

基于数字孪生的力能控制式压力机虚拟调试

陆新时 马嵩华 胡天亮

(山东大学 机械工程学院, 济南 250061)

(山东大学 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

(山东大学 机械工程国家级实验教学示范中心, 济南 250061)

E-mail: luxinshi@mail.sdu.edu.cn

摘要: 为降低调试周期和成本, 提前预知系统级风险, 基于数字孪生的虚实一致特性, 提出了一种基于数字孪生的力能控制式压力机虚拟调试方法, 设计了虚拟调试系统。根据力能控制式压力机的多系统协同调试任务, 建立了其多物理领域统一模型, 即机械、电气等的多领域数字孪生模型, 并构建了虚拟控制系统, 包括虚拟控制器和控制器-模型接口。通过应用于压力机虚拟调试的实例, 展示了基于此数字孪生模型进行虚拟调试的有效性。构建的虚拟调试系统能够验证机械系统、电气系统和控制程序的设计, 并确定和优化运行参数, 有效避免了实机调试成本高、风险大、周期长等弊端。

关键词: 数字孪生; 压力机; 多领域建模; 虚拟调试

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2022)07-1356-06

Virtual Commissioning of Force-power Controlled Press Machine Based on Digital Twin

LU Xin-shi, MA Song-hua, HU Tian-liang

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture at Shandong University, Ministry of Education, Jinan 250061, China)

(National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to reduce the cycle and cost of the commissioning process and predict system-level risks in advance, according to the virtual and real consistency characteristic of the digital twin, a virtual commissioning method for the force-power controlled press machine based on the digital twin was proposed and the system was designed. According to the multi-system coordinated commissioning task of the force-power controlled press machine, a unified model of its multi-physical fields was established, which is a multi-domain digital twin model including mechanical system, electrical system and so on. The virtual control system consisting of virtual controller and controller-model interface was provided. A use case was developed to verify the effectiveness of virtual commissioning based on this digital twin model. The result shows that the virtual commissioning method which developed in this research can verify the design of mechanical system, electrical system and control programs, and optimize the operating parameters. The commissioning disadvantages such as high cost, high safety risk and long time cost which are usually caused by actual commissioning can be avoided.

Key words: digital twin; press machine; multi-domain modeling; virtual commissioning

1 引言

冲压机械是制造业的重要装备之一, 其生产过程具有切削少、效率高、一致性好等显著优点, 可完成冲裁、弯曲、拉伸、成型等多种工艺。近年来在汽车覆盖件生产过程中更是得到广泛的应用。在实际生产过程中, 为保障生产的安全与高质量, 压力机的调试环节往往是必不可少的。通过调试, 可以发现设计和工艺中存在的问题, 确定生产中各种静态、动态参数和检验控制程序的生产效果等, 保障压力机功能的正确可靠运行。

当前, 压力机的调试一般是实机调试, 然而实机调试存在着诸多问题: 1) 机械、电气和控制工程师在实机完成前, 难以进行联合调试, 各领域只能各自测试, 容易出现设计问题; 2) 设计、制造、调试及后续实际生产过程各环节串行式依赖, 导致调

试周期长。实机调试前, 许多设计问题难以发现, 当调试发现设计缺陷后, 需重复设计与制造环节, 由此造成巨大的时间与经济成本消耗; 3) 实机调试往往需要依赖经验, 只有技术水平较高的工程师才能完成调试工作; 4) 调试过程需要停机, 严重影响生产效率, 进行试生产需要成本; 5) 调试过程中安全保障措施无法充分发挥效能, 使得调试往往具有一定风险性。

虚拟调试技术为解决以上问题提供了新的方法和途径。围绕虚拟调试的关键问题, 郑魁敬等人^[1-3]介绍了当前应用较多的基于NX MCD建模的虚拟调试解决方案, 该方法存在的主要问题是只建立机械模型进行调试, 模型较为简单, 完成的调试内容有限, 目前只限于进行机械系统模型与控制程序的联合调试。

