

# 数字孪生驱动的离心铸管机服务机器人 虚拟调试的研究

李振杰<sup>1</sup>, 张艳<sup>2</sup>, 宋彦<sup>1</sup>

(1. 河南工程学院 机械工程学院, 河南郑州 451191; 2. 郑州财经学院 智能工程学院, 河南郑州 451191)

**摘要:** 机电虚拟调试可以避免机械运动产生干涉, 缩短系统调试时间。本文针对离心铸管机服务机器人集成系统, 进行了机电联合虚拟调试研究。建立了机器人集成系统的几何模型和数字孪生模型, 研发了集成系统的控制系统和控制程序。借助于MCD平台, 以PLCSIM Advance作为虚拟PLC, 搭建了数字孪生模型与PLC程序的双向通信模型。实现了PLC程序驱动数字孪生模型的运动, 同时数字孪生模型也将运动状态反馈给PLC程序。进行了机器人集成系统的虚拟调试、整改直至其运行无误, 然后进行了实物调试。结果表明: 实物运行与数字孪生模型运行逻辑基本相同, 并且实物联调的时间约是传统调试时间的三分之一。对铸造业自动化系统的调试方法具有借鉴作用。

**关键词:** 离心铸管; 服务机器人; 数字孪生; 虚拟调试

## 1 国内外研究现状

### 1.1 离心铸管工艺的研究现状

离心铸管采用离心浇铸的方式制作而成, 铸件内部组织致密, 可用作乙烯裂解管、制氢转化炉管、辐射(加热)管等。在石油化工、冶金机械、火电核电等行业中有着广泛的应用。其工艺过程为: 铸型准备→金属冶炼→离心浇铸→脱模→检验→入库。其中, 离心浇铸和脱模方式对离心铸管的质量和生产效率有重要影响。工程界和学术界对此也进行了大量的研究, 主要集中在以下几方面。

(1) 涂料配方的研究。在金属液注入铸型前, 在铸型工作表面上喷一层涂料, 称为喷涂。喷涂可减缓金属液对铸型的冲蚀和热冲击、降低铸型的工作温度、减少型腔的热应力。此外, 涂料还有一定的润滑作用, 改善金属液充填条件、减少铸管冷隔、厚薄不均等缺陷。张研等<sup>[1]</sup>分析了砂型水基石墨涂料的特性, 确定了合理的砂型水基石墨涂料工艺参数。庞铭李<sup>[2]</sup>研究了涂料的组成, 耐火粉骨料、粘结剂、悬浮剂对涂料的发气量、高温强度、悬浮性等的影响, 确定了涂料的合适配方、施涂工艺。试验结果表明, 只要涂料发气量 $<7.5$  g, 铸管就不会产生气体缺陷。隋贤栋等<sup>[3]</sup>提出用铝矾土、石英粉、锆英粉和硅藻土适于作基料的双层涂料, 可有效地发挥基料的隔热及耐火性能。姜不居<sup>[4]</sup>等研究了长白硅藻土耐火特性, 可替代从德国进口的硅藻土。

(2) 清理机构。离心铸管机铸型因频繁使用, 涂料在高温下烧结在铸型内壁上, 形成较坚硬的硬壳, 同时还存在部分冷凝金属残留物, 使加工成型的铸管表面较粗糙, 铸型内壁久之产生龟裂, 影响铸管质量, 缩短了铸型的使用寿命, 因此, 需要对铸型内壁进行清理。通常采用气吹并用较硬物铲除硬结, 张伯恩<sup>[5]</sup>提出了用高速电机通过胶带带动轴, 使刷子高速旋转, 从而冲刷掉涂料的硬结和金属残留物, 并用气吹将它们吹掉。

(3) 脱模也即拔管。成型后铸管的脱模, 是用动力将铸管从铸型中抽出, 称为

作者简介:

李振杰(1968-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为工业机器人系统集成与控制。电话: 13298339302, E-mail: lzjxx@126.com

中图分类号: TG249.4;  
TP278

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)  
08-1056-07

基金项目:

河南省高等学校重点科研项目(23A460026)。

收稿日期:

2022-10-08 收到初稿,

2023-01-13 收到修订稿。

拔管。黄新高等给出了行走液压系统进行拔管的技术方案。王希霞等<sup>[6]</sup>提出了单链冷拔管方案。关红明等<sup>[7]</sup>提出了用钢丝绳式的拔管方案。

