

文章编号: 0253-2697(2004)01-0079-05

顶部驱动钻机虚拟样机技术研究

肖文生¹ 袁清鸿¹ 周先军² 孙峻岭² 康玉晶² 钟毅芳¹

(1. 华中科技大学国家 CAD 支撑软件工程技术研究中心 湖北武汉 430074; 2. 石油大学(华东)机电工程学院 山东东营 257061)

摘要: 虚拟样机技术是一种新型的基于集成化产品和过程开发策略的产品设计开发和评估手段,在实践中已显示出优越性。研制、开发的顶驱钻机虚拟样机系统可以对顶部驱动钻机进行基于物理的三维动态仿真和虚拟环境下的性能分析,并可对顶部驱动虚拟样机系统数据进行管理。介绍了顶部驱动钻机虚拟样机的总体技术,给出了顶部驱动虚拟样机的体系结构及功能结构,描述了顶部驱动虚拟样机建模、装配、运动分析和动力分析以及数据管理等软件模块的构成和功能,分析了顶部驱动虚拟样机的关键技术及其解决方案。虚拟顶部驱动钻井装置样机系统的研制将改变我国石油机械的产品研制思路,为新型顶部驱动钻井装置的设计和制造提供崭新的计算机平台。

关键词: 虚拟样机; 顶部驱动钻机; 虚拟造型; 仿真; 模块

中图分类号: TE822

文献标识码: A

Towards technology of virtual prototyping in top drive drilling system

XIAO Wen-sheng¹ YUAN Qing-hong¹ ZHOU Xian-jun² SUN Jun-ling² KANG Yu-jing² ZHONG Yi-fang¹

(1. National CAD Software Engineering Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Mechanical Engineering and Electricity, University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Virtual prototyping based on integrated products and process development is a new kind of technology for development and assessment of products. The significance and the necessity of virtual prototyping were discussed, and top drive drilling system-virtual prototyping system (TDS-VPS) was developed. The structures and functions of TDS-VPS were introduced. This system is composed of some subsystems including general project design system, general layout design system, module design system, assembly analysis system, running simulation system, performance analysis system. The functional structures of the TDS-VPS include virtual shaping system and simulate system. The data management method of the TDS-VPS was also discussed.

Key words: top drive drilling system; virtual prototyping; virtual shaping; simulation; module

虚拟样机技术(简称 VP)是在 CAx (CAD/CAM/CAE)和 DFx(DFA/DFM)技术基础上发展而来的,是基于集成化产品和过程开发(IPP)策略的产品设计、开发和评估的新型使能技术^[1]。它融合信息技术、先进制造技术、多领域仿真技术、交互式用户界面技术和虚拟现实技术。同时,有机地结合现代管理理论、系统工程方法学,涉及多体系统运动学与动力学建模理论及其技术实现,将不同工程领域的开发模型融合在一起,建立复杂机械产品的基于物理的仿真模型,为产品的全生命周期设计和评估提供分布式的集成化环境^[2,3]。

虚拟样机技术自 20 世纪 90 年代初出现以来,在军事、航空、航天、汽车制造等高科技领域获得成功的

应用^[4]。将顶驱钻井装置^[5,6]TDS(Top Drive Drilling System)设计、装配和样机运转、性能测试和设计改进完全在虚拟环境中进行,使石油设备制造业从纯粹的物质流与资金流转为数据流与信息流,实现数字化设计与制造的崭新理念,可以为新型顶部驱动钻井系统的研制提供崭新的计算机平台。

1 顶驱虚拟样机 TDS-VPS 体系结构

顶驱虚拟样机 TDS-VPS(Top Drive Drilling System-Virtual Prototyping System)体系结构及各子项目之间的关系如图 1 所示^[7]。顶驱虚拟样机 TDS-VPS 由 6 个子系统组成。

