

数控弯管成形专家系统在某航空发动机企业的应用

撰文 / 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 庞丹 亢亚敏

本文结合企业的实际业务情况,在 Teamcenter 系统(简称 TC 系统)、NX 和有限元仿真软件 Pam-stamp 基础上,根据实际数控弯管工艺分析过程,建立以实际数控弯管成形工艺仿真过程为对象一体化集成环境,针对典型数控弯管工艺来对弯管成形工艺仿真分析流程进行定制和开发,建立数控弯管成形专家系统。通过系统的建立有效降低了弯管建模、模具设计、运动仿真、力学仿真、数控编程、结果分析及管形质量评估的工作难度。

一、引言

目前,国内各个企业用的最多的数控弯管工艺有限元分析工具软件是 PAM-STAMP\DYNAFORM\ABAQUS 等软件,这些软件功能都具备模拟数控弯管工艺过程的能力,但这些软件的共性特点是软件界面比较复杂,软件与模具三维设计软件需要几何数据转换,容易丢失几何信息,使用过程中相对麻烦,同时也要求使用者具备一定的有限元基础知识,所以这些缺陷导致了软件不利于在企业中大量推广和使用,限制了软件功能和效益的发挥。为了解决这些使用缺陷,提出了基于统一界面的数控弯管成形专家系统,系统前端展现 NX 软件界面,后台有限元分析工具软件采用商用的有限元分析工具软件 PAM-STAMP,解决弯管下料尺寸估算、弯管模具可成形性和可行性分析、弯管成形精确模拟、弯管成形后零件回弹量大小预测等。该系统能够实现对零件数字化加工相关的全部数据进行有效管理,并通过导管成形过程的快速模拟,对导管成形工艺方案和成形质量进行分析、预判,协助技术人员快速、轻松制定工艺总方案。

在当前制造业快速反应、敏捷制造的大环境下,随着企业某型发动机的生产任务逐年增加,发动机钣金导管类零件的形状及设计精度要求也越来越高,一些钣金成形的管件

正逐渐改成由管材成形,如 90° 弯头、异形管等,其材料也逐渐向钛合金、高温合金等新材料转变,其成形状况相对复杂、回弹复杂,对设计给定的弯曲半径,倘若简单依靠经验设计模具,则无法保证其工艺实现,假如对其成形过程采用仿真软件进行工艺分析和模具设计,可以预测成型过程质量缺陷,则可以在现场物理试模之前将问题消灭。

二、企业的信息化应用水平现状

某企业作为我国航空发动机行业的骨干单位,承担着发动机的生产制造及售后服务工作。PDM、ERP、MES 及 OA 等系统在该单位都有一定规模的应用,并取得了显著的成果。企业在数控弯管工艺仿真方面开展了部分应用研究工作,但尚未全面推广应用,数控弯管工艺仿真过程操作复杂,尚未打通仿真软件与建模软件和 PDM 系统之间的接口,仿真过程缺乏工艺参数等知识的支撑,仿真结果缺乏集中有效的信息化管理。具体表现在以下几个方面。

◎ 弯管建模目前在 NX 中手动创建,没有实现参数化建模手段。

◎ 弯曲模具也是在 NX 中手动创建,没有实现快速建模工作。

◎ 数控弯管工艺有限元分析工具软件 PAM-STAMP 使用过程繁琐，操作流程麻烦，普通工艺和设计人员很难掌握软件，很难发挥软件使用效能，不利于有限元分析工具软件的大规模使用和效益发挥。

因此，需要在 NX 和有限元分析工具软件 PAM-STAMP 基础上，根据实际数控弯管工艺分析过程，建立数控弯管成形专家系统，解决数控弯管参数化设计建模，弯曲模具的快速设计，针对典型数控弯管工艺来对弯曲成形工艺仿真分析流程进行定制和开发，建立弯曲仿真 KBE 建模分析模块，建立弯管力学仿真模块，建立仿真结果质量评估模块和实现基于 Teamcenter 系统的导管工艺知识数据库，建立数控弯管成形专家系统统一平台，同时要实现数控弯管成形专家系统统一平台与 TC8.3 系统集成关联，模型和仿真结果都在 TC8.3 系统存储和管理。