(4) 离心机控制系统的研究。张玉湖等<sup>[8]</sup>针对球墨铸铁管离心机控制系统强电与弱电混杂一起相互干扰的现象,提出了利用工业以太网技术将PLC控制系统的强电与弱电有效分开布置,增加了系统抗干扰的能力和安系数。

综上所述,铸型准备和脱模需要经历拔管、清理和喷涂等工序,相关学者们对离心机控制方法、涂料配方及喷涂方法、清理方案以及拔管方案都做了记载,但都局限在对单工序研究,并没有对各工序的自动化集成系统进行研究。

## 1.2 智能铸造的研究现状与发展趋势

目前,铸管的生产工序相互独立,没有形成自动化系统,工作效率极低,污染严重,劳动强度极大,无法满足市场快速变化的需要。尤其在碳达峰与碳中和的大背景下,全球兴起了低碳和“脱碳”大潮,绿色铸造将是铸造业发展的终极目标,而智能铸造是实现绿色铸造的根本途径。绿色铸造和智能铸造已经成为学术界和工程界研究的热点。例如,徐贵宝等<sup>[9]</sup>针对复杂中小型铸铝产品——高铁齿轮箱,设计了一条数字化、智能化、模块化、柔性化、信息化的金属型低压铸造生产线,很大程度地稳定生产过程、确保产品质量、满足高端铸件的需求。袁显华<sup>[10]</sup>提出了通过建立绿色管理机制、落实全生命周期管理等措施,逐步实现绿色铸造目标,并采取规划精益化设计思路、搭建自动化运输线等策略,建设智能化铸造生产线。李怀明等<sup>[11]</sup>给出了实现绿色铸造的几个要素,从节地、节能、节水和节材等方面实现智能铸造和绿色铸造。沈华刚等<sup>[12]</sup>针对铸铁杠杆的铸造工艺,开发工具、开发该智能铸造生产管理系统,实现了铸造生产过程的可视化和快速统计。王树宝等<sup>[13]</sup>研究了工业机器人在铸造制芯、造型、熔炼、浇注及清理等工序的应用。杨大春等<sup>[14]</sup>对离心铸造环形阵列式自动化生产线进行了研究,降低了工人劳动强度,提高了生产效率。

从相关文献可以看出,组建工业机器人或者智能化生产线是绿色铸造的有效手段。但是铸造工艺,从熔炼到毛坯件的清理,经历的工序多,组建智能铸造生产线长,需要的设备多,生产线的调试耗时费力。传统的生产线调试是在生产线集成后进行的,电气系统是通过电控工程师现场对点、编程和调试进行,机器人系统则是通过现场一台台示教进行,项目调试周期长是传统生产线研发投入使用的突出缺陷,根本无法满足敏捷制造的需求。

## 1.3 基于数字孪生理论的虚拟调试技术

基于数字孪生理论的虚拟调试技术为解决以上问题提供了新的方法和途径。数字孪生英文是Digital Twin,是两个高度相似的对象,一个是物理实体对象,一个是虚拟数字对象。它们是一对孪生子,二者的机械、力学、电气性能高度相似,并且可以实现实时通讯。当物理实体对象发生变化时,虚拟数字对象也会随之而变;相反,由于虚拟数字对象改变,物理实体对象也同步发生改变。虚拟调试技术就是用虚拟数字对象,与控制系统进行双向通讯,用控制系统驱动虚拟数字对象运行,同时虚拟数字对象也实时把机电信息传给控制系统,以此来检验控制逻辑的正确性。虚拟调试成功后,再进行实物联调,对存在的问题稍加改动即可。

正是由于虚拟调试技术在现代生产方法中作用巨大,因此对基于数字孪生理论的虚拟调试技术研究也十分火热。查阅文献可知,研究主要集中在数字孪生模型的建立和数字孪生对象与控制器的通讯方式上。相关文献主要有:李琳利等<sup>[15]</sup>研究了对复杂机械产品进行多学科建立数字孪生模型的方法。肖驰<sup>[16]</sup>等研究了自动化工业生产线的虚拟调试,借助NX MCD平台,提出用OPC服务器连接PLC和数字孪生模型,实现了对设备的控制。赵永信<sup>[17]</sup>提出了基于TCP的通讯,研究了气动手爪MCD模型虚拟调试。赵辉<sup>[18]</sup>等研究了全自动注塑机的虚拟调试,以PLCSIM Adv的通信方式建立数字孪生模型和虚拟PLC的连接,实现TIA博图控。汪浩<sup>[19]</sup>等研究了桁架式机器人的虚拟调试,通过SIMIT软件实现该三维模型与控制程序的信号交换。可见,控制器与数字孪生模型通讯方式,主要有OPC UA服务器、SIMIT服务器和S7-PLCSIM Advanced三种方式。

