

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.03.016

智能塔式起重机关键技术研究^{*}

郑宏远^{1,2}, 卢 宁^{1,2*}, 宋鹏程³, 龚 涛^{1,2}

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100032; 2. 北京市建筑安全监测工程技术研究中心, 北京 100032; 3. 北京起重运输机械设计研究院有限公司, 北京 100007)

摘要:传统的塔式起重机在作业过程中,存在作业效率低、安全隐患多、塔机检修困难等问题,为了解决这些问题,对智能塔式起重机进行了研究,探讨了塔式起重机智能化所需的关键技术。首先,提出了塔式起重机智能化的概念,归纳并分析了塔式起重机在技术方面的发展历程;然后,提出了塔式起重机智能化应具备的关键技术,将同步定位与建图(SLAM)构建技术、实时动态(RTK)定位技术、故障诊断技术和云监管平台应用至智能塔式起重机中;最后,结合所提出的关键技术,提出了智能塔式起重机自动化作业系统的框架,对智能塔式起重机的自动化作业系统进行了定义和模块化处理,分别对系统框架中的各模块子系统进行了具体阐述分析,强调了自动化作业系统主要依托于关键技术。研究结果表明:今后塔式起重机将朝着智能化、自动化的方向发展,其研究核心是塔机的关键技术和自动化作业系统的框架。

关键词:智能塔机;同步定位与建图;地图构建技术;定点吊装技术;实时动态定位技术;故障诊断技术;自动化作业系统;吊钩路径规划
中图分类号:TH213.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4551(2023)03-0435-09

Key technologies of intelligent tower crane

ZHENG Hong-yuan^{1,2}, LU Ning^{1,2}, SONG Peng-chen³, GONG Tao^{1,2}

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Monitoring for Construction Safety, Beijing 100032, China; 3. Beijing Materials Handling Research Institute Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional tower cranes, such as low operating efficiency, hidden dangers in operation safety, and difficulties in tower crane maintenance, the intelligent tower crane was studied, and the key technologies required for the intellectualization of tower cranes were discussed. Firstly, the concept of intelligent tower crane was proposed, and the development history of tower crane in all aspects of technology was summarized and analyzed. Then, the key technologies that should be available for intelligent tower crane were proposed, and simultaneous localization and mapping (SLAM) technology, real time dynamic (RTK) positioning technology, fault diagnosis technology and cloud supervision platform were applied to intelligent tower crane. Finally, combining with the proposed key technologies of intelligent tower crane, the framework of the intelligent tower crane automation operation system was proposed, the intelligent tower crane automation operation system was defined and modularized, at the same time, each module subsystem in the system framework was described and analyzed in detail, emphasizing that the automation operation system mainly depended on the key technologies. The research results show that the tower crane is developing towards intelligence and automation, the core of the research is the key technology of intelligent tower crane and the framework of automatic operation system.

Key words: intelligent tower crane; simultaneous localization and mapping (SLAM); map building technology; fixed point hoisting technology; real time dynamic (RTK) positioning technology; fault diagnosis technology; automatic operation system; hook path planning

收稿日期:2022-07-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775031)

作者简介:郑宏远(1998-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail:brodiewest@163.com

通信联系人:卢宁,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:luning@bucea.edu.cn

0 引 言

塔式起重机是施工过程中不可或缺的工具^[1]。随着工业技术的不断发展,传统的塔机操作模式存在施工成本高、工作效率低、施工安全问题频出等问题^[2],因此,智能化、自动化是塔机行业的技术进步方向之一。

塔机智能化是在能够完成塔式起重机起重任务的基础上,将自动控制、人工智能、通讯、机械等多学科和领域耦合在一起的非线性系统,从而使其能够更加高效地完成作业任务。

目前,国内还没有从整体上系统地对智能塔机进行定义与研究,只有部分关于塔机局部功能的研究。我国塔机智能化的研究工作尚处于起步阶段。

对塔机智能化进行研究,一方面能够提高塔机的控制性能,降低其能耗,提升塔机的作业效率;另一方面,将塔机安全监测和故障诊断等进行智能化改造,能够延长塔机的使用寿命,减少塔机作业安全事故。

笔者认为,塔式起重机智能化应该具备高度智能感知、自动化控制、实时安全监控、设备智能故障诊断、智能决策、智能化信息共享和局域网内塔机互联等能力,并且能够满足用户对其操作舒适度以及工作安全性的要求。为此,笔者将对塔机的相关研究进行归纳分析。

1 国内外研究现状及分析

1.1 精确定位防摇

在塔式起重机吊起重物的过程中,塔机本身的作业动作、负载、风速大小、摩擦力大小等因素都会导致重物来回摆动,而产生的摆动又容易造成安全事故。因此,在塔机吊起重物的作业过程中,精确定位防摇很重要。

在有关塔机定位防摇问题的研究方面,目前主要采取的控制策略有闭环控制策略和开环控制策略。在早期的起重机定位防摇研究中,输入整形技术、滑模控制^[3]等技术应用广泛,此类方法在工程应用中易于实现;但其控制效果有限。

为了解决传统方法控制效果有限的问题,不少学者都进行了探索。针对传统输入整形器鲁棒性能差、控制效果不理想等问题,王晓军等人^[4]提出了一种时变输入整形方法,相较于传统的鲁棒输入整形法,该方法能够更加有效地抑制负载的残留震荡,提高起重机的作业效率。董明晓等人^[5]采用拉格朗日方程,建立

