

# 基于数字孪生的涡轮焊接与视觉检测应用研究

刘永刚,姚立权

(辽宁装备制造职业技术学院 机械工程学院,辽宁 沈阳 110161)

**摘要:**针对涡轮焊接控制以及质量检测问题,提出了一种基于数字孪生和视觉检测的涡轮焊接检测控制系统。对控制系统的物理概念、数字孪生系统、通信等整个方案的设计理论进行研究;对整个系统以基于 NX MCD 的数字孪生构建进行设计,对直流铆焊专机的硬件工作原理进行分析。通过视觉检测方法,对涡轮焊接的质量检测过程进行分析。分析了基于 KEP server 实现 PLC 与 NX MCD 的数据映射通信过程原理。将研究成果应用于现场实际设备的运行中,实验结果表明涡轮焊接与检测的数字孪生同步率达到 100%。

**关键词:**数字孪生;焊接;视觉检测;通信

**中图分类号:**TP23

**文章编号:**1000-0682(2025)01-0060-06

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.011

## Application research of turbine welding and visual detection based on digital twin

LIU Yonggang, YAO Liqun

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Equipment Manufacturing Vocational and Technical College, Liaoning Shenyang 110161, China)

**Abstract:**To solve the problem of turbine welding control and quality inspection, a turbine welding detection and control system based on digital twin and visual detection was proposed. The physical concept of control system, digital twin system, communication and other design theories of the whole scheme are studied. The whole system is designed based on the digital twin construction of NX MCD, and the working principle of the hardware of the DC riveting machine is analyzed. The process principle of data mapping communication between PLC and NX MCD based on KEP server is analyzed. The research results are applied to the operation of the actual equipment in the field, and the experimental results show that the digital twin synchronization rate of turbine welding and detection reaches 100%.

**Keywords:** digital twin; welding; visual detection; communication

## 0 引言

随着自动化程度的提高,自动焊接也在逐步发展。铆焊检测的背景主要涉及到产品质量的保障以及生产过程的控制等多个方面。随着科技的发展,人们对产品的质量要求越来越高,对设备的安全性要求也越来越高,因而对设计和制造都有了更高的要求。尤其是在一些对安全要求极高(如航空航天及核能等)的领域,任何一点小小的缺陷都可能导

致严重的后果。因此,对铆焊件进行严格的检测,确保其质量符合标准,是保障设备安全的重要手段。在生产过程中,通过对铆焊件进行检测,可以及时发现生产过程中存在的问题,如工艺参数不当、设备故障等,从而及时进行调整和改进,确保生产过程的稳定和可控<sup>[1-4]</sup>。

数字孪生(Digital Twins)是将多学科、多物理量、多尺度、多概率的模拟过程,充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据进行整合,并在虚拟空间内完成映射,从而体现全生命周期过程所对应的实体设备<sup>[5-7]</sup>。国内基于 NX MCD 的数字孪生技术进行了多方面的研究。蔡文站等人<sup>[8]</sup>实现了基于 NX MCD 的机器人打磨叶片虚拟调试系统;王俊杰等人<sup>[9]</sup>提出了 NX MCD 的机电概念设计与虚实验证协同的研究;苏建等人<sup>[10]</sup>实现了基于 NX MCD 的工业机器人视觉分拣数字孪生系统;郑魁敬等人<sup>[11]</sup>

收稿日期:2024-05-27

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2023-MS-335);2023 年度辽宁省职业教育与继续教育教学改革研究项目(LZJG2023042);2024 年度辽宁省教育厅高校基本科研项目。

第一作者:刘永刚(1983—),男,山东寿光人,硕士,副教授,主要研究领域数字孪生、虚拟仿真、智能制造、自动化等。

E-mail: chinahappy8@163.com

提出基 NX MCD 的机器人磨削系统虚拟调试;林裕程等人<sup>[12]</sup>提出基于 NX MCD 的数控机床虚拟调试方法,以上大多数的研究都是基于具体设备的虚拟仿真研究,但是在焊接检测领域数字孪生系统的应用研究还不够深入。