从上述文献可以看出,关于离心铸管的浇注,还没有对铸型准备、脱模工序的集成及其虚拟调试展开研究。本文提出一种服务机器人,将拔管、清理、喷涂、接管、转运存储等工序进行了集成,并将数字孪生理论应用到离心铸管服务机器人的虚拟调试中。主要研究机器人控制系统和虚拟调试,是在机器人力学性能满足工程要求的基础上展开的,主要内容包括服务机器人的组成、数字孪生模型的建立、控制系统的组建、虚拟调试和工程试验

## 2 离心铸管服务机器人的组成与工艺过程

### 2.1 服务机器人的组成

离心铸管服务机器人如图1所示,包括:拔管机械手、清理机械手、喷涂机械手、接管机械手以及X梁、

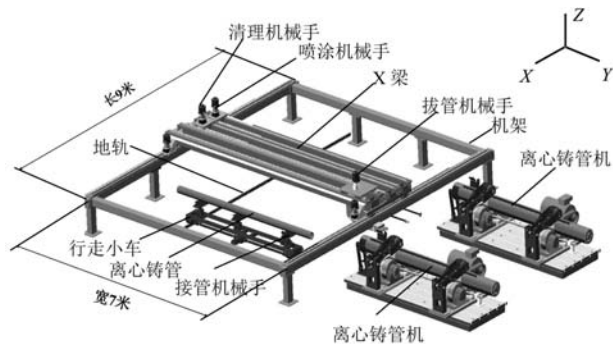


图1 离心铸管服务机器人

Fig. 1 Service robot for centrifugal casting pipe

机架和行走小车等。机器人工作对象是离心铸管，其长度在3.5~5 m之间，直径在50~200 mm之间。机器人服务对象是两台离心铸管机。整体尺寸框架长度9 m、宽度7 m，属于大型桁架机器人。接管机械手、清理机械手、喷涂机械手布置在X梁上，三者都可以做相互独立的Y向运动，X梁沿着机架做X向运动。在机架的下方布置有行走小车，可以地轨沿X向运行，接管机械手布置在行走小车上，可沿Z向运动。

## 2.2 系统工艺流程

服务机器人的工艺流程可用图2表示。

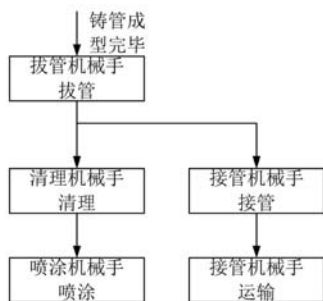


图2 服务机器人工艺流程

Fig. 2 Process flow of the service robot

## 3 控制系统分析

控制系统分析主要包括控制器组态和控制逻辑。

### 3.1 控制器组态

商用工业控制器常见的有：西门子、三菱、欧姆龙、汇川、和利时、合信、台达等。其中西门子1500系列PLC，响应时间短，程序扫描周期短，CPU位指令处理时间最短可达1 ns，配标准以太网口，运动控制可高达128轴。考虑到本文的离心铸管服务机器人，仅仅是离心铸管生产线的—个站点，因此，选择的控制器控制能力要有冗余量，便于生产线后续的扩展。

此外，西门子1500PLC系列可以实现机电联合虚拟调试，这对程序的验证、缩短工程周期有重要的作用。因此，本课题选择1500PLC。

工作状态下，接管机械手、清理杆和喷涂杆的轴中心线，需要分别与离心机型桶中心线对齐，即三者的X向坐标值精度要求很高（图2）。同时，由于离心铸管的长度规格很多，为了适应长度规格的变化，三者Y向的运动位移也要精准。因此，接管机械手、清理机械手、喷涂机械手和X梁运行均采用西门子V90伺服驱动，可以方便进行高精度位置控制。6台伺服驱动器之间采用以太网总线组态，PLC与其中一台伺服驱动器也采用以太网总线组态。小车行走机构需要与1号、2号离心机对齐，也采用伺服电机驱动。其余电机采用三相异步电动机驱动。触摸屏采用昆仑通泰TPC1561Hi，主要完成数据输入和动态显示功能。硬件构架图如3所示。