三、主要功能需求分析

1. 弯管参数化建模

弯管参数化建模模块是在 NX 的管路设计模块基础上，利用 NX 二次开发函数和参数化驱动功能进行定制开发实现，模块可以根据输入弯管曲线参数和壁厚、材料等设计参数实现基于 NX 快速三维建模，并能够自动计算弯管所需管料参数和管型参数，能够作为“弯管仿真 KBE 建模分析模块”进行弯管成形仿真设置所需要弯管的建模参数数据。

模块能够直接读取和利用 TC 系统已有的设计三维模型进行弯管所需管料参数和管型参数的计算，通过对弯管三维模型进行反向处理，生成“弯管仿真 KBE 建模分析模块”进行弯管成形仿真设置所需要弯管的建模参数数据。

2. 弯管工艺知识数据库

模块是在收集整理不同管材、规格、成形半径、模具及加工参数等的实际加工数据后，利用 TC 系统的分类管理功能实现工艺知识库的分类管理，开发实现弯管工艺知识管理、检索查询及应用功能。

弯管工艺知识数据库基于 TC 定制开发实现，其子模块包含材料性能数据库、弯管设备库、弯管模具库、弯管工艺参数库、弯管知识库和仿真模板库等。

由于数据库是直接由 TC 系统定制开发实现，因此每个子库都具备 TC 系统对数据库的实例信息进行增加、修改、删除、统计、查询、数据导入和下载等功能。

用户利用弯管工艺知识数据库可以查询、增加、修改和删除材料、设备、模具、工艺参数、弯管知识和仿真模板等实例信息。

3. 系统统一环境与 NX、Pam-stamp、TC 集成接口

利用 Pam-stamp 软件的二次开发接口，建立系统与 Pam-stamp 集成接口，能够将软件界面集成到系统界面中，同时系统可以驱动软件进行计算操作。

建立 NX 模面处理、有限元分析软件 Pam-stamp 软件前置处理、求解、后处理和生成分析报告之间的接口。

系统将建立 NX 模面处理、有限元分析软件 Pam-stamp 软件前置处理、求解、后处理和生成分析报告之间的操作过程整合到一个总体操作界面，实现操作过程自动关联。

实现与 Teamcenter 系统集成，实现软件调用和数据管理，实现工艺知识的查询调用，实现建模及仿真结果在 Teamcenter 系统自动存储管理。

利用 Teamcenter 系统的数据组织模式进行工艺仿真结果数据的管理，并建立与管件设计数据、工艺数据等的关联，基于 Teamcenter 系统实现数据统一集成管理。

在企业内，目前产品原始弯管三维设计模型保存在 TC 系统中，当要分析此弯管成形性及工艺性，需要从 TC 中获取此弯管三维设计模型，当用户利用弯管仿真 KBE 建模、弯管力学仿真和仿真结果质量评估模块，完成某特定的弯管仿真分析报告，系统将此仿真分析报告上传到 TC 系统管理，以方便其他人员共享此分析报告。

4. 仿真分析流程定制开发

在 NX 和有限元工具软件 Pam-stamp 基础上，根据实际弯管成形仿真过程的需求，在系统中定制开发典型数控弯管工艺仿真过程中导入几何及划分网格功能模板、边界条件和计算求解条件设置功能模板、执行求解计算功能模板、输出结果云图及结果报告功能模板，功能模板可以被重复调用，功能模板界面包含推荐的默认设置参数。

各个功能模板都存储在 TC 系统的弯管工艺知识数据库中进行管理，并能够被用户查询、共享和使用。

多个功能模板可以有机组合成一个仿真分析流程模板，流程模板符合某个实际弯管弯曲成形工艺规范和 Pam-stamp 软件操作规则，能够完整执行一个弯管弯曲成形仿真全过程，最后生成仿真结果分析报告。

经常被使用的仿真分析流程模板经过专家认可审核后

可以保存成标准仿真分析流程模板，存储到 TC 的弯管工艺知识数据库中，以便其他人员查询、共享和应用，流程模板可以重复使用，新工艺人员可以调用标准流程模板来进行一个新弯管成形仿真过程，仿真过程中系统会推荐各个功能界面的默认设置参数，用户也可以对默认的参数进行修改，以适应新弯管仿真的要求，这种使用方式能够大大简化软件使用难度，降低有限元仿真软件门槛。

弯管成形标准仿真流程模板可以自动化运行，以实现优化弯曲过程的弯曲工艺参数。使用者利用系统平台功能可以对弯管仿真过程中功能模板和标准仿真流程模板修改和优化。

同时经过培训，用户可以利用平台提供模板封装的功能可以自己封装功能模板，然后利用功能模板可以有机组装成仿真流程模板。

系统提供可视化的流程定制功能，通过控制流和数据流的定义，实现对用户特定设计分析流程的封装。

5. 弯管仿真 KBE 建模分析

基于 NX 和 Pam-stamp 软件，分别定制开发出弯管仿真 KBE 建模功能模块，此模块的各个功能模板界面能够实现快速定义弯管成形仿真过程有限元相关参数设置功能、网格划分及边界条件设定功能，包括：导入几何模型及划分网格；定义弯管成形工具（弯曲模具、压块、防皱块、芯棒、芯球和推力块等）；定义弯管金属材料成形性能参数；定义弯曲模具边界条件；定义弯管成形过程的载荷条件；定义 Pam-stamp 软件求解器参数；定义弯管成形过程中的回弹参数；定义计算结果后处理操作条件和参数等。

模块包含弯管反算下料模块、弯管一次弯曲成形仿真模块、弯管两次弯曲成形仿真模块等子模块，每个模块包含多个功能模板和标准仿真分析流程模板。

模块能够将原来复杂的弯管成形仿真前处理设置过程变成采用调用各个功能模板和标准仿真流程模板来驱动 NX 和 Pam-stamp 软件去执行以前需要手动操作的工作，能够大大简化 Pam-stamp 软件操作界面和设置过程，降低用户对有限元软件使用难度。

6. 弯管力学仿真

弯管力学仿真采用 Pam-stamp 软件计算和分析完成，利用平台集成 Pam-stamp 软件的功能，当用户利用“弯管仿真 KBE 建模分析模块”完成某个具体的弯管成形仿真前处理设置时，平台后台驱动 Pam-stamp 软件执行计算，得

到仿真计算结果。力学仿真模块能够完成应力、应变、破裂、起皱和回弹等后处理云图显示，能够对回弹进行补偿计算分析，输出回弹补偿结果。

7. 仿真结果质量评估

根据弯管弯曲成形仿真结果云图和仿真结果报告，与弯管成形缺陷规则工艺知识库的数据进行对比，以评估工艺仿真结果质量。

然后根据企业仿真结果质量评估报告要求格式，按现行各型号弯管制造说明书指标可量化的仿真结果质量评估分析报告。

8. 与其他模块集成

提供弯管模具辅助设计、数控弯管自动编程、运动仿真和管型质量评估模块数据接口，实现这些模块之间数据交互，将模块输出的结果文件保存到 TC 系统中。

四、系统总体架构设计

1. 系统总体架构

数控弯管成形专家系统包含弯管参数化建模模块、弯管模具辅助设计模块、数控弯管自动编程模块、弯管运动仿真模块、管形质量评估模块、弯管仿真 KBE 建模模块、弯管力学仿真模块、仿真结果质量评估模块以及弯管工艺知识数据库。

其中弯管工艺知识数据库包含材料性能数据库、弯管设备库、弯管模具库、弯管工艺参数库、弯管知识库、仿真模板库及典型零件仿真模板库。系统总体架构如图 1 所示。

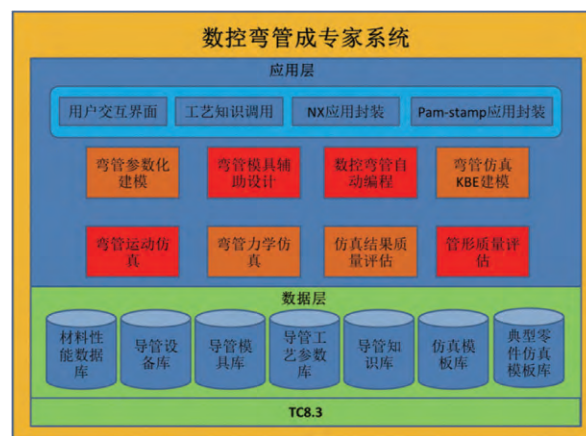


图 1 系统总体架构

(1) 选择索为公司的 Sysware.IDE 作为数控弯管成

形专家系统运行的统一环境和基础系统，在 Sysware 图形展示窗口嵌入 NX7.5 系统，PAM-STAMP 软件在系统后台运行。

(2) 建立系统与 TC8.3 系统数据集成接口，通过集成接口可以获取弯管件的三维数模，且可以将仿真结果报告上传到 TC8.3 系统中。

(3) 基于实际弯管弯曲仿真分析流程，进行规范化分析与定制出弯管参数化建模模块、弯管仿真 KBE 建模模块、弯管力学仿真模块、仿真结果质量评估模块和基于 TC 的弯管工艺知识库等子模块。

(4) 弯管工艺知识库数据库中所有数据存储在 TC 中。

2. 系统总体环境

系统总体环境采用索为公司的 Sysware.IDE 系统，Sysware.IDE 系统具有很强的集成封装功能。

◎ IDE，即集成设计环境（Integrated Development Enviroment），实现对用户设计分析流程的快速封装，实现基于知识组件的设计与分析。

◎ IDE 提供 NX、Pam-stamp 接口组件，能支撑数控弯管成形专家系统中 NX 与 Pam-stamp 的集成。

◎ IDE 提供丰富的通用操作组件，可实现与外部文件、程序、算法 / 函数的调用和数据交互，能支撑数控弯管成形专家系统更好地封装 NX、Pam-stamp。

◎ 提供可视化的流程定制工具，无须编程实现设计分析流程的快速定义，包括控制流定义和数据流定义，能支撑数控弯管成形专家系统中弯管工艺设计流程后台控制流、数据流的定制。

◎ IDE 提供 GUI 界面定制工具，无须编程实现设计分析流程的向导式执行，提高友好性，能支撑数控弯管成形专家数据库中弯管工艺设计流程前台界面定制。

系统总体环境默认布局如图 2 所示。

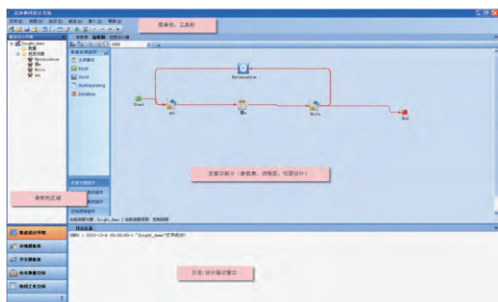


图 2 系统总体环境

五、主要技术特点

1. 弯管参数化建模

弯管参数化建模模块分为两部分，快速参数化建模和三维模型反向处理。

(1) 弯管参数化建模—快速参数化建模。

在模块输入界面中导入弯管弯曲中心曲线坐标文件，输入弯管壁厚、直径和材料等弯管建模参数，系统后台调用 NX 进行参数化建模，输出弯管三维参数化模型、YBC 程序、弯管弯曲中心曲线坐标、弯管弯曲曲线文件（ASC 格式）以及其他的导管参数。

(2) 弯管参数化建模—三维模型反向处理。

在模块输入界面中导入弯管三维模型，系统后台调用 NX 进行反向处理，输出 YBC 程序、弯管弯曲中心曲线坐标、弯管弯曲曲线文件（ASC 格式）以及其他的弯管参数。

2. 弯管仿真 KBE 建模

开发统一的弯管求解设置操作界面，定义仿真过程有限元相关参数设置、网格划分及边界条件设定，为仿真力学计算求解提供依据。包括：导入几何模型及划分网格；定义成形工具（弯曲模具、压块、防皱块、芯棒、芯球和推力块等）；定义金属材料成形性能参数；定义弯曲模具边界条件；定义求解器参数；定义回弹参数等。

弯管仿真操作流程模板可以保存成标准流程模板，使其他人员可以共享和重用。弯管仿真流程模板可以自动化运行，以优化弯曲过程的弯曲工艺参数。使用者利用系统平台功能可以对弯管仿真流程模板修改和优化。

对弯管复杂的仿真流程进行定制化开发后，将形成如图 3 所示的简单、规范且易用的仿真流程模板。

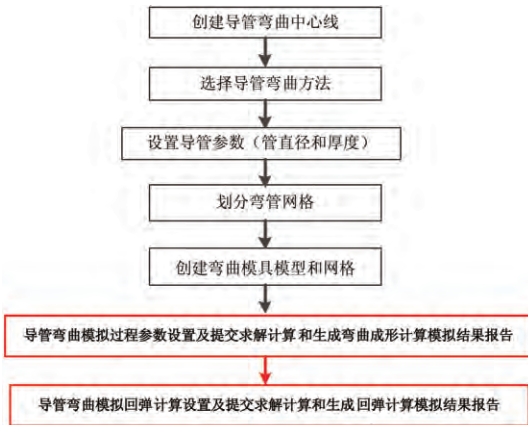


图 3 弯管仿真流程模板

由于 Pam-stamp 有限元仿真软件在进行弯管弯曲成形有限元仿真时,其前处理不支持封装,所以在数控弯管成形专家系统中进行弯管弯曲成形仿真时,前处理采用 Pam-stamp 自带的前处理功能。