针对汽车涡轮铆焊过程中可能出现的漏铆,过铆,过轻等质量问题,该文设计了基于视觉检测的涡轮焊接检测数字孪生系统。应用 NX MCD 构建焊接控制与视觉检测的数字孪生系统。将焊接质量的视觉检测数据映射到数字系统中,实现虚实同步,缩短生产制造周期。

### 1 方案设计

涡轮组件的焊接与检测是整个涡轮制造、加工、装配过程中至关重要的生产环节。在汽车涡轮生产过程中,对已经装配好垫片、涡轮、轮毂的组件进行铆焊,是涡轮成品生产过程中最重要的生产过程,该文针对这一过程进行一系列的研究设计。

#### 1.1 物理系统设计

采用数字孪生和工业视觉技术进行涡轮组件的焊接检测故障诊断。涡轮组件焊接与视觉检测的数字孪生模型如图 1 所示。

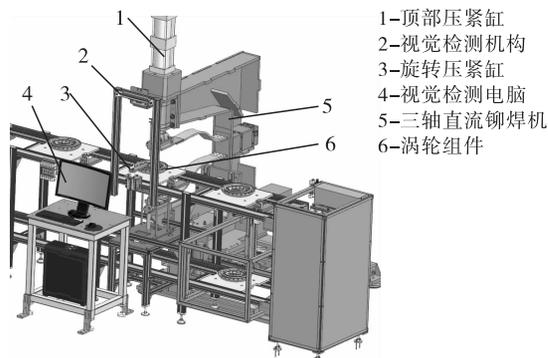


图 1 涡轮组件焊接与视觉检测数字孪生模型

该系统是整个涡轮组件加工、装配、铆焊检测过程中的一部分。采用工业视觉技术检测涡轮组件焊接漏铆以及焊接质量等数据。采用三轴直流铆焊专机对涡轮组件进行铆焊;采用西门子 1200PLC 进行硬件组态,流程控制和通信。通过顶部压紧缸实现直流铆焊机上铆头与下铆头的焊接作业。通过旋转压紧缸实现涡轮组件的固定。

#### 1.2 数字孪生系统设计

为了实现涡轮组件焊接与视觉检测的虚实同步作业,采用 NX MCD 软件,构建涡轮组件焊接与视觉检测的数字孪生系统,包括三轴直流铆焊机、顶部压紧缸、旋转压紧缸、传感器、视觉检测机构等三维

模型。将物理实体设备的相关数据映射在构建的数字孪生系统中,以达到虚实联动的效果。构建的数字孪生模型所涉及的机电概念如表 1 所示。

表 1 孪生系统模块与机电概念

孪生系统	机电概念
三轴直流铆焊机	刚体、碰撞体、固定副、滑动副、位置控制、位置传感器
顶部压紧缸	刚体、滑动副、平面副、位置控制、位置传感器
旋转压紧缸	刚体、碰撞体、柱面副、滑动副、固定副、位置控制
涡轮组件	刚体、碰撞体
铆钉	显示更改器
托盘	刚体、固定副

#### 1.3 通信方案设计

系统将视觉系统检测到数据实时传输到 PLC, PLC 将数据进行处理,并根据处理完的数据控制三轴直流铆焊机,实现涡轮组件的铆焊。同时视觉系统实时检测铆焊过程数据,PLC 对铆焊过程数据进行处理,当出现漏铆,铆接质量问题时,实时反馈到 HMI 人机界面。

如图 2 所示,利用 SYHT 软件对视觉检测进行算法分析,通过 MODBUS TCP 协议传输到 PLC,通过 TIA Portal 软件对 PLC 进行硬件组态,编程,控制流程设计。为了实现虚实同步,利用 KEP Server 软件通过 OPC DA 通信实现 PLC 物理系统和 NX MCD 虚拟系统的数据映射,实现虚实同步。

