文章编号: 1001-1986(2012)01-0089-04

煤矿井下坑道钻机数字化设计技术

张建明，刘桂芹，刘庆修
(中煤科工集团西安研究院，陕西 西安 710077)

摘要: 结合企业批量定制生产和产品变型开发的特点，定义了坑道钻机的数字化设计流程；提出了坑道钻机数字化设计中的数字化建模、数字化仿真和数字化管理 3 项关键技术。数字化建模用于建立产品三维模型和装配分析；数字化仿真用于分析产品的动态特性；数字化管理则用于管理产品设计过程及其数据。进而建立了坑道钻机数字化设计平台，包括基础、平台和应用 3 个层次。结合千米定向钻机开发说明了该数字化设计技术的应用。

关 键 词: 数字化设计；建模；仿真；产品数据管理；坑道钻机
中图分类号: P634 **文献标识码:** A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.01.021

Digital designing technologies for tunnel drilling rigs for underground coal mines

ZHANG Jianming, LIU Guiqin, LIU Qingxiu
(1. *Xi'an Research Institute*, *China Coal Technology & Engineering Group Corp*, *Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: A digital design flow chart for tunnel drilling rigs is defined from the perspectives of small-lot customization and variation development firstly. Then three key technologies for the digital design of drilling rigs have been proposed, i.e, digital modelling, simulation and management. The first is used to support 3-D modelling and assembly analysis, the second is used to analyze the dynamic performance of drilling rig, and the third is to manage the design process and the data generated in it. A digital design platform has been subsequently developed, including the base layer, platform layer and application layer. Finally, a design case of one-kilometre directional drilling rig is given to demonstrate the application of digital design technologies.

Key words: digital design; modelling; simulation; product data management; tunnel drilling rig

瓦斯抽采是煤矿防治瓦斯灾害的基本手段，这主要通过在煤层中钻孔来实现。坑道钻机是煤矿井下钻孔抽采瓦斯的主要技术装备，钻孔能力覆盖从几十米到 1 000 m。目前的坑道钻机主要为全液压动力头型式，依据其结构特征又可分为分体式和整体式两类。分体式坑道钻机由主机、泵站和操纵台 3 部分组成，各部分之间采用液压胶管联接，具有解体性好，可远距离操作，运输和搬迁灵活的优点。整体式坑道钻机将主机、泵站和操纵台集成在履带平台上，并采用了先进的负载敏感液压技术，实现了钻机的整体自行移动。

数字化设计技术是基于产品描述的数字化平台，建立基于计算机的数字化产品模型，并在产品开发全过程中使用，达到减少或避免使用实物模型的一种产品开发方法[1]。数字化设计技术已在航天、航空、兵器、汽车等领域的产品开发中获得广泛的应用，在钻机产品开发中的应用集中在关键零部件的强度分析上[2-8]。然而，上述研究工作主要集中在石油钻机和非开挖钻机领域，关于煤矿井下坑道钻机的研究则相对较少，更缺乏对坑道钻机全面的数字化设计技术的研究。

当前，坑道钻机的产品研发主要采用基于经验设计和物理样机测试的模式，具体表现为：**a.** 产品设计以二维 CAD 工具为主，或部分使用三维 CAD 工具；**b.** 设计验证主要通过物理样机的测试来实现；**c.** 产品数据文档的管理采用文件夹模式；**d.** 产品研发流程以人工流转为主。随着坑道钻机市场竞争的逐渐加剧，这种产品开发模式愈来愈难以适应市场需求。因此，企业亟需开发坑道钻机的数字化设计技术，从而实现高质量、低成本的产品开发，以适应市场的快速响应。

1 数字化设计流程

坑道钻机既要有系列化产品，又需满足不同客户的定制要求，一般是在老产品的基础上变型开发，并

收稿日期: 2011-03-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(50805010)；陕西省自然科学基础研究计划项目(2011JM7017)
作者简介: 张建明(1973—)，男，山西文水人，博士，高级工程师，从事煤层钻进装备数字化设计工作.

