

Design of Transport Device and Its Control System for Weld-Inspection Robot in AP1000

Baoliang Cheng¹, Zhongji Zhao², Jian Rong², Wenfeng Lin², Xueguan Gao²

¹State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai

²Shanghai Jiao Tong University, Robotics Institute, Shanghai

Email: 846811726@qq.com

Received: Aug. 29th, 2018; accepted: Sep. 22nd, 2018; published: Sep. 29th, 2018

Abstract

At present, the inspection of connecting weld on Steam Generator (SG) is still in the artificial stage while the protection of workers in the testing process is imminent. In this paper, a transport device for Weld-inspection Robot is designed based on field conditions. By using modular design, the device can be assembled quickly to save installation time. Then the realization of rapid assembly is briefly introduced. Finally, the control system of transport device is designed and its feasibility is verified by simulation.

Keywords

Steam Generator, Weld Inspection, Inspection Robot, Control System

焊缝检测机器人送入装置及控制系统的设计

程保良¹, 赵众集², 荣健², 林文峰², 高雪官²

¹国核电站运行服务技术有限公司, 上海

²上海交通大学机器人研究所, 上海

Email: 846811726@qq.com

收稿日期: 2018年8月29日; 录用日期: 2018年9月22日; 发布日期: 2018年9月29日

摘要

目前国内对于核电站蒸汽发生器接管焊缝检测还处于人工阶段, 而检测过程中对于工人的保护又迫在眉

睫。本文针对之前设计的焊缝检测机器人，根据现场工况，设计了送入装置并将其模块化，方便进行快速装配以节省安装时间；再对其快速装配的实现做了简单的介绍；最后设计了送入装置的控制系統，并利用仿真验证了其可行性。

关键词

蒸汽发生器，焊缝检测，检测机器人，控制系统

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

AP1000 蒸汽发生器系统(Steam Generator System, 简称 SGS)是核电站动力装置中连接一、二回路的枢纽设备。由于 AP1000 的特殊结构[1]，国家核安全监管部門对于该设备的役前和在役检测都提出了新的要求，其中就包括了蒸汽发生器出水接管和主泵连接焊缝的无损检测[2]。检测焊缝如图 1 所示。

针对其结构特点，我们已经设计了基于 UR10 机器人的检测机器人辅助臂[3]，如图 2 所示。UR10 机器人与 PITCH 关节连接，末端关节搭载超声波探头架，深入 SG 接管焊缝处进行扫查[4]。本文将在此基础上，设计该机构的送入装置，对其进行力学性能分析，并完成其控制系统的设计。