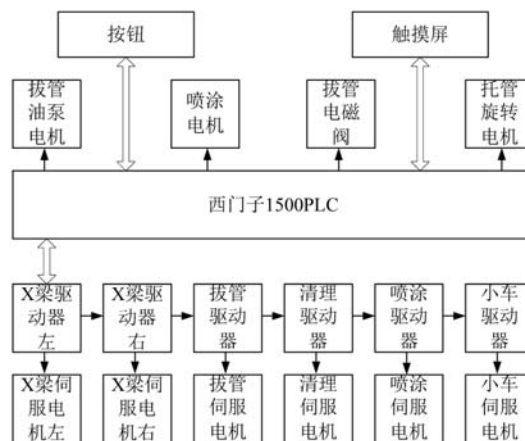


图3 控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the control system

### 3.2 控制逻辑

根据工艺流程，一台服务机器人配置两台卧式离心机。采用西门子TIA博图软件进行组态和编程。程序结构采用主程序和子程序框架式。根据工艺要求，共需要4个子程序，分别是接管子程序、清理子程序、喷涂子程序和接管子程序。各子程序流程图如图4至图6所示。喷涂子程序与清理子程序类似。主程序流程图如图7所示：

## 4 基于数字孪生的服务机器人虚拟调试

虚拟调试主要是检验控制逻辑与机械部件的运动逻辑是否一致。对于机械部件的动力学特性的分析，不在虚拟调试的范畴之内。



图4 拔管子程序

Fig. 4 Subprogram for pipe drawing

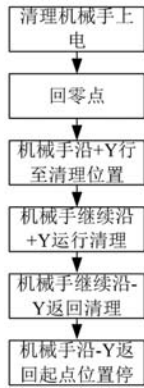


图5 清理子程序

Fig. 5 Subprogram for cleaning

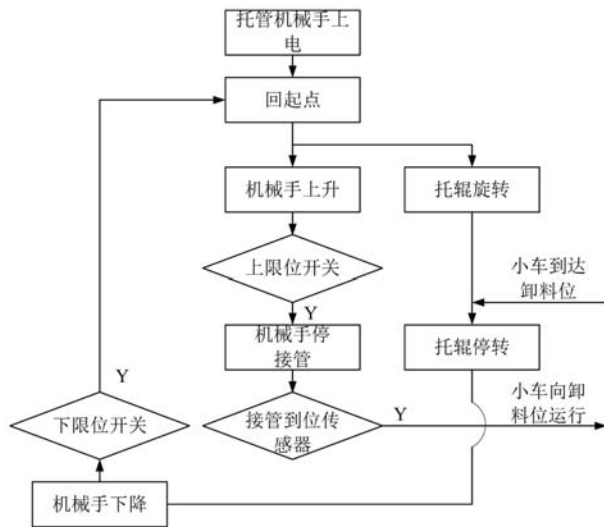


图6 接管子程序

Fig. 6 Subprogram for takeover

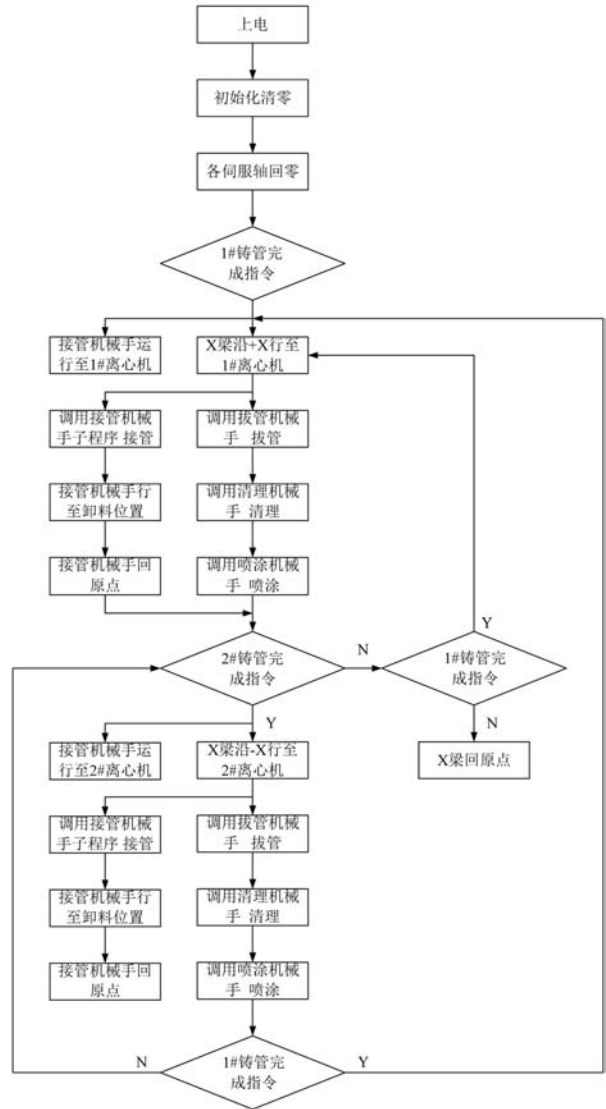


图7 主程序流程图

Fig. 7 Flowchart of main program

### 4.1 虚拟调试系统的搭建

虚拟调试系统的构成如图8所示。由MCD数字孪生模型、PLCSIM Advance虚拟PLC、博图PLC程序构成。博图软件、虚拟PLC与MCD数字孪生模型，三者之间通过自带接口进行通讯。博图PLC程序下载到虚拟PLC内。当PLC程序运行时，就可以虚拟PLC驱动MCD数字孪生模型，同时数字孪生模型也实时把运行的相关信号传递给虚拟PLC，并被博图程序接受。这样就构成了一个博图PLC程序与数字孪生模型的双向信息交



图8 虚拟调试系统组成

Fig. 8 Composition of virtual debugging system

互。通过观察数字孪生模型的运行状况，及时修改相应的PLC程序，直到数字孪生模型的运行满足工艺要求。

### 4.2 服务机器人数字孪生模型的建立

如前所述，数字孪生模型，就是要附加与物理对象相似的所有机械、电气属性，具体属性如下。

刚体：具有重力特性，可以承受力。为了减轻计算机的负担，提高计算速度，要对原几何模型进行轻量化处理。原则如下：仅把需要调试的部件作为刚体属性，不调试的部件不附加刚体属性，比如两台离心机不附加刚体特性；与运动部件不直接接触的零部件也不附加刚体属性；把与运动部件直接接触的标准件删除，比如螺钉、齿轮、齿条、链条、电机等；一些

不重要的连接件也删除。这样经过轻量化处理后，计算效率就会提高，图9是部分刚度属性。

机电导航器	
名称	类型
<input checked="" type="checkbox"/> Y梁体	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手1	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手2	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手臂1	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手臂2	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管体	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管油缸杆	