了塔机-小车-货物系统的动力学方程,对货物摆动特性进行了分析,揭示了小车运动过程中货物摆动与塔机起重臂震动的相互作用规律,为后续学者研究塔机防摇做出了贡献。

由于早期工程实践操作中容易出现塔机吊点定位精度不良的问题,黄冀等人^[6]分析了塔机的工作特点和技术缺陷,结合绝对编码器和电子罗盘的特点,开发了一套定点吊自动控制系统。该系统具备自学习功能,因此其定位精度会逐渐提高;但在实际工程应用中,其初期的精度问题仍不易解决。卢宁等人^[7]提出了七段式 S 速度轨迹理论,通过虚拟样机仿真,将塔机运行过程中吊物的摆角限制在 5° 内,有效地提高了小车的定位精度和防摆效果。LI Kun 等人^[8]在考虑了结构振动和有效载荷摆动之间耦合的基础上,提出了一种考虑塔机振动的有效载荷摆动控制方法,测试结果表明,该方法可以有效地降低有效载荷的摆动幅度。王海舰等人^[9]针对由于固定配重所导致的力矩不平衡问题,提出了一种基于自动配重的平衡控制方法;该方法能够满足塔机的实际需要,可以为塔机的防摇摆研究和延长使用寿命提供一定的借鉴。CHEN You-cheng 等人^[10]提出了一种基于 ANFIS 的无人起重机定位防摇算法,在一定绳长范围内提升了其定位精度,在起重机达到目标位置时,负载摆角很小;该方法对智能塔机的定位防摇研究具有很好的借鉴作用。

1.2 安全监控技术

塔机的作业安全问题非常重要。因此,对塔机进行安全监控是保障塔机能够顺利安全完成作业的一项重要措施。同时,塔机的安全监控技术也直接反映了塔机的作业安全性能。

随着无线通讯技术和互联网技术的发展,塔机安全监控领域越来越偏向于采用远程监控诊断。

李超等人^[11]对塔机机身进行了建模,通过采集现场数据,构造了虚拟工作环境,提出了一种 3D 远程虚拟监控技术方案,并通过现场传感信息驱动塔机动作的虚拟监控系统,对塔机的安全性进行了监控。该方法具有较高的可靠性以及易于操作的人机交互性,能够为塔机的安全运行提供一定的保障。张泽根等人^[12]运用 DSP 技术作为监控系统核心,在此基础上提出了一种既有理论建模又有数据分析建模的新建模方式,完成了起重机监控系统的整体设计。与传统的塔机安全监控系统相比,该系统具有远程监管、操作简单、稳定性更高等优势,可以为智能监控系统的后续研发提供经验。崔英等人^[13]将远程监控、专家系统、故障诊断功能结合在了一起,建立了一种数据库系统,通

过建立数据库模型和实体关系模型,对起重机进行了安全监控,完善了起重机的远程监控及故障诊断功能。

在塔机的安全监测中,监测装置所监测的位置选取对安全系统的可靠性也有一定影响。

张充等人^[14,15]提出了一种根据安全监测测点和数值分析的方法,来对运行过程中的塔机安全状态进行监测,通过数值分析和试验验证的方式,得到了安全监测测点的位置。该方法的可靠性较高,可以为后续研究塔机安全监控提供数据支撑,同时也可以减少后续的研发周期。赵挺生提出了一种基于物联网的塔机安全监控系统,即通过对塔机的机械结构进行分析,提出了安全监控的一系列测点和测量数据的危险阈值;该系统可以通过物联网技术对塔机的结构和当时的作业进行实况监控。张会敏等人^[16]建立了塔机顶端轨迹图谱的数据模型和损伤判据,并根据图谱法,对塔机结构损伤状态和损伤程度进行了判断,实现了对塔身状态进行快速检测的目的。该方法可以根据图谱的面积大小,确定不同的塔身损伤状态,具有很强的灵活性,且能够对塔身进行快速、精准的故障诊断,为塔机机械结构方面的检测提供了新思路。WANG Sheng-chun 等人^[17]提出了一种基于 AR 模型的塔机结构损伤检测方法,建立了塔机在正常和损伤状态下的有限元模型,在此基础上得到了在提升动载荷作用下,法向的动态位移和损伤状态;最后建立了 AR 模型,选取了 AR 模型的残差方差作为损伤敏感因子,通过判断残差方差的大小,确定了塔身的损伤程度。在对塔机安全评估过程中,CHEN Wei 等人^[18]提出了一种波动风载荷评估方案,研究表明,在满足强度和静刚度的条件下,对塔机的安全进行评估时仍需考虑波动风载荷的影响。该研究为塔机的安全监控提供了一个新的角度,可以为塔机的安全提供保障。

尽管针对塔式起重机安全方面的研究已经取得了重大进展,但其缺乏基于系统思维的方法。

ZHOU Wei 等人^[19]提出,利用定性和定量的分析方法,从复杂的社会技术系统角度分析塔式起重机的安全性,并确定了 56 个影响塔式起重机安全的因素,通过研究,发现了与塔式起重机安全系统相关的 9 个主要维度和 25 个关键因素,为塔式起重机的安全提供了新的视角,并为塔式起重机安全管理中的新系统思维应用做出了贡献。