以批量定制的方式生产。因此，坑道钻机的数字化设计需适应这种产品变型开发和批量定制生产的特点。

产品的开发过程通常包括方案设计、详细设计、工艺规划、样机制作与测试 4 个阶段。数字化设计涉及从方案设计到样机测试的整个产品开发过程，并且在产品数据管理(Product data management, PDM)系统的支持下，实现产品研发数据与过程的有效管理。图 1 给出了坑道钻机的数字化设计流程，其核心为方案设计与详细设计。由于坑道钻机主要由机械和液压传动两部分组成，因此，其特性分析主要集中在机械结构的强度分析、机构动力学分析和液压系统的动态性能分析上。

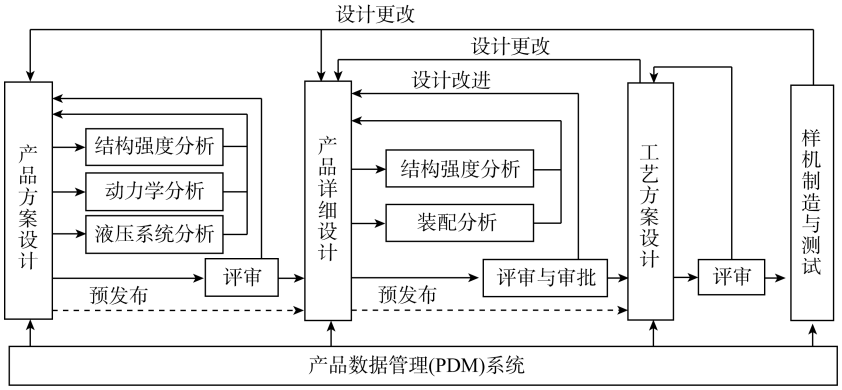

图 1 数字化设计流程

Fig. 1 Flowchart of digital design

2 数字化设计技术

基于图 1 所定义的数字化设计流程，提出了坑道钻机的 3 项数字化设计关键技术：数字化建模、数字化仿真和数字化管理。数字化建模作为数字化设计的基础，主要完成产品的三维造型和装配分析；数字化仿真作为数字化设计的核心，主要完成机械结构强度、机构动力学和液压系统特性仿真等一系列分析任务；数字化管理作为数字化设计的保障，主要管理产品的研发过程和研发数据。

数字化建模、数字化仿真与数字化管理 3 项关键技术既相互独立，又通过接口相互关联。数字化建模为数字化仿真提供了基本的数据模型，供其对各种设计模型进行评估与测试 数字化管理则将数字化建模与仿真过程中生成的图纸、文档与分析文件等各类数据统一管理起来。图 2、图 3 和图 4 分别描述了数字化建模与数字化仿真、数字化建模与数字化管理、数字化仿真与数字化管理之间的关系。

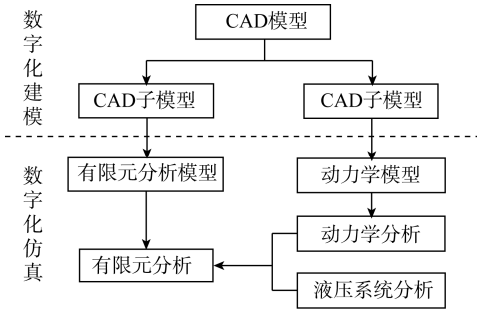

图 2 建模与仿真关系

Fig. 2 Relation of modelling and simulation

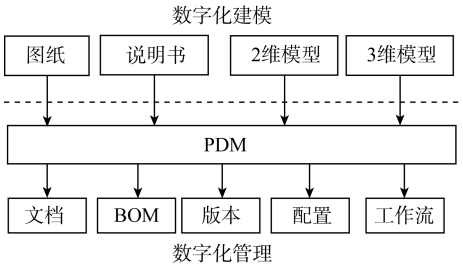

图 3 建模与管理关系

Fig. 3 Relation of modelling and management

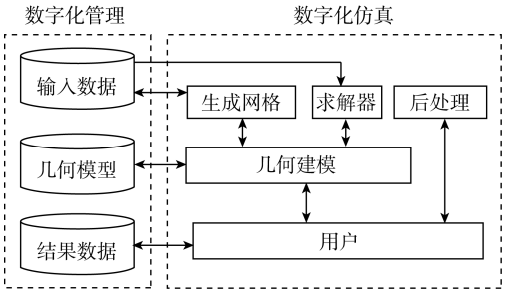

图 4 仿真与管理关系

Fig. 4 Relation of simulation and management

实现上述 3 项关键技术需要多种软件工具。为此，从企业的产品开发和规模出发，选择了如下 5 种软件工具，即 Solid Edge、Abaqus、LMS motion、AMESim、Teamcenter Express，分别用于产品三维建模、机械结构强度分析、机构动力学分析、液压系统动态特性分析和产品数据管理。

3 数字化设计平台

坑道钻机的数字化设计平台基于所实现的数字

化建模、数字化仿真与数字化管理技术，集成各项数据服务与技术系统形成的。数字化设计平台的目标是：实现产品数据和研发过程的统一管理；实现产品的仿真优化设计；建立虚拟样机与物理样机互补的并行化产品开发模式；提高产品的开发效率和质量，为未来企业设计、制造与管理的数字化协作平台奠定基础。

图 5 描述了坑道钻机数字化设计平台的基本架构，包括基础层、平台层和应用层。其中，基础层由计算机局域网和数据库构成，为数字化设计提供基本支撑；平台层以数据服务、资源服务和数据中心为主，通过集成接口形成信息集成与共享平台；应用层包含数字化建模、数字化仿真和数字化管理 3 个子应用系统，对应 3 项数字化设计关键技术，用于实现产品的数字化开发。

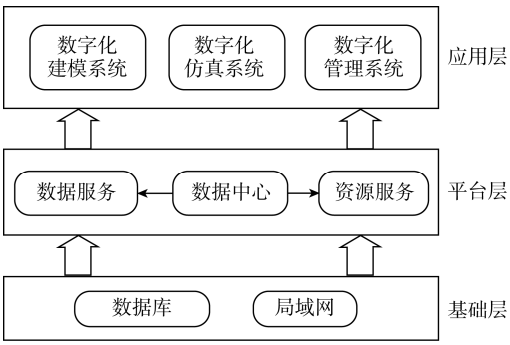

图 5　数字化设计平台

Fig. 5　Platform of digital design

图 6 描述了企业数字化设计平台的网络拓扑结构。该平台采用 C/S 架构，客户端包括虚拟装配工作站、仿真分析工作站、CAD 终端、CAPP 终端，实现整个网络在 PDM 系统的支持下的统一管理。

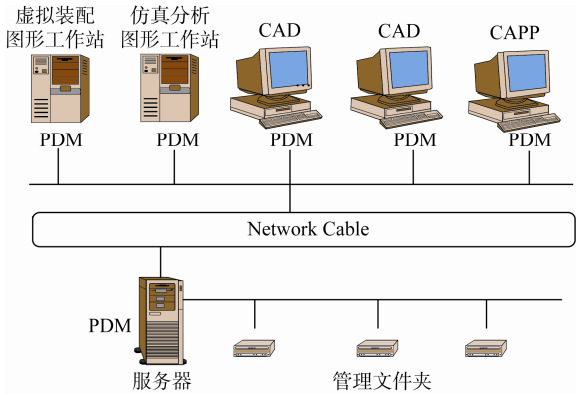

图 6　网络拓扑结构

Fig. 6　Topological structure of network

4　应用实例

千米定向钻机是我国自主开发的首套煤矿井下履带式定向钻进装备，适用于孔口回转驱动的大直径近水平孔钻进和孔底马达动力驱动的深孔定向钻进。在数字化设计技术与平台的支持下，实现了千米定向钻机的数字化设计。图 7 是由数字化建模系统建立的千米定向钻机三维模型；图 8 和图 9 是钻机稳固装置在回转钻进中水平给进和起拔工况下的变形分析；图 10 则是钻机回转液压系统的 AMESim 仿真模型。

