

# 基于高铁装配的机器人关键技术研究

王熙杰<sup>[1,2]</sup>

- (1. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412006;  
2. 湖南省高铁运行安全保障工程技术研究中心, 湖南 株洲 412006)

**摘要** 工业机器人因具有柔性化、自动化水平高、定位精度高、承载质量大等优点, 成为我国未来智能制造转型升级的重点研究方向, 当前已广泛应用于以汽车制造为代表的自动化生产现场, 大大提高了产品的生产质量、效率和可靠性。然而高铁部件产品具有小批量、多样化、工位不固定等生产特点, 如何在高铁生产装配过程中充分发挥机器人技术优势是重点突破方向。研究中心突破了机器人柔性控制、机器人高精度自动化姿态测量等关键技术, 形成了面向高铁装配测试的机器人系列产品并在各型号平台应用, 有效解决了高铁生产装配环节中面临的大质量设备安装柔性差精度低、装配测试自动化水平及效率低等难题。

**关键词** 高铁装配 精度测量 机器人 装配系统

**中图分类号:** TP242; U238

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-0745(2021)10-0001-06

## 1 前言

高铁装配与检测是将分系统组合装配成完整高铁并进行性能检测的过程, 是高铁产品功能和性能实现的最终阶段和关键环节, 装配与检测的质量直接影响高铁最终研制质量和服役性能。高铁产品通常不是批量生产, 总体装配是典型的离散制造过程, 当前大多以手工装配和检测为主, 人工操作的方式柔性程度高, 比较适合于高铁小量研制的特点。

近年来, 随着国家对新型高铁研制模式逐渐发生转变, 主要体现在如下几个方面: (1) 产品数量越来越多, 研究任务不断加重, 研制周期紧张; (2) 研制技术指标提升对装配检测水平要求不断提高; (3) 高铁本体构型多样化使得总装工况复杂化。传统装配及检测手段存在着装配和检测自动化程度不高、缺乏量化标准等问题, 已严重影响了高铁研制质量及生产效率。

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置, 通常应用于批量产品的生产流水线, 具有柔性化、自动化水平高、定位精度高、承载质量大等特点, 已广泛应用于以汽车制造为代表的自动化生产现场。然而高铁部件产品通常不成批量, 生产装配检测工况也不固定, 难以做到全自动化生产, 如何在该生产条件下充分发挥工业机器人优势, 解决大质量设备安装难度大、检测自动化水平及效率低等难题, 提高装配过程的安全可靠性及效率, 是高铁装配检测过程中进行机器人技术应用时需要重点突破的研究方向。

## 2 机器人装配系统

机器人通常应用于批量产品的生产流水线, 面对固定的工况, 不断重复预先示教好的动作, 生产效率高。对于高铁的装配作业, 机器人可以实现大质量部件的稳定保持

与精确调整, 但由于装配工作不具有重复性, 传统意义上的示教重复型机器人不再适用。

人与机器人协作的作业方式可以将机器人载重量大、运行稳定精度高的特点, 与人观察、操作的灵活性相结合, 适用于高铁复杂多变的装配工况。但已有协作型机器人主要面向电子行业的零部件组装, 另外需考虑人机协作的安全性, 承载能力均较小。对市场现有协作机器人承载能力的统计见表1。

表1 市场现有协作机器人承载能力统计表

序号	制作商	型号	承载能力(kg)
1	FANUC	CR-35iA	35
2	Rethink Robotics	Sawyer	19
3	KUKA	LBR iiwa	14
4	Universal Robots	UR10	10
5	新松	柔性多关节机器人	5
6	Bosch	APAS	4
7	ABB	IRB14000	0.5

由表1可见, 在高铁总装阶段, 数十至数百公斤部件的安装工作对机器人有较大的需求, 已有的协作机器人产品无法满足需求, 因此研制了“重载”协作机器人装配系统。

### 2.1 系统组成

机器人装配系统组成见图1, 机器人采用市场现有成熟的工业机器人, 可实现空间六自由度的位姿调整。末端执行器通过六维力传感器安装在机器人末端, 用于工件的抓取。六维力传感器用于感知作用在机器人末端的力/力矩信息, 反馈给机器人柔顺控制器。机器人本体及其控制器安装在移动平台上, 可随移动平台移动。机器人柔顺控制器用于实时采集机器人及六维力传感器的数据, 并根据所获

★基金项目: 2020年度湖南省教育厅科学研究项目, 项目编号: 20C1224。

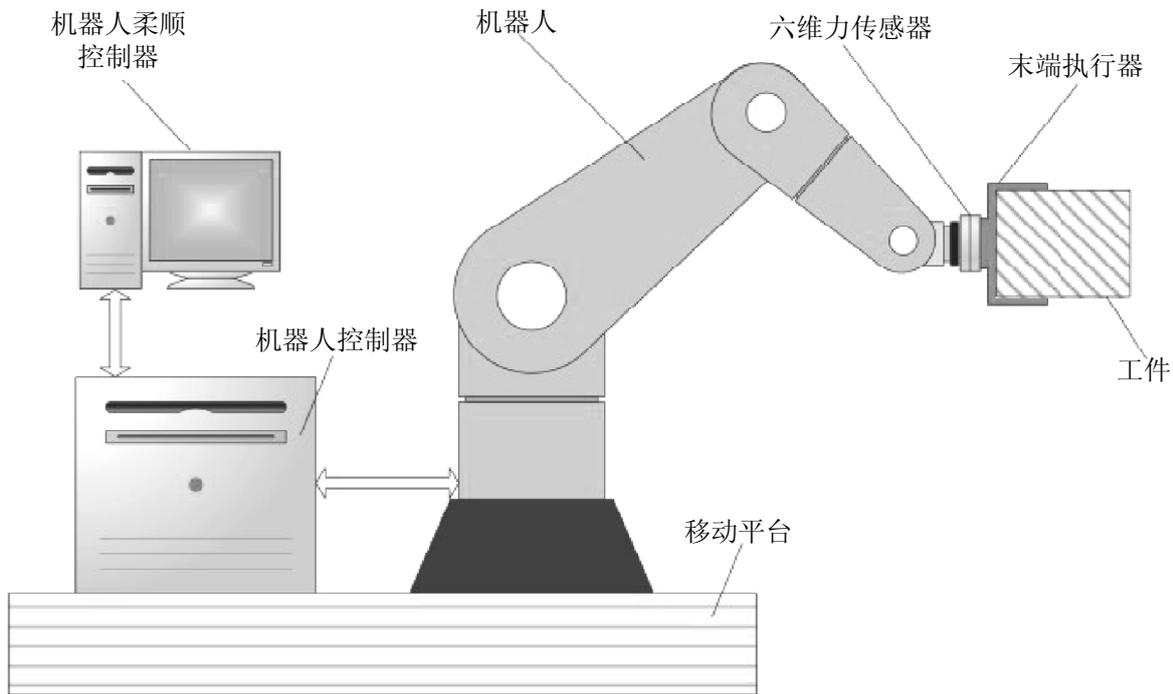


图1 机器人装配系统组成示意图

得的信息，实时向机器人发送控制指令，实现机器人的人及协作及柔顺装配控制。

## 2.2 受力感知

图1中六维力传感器安装在机器人末端与负载之间，机器人腕部六维力传感器测得的力与力矩数据由三部分造成，即：（1）传感器自身系统误差；（2）负载重力作用；（3）负载所受外部接触力<sup>[1]</sup>。若要得到负载所受外部接触力，需要消除传感器系统误差、负载重力作用两方面的影响。

将六维力传感器直接测得的三个力分量记为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，三个力矩分量记为  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ，分量测量的系统误差记为  $F_{x0}$ 、 $F_{y0}$ 、 $F_{z0}$ 、 $M_{x0}$ 、 $M_{y0}$ 、 $M_{z0}$ ，负载重力在各分量的影响分别记为  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ 、 $M_{gx}$ 、 $M_{gy}$ 、 $M_{gz}$ ，可以得到：

外部力在传感器3个坐标轴上的分量为：

$$\begin{cases} F_{ex} = F_x - F_{x0} - G_x \\ F_{ey} = F_y - F_{y0} - G_y \\ F_{ez} = F_z - F_{z0} - G_z \end{cases} \quad (1)$$

外部力矩在传感器3个坐标轴上的分量为：

$$\begin{cases} M_{ex} = M_x - M_{x0} - M_{gx} \\ M_{ey} = M_y - M_{y0} - M_{gy} \\ M_{ez} = M_z - M_{z0} - M_{gz} \end{cases} \quad (2)$$

故得到了负载所受的外部作用力信息，可据此实现对机器人的力反馈控制。

## 2.3 柔顺控制

使用机器人抓持被安装对象，并将其准确运送至装配位置，可实现大型部件的稳定、可靠装配。由于高铁装配工况不具有重复性，无法通过常规的示教再现方式保证装配精度，需要机器人具有顺应外界边界条件的柔性，通过装配边界约束结合力反馈控制将部件安装到位<sup>[2]</sup>。