基金项目: 中国石油天然气集团公司石油中青年创新基金(2001CX-33)和中国石油天然气股份有限公司风险基金资助。

作者简介: 肖文生,男,1966 年 8 月生,1988 年毕业于石油大学(华东),现为石油大学(华东)机电工程学院副教授,在华中科技大学国家 CAD 支撑软件技术工程研究中心攻读博士学位,研究方向是虚拟样机和 CAD 技术。E-mail: wenshengxiao@yahoo.com.cn

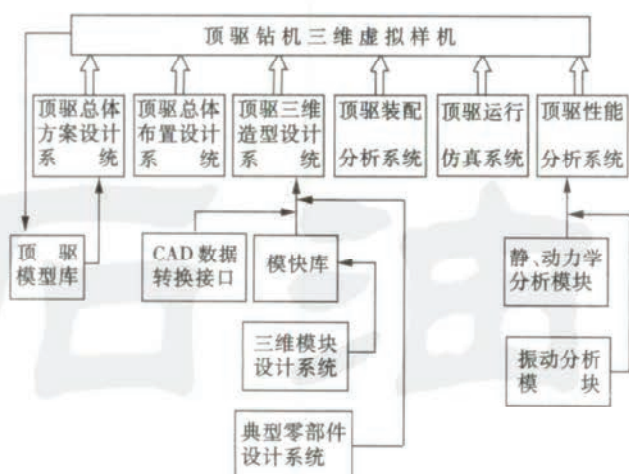


图1 顶驱虚拟样机 TDS-VPS 体系结构

Fig.1 Structure of TDS-VPS

1.1 总体方案设计系统

按照模块化设计思想,将顶驱钻机的概念设计转为结构设计,把顶驱抽象为一组相互连接的功能模块的集合,建立功能模块之间的关系。采用模块化综合智能设计支持工具,在功能分析的基础上,确定顶驱总体设计方案型式和所需模块的种类、功能以及主要性能参数、特性参数值,合理选择出所有可能的顶驱总体模块结构,并通过功能综合将所选的模块结构合理组合,构成多个顶驱的总体方案,通过总体方案分析与评价决策子系统,确定最终设计方案。

1.2 总体布置设计系统

该系统依照总体设计方案确定的顶驱各模块功能^[8]、综合约束的布置模型和拓扑描述的布置设计模型,分析顶驱各模块间的空间相对位置关系,确定相互间约束的方位和种类,解决不同模块间的干涉冲突问题,确定顶驱的总体结构。

1.3 模块设计系统

它由三维造型模块、典型零部件设计模块、数据转换接口和模块库组成,包括顶驱组成模块的三维几何造型以及与其他 CAD 造型系统的数据转换,用以完成对顶驱各模块的实体造型,并构建顶驱的模块库。在顶驱模块综合智能设计决策支持系统的基础上,依据顶驱布置方案进行整机、各模块及其零部件的三维外观造型设计和工艺准备^[9,10]。顶驱虚拟样机主体结构见图 2。

1.4 装配分析系统

根据模块装配的表达策略和模块装配顺序的计算机生成技术,开发出具有多层装配序列、零件装配路径规划和装配工艺文档化等的 TDS-APS (Top Drive

Drilling System-Assembly Planning System) 装配设计平台。该装配设计平台能够通过装配建模、装配模型的公差分析与综合评价、装配模型中的运动机构的求解及干涉检查等进行装配模型的设计分析和评价。通

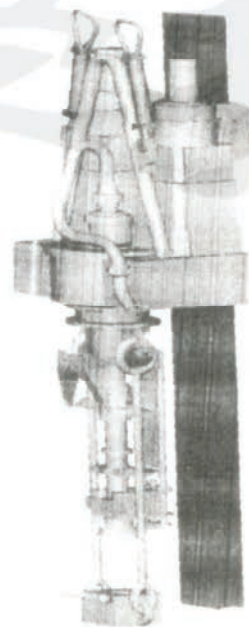


图2 顶驱虚拟样机结构

Fig.2 Structure of the TDS-VPS

过人机交互产生顶驱装配序列,进行装配顺序和装配路径规划,然后通过整体和各模块基于物理的装配过程仿真,实现装配规划过程的可视化;具备干涉碰撞路径、装配-拆卸路径等的可视化功能等。可以使装配过程具有良好的几何约束可操作性,实现欠约束条件下多封闭环约束操作,支持常见运动副和装配关系的约束表达。