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 被动托辊	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 地轨	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 喷涂杆	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 托管升降体	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 小车轨道	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 小车体	刚体
<input checked="" type="checkbox"/> 主动托辊	刚体

图9 刚体属性

Fig. 9 Rigid body attributes

碰撞体：对于刚体之间依靠碰撞来传递作用力的情况，就要对刚体再添加碰撞体属性。接管机械手要托住下落的离心铸管，二者之间有碰撞接触，故把二者设置为碰撞体。

运动副与约束：把具有运动副连接的部件，赋予相应的运动副特性，比如接管机械手沿Y向移动，这是接管机械手与X梁构成的移动副，故对接管机械手与X梁设置为移动副。图10是部分运动副和约束图。

运动副和约束	
<input checked="" type="checkbox"/> X向运动	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手1_拔管体_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手2_拔管体_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手臂1_拔管机械手1_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手臂1_拔管油缸杆_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手臂2_拔管机械手2_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管机械手臂2_拔管油缸杆_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管体_Y梁体_SJ(1)	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管油缸杆_拔管体_SJ(1)	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 被动托辊_托管升降体_HJ(1)	铰链副
<input checked="" type="checkbox"/> 地轨	固定副
<input checked="" type="checkbox"/> 喷涂杆_Y梁体_SJ(1)	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆_Y梁体_SJ(1)	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 托管升降体_小车体_SJ(1)	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 小车轨道_FJ(1)	固定副
<input checked="" type="checkbox"/> 小车体_FJ(1)	固定副
<input checked="" type="checkbox"/> 小车体_RB(1)_SJ(1)	滑动副
<input checked="" type="checkbox"/> 主动托辊_托管升降体_HJ(1)	铰链副