1.2. 技术难点

图 3(a)是正对 SG 水室人孔法兰外表面的栅格板夹层，表面过度粗糙是送入装置系統定位于栅格板上

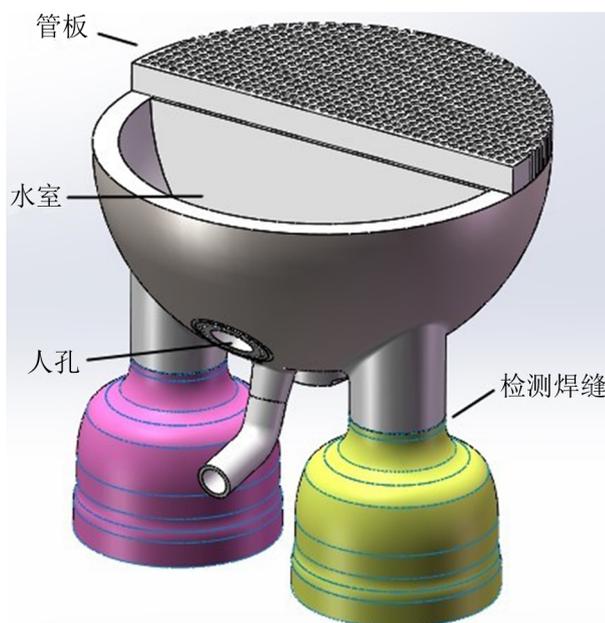


Figure 1. Weld inspection

图 1. 检测焊缝

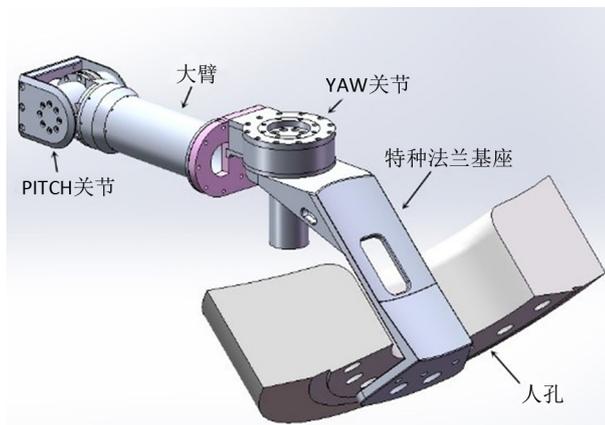


Figure 2. Auxiliary arm of inspection robot

图 2. 检测机器人辅助臂

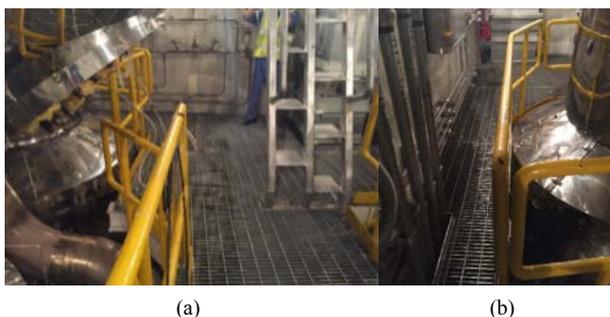


Figure 3. Work site

图 3. 现场勘测图

的最大阻碍之一。图 3(b) 是 SG 水室周围的过道，其宽度仅有约 0.3 m，对装置的运输造成了较大的制约。

考虑到现场辐射，焊缝检测需要在较短的时间内进行，这就要求安装、扫查、拆除的整体流程在短时间完成。所以要对检测机器人进行模块化设计，并要求能在短时间内完成装配。

此外，检测机器人加上送入装置的自由度较多，且机器人在执行任务的过程中不能对蒸发器或检测装置造成损伤，这对其控制系统的设计提出了非常高的要求。

2. 送入装置的结构设计

结合设计需求和现场环境，设计的送入装置总体方案简图如图 4。底座提供水平方向的自由度；升降机构提供上下升降的自由度，且在上下升降的同时，也会带动上平台的水平平动；摆臂机构提供选装自由度以调整辅助臂相对于人孔的位置。

2.1. 水平移动机构设计

水平移动机构是整个检测机器人的底座，将会直接固定在蒸汽发生器外围的栅格板上，升降机构则通过滑块导轨机构与其相连。经过计算，水平移动机构的重量在 60 kg 左右，且长度较长。考虑到 0.3 m 狭窄的过道，将整个水平移动机构直接运输进现场显然是不现实的。因此底座需要二次模块化。本文将整个水平移动机构划分为 Part 1, Part 2, Part 3 这 3 个部分。每个部分都有可调节高度地脚支撑并调节水平平衡。Part 1 中还含有工装定位槽、滑块组件等用于快速装配。二次模块化之后水平移动机构使用同步带轮进行驱动，主要是利用同步带的可拆性。为了缩短装配时间，为同步带轮也设计了快速装配结构，

并将其驱动装置放置于 Part 1 和 Part 3 上。三个部分最终结构设计分别如图 5、图 6、图 7 所示。

2.2. 升降机构与摆臂机构设计

升降机构提供了 Z 轴向自由度的移动和 X 轴向自由度的平动，两者结合控制着整个 UR10 机械臂和超声探头架的空间位置。摆臂机构用来配合辅助臂的特种法兰基座，使 UR10 机械臂能顺利进入 SG 水室。为了简化整个安装流程，减少操作人员滞留于核站工作间现场的时间，将这两部分进行合并为 Part 4，三维模型如图 8 所示。