1.3 路径规划和塔群调度

目前,在针对塔机吊钩轨迹规划的研究中,蚁群算法^[20]、遗传算法^[21]等已经被广泛运用于起重机的轨迹控制领域。

澳大利亚学者 BCOK M 等人^[22]研制了一种路径跟踪控制器,可以对实验室塔式起重机的实时非线性模型预测路径进行跟踪控制。THOMAS M 等人^[23]提出了一种塔式起重机自动定位任务的轨迹序列生成与静态避障方法,能够自主完成起重机吊钩的轨迹规划。KANESHIGE A 等人^[24]提出了一种包括在线障碍物识别、在线路径规划的系统,能够在相对快速的传输执行过程中,满足需要的在线路径规划。该方法能够实时在线进行路径规划,这对塔机施工面临的复杂地面环境而言,具有重大的现实意义。陈志梅等人^[25]提出了一种基于 RRT 算法的起重机路径规划方法,与传统方法相比,该方法能够更加快速、准确地获得作业路径。CHEN He 等人^[26]考虑塔机工作对外部干扰异常敏感的基础上,提出了一种自动跟踪控制方法,该方法在参数不确定和存在外部干扰的条件下,可以获得令人满意的跟踪控制性能,基于这种方式能够为塔机的路径规划提供良好的保障。李国杰^[27]提出了一种基于经验学习的智能起重机路径规划和自动生成方法,采用该方法能够获得使用价值强的作业路径。DUTTA S 等人^[28]对塔机作业路径进行了规划,并通过三维建模,解决了塔机盲吊过程中的防碰撞问题,以及寻找最优路径的问题。

在所有针对塔群调度的研究中,多数集中在对多起重机协作吊装结构的研究。

钱森等人^[29]构建了一种柔索并联机构,然后在此基础上,对多起重机协作吊装进行了避障路径规划研究。贾宁等人^[30]设计了一种多起重机协同吊装联接装置,利用 ADAMS 软件,建立了多起重机吊装的虚拟样机,并对其性能进行了验证,结果表明,该样机可以有效增强多起重机协同作业过程中的动态稳定性。董永强等人^[31]针对作业过程中起重机电机处于的制动发电状态,提出了一种多起重机协调调度节能的方法。SHEN Xiao-ling 等人^[32]通过计算,分析了起重机操作和被吊物位姿态之间的关系,并根据每台起重机实际载荷分布的计算结果,给出了起重机协同作业的规划方法。

随着计算机技术的发展,多数学者采用智能算法来解决起重机的调度问题。

王耀宗等人^[33]利用遗传算法求解优化,能够在避免干涉的情况下,完成起重机的同步调度作业,提升了起重机协同作业的效率。王豪等人^[34]通过运用差分进化算法,能在短时间内求解双 ASC 调度的问题,避免了作业过程中的干扰和冲突,同时实现了作业完成时间的最小化目标。SUN Chen-xi 等人^[35]设计了一种

具有运行监控功能的调度系统,通过设计规则和优化算法,解决了在同一地点多台起重机的优化分配和冲突问题,以及紧急情况下的任务重组和分配问题。

1.4 塔机结构优化设计

出于安全的考虑,并受到一些其他因素的限制,传统的塔式起重机在设计过程中,往往会使用较大的安全系数和不合理的结构,以达到对安全作业的要求;但这种设计消耗钢材过多,效率也较低。随着有限元方法和一些智能优化算法的发展,国内外学者基于此,对塔式起重机的结构进行了探索和创新^[36]。

在早期,于兰峰等人^[37]通过建立起重机的数学模型,将关键参数作为优化目标,对其结构进行了研究。该方法主要是对塔机总体质量进行了优化,通过对参数的优化,达到了整机结构的优化目的。

随后,多数学者开始使用 ANSYS 有限元方法对塔机的结构优化进行了研究,如拓扑优化分析^[38]、动态特性设计优化^[39]等。

后来,学者多数集中于研究应力分布,以改善其危险截面。

杨阳等人^[40]提出了吊点位置优化和型钢规格优化的两级起重机结构优化方法,结构优化改善了危险截面的应力分布。甘盛霖等人^[41]针对塔机上下回转支座应力分配不均的问题,对塔机的结构进行了局部优化,改善了塔机结构应力集中现象,提高了塔机的整体强度。

在塔机的结构优化中,随着有限元方法^[42-44]的逐步完善,笔者倾向于参考桥式起重机的设计方法。在桥式起重机的结构优化设计方法中,目前使用较多的有:遗传算法、神经网络、粒子群算法等^[45-48]。

目前,关于塔式起重机局部性能研究文献较多,但针对塔机自动化作业系统仍针缺乏整体性的研究。

归纳分析已有的塔式起重机研究文献可以发现,大量学者的研究内容多为针对塔机众多功能中的某一项进行优化研究,而没有对塔机整体智能化、自动化进行探究。

因此,笔者提出塔机智能化、自动化应具备的关键技术,并对其进行相关的阐述;结合关键技术提出自动化作业系统概念,并对其组成模块进行阐述。

2 智能塔机关键技术

2.1 地图构建技术

塔机的自动化作业离不开对作业环境的获取,因此,高效、高精度地获取地图环境可以大幅提升塔式起

重机作业的效率和安全性能;同时,地图构建的好坏对于系统日后的自主定位和路径规划,以及避障起着决定性作用。

不同地图构建产品性能对比如表 1 所示。

表 1 不同地图构建产品性能对比

产品	机器视觉	传感器	激光雷达
扫描范围	小	大	大
扫描精度	高	低	中
作业成本	高	低	高
产品成本	高	低	高

当前,地图构建技术主要集中应用在汽车智能驾驶、工业机器人的路径规划中。而在其中,机器视觉、自主定位与地图构建技术、传感器同步定位、激光雷达等方法的应用较为广泛。

当前移动机器人技术发展迅速,同步定位与建图(SLAM)技术被广泛运用在移动机器人的研发中。SLAM 技术可以将视觉系统、激光雷达有机地糅合在一起。SLAM 技术已经被应用于塔机智能化的研究中。