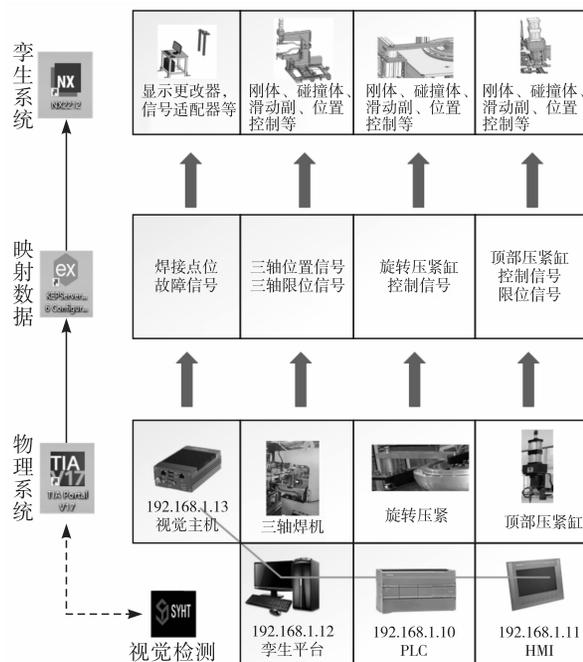


图 2 数字孪生系统构建

## 2 数字孪生系统的构建

### 2.1 三轴直流铆焊专机数字孪生系统构建

三轴直流铆焊专机数字孪生系统如图 3 所示,三轴直流铆焊专机机电概念如图 4 所示,系统由刚体、固定副、滑动副、碰撞体、位置控制、位置传感器等组成。

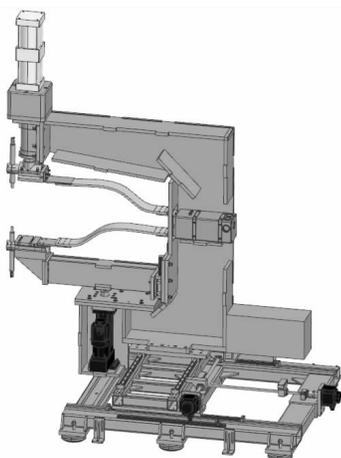


图 3 三轴直流铆焊专机数字孪生系统

名称	类型
三轴直流铆焊专机	
101Y轴导轨	刚体
101Y轴导轨_FJ(1)	固定副
102Y轴	刚体
102Y轴_103Y轴动力杆_SJ(1)	滑动副
102Y轴_103Y轴动力杆_PC(1)	位置控制
103Y轴动力杆	刚体
103Y轴动力杆_FJ(1)	固定副
201X轴	刚体
201X轴_102Y轴_SJ(1)	滑动副
201X轴_102Y轴_PC(1)	位置控制
301Z轴	刚体
301Z轴_201X轴_SJ(1)	滑动副
301Z轴_201X轴_PC(1)	位置控制
501上铜排	刚体
502下铜排	刚体
X轴负限位	位置传感器
X轴位置控制	信号适配器
X轴正限位	位置传感器
Y轴负限位	位置传感器
Y轴位置控制	信号适配器
Y轴正限位	位置传感器
Z轴负限位	位置传感器
Z轴位置控制	信号适配器
Z轴正限位	位置传感器
上铜头下表面	碰撞体

图 4 三轴直流铆焊专机机电概念

三轴直流铆焊机由 Y 轴、X 轴、Z 轴、Y 轴导轨、Y 轴动力杆、上铜排和下铜排等刚体组成。Y 轴动力杆和 Y 轴导轨是固定副,Y 轴动力杆、Y 轴、X 轴和 Z 轴通过滑动副关联而成。其中 Y 轴 - Y 轴动力杆滑动副的基本体是 Y 轴动力杆,连接体是 Y 轴,轴矢量方向向右,Y 轴移动范围通过正负限位传感器进行限制;X 轴 - Y 轴滑动副的基本体是 Y 轴,连接体是 X 轴,轴矢量方向向后,X 轴移动范围通过正负限位传感器进行限制;Z 轴 - X 轴滑动副的基本体是 X 轴,连接体是 Y 轴,轴矢量方向向上,Z 轴移动范围通过正负限位传感器进行限制;完成 Y 轴、X

