面向飞机智能制造的工艺智能决策与知识库技术

撰文／中航工业沈阳飞机工业（集团）有限公司 王勃 杜宝瑞 赵璐

工艺知识与决策技术是未来飞机智能制造中的关键技术之一。本文首先阐述了工艺知识与资源的获取方法以及建模方法；其次，研究了工艺知能决策中的工艺知识推理与智能决策方法；最后，建立了面向飞机智能制造的工艺智能决策平台，实现了典型零部件的智能化制造。

一、前言

21 世纪以来，虽然知识经济已初见端倪，但制造业仍是经济的主要载体，在国民经济中仍占有非常重要的地位。飞机制造处于制造业的技术顶端，在新形势下，飞机制造业不断提升其数字化、自动化水平，并逐渐向智能制造演进。作为智能制造中的关键环节，智能工艺设计已成为飞机制造领域的研究热点。

知识是智能的基础，基于知识的工艺智能决策则是工艺设计智能化的灵魂所在，其利用现有知识通过人工智能手段实现工艺自动决策及优化，同时不断更新与完善工艺知识，使企业能够更快地响应新型产品的工艺需求。航空制造企业在多年的飞机研制过程中积累了丰富多样的工艺知识。然而，现阶段大量的知识尚无法以独立的形式存在，而是依存于富有经验的工程师，或是被固化在特定的智能制造系统中。这使得企业无法对这些知识进行有效地维护、应用、拓展及共享。此外，由于工艺员的水平及工作习惯不尽相同，而在工艺设计中又缺乏具有指导性的规范，致使相似零件选用的工艺方案及加工参数存在差异，从而容易造成产品加工效率低及加工质量差等问题。因此，建立企业工艺知识库与资源库，并在此基础上构建工艺智能决策系统已成为智能制造中的亟待解决的关键问题。

国外基于知识的工艺系统开发技术正朝着智能化方向发展。日本政府早在上世纪 80 年代初就设立了用于制造工艺数字化、智能化研究的专项基金，其建立的国家级数字化工艺参数库已面向全国开放，并以此提高该国中小企业的制造工艺水平。美国和欧洲已建立了易维护、可重用的大型知识库系统，影响较大的有美国军方 DARPA 投资的 HPKB 及欧洲数国联合开发的 IBROW 等。

国内在此领域也已开展了卓有成效的研究。在知识库构建及系统开发方面，北京航空制造工程研究所建立了针对飞机构件制造过程的工艺知识库，该知识库主要包括典型工艺、工艺参数、刀具和基础数据等。北京航空航天大学开发了针对“机床／刀具／工件”的切削加工工艺系统，构建了动态切削力、主轴功率与转矩、工件与刀具的振动变形等工艺参数库，目前该系统已经在工厂进行了推广和应用。哈尔滨工业大学通过对树脂基复合材料成型工艺决策数据分析，建立了基于粗糙集理论的复合材料成型工艺决策的知识挖掘模型，提出了一种基于知识相依性的复合材料成型工艺决策规则挖掘方法。然而，国内目前在工艺智能决策方面仍存在明显的不足，具体表现在两个方面：一是尚未形成完整有效的工艺知识与资源库，二是尚未实现基于知识的快速工艺设计。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

针对上述问题，本文首先提出了工艺知识库与资源库的构建方法，然后介绍了工艺智能决策的关键技术，最后阐述了工艺智能决策平台的体系结构，如图 1 所示。

图 1 工艺智能决策与知识库构建的思路

二、工艺知识库及资源库体系

工艺知识是指在特定的设计制造过程环境中，经过学习、整理、归纳及整合之后的具有统一结构、普适性且可用于再生产的，并且本身不断发展和改进的一种描述工艺设计过程及其相关资源的知识体系。工艺知识库及资源库的构建过程从宏观上讲可分为两个阶段，即工艺知识的获取与工艺知识的表达。