通过升降平台底部的滚珠丝杠，将丝杠螺母的水平运动转化为平台的竖直运动。目前市面上常见垂

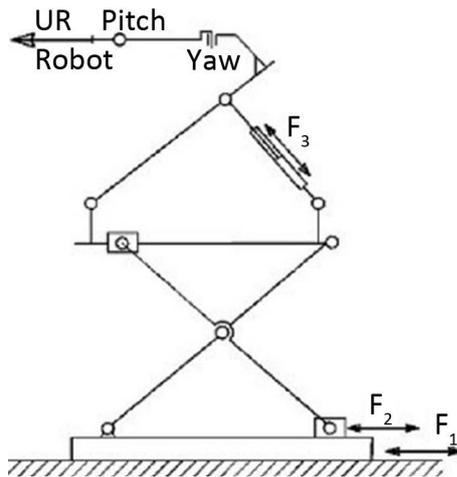


Figure 4. Work site

图 4. 现场勘测图

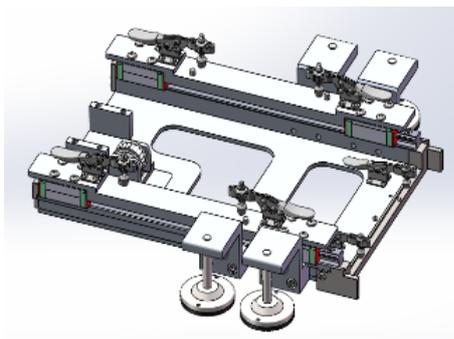


Figure 5. Part 1

图 5. Part 1

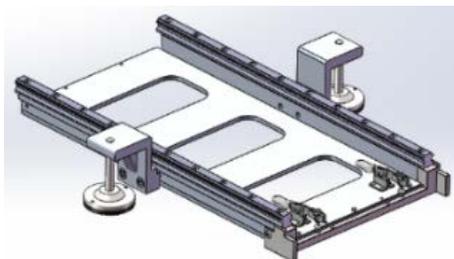


Figure 6. Part 2

图 6. Part 2

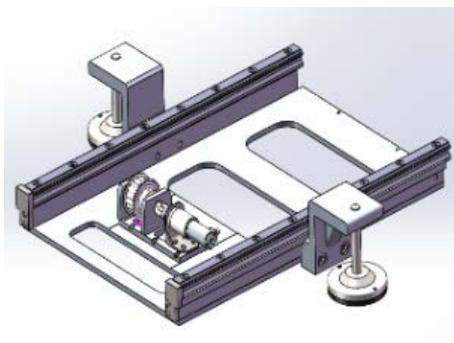


Figure 7. Part 3

图 7. Part 3



Figure 8. Part 4

图 8. Part 4

直运动装置运动时，升降平台上下底板始终处于同一竖直平面，与现场工况相矛盾。通过对传统升降平台的结构进行改进，使得上平板在上升的同时，也会向前平动，避免与现场工况发生干涉。使用线性致动器取代传统的电机和谐波或 RV 减速器组合驱动，是为了避免与蒸汽发生器外壁的干涉情况，并且好处是使得摆臂机构更加平衡，有利于倾覆力矩的克服。

3. 快速装配设计

由于焊缝检测过程需要在短时间内完成，不仅需要对整体机构进行模块化设计，还需要各个模块之间能快速连接以缩短装配时间。

受限于现场条件问题，本文将整个结构分为了如上所述的 Part 1~Part 4，并将之前设计的机器人辅助臂作为 Part 5。现场安装时，需要将各个模块进行快速连接以完成快速装配。接下来将介绍各个部分之间的连接方式。

在装配过程中，一开始对于 Part 1 相对于人孔中心平面的位置校准十分困难，因此需要设计一个定位工装。配合人孔位置和 Part 1 上的定位卡口，通过工装上的升降装置，做到对 Part 1 迅速的安装和固定。

Part 1 将会固定于现场的栅格板上，通过可调节高度地脚螺栓进行连接。当通过定位工装确定好人孔中心平面与水平移动机构的中间平面的位置以后，Part 2 将会通过快接装置与 Part 1 相连。

首先 Part 2 将通过一组定位销迅速与 Part 1 确定好相对位置，接着通过水平式压紧器给 Part 2 进行压紧，实现与 Part 1 的快速连接。如图 9 所示。

Part 2 和 Part 3 之间与上述 Part 1 和 Part 2 的连接有异曲同工之处，都是利用定位销和水平式压紧器

进行快速连接。

Part 4 要固定于 Part 1 之上，因为在运输过程中，为了减少滑块安装的复杂性，Part 1 上的导轨滑块将和 Part 1 的导轨配合在一起，而滑块又需要和 Part 4 的底面平台相固定，因此滑块之上需要进行一个中间件的设计，用来与 Part 4 的底面平台快速连接。

其具体的设计三维图如图 10 所示。

所采用的快接方式和前面所讲的方式一样，只不过 Part 4 的底面平台将与上面设计的快接板相固定。快接板的机构为卡口式，配合底面平台可以先大致定位，再通过定位销精确定位。

