

# 基于混合推理的蒙皮拉形智能工艺设计方法

李小强<sup>1</sup> 徐柯<sup>1</sup> 徐文浩<sup>2</sup>

1.北京航空航天大学 机械工程及自动化学院 北京 100080

2.北京航空航天大学 软件学院 北京 100080

**摘要:**针对大飞机金属蒙皮零件种类复杂、工序知识复用率、共享能力低与工艺人员经验要求高等难点,提出基于规则与实例混合推理的工序智能生成技术。采用混合推理完成蒙皮拉形智能工艺设计与工序生成,达到优化资源、节省成本、提高效率的目的。通过规则推理,输入零件信息、成形参数信息与材料信息,结合提取规则公式,计算比较零件的拉形系数 $K_l$ 与极限拉形系数 $K_{max}$ 之间的关系,从而实现多道次与热处理工序的判断。其后通过零件截面形状、毛料长度等几何特征和材料信息的检索,反馈最相似案例生成成形工序,并且通过工序评估与冲突修正提高工序的准确性。在混合推理的基础上,总结蒙皮拉形工艺设计流程,开发了蒙皮拉形工序智能生成系统,证明了该设计方法的有效性。

**关键词:**蒙皮拉形;混合推理;工艺设计;工序生成

## 引言

飞机金属蒙皮作为气动力外形的关键锥形结构,具备结构复杂、种类繁多、小批量且成形精度高等特点,一般采用拉形制造<sup>[1]</sup>。工艺规划设计是蒙皮零件制造过程的重要辅助手段,然而由于缺乏有效的知识推荐与继承,工艺人员需要凭个人经验进行大量的重复性设计工作,以及工艺设计过程中有效知识提取难度大、知识复用率与共享能力低等难点,造成了零件工艺设计流程长、效率低、协同性差、工艺知识的积累和应用差等问题<sup>[2]</sup>。自上世纪60年代以来,在数字化、信息化、智能化的制造发展趋势下,辅助工艺规划已经成为提高工作效率、缩短制造周期的有效途径之一。

数字化蒙皮成形制造已成为主要发展方向,对蒙皮拉形工艺方面的数据信息进行系统化、规范化的研究,帮助用户快速获取工艺信息、进行工艺设计与分析决策,并提供必要的工艺自主决策功能,对于数字化成形制造技术的发展具有重要意义<sup>[3]</sup>。李东升等<sup>[4]</sup>综合CAD工艺设计系统、CAE仿真技术、CAM数控成形技术,采取建立多点模具型面到贴模精度的传递函数,进行回弹补偿闭环控制研究,实现了数字化的工艺过程,显著提高了效率。罗红宇等<sup>[5]</sup>基于CATIA二次开发技术,建立了高精度可调形模面生成系统,完成了特征识别与模面工艺生成。白笛等<sup>[6]</sup>采用数字PID控制算法,开发了复杂蒙皮拉形数值模拟系统STRETCH FORM,实现了蒙皮

拉形油缸的位移同步控制,建立了数控拉形工艺过程控制系统。李晓星等<sup>[8]</sup>基于UG建模,开发了蒙拉工艺辅助设计系统,实现了工艺参数到边界条件的自动转化。Grigoras C C等<sup>[9]</sup>基于Python开发了具有计算机视觉功能和统计意义分析的自适应算法,实现了蒙皮拉形工艺过程中应变实时监测与自动迭代计算,实现了工艺过程中的实时控制。

采用模拟专家思维、提取规则的规则推理方法(Rule-based reasoning, RBR)可以有效解决工艺规划设计中问题,但是存在知识获取困难、推理效率低等难题<sup>[10]</sup>。采用实例推理方法(Case-based reasoning, CBR)可以利用以往实例经验,显著提高工序设计效率,但是需要面对冲突修正的问题<sup>[11]</sup>。混合推理方法集合CBR技术和RBR技术的优势,用于进一步提高实例检索的准确性和实例调整的自动化水平<sup>[12]</sup>。杨芬等<sup>[11]</sup>采用RBR-CBR相结合的方法有效突破了工艺知识获取的问题,有效解决了工艺设计冲突问题。李圆圆等<sup>[13]</sup>提出以RBR为主、CBR为辅的推理模式,开发了枪械故障诊断专家系统,实现枪械故障的快速准确诊断。瞿幼苗<sup>[14]</sup>提出并行混合推理模型进行检索优化,减少了案例匹配的复杂度和冗余度。谢胜利等<sup>[15]</sup>构造了混合推理的智能工艺设计系统,首先基于实例推理返回最相似实例,评估冲突并用深层规则推理修改,满足工艺设计要求,混合推理流程如图1所示。

