

挤出成型实验装置数字孪生管理系统的开发

毕超, 王斌元

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 本文将数字孪生概念引入实验室管理领域, 以双螺杆挤出实验装置为例, 开发了实验装置数字孪生管理系统。以传统设备的信息化改造作为出发点, 从现场数据网络传输、实验室网络冗余配置、数据管理及应用管理系统开发等层面介绍了数字孪生管理系统的开发过程。并从实验安全、运维成本和实验效率等方面阐述了数字孪生管理系统的优势。本文所涉及内容对数字孪生技术在高等院校实验室管理及中小型企业设备信息化升级的应用具有一定的指导意义。

关键词: 数字孪生; 实验室管理; 挤出机组

中图分类号: TQ330.493

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)01-0022-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.01.004

0 介绍

数字孪生^[1]是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据, 集成多学科、多尺度的仿真过程, 它作为虚拟空间中对实体产品的镜像, 反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。将数字孪生概念引入实验室管理领域, 需要从实验装置运行数据的信息化着手, 选择能够代表实验装置运行状态的一系列实时数据。在构建基于数据的数学模型框架下, 形成虚拟空间中实验设备的完整镜像。既能够表征设备的实时运行状态, 又能够先一步判断和预测设备运行状态变化趋势。本文以传统设备的信息化改造作为出发点, 从现场数据网络传输、实验室网络冗余配置、数据管理及应用管理系统开发等层面介绍了数字孪生管理系统的开发过程, 并从实验安全、运维成本和实验效率等方面阐述了数字孪生管理系统的优势。本文所涉及内容对数字孪生技术在高等院校实验室管理及中小型企业设备信息化升级的应用具有一定的指导意义。

1 挤出成型实验装置的技术升级

1.1 设备的数字化及信息化

1.1.1 设备介绍

如图1为实验室现有 CHT-30B/600-11-48 双螺杆挤出机照片。该机组由主机、喂料系统、冷却水槽、吹干机和切粒机组成。其控制电气系统采用了以继电器为主的传统电气控制方案, 不具备装置信息化管理

的基本条件。



图1 双螺杆挤出机组

1.1.2 数据及采集方法

为使得该机组具备信息化管理条件, 需要对机组现有控制系统进行数字化升级。在不影响机组正常开展实验的前提下, 通过增加数据采集模块、PLC 控制器及通讯网关等硬件设备, 实现了设备运行核心数据的采集、存储、监控和实时分析。机组运行参数如表1所示, 包含了加热冷却和电机运行两部分, 电流、电压、开关状态和温度四种类别, 共计 59 个表征数据。其中, 实时温度和设定温度是通过 485 通讯方式直接采集到 PLC 控制器, 电机和加热器电流、系统电压是通过 4~20 mA 模拟量转换进行采集, 冷却电磁阀的关闭状态是借助中间继电器将温度控制器的输出信号间接接入 PLC 的数字量输入端。所有采集到的数据汇入 PLC 控制器。

作者简介: 毕超 (1981-), 男, 北京化工大学机电工程学院机械设计制造及其自动化专业实验室主任, 主要从事高分子材料加工装备开发及其信息化建设方面的研发工作。

表 1 机组运行数据采集

数据类别	数据来源	采集方式	信号类型
设定温度、实际温度	11 区机筒及机头	温度传感器	数字量
冷却状态	11 区机筒	温度表输出	开关量
电流	主电机、各喂料电机、水泵、真空泵、吹干机、切粒机	电流变送器	4~20 mA 模拟量
电压	主电机、主喂料电机、上阶侧喂料电机、切粒机	电压变送器	4~20 mA 模拟量

1.1.3 信息化传输

PLC 控制器完成数据采集后通过现场和远程两种渠道进行数据传输。一方面，数据接入现场数据管理系统，实现现场数据实时监控。另一方面，通过智能网关将数据上传至服务器云平台，实现数据存储和远程监控的同时，通过故障实时分析和应用程序的分析和处理，实现了故障的诊断。

1.2 现场及对外网络配置

1.2.1 现场网络

实验室现场具备有线网络和无线网络两种设备接入方式。由于现场接入设备处于同一个高速路由器的网络范围内，所以现场设备具有高速数据传输带宽，可以进行实时的数据可视化展示和灵敏的故障预警响应。具体地，在实验室现场网络环境下，利用 Node-RED 开源物联网平台实现了 PLC 控制器与单板机之间的数据传递，并利用其控制面板工具开发了实时数据可视化系统，如图 2 所示。

