

二次预制舱柔性制造研究与实践

文/许继集团有限公司 张叶同 王军奎 张 豪
许继电气股份有限公司保护自动化系统分公司 王 凯

提出了二次预制舱由传统的离散型制造向柔性制造转型的实现方式，基于脉动式的自动化产线，结合制造执行系统MES，进行生产全流程的信息系统集成，辅以智能物流系统，实现数字化管理。解决了二次预制舱传统生产模式中人工搬运，空间狭小、作业困难、自动化程度低、生产效率低和产品质量等问题，助力电工装备制造业向智能制造转型升级。



◎ 预制舱自动化生产线

我国现已成为名副其实的电工装备制造大国，历经几十年的发展，形成了门类齐全、规模较大且具有一定技术水平的产业体系。面对激烈的市场竞争，电工装备制造企业面临着巨大压力，加快推进智能制造实现企业转型升级势在必行。

预制舱式变电站，可追溯到20世纪60年代欧美使用的户外成套变电所装置。预制舱技术在欧美、中

东及澳大利亚等地得到了较多的应用，国内则是从20世纪90年代开始使用。目前，国内厂家预制舱式二次组合设备的生产制造环节中普遍存在的问题是标准化、自动化程度低，现有的生产制造流程多为串行生产模式，待舱体整体加工完毕之后才进行舱内二次设备及辅助设备的安装，舱内空间狭小、环境差，给施工带来了重重困难。

智能制造给制造业带来了一场革命，为装备制造业创新发展提供了有力的抓手。二次预制舱（以下简称“预制舱”）传统生产模式是典型的离散型制造，采用敏捷柔性制造可以实现小批量、多批次生产，快速响应用户的需求。预制舱脉动式自动化产线的实践，助力电工装备制造业加快向智能制造的转型升级。

预制舱柔性制造研究

目前预制舱采用的传统串行生产模式，大多工序主要靠人力完成，自动化、信息化和智能化程度低，生产周期长，生产过程难以监控，影响生产质量可靠性。传统模式的劣势主要表现为以下四个方面：

1) 舱体成型后进行屏体安装工作，其内部空间狭小，主要靠人力搬运。

2) 舱体部分组件重量达60 kg，自动化程度低，主要靠人工安装，劳动强度大。

3) 屏间连线, 电缆头制作困难且空间狭小, 接线工作量大, 生产周期长, 工艺质量难以保证。

4) 目前预制舱生产模式主体框架采用焊接工艺, 焊接过程中易产生大量焊接烟尘, 整体喷漆过程中挥发性气体难以控制, 为满足环保要求, 需投入大型环保设备, 环保成本高。

预制舱的组装加工属于离散型生产, 订单需求呈现个性化、多样化, 生产复杂程度高, 组装难度大, 不利于企业自动化产线建设。为适应市场需求, 通过智能制造, 建立预制舱自动化生产线。相比传统生产模式, 其优势主要体现在以下几个方面:

1) 敏捷响应。以“设计—生产—销售”为特征的传统制造流程正在向“个性需求—定制订单—生产”为特征的消费生产一体化制造流程转变。将舱体结构、内部装修和辅助电气设备等模块化, 降低预制舱加工维度和装配的复杂性, 实现小批量、多批次生产, 快速响应用户的定制化需求。

2) 系统集成。集成PLM、

SAP、MES、SCADA和调度等系统, 实现人-机器-信息的交互, 对产品全生命周期实现数字化的管理, 将传统的加工方式转变为高度自动化的生产线, 实现柔性化生产。

3) 智能物流。通过手持PDA或AGV上安装的扫码枪识别物料上的二维码, 获取物料的到货信息, 并将信息送至调度系统, 调度AGV将物料配送至相应工序, 实现自动准时配送、全程监控和过程追溯。