数字孪生概念最早是2003年由美国密歇根大学Grievies

收稿日期: 2022-01-28 收修改稿日期: 2022-02-28 基金项目: 国家自然科学基金项目(51875323)资助; 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE086)资助。作者简介: 陆新时, 男, 1997年生, 硕士研究生, 研究方向为数字孪生、虚拟调试; 马嵩华, 女, 1985年生, 博士, 副教授, 研究方向为CAD/CAM等; 胡天亮, 男, 1981年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字孪生、智能制造等。

教授提出,其概念模型主要包括 3 个部分: 1) 物理空间的实体; 2) 虚拟空间的模型; 3) 物理空间和虚拟空间之间的数据和信息接口^[4]。数字孪生旨在通过数字化技术,建立物理世界的虚拟模型,借助数据模拟实体在真实环境下的行为,通过虚实交互、数据分析、人工智能等技术手段,提升物理实体效能^[5-8]。数字孪生技术的巨大优势,为解决压力机实机调试存在的上述问题提供了先进的技术理念。作为虚拟调试的关键基础——数字孪生模型,其必须具备对压力机机械、电气等多个领域融合建模的能力。

目前,常用的多领域建模方法有^[9]: 1) 基于各领域不同建模软件接口的方法; 2) 基于高层体系结构的方法; 3) 基于统一建模语言的方法。基于统一建模语言的多领域建模方法采用 Modelica^[10]、Simscape^[11]等语言,可于同一平台下建立多领域模型,因此具备更好的领域集成能力,并且能够充分描述各领域子系统之间的耦合关系。

本文拟通过统一建模语言,建立压力机的多领域数字孪生模型,并为模型构建虚拟控制系统,以实现涵盖机械、电气和控制等内容的更全面的虚拟调试。

2 整体实施方案

2.1 力能控制式压力机特性分析

不同于行程控制式压力机通过伺服电机及其伺服控制程序精确控制滑块的运动行程和速度,力能控制式压力机通过飞轮为滑块提供能量而完成压制工作。

力能控制式压力机通常由电动机、带轮、飞轮、离合器、杆系、滑块和机身等部件组成,压力机工作时由电动机通过皮带将运动传给飞轮,飞轮加速旋转进行蓄能,当滑块上的模具接触冲压件,压力机开始利用飞轮的能量进行成型加工,与此同时飞轮减速,冲压结束后滑块上行,飞轮重新进入加速蓄能状态。为取得较好的运动特性,力能控制式压力机常采用多连杆结构,通过多杆机构设计,常见如六连杆和八连杆等,实现滑块在工作期维持缓慢的拉延速度,非工作期保证较高的回程速度^[12]。

2.2 虚拟调试需求分析

实施虚拟调试主要基于两个目的: 1) 验证设计的正确性、可用性; 2) 确定生产中可变参数的合理取值。对力能控制式压力机的虚拟调试可分为压力机本体和压力机控制程序两个方面。压力机本体的液压系统受实际油液情况和管路安装质量等不确定因素影响较为严重,对其实现高质量建模的难度大,虚拟调试的意义有限,因此在压力机本体方面的调试着重考虑机械系统与电气系统。

压力机本体的虚拟调试中,针对机械系统需要进行运动学检查,确保机身各部件在正常运动下不产生干涉行为,由于压力机杆系的部分设计较为复杂,是检查的重点;其次,需检查滑块的行程距离,滑块运行速度、加速度特性等是否与设计期望一致。此外,还需对电气系统中变频器等部件进行控制参数调试,使得电气系统能够正常稳定工作。

在控制程序方面,首先需验证程序设计的正确性,即程序是否能完成正常的控制功能,如行程速度调整、装模高度调整等;其次是确定生产中合理的工艺参数,如确定合适的行程速度等。

2.3 虚拟调试系统架构设计

针对以上调试需求,设计虚拟调试系统架构如图 1 所示。该虚拟调试系统由工程师通过虚拟控制器的人机交互界面控制压力机数字孪生模型,控制命令由模型-控制器交互接口到达模型端,模型接到控制指令后,模拟与实机相同的行为运行,由接口将模型运行信息反馈控制系统,最终调试结果以三维动画和二维曲线形式输出。

