文针对小模数齿轮注塑工艺设计中过度依赖经验，难以实现知识重用和知识驱动的问题，提出了小模数齿轮注塑工艺智能驱动设计方法，并开发了小模数齿轮注塑工艺智能设计系统，包括以零件为载体的知识库、特征识别模块、智能检索模块和驱动设计模块。通过定义圆柱直齿轮的分区模板，自动完成齿轮模型的数字化计算，进而通过基于相似度计算的智能检索算法，在知识库中找到相似的

表 3 注塑工艺参数			
Table 3 Parameters of injection molding process			
参数	数值	参数	数值
1 段注射压力/kN	95	2 段注射压力/kN	75
1 段注射速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	45	2 段注射速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	30
1 段注射位置/mm	20	2 段注射位置/mm	15
溶胶压力/kN	95	溶胶速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	55
溶胶位置/mm	80	溶胶背压/kN	10
抽胶压力/kN	25	抽胶速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	18
抽胶位置/mm	8	射胶时间/s	2.5
胶延迟时间/s	0.5	顶针压力/kN	70
顶针速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	45	顶针位置/mm	95
顶出延时/s	0.5	1 段温度/℃	195
2 段温度/℃	200	3 段温度/℃	195
4 段温度/℃	190	5 段温度/℃	185
1 段合模压力/kN	65	1 段合模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	40
1 段合模位置/mm	350	2 段合模压力/kN	65
2 段合模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	40	2 段合模位置/mm	50
3 段合模压力/kN	60	3 段合模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	40
3 段合模位置/mm	10	4 段合模压力/kN	15
4 段合模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	25	4 段合模位置/mm	2.5
5 段合模压力/kN	120	5 段合模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	30
5 段合模位置/mm	0	1 段开模压力/kN	40
1 段开模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	30	1 段开模位置/mm	20
2 段开模压力/kN	40	2 段开模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	35
2 段开模位置/mm	50	3 段开模压力/kN	50
3 段开模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	35	3 段开模位置/mm	180
4 段开模压力/kN	40	4 段开模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	35
4 段开模位置/mm	350	5 段开模压力/kN	25
5 段开模速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	25	5 段开模位置/mm	420
保压压力/kN	70	保压速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	10
保压时间/s	1.8	前模芯温度/℃	70
后模芯温度/℃	70	烘料温度/℃	70
冷却时间/s	15	周期时间/s	30



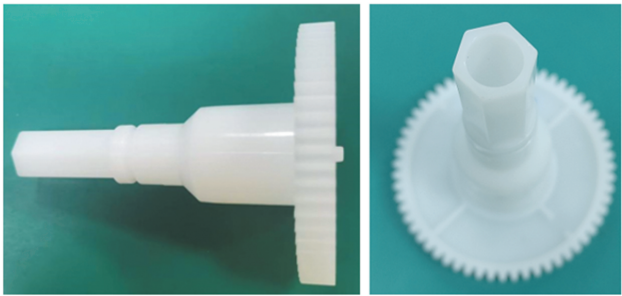


图 13 成品照片

Fig. 13 Finished product photos

表 4 模型效率统计

Table 4 Efficiency statistics of models

参数	识别时间/ min	检索时间/ min	试模次数/ 次
智能设计	0.5	1	1
人工设计	≈20	≈60	3
效率提高率/%	97.5	98.33	66.67

模型，最后以相似模型为基础，推理计算产品制造工艺，实现产品制造过程中的知识重用和知识驱动。知识以零件为载体，增强了驱动设计的稳定性和可靠性。通过应用案例的验证，设计系统展现出良好的设计效果，在摆脱经验设计的同时，有效提高了设计效率，大幅度缩短了设计周期。

目前，该方法已实现了圆柱直齿轮的自动识别、智能检索和驱动设计。未来的工作可以从纵向和横向两个维度进行拓展。在纵向方面，模具设计是产品制造过程中重要的一环。研究和开发注塑模具的自动化设计系统可以进一步实现小模数齿轮制造的智能化，提高制造效率和质量。在横向方面，可以进一步研究该方法的可扩展性，以适应各种类型齿轮的设计需求。该方法针对其他注塑产品具有一定的参考性，需要注意的是针对不同产品，需要研究对应的特征自动识别方法。

参考文献：

[1] 崔醒, 辛栋, 于渤, 等. 小模数塑料齿轮静态强度试验台研制与实验研究 [J]. 机械传动, 2023, 47 (12): 140-145.  
Cui X, Xin D, Yu B, et al. Design and experiment research of static strength test benches for small modulus plastic gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47 (12): 140-145.

[2] 崔醒. 小模数塑料齿轮静态强度试验台研发与实验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2023.  
Cui X. Development of Small Modulus Plastic Gear Static Strength Test Rig and Experimental Research [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023.

[3] 石照耀, 辛栋. 塑料齿轮研究的进展和方向 [J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-18 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0788>.

Shi Z Y, Xin D. A review on plastic gear's research progress and direction[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-18 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0788>.

[4] Islam S T, Samanta S K, Das S, et al. Simulation of micro-powder injection molding using a dynamic mesh approach [J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2023, 10 (3): 1-37.

[5] Tian W, Cao Y. Evaluation model and algorithm optimization of intelligent manufacturing system on the basis of BP neural network [J]. Intelligent Systems with Applications, 2023, 20 (3): 200293.

[6] Wang J J, Ma Y L, Zhang L B, et al. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 144-156.

[7] Chapman C B, Pinfold M. Design engineering-A need to rethink the solution using knowledge based engineering [J]. Knowledge-Based Systems, 1999, 12 (5-6): 257-267.

[8] Barr A, Feigenbaum E A. The Handbook of Artificial Intelligence [M]. 1st Edition. USA, CA: William Kaufmann, 1981.

[9] 井维峰, 孙锡红, 付沛福. 齿轮冷精密锻造智能 CAD/CAM 系统研究 [J]. 模具工业, 2005 (2): 6-9.  
Jing W F, Sun X H, Fu P F. Study on an intelligent CAD/CAM system for cold precision forging of gears [J]. Die & Mould Industry, 2005 (2): 6-9.

[10] 王文波. PDM 平台下齿轮零件 CAD 系统的研究与开发 [D]. 南昌: 南昌大学, 2006.  
Wang W B. Research and Development about CAD System of Gear Based-on Platform of PDM [D]. Nanchang: Nanchang University, 2006.

[11] 李阳. 基于实例推理的数控滚齿加工工艺数据库的开发与研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.  
Li Y. Development and Research for CNC Gear Hobbing Process Database Based on Case-based Reasoning [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[12] Esanakula J R, 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.

[13] Studer R, Benjamins V R, Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods [J]. Data & Knowledge Engineering, 1998, 25 (1-2): 161-197.

[14] Rocca G L. Knowledge based engineering: Between AI and CAD [J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26 (2): 159-179.

[15] Kügler P, Dworschak F, Schleich B, et al. The evolution of knowledge-based engineering from a design research perspective: Literature review 2012-2021 [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55 (1): 101892.

[16] Wang Z H, Daeipour M, Xu H Y. Quantification and propagation of aleatoric uncertainties in topological structures [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 233 (4): 109122.

[17] Zhang Y, Zhang Y S, He K W, et al. Intelligent feature recognition for STEP-NC-compliant manufacturing based on artificial bee colony algorithm and back propagation neural network [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 62 (3): 792-799.