

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.001

基于规则的卫星产品 3 维模型工艺性审查技术

陈瑞启, 吴剑锋, 万 峰, 邢香园, 赵文浩, 王 治

(中国航天科技集团第八研究院上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 针对卫星总装阶段产品 3 维模型设计数据种类繁多、迭代频繁, 工艺性审查数据专业和种类复杂等设计工艺性审查难点问题, 提出一种基于规则的卫星产品 3 维模型设计工艺性审查技术。阐述卫星产品 3 维模型设计工艺性审查业务流程分析、审查规则与属性信息关系建模、设计工艺性审查关键技术实现等内容, 设计卫星 3 维模型工艺性审查系统的架构原理和主要功能。结果表明, 该技术可实现卫星 3 维模型工艺性自动审查和结果可视化。

关键词: 3 维模型; 关系建模; 审查规则; 规则知识库; 工艺性审查

中图分类号: TP391.99 **文献标志码:** A

Rule-Based Technology for Processability Review of Satellite Product 3D Model

Chen Ruiqi, Wu Jianfeng, Wan Feng, Xing Xiangyuan, Zhao Wenhao, Wang Zhi

(Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, No. 8 Academy,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the difficult problems in the design process review of satellite product 3D model design in the final assembly stage, such as various types of design data, frequent iterations, and complex professional and types of process review data, a rule-based process review technology for satellite product 3D model design was proposed. The business process analysis of satellite product 3D model design process review, the relationship modeling between review rules and attribute information, and the implementation of key technologies of design process review are described, and the architecture principle and main functions of satellite 3D model process review system are designed. The results show that the technology can realize the automatic review of the processability of the satellite 3D model and the visualization of the results.

Keywords: 3D model; relationship modeling; review rules; rule knowledge base; processability review

0 引言

随着基于模型定义(model based definition, MBD)产品研制模式在航空航天等领域逐渐推广, 目前卫星设计已基本实现了基于 3 维模型进行设计意图的定义, 并通过 PDM 等系统实现设计数据的管理和控制以及各单位之间的 3 维模型数据的传递。卫星型号研制是典型的边设计边生产研制模式, 具有设计装配并行、状态多变、更改频繁、质量严格等特点。由于卫星 3 维设计模型的复杂性, 且型号研制过程中修改、迭代频繁, 基于产品 3 维模型进行工艺性审查, 审查设计的合理性、规范性和工艺性能优劣, 可有效地避免设计缺陷、返工等问题, 显著降低成本, 增强产品的生产研制效率和竞争力。各行业结合多种技术手段已开展了自身产品的 3 维模型设计工艺性审查的技术研究, 例如利用虚拟现实技术提高数字样机的审查效率和质量^[1-2], 基于

MBD 进行产品工艺信息建模以及工艺性评价^[3], 使用设计与审查同步开展方法有效减少产品研发周期、提升产品设计质量^[4], 基于 CATIA 进行产品工艺审查系统的二次开发来实现产品 3 维模型的仿真与工艺性审查^[5]等一系列研究, 都取得了良好的应用效果, 但对于产品的 3 维模型设计工艺性进行快速、高效、准确地审查和模型特征分析等方面的研究还有所欠缺。

笔者针对卫星产品 3 维模型设计工艺性审查的特点和需求, 提出了基于规则的卫星产品 3 维模型设计工艺性审查技术。该技术通过对产品 3 维模型的数据分析提取、审查规则知识库构建和基于规则的 3 维模型设计工艺性审查等方面开展研究, 实现并优化卫星产品 3 维模型的设计工艺性审查, 提升工艺审查能力和效率。

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-03-28

作者简介: 陈瑞启(1994—), 男, 浙江人, 硕士, 工程师, 从事数字化设计研究。E-mail: 282299012@qq.com。

1 卫星 3 维模型工艺性审查流程分析

1.1 卫星 3 维模型工艺性审查业务分析

面向 3 维模型的卫星产品设计工艺性审查，是在 3 维标注和属性信息等方式全面表达定义产品 3 维设计模型的基础上，通过模型属性信息提取与特

征识别等方法获取产品 3 维模型属性，然后根据制定的规则工艺性审查相关属性数据并输出相应的审查结果。面向 3 维模型的卫星产品设计工艺性审查主要包括产品模型信息处理和工艺性审查，其整体流程如图 1 所示。