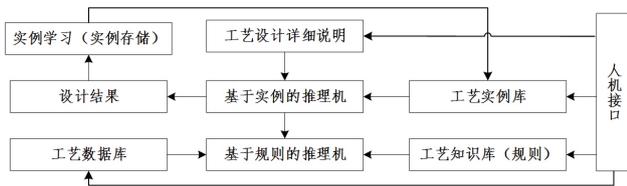


图1 混合推理的智能工艺设计系统总体结构图<sup>[15]</sup>

陈鲲等<sup>[16]</sup>基于并行混合推理模型，开发飞机蒙皮数字化拉形系统软件，提供了基于实例的审查和基于规则两种决策方式。前者通过用户输入的零件尺寸、规格、分类、形状等关键信息，检索出匹配的实例数据，并导出相应的工艺规程。后者依据用户输入的变形部位长度、摩擦系数、毛料在模具上的包角等数据，返回工艺设计表，如图2所示。本文基于混合推理模型，开展蒙皮零件工艺规划技术研究，有效提高飞机零件工艺设计效率与质量，降低制造周期及成本。

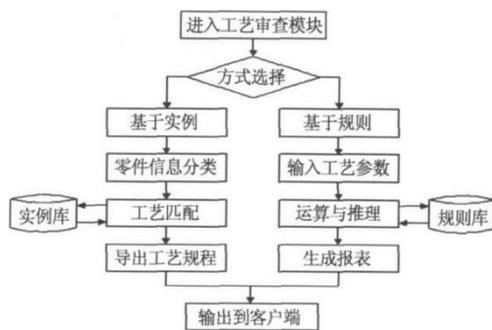


图2 飞机蒙皮数字化拉形系统工艺决策流程<sup>[16]</sup>

### 一、混合推理工序设计技术

基于RBR-CBR混合推理的蒙皮零件工艺设计整体流程如图3所示，主要包括零件工艺信息的提取、RBR推理、CBR推理，生成零件的最终成形工序。其中，零件的工艺信息包括基于规则的判据系数和基于实例的属性特征；采用RBR推理实现蒙皮零件成形道次满足设计要求的判断，判定失败则需要重新更改工艺参数；RBR推理完成以后进入到CBR推理，通过零件的主要属性特征，选择出最相似的零件提取对应的成形工序，并在该部分进行工序的评估与冲突修正，修改成功后形成零件的最终成形工序，并且将成功案例进一步存储丰富到实例库。

基于实例的推理方法和基于规则的推理方法详细流程如图4所示。其中，基于实例的推理方法可以针对特定零件进行指向性匹配，用户可通过相关的特征匹配，查询相似零件的成形实例，并输出查询的结果，从而为