目前，航空制造企业中的工艺设计仍以经验型设计为主，工艺知识通常隐含或蕴藏在工艺设计系统的工艺参数或工艺设计人员的设计经验中，具有广泛性、隐含性、多样性、复杂性以及模糊性等特点。如何有效地获取丰富的工艺知识是实现工艺设计智能化的重要技术基础。在获得工艺知识之后，还需要建立其结构化模型，使其显式化、逻辑化及数字化，进而使这些知识能够在新产品的工艺设计中被有效地重复利用。

1. 工艺知识的获取

工艺知识主要来自于专业书籍、标准与规范、现行工艺文件、企业工艺数据库及领域专家的经验等，内容繁多，形式多样。传统上，工艺知识的收集和获取主要依靠人工实现，这种方式无法保证知识的准确性和可靠性，难以捕获到可能存在的隐性知识，而且也难以发现知识或数据间的内在逻辑关系，因此已难以满足制造系统智能化和信息化的要求。

经过数十年的发展，当前主流的工艺知识获取方法包括：（1）基于对象模型的工艺知识获取。即建立工艺知识的对象模型，在模型的基础上对专家知识进行分类、组织，并以概念、对象、文本和数据等形式表示出来，其核心是知识的建模。（2）基于人工神经网络的工艺知识获取。这种方式主要应用于工艺决策及工艺方案的自动生成方面，其关键在于网络拓扑结构的设计和学习训练样本的准备，这两项工作需要在大量专家经验和有效且完备的历史数据基础上进行。（3）基于实例推理的工艺知识获取。此类技术与传统的专家系统相比，获取知识较为容易，其技术难点在于实例、修正知识及相似性评估等方面的问题。（4）基于 KDD 的工艺知识获取。即利用企业工艺数据库、资源库，应用数据挖掘技术从中分析、总结抽取工艺知识，其关键是建立符合工艺知识特点的挖掘算法和数据分析方法。

飞机智能制造中涉及到各类工艺知识，在知识获取过程中应对机加、钣金、复材及装配等制造流程进行全面的分析与整理。从加工对象、装配对象的结构性能及工艺特性出发，分析各类典型工艺，归纳工艺设计中涉及的事实参数，建立标准术语的准确定义及知识的规范性描述方法等，从工艺知识术语、流程、方法到规范性描述等多个层次对工艺知识进行详细分类及梳理。具体包括：

（1）工艺流程及方法的梳理：对飞机制造各环节进行流程梳理，并对流程中涉及的工艺方案、加工方法、资源选择、编程方法和资源参数等进行全面的分析与总结。

（2）标准术语整理：对工艺设计中涉及到的标准术语进行准确定义与合理分类，确保术语合理、准确且易理解，为后续工艺知识的规范描述奠定基础。

（3）工艺知识的规范性描述：将工艺信息及知识进行分类，研究各类知识的规范性描述，将知识以规范化的方法进行描述，便于后续知识模型的构建。

（4）典型工艺分析与总结：收集并整理结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配等典型工艺方案，形成各类加工对象、装配对象的典型工艺流程、制造资源的选取方法、编程方法和加工操作方法等。

2. 工艺知识的建模

传统制造领域中常采用的工艺知识表示与建模方法主要包括谓词逻辑法、基于规则法、框架表示法、语义网络法、基于过程方法以及面向对象法等。航空制造领域的特点决定了其难以采用某种单一的方法有效地表达制造过程中的所有工艺知识。例如，谓词逻辑法表达的知识具有比较严密的科学性，适用于确定性、陈述性和静态性知识，但对于动态、变化、模糊的知识则很难表示。

基于本体论的方法强调领域知识的规范性定义，有较

好的知识涵盖和扩充性能。该方法具有良好的概念层次结构，可对术语语义进行明确的、形式化的定义，进而实现逻辑推理。通过建立工艺知识本体模型来建立工艺知识及资源库的过程如图 2 所示。