轴和 Z 轴滑动副的创建,并对应创建位置控制。

### 2.2 工件数字孪生系统构建

图 5 所示工件数字孪生系统的机电概念主要由更改显示器和信号适配器等组成,如图 6 所示。创建 12 个铆钉的显示更改器,根据铆焊质量分为过铆、过轻、漏铆、正常和未开始等不同颜色。创建信号适配器用于与 KEP server 的信号连接。

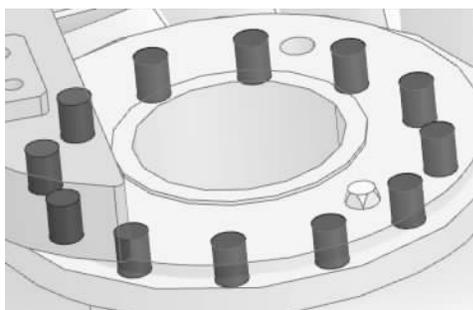


图 5 工件数字孪生系统

名称	类型
视觉检测	
铆钉01_过铆_粉色	显示更改器
铆钉01_过轻_黄色	显示更改器
铆钉01_漏铆_红色	显示更改器
铆钉01_视觉检测	信号适配器
铆钉01_未开始_蓝色	显示更改器
铆钉01_正常_绿色	显示更改器
铆钉02_过铆_粉色	显示更改器
铆钉02_过轻_黄色	显示更改器
铆钉02_漏铆_红色	显示更改器
铆钉02_视觉检测	信号适配器
铆钉02_未开始_蓝色	显示更改器
铆钉02_正常_绿色	显示更改器

图 6 工件机电概念

为保证工件颜色虚实同步,建立工件的 5 个“显示更改器”,根据接收的视觉检测的颜色信息修改数字孪生系统中工件颜色。添加仿真序列,可以查看颜色值,其中粉色 145,黄色 5,红色 186,蓝色 127,绿色 29,如图 7 所示。

孪生颜色	颜色值
	粉色 值=145
	黄色 值=5
	红色 值=186
	蓝色 值=127
	绿色 值=29

图 7 工件颜色

通过信号适配器的信号判断数字孪生工件的颜色,选择工件 5 个显示更改器作为机电对象 Parameter,创建 5 个信号 Signal 作为 MCD 的关联信号,如

图 8 所示。Parameter 参数选择执行模式,颜色识别公式为:

If Signal = = true then 1 else 0



图 8 工件颜色信号适配器

当 Signal = = true 时,Parameter 为 1,当 Signal = = false 时,Parameter 为 0。Signal 为脉冲信号,由 PLC 的编程实现脉冲信号的输出,通过 KEP server 映射到 NX MCD 的 Signal。

### 3 直流铆焊专机的工作原理

直流铆焊专机包括伺服驱动器、绝对值编码器、PLC、触摸屏、传感器、焊机 etc 硬件设备。安装在装配线体的一侧,当有工件经前部工序到达铆焊工位时,铆焊专机控制系统检测是否有工件,然后通过移动 X 轴、Y 轴和 Z 轴实现焊接点位的空间定位,通过顶部压紧缸与 Z 轴铆头实现焊接。通过调整焊接电流大小来保证焊接质量,到达指定焊接高度时,停止焊接。

对于 12 个铆钉的孔位,需要对三轴直流铆焊专机进行示教定位,如图 9 所示,需要在触摸屏上对 1~12 个铆钉点位进行示教。X 轴和 Y 轴坐标位置是根据 12 个孔位相对三轴直流铆焊专机的位置,12 个铆钉的位置高度一致的,所以 Z 轴升高的位置数据是相同的。