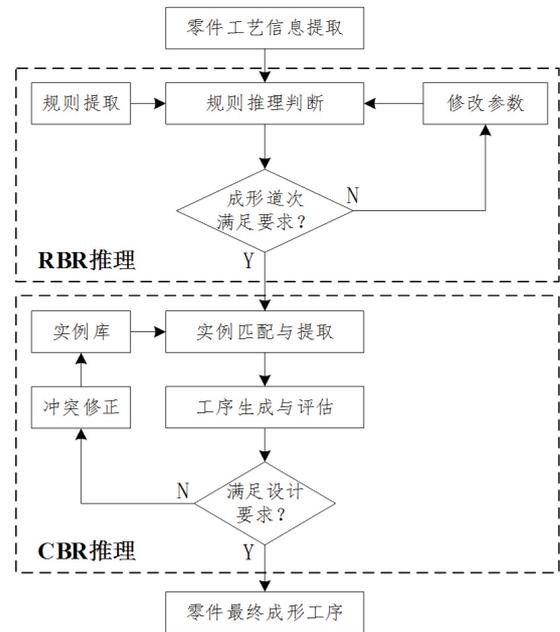


图3 基于RBR-CBR混合推理的工艺设计整体流程

工艺的设计提供有效地参考。基于规则的推理方法主要是针对零件的工艺参数信息，通过输入相关的参数，计算输出审查的结果，从而可判断成形零件的工艺可行性。在实际操作流程中，通过工艺审查针对特定零件先进行规则推理，其后进行实例匹配，通过评估与修正，完成蒙皮零件的成形工序智能设计。

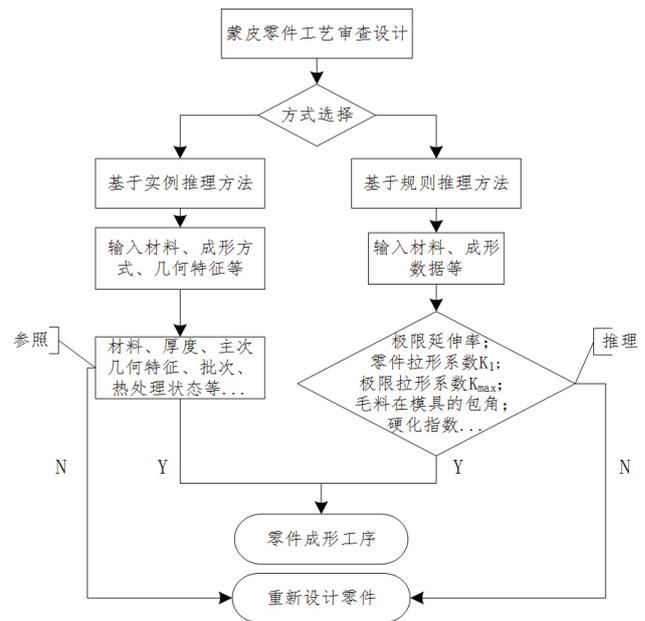


图4 基于混合推理的工艺设计详细流程

### 二、基于实例与规则混合的工序设计方法

#### (一) 基于规则的工序设计方法

基于规则的推理方法输入的信息包括零件信息、成

形参数信息以及材料信息。其中，零件信息主要包括零件沿拉形方向最大剖面线长度 $L_{max}$ 和最小剖面线长度 $L_{min}$ ，如图5所示；成形参数信息主要包括摩擦系数、毛料在模具的包角、包覆过程系数、补拉过程系数等；材料信息主要包括极限延伸率和0度硬化指数。通过零件信息和成形参数信息可以计算得到该零件的拉形系数 $K_l$ ，通过材料信息可以计算得到极限拉形系数 $K_{max}$ 。如果 $K_l < K_{max}$ ，该零件可在新淬火状态下一次拉形；如果 $K_l > K_{max}$ ，则该零件应进行多道次拉形，退火状态初拉，新淬火状态后校拉。基于规则推理方法的工序设计界面如图6所示。