笔者认为,应将现有的、成熟的地图构建技术结合应用到智能塔机地图的构建中。

地图构建系统如图 1 所示。

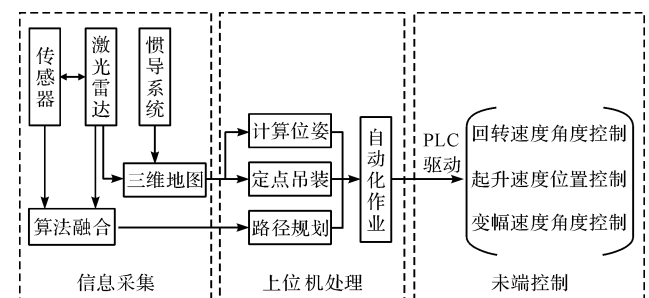


图 1 地图构建系统框架

笔者采用 SLAM 地图构建技术和点云技术,通过三维激光雷达,对塔机作业环境进行扫描提取,对作业环境内的障碍物、楼体、物料堆放位置以及施工车辆和人员进行位置识别,提取以上提及的“障碍物”的边界特征和区域特征,并将提取到的环境特征点通过云数据传输至上位机,进行作业环境的三维重构;

在其三维重构的过程中,误差在所难免,因此,笔者通过检测,对构建的 3D 作业地图和实际的作业环境进行对比,以消除误差(即闭环检测方法);对作业环境进行重新定位扫描,提取特征,与生成的 3D 作业地图进行对比,运用 surf 算法消除误差,从而使构建的地图更为精准;

若是 40 m 以上的起重臂,则将上述过程激光雷达数量增加至 2 个,使这 2 个激光雷达相互标定,从而满足其精度要求;作业地图的构建以 SLAM 技术为基础,

并结合塔机复杂的工况进行改进。

目前,SLAM 技术已广泛应用于智能巡检、无人汽车等领域。但要将其移植于塔机自动化作业系统中,还有很多实际问题需解决。

需解决的实际问题如下:

(1)扫描精度问题。塔机作业环境复杂,障碍物具有不确定性,部分小体积障碍难以被准确扫描,极易与吊钩发生碰撞,造成危险;

(2)扫描盲区问题。施工环境存在遮挡物,激光雷达无法穿透,出现扫描盲区;

(3)延迟性问题。对于部分突然出现的障碍物,雷达难以及时捕捉到轮廓点云数据;或上位机发出避障指令后,塔机难以及时反应。

2.2 定点吊装技术

塔机的一大主要功能是对货物进行吊装。因为电机条件的限制,电机无法连续运转,因此,在作业过程需要提升货物吊装的效率。

传统塔机依靠司机的经验来对货物进行定点吊装,此过程容易出现安全隐患,并且其效率也较低。因此,笔者认为,塔机智能化发展需要定点吊装技术的支撑,即接收到起重任务后,定点吊装技术要立刻计算出货物的坐标以及放样点的坐标,从而迅速完成作业任务。

这一过程既可以减少塔机的运转时间,又可以提高吊装作业的精准度。

全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)目前已被广泛应用于需要精密测量的各个领域。其中,PPP-RTK 技术继承了 PPP 基于状态空间表达的误差改正方式,同时吸收了实时动态(RTK)定位固定模糊度的思想,是当前最前沿的精密定位技术。采用该技术,能够为智能塔机精确定点吊装和定点放样提供保障。

定点吊装系统工作过程如图 2 所示。

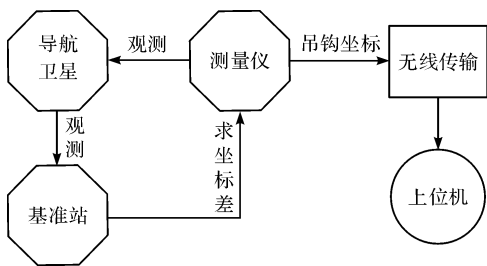


图 2 定点吊装系统工作过程

笔者认为,应采用 PPP-RTK 技术作为智能塔机定点吊装的技术支撑,将终端安装在塔机机身上,根据导航卫星采集到的观测数据,计算出基准站的三维坐标;

然后,对基准站的坐标进行求解,得到塔机吊钩上方的小车三维坐标,在小车上安装偏摆传感器,测量起重绳的偏摆数,通过计算偏摆数和小车的三维坐标,得出吊钩应移动到的目标点坐标;