序号	X	Y	Z	名称
1	28.83	44.05	78.00	东线
2	25.79	67.51	78.00	东线
3	35.08	89.22	78.00	东线
4	54.01	103.90	78.00	东线
5	77.58	106.79	78.00	东线
6	99.71	98.10	78.00	东线
7	113.86	79.07	78.00	东线
8	117.05	55.65	78.00	东线
9	107.94	32.59	78.00	东线
10	88.71	19.09	78.00	东线
11	64.96	16.19	78.00	东线
12	43.10	25.19	78.00	东线
13	40.00	40.00	16.00	东线
14	0.00	0.00	0.00	东线
15	45.00	45.00	17.00	东线
16	14.15	10.50	19.58	东线
17	14.15	10.50	19.58	东线
18	14.15	10.50	19.58	东线
19	14.15	10.50	19.58	东线
20	0.00	0.00	12.00	东线

图 9 触摸屏 12 孔示教设置

直流铆焊专机工作流程如图 10 所示。

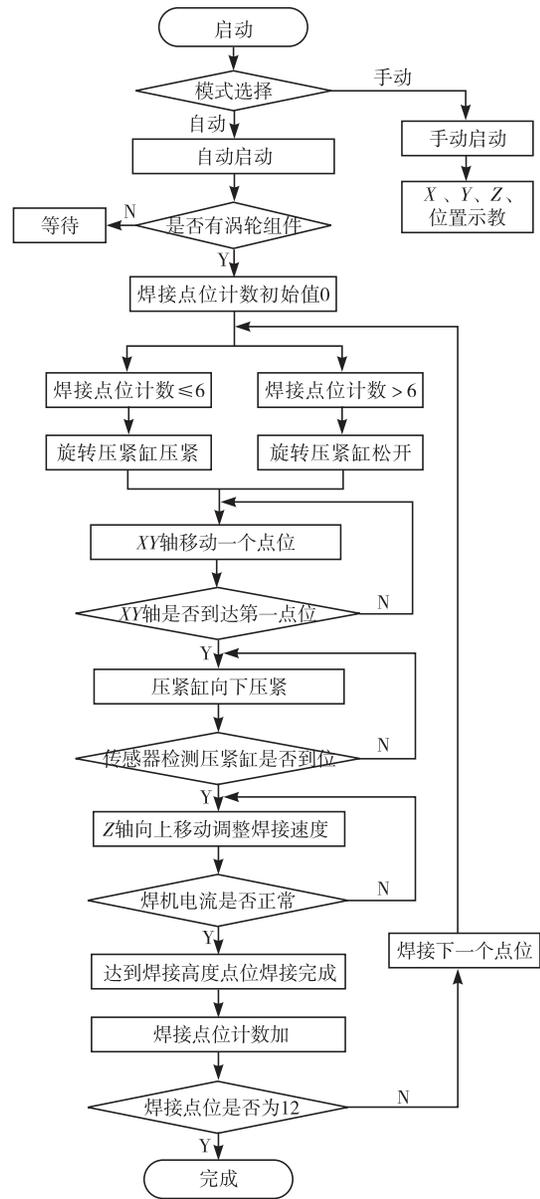


图 10 三轴直流铆焊专机工作流程

系统上电,启动设备,选择控制模式,在手动模式下,可以对 12 个铆钉点位进行示教。选择自动模式,进行自动焊接作业。

自动模式下,首先检测是否有涡轮组件,如果没有,继续等待。如果有,初始化焊接点位计数器为 0。当焊接点位计数器 ≤ 6 时,旋转压紧缸压紧涡轮;当焊接点位计数器 > 6 时,旋转压紧缸松开。然后 X 轴和 Y 轴移动到需要焊接的铆钉点位,到位后,顶部压紧缸压紧铆钉,Z 轴向上移动,实现铆钉的焊接作业。焊接完成一个铆钉后,焊接点位计数器加 1,判断焊接点位计数器,当焊接点位计数器 < 12 时,继续进行下一个铆钉焊接,当焊接点位计数器 = 12 时,这个涡轮组件焊接完成。