图10 运动副和约束图

Fig. 10 Kinematic pairs and constraints

传感器与执行器：各种类型的电机是执行元件，根据电机驱动的负载运动特性，附加位置控制和速度控制属性，这样就从功能上具备了电机的属性。对电气元器件，比如行程开关、接近开关等，设置为碰撞传感器等。如图11所示。

传感器和执行器	
<input checked="" type="checkbox"/> X向运动	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管体_Y运动	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/> 拔管油缸杆伸缩	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/> 喷涂杆_Y运动	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆_Y运动	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/> 托管升降Z向	速度控制
<input checked="" type="checkbox"/> 托管升降上限位开关	碰撞传感器
<input checked="" type="checkbox"/> 托管升降下限位开关	碰撞传感器
<input checked="" type="checkbox"/> 小车体X向运动	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/> 主动托辊旋转	速度控制
运行时行为	
信号	
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(1)	信号适配器
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(2)	信号适配器
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器	信号适配器

图11 传感器和执行器图

Fig. 11 Sensors and actuators

### 4.3 虚拟 PLC 的建立与控制程序下载

打开PLCSIM Advance，并把控制程序下载到PLCSIM Advance中，这样就具备了一台与真实PLC相同的虚拟PLC。

### 4.4 数字孪生模型与虚拟 PLC 信号映射建立

将数字孪生模型运动属性和信号，与虚拟PLC中控制变量进行映射。如图12所示。

信号	
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(1)	信号适配器
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(2)	信号适配器
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器	信号适配器
信号连接	
806-1	
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(1)_托管上升...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(1)_托管上限位...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(1)_托管下降...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(1)_托管下限位...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> SignalAdapter(2)_管子旋转...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器_Y轴清理负...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器_Y轴清理负...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器_Y轴清理正...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器_Y轴清理正...	信号映射连接
<input checked="" type="checkbox"/> 清理杆信号适配器_Y轴清理正...	信号映射连接

图12 信号映射图

Fig. 12 Signal map

#### 4.5 虚拟调试

信号映射与通讯建立后,打开数字孪生模型的播放工具,然后在博图中启动在线功能和监控功能,让程序运行,同时观察数字孪生模型的运行状态。查看控制逻辑、各个机械手运行坐标、运行速度是否合理等。对不合理之处,修改PLC程序,再次运行查看,直至无误。

### 5 实物调试

服务机器人经过虚拟调试后,数字孪生模型运行程序符合设计要求,并且机械零部件之间也没有干涉碰撞现象。此时,就可以进行实物联调。将经过虚拟调试验证后的PLC程序下载到物理PLC中,进行自动化系统的调试。采用本文研究的控制系统,在某铸管企业的铸造智能化改造中得到了成功应用。图13是触摸

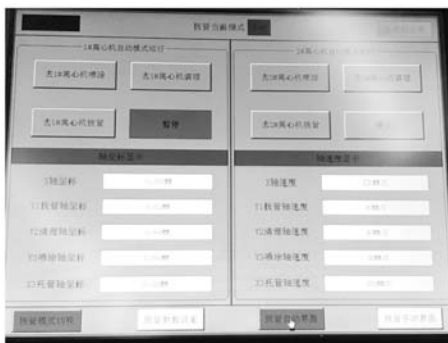


图13 触摸屏画面

Fig. 13 Screen of touch screen

屏画面。

分别进行了单独运行一台离心机机组和两台离心机机组都运行的生产测试。铸管规格分别有 $\Phi 50\text{ mm} \times 3\ 500\text{ mm}$ 、 $\Phi 70\text{ mm} \times 3\ 800\text{ mm}$ 、 $\Phi 118\text{ mm} \times 5\ 000\text{ mm}$ 。分别进行了手动操作和系统自动运行的运行测试。

工程应用表明:服务机器人运行无干涉碰撞,控制逻辑基本正确。

### 6 结束语

针对离心铸管机服务机器人系统传统调试周期长、设备已损坏的缺陷,展开了基于数字孪生属性的虚拟调试技术的研究,主要创新点有:

(1) 提出了虚拟调试与实物调试相结合的自动化系统调试方法。

(2) 借助于MCD平台,搭建了离心铸管机服务机器人的数字孪生模型与虚拟PLC之间的双向通信模型。

(3) 进行了虚拟调试研究,实现了PLC程序控制数字孪生模型的运动。

虚拟调试与实物调试相结合的调试方法,是传统的实物调试时间大约三分之一,并且避免了的机械部件之间的碰撞干涉。研究方法对离心铸造企业的自动化改造的实施具有借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 张研,苏柏林,杨万华.砂型水基石墨涂料在离心铸管生产中的应用[J].铸造设备与工艺,2020(3):30-32.
- [2] 庞铭李,庞铭李,靳玉春,等.离心铸造灰铸铁管涂料制备技术研究[J].热加工工艺,2012,41(7):48-50.
- [3] 隋贤栋.离心铸管涂料[J].铸造,1992,41(6):1-5.
- [4] 姜不居,刘志明,阎双景,等.硅藻土及其在离心铸管涂料中应用[J].铸造,1991,40(9):10-14.
- [5] 张伯恩.离心铸管机铸型内壁清理机构[J].中国铸机,1992(6):47-50.
- [6] 王希霞,潘汶,常远,等.3MN单链冷拔管机链条结构改进[J].钢管,2000(6):28-30.
- [7] 关红明,杨鹏,樊萍.钢丝绳式冷拔管机[J].重型机械,2000(3):9-10,33.
- [8] 张玉湖.离心机智能数字化柔性控制系统[C]//2018全国铸铁管技术研讨会论文集,2018:10-12.
- [9] 徐贵宝.数字化智能化铝合金低压金属型绿色铸造系统[J].铸造,2019,68(4):347-352.
- [10] 袁显华.绿色铸造与智能化生产研究[J].中国高科技,2022(8):44-45.
- [11] 李怀明,李晓宾,姜宗营,等.绿色铸造工厂工程设计研究[J].铸造技术,2021,42(11):993-996.
- [12] 沈华刚,朱永刚,郑喜贵.智能铸造生产管理系统的开发与应用[J].铸造,2022,71(2):215-219.
- [13] 王树宝,孙永功,郭文申.工业机器人在铸造自动化生产线中的应用[J].金属加工(热加工),2018(11):7-9.
- [14] 杨大春,李森林,何峰.离心铸造环形阵列式自动化生产线可行性研究与设计[J].铸造技术,2010,31(10):1307-1310.
- [15] 李琳利,李浩,顾复,等.基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1307-1319.

- [16] 肖驰. 工业生产线集成控制与虚拟调试分析 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12 ( 14 ) : 111-114.
- [17] 赵永信, 度国旭, 吴坚, 等. 基于TCP的气动手爪MCD模型虚拟调试的研究 [J]. 机床与液压, 2022, 50 ( 3 ) : 70-72.
- [18] 赵辉, 杨超, 宋洪洋. 基于NXMCD的全自动注塑机的虚拟调试 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 ( 1 ) : 118-121.
- [19] 汪浩, 刘树青, 贾茜, 等. 基于数字孪生的数控机床自动上下料系统设计 [J]. 机械制造与自动化, 2021, 50 ( 4 ) : 101-103.

---

## Research on Virtual Debugging of Service Robot of Centrifugal Pipe Casting Machine Based on Digital Twin

LI Zhen-jie, ZHANG Yan, SONG Yan

(1. School of Mechanical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, Henan, China; 2. School of Intelligent Engineering, Zhengzhou College of Finance and Economics, Zhengzhou 451191, Henan, China)

### Abstract:

Electromechanical virtual debugging can avoid the interference of mechanical movement and shorten the debugging time of the system. Based on the service robot integrated system of centrifugal pipe casting machine, the research of electromechanical joint virtual debugging was carried out in this paper. The geometric model and digital twin model of the robot integrated system were established. The control system and control program of the integrated system were developed. With the aid of MCD platform, a two-way communication model between digital twin model and PLC program was built with PLCSIM advance as a virtual PLC. The motion of the digital twin model was driven by the PLC program, and the digital twin model also fed back the motion state to the PLC program. The virtual debugging and rectification of the robot integrated system were carried out until it ran correctly, and then the physical debugging was carried out. The results showed that the logic of physical operation was basically the same as that of digital twin model, and the time of physical joint debugging was about one third of that of traditional debugging. This paper can be used for reference to the traditional debugging methods of the foundry automation systems.

### Key words:

centrifugal cast pipe; service robot; digital twins; virtual debugging

---