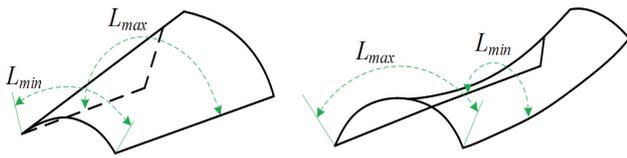


图5 最大剖面线长度 $L_{max}$ 和最小剖面线长度 $L_{min}$

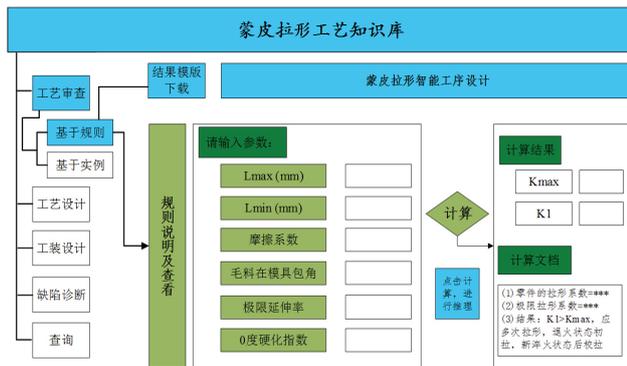


图6 基于规则推理的蒙皮拉形工序设计界面

### (二) 基于实例的工序设计方法

基于实例的推理方法通过输入几何特征、材料特征与其它特征。其中，零件的几何特征主要包括零件截面形状、毛料长度以及其他特征等的某一项或者几项，对蒙皮主次几何外形进行区分可以参照表1所示。材料特征包括材料牌号、热处理状态、厚度和批次等，其它特征包括注意事项和非典型特性。根据类似零件查询的信息，可以反馈得到相似零件的成形工序设计方案，用户可对其成形性做出评价与修正，形成零件最终成形工序。

选取图7所示实例零件进行横截面和纵截面角度范围的定义，由此可以表示该零件的特征，结果如表2所示。基于规则推理方法的工序设计界面如图8所示。

### 三、蒙皮零件工序流程设计

通过调研钣金厂的各种工艺知识，总结其中的共同点以及差异，设计一套合理的工序设计流程，以下对基

表1 蒙皮几何特征分类

几何主特征	几何次特征	几何三特征
同向双曲面	横截面角度范围 0-30度	纵截面角度范围 150-180度
同向双曲面	横截面角度范围 60-90度	纵截面角度范围 120-150度
同向双曲面	横截面角度范围 30-60度	纵截面角度范围90- 120度
同向双曲面	横截面角度范围 90-120度	纵截面角度范围 60-90度
同向双曲面	横截面角度范围 120-150度	纵截面角度范围 30-60度
同向双曲面	横截面角度范围 150-180度	纵截面角度范围 0-30度
异向双曲面	S形	
异向双曲面	局部凸凹形	
异向双曲面	其它	
异向双曲面	马鞍形	

注：对于蒙皮横拉成形方式，拉形方向的截面定义为横截面；非拉形方向的截面为纵截面；而对于纵拉成形方式，拉形方向的截面定义为纵截面；非拉形方向的截面为横截面。截面角度为两个端面的端点切线夹角的最小值。

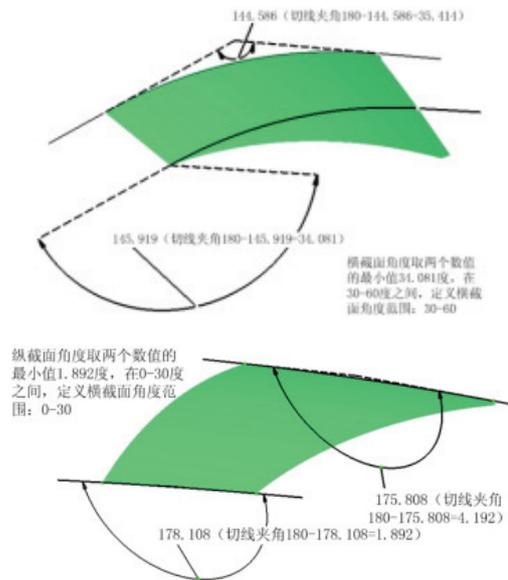


图7 横截面角度示意图（上）  
和纵截面角度示意图（下）

表2 指定蒙皮零件的几何特征定义

特征名称	几何主特征	几何次特征	几何三特征
特征内容	同向双曲面	横截面角度范围 30-60度	纵截面角度范围 0-30度

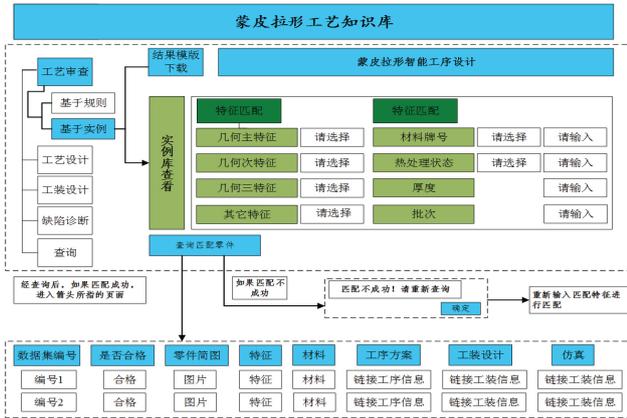


图8 基于实例推理的蒙皮拉形工序设计界面

于混合推理方法的蒙皮拉形的工序流程设计技术进行说明，如图9所示。第一步，是工艺准备阶段，通过零件数模读取零件的几何信息和非几何信息，选择不同下料方式得到零件外形。常见的下料方式有数控铣削外形，常规铣削外形，直线下料，手工剪切外形和冲切外形等。第二步，是多道次判断阶段，借助于规则推理判断道次划分以及热处理状态。第三步，是成形工序匹配阶段，借助于实例推理，从几何特征提取相似零件的成形工序，并进行评估与修改。第四步，是后置处理阶段，按照材料确定淬火、理化和时效、检验入库等形成最终工艺规程。