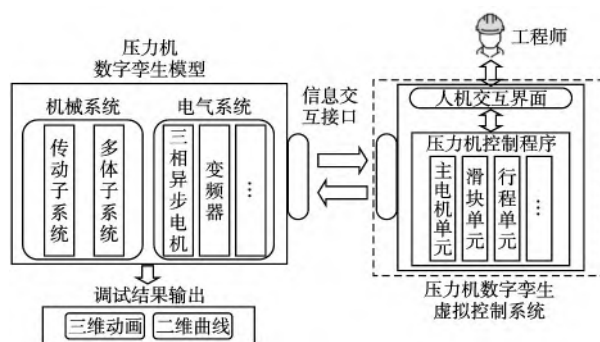


图 1 虚拟调试系统架构

Fig. 1 Structure of the virtual commissioning system

2.4 数字孪生模型构建方法

以上基于数字孪生的虚拟调试系统架构中,数字孪生模型构建是基础。本研究利用多领域建模语言,借助软件工程中面向对象的思想,并结合实际物理系统的特点,采用面向对象的多物理领域统一建模的方法构建数字孪生模型。模型构建中主要依据 3 条指导原则: 面向对象分解原则,多物理领域统一集成原则和增量式构建原则。

面向对象分解原则将压力机整体模型视作齿轮、连杆、滑块等部件的对象组合。各部件类具有不同的行为和属性,当采用多领域建模语言实现时,行为通常表现为反映部件物理本质的数学方程;属性是部件类的参数,由同一类部件实例化出的不同对象,其区别即在于属性。通过属性实现了对建模对象的数字化和参数化。

表 1 常见领域流、势变量

Table 1 Flow variable and potential variable in common domains

领域	流变量	势变量
平动机械	力	位移
转动机械	转矩	转角
电气	电流	电压
液压	流速	压强

多物理领域统一集成原则是根据实际物理系统满足广义基尔霍夫定律的特性,将各零部件之间的交互行为反映为通过流、势变量进行的物质和能量传递。各常见物理领域的流、势变量如表 1 所示。同一领域下的模型通过定义的流、势变量接口进行连接,不同领域间模型通过具备多种领域接口的能量转换器实现模型的整体集成。

增量式构建的本质是一个循环迭代、逐渐精细化的过程。本研究基于面向对象分解原则,分别建立各零部件模型,以此作为增量模块的基本单位;然后根据多领域统一集成原则将各模块组合,并判断当前模型系统是否满足应用要求,若不满足则继续细化、增加或修改模块,直至满足要求。

3 压力机本体数字孪生模型实现

本文采用 Simulink 作为压力机多领域统一建模平台,该平台支持 Simscape 语言及其物理建模仿真环境,且具有丰富的模型元件库,方便快速建立物理系统模型和实现控制算法。

3.1 机械系统建模

基于上文对压力机特性的分析,本研究将压力机机械系统划分为传动子系统和多体子系统,划分的依据是部件的行为和功能特点:传动子系统中一般包括各种传动部件,该子系统的主要功能是实现给定的传动比,系统中各部件均为转动型机械;多体子系统中各部件的空间关系较为复杂,存在相对运动的部件之间具有旋转副、棱柱副等多种运动副关系。

3.1.1 传动子系统模型实现

对传动子系统进行面向对象的分解后,按动力传递方向,即从电机轴到杆系的曲柄方向,其主要环节依次有皮带传动、飞轮、离合器和多级齿轮传动。飞轮的主要作用是增大传动系统的转动惯量,以此实现储能,建模时可使用转动惯量模型元件或增大皮带传动中从动轮的转动惯量属性来实现。基于数字孪生虚实映射的理念,分别调用上述部件对应的模型元件,并根据实际动力传递情况进行连接,本文所讨论的压力机传动子系统模型实现如图 2 所示。

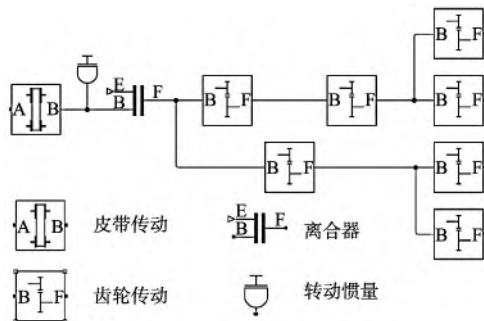


图2 传动子系统模型

Fig.2 Model of the transmission subsystem

3.1.2 多体子系统模型实现

多体子系统中,各零件具有不同的几何形状、质量、惯量、质心位置等属性,在本研究的建模方法中,将各零件统一视作多体类的不同实例化对象。本研究通过将多体类模型关联至零件相应的三维建模文件,如 STEP 格式文件,来描述多体对象的几何属性;同时,赋予该模型与实体相同的质量、惯量和质心位置等物理属性值,以此实现对该零件个体的建模。

