

智能化电气自动控制技术在集装箱制造中的实践应用

洪连辉

天津中集集装箱有限公司，天津 300461

[摘要]全球制造业智能化发展势头强劲，这股浪潮给集装箱制造业带来了重大影响，集装箱制造业是贸易的根基所在。在生产效率、质量控制以及绿色发展等众多方面都面临着严峻挑战，而以物联网、人工智能还有数字孪生为核心要素的智能化电气自动控制技术，已然成为破解这些难题的关键之处。本文先是全面梳理了该技术体系的构成情况以及所具备的特点，接着又对集装箱制造全流程的自动化需求展开系统分析，囊括了切割环节、焊接环节、涂装环节一直到装配检测环节。

[关键词]电气自动控制；集装箱制造；智能制造；数字孪生；AI；IOT 系统；MES

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18593

中图分类号: U653

文献标识码: A

Practical Application of Intelligent Electrical Automatic Control Technology in Container Manufacturing

HONG Lianhui

China International Marine Containers (Group) Ltd. Container Co., Ltd., Tianjin, 300461, China

Abstract: The global trend of intelligent development in manufacturing is strong, and this wave has had a significant impact on the container manufacturing industry, which is the foundation of trade. There are severe challenges in production efficiency, quality control, and green development, and intelligent electrical automatic control technology with the Internet of Things, artificial intelligence, and digital twins as core elements has become the key to solving these problems. This article first comprehensively outlines the composition and characteristics of the technology system, and then conducts a systematic analysis of the automation requirements for the entire container manufacturing process, including cutting, welding, painting, and assembly testing.

Keywords: electrical automatic control; container manufacturing; intelligent manufacturing; digital twin; AI; IOT system; MES

集装箱作为全球物流体系的核心载体，其标准化尺寸、高强度结构及良好的耐久性等优势，为海运、陆运及多式联运提供了有效的解决方案。在全球经济一体化与国际贸易规模扩大的双重驱动下，集装箱的制造质量已成为影响船舶运输安全、物流效率及运营经济性的关键变量。第四次工业革命技术当中，像人工智能、大数据这类技术，给这个传统的产业带来了全新的动力，促使它实现升级。智能化电气自动控制技术，并不是简单地用机器去取代人力，而是要打造一个完整的智能生产生态系统，这个系统有感知的能力、分析的能力、做决策的能力以及执行任务的能力。

1 智能化电气自动控制技术概述

1.1 技术基本原理与构成

智能化电气自动控制技术属于一个将多学科融为一体的综合体系。它的关键之处在于会广泛地部署各类传感器以及智能设备（IED），以此来实时且全面地采集有关全生产要素方面的数据。而这些所采集到的数据，会借助高速工业网络汇聚到中央处理平台^[1]。这个中央处理平台依靠大数据分析手段以及人工智能算法，能够形成具备智能化特性的决策，并且能够精准地驱动像机器人、智能物流这类执行单元，进而形成一个完整的“感知-分析-决策

-执行”的闭环流程。在这一体系当中，数字孪生技术有着极为重要的作用。它通过构建起与物理生产情况完全对应的虚拟模型，达成了对工艺优化、故障预测等方面进行超前仿真以及有效管控的目标。整个系统是依靠类似于ABBAbility™System800xA 这样的集成化架构来搭建的，该架构支持开放协议，这便保证了不同系统以及设备之间能够实现互联互通，同时也能确保对它们进行全生命周期的高效管理操作。

1.2 在制造业中的应用特点

在集装箱这种离散制造业领域当中，该技术呈现出十分突出的特点。其一便是有着相当高的生产柔性。借助软件来定义工艺流程，并且采用模块化的方式去开展设计工作，如此一来，系统便可以极为迅速地对多品种以及小批量的订单做出响应，能够灵活地对生产路径以及程序加以调整，切实有效地化解了传统生产线在转产时速度过慢的这一难题。其二是整个生产流程都是由数据来驱动的。从原材料一直到最终的成品，在这个过程当中，每一个物料以及每一项工序都会被赋予相应的数字身份，它们的状态会在整条产业链路之中得到实时的追踪以及详尽的记录，进而使得生产过程彻底实现透明化。最后是该系统具有持续不断进化的特性。凭借机器学习算法，系统可以从以往