另外 Part 4 作为运动模块，需要被同步带轮所驱动，因此底面平台与同步带之间也要形成快接装置。主要根据同步带的齿形进行设计，可以使同步带完美契合到夹板槽内部，在通过固定于底面平台底部的水平压紧器将其定位。

Part 5 与 Part 4 的相连这通过螺栓连接。摆臂的形状是根据特种法兰基座所设计的，类似于一个卡槽，将特种法兰基座大致定位于其中，在通过螺栓连接即可。

Part 5 与 UR10 利用 UR10 自身的孔，进行相应的螺纹连接即可。

最终的整机三维模型图如图 11 所示。

4. 送入装置控制系统的设计

4.1. 硬件设计

图 12 为控制系统的硬件结构总图。图 13 是执行模块的连接示意图。由于 UR10 机器人内置关节控制模块，通过以太网与其控制盒进行通讯[4]，即可实现上层运动控制，在硬件上不需要进行其他处理。以

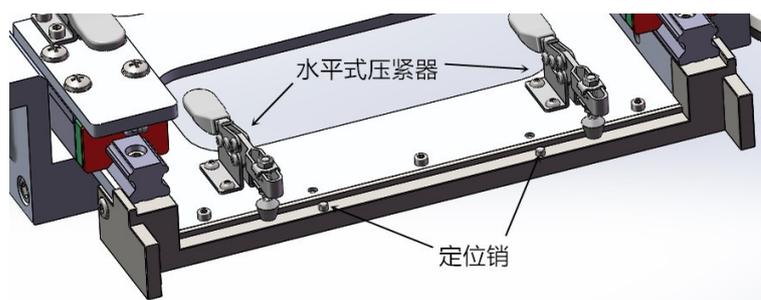