因此针对高铁大部件装配需求，给出一套基于力/位控制的机器人柔顺装配方法。针对自由空间力控制、销钉导向等典型应用需求给出了力/位控制策略。其中，自由空间力控制是对机器人空间6个自由度的运动均采用力控制。在这种控制方式下，被操作工件完全按照空间受力情况进行位姿调整，按照空间3个方向的力信息进行位置调整，按照空间3个方向的力矩信息进行姿态调整。

自由空间力控制可用于大型部件的“人机协作”操作，如图2所示。在这种情况下，机器人承担了工件的重力，操作者只需施加较小的力即可对大重量工件进行空间位姿的调整操作，实现“人机协作”。

自由空间力控制的另一个典型应用工况为紧固件柔性安装，如图3所示。当工件基本达到安装位置后，此时安装面没有完全贴合，工件安装孔也没有与主体结构螺纹孔完全对准，若不采用力反馈控制而直接安装紧固件，在紧固件旋入拧紧过程中，会对工件及结构板产生额外牵拉力，存在损坏工件及结构板的隐患。此时可采用力反馈控制，工件随紧固件的选入拧紧可自适应调整到位。

此外，还针对销钉导向、分离界面力卸载等环节的力反馈控制研究了相应的控制策略<sup>[3]</sup>。