### 4 通信连接

#### 4.1 视觉系统通信

视觉系统采用 MODBUS TCP 通信协议,视觉系统做客户端,PLC 系统做服务端。

视觉系统通信端口配置如图 11 所示。目标端口 502,目标 IP 地址 192.168.1.10(PLC 的 IP 地址)。



图 11 视觉通信配置

PLC 系统做服务端,与视觉系统的通信采用 MB\_SERVER 功能模块,如下所示:

"MB\_SERVER\_DB" (DISCONNECT; = "Vision\_PLC\_Data". DIS, NDR = > "Vision\_PLC\_Data". NDR, DR = > "Vision\_PLC\_Data". DR, ERROR = > "Vision\_PLC\_Data". Error, STATUS = > "Vision\_PLC\_Data". Status, MB\_HOLD\_REG; = "Vision\_PLC\_Data". Data, CONNECT; = "Vision\_PLC\_CON". ATcp);

Vision\_PLC\_CON 用于配置连接视觉系统的参数,RemoteAddress 中的 ADDR 是 192.168.1.18,是视觉系统的 IP 地址。Vision\_PLC\_Data 是视觉检测的数据,用于视觉系统与 PLC 之间的信号交互。

#### 4.2 PLC 与 KEP server 通信

KEP server 与西门子 1200 通信采用 Siemens TCP/IP Ethernet 驱动程序,ID 是 192.168.1.10,是西门子 PLC 的 IP 地址。如图 12 所示。



图 12 KEP server 驱动配置

PLC 与 KEP server 的地址映射如图 13 所示。例如铆钉 01\_视觉检测的 PLC 地址是 DB1.B18.0 ~

DB1.B18.4,对应的 KEP server 标记名称是 Signal\_010, Signal\_011, Signal\_012, Signal\_013 和 Signal\_014。以此类推完成其他信号的 PLC 与 KEP server 的数据映射。

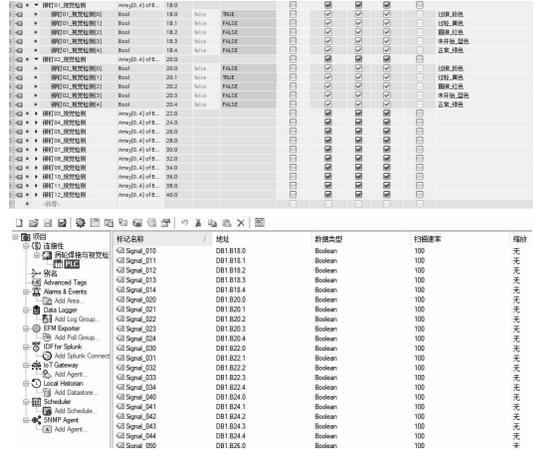


图 13 KEP server 与 PLC 数据

#### 4.3 NX MCD 信号

NX MCD 软件与 KEP server 软件安装在同一台电脑主机上,KEP server 接收 PLC 数据,然后 KEP server 与 NX MCD 软件通过 OPC DA 协议进行数据交互。NX MCD 与 KEP server 信号映射如图 14 所示。



图 14 信号映射

### 5 联合编程调试与应用

PLC 作为控制系统的核心部分,用于控制三轴铆焊机的铆焊作业,控制工业相机进行拍照,获取视觉系统的检测数据。通过 KEP server 软件实现 PLC 与 NX MCD 的数据映射,实现虚实同步。现场实际安装设备如图 15 所示。

三轴铆焊机设备运行曲线如图 16 所示,在设备运行时,三轴铆焊机 X 轴和 Y 轴移动到铆焊点位,然后顶部压紧缸压紧涡轮顶部铆钉,Z 轴对铆钉进行铆焊作业。从运行曲线可以看出,Z 轴上升高度