1.5 运动仿真系统

建立了顶驱沿井架内专用导轨向下送进、钻柱旋转钻进、接立根、上卸扣和倒划眼等过程^[11,12]的虚拟运动仿真模型,规划出各部件运动路径,实现了对顶驱工作过程进行可视化仿真和分析。分析了运动部件碰撞等运动干涉情况,及时进行了设计改进。顶驱减速器运转测试图见图 3。

1.6 性能分析系统

开发了具有动力学分析能力的几何约束引擎体系。在实时动态仿真顶驱旋转钻进过程时,考虑到物体的质量、运动规划、惯性、外部作用力和重力等多种物理因素,融合多体系统动力分析常用的缩并法和微分流形分析法,在设计最大功率、最大转速范围^[13]内对模块化顶驱进行闭环动力学、动态特性分析。可

以对顶驱主要零部件、易损件进行寿命预测分析,用以改进顶驱的结构。



图 3 顶驱减速器运转图

Fig.3 Rotation of gearbox in the TDS-VPS

(注:大齿轮与两齿轮下的小齿轮啮合)

2 虚拟样机 TDS-VPS 的功能模型

顶驱虚拟样机 TDS-VPS 分为顶驱造型设计系统和顶驱虚拟仿真系统两个功能系统。顶驱虚拟样机的功能模型如图 4 所示。

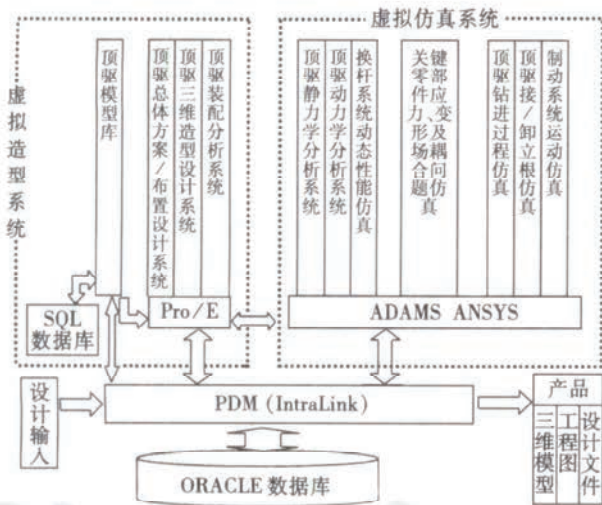


图 4 顶驱虚拟样机 TDS-VPS 系统总体结构

Fig.4 TDS-VPS general construction

2.1 虚拟造型系统

顶驱造型设计系统主要有顶驱三维造型设计系统和顶驱模型-模块库,旨在提高设计速度,为用户提供一个便捷的设计环境。

2.1.1 三维造型设计系统

顶驱三维造型设计以数据库为核心,以 PDM 为产品并行开发支撑环境,包括顶驱三维模块设计子系统和典型零部件设计子系统。顶驱三维模块设计子系

统利用 Pro/E 进行建模,生成新的零件文档。典型零部件设计子系统则由 MFC 应用程序首先根据机械设计理论对零部件进行设计计算,将设计的结果直接传入三维实体造型模块,并将结果作为属性附加到模型中,通过文件传输给三维实体造型模块;应用程序通过 Pro/Toolkit 和 Pro/Develop 与 Pro/E 通讯,调用 Pro/E 提供的接口函数,对 Pro/E 文档进行操作,生成草图、增加尺寸和约束,生成各特征,由 Pro/E 内核进行布尔运算,生成零件体。