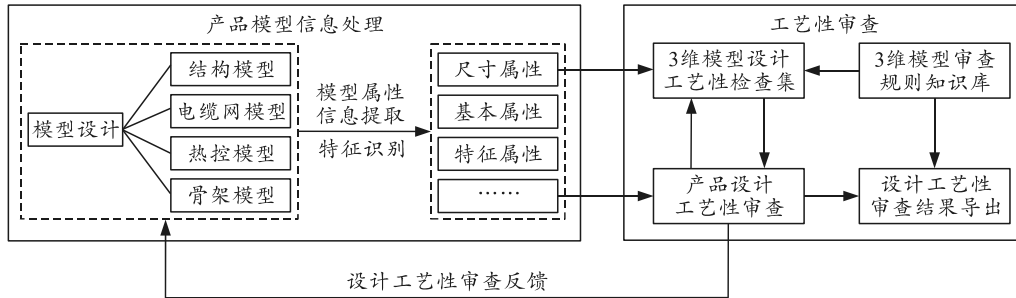


图 1 面向 3 维模型的卫星产品设计工艺性审查业务流程

1) 产品模型信息处理。

产品模型信息处理是在完成产品模型设计并下发之后，对产品模型进行提取、筛选以及整合等处理。模型属性信息提取是对 3 维模型设计属性参数信息进行提取，包括 3 维设计软件赋予的基础属性、材料属性等以及二次开发快速设计软件模块中补充的属性信息；特征识别是对 3 维模型中的特征进行识别，分析提取特征类型、尺寸等非直接记录的属性信息。最终对两者数据进行筛选、预分析以及整理等获取设计工艺性审查相关属性条目与数据。

2) 工艺性审查。

产品设计工艺性审查是依据设定的工艺性审查规则对设计模型进行审查分析^[6-7]。将行业标准、行业实践经验和企业自身的知识整理和构建知识库并定时更新，通过建立 3 维模型、属性、审查规则之间的关系模型，依据选定的检查集对提取的属性信息进行设计工艺性审查，并输出工艺性审查结果。

1.2 卫星 3 维模型工艺性审查需求分析

随着卫星领域基于 MBD 3 维设计的不断深入，许多卫星设计环节已采用全 3 维模型、3 维标注和属性信息等方式进行设计表达定义，设计时多采用二次开发的快速设计系统，引入多种快速定义属性^[8]。工艺环节只能基于 3 维模型进行后续的工艺性审查、工艺设计和检验等流程，因此，快速、完整地提取 3 维设计模型的属性信息对于后续的步骤流程至关重要^[9]。

设计模型越来越复杂和庞大、更新频率变快以及产品设计对 3 维模型的依赖程度日益增加，工艺人员仅靠自身所掌握的规范和经验知识对 3 维模型

开展工艺性审查已很难达到良好效果，导致难以发现潜在的工艺性问题，增加返修风险，需开展以下研究与应用：1) 进行设计工艺性审查规则与 3 维模型属性信息关系建模，为后续工艺性审查提供基础；2) 整理行业标准、行业实践经验和企业自身的知识并构建知识库，并定时更新；3) 结合工艺性审查知识进行自动化的产品设计工艺性审查提高审查效率。

2 审查规则与 3 维模型属性关系建模

卫星产品 3 维设计模型属性信息种类多样且复杂。为满足产品工艺性审查的针对性、高效性、即时性等需求，在 3 维模型属性信息提取的基础上进行整理归纳，并基于产品 3 维模型几何信息、模型属性和审查规则的逻辑关系实现审查规则与属性信息之间的关联建模，记作：

$$RM = \{GI, MP, RR\}.$$

其内容定义如下：

几何信息 (geometric information, GI) 指 3 维设计模型相关的几何信息，可分为装配层、特征层和零部件层，包括尺寸、特征参数等信息，记作：

$GI := \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_i, \dots, I_n\}$ 。其中 I_i 为各项几何信息。

模型属性 (model properties, MP) 指 3 维模型设计属性信息，在 3 维模型工艺性审查过程中，主要包括装配明细信息、孔位信息、电缆与元器件信息、结构杆件信息、热电偶信息等设计属性，记作：

$MP := \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n\}$ 。其中 P_i 为各项模型属性。

审查规则 (review rules, RR)，工艺性审查过程

中所用到的规则，可分为面向技术文件、2 维图纸和 3 维模型的审查规则。对于 3 维模型工艺性审查来说，包括通用检查项、3 维标注检查项、零件检查项、装配检查项、绘图检查项等类别，记作：

$RR ::= \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_i, \dots, R_n\}$ 。其中 R_i 为各项审查规则。

多层次产品属性信息与审查规则模型如图 2 所示，装配层、特征层以及零部件层为纵向分层关系，其相应的属性信息如卫星装配明细、孔位信息查看等以及装配、绘图等检查项构成横向关联关系，且属性信息根据其实际要求及分类与各实例化检查项构成引用关系。

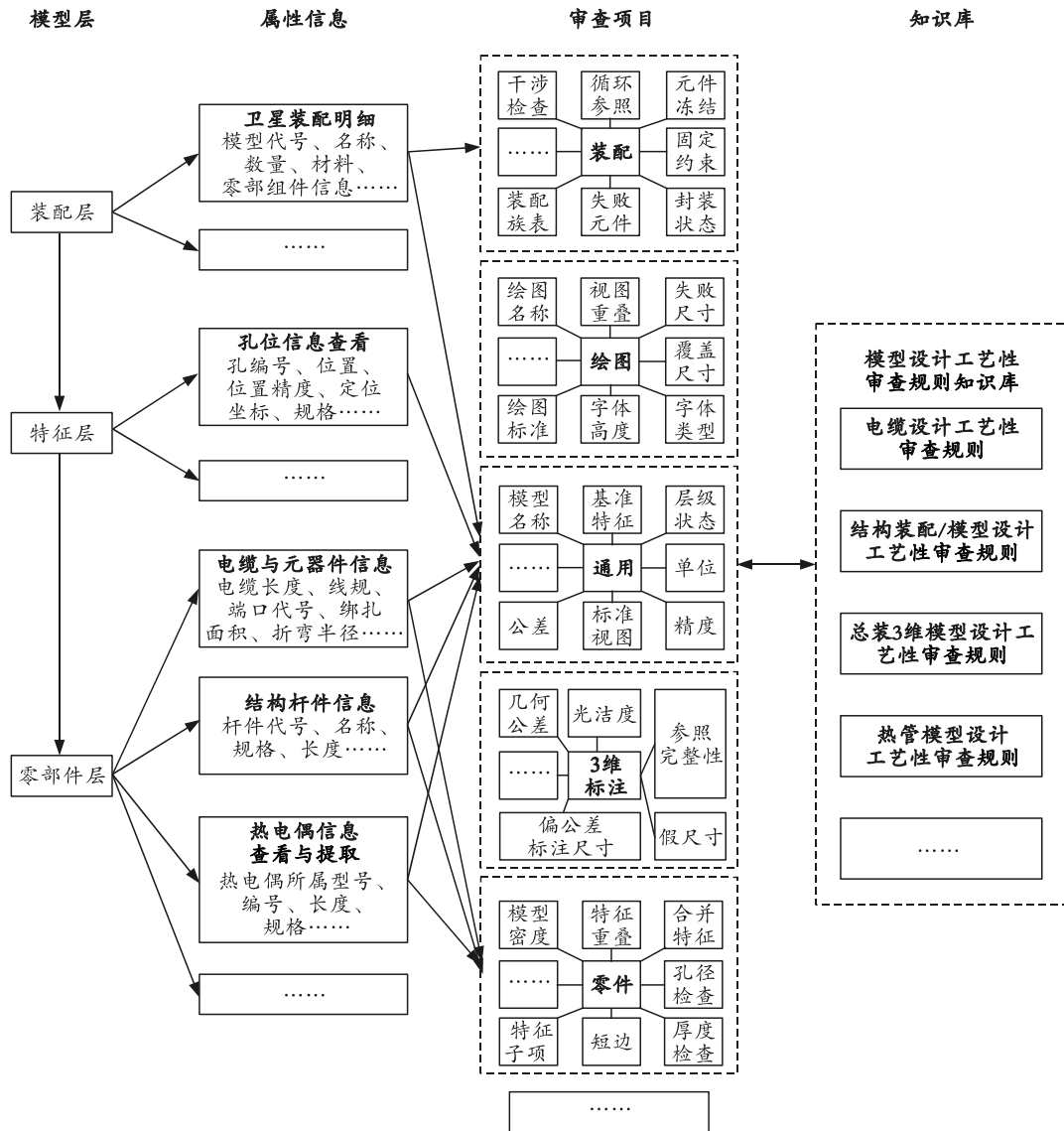


图 2 多层次产品属性信息与规则关系模型

3 3 维模型工艺性审查关键技术实现

3.1 模型设计属性提取与自动分析

目前，卫星设计单位 MBD 的模式采用 3 维设计软件以及二次开发设计软件模块开展卫星 3 维模型设计^[10]，导致产品设计模型属性信息数据量大、种类繁多，根据属性信息的定义方式和工具，将设计属性信息分为基础属性信息与快速定义属性信息，如图 3 所示。

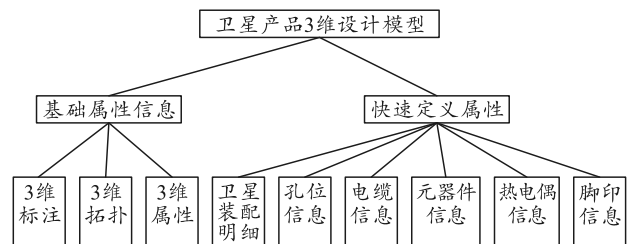


图 3 模型设计属性信息组成

模型设计属性提取与自动分析环节步骤如图 4 所示。接收到卫星产品 3 维设计模型后，进行模型

属性信息的提取，包括由设计软件定义的基础属性信息，如特征参数、尺寸参数等和由二次开发软件定义的快速定义属性信息，如元器件信息、电缆信

息、脚印特征信息等。为保证后续设计工艺性审查的效率和有效性，进行关键属性和关键特征的信息提取，如特征坐标、象限标识等。

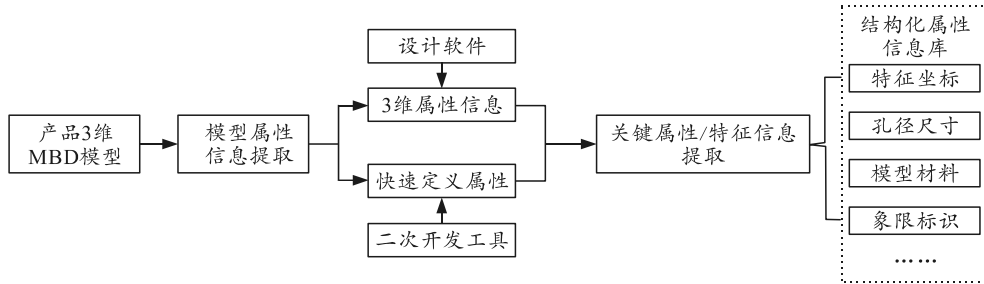


图 4 模型设计属性数据提取与查看流程

3.2 基于规则的 3 维模型设计工艺性审查

基于 3 维模型开展卫星设计和定义是当前卫星设计的趋势，对卫星 3 维设计模型数据开展工艺性审查是工艺工作的重要环节。目前，对卫星 3 维模型的设计工艺性审查主要采用传统的人工审查方式，工艺人员审查设计数据主要依赖工艺标准规范和自身经验知识^[11]，但是随着设计模型越来越复杂和庞大、更新频率变快以及产品设计对 3 维模型的依赖程度日益增加，工艺人员仅靠自身所掌握的规范和经验知识对 3 维模型开展工艺性审查已很难达到良好的效果，导致难以发现潜在的工艺性问题，增加返修风险。笔者在提取和存储模型设计属性数据的基础上，提出基于规则的 3 维模型工艺性审查分析方法。

多专业模型审查规则知识库，包括结构装配模型、热管 3 维模型、卫星总装 3 维模型、低频电缆网 3 维模型和桁架模型等设计工艺性审查规则知识库。

3) 采用关系型数据库+文件数据库相结合的混合存储方式，实现对各专业模型工艺性审查知识的统一关联存储。

3.2.1 多专业设计工艺性审查规则知识库构建

卫星产品 3 维设计模型审查规则涉及知识专业领域较多、种类复杂多样。且在设计模型中数据一般为定量的方式来输入，而审查结果通常需要定性判断输出。为实现设计工艺性审查规则知识的规范化表达，根据专业进行审查规则结构化梳理和数据结构设计，实现对知识单点的表达，而后构建审查规则知识库，其步骤如下：

3.2.2 基于规则的 3 维模型设计工艺性自动审查

基于规则的 3 维模型设计工艺性审查时在卫星产品 3 维模型属性信息提取整合和规则知识库构建的基础上，通过提取的模型各专业属性信息与审查规则进行匹配和判断分析，实现 3 维模型设计工艺性的自动审查和结果输出，具体流程如图 5 所示。

1) 在整理卫星产品各模型工艺性审查条目和模板的基础上，对审查规则进行梳理、聚类、降维，明确审查规则知识的所属类型、所处专业、知识范畴、关联关系及数据格式，以热管 3 维模型审查规则知识条目数据结构为例，如表 1 所示。

表 1 热管 3 维模型审查规则知识条目数据结构

字段名称	编号	类型	数量	蜂窝板 最大厚度	结构孔 最大孔径	...
类型	char	char	int	real	real	...

2) 根据审查规则知识的类型及专业范畴，构建

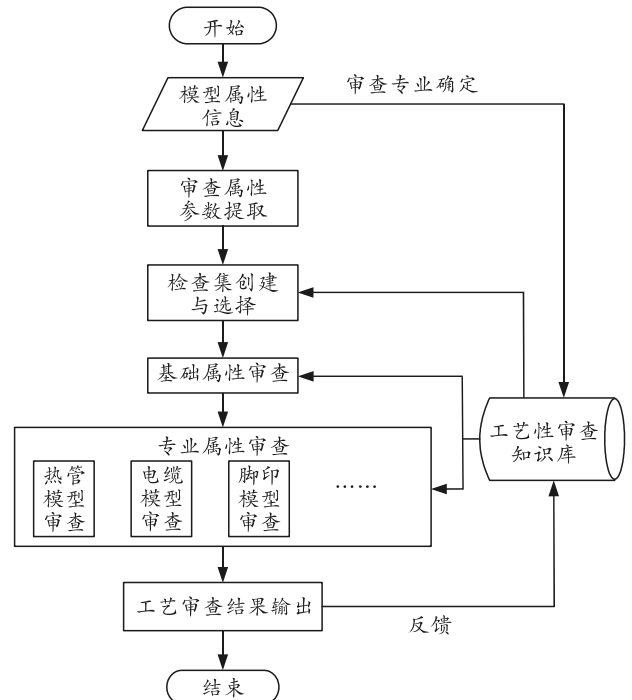


图 5 基于规则的 3 维模型设计工艺性审查流程

1) 审查专业确定：根据产品设计模型提取的属性信息，确定审查专业并确定规则知识库类型和审

查规则知识条目。

2) 审查属性参数提取：根据从审查规则知识库提取的审查规则对模型属性信息进行遍历，提取尺



图 6 模型 3 维标注尺寸和模型参数信息

3) 检查集创建及选择：基于提取的模型数据信息，确定模型审查专业类型并查看现有审查规则检查集，若已存在对应的审查规则检查集，则选择该检查集；若不存在匹配的检查集，则通过配置所需的审查规则条目创建合适的审查规则检查集，并上传至服务器进行版本控制。

4) 基础属性审查：该步骤实现对设计尺寸、设定参数等由 3 维模型基础参数数据比对，并与对应审查规则进行匹配分析，输出审查结果。

5) 专业属性审查：该步骤实现对卡箍位置约束参数、结构孔参数等由各专业相关模型参数数据比对，并与对应审查规则进行匹配分析，输出审查结果。

6) 工艺审查结果输出：整合基础属性和专业属性审查结果，进行模型设计工艺性审查结果输出，并反馈工艺性审查知识库进行审查规则的补充和修正。

3.2.3 设计模型工艺完整性审查

3 维模型工艺性审查规则知识库是结合模型工艺性审查经验提出的规则要素和后续模型设计工艺性审查结果反馈修整构建的。通过选择特定的工艺性审查知识库以及对应的审查规则知识条目，在完成设计工艺性自动审查后，匹配并比对审查结果可以实现设计模型的工艺完整性审查，如编号、设计数据完整性，用于模型的修改意见反馈，提高审查效率。设计参数缺失如图 7 所示。

序号	参数名	类型	值	指定
1	WZ_VER	STR	*	<input checked="" type="checkbox"/>
2	WZ_CODE	STR	*	<input checked="" type="checkbox"/>

图 7 设计参数缺失

寸信息、形位公差信息、各专业属性参数等模型属性参数用于审查。图 6 所示为 3 维标注尺寸和模型参数信息。

4 3 维模型设计工艺性审查系统设计及实现

基于上述研究，依托 Pro/E 软件设计开发了 3 维模型工艺性审查系统，包括模型设计属性数据提取、审查规则知识库构建与配置、3 维模型设计工艺性审查等功能模块，其系统框架如图 8 所示。

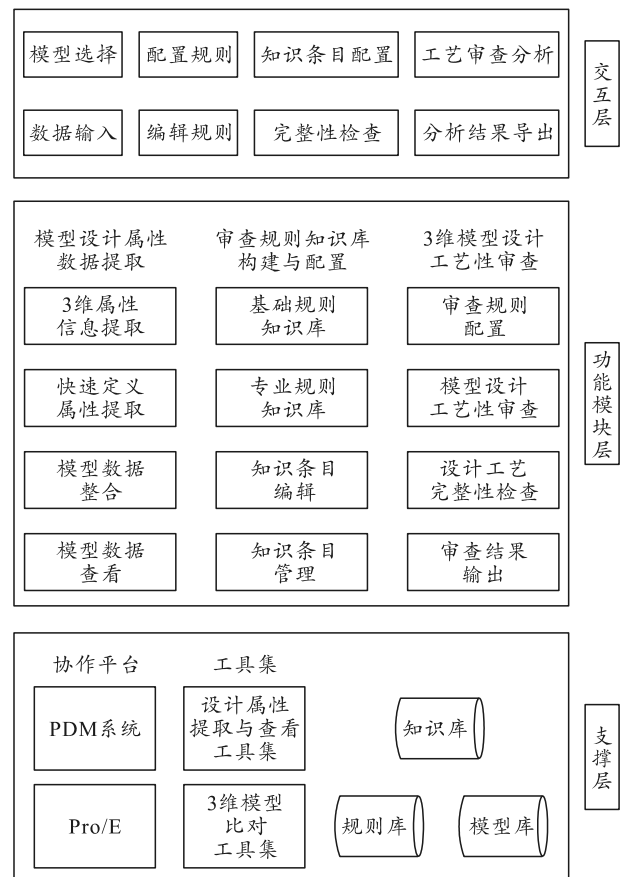


图 8 3 维模型工艺性审查系统总体架构

1) 模型设计属性数据提取。

该模块在设计软件中基于特征识别、设计信息遍历提取等技术，提取并存储 3 维模型属性信息和快速定义的属性信息，如图 9 所示。

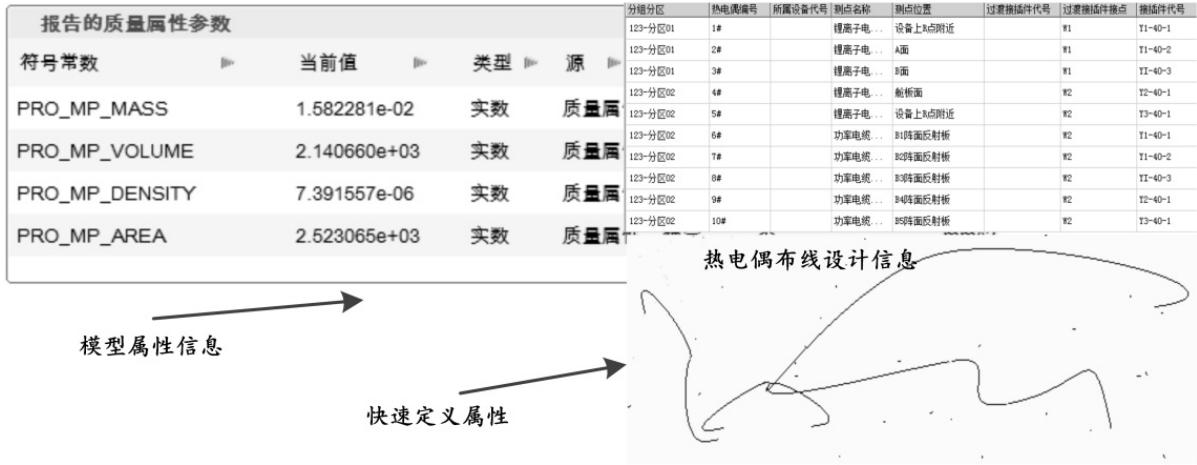


图 9 模型属性信息和快速定义属性

2) 审查规则知识库构建与配置。

审查规则知识库构建与配置功能模块，是将 3 维模型设计工艺性审查经验整理的规则要素根据定义的知识条目数据结构进行结构化处理，图 10 和 11 分别为审查条件与审查规则知识条目的关联匹配和各专业检查集的配置。

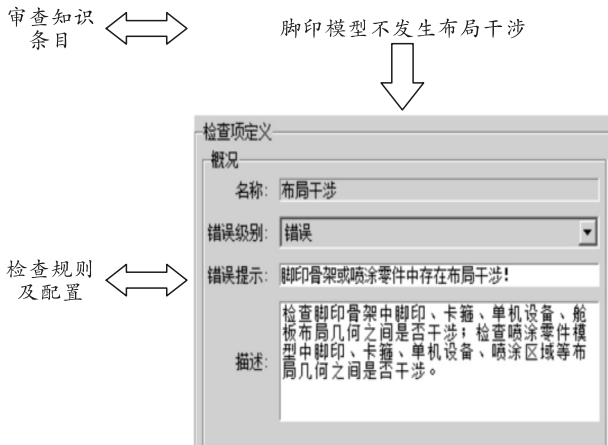


图 10 审查条目与审查知识关联匹配



图 11 模型检查集构建与配置

3) 模型工艺性审查分析。

模型工艺性审查分析模块是将相关知识整理成工艺审查规则库的基础上，通过数据和审查规则知识条目匹配分析实现设计工艺可行性审查，并支持审查区域的快速定位以及结果自动分类和分析报告输出，如图 12 所示。

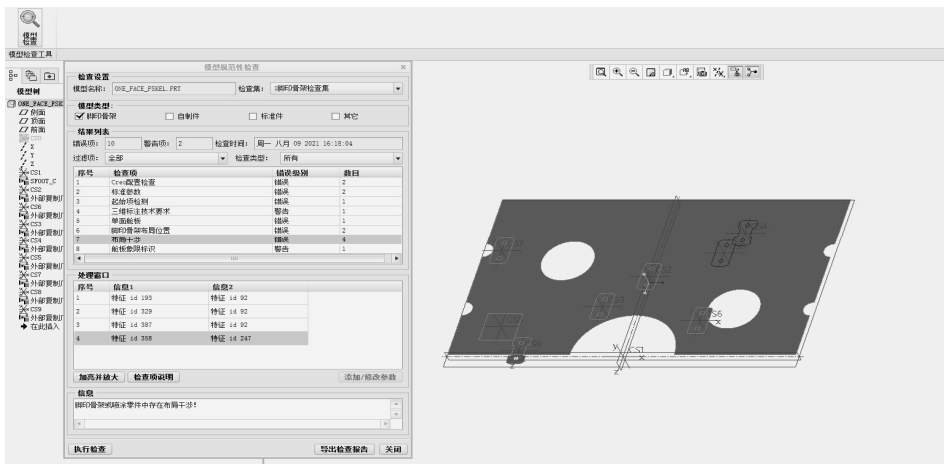


图 12 3 维模型设计工艺性审查分析