是一致的, X轴和Y轴运行是根据12个铆钉的位置进行调整。



图15 现场设备图片

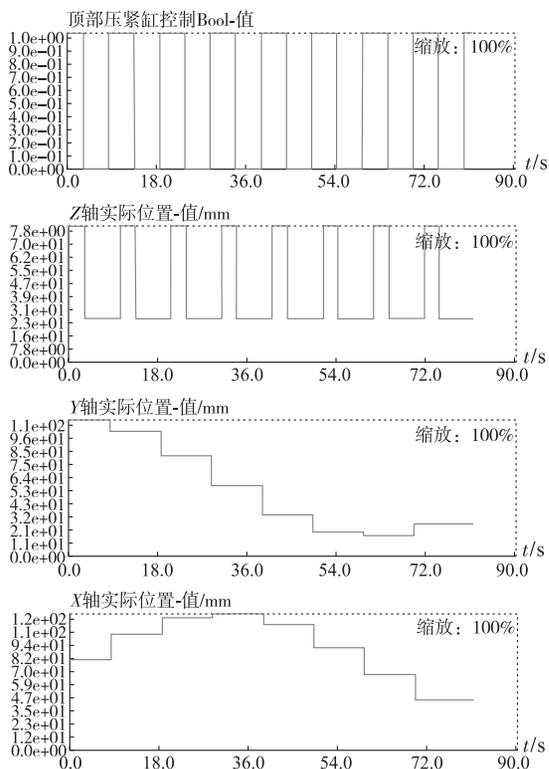


图16 三轴焊机运行曲线

视觉检测数字孪生如图17所示,实现铆钉焊接的过铆、过轻、漏铆、正常、未开始的显示。实验结果表明,工件检测数字孪生准确率达到100%。

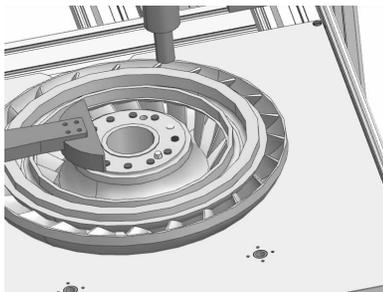


图17 视觉检测数字孪生

## 6 结论

基于NX MCD建立数字孪生模型,以PLC为核心控制部件,以KEP server为数据映射软件,以视觉系统为焊接质量检测工具。通过视觉检测实现了检测质量的准确判断,通过数字孪生实现虚实同步,在实际生产过程中,视觉检测准确率达到100%同步显示在数字孪生系统中。同时简化了三轴铆焊控制功能,提高了整个焊接作业的工艺流程。

### 参考文献:

- [1] 安琪. 焊接机器人在汽车焊装领域中的应用思考[J]. 中国设备工程, 2020(06): 19-21.
- [2] 林铭. 自动焊接在机械焊接中的应用研究[J]. 福建冶金, 2021, 50(04): 48-50.
- [3] 于英飞, 郭吉昌, 朱志明. 焊接可视化技术的发展与研究现状[J]. 焊接, 2017(12): 4-8.
- [4] 顾俊, 张玲玲, 王健超. 机器视觉在自动化焊接中的应用[J]. 应用激光, 2018, 38(6): 1038-1043.
- [5] 冯鹏飞. 数字孪生智慧城市排水系统建模研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2022.
- [6] 朱冬. 基于数字孪生的工业机器人状态监测技术及系统设计研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(05): 110-112.
- [7] 张琛, 黑晨菲, 李晶. 自动上下料系统的数字孪生模型构建与虚拟仿真调试方法[J]. 制造业自动化, 2024, 46(01): 45-50.
- [8] 蔡文站, 田建艳, 王书宇, 等. 基于NX MCD与TIA的机器人打磨联合虚拟调试研究[J]. 现代制造工程, 2022(07): 37-42+120.
- [9] 王俊杰, 戴春祥, 秦荣康, 等. 基于NX MCD的机电概念设计与虚拟验证协同的研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(07): 31-33.
- [10] 苏建, 慕存强, 任善剑, 等. 基于NX\_MCD的工业机器人视觉分拣数字孪生系统设计[J]. 机床与液压, 2023, 51(23): 73-79.
- [11] 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+64.
- [12] 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(02): 151-156.