顶驱三维造型设计系统还可以用下列方式调用模块库:

(1) 利用模块库的查询工具,查找与设计任务中最相似的库资源,并通过完全复制或智能方式生成变型产品设计模板。采用面向对象的设计技术,通过对模板的对象化和参数化,快速自动建立零件的产品目录树,或者自动完成部分零件的产品设计模型,支持产品自上而下的设计。

(2) 对设计模板中不能自动生成的部分,利用 Pro/E 软件中基于特征的三维参数化设计模块修改或二维参数化设计模块,建立产品的全局信息模型。

整个产品的开发和设计活动以 PDM 和工程数据库为支撑环境,实现设计人员之间的协同工作,并保持全局数据的一致性;根据产品结构的层次关系来划分设计任务,自动记录整个设计活动,并实现对产品设计整个活动的有效管理。

2.1.2 顶驱模型-模块库建设

归纳和整理已有的设计成果,按照顶驱的功率序列进行分类整理,建立了一个方便快捷、系统化的模型-模块库;对同一序列的模型-模块相类似的设计活动进行收集和提炼,并对模型-模块中相同的设计实现参数化,按一定的编码规则进行编码,便于对其进行查询利用。在进行顶驱模型-模块三维造型时,每个顶驱模型-模块都包含规格、代号、名称、类别等工程信息与对应的参数,以满足 Pro/E 装配调用和二维工程出图的要求。

顶驱模型-模块库建库遵循数据库的一般设计原则,具有以下特点:查询简单,顶驱模型库可以扩展;支持多级表结构;建成的顶驱模型-模块库支持各种数据维护操作,如插入数据,删除数据,多种方式查询等。

顶驱模型-模块库开发包括以下几个方面的内容:①对已有的设计对象进行分析、归纳,提炼出在不同顶驱模型-模块中相似、相近的模型-模块,即确定顶驱模型-模块的具体对象;②建立顶驱模型-模块的三维参

数字化模型;③建立顶驱模型-模块的查询标识规则,即建立顶驱模型-模块的编码规则;④利用 PDM 的库管理功能,实现对顶驱模型-模块库的查询、添加、删除、修改等功能,并实现与 Pro/E 的集成。

在生成顶驱模型-模块时,由设计结果得到顶驱模型-模块的系列,MFC 通过 ODBC 访问 SQL-Server 的模型库数据源,查询数据库得到造型所需的全部尺寸数据,由参数驱动模块按尺寸数据驱动顶驱模型的三维模型,通过参数化特征重构得到新的顶驱模型的实例。

2.1.3 数据库建设

数据库是整个系统的基础,在数据库建设中除了要遵循数据库的一般设计原则外,还遵循了以下设计原则:查询简单且支持多种方式查询;除查询外,数据库应提供数据维护操作,主要有:新数据表生成,数据录入,数据删除;数据表的字段名称可以指定和修改,字段数目可以增加,即数据库应具有良好的可扩充性和可维护性;支持多级表结构;权限管理充分利用 SQL 的权限管理能力,为用户分配相应的使用权限,同时考虑合理利用了 Intralink 中的权限管理信息。

2.2 顶驱钻机仿真分析设计

TDS-VPS 虚拟仿真系统包括顶驱钻井系统的运动仿真、整机性能仿真以及关键零部件的结构有限元分析。顶驱钻井系统的运动学和整机性能的虚拟仿真是通过运动学、动力学的分析来获得的。每一个完整的虚拟仿真过程都包括模型设置、运行仿真以及结果分析 3 个步骤。顶驱 TDS-VPS 虚拟仿真系统以 ADAMS 为运动学和动力学仿真平台,利用 Pro/E 软件与动力学仿真分析软件 ADAMS 间的无缝连接接口,将前述的三维实体模型导入到 ADAMS 仿真环境中。关键零部件的结构有限元分析也是由模型建立、运行仿真和结果分析 3 个步骤组成,其核心平台为 ANSYS。以 ADAMS、ANSYS 提供的二次开发工具为开发手段,为顶驱钻井系统中关键子系统,如减速装置、动力总成、接卸立根装置等开发运动学虚拟仿真系统,为顶驱钻井装置系统静-动力学性能等开发出静-动力学分析仿真系统,为顶驱钻井系统中关键零部件,如减速器中的齿轮、换钻杆柄等零部件开发出结构有限元分析集成工具。