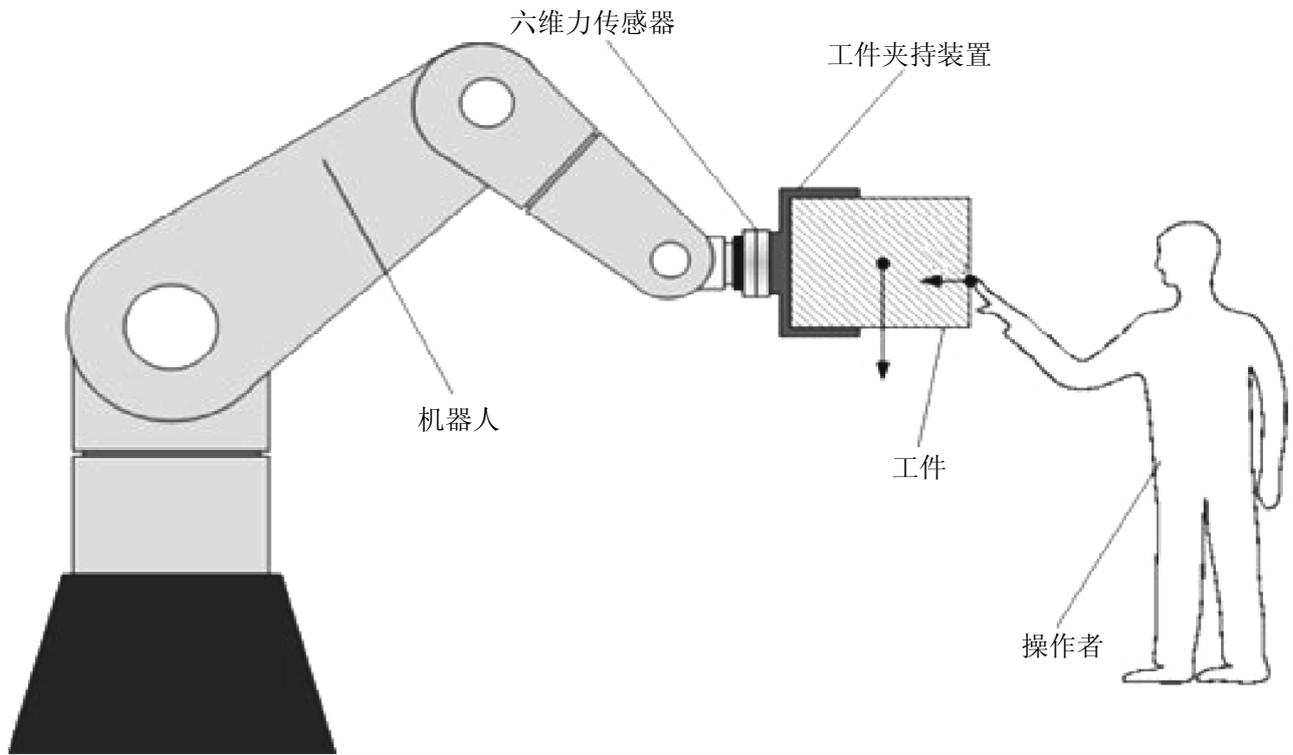


图2 机器人人机协作示意图

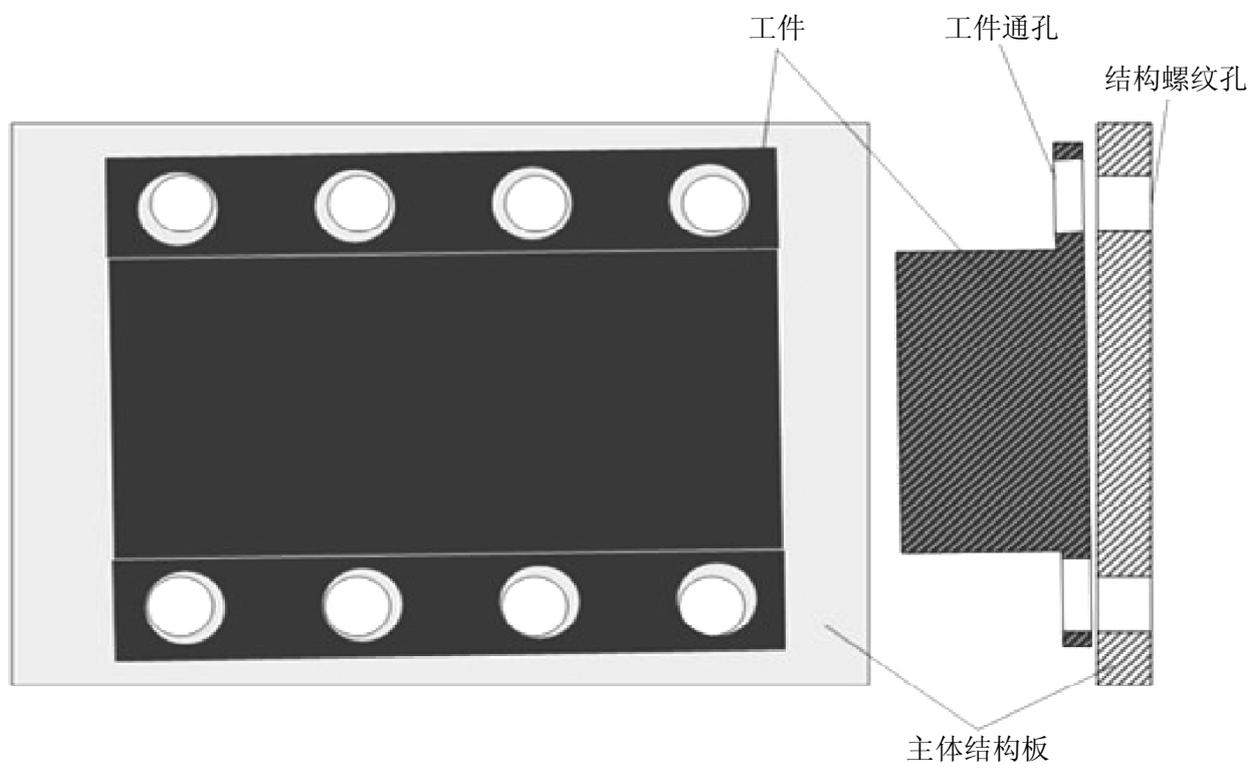


图3 紧固件柔性安装示意图

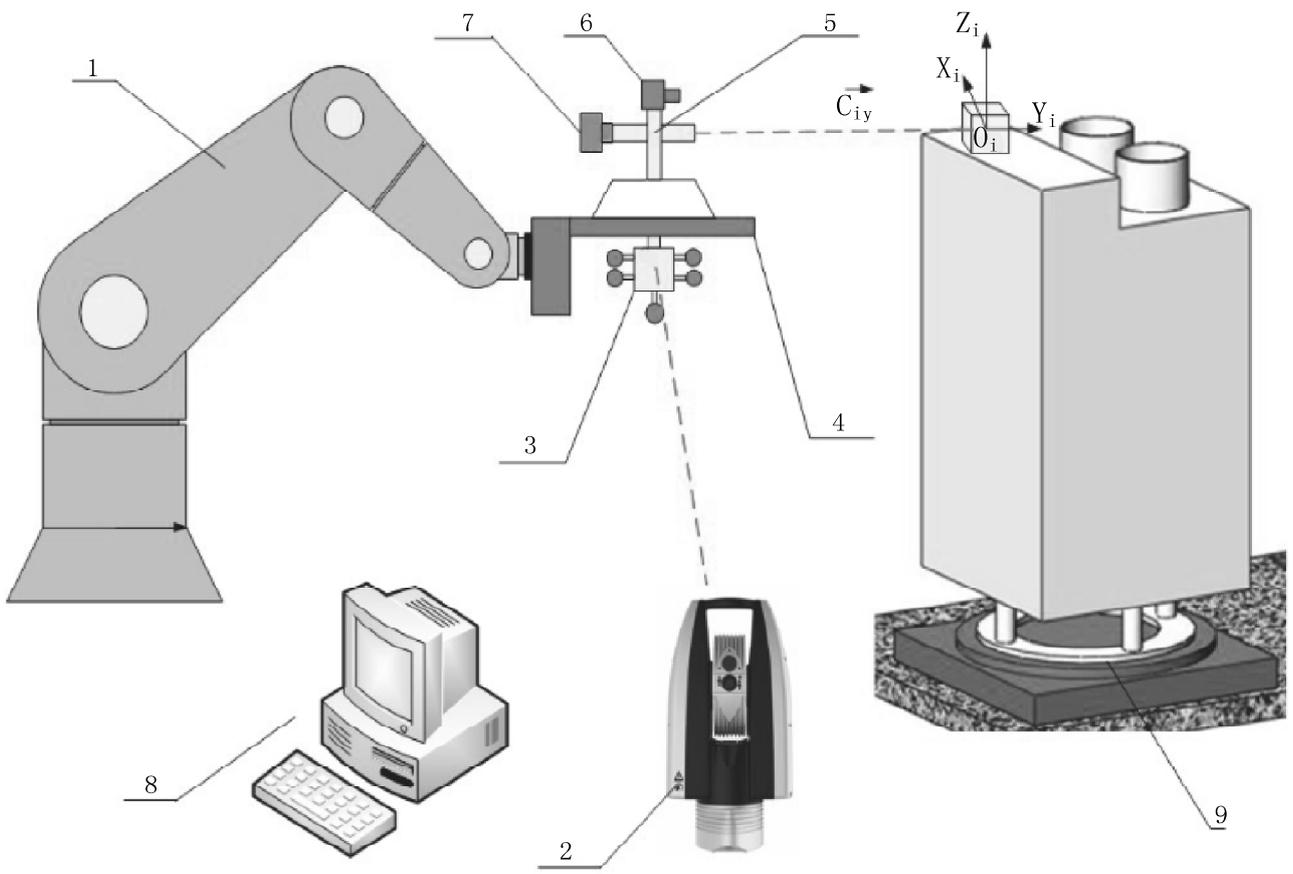


图4 测量系统示意图

(注: 1- 机器人、2- 激光跟踪仪、3- 激光跟踪靶标 (T-mac)、4- 机器人末端工装、5- 经纬仪、6- 视觉搜索相机、7- 辅助精对准相机、8- 工控机、9- 精密转台。)

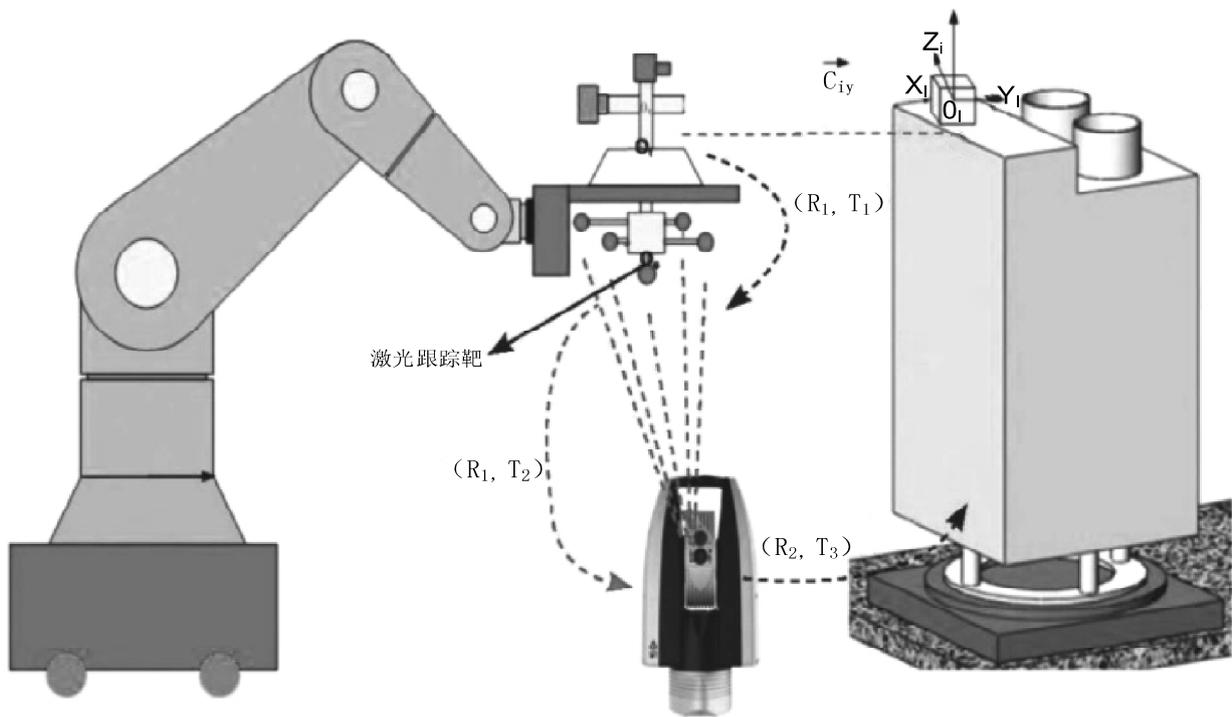


图5 基于多目标跟踪的精密引导及全局精度控制示意图

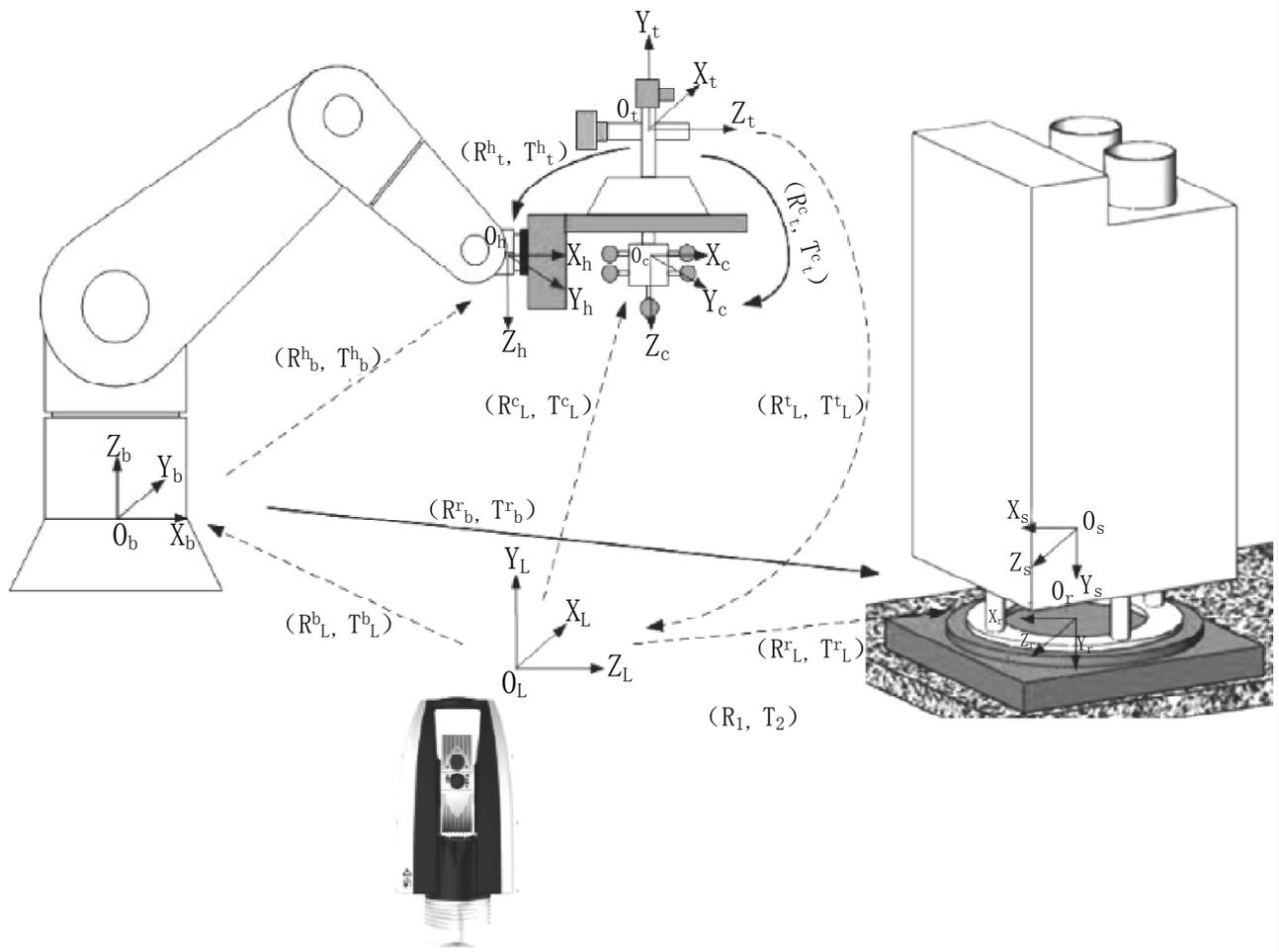


图6 基于模型驱动的高铁设备自动测量示意图

### 3 机器人自动化测量系统

高铁通常需要安装大量传感器、天线为代表的设备，这些设备在高铁上都有安装精度要求。装配过程中，需要对安装在高铁上各种设备进行精确测量并通过装调及复测以满足功能设计要求。

在高铁时间紧、任务重的研制条件下，亟待研究提高检测过程自动化水平的新方法，以缩短测量周期及减少人员占用率，有效满足高铁研制需求。

机器人具有灵活度高、自由度高、成本低的特点，机器人在实现自动化测量方面有巨大优势。为了在保证高测角精度基础上，提高测量系统的自动化水平、灵活程度及柔性化水平，研制一套基于机器人与经纬仪相结合的高铁设备自动化测量系统，提高了现场测量效率并减小人员占用率，有效满足了高铁研制需求。

#### 3.1 系统组成

机器人自动化测量系统及坐标系分布如图4所示，该系统将实现机器人携带经纬仪对高铁AIT过程中批量设备装配精度的自动测量，机器人可以借助AGV车实现对原位高铁所有设备的全向检测<sup>[4]</sup>。为了实现高精度测量，该系统利用激光跟踪仪作为全局引导及精度控制装置，首先需要

对跟踪仪坐标系与机器人、高铁坐标系进行标定统一；其次通过标定建立机器人末端经纬仪自身坐标系与机器人工具坐标系、激光跟踪靶标的相对方位关系；根据被测设备在自身坐标系下的先验信息，借助激光跟踪仪的实时跟踪、定位及引导技术，实现经纬仪对被测设备的自动化精确准直；最后将经纬仪在各位置的准直信息统一到跟踪仪坐标系下，实现高铁设备姿态信息的自动化测量。