的历史数据当中自主地展开学习活动，不断地对控制参数予以优化，同时还能对设备状态做出预测，由此便具备了一定程度上的自优化以及自适应的能力。

2 集装箱制造工艺流程及自动化需求

2.1 主要工艺流程分析

标准干货集装箱的制造流程是连续且复杂的，其中涵盖了诸多环节，像钢材预开卷这一项，还有矫平操作、打砂处理，部件切割以及冲压工序，另外焊接工作也包含在内，涉及箱体总装焊接，之后还要进行整体打砂，接着是喷涂作业，烘干步骤也不能少，最后得完成地板铺设、附件安装以及水密测试等工作。这些工序彼此紧密关联，物料在各个环节间频繁流转，要是哪个环节出现瓶颈情况，那么势必会对整体产出效率以及成本产生直接影响。

2.2 生产中的关键控制环节

在这些环节当中，有几个环节对于控制精度以及稳定性的要求是相当高的。就焊接工艺而言，其质量会直接对箱体结构强度和密封性起到决定性的作用。而采用传统的手工操作方式来进行作业的话，就很容易会出现变形、气孔之类的种种缺陷。再看涂装工艺，涂层的均匀程度以及厚度这两方面的情况，将会直接影响到产品的使用寿命。并且传统喷涂这种方式还存在着 VOCs 排放量偏高、工作环境状况较差等一系列问题。还有装配与紧固工艺，比如说像大量螺钉的锁固这类工作，其性质往往是重复且单调的，所以就特别容易出现漏打或者是扭矩分布不均等这样一些质量问题。

2.3 自动化与智能化需求

经过上述分析能够看出，集装箱制造业对于自动化以及智能化方面的需求是明确而又紧迫的。就效率和质量而言，该行业迫切需要用机器来取代人力，以此来应对因人口红利消失而带来的种种挑战，进而达成稳定且高效能的标准化生产状态。就好比说，有些企业已然设定了“每 30s 便要生产出一个标准集装箱”这样的极为苛刻的生产节拍目标。从过程控制这个层面来讲，得针对焊接电流、电压、速度这些方面，还有喷涂的流量、压力、雾化效果这些情况，以及装配的定位精度、锁固扭矩等关键工艺参数展开毫秒级别的实时监测与闭环调节操作，借以确保产品的高度一致性^[2]。在能源与成本方面，随着“双碳”目标不断向前推进，企业务必要对电力、压缩空气这类能源的消耗实施精细化的管理举措，并且依靠预测性维护手段来削减非计划停机的情况发生，最终实现降低综合运营成本的目的。在系统管理这个层面，得把信息孤岛彻底打通，达成从订单下达一直到产品交付的全流程数字化管控效果，以此提高企业针对市场变化所具备的快速响应的能力。

3 智能化电气自动控制技术在集装箱制造中的具体应用

3.1 自动化切割与成型控制

在钢材的切割以及成型相关环节当中，智能化控制技

术已然获得了较为深入的应用。激光切割机在接收到由上层生产管理系统所发出的排产指令还有图纸数据之后，便能够自主地去完成板材的定位工作，并且还能开展高精度的切割操作。它的控制系统把视觉识别以及 PID 调节算法给整合到了一起，如此一来便能够在实际运行过程中实时对因板材温度或者材质存在细微差异而产生的切割误差加以补偿，进而保证每一个零件的尺寸公差都能够被严格地控制在毫米级别的范围之内。就复杂的型材弯曲以及冲压成型这一情况而言，在 EtherCAT 总线等具备高速实时通信功能的网络的控制之下，伺服压力机和折弯机是可以达成多轴之间高度协同运动的状态的。

3.2 焊接过程的智能监控与调控

焊接领域乃是智能化应用最为集中的场景所在。就天津中集集装箱有限公司的实际践行情况来看，该公司的焊接车间安排部署了接近 100 台焊接机器人，并且借助中央系统来开展集群调度方面的相关工作。每一台机器人均集成了多种多样的传感器，能够实时对焊接参数以及熔池图像加以采集。这些所采集到的数据经过边缘计算或者云端 AI 算法的分析处理之后，便能够自动对焊缝予以识别并且进行跟踪操作，同时还能依据实际情况动态地对机器人姿态以及参数做出相应调整，进而达成自适应焊接的效果。

3.3 涂装与烘干系统的精确控制

在绿色制造的发展趋势之中，涂装环节的智能化改造显得格外重要。以中集环科所建成的行业首条全自动粉末喷涂线作为例子来看，它成功地达成了从源头上开展的“油改粉”工作。整个喷涂房的环境温度、湿度以及送排风压力，都是依靠安装在现场的各类传感器来展开实时监测的，并且还由 PLC 和 DCS 系统组合而成的双层控制网络来进行细致的调节操作，以此来保证房内能够形成稳定且均匀的空气流场。对于粉末喷涂机器人而言，其运动轨迹以及出粉量，会由数字孪生系统提前进行仿真实验并加以优化处理。在实际的生产过程当中，数字孪生模型和物理产线能够实现实时的同步状态，可以持续不断地对实际喷涂效果和仿真预期进行比对，并且还能依据实际情况动态地调整相关参数，进而能够在复杂形状的罐箱表面上形成厚度较为均匀的涂层，这不仅极大地提升了粉末的利用率，而且几乎将 VOCs 排放给彻底消除了。

3.4 装配与检测的自动化集成

在最终的装配以及检测这个阶段，智能化技术达成了从部件分配一直到最终检验的集成效果。当生产线发出拖箱拉箱需求方面的指令之后，系统会自动对 AGV 小车进行调度，依照由最优路径算法（LES）所规划出来的最为高效的那条路线，把集装箱托举运送到相应的工位上。在木地板铺装紧钉工位上，专门的智能机器人结合了视觉定位、扭矩传感以及 EtherCAT 总线伺服控制等一系列技术。该机器人能够自主地移动并精准定位，依靠图像识别来确

定螺孔的具体位置，并且能够实时对螺丝锁入时的扭矩以及深度加以监控。要是碰到了工具出现磨损或者螺丝发生浮锁这类异常情况，它可以根据预先设定好的逻辑来自动进行处理，像是补偿扭矩又或者是更换螺钉，以此保证每一颗螺钉的装配质量都能够既可靠又可以被记录下来。完成装配之后的集装箱，它的水密性测试所得到的数据、关键尺寸检测的结果等，都会自动录入到“云箱管理系统”当中，进而生成独一无二的“数字身份证”，从而实现了对产品整个生命周期的质量追溯以及智能化的管理。

4 应用效果与优化策略

4.1 生产效率与质量提升分析

智能化转型能够促使效能以及质量实现质的飞跃。以宁波中集为例，在2025集装箱多式联运亚洲展上所披露的信息显示，借助于大规模机器人应用以及产线集成，其单条产线的人均生产效率得以提升，提升幅度超过了50%，并且还达成了每30s便能下线一个标准集装箱这样的高节拍状态^[3]。质量方面的提升也是颇为显著的，机器执行所具备的稳定性让焊接、涂装的一次合格率这一关键指标得到了大幅度的改善。而全过程的数据采集则促使质量管控从原本的事后抽检转变为了实时且全数的预防性管理方式。具体的应用效果可参考表1。

表1 智能化电气控制技术在集装箱制造关键环节的应用效果分析

应用环节	核心控制技术	关键性能指标提升
焊接	机器人集群控制、多传感器融合、AI焊缝识别与自适应调节	焊接精度达毫米级；单线人均生产效率提升超50%
涂装	全自动粉末静电喷涂、闭环温湿度与风压控制、数字孪生仿真优化	VOCs排放接近零；涂料利用率大幅提高
装配与物流	AGV调度系统（LES最优路径算法）、视觉引导机器人、RFID全流程追踪	物流效率提升；实现30s/箱的生产节拍
能源管理	电气数字化平台、AI能耗预测与优化调度	系统抗干扰能力增强；实现碳足迹精准核算

4.2 能源管理与成本控制优化

智能化乃是精细化成本控制极为关键的一环。那覆盖整个厂区的电气数字化平台，能够对各级能耗展开实时的监控工作，而AI能源管理系统则可开展负荷预测以及智能调度等相关操作，进而达成“削峰填谷”的效果。在涂装烘干等诸多环节当中，精准温控模型把热能浪费的情况给减少了。并且更为重要的是，预测性维护模型借助对设备运行数据所呈现出的趋势加以分析，能够在故障发生之前发出预警，使得维修方式从原本的被动维修转变成了主动计划，如此一来便大幅度降低了非计划停机所带来的损失以及维修成本。像中集环科等重点打造的碳管理数字化平台试点，更是把成本控制的范围延伸到了碳资产领域，从而为企业的绿色转型奠定了相应的数据基础。除此之外，