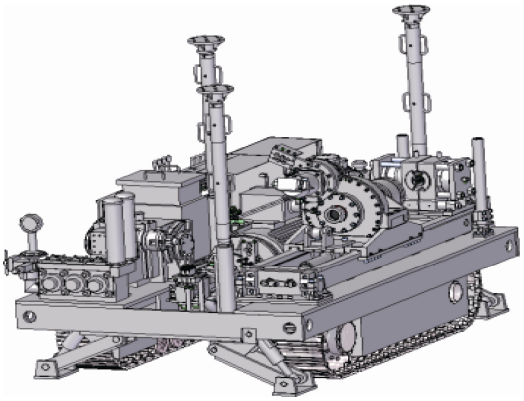

图 7　千米定向钻机三维模型

Fig. 7　3D model of one-kilometer directional rig

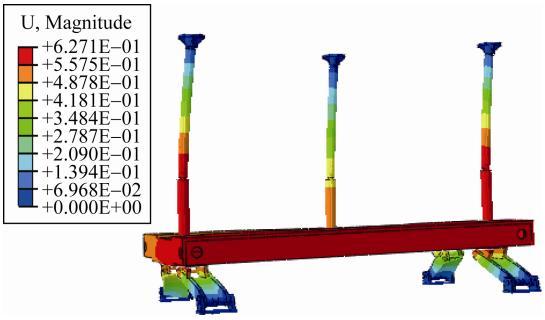

图 8　稳固装置水平给进工况强度分析

Fig. 8　Strength analysis of stabilization in working condition of horizontal feeding

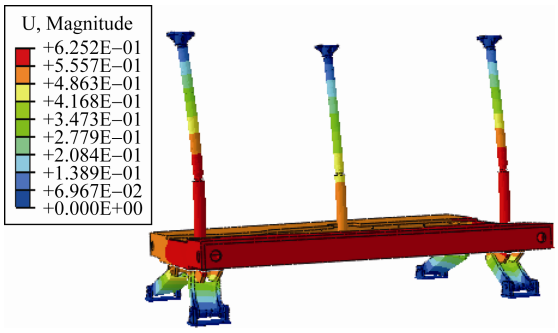

图 9　稳固装置水平起拔工况强度分析

Fig. 9　Strength analysis of stabilization in working condition of horizontal pulling

在坑道钻机数字化设计平台中，采用了西门子公司的 Teamcenter Express 软件建立了坑道钻机 PDM 系统，实现了项目管理、文档管理、流程管理、BOM 管理、零部件分类管理、组织结构管理和系统集成 7 项功能。图 11 是在该 PDM 系统中千米定向钻机的 BOM 结构。