Figure 9. Quickly assembling device for Part 1 & Part 2

图 9. Part 1 与 Part 2 快接

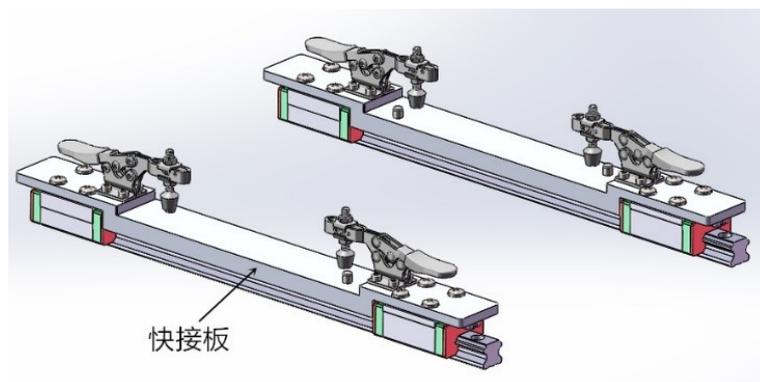


Figure 10. Quickly assembling device

图 10. 快接板

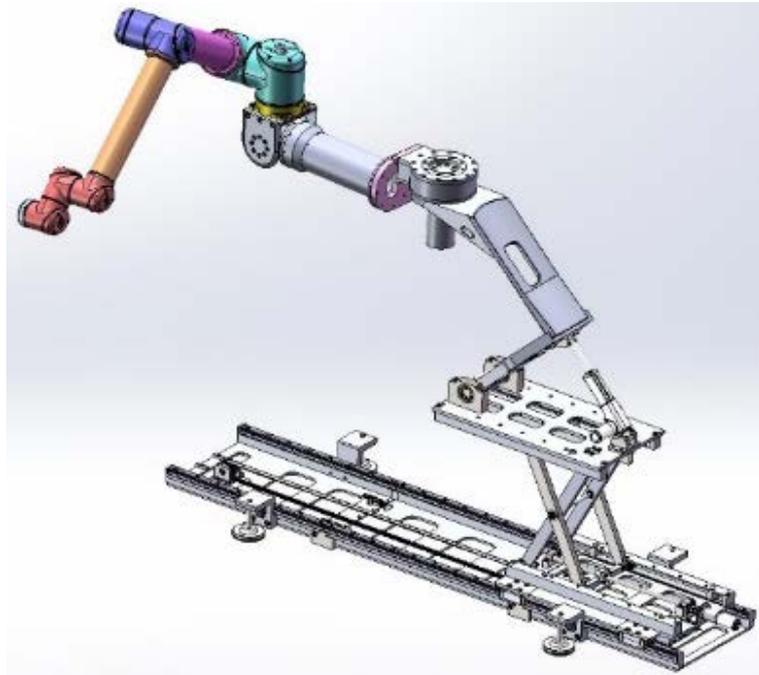


Figure 11. Overall model
图 11. 整机三维模型

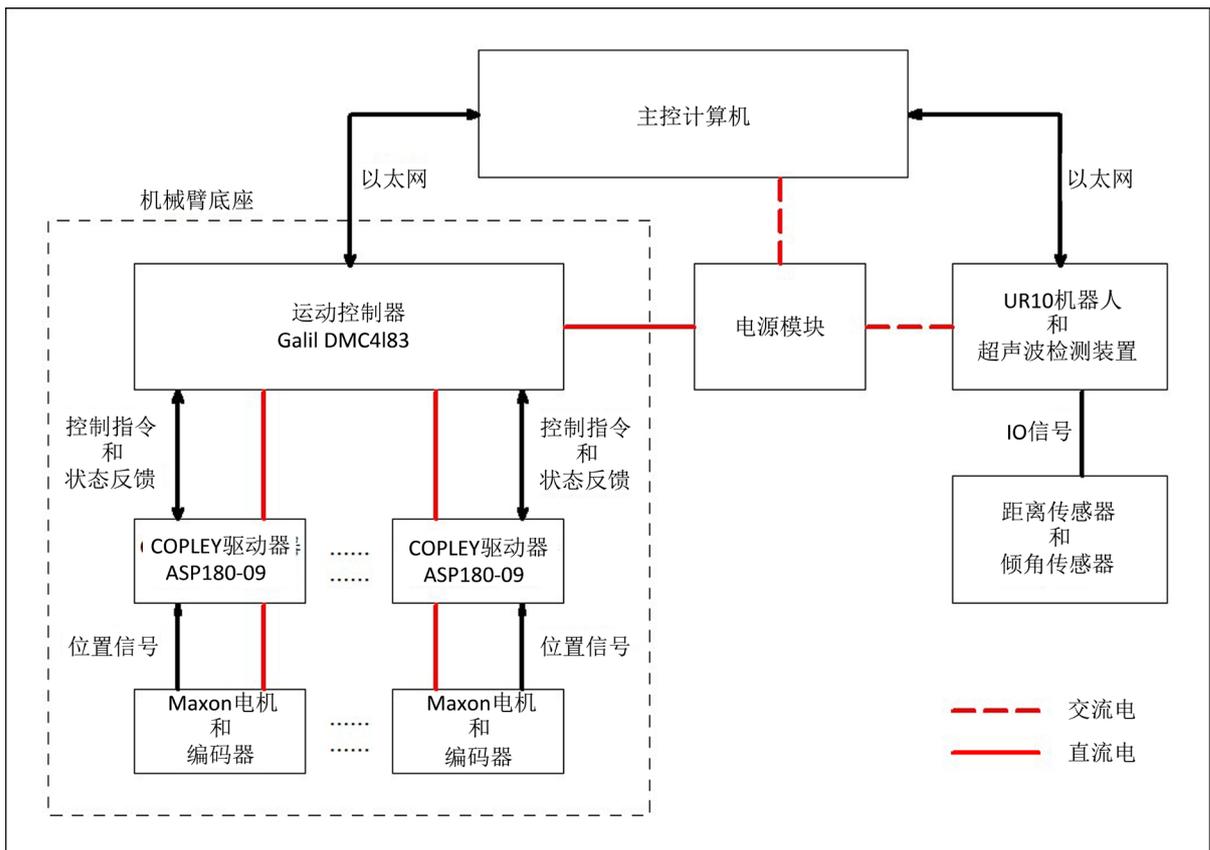


Figure 12. Hardware structure
图 12. 检测机器人的硬件结构

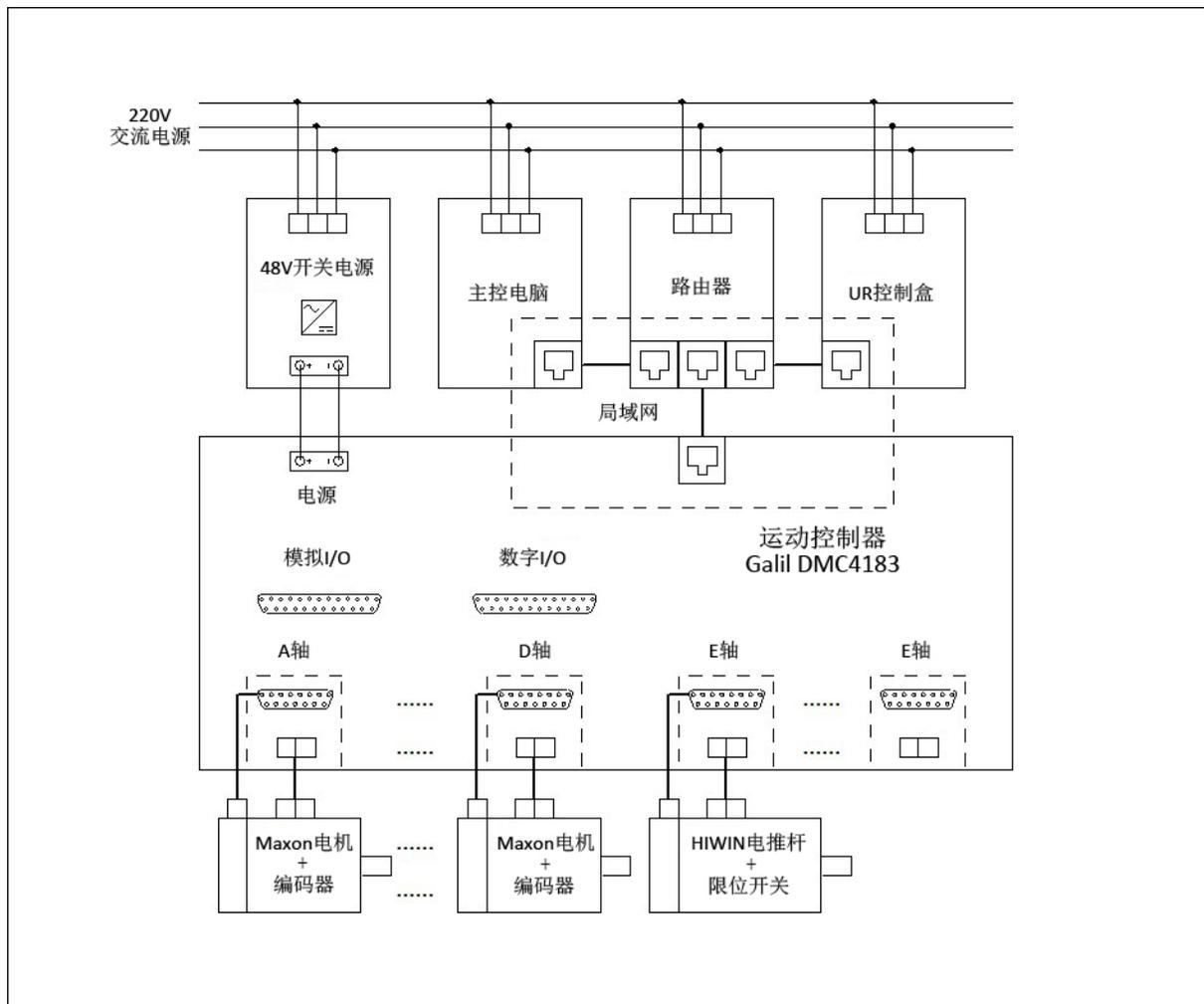


Figure 13. Executive module connection diagram

图 13. 执行模块连接示意图

下将对底座的控制进行详细讨论。

项目中采用的是来自 Galil 的多轴运动控制器 DMC41x3，并内置电机驱动器 AMP430x0。运动控制器向驱动器发送电机速度控制指令，驱动器根据指令调节电机两端的电压方向和幅值，从而控制电机速度；与电机相连的编码器信号反馈给运动控制器形成闭环的控制回路。

底座中有 4 个关节采用了 MAXON 的直流有刷电机作为驱动，为了实现关节位置的闭环控制，还需要结合对应的电机编码器。

线性致动器选择 HIWIN 线性致动器中的 LAM2-2 型号[5]，其控制较为简单。通过施加 24 伏电压进行电机的驱动，电压的正反决定运动方向；当运动到任意一个极限位置时触发相应的限位开关从而停止电机，同时通过对应的引脚输出电平信号。

4.2. 软件设计

本次研究中采用的 Galil DMC 41x3 运动控制器，支持 USB，串口和以太网连接。与上位机建立物理连接之后，可根据应用场景选择官方软件进行操作或基于官方跨平台的函数库进行二次开发。利用 Galil 官方提供的 GDK (Galil Design Kit)验证控制方式和控制逻辑无误后，需要基于 Galil 提供的函数库进行二

次开发将电机的控制整合到主控软件中。

图 14 是通过调用函数向 DMC4183 发送指令的基本流程, 根据实际应用发送不同的指令即可完成对电机的控制。项目中主要对各个轴的位置进行独立控制, 控制逻辑和对应的指令如下:

- 1) 指定一个或多个轴的目标位置(PA 指令)。
- 2) 指令各个轴的加速度和减速度(AC 和 DC 指令)。
- 3) 指定各个轴的目标速度(SP 指令)。
- 4) 驱动器使能(SH 指令)
- 5) 根据当前设置开始运动(BG 指令)。正常情况下, 关节转动到指定位置之后自动停止。
- 6) 运动期间, 可以查询当前各个轴的位置和速度等信息(TP 和 TV 指令)。

以上与位置, 速度和加速度相关的指令中都是以编码器信号个数而不是关节角度作为单位, 需要在上位机中自行完成编码器信号个数和旋转角度之间的转换。

将 Maxon 电机, 编码器和 DMC4183 控制器进行连接, 并通过开关电源供电。通过计算机发送运动指令可以控制电机的位置, 方向和转速。对底座电机进行简单测试, 得到目标位置和实际位置分别是 100000 和 99991 个脉冲信号, 定位误差小于 0.01%。

5. 仿真

将机器人的 3D 模型导入 V-REP 进行模拟仿真。为了加快模拟速度, 对机械结构进行了合理的简化。

图 15 为模拟器界面。

以下将对检测过程进行仿真。其中 UR10 机器人的模拟器可以从 Universal Robot 的官方网站下载,

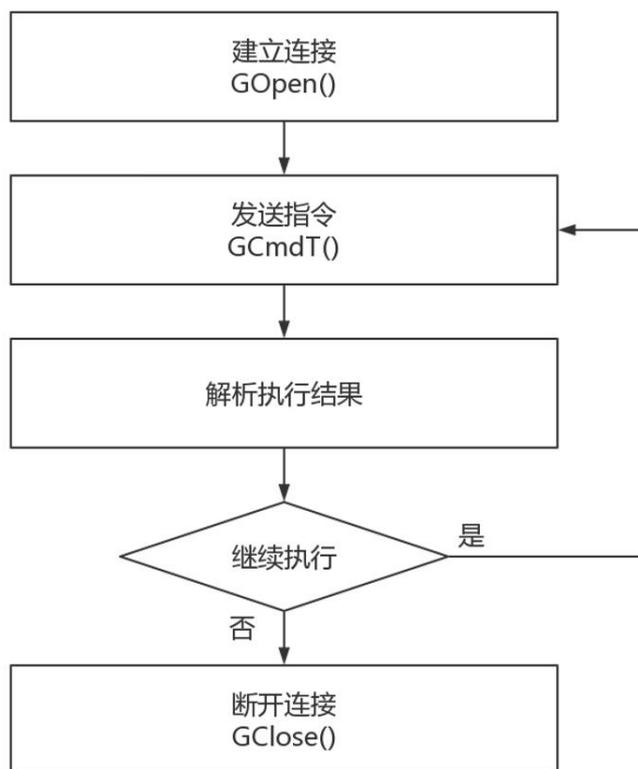


Figure 14. Galil C function library's operational flowchart
图 14. Galil C 函数库的基本操作流程