图 2 基于本体的工艺知识库框架

根据航空工艺设计的需求，需要建立的工艺知识模型主要包括如下类型：

（1）典型工艺流程模型。典型工艺流程模型主要描述采用何种形式表示结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配的典型工艺流程，以及局部的流程信息。图 3 所示为某典型机加工工艺流程的层次模型。（2）典型方法模型。典型方法模型主要描述方法类的知识，例如典型特征的编程方法等。（3）事实参数模型。事实参数模型是一种对象模型，用于对结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配等环节工艺过程中的事实参数进行分类、归纳，分析其取值。如图 4 所示为事实参数模型的示例。（4）规则类知识模型。规则类知识模型主要描述制造资源与加工方式的选择方法以及编

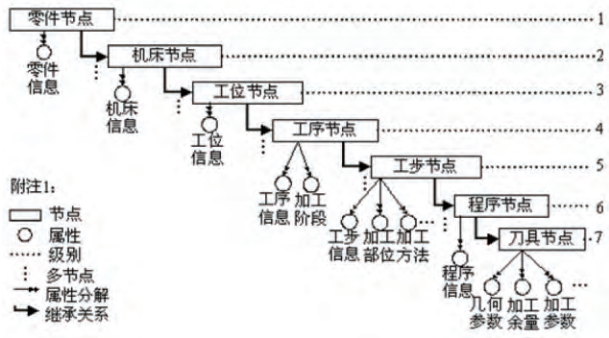

图 3 工艺过程建模

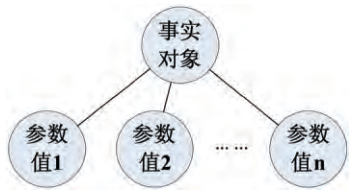

图 4 事实参数建模

程经验等方法类知识，用于后续知识推理。（5）工艺资源模型。工艺资源模型是用于描述结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配等环节工艺过程中涉及到的设备、工具、工装等资源的参数及三维模型等信息的模型，工艺资源模型可为制造资源的选择提供基础参数。（6）工艺资源仿真模型。工艺资源仿真模型主要用于工艺仿真，即在虚拟环境中验证工艺方案，进而减少实际制造中的问题。以装配仿真为例，需建立三维人体模型、三维工装模型和三维工厂模型等。如图 6 所示为工艺资源仿真模型示例。

以飞机装配工艺为例，在工艺知识及资源库的构建过程中，首先对飞机装配过程中涉及到的知识进行分析与分类，梳理出装配工艺知识的结构化体系（图 7），然后构建装配工艺知识的本体模型，最终建成装配工艺知识库。知识库的整体构建流程如图 5 所示。

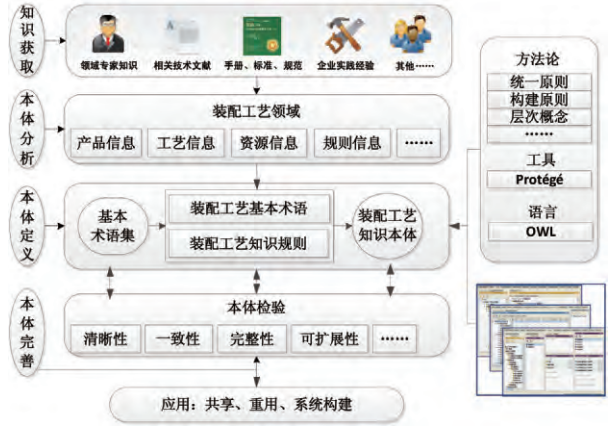

图 5 装配工艺知识本体构建流程

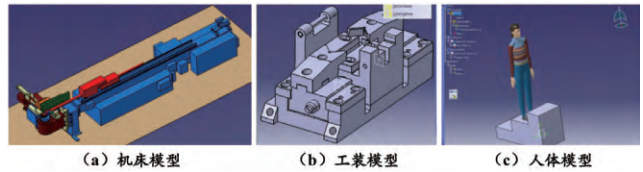

图 6 工艺仿真资源模型

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

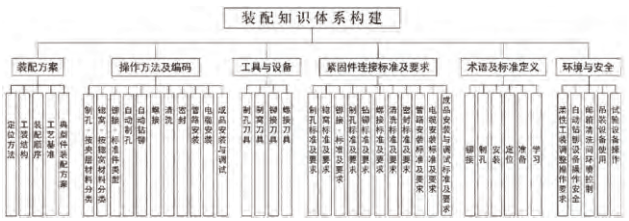

图 7 部件装配工艺知识结构化示例

三、工艺智能决策

工艺智能决策是基于工艺知识及资源库，面向新的工艺需求，采用适当的工艺推理方法，在工艺设计过程中由机器模拟人类的思维推理过程，构建出最优化的制造工艺。

工艺智能决策中涉及的关键理论及方法基础包括工艺知识推理与工艺参数优化。在这些技术基础的支撑下，可实现基于模板的快速工艺决策，进一步实现工艺模板与制造资源相融合的智能工艺决策。