同理,在定点放样时,也可用精准定位技术,将吊钩移动到目标点位的上方。

通过以上方法得到吊装点与吊钩的相对距离后,再通过数据传输装置将坐标传输到上位机,上位机进行塔机吊钩的路径规划。

2.3 故障诊断技术

当前,故障诊断技术已经拥有成熟的体系,包括神经网络、深度学习等多种方法。

针对塔机的故障诊断,笔者认为,应将现有的、成熟的故障诊断技术应用到塔机故障诊断系统中。

故障诊断流程如图 3 所示。

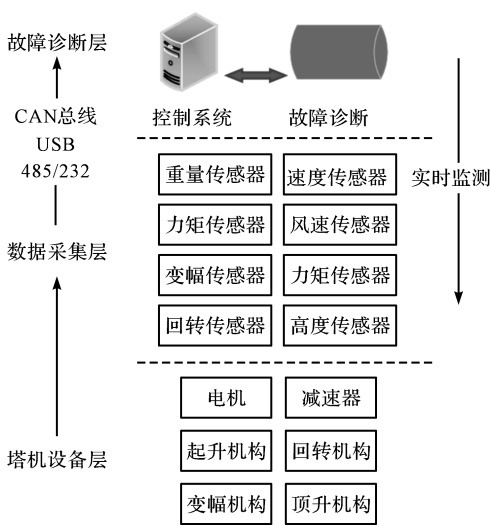


图 3 故障诊断流程图

笔者针对塔机故障诊断技术的描述如下:应用现有的故障诊断技术构建故障诊断系统,对故障诊断系统进行分层处理(即故障诊断层、故障表现层、故障原因层)。

(1)采用故障诊断系统,对塔机设备进行实时的数据采集,将采集到的数据与建立的故障诊断数据库进行对比,即故障诊断层;

(2)对比筛选出异常数据,通过异常数据确定塔机故障的具体结构,即故障表现层;

(3)确定故障结构后,与故障数据库进行比对,从而确定出现故障的原因,即故障原因层。

将这些可能导致故障的原因反馈给维修人员进行检修,从而规避可能发生的安全事故。

笔者以诊断树的形式建立塔机设备故障数据库,如图 4 所示。

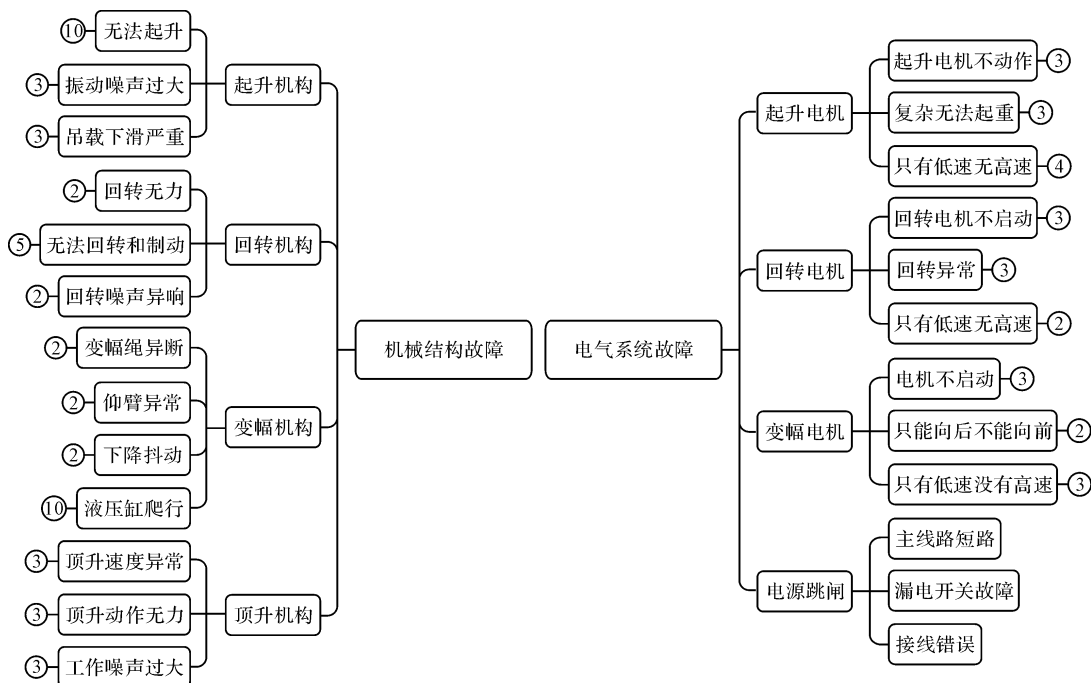


图 4 塔机故障诊断树

由图 4 可知:塔机的主要故障分为机械结构故障和电子电气系统故障两方面。

因此,通过建立故障诊断数据库和评价准则,可以完成对故障类型和故障发生点的诊断,从而避免塔机发生安全事故。

2.4 云监管平台技术

笔者认为,随着网络通信技术的迅速发展,工程机械行业也应与“物联网”有机结合在一起,向“智慧工地”的生产模式转型。

塔机云监管平台应用网络通信技术,依托 B/S 架构,与施工单位进行有机交互。

B/S 结构。即浏览器/服务器结构,具有 3 层框架:用户端、WEB 服务器以及数据库。用户端即监管平台和施工单位,施工单位以塔机监控系统为依托,将存储于上位机的塔机工况数据上传到数据库中,便于监管平台随时调取并查看塔机工作状态。

WEB 服务器。具有信息传送功能,用于用户端与数据库的信息交互。

数据库作为储存端,存放塔机工况等信息。

塔机云监管平台结构如图 5 所示。

云监管平台采用 B/S 架构,通过 WEB 服务器,将各个孤立的塔机监控主机与远程数据库服务器相连,以实现通信和资源共享的目的。

将这些监管数据与安全监控系统和故障诊断系统进行数据共享,可以完善数据库的数据类型,使安全监控系统和故障诊断系统更加可靠,进一步增强塔机的

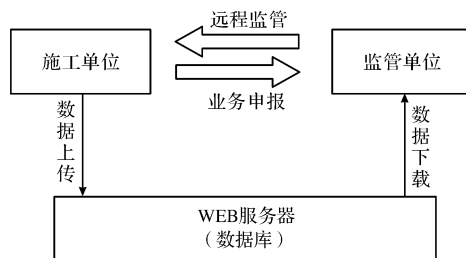


图 5 塔机云监管平台

安全性;另外,可以将这些数据反馈给厂家以及国家监管部门,对完善技术研发提供一定的帮助,还可以及时发现违规开工的工地,防止发生安全事故。由此,监管平台完成对塔机的集中管理以及统一监控。

笔者认为,云监管平台应具有如下功能:

(1) 远程定位监管功能。有关机构对所有塔机进行备案,对工地具体位置、设备序列号、使用时长进行统一记录;

(2) 塔机工况监控功能。云监管平台可通过 WEB 服务器,对塔吊的运行轨迹以及各机构的运行速度、起重量、起重力矩以及作业环境的温度、湿度条件等进行记录并存储,随时监管塔机有无违规作业情况出现;

(3) 业务在线办理功能。各部门以及各施工单位可通过云监管平台办理塔机相关业务,如塔机开工申报等。

3 自动化系统框架

智能塔机自动化系统采用多个子系统集成的方

法,将系统分为地图构建系统、定点吊装系统、安全监控系统、安全防护系统、故障诊断系统、PLC 驱动系统以及云监管平台。

塔机自动化作业系统框架如图6所示。

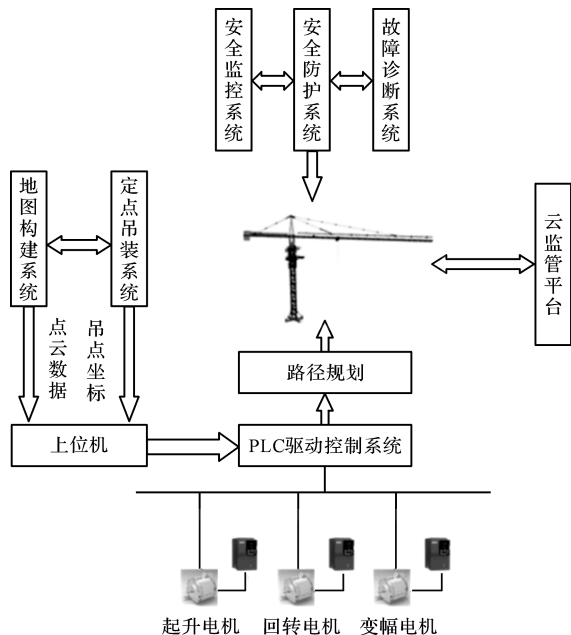


图6 塔机自动化作业系统框架

由图6可知:塔机自动化作业系统的作业过程表述为:

由地图构建系统对塔机作业环境进行扫描,建立作业地图;定点吊装系统将目标吊装点的精确坐标发送到上位机,上位机根据建立的地图,开始计算塔机吊钩到达目标坐标工况下的无碰撞最优移动路径,并输出模拟量信号,控制 PLC 驱动塔机吊钩按照最优路径进行作业;作业过程中,安全防护系统对塔机机身以及现场施工人员进行安全防护;故障诊断系统采集塔机工况数据,并将其上传至云端服务器,以供现场监控及云端监管之用。

3.1 吊钩路径规划

智能塔机自动化作业的一个核心部分是吊钩的路径规划。吊钩路径规划的实现依托于地图构建子系统与定点吊装子系统,其原理主要是借助地图构建技术与定点吊装技术,以此来对吊钩的路径进行规划,从而大幅提高塔机的工作效率。

地图构建子系统将塔机的三维作业环境构建出来,实时对作业环境进行更新;定点吊装系统根据建立的3D地图,按照上位机给定的指令,对塔机目标作业地点进行定位。

依托于以上两个子系统,上位机计算吊钩的最佳移动路线,吊钩根据指定的移动路线移动至目标位置,

从而达到路径规划的目的。

3.2 PLC 驱动控制系统

智能塔机采用 380 V 工业电压进行供电,通过变频调速方式驱动执行机构,采用 PLC 作为驱动系统的控制模块,通过以太网、Profibus 和 Modbus 等通讯协议,将 PLC、变频器以及监控系统有机结合在一起。

PLC 驱动系统如图7所示。

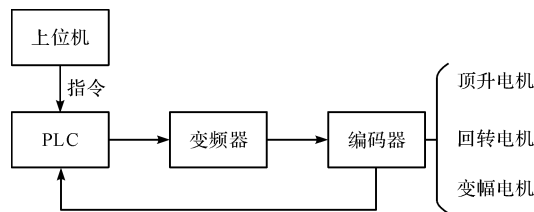


图7 PLC 驱动系统

由图7可知:PLC 驱动系统服务于自动化作业系统,利用上位机计算塔机三大机构,完成其作业的最优逻辑运动顺序;向 PLC 发出指令,PLC 通过不同的 I/O 接口,对塔机的回转、变幅以及起升进行控制,实现塔机自动化作业的功能。

3.3 安全监控与安全防护系统

安全监控系统由监控主机、监控面板以及多种传感器组成。监控主机安装在工地现场的塔机上,并连接高度、重量、倾角、风速、温度、湿度、行驶速度等多种传感器,记录并存储塔机运行的工况数据。

监控面板实时显示塔机作业时的起重力矩、各机构运行速度、塔机运行轨迹以及作业环境的风速、温度、紫外线强度等,以方便作业人员对数据进行记录与分析。

安全防护由限位保护、吊钩防摇、防溜车、防溜钩、防冲顶、起升防拉等装置组成。安全防护为塔机自动化系统的可靠性提供保障,有效预防塔机自动化作业过程中可能发生的各类危险情况,在塔机的基础防护装置上增加额外的防护,能够有效避免基础保护装置失效的危险。

塔机的安全由监控系统与安全防护系统共同保障。在监控系统中预设起重力矩、起重量、幅度、回转角、起升高度以及温度、紫外线等安全阈值。当塔机作业过程出现超过安全阈值时,监控主机及时反馈到上位机,进行制动等安全防护动作;当环境温度过高或紫外线过强时,可对施工人员发出停工提醒。

监控系统对塔机运行状况进行记录,同时与故障诊断系统以及安全防护系统配合,一起保证塔机的安全。监控数据及时上传云监管平台,实现有关部门对塔机的监管。

4 结束语

为了对智能塔式起重机进行研究,笔者分析并总结了塔式起重机技术的发展历程,提出了塔机智能化的概念,以及智能塔机应具备的关键技术,并结合关键技术构建了塔机的自动化作业系统,可以为塔机今后的研究提供参考依据。

研究结论如下:

(1)提出了智能塔式起重机的概念,明确了智能塔式起重机应具有的功能;

(2)归纳分析并总结了塔式起重机在相关技术上的研究;

(3)提出了智能塔式起重机所需要的关键技术和自动化作业框架。

在后续的工作中,笔者将结合无人驾驶、地面塔群控制以及物联网等前沿技术,深入研究塔机智能化。

参考文献 (References):

- [1] 张云霞. 建筑设备在建筑工程施工中的运用[J]. 建筑科学, 2021, 37(3): 161.
- [2] 寇红平. 建筑领域的人工智能技术发展研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(3): 187.
- [3] 俞建蔚, 肖健梅, 王锡淮. 基于滑模控制的集装箱起重机防摇控制[J]. 控制工程, 2009, 16(S2): 39-41.
- [4] 王晓军, 邵惠鹤. 基于输入整形的线性二次型调节器及其应用[J]. 上海交通大学学报, 2006(5): 848-851, 855.
- [5] 董明晓, 张恩, 韩松君, 等. 塔式起重机在变幅运动过程中货物的摆动规律[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(1): 74-77.
- [6] 黄冀, 梁杰金, 严波, 等. 塔式起重机吊点定位控制技术[J]. 机电工程, 2018, 35(9): 955-958.
- [7] 卢宁, 宋鹏程. 基于自适应 S 速度轨迹的塔式起重机变幅定位与防摆控制研究[J]. 机电工程, 2022, 39(1): 120-127.
- [8] LI Kun, LIU Man-lan, YU Zu-qing, et al. Multibody system dynamical analysis and payload swing control of tower crane[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics**, 2022, 236(3): 407-421.
- [9] 王海舰, 袁嘉惠, 卢士林, 等. 塔式起重机自动化配重控制及平衡动态特性分析研究[J]. 机电工程, 2021, 38(1): 108-112.
- [10] CHEN You-cheng, NIU Dan, LI Qi, et al. An Anti-sway Positioning Algorithm of Unmanned Crane Based on ANFIS [C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020: 3587-3590.
- [11] 李超, 李彦明, 刘成良. 塔式起重机 3D 远程虚拟监控[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(11): 1689-1692, 1697.
- [12] 张泽根, 周洪, 夏明晔. 起重机智能监控装置的研究与开发[J]. 自动化仪表, 2011, 32(6): 53-57.
- [13] 崔英, 杜文辽, 李根, 等. 起重机远程监控及故障诊断数据库系统[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(1): 97-103.
- [14] 张充, 赵挺生, 蒋灵, 等. 塔式起重机结构安全监测参数选取及测点布置[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 112-118.
- [15] 张伟, 廖阳新, 蒋灵, 等. 基于物联网的塔式起重机安全监控系统[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 55-62.
- [16] 张会敏, 宋世军. 基于图谱特征的塔式起重机塔身损伤判断方法研究[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(3): 268-272.
- [17] WANG Sheng-chun, ZHANG Ye, TIAN Yan, et al. Research on Tower Crane Structure Damage Detection Based on AR Model [C]//Proceedings of 2017 IEEE. 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2017: 2540-2544.
- [18] CHEN Wei, QIN Xian-rong, YANG Zhi-gang, et al. Wind-induced tower crane vibration and safety evaluation [J]. **Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control**, 2020, 39(2): 297-312.
- [19] ZHOU Wei, ZHAO Ting-sheng, LIU Wen, et al. Tower crane safety on construction sites: a complex sociotechnical system perspective [J]. **Safety Science**, 2018, 109(11): 95-108.
- [20] 周浩, 曹旭阳, 王殿龙, 等. 基于改进蚁群算法的桥式起重机路径规划问题研究[J]. 机械设计与制造, 2021(4): 133-136.
- [21] 邓乾旺, 高礼坤, 罗正平, 等. 基于多目标遗传算法的起重机吊装路径规划[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(1): 63-69.
- [22] BCOK M, KUGI A. Real-time nonlinear model predictive path-following control of a laboratory tower crane [J]. **IEEE. Transactions on Control Systems Technology: A Publication of the IEEE. Control Systems Society**, 2014, 22(4): 1461-1473.
- [23] THOMAS M, QIU Jia-cheng, SAWODNY O. Trajectory Sequence Generation and Static Obstacle Avoidance for Automatic Positioning Tasks with A Tower Crane [C]//IECON. 2021 47th Annual Conference of the IEEE. Industrial Electronics Society, 2021: 1-6.
- [24] KANESHIGE A, NAGAI S, UEKI S, et al. Development of the autonomous overhead travelling crane with real time

- path-planning based on obstacle information[J]. **IFAC. Proceedings Volumes**, 2012, 45(24):30-35.
- [25] 陈志梅,李敏,邵雪卷,等. 基于改进 RRT 算法的桥式起重机避障路径规划[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1832-1838.
- [26] CHEN He, FANG Yong-chun, SUN Ning. An adaptive tracking control method with swing suppression for 4-DOF tower crane systems[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2019, 123(5):426-442.
- [27] 李国杰. 基于经验学习的智能起重机搬运路径规划研究[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(5):377-383.
- [28] DUTTA S, CAI Yi-yu, HUANG Li-hui, et al. Automatic re-planning of lifting paths for robotized tower cranes in dynamic BIM environments[J]. **Automation in Construction**, 2020, 110(2):102998.
- [29] 钱森, 晔斌. 多起重机协作吊装避障路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2015(10):260-263.
- [30] 贾宁, 杨善国, 钱森, 等. 多起重机协同吊装联接装置设计与可行性研究[J]. 机械设计与制造, 2015(7): 200-203, 207.
- [31] 董永强, 高明远. 多起重机节能系统建模及调度[J]. 控制工程, 2012, 19(3):385-388, 393.
- [32] SHEN Xiao-ling, AN Jian-qi, TERANO T. Calculation Method of Load Distribution for Two-crane Cooperative Lift [C]//2018 37th Chinese Control Conference. IEEE., 2018:7851-7855.
- [33] 王耀宗, 胡志华. 干涉存在下自动化集装箱码头穿越式双起重机同步调度优化[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(1):83-93.
- [34] 王豪, 白丹宇, 曾庆成, 等. 差分进化算法求解自动堆垛起重机调度问题[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2021, 38(1):105-113.
- [35] SUN Chen-xi, LIU Dong, KANG Shu-yi, et al. Design of Intelligent Dispatching System for Port Gantry Crane[C]//2021 40th Chinese Control Conference. IEEE., 2021: 1887-1892.
- [36] 张嘉宁, 张明路, 李满宏, 等. 面向灰库清理的超大伸缩比机械臂结构设计与刚度优化[J]. 工程设计学报, 2022, 29(4):430-437.
- [37] 于兰峰, 王金诺. 塔式起重机结构系统动态优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(2):206-210.
- [38] 秦东晨, 王然然, 赵鹤鸣. 起重机箱形梁静刚度拓扑优化设计研究[J]. 机械设计与制造, 2020, 49(2):14-17, 21.
- [39] 罗跃纲, 李小彭, 闻邦椿. 工程结构动态特性智能优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(1):97-99, 109.
- [40] 杨阳, 秦大同, 杨涛. 塔机双吊点水平起重臂结构优化设计研究[J]. 工程机械, 2003, 44(6):16-19, 1.
- [41] 甘盛霖, 梅益, 鄢天灿, 等. 平头塔式起重机回转总成有限元分析及结构优化[J]. 现代制造工程, 2020, 41(3):147-151, 156.
- [42] 秦仙蓉, 龙世让, 丁旭, 等. 基于改进区间逆响应面法的塔机有限元模型修正[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2021, 49(11):1575-1581.
- [43] 卢宁, 韩崇瑞. 基于 ADAMS 刚柔耦合模型的塔式起重机起重臂疲劳寿命分析[J]. 机电工程, 2021, 38(8): 1003-1009.
- [44] 董明晓, 梁立为, 冯润辉, 等. 基于 ANSYS 的平头塔式起重机起重臂挠度与静应力分析[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(6):471-474.
- [45] 梁其传, 易朋兴, 邱悦. 基于稀疏网格模型与 MOGA 算法的起重机主梁结构优化[J]. 现代制造工程, 2019, 40(6):79-83.
- [46] 计三有, 苏运波. 基于神经网络的起重机臂架结构优化[J]. 机械设计与制造, 2008, 37(8):23-25.
- [47] 韦洪新, 王智森. 食品搬运机器人小臂的静态分析与优化[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(5):74-78.
- [48] 王欣, 陈博文, 林远山, 等. 基于粒子群算法的大跨度钢结构吊点层次优化[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(5):664-669.

[编辑:全瑶]

本文引用格式:

郑宏远, 卢宁, 宋鹏程, 等. 智能塔式起重机关键技术研究[J]. 机电工程, 2023, 40(3):435-443.

ZHENG Hong-yuan, LU Ning, SONG Peng-chen, et al. Key technologies of intelligent tower crane[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(3):435-443.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>