像以“数”造质量管理模式这类全流程数字化管理方式，能够在设计周期、生产成本等多个方面都带来综合效益的优化，具体的情况如表2所示。

表2 智能化转型中的系统可靠性与综合效益分析

关注维度	传统模式面临的挑战	智能化控制策略与改进	预期效益
生产效率	生产节拍慢，人均产出低	机器代人、机器人集群协作、精益化生产管理	实现30s/箱节拍，人均生产效率提升超50%
质量与成本	质量波动大，设计生产周期长，成本控制粗放	全生命周期数据链管理、数字孪生仿真优化	设计周期压缩22%，生产成本下降12%，产品不良率下降26.83%
系统可靠性	硬接线复杂，故障点多；设备状态未知，突发故障多	采用IED互联、状态监测与预测性维护体系	提升生产连续性保障能力，降低突发停机风险与维修成本
绿色低碳	VOCs排放高，能耗大，碳管理缺失	源头“油改粉”、能源精细化管理、碳足迹平台	VOCs排放接近零，实现精准碳核算，支撑绿色转型

4.3 系统可靠性与维护策略

复杂智能系统能够可靠地运行，这是实现成功转型的重要基础。通过采用智能电气设备也就是IED，同时运用工业互联网协议，如此一来便取代了大量的硬接线，把故障点的数量减少了，并且还让系统的扩展性得到了增强。对于关键设备而言，其具备的“故障主动上报”机制，可以依据状态监测所获取的数据来对性能可能出现的劣化情况发出预警，进而促使运维模式从以往的“故障后响应”逐步转变为如今的“故障前干预”^[4]。基于数字孪生打造的设备全生命周期管理系统，能够在虚拟的空间当中针对维修、换型等一系列作业展开仿真验证的操作，借此对维护方案加以优化，同时也使得管理的标准化程度得以提升。

4.4 未来技术融合与发展方向

未来，技术融合的发展会更为深入，“AI+数字孪生”将会成为标配，让工厂变成一个可以持续学习并且自主优化的“数字生命体”，5G技术在不断普及，这能支持更高精度的实时控制以及更大规模的设备无线互联，给极致柔性制造打下基础，智能化和绿色化这两个方面的驱动作用会越来越突出，电气控制系统会和光伏、储能等清洁能源高度融合起来，达成生产用能的智慧微网管理，最后凭借工业互联网平台，构建起一个透明、高效且有韧性的全球集装箱智能制造生态。

5 结束语

智能化电气自动控制技术正在带领集装箱制造业达成一场颇为深刻的范式变革。从实际运用的情况来讲，该技术借助数据驱动以及智能决策的方式，在效率方面、质量方面、能耗方面还有系统可靠性等诸多不同维度都创造出了实实在在的价值。虽说转型的过程是需要不断地投入

资源以及智力的,然而在全球竞争以及可持续发展这双重的压力情况之下,坚定且毫不动摇地去走一条以“硬件+算法+数据”当作核心的智能化并且绿色化的发展道路,这无疑是集装箱制造企业在构筑未来的核心竞争力时所做出的战略性选择。

[参考文献]

- [1]王永壮.岸边集装箱起重机制造项目的全生命周期管理研究[J].模具制造,2025,25(12):271-273.
- [2]杜兴民.基于改进遗传算法的集装箱制造生产线布局自优化方法[J].现代制造技术与装备,2025,61(5):189-191.
- [3]魏少鹏,高颂庆,马龙飞,等.铁路集装箱专用平车配件制造偏差分析及控制措施 [J].金属加工 (冷加工),2025(2):57-60.
- [4]吕勤晓.基于自动化技术的轨道式集装箱龙门起重机制造工艺研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(6):204-206.

作者简介:洪连辉(1979—),男,汉族,天津人,学士,天津中集集装箱有限公司,研究方向:智能制造,低碳节能。