1. 工艺知识推理

推理是指从已知的判断出发，按照某种策略推导出一种新的判断的高级思维过程。从推理方向的角度，工艺推理策略可分为正向推理与反向推理。正向推理是指由原始数据出发，按照一定的策略，依据数据库知识，推断出结论的方法。反向推理则是从目标出发通过推理最终得到初始数据的方法。从推理方法的角度，工艺知识推理可分为基于实例的推理与基于知识的创成式推理。基于实例的推理以成组技术为基础，建立零件族的典型工艺规程，并利用相似性原理来检索现有工艺规程。创成式推理根据零件输入信息，在推理过程中综合应用各种工艺决策规则进行判断，为新的产品自动生成新的工艺规程。此外，还有综合了上述两种方法以及人工交互法的混合式推理方法等。

在工艺知识推理过程中，工艺参数选取的合理性在很大程度上决定了产品的制造质量，其中参数优化与路径优化是飞机制造工艺优化的核心内容。以数控加工为例，目前航空制造企业尚未形成有效合理的加工参数库，往往依靠工艺员的自身经验决定加工参数，合理性难以保证，并且偏向保守。为此，可采用等材料切削模型对加工参数进行优化，从而使单位时间内刀具的切除材料体积相等，以保证刀具在加工过程中的状态稳定，降低刀具损耗，提高零件的加工质量。此外，路径优化是关乎零件加工效率高低的另一关键，可采用遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法和人工神经网络等人工智能算法对加工路径进行优化，并构建路径优化模型。例如，在飞机结构件的数控加工中，为了减少空走刀行程，可采用模拟退火法进行加工单元排序，进而提高工艺规划质量及加工效率。

2. 工艺智能决策方法

工艺智能决策可分为两个层次，即基于工艺模板的快速工艺决策以及工艺模板与制造资源相融合的工艺智能决策。

基于工艺模板的快速工艺决策是指在工艺模板基础上，通过可视化、图形化且便捷化的方式实现工艺决策模型的自定义，实现模型驱动的工艺快速决策。以数控加工结构件为例，为保证工艺设计质量，结构相似的零件应选用相似的工艺方案，因此，针对典型零件的加工工艺，首先建立如图 3 所示的加工方案模型。在工艺设计过程中，只需要交互指定机床、刀具和工装等加工资源的参数即可完成工艺设计。

工艺模板与制造资源相融合的工艺智能决策是指，通过读取产品 MBD 模型中的工艺要求，结合产品三维模型的特征识别结果，自动选择工艺模板及制造资源，并且将模板与资源进行深度融合，进而实现工艺的自动决策。同时，通过建立一定的规则，对工艺方案的有效性进行检查。如图 8 所示为工艺智能决策流程。