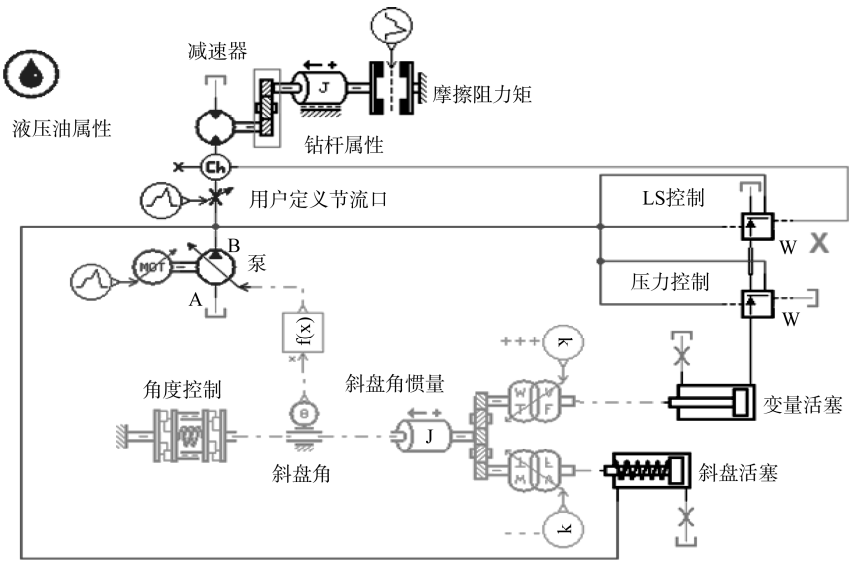

图 10 回转液压系统模型

Fig. 10 Model of rotary hydraulic system

BOM行	零组件名称	序号	数量
KL7.asm/A-ZDY6000LDA(view)	ZDY600LDA		
KL7.2/A-操作台(view)×1	操纵台	10	1
GB/T93 10/A-弹簧垫圈×25	弹簧垫圈	10	25
7.2.3/A-给进快开浮动油路板总成 (view)×1	给进快开浮动油路板总成	20	1
GB/T701 M10*30/A-内六角圆柱头螺钉×21	内六角圆柱头螺钉	30	21
KL7.2.1/A-副泵油路板总成 (view)×1	副泵油路板总成	40	1
KL7.2.5/A-管夹 (view)×1	管夹	50	1
KL7.2.4/A-回转油路板总成 (view)×1	回转油路板总成	60	1
KL7.2.4-4/A-堵头×8	堵头	10	8
KL7.2.4-3/A-直通接头×2	直通接头	20	2
JB982-77 27/A-组合密封垫圈×11	组合密封垫圈	30	11
KL6.2.4-5/A-接头×1	接头	40	1
GB/T3452.1 31.5*2.65/A-O型密封圈×2	O型密封圈	50	2

图 11 千米定向钻机的 BOM 结构

Fig. 11 BOM structure of one-kilometer directional rig

5 结 论

a. 在定义坑道钻机数字化设计流程的基础上，提出其数字化设计的 3 项关键技术：数字化建模、数字化仿真和数字化管理。数字化建模用于支持产品三维模型的建立和装配分析；数字化仿真用于产品动态特性的分析，包括机械结构强度分析、机构动力学分析和液压系统动态特性分析；数字化管理则基于 PDM 系统实现产品设计过程及数据的有效管理。

b. 以千米定向钻机为例，说明了数字化设计技术在产品开发中的应用，实现了产品三维建模、动态仿真和数据管理。数字化设计技术与平台已在中煤科工集团西安研究院的其他钻机产品开发中获得了应用，有效地缩短了产品的开发周期，降低了产品的开发成本。

参考文献

[1] 阎楚良，杨方飞. 机械数字化设计新技术[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[2] 刘长佑. 水平定向钻机 DL360 人机工程设计与结构分析[D]. 南京：东南大学，2006.

[3] 徐成宇. 有限元方法在非开挖钻机动力头主轴设计中的应用[D]. 长春：吉林大学，2002.

[4] 赵伟红，李增亮，赵新学，等. 物探螺旋钻机钻杆液压夹紧机构的设计计算[J]. 石油机械，2007，35(10)：26–28.

[5] 邹龙庆. 石油钻机井架动态响应分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2006.

[6] 薛继军. 非线性有限元和小波有限元理论研究及其在钻机井架中的应用[D]. 西安：西安交通大学，2003.

[7] 江进国，常江华，姚宁平，等. 基于 ANSYS 的液压卡盘胶筒的应力分析与优化[J]. 煤田地质与勘探，2007，35(5)：7–80.

[8] 张幼振，常江华，张建明. 全液压动力头式钻机给进机身的动态分析研究[J]. 煤矿机械，2008(3)：71–73.