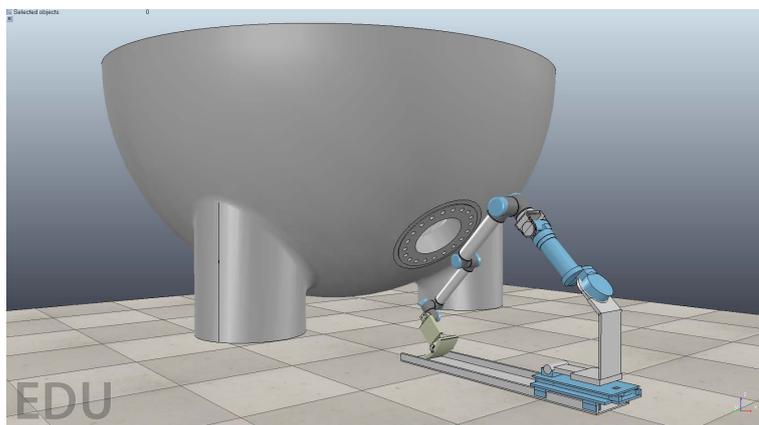


Figure 15. Simulator of the evaporator and the weld-inspection robot
图 15. 检测系统和蒸发器的模拟器

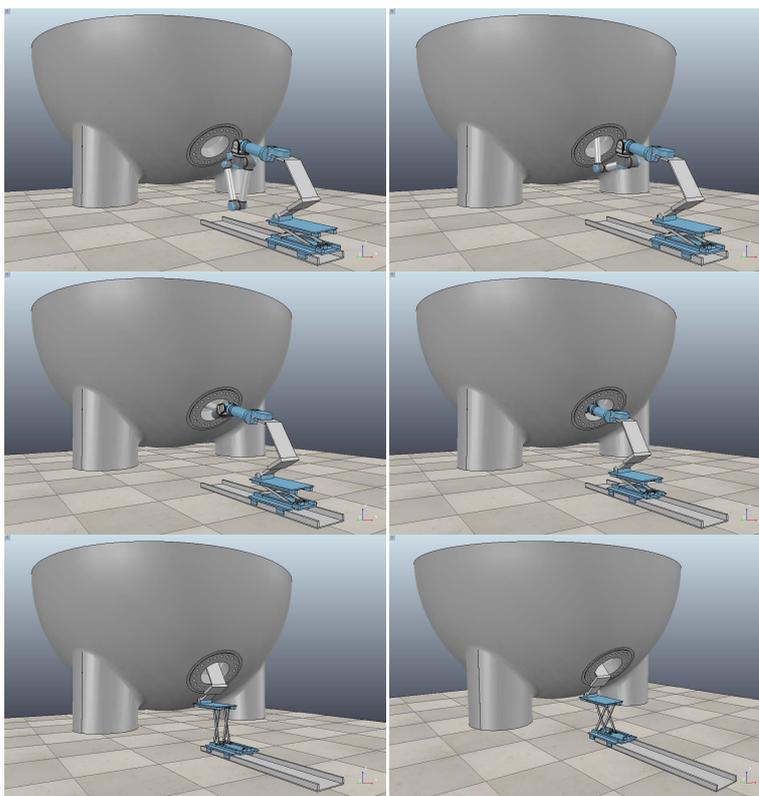


Figure 16. Simulation process of transporting the robot
图 16. 将 UR 检测机械臂送入蒸发器的模拟

而底座的控制则由主控软件内部自行模拟。通过调节关节位置结合模拟器碰撞检测，规划出一条安装路径，将 UR10 通过人孔送入蒸发器。大致过程见图 16。

6. 结语

经过三维软件的建模与仿真，确定该送入装置可以在不与蒸汽发生器产生碰撞的情况下将焊缝检测机器人从人孔中送入。将送入装置的控制系统集成至主控软件之后，主控软件已经实现了对底座和 UR 机械臂的控制。下一阶段，会将整个系统应用在 1:1 的蒸发器模型中，确认方案的可行性之后正式用于现场检测。

参考文献

- [1] 刘亮, 周涛, 宋明强. AP1000 与大亚湾核电站蒸汽发生器的对比和分析[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 417-419.
- [2] 朱性利, 周礼峰, 罗玉文, 陈姝. AP1000 蒸汽发生器接管焊缝内部超声检测系统[J]. 机械工程师, 2016(7): 136-138.
- [3] 荣健, 高雪官. AP1000 蒸汽发生器接管焊缝无损检测机器人的设计、仿真及优化[J]. 机械工程与技术, 2018, 7(1): 18-28.
- [4] 叶志坚. 可重构嵌入式以太网分布式多轴运动控制研究[D]: [硕士学位论文]. 湖北: 湖北工业大学, 2011: 7-14.
- [5] HIWIN Co. 线性致动器[EB/OL]. <http://www.hiwinmikro.tw/DownloadCenter/index.aspx>, 2017-04-24/2017-12-12.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: met@hanspub.org