弯管弯曲模拟过程参数设置及提交求解计算和生成弯管弯曲计算模拟结果报告模块主要一次性就完成了如图 4 所示工作内容。

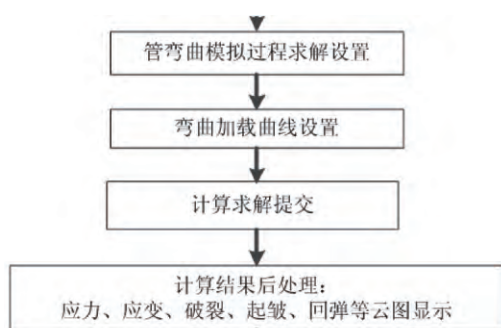


图 4

弯管弯曲模拟回弹计算设置及提交求解计算和生成回弹计算模拟结果报告模块主要一次性就完成了如图 5 所示工作内容。

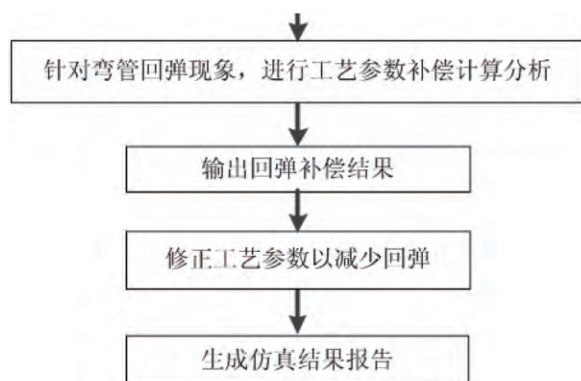


图 5

大大简化了两三个软件操作过程,能够提高软件仿真使用效率,降低有限元仿真软件使用门槛。

3. 弯管力学仿真功能

在弯管力学仿真中,主要是弯管弯曲成形仿真优化计算模块。在 Pam-stamp 中进行弯管弯曲成形仿真求解计算时,Pam-stamp 会将弯曲成形求解计算设置的参数存储在 att 格式的仿真处理文件中,系统通过解析 att 格式的仿真处理文件,获取工艺参数,将其显示在优化计算界面中,且可以在优化计算界面中对工艺参数进行修改并更新至 att 格

式仿真处理文件中。

系统通过封装并调用 Pam-stamp 读取仿真处理文件(att 文件、pre 文件及 psp 文件)重新进行弯管弯曲成形仿真计算。在弯管弯曲成形仿真计算之后,如对仿真结果不满意,可在弯管弯曲成形仿真优化计算界面中重新调整工艺参数,然后再次进行计算,无需用户再次在 Pam-stamp 计算设置界面中重新设置参数。同时,也可以将 TC 中存储的弯管弯曲成形仿真文件导入弯管弯曲成形仿真优化计算模块中进行计算,也可调整参数再次进行计算。

六、应用情况介绍

通过数控弯管成形专家系统建立了企业弯管工艺设计仿真的统一工作环境,实现了从 TC 的弯管零件数据开始,经过数控弯管成形专家系统各模块处理分析,所产生结果数据最后上传 TC 对应零件弯管成形工序中的统一管理模式。有效降低了弯管建模、模具设计、运动仿真、力学仿真、数控编程、结果分析及管形质量评估的工作难度。

◎ 数控弯管成形专家系统基于 NX 建立弯管参数化建模模块,使客户能够方便快捷地进行弯管参数化建模。

◎ 数控弯管成形专家系统基于 TC8.3 建立了弯管工艺知识数据库,以存储弯管工艺相关工艺知识、工艺参数以及相关仿真结果,并使这些数据得到最大化的重用。

◎ 数控弯管成形专家系统基于 SYSDWARE 封装 Pam-stamp,建立弯管仿真 KBE 建模、弯管成形力学仿真,简化了弯管弯曲成形仿真过程,使弯管力学仿真在弯管工艺设计中得到了更广泛的应用。

◎ 数控弯管成形专家系统基于 SYSDWARE 封装 Pam-stamp,建立仿真结果质量评估模块,简化了弯管力学仿真后处理,自动生成弯管仿真结果质量评估报告,使客户更便捷地对仿真结果进行质量评估。