完成对零件个体的建模后,还需要考虑零件之间的相互关系,即各零件之间的相对位置关系,以及具有相对运动的零件之间的运动副。本研究对其实现方法为:在零件模型上定义一个位置参考点,各零件的参考点之间进行相对位置的坐标变换,由此确定了各零件间的空间位置关系;对于相互间存在运动的零部件,在坐标变换的基础上加入如表 2 所示的运动副元件,实现期望的零部件运动关系。

上述过程通过 Simulink 提供的 Simscape Multibody Link 工具,导入在 Solidworks 等软件中建立和装配好的三维模型以辅助完成。整体的多体子系统模型结构过于复杂,受篇幅限

制,本文给出局部模型示例如图 3 所示。

表2 运动副

Table 2 Joints

名称	图标	特性
旋转副		提供 1 个旋转自由度
圆柱副		提供 1 个移动自由度和同轴向上的旋转自由度
球副		提供 3 个旋转自由度
棱柱副		提供 1 个移动自由度
平面副		提供 2 个移动自由度和一个旋转自由度
螺旋副		提供特定比例的旋转自由度

3.2 电气系统建模

电机和变频器是力能控制式压力机电气系统的核心组件,本文所讨论的压力机是一台大吨位压力机,其设计采用了

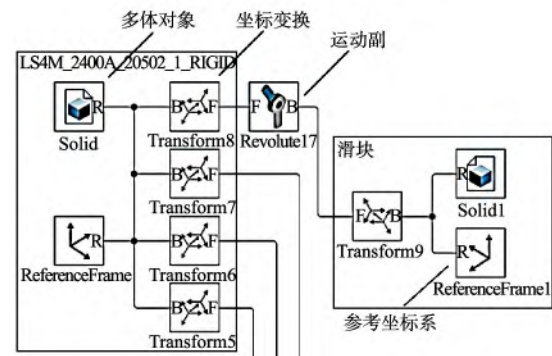


图3 局部模型示例

Fig.3 Example of the local model

三相异步电机。基于 Simscape 提供的模型元件库,对电气系统中电源等其他组成部分的建模较为简单,本文不再详细介绍。以下主要以三相异步电机和变频器为例,给出电气系统模型的构建过程。

3.2.1 三相异步电机模型实现

旋转正交坐标系下三相异步电机的电压、磁链和转矩分别如公式(1)~公式(3)所示^[13]:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_1 \Psi_{sq} \\ \omega_1 \Psi_{sd} \\ -(\omega_1 - \omega) \Psi_{rq} \\ (\omega_1 - \omega) \Psi_{rd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 (\Psi_{sd} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (3)$$

式中 u 、 i 、 R 、 L 、 Ψ 、 T_e 、 ω_1 表示电压、电流、电阻、电感、磁链、电磁转矩和旋转正交坐标系的旋转速度,下标 d 、 q 、 m 、 r 、 s 分别代表直轴、交轴、励磁、转子和定子,它们描述了电机的电压、电流等的电气量至机械转矩值的转换关系。利用 Simulink 元件搭建该算法模型,将所得电机转矩值通过连接赋给转矩源

元件,即可完成电机行为的建模,然后通过添加阻尼和惯量等元件描述电机的物理属性,最终完成对三相异步电机的建模。上述过程的模型实现如图 4 所示。

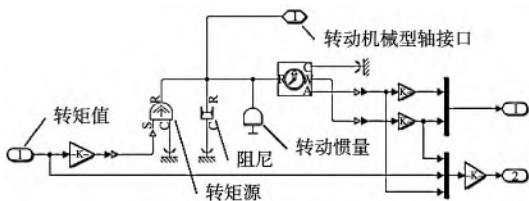


图 4 三相异步电机模型

Fig. 4 Three-phase asynchronous motor model

3.2.2 变频器模型实现

本文讨论的压力机采用西门子 SINAMICS G120 系列变频器,其包含控制单元和功率模块,对其建立的数字孪生模型也相应的分为上述两个模块。

功率模块模型用于实现变频器内部的主电路,包括整流、滤波和逆变 3 个环节。如图 5 所示,整流电路使用二极管进行全桥整流,其后并联的电容对整流后的直流电进行滤波,与电容器并联的电阻起均压作用,逆变环节通过 IGBT(Insulated gate bipolar transistor,绝缘栅双极型晶体管)构建三相桥式电路。依照电路原理图,使用 Simscape 中对应的电气元件模型并进行与图示相同的连接,即完成了对功率模块的建模。

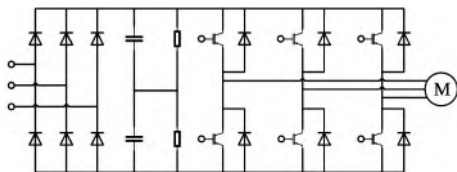


图 5 电路原理图

Fig. 5 Circuit schematic

压力机使用的变频器的控制单元采用数字控制方式通过软件实现,因此本研究对该部分的建模不采用物理建模的方式,而使用传统的利用 Simulink 对控制系统建模的方法。针对变频器的无速度传感器矢量控制模式,其控制算法包含 PI 控制、坐标变换、模型参考自适应控制、电流滞环跟踪脉冲宽度调制等模块,参考相关资料^[14]建立该部分模型的过程在此不再赘述。由控制单元模型的输出控制上文功率模块的 IGBT,最终完成完整的变频器模型的构建。

3.3 模型集成

根据多物理领域统一集成原则,各传动子系统模型模块使用传递转角和转矩的接口相连接,多体子系统模型模块间通过承载力和位移的运动副元件相连接。基于实际压力机的设计情况,传动子系统末端的齿轮与多体子系统的偏心体相固连,根据数字孪生虚实映射的建模思想,在模型中将齿轮模型的运动传递至与偏心体模型相连的旋转副,以此实现机械系统的集成。

变频器模型通过传递电流和电压的电气接口连接至电机模型,电机模型作为电气-机械领域的能量转换器,其转动机械型接口连接至传动子系统的皮带传动模型,至此集成整个压力机的多领域数字孪生模型。

4 压力机数字孪生虚拟控制系统构建

根据本研究设计的虚拟调试系统架构,具备压力机本体模型后,还需要建立虚拟控制系统以实施对模型的控制。对应于实际控制系统的控制器和输入/输出接口,虚拟控制系统也包括两部分:虚拟控制器和控制器-模型交互接口。

4.1 虚拟控制器的构建

压力机控制器使用西门子 S7-4500 系列 PLC(Programmable Logic Controller,可编程逻辑控制器),CPU 模块为 1515F。在不使用控制器硬件的条件下进行虚拟调试,可通过两种方式实现:1) 在软 PLC 中进行调试后,再将控制程序移植到实际 PLC;2) 构建虚拟 PLC 或仿真 PLC。为避免代码移植带来的问题,本文选择构建虚拟 PLC 的方式。

S7-PLCSIM Advanced 是西门子针对 S7-4500 系列 PLC 推出的仿真软件。除了像过去的 S7-PLCSIM 一样能完成普通的控制逻辑仿真外,它还能够仿真各种通信功能。

利用 S7-PLCSIM Advanced 构建的虚拟 PLC 可通过 Softbus 和 TCP/IP 两种方式与外界通信。虚拟调试需要实现虚拟控制器与模型的通信,本文选择 TCP/IP 方式,以方便开启 OPC UA 服务器功能,建立控制器与虚拟模型的接口。

结合上述分析,本研究利用 S7-PLCSIM Advanced 提供的 C#语言 API 构建虚拟 PLC,其构建过程主要包括以下步骤:1) 生成虚拟 PLC 实例;2) 设置实例的通信接口为 TCP/IP;3) 配置实例的 IP 地址、子网掩码和默认网关;4) 对实例上电;5) 将控制程序下载到实例;6) 运行实例。

4.2 控制器-模型信息交互接口构建

构建控制器-模型的信息交互接口首先需要确定合适的通信协议。为保证系统接口的通用性,本研究基于虚拟控制器对 OPC UA 服务器功能的支持,通过 OPC UA 协议构建控制器-模型交互接口。在 OPC UA 的客户端-服务器模式下,控制器端为服务器,模型端为客户端。

4.2.1 控制器端接口配置

构建本文所述接口,在控制器端只需要完成:1) 将程序中与输入和输出相关的变量加入 OPC UA 服务器地址空间;2) 使能 OPC UA 服务器功能。

4.2.2 模型端接口实现

模型端通过 MATLAB 语言构建交互接口。如表 3 所示,MATLAB 的 OPC Toolbox 提供了对 OPC UA 客户端开发所需的基础方法(函数)支持。

表 3 MATLAB 提供的基础方法
Table 3 Basic methods provided by MATLAB

方法名	功能
opcua	构造 OPC UA 客户端对象
connect	连接 OPC UA 服务器
findNodeByName	根据名称寻找节点
readValue	从服务器上的节点读取数据
writeValue	向服务器上的节点写输入

首先,通过 opcua 方法创建 OPC UA 客户端对象,该方法通过 URL 参数确定待连接的 OPC UA 服务器,URL 的格式形如“opc.tcp://192.168.1.104:4840”,其中“opc.tcp”指示

采用的协议类型,“192.168.1.104:4840”指定 IP 地址与端口号.以 OPC UA 客户端对象为参数调用 connect 方法,通过匿名身份验证和连接服务器.当需要以特定用户身份连接时,则在调用时增加用户名和密码作为第 2 和第 3 参数.可通过 OPC UA 客户端对象的 isConnected 属性判断当前的连接状态,以避免重复连接.

在 OPC UA 中,各数据信息依附在各个节点下,由节点相互连接构成网络的 OPC UA 服务器地址空间.针对具体的数据信息,使用 findNodeByName 方法通过节点名称,依照节点空间简化的树形拓扑结构,寻找相应节点.确定具体节点后,通过 readValue 和 writeValue 方法完成具体的数据读写任务.

最后,使用 Simulink 中的 Interpreted MATLAB Function 模块对上述程序进行封装,该模块封装的接口程序能够在数字孪生模型仿真期间循环执行.将该模块的输出端口连接至数字孪生模型的电气系统以实施控制,模型的运行数据连接至该模块的输入端口以反馈至控制器.

5 虚拟调试应用验证

为了验证本文所述模型及整体系统的可用性和正确性,以及确定压力机设计方案的合理性和生产中运行参数的合理取值,将模型及系统应用于本研究针对的某型号公称吨位 2250 吨的八连杆四点压力机进行虚拟调试.该压力机的部分技术参数如表 4 所示.

表 4 技术参数

Table 4 Technical parameters

参 数	参数值
皮带传动比	5
飞轮惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	19763
电机功率(kW)	435
电机额定转速(rpm)	1150
电机额定转矩($\text{N} \cdot \text{m}$)	3607
电机转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	6.3
电机极对数	3

为保证压力机模型能够平稳运行,首先进行电气系统的变频器参数调试.变频器模型的初始控制参数取值情况如表 5 所示.对变频器设定幅值为 1000 转/分的参考速度信号并

表 5 变频器模型的初始控制参数

Table 5 Initial control parameters of inverter model

参数名	参数值
速度调节器比例系数 P	7
速度调节器积分系数 I	3500
磁链调节器比例系数 P	7930
磁链调节器积分系数 I	180000

施加一定的变负载扰动,查看当前电机及变频器的定子电流、转速、转矩和直流母线电压情况如图 6 所示,可见建立的变频器模型能够实现电机转速的调节,验证了电气系统建模的正确性.但是,可通过响应曲线观测到:当前控制参数取值不合适,在负载作用下系统处于不稳定状态.

对于变频器模型的 PI 控制器调参,可以通过经验法进行手工调参或借助 Simulink 提供的 PID Tuner 工具.对参数进行调整后,取值如表 6 所示,此时系统的响应行为如图 7 所

示,可见当前参数下速度保持性好,震荡小,转矩稳定性好,该组控制参数取值较为合适.

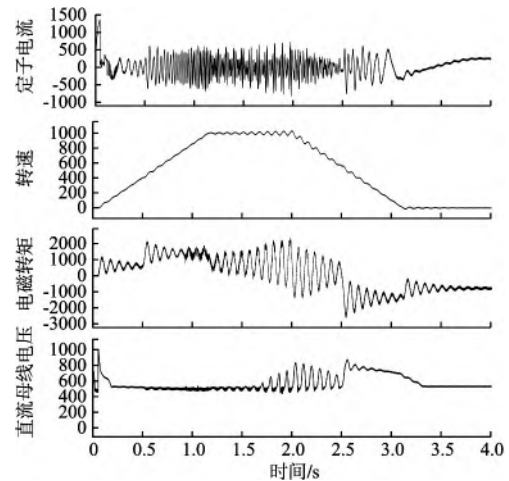


图 6 初始参数下的响应情况

Fig. 6 Response with initial parameters

通过虚拟控制器的人机交互界面,对压力机进行单次、寸动、最大和最小速度连续运转以及装模高度调整等其它各种

表 6 调整后变频器模型的控制参数

Table 6 Adjusted control parameters of inverter model

参数名	参数值
速度调节器比例系数 P	150
速度调节器积分系数 I	2000
磁链调节器比例系数 P	100
磁链调节器积分系数 I	30

功能控制,由图 8 所示界面可观察到模型的实时动画,以直观展示其运动的正确性.同时,根据当前所见的控制程序执行情

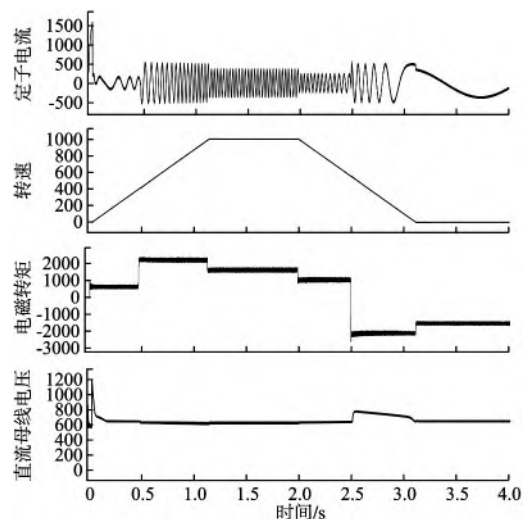


图 7 调整参数后的响应情况

Fig. 7 Response with adjusted parameters

况,压力机各种控制功能运行正常,由此说明控制程序设计合理,与压力机能够协同正常工作;若模型运行出现异常,则说明加工程序设计存在问题,应检查加工程序,进行修改后再进行调试.当发生生产任务变化时,可通过虚拟调试,根据模型

运行动画和下文的滑块运动特性曲线等来确定合适的行程次数等工艺参数。

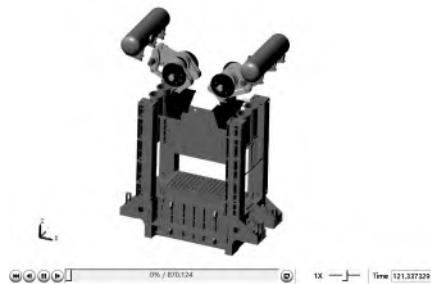


图8 模型仿真图示

Fig.8 Model simulation diagram

通过控制模型进行连续运动等测试,在如图8所示界面对运行状况进行检查,若出现干涉、碰撞等异常行为,则应当修改压力机设计方案,然后再进行虚拟调试。当行程次数设定为12次/分时,滑块运行的位移、速度、加速度情况如图9所示,此时滑块运动周期为5s,滑块实际运行速度与控制系统