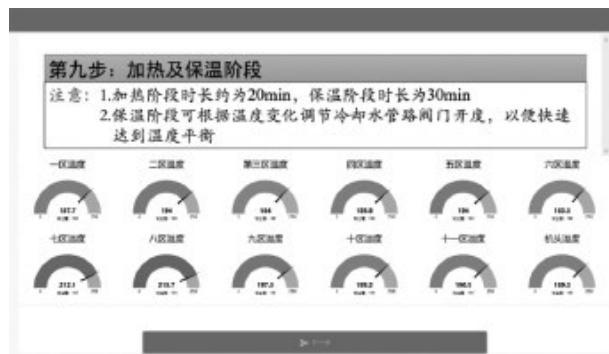


图 2 现场实时监控系统

1.2.2 对外网络

对外网络主要为远程数据监控提供服务。具体地，智能网关通过以太网接入实验室网络环境，并开通对外网络数据服务。为了保证数据采集稳定性，提供必要的冗余网络资源，网关还可以蜂窝网络方式接入移动 4G 网络。

1.3 数据管理

1.3.1 数据存储

通过现场网络可以实现秒级数据存储。依托这部

分数据，利用边缘计算手段可以实现快速的故障分析和预警响应。考虑到数据存储的运维成本，不会在实验室建设数据存储服务器，所以通过现场网络存储的数据量仅以短周期数据分析数学模型所要求的数据量为准。

通过对外网络，不仅将设备运行数据接入了物联网云平台，而且还将数据存入了云服务器数据库。这些数据不仅将用于周期性较长的分析模型使用，而且是实验室设备运行管理过程追溯的依据。考虑到数据同步滞后、数据传输稳定性限制等影响因素，数据接入物联网云平台和存入云服务器数据库的间隔时间以 20 s 计。

虽然数据接入物联网云平台和存入云服务器数据库都会产生一定的运行成本，但是这一方式避免了实验室搭建服务器的开支和运维成本。实际上，这种模式对中小型企业实现设备信息化管理是有极大帮助的。相关技术升级费用可以集中到厂内设备的信息化升级，而极大程度上避免了私有服务器搭建。与此同时，采用云服务后还可以极大程度上避免了数据层面上的人工运维成本。

1.3.2 数学模型

利用网络服务器的定时触发功能，不仅实现了数据的定时采集，而且可以对数据进行实时分析。设备信息化的真正价值体现就在于依赖数据的服务和决策。而实现服务和决策的途径就是建立依托数据的数学模型。在当前挤出实验室实验装置信息化升级后，基于设备运行的电流和温度等数据，开发了系统运行能耗分析、加热冷却系统故障分析、主机故障预警分析、加料系统调整预警、切粒机防堵转分析等有针对性的多种数学模型。

1.4 应用及管理

1.4.1 开关机指导系统

从实验室运行人员特点角度来看，操作实验装备的人员以学生为主。考虑到学生进入实验室前虽然已经具备了一定的专业理论知识，但是从设备操作熟练程度来看，还存在较大不足。为了提高实验过程学生

的主动参与程度并保证设备运行安全可靠，依托所开发的挤出机组数字孪生系统，开发了挤出机组的开关机指导系统。该系统运行过程中，系统对开关机步骤的提示是基于设备的实时状态开展的。在开机过程中，系统将开机过程划分为 10 个环节，在前序环节没有执行到位时，不会给出对后续环节的执行提示。比如说，当机筒实时温度低于设定温度时，系统不会进入保温阶段；当保温时间低于规定时间时，系统会屏蔽主机

启动功能。这样一来，按照开机系统提示对机组进行必要安全检查后，操作人员便可以按照屏幕上的提示按顺序执行开机步骤。在关机过程中，跟随系统提示，在完成实验物料清洗的基础上，还可以保证机器的关机状态最适合于下一次实验启动。关机环节以机组电源最终全部断开为终点，避免安全隐患。开机指导系统部分环节的指导界面如图 3 所示

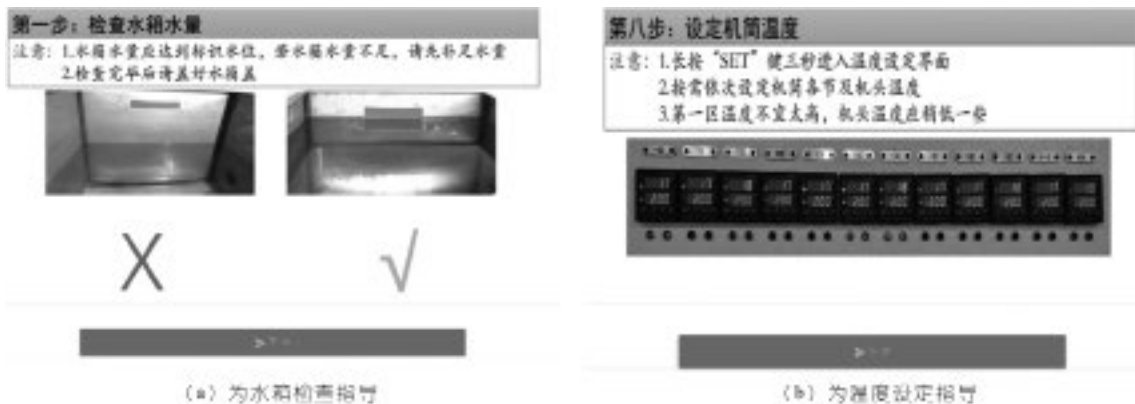


图 3 指导界面

1.4.2 故障监测报警专家系统

故障监测报警系统的开发目的在于①减少设备联锁关机的次数；②在发生联锁关机时指出故障产生点位置；③给出解决故障的指导方法。以主机螺杆驱动电机电流的监测为例，对该系统的功能进行分析。实验中，如增加主喂料量时，主机电流会呈现随加料量的增加而快速上升且随后趋于稳定的变化过程。对于没有经验的学生操作人员来说，如果其对主喂料转速调整过快，则很有可能会发生主机电流瞬间过载导致联锁停机的故障。为此，系统会根据主喂料转速、主喂料电流和主机电流的变化，给操作人员必要的指导意见。如主喂料转速调整过快，则提示操作人员停止操作的同时反向调整喂料速度。从而可以有效地避免因主机电流过载而造成的联锁停机。再比如，通过对机筒温度历史数据的分析，加之利用对应机筒加热器电流的实时数据，可以判断机筒加热器可能存在的故障。正因为设备某种故障的出现可能对应多种原因，对于经验不足的学生操作人员来说快速形成解决故障的思路更为重要。以加热器无法正常工作的故障为例，专家系统会给出检查线路端子是否松动、检查线路电气元件（熔断器）是否断路、检查温控仪表是否正常工作的检修指导意见。

2 数字孪生带来的好处

2.1 安全程度提高

基于数字孪生的设备管理系统可以有效地提高设备运行安全程度。以开机指导系统为例，操作人员跟随系统的指示进行开机各环节操作的同时，系统实施监测开机进展情况，可以最大程度避免无经验操作人员因疏漏所造成的设备潜在风险和故障。与此同时，数字孪生系统还可以根据设备的实时状态规范无经验操作人员的操作流程，避免不当操作所导致的联锁停机。据不完全统计，使用该系统前后设备运行联锁停机次数降低了 50%。

2.2 设备运维成本降低

设备用电是实验室设备的运维成本的主要部分之一。以开机过程设备保温环节来说，采用数字孪生管理系统后，系统会根据机筒的实际温度变化确定保温时间的终点，不仅可以保证设备升温热透，而且可以给出保温阶段终止提示，从而可以最短的保温时间启动设备，避免过度保温所造成的能量损失。与此同时，数字孪生系统可以保证设备一直处于高效稳定的工作状态，在保证设备处于能效最优的同时，还能保证设备处于良好的健康运行状态。从而有效降低设备维修次数、提高易损件寿命，降低运维成本。

除此之外，由于使用数字孪生管理系统可以有效地减少设备运行联锁停机次数，所以从物料使用角度可以避免非必要环节的物料耗损，从而降低物耗方面的运维成本。

2.3 实验效率提高

鉴于实验室设备不断增长的开课要求，以及开放性教学实验的时长不确定性因素，解决教学资源不足与开设实验对设备具有较高依赖性的矛盾，需要提高设备的运行效率。一方面，数字孪生管理系统可以帮助操作人员快速地将机组调试至最优工作状态，有效地节省了实验时间。另一方面，使用数字孪生管理系统可以对机组状况进行实时评估，实现故障预警，防患于未然，保证了实验的连续性。当故障发生时，该系统还能够快速定位故障点并给出检修指导意见，以

缩短非必要环节所占用的实验时间。

3 总结

本文基于挤出成型实验装置的实时数据，构建了该实验装置的完整虚拟镜像，开发了挤出成型实验装置的数字孪生管理系统。在传统设备的信息化改造中为双螺杆挤出机组暴露出60个表征数据。从现场数据网络传输、实验室网络冗余配置、数据管理及应用管理系统开发等层面介绍了数字孪生管理系统的开发过程。并从实验安全、运维成本和实验效率等方面阐述了数字孪生管理系统的优势。本文所涉及内容对数字孪生技术在高等院校实验室管理及中小型企业设备信息化升级的应用具有一定的指导意义。

Development of a digital twin management system for extrusion molding experimental equipment

Bi Chao, Wang Binyuan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper introduces the concept of digital twins into the field of laboratory management, taking the twin-screw extrusion experimental device as an example, developed a digital twin management system for experimental devices. Starting from the informatization transformation of traditional equipment, the development process of the digital twin management system is introduced from the aspects of on-site data network transmission, laboratory network redundancy configuration, data management, and application management system development. The advantages of the digital twin management system are elaborated from the aspects of experimental safety, operation and maintenance costs, and experimental efficiency. The content covered in this article has certain guiding significance for the application of digital twin technology in laboratory management in colleges and universities and the informatization upgrade of equipment in small and medium-sized enterprises.

Key words: digital twin; laboratory management; extrusion unit

(R-03)