#### 3.2 基于多目标跟踪的精密引导及全局精度控制

由于机器人绝对定位精度不高，单纯利用机器人提供的关节信息进行全局统一的精度无法满足测量精度要求。在数据传递过程中如何实现准直结果的高精度全局控制及统一是决定该系统最终检测精度的关键技术。

为此，研究并设计一种全局激光跟踪靶并固定在机器人末端，如图5所示。机器人末端工具移动过程中，激光跟踪仪可以实时跟踪并高精度确定机器人末端跟踪靶的位姿，再结合标定环节精确建立的其与机器人末端经纬仪的相对位姿关系，便可实现激光跟踪仪对机器人末端经纬仪的全局精密定位及引导，并可将经纬仪在不同站位的准直结果进行全局精密统一，有效提高系统的高精度自主绝对定位及全局精度控制能力。

(下转第28页)

界面上翻和下翻的后台服务端分页的功能。

### 7.3 历史空气质量数据可视化展示

数据统计分析模块采用多样化的图表展示,帮助用户直观了解过去以及现在空气质量指数以及PM2.5的变化情况及趋势<sup>[4]</sup>。

根据本系统的数据获取的内容,数据统计分析模块应包括对历年来获取的数据整体统计(可使用PM2.5或AQI指数),并通过对比多年来的数据均值,以直观查看各年度数据。

### 7.4 数据分析结论

根据均值对比图统计,可知:2014年到2017年底,石嘴山市的PM2.5浓度一直较高。结合相关资料调查,这是由于石嘴山市在2018年前推动大气污染治理还未取得较好效果,境内以煤炭为主的生产加工企业较多。从2018年开始PM2.5浓度明显下降,说明政府以及民众的重视度提高,采取很大力度的措施得到显著的效果。但是2020年PM2.5又有了上升的趋势,是由于静稳天气的影响使得一月份PM2.5有升高的趋势,从而影响了整年度的PM2.5值。

从2021年变化走势图可知:2021年PM2.5浓度总体有所改善,仅有个别几天有明显上升的趋势。以3月15日为例,石嘴山市出现大范围沙尘暴天气,严重是影响空气质量。

结论:对比2013年到2021年3月份空气质量指数数据显示,以AQI指数为衡量标准,石嘴山市2018年以前的空气质量大于50的天气比较密集也比较多,从2018年以后

污染情况逐渐改善。

## 8 结语

随着人们对空气污染问题的重视度越来越高,空气质量在逐渐改善,基于该系统的实现,相信在以后的发展中,空气监测系统会越来越完善,会通过历史数据作出分析、预测,为监测人员提供依据。

总体而言,系统功能完备、界面交互性强,具有非常好的社会价值和使用意义。通过Bootstrap、CSS使界面更加美观,并减少开发所需时间,提高开发效率。随着人们对空气污染问题的重视度越来越高,空气质量在逐渐改善,基于该系统的实现,相信在以后的发展中,空气监测系统会越来越完善,会通过历史数据作出分析、预测,为监测人员提供依据。

## 参考文献:

- [1] 刘姝童,刘诗娇,夏鸣,梁钰薇,姚婷玮.天津机场运行对区域空气质量影响评估研究[J].科技风,2021(09):141-144.
- [2] 司桂静,崔向前,邹坤,戚昭岳.基于Python和Django实现城域网流量统计监控系统[J].山东通信技术,2020,40(01):26-27.
- [3] 白昌盛.基于Django的Python Web开发[J].信息与电脑(理论版),2019,31(24):37-40.
- [4] 李锦华,孙萌,陈缘,吕海波.2014-2020年渭南市雾霾发展状况分析[J].科学咨询(科技·管理),2021(03):70-71.

(上接第5页)

### 3.3 基于模型驱动的高铁设备自动测量

在完成系统标定后,通过现场测量可建立被测高铁部件与机器人坐标系之间方位关系,再结合高铁被测目标的三维模型或先验测量数据信息,可驱动机器人携带经纬仪到达目标位置,实现对被测目标的粗准直,再通过视觉引导准直技术实现被测目标的精确准直,如图6所示。通过对每个被测目标准直结果的坐标系统一,可实现不同被测目标坐标系间的相对姿态确定,从而实现最终测量。

该技术包含两个核心环节,一个是利用已知的被测目标在高铁坐标系下的先验位置信息,结合系统的标定结果,推算出经纬仪要移动到的目标位置及对应的水平俯仰角,从而实现对被测目标的准直;第二环节是经纬仪完成对被测目标的精确准直后,需要结合各系统间的标定结果将经纬仪在每个位置自身坐标系下的结果统一到全局坐标系下,而且尽可能减少坐标系传递误差,以保证最终高精度测量结果。

## 4 系统应用

相关技术先后应用于我国CRH5、CRH2-380、CRH380C(L)、CRH380D(L)、CR400AF等高铁型号中,完成了大重量部件装配,为新一代时速600km/h重要项目建设提供了重要支持,并由于技术改进,节约大量高铁研制经费,在支持国家战略建设的同时,也带来了可观的经济效益。机

器人自动测量系统可实现更高姿态测量精度,测量效率得到提高,同时测量人员进一步减少。

## 5 结论与展望

本研究通过自主攻关突破了机器人柔性控制、机器人高精度自动化姿态测量等关键技术,形成了面向高铁装配测试的机器人系列产品并在各型号平台应用,有效解决了高铁生产装配环节中面临的大质量设备安装柔性差精度低、装配测试自动化水平及效率低等难题。

未来将面向新一代高铁研制量增加的需求,重点突破机器人人机共融协作、仿人双臂机器人、自动化测量测试机器人等关键技术,建立起高度自动化、智能化的高铁总装测试生产模式。

## 参考文献:

- [1] 张立建,胡瑞钦,易旺民.基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J].自动化学报,2017,43(03):439-447.
- [2] 喻洋,王耀兵,魏世民,马如奇,唐玲.基于柔顺控制的机器人装配技术[J].北京邮电大学学报,2020,43(04):1-6.
- [3] 汤海洋,纪柱,李论.基于力反馈牵引力导引的机器人辅助装配技术研究[J].制造业自动化,2021,43(03):9-13.
- [4] 黄心汉.微装配机器人:关键技术、发展与应用[J].智能系统学报,2020,15(03):413-424.