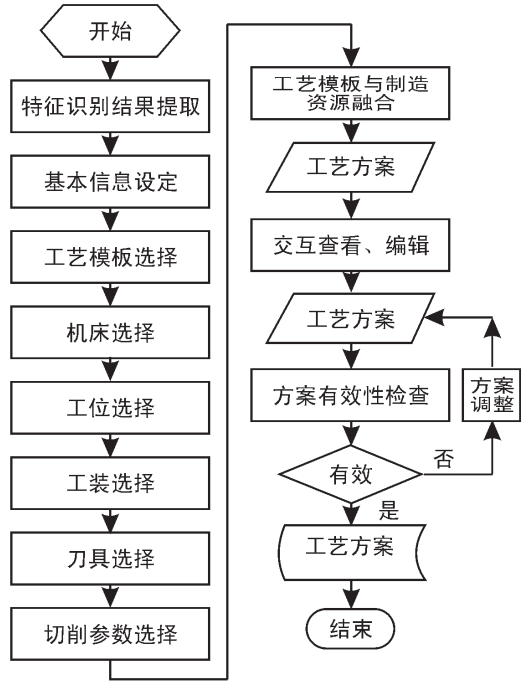

图 8 工艺智能决策流程

四、工艺智能决策平台

在前述技术基础上，可建立面向飞机智能制造的工艺智能决策平台，实现典型零部件的智能化制造。平台中主要包括工艺知识及资源库、工艺知识及资源关系系统、工艺智能决策系统以及智能化应用系统等关键构成部分。

1. 工艺知识及资源库

工艺知识及资源库为决策平台提供基础数据支撑，其中工艺知识库包括工艺模板库、工艺方案库、规则类库、参数优化库和事实参数库等；工艺资源库包括机床参数库、切削参数库、工装标准件库、刀具参数库、三维仿真模型库、工装标准件及典型件库及工件材料库等。工艺知识库及资源库通过特定的数据接口与系统各功能模块进行数据交换。

2. 工艺知识及资源管理系统

工艺知识及资源管理系统以飞机制造的工艺流程为中心，对工艺知识及资源库中的知识进行统一管理，使其成为统一、多层次、可重用且科学的工艺知识体系。管理平台可对工艺知识及资源进行检索、插入、删除以及修改等操作。为了提高工艺设计效率，该系统提供了多样化的知识检索手段，例如分类检索、关键字检索、语义检索以及实例检索等。此外，对于知识的管理，系统对普通用户、高级用户以及管理员用户分别设定了不同的权限。普通用户具有只读权限，高级用户和超级用户都具有管理员权限，但超级用户比高级用户拥有更高的权限。

3. 工艺智能决策系统

基于知识的工艺智能决策系统中实现了大量的工艺知识推理方法及工艺参数优化方法，形成了面向飞机制造的工艺推理机制与决策逻辑策略，可实现基于模板的工艺快速设计以及基于模板与资源融合的工艺自动设计。

在工艺智能决策过程中，首先从零件 MBD 模型中提取几何信息、材料信息、产品性能要求及工艺要求等，依据这些输入信息有选择性地访问工艺知识及资源库；然后通过检取到的规则类知识推理出所需的工艺模板、机床、刀具、工装和切削参数等，并借助优化模型及算法对初选结果进行优化选择；然后根据映射关系将工艺模板与各类制造资源进行深度融合，将制造资源分配到对应的工序及工步中；最后经过有效性检查等自动校验过程，推理出结构件的合理工艺方案。

4. 智能化应用系统

知识库的强大不仅在于它能够为工艺决策提供丰富的知识支撑，而且在于它具有自学习与自维护的能力，能够使其在应用过程中不断更新、完善与拓展。在工艺决策过程中，系统可记录新的工艺知识及工艺决策方案，在用户允许的情况下将其添加至工艺知识库。随着知识库中新知识的不断加入，知识库中各知识单元之间的相互影响与联系随之变得复杂。为此，系统提供了对知识的自维护功能，对新加入的知识可进行正确性、一致性及完备性检查维护。知识的正确性维护即检查知识库是否能够推理出合理的工艺；一致性维护即检查知识单元记录格式的标准化和规范化，以及检查知识之间是否存在冗余、矛盾和循环等错误；完备性维护主要是排除由于多余输入或死节点或编码遗漏所造成的知识缺失。

五、结语

智能制造是信息化与工业化两化深度融合的重要体现，工艺智能决策与知识库技术则是实现智能制造的一项关键技术。将专家的工艺设计经验知识进行结构化存储，并基于此实现工艺快速及智能化决策，可以显著提升工艺设计的规范化水平，提高工艺设计效率和产品研发质量。同时，由于工艺知识可以有效继承、重用与拓展，在企业的可持续发展及提升企业核心竞争力方面将起到不可估量的作用。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn