

掘进机三维套料系统集成应用

中国铁建重工集团有限公司 中央研究总院 邹佰文

随着掘进机研发过程的三维化及 PLM、CAPP 的实施，三维套料及其集成应用十分必要。通过对套料软件、CAPP、PLM 中流程、工艺数据、工艺模型的集成应用，工序模型厚度方向标识算法的开发，提出了一种新的三维套料系统集成应用方案。应用结果表明：三维套料集成系统可大幅缩短套料环节消耗时间，提高套料准确率。

一、前言

掘进机是一种广泛应用于地下工程施工的高端装备，其产品设计与所应用的施工环境紧密关联，产品生产模式为典型的 ETO (Engineering To Order) 模式，构成产品的零件种类多，数量大，结构非常复杂。为满足掘进机日益增长的需求、快速缩短的交货周期，掘进机研发正逐渐转向全三维过程，传统的基于二维图纸的工艺研发及制造过程已无法适应三维研发，作为制造的首要环节，下料、套料过程的三维化及其集成应用迫在眉睫。

掘进机的研发过程具有边设计、边生产、BOM 分批发放的特点，目前针对掘进机等大型装备的三维套料集成应用研究较少，宋建军等基于二维 CAD 系统研究了 Tekla Structure 与 FastCAM 在钢结构制造中的集成应用，提高了生产效率；吕超、米小珍等将套料系统与定额管理集成，在与 PDM、CAPP 的集成方面做了尝试，提高了定额计算精度；刘小娟将套料系统与 ERP 集成，提高了家具企业信息流效率和准确性。在如何充分利用设计三维信息，将套料过程与 PLM、CAPP 高效集成，满足 BOM 分批发放特点方面，尚未有较成熟的解决方案。

通过分析掘进机下料零件特点，结合 PLM、CAPP 数据结构，提出了一种适用于掘进机等大型装备的全三维套料集成方案，在保证套料软件套料效率及材料利用率的同时，大幅缩短套料周期，提高套料准确率。

二、掘进机三维套料集成总体方案

由于掘进机 ETO 模式的特点，一般采用项目制管理研

发生产过程，其 MBOM 基本重用 EBOM 结构，因而掘进机套料过程主要涉及到 PLM、CAPP、套料软件三方集成。掘进机三维套料集成总体方案图如图 1 所示。其中，涉及的软件平台包括：PLM 为 PTC 公司的 Windchill 平台，套料软件为华中科技大学的 SmartNest，CAPP 为 PTC 公司的 MPMLink 模块，其中 MPMLink 无缝集成于 Windchill 平台。

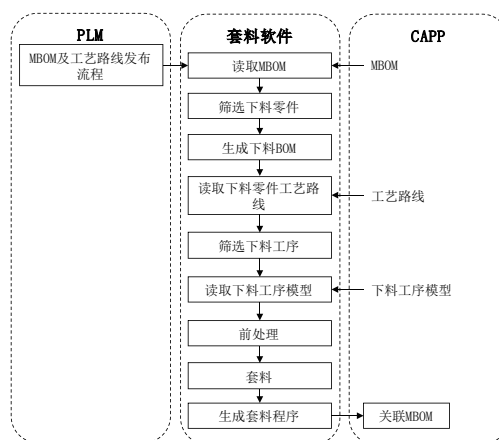


图 1 三维套料集成总体方案

工艺人员在 CAPP 中完成工艺设计后，在 PLM 通过“MBOM 及工艺路线发布流程”发布正式版本的 MBOM 及工艺路线，提供相应的下料零件下料三维模型，同时触发套料软件开始套料任务，套料软件从 CAPP 读取 MBOM，筛选出下料零件，生成下料 BOM，再根据下料零件的工艺路线筛选出下料工序，读取相应的下料工序模型，结合下料 BOM 及下料工序模型，经模型前处理后，进行套料，生成的套料程序关联至 CAPP 中的 MBOM，同时发送车间设备，完成一个标准的套料周期工作。

三、套料软件与 PLM 的集成

PLM 作为产品研发数据管理平台及研发过程管理平台，通过工作流程规范研发工作，套料软件与 PLM 的集成主要集中在流程驱动集成上。

工艺设计人员在 CAPP 中进行产品零部件的工艺研发工作，完成工艺技术文件的设计和下载工序模型的设计后，在 PLM 中发起“MBOM 及工艺路线发布流程”，进行 MBOM 及工艺路线的发布工作，完成 MBOM 及工艺路线的审签、定版。结合掘进机产品研发过程 BOM 分批发放的特点，流程审签完成后，PLM 将发布流程中包含本批次发布的 MBOM 中所有顶级部件物料编码、物料名称、数量等信息推送至套料软件，触发套料软件生成一个新的套料任务。

因掘进机的 MBOM 数据量大，又是单台非标产品，在设计套料软件与 PLM 的集成接口时，充分考虑集成数据的验证，确保套料任务信息传递的准确性。

四、套料软件与 CAPP 的集成

CAPP 作为掘进机产品工艺研发的主要平台，管理了所有工艺相关的信息，并使用 PLM 的研发流程，进行工艺技术文件的有效性管理，是套料软件工作所需基础数据的来源，因而，套料软件与 CAPP 的集成主要是 MBOM、工艺路线、下载工序模型、套料交付物等数据的集成。

CAPP 中的 MBOM、工艺路线是结构化的数据，结构如图 2 所示，组件 / 焊接件由多个物料组成，每个自制物料包含该物料所需的原材料、一条确定的工艺路线，每条工艺路线由多道工序组成结构树，每道工序又包括该工序所需要的下载工序模型、设备、工作中心等。

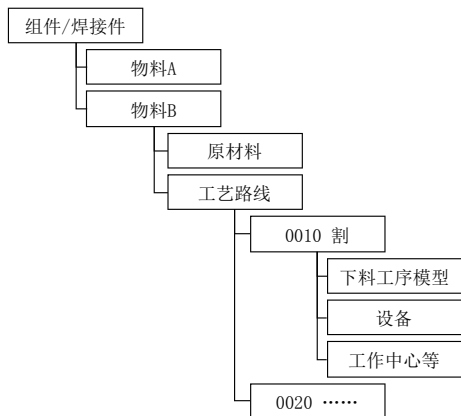


图 2 CAPP 中的结构化工艺

1、MBOM 集成

掘进机产品 BOM 规模大，整个产品，甚至一级部件的 BOM 都无法一次性发放完全，普遍存在分批发放的现象，分批发放是指设计完一个一级部件的一批零部件，即正式发布至工艺、生产等下游部门，用于组织生产，以确保部分长周期物料能及时供应，满足产品交付周期，因而发布的一批零部件可能包含多个并列的顶级物料。为契合此特点，在套料软件与 PLM 的集成中，PLM 推送给套料软件的不是单个 MBOM 顶级物料，而是当前发布批次中所有顶级物料的信息。套料软件接收到 PLM 的推送后，自动创建一个新的套料任务，并根据推送的顶级物料信息，逐个到 CAPP 中读取 MBOM 信息，读取的 MBOM 信息字段包括父项物料编码、父项物料名称、子项物料编码、子项物料名称、数量、原材料规格、是否定尺等。

掘进机中 MBOM 中，物料属性包括自制件、外购件、外协件，根据物料结构类型又分为组件、焊接件、零件，零件所用的原材料又包括板材、型材、铸锻件等，其中套料的物料主要为自制件中以板材为原材料的零件。因而，套料软件读取 MBOM 后，首先根据物料“来源”字段过滤其中的外购件、外协件，再根据“材料规格”字段过滤出其中的以板材为原材料的零件，形成初始下载 BOM，作为套料任务的初始输入物料清单。

2、工艺路线集成

工艺路线描述了物料从原材料、半成品到成品的方法和过程，下载工序一般为零件的首道工序。掘进机中板材下载零件一般为板厚 40 ~ 100mm 的厚板，下载方法为火焰切割，根据掘进机零件制造车间设备情况及工艺路线设置原则，板材下载工序在工艺路线的第一道工序，工序名称为“割”。

套料软件基于下载 BOM，从 CAPP 中抓取下载 BOM 中每一项物料的工艺路线，首先筛选出第一道工序名称，过滤出第一道工序名称为“割”的物料，形成最终的下载 BOM。

3、下载工序模型集成

下载 BOM 是套料任务的生产纲领，描述了需要下载物料清单、数量，所用原材料的材料规格等信息，下载工序模型则是零件下载毛坯的几何描述，下载 BOM 和下载工序模型形成完整的套料任务输入。

套料软件根据最终下载清单，从 CAPP 中找到每一项

物料工艺路线的第一道工序，抓取其附件中关联的下料工序模型，作为该物料的下料毛坯。为了满足套料软件套料的准确输入，需要工艺研发人员在工艺设计过程中，为每一道下料工序附上关联的下料工序模型，其中，若下料毛坯与设计零件模型完全一致，则直接引用设计零件模型，建立其与下料工序的关联关系，若下料毛坯需要留加工余量等造成与设计模型不完全一致，则需要工艺研发人员利用设计模型生成所需的下料工序模型，并通过注释标识模型的板厚方向，检入 PLM 系统后与下料工序关联。在此过程中，若未检测到对应的下料工序模型，则报错，提醒用户错误。