顶驱“运动仿真”模块,根据电机的运动参数和已知构件的运动规律,解算顶驱全量运动方程,求出其他构件上某些点的位移、轨迹、速度和加速度,以及角位移、角速度和角加速度获取顶驱的姿态、位置以及旋转钻

进、接卸立根等运动参数,并输出到顶驱实时仿真系统的其他分系统。顶驱动力学仿真系统包括“顶驱动力特性”仿真和“钻柱振动分析”仿真,是组成顶驱实时仿真系统的一个主要软件系统。该系统建模、编程、数据的选取及预处理的计算公式多,计算量大。根据钻柱在斜直井中的受力状态,建立纵向振动、扭转振动和横向振动的动力学方程,考虑横向振动难以传递到地层表面,不会对顶驱装置造成影响,计算钻柱的其他振动响应,并作为顶驱主体装置的激励源。“顶驱动力特性”仿真考虑顶驱装置施加钻压,接收来自钻柱系统的浮重力、各种振动,来自电机系统的驱动力等,采用柔性多体动力学计算在顶驱装置的整体受力-力矩。将顶驱钻机的拓扑结构视为为铰连接的树系统,选定广义坐标,建立关联数组、关联矩阵、通路矩阵和内接物体数组(即低序体阵列)等;与系统拓扑结构和所选用广义坐标相对应,建立多体系统动力学微分-代数方程组(DAE)。

建立的顶驱仿真模型库-软件包以及虚拟样机建模环境具有以下特点:建立仿真建模环境是为了让用户快速、方便地建立仿真所需要的模型,并向外系统提供接口,从而使建模者和软件编制人员分开。系统建模采用的是层次化、模块化的建模方法,建立钻柱振动和顶驱主体装置的多柔性形体动力学的数学模型,然后编制程序。顶驱方面的专家可以通过建模仿真环境建立起钻柱的数学模型,而整个顶驱实时仿真系统的建立者可以通过程序调用顶驱专家建立的模型,从而实现了建模者和程序设计者的有机结合。顶驱仿真建模环境具备突出特征,即系统性、可行性、先进性、开放性、规范性、可重用性、通用性、可移植性、可维护性以及良好的人机界面交互。连接模型库就可计算出钻柱姿态、位置等顶驱参数,进行顶驱仿真。设有初始化文件,快速的环境设定、记录、回放和仿真结果复现、记录与回放功能记录所有的仿真过程,可以在标准主程序中集成用户自定义的应用函数库。

用户使用该建模环境时,通过图形化的用户界面,自定义顶驱仿真系统整体,只输入钻柱振动的数据或曲线。在关键子系统和整机性能的虚拟仿真中,模型的建立来源于 3 个方面的数据:①模型拓扑库中的模型拓扑;②Pro/E 计算的物性数据,如各零部件的质心、惯量等;在要求进行干涉检查时,还需要从 Pro/E 传来的几何实体;③实验数据,包括矿场实验数据和阻尼数据等等。关键零部件结构有限元分析模型建立则来源于两个方面的数据:①Pro/E 的几何实体模型;②包含该关键零部件的子系统进行动力学分析所得