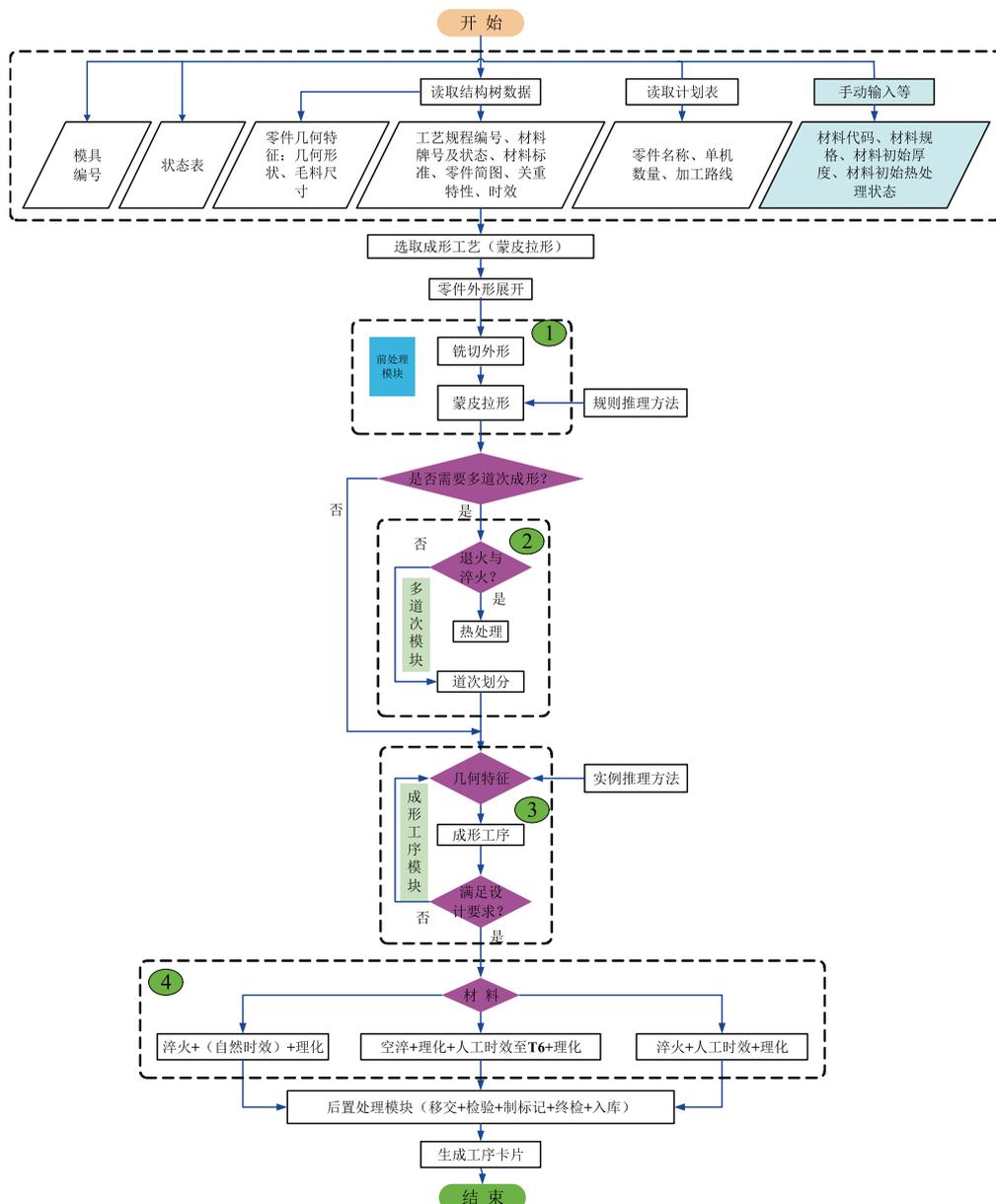


图9 基于混合推理的蒙皮拉形工序流程

#### 四、系统开发

开发出蒙皮拉形工序设计软件, 可以进行规则推理与实例推理生成零件成形工序, 如图 10 和图 11 所示。并且针对生成的工序, 可以进行评估与检测, 具备较好的可操作性, 如图 12 所示。



图 10 基于规则推理的软件界面



图 11 基于实例推理的软件界面



图 12 工序评估的软件界面

#### 参考文献

[1] 于成龙, 李东升, 李小强, 等. 可重构柔性多点模具蒙皮拉形工艺设计系统[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(06): 1144-1150

2010, 16(06): 1144-1150

[2] 王纪清. 三维钣金展开与工艺规划的研究[D]. 西安工业大学, 2012.

[3] 郭刚. 大型复杂高精度蒙皮零件制造技术数字化研究[D]. 电子科技大学, 2019.

[4] 李东升, 罗红宇, 王丽丽, 等. 飞机蒙皮的数字化成形制造技术[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(01): 82-87.

[5] 罗红宇, 李东升, 曾元松, 等. 蒙皮拉形可重构柔性模具模面生成系统开发及应用研究[J]. 塑性工程学报, 2006(06): 61-65.

[6] 白笛, 周贤宾, 李东升. 数控蒙皮拉形试验系统及精度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004(04): 334-338.

[7] 白笛, 周贤宾, 李东升, 等. 飞机复杂蒙皮拉形数值模拟系统开发及关键技术研究[J]. 航空学报, 2004(06): 606-610.

[8] 李晓星, 毕研华, 葛宇龙. 飞机蒙皮拉形工艺辅助设计系统开发[J]. 航空制造技术, 2016(17): 41-44+49.

[9] Grigoras C C, Zichil V, Chirita B, et al. Adaptive Stretch-Forming Process: A Computer Vision and Statistical Analysis Approach[J]. Machines, 2021, 9(12): 357.

[10] 王宸煜, 王敏, 赵熹华. 基于混合推理机制的点焊工艺设计[J]. 机械工程学报, 2002(01): 83-86.

[11] 杨芬. 基于实例与规则混合推理的轴类零件工艺设计[D]. 武汉理工大学, 2007.

[12] 张禹, 关凯楠, 曾泽群, 等. 基于RBR-RF-BP的焊接工艺混合推理模型及智能系统[J]. 焊接技术, 2023, 52(08): 30-34

[13] 李圆圆, 王亚平, 王家浩. 基于混合推理的枪械故障诊断[J]. 装备环境工程, 2022, 19(06): 26-34.

[14] 瞿幼苗. 面向智能决策的推理引擎技术[D]. 西北工业大学, 2018.

[15] 谢胜利, 黄强, 林兰芬, 董金祥. 基于实例的智能工艺设计系统[J]. 计算机应用研究, 2002(09): 97-99+103.

[16] 陈鲲, 万敏, 李卫东, 等. 飞机蒙皮拉形工艺知识库的研究与开发[J]. 塑性工程学报, 2008, (05): 142-146.