随着掘进机产品研发转换到三维研发，套料软件从 CAPP 直接读取的下料工序模型为三维模型，而最终的套料过程本质上是一个在二维钢板平面套料的过程，要实现套料，要么全部转化成二维 CAD 模型，但工作量较大，存在数据源不统一的问题，要么直接利用三维模型，需要准确的识别模型的板厚方向。为吻合全三维设计及工艺设计流程，开发了一种三维下料工序模型板厚方向识别的算法，其流程图如图 3 所示。

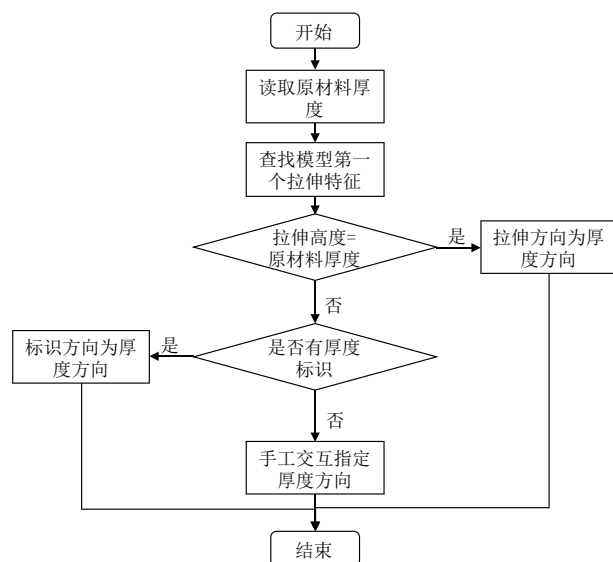


图3 板厚方向识别算法流程图

首先，从 MBOM 中读取物料原材料规格中的厚度，查找下料模型中的第一个拉伸特征，判断拉伸特征高度是否等于原材料厚度，若匹配，则以拉伸方向为厚度方向，这一步主要针对直接引用的设计模型，在建模规范中要求设计人员按此规范设计。在工艺人员制作的下料模型中，因为建模方法为基于设计模型进行柔性建模，一般无法匹配，则查找模型中是否有工艺人员标识的厚度方向，若匹配，则以标识方

向为厚度方向，其他特殊的则在套料软件中手工指定厚度方向，确保所有下料模型均已指定下料厚度方向。

4、套料交付物的集成

经过前述的数据准备，套料软件进行套料工作，套料完成后，生成相应的套料图、套料程序等交付物，为了统一工艺技术文件管理，将此交付物返回 CAPP 系统与相应的 MBOM 关联，完成套料任务。

五、应用成果

以某掘进机项目刀盘、盾体作为试点项目，应用三维套料集成方案，作为对比，同型号另一项目采用三维模型转二维再生成下料轮廓、手工处理 MBOM 的初始方案，在套料相关环节的消耗时间如图 4 所示。试点项目中共包括 387 种，总计 1854 个下料零件，总体来看，应用三维套料集成方案后，下料模型准备环节缩短了 2 小时，MBOM 环节由系统集成，耗时可忽略，前处理环节省去了二维模型封闭性，尺寸是否 1:1 等检查，缩短了 3 小时，总体套料环节缩短了 6 个小时，缩短时间超过 50%。同时，因手工处理模型和数据产生的错误大幅减少，提高了套料的准确率。

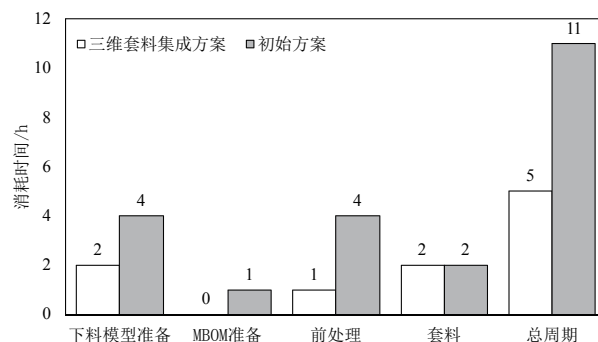


图4 三维套料集成方案与初始方案套料各环节消耗时间对比图

六、结语

掘进机三维套料集成方案主要涉及套料软件、CAPP、PLM 的三方集成。三维模型厚度方向识别算法可有效标识零件厚度方向，用于三维套料前处理。应用三维套料集成方案缩短掘进机套料环节消耗时间 50% 以上，套料过程准确性大幅提高。