的各种数据,如力、位移、速度等等,来作为有限元分析的边界条件。

3 顶驱虚拟样机 TDS-VPS 的关键技术

3.1 数字化表达方式

机械性能设计的目的是将各相关领域的基础性研究成果应用于设计自动化。顶驱装置的数字化表达除了建立顶驱装置的三维模型外,主要工作是建立顶驱装置的运动状态模型,顶驱装置主体的柔性多体动力学建模。根据构件间的运动学约束方程可以定义常用的运动关联:固定连接(无自由度),旋转连接(绕 X、Y、Z 某一轴旋转自由度),球连接(绕任意轴旋转自由度)移动铰等约束。考虑构件的受力和质量,可以进行速度和加速度分析及多体动力学分析等。

3.2 虚拟性能评估

此项研究主要是在仿真的基础上,对产品运行状态与性能进行虚拟条件下的评估,并从中获得修改设计的依据。运行状态评估是在对正常运行状态、性能下降状态、维护状态以及失效状态等进行评估,性能评估是在设计规划中对产品系统的性能要求。研究的重点是基于仿真结果的工况分析。

4 结 论

本研究基于几何造型和性能分析及人机交互的基本理论,构造了基于物理的虚拟的顶驱钻井装置的动态实时实体样机和性能测试、分析系统,并在虚拟现实环境中对整机和零部件性能进行了测试和分析。

对虚拟顶驱钻井装置样机及其分析系统的研制,将改变我国石油机械的产品研制思路。为新型顶驱钻井装置的设计、制造提供了崭新的计算机平台,将减少新型顶驱钻井装置的研制时间,提高我国石油机械的设计水平。

参 考 文 献

- [1] Su W, Woon I M Y. Current research in the conceptual design of mechanical products[J]. CAD, 1998, 30(5): 377-389.
- [2] 李伯虎,柴旭东,熊光楞,等. 复杂产品虚拟样机工程的研究与初步实践[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 336-341.
- [3] 熊光楞,李伯虎,柴旭东,等. 虚拟样机技术[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1): 114-117.
- [4] Martin J M. Virtual engineering on the right track[J]. Mechanical Engineering, 1996, 118(11): 64-68.
- [5] Tyson R W Helmerich. Why use a top drive on a land rig, or when? [C]. Varco Intl. SPE/IADC Drilling Conference, 1995: 529-544.
- [6] Boyadjieff George I. An overview of top-drive drilling system applications and experiences. [C]. IADC/SPE 14716, 1996: 435-442.
- [7] Mine M R. ISAAC: a meta-CAD system for virtual environments[J]. CAD, 1997, 29(8): 547-553.
- [8] Varco international company. Top drive drilling systems with integrated swivel [M]. Houston: Varco BJ, 1992: 22-45.
- [9] Brouse M. Economic/operational advantages of top-drive installations[J]. World Oil, 1996, 28(10): 63-70.
- [10] Cavanaugh, James M, Adams David M. Top-drive drilling system evaluation[J]. SPE 6064, 1988: 43-49.
- [11] Riahi M. Electric top-drives gain wide industry acceptance [J]. Petroleum Engineer International, 1998, 32(5): 45-51.
- [12] King Ian M, Douglas David. Multi-platform drilling operations utilizing one rental top drive-the commercial and technical benefits[C]. SPE 30344, 1995: 19-22.
- [13] 张连山. 美国 Varco 公司新系列顶驱技术分析[J]. 石油机械, 2000, 28(1): 45-48.

(收稿日期 2002-11-25 改回日期 2003-04-08 编辑 杨 苗)

《石油学报》再次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号

2003 年 12 月 9 日, 中国科学技术信息研究所在北京国际会议中心召开了“2003 年度中国科技论文统计结果发布会”。根据中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)统计结果和科技期刊引用计量指标及来源期刊计量指标的统计分析,《石油学报》的影响因子为 0.691, 在全国 1534 种统计源期刊中居第 106 位, 在能源科学技术类期刊中名列第一; 总被引频次为 692, 在全国 1534 种统计源期刊中居第 138 位, 在能源科学技术类期刊中位居第二。

继 2002 年之后,《石油学报》再次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。

(齐娜 供稿)