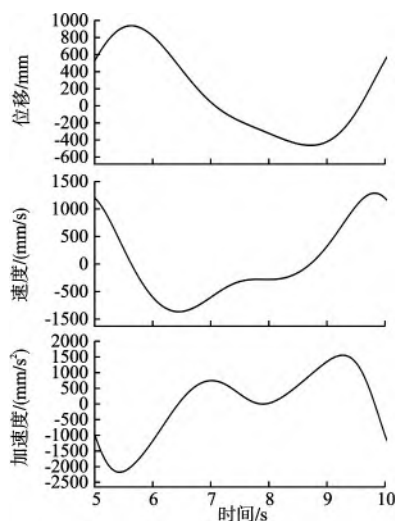


图9 滑块运动特性曲线

Fig.9 Motion characteristic curve of the slider

人机交互界面的设定速度一致,可获知本文对传动子系统建模正确。观察滑块的运动特性曲线可发现:滑块在向下接近下死点的工作行程内速度较慢,当滑块通过下死点后,滑块的空行程急回特性明显。该结果与设计期望一致,验证了压力机机械系统设计的合理性;若滑块运动特性不满足要求或与设计期望不一致,则检查压力机设计方案,修改后再次进行调试验证。通过以上验证过程可以看出,本研究设计的虚拟调试系统可完整、可靠的实现预定功能。

6 结束语

本文以虚拟调试应用为目标,给出了一种压力机的数字孪生模型构建方法,依照此方法建立了力能控制式压力机的多物理领域耦合模型;搭建了压力机数字孪生的虚拟控制系统,包括虚拟控制器和基于 OPC UA 的控制器-模型交互接口,实现了模型与控制器的信息交互。以某型号压力机为对

象,给出了该方法的应用示例,验证了虚拟调试的可行性。本文所述方法及模型系统可对压力机机械、电气和控制程序的设计结果以及运行参数等进行虚拟调试验证,以克服传统实机调试中成本高、风险大、周期长等弊端。同时,该数字孪生模型及系统还可推广应用至操作员培训等其他应用场景。

References:

- [1] Zheng Kui-jing, Dai Fang-yuan, Lian Lei. Virtual Commissioning for robot grinding system based on NX MCD [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique 2019 (12): 57-60, doi: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2019.12.014.
- [2] Lian Lei. Research on virtual commissioning of robot laser cladding system based on NX MCD [D]. Qinhuangdao: Yanshan University 2020.
- [3] Lin Yu-cheng, Han Yong. Virtual commissioning for CNC machine tools based on NX MCD [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021, (2): 151-156, doi: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2021.02.031.
- [4] Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [EB/OL]. http://www.aprison.com/library/Whitepaper_Dr_Grieves_DigitalTwin_ManufacturingExcellence.php. 2014.
- [5] Alam Kazi Masudul, El Saddik Abdulmotaleb. C2PS: a digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems [J]. IEEE Access, 2017, 5: 2050-2062, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2657006.
- [6] Lu Yu-qian, Liu Chao, Wang Kevin I-Kai, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 2020, 61 (C): 101837-101837, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [7] Tao Fei, Zhan He, Liu Ang, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15 (4): 2405-2415.
- [8] Tao Fei, Zhang Meng. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing [J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2756069.
- [9] Dahmann J S, Fujimoto R M, Weatherly R M. The dod high level architecture: an update [C]//Winter Simulation Conference on Simulation in the 21st-Century (WSC 98), 1998: 797-804.
- [10] Thomas Wueest, Schuetz Philipp, Luible Andreas. Outdoor test cell modelling with modelica [J]. Buildings, 2019, 9 (10): 209-229.
- [11] Fernandez De Canete Javier, Martin-Aguilar Jesus. Ship-course modeling and control using the SIMSCAPE physical modeling environment [J]. Simulation-transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2021, 97 (4): 247-266.
- [12] Wang Long-tai. Mechanical servo press [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [13] Ruan Yi, Yang Ying, Chen Bo-shi. Control system of electric drives-motion control systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [14] Bose Bimal K. Modern power electronics and AC drives [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

附中文参考文献:

- [1] 郑魁敬, 代方园, 廉磊. 基于 NX MCD 的机器人磨削系统虚拟调试 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, (12): 57-60, doi: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2019.12.014.
- [2] 廉磊. 基于 NX MCD 的机器人激光熔覆系统虚拟调试研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [3] 林裕程, 韩勇. 基于 NX MCD 的数控机床虚拟调试 [J]. 制造技术与机床, 2021, (2): 151-156, doi: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2021.02.031.
- [12] 王隆太. 伺服压力机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [13] 阮毅, 杨影, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.