因此, 预制舱自动化产线的主要功能包括: 预制舱组装生产自动化、信息化深度融合, 提高预制舱产品生产质量, 缩短制造周期, 实现柔性制造。

自动化生产线总体方案

预制舱自动化生产线有两种实现方式: 一是固定站式自动化生产线; 二是脉动式自动化生产线, 属于移动流水化生产线的一种。

1. 固定站式自动化生产线

传统的固定站式生产线, 需要为产品的总装提供单独的一整套体系及工人, 其生产能力既受

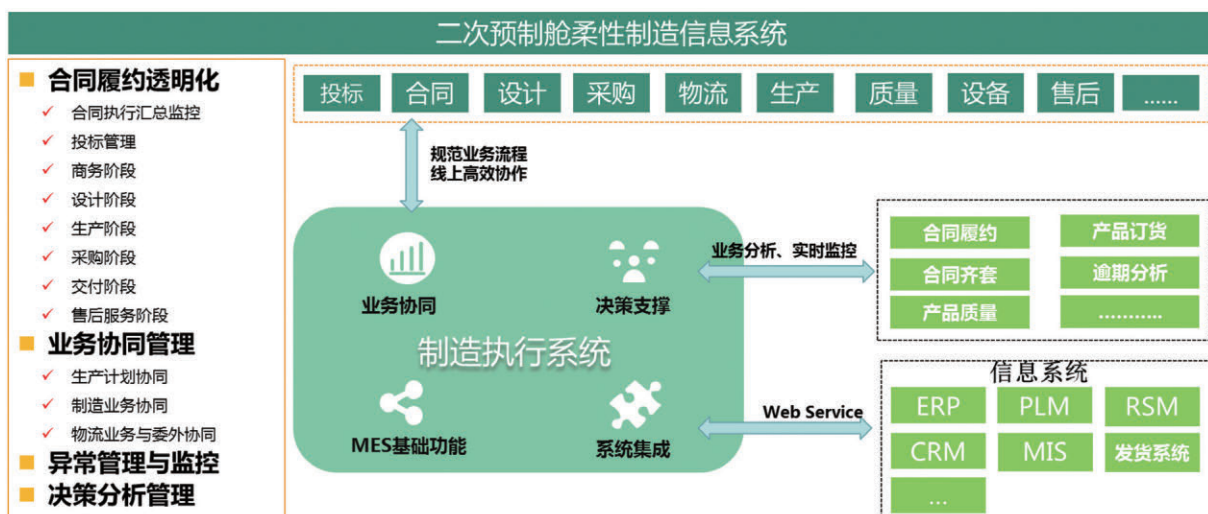
到总装台架等单独系统的约束, 同时也受到工人技术及数量的限制, 从而使得产品难以在较小投入的情况下大批量生产。其装配方式就是将产品停放在固定站位, 然后工人依次完成自己的装配任务, 反复操作, 从而达到量产的目的。这种方式虽然简单, 但是存在效率低、耗时长等问题, 不利于广泛推广。

1. 脉动式自动化生产线

脉动式自动化生产线是介于固定站式与连续移动式之间的一种装配生产线形式, 其典型特征是产品移动时不进行装配作业, 装配作业进行时产品不移动。工位上可以设定缓冲时间, 当生产某个环节出现问题时, 整个生产线可以不移动, 或留给下个站位(一般是备用工位)去解决, 当站位的装配工作全部完成时, 生产线就脉动一次。一般设置多个工作区, 从1区开始, 依次按序排列。每个工作区就是一个装配工位, 1区负责总装过程的第一道工序。也就是说, 每一台产品的总装从1区开始起步, 完成一道工序后就进入到下一个工作区, 后面

表 预制舱自动化生产线各工位作业

线缆铺设	舱内屏间连线采用预制光电缆进行连接, 预制光电缆采用转运车送至安装区, 由AGV自动运送至线缆连接工位; 人工完成线缆布设工作
地板和屏体安装	防静电地板由AGV自动运送至地板工位; 工位配备机器人实现自动安装; 屏柜采用AGV自动运送至屏柜待安装区; 屏柜采用步进式传送方式, 由机器人自动完成安装
屏柜固定接线	调试员完成屏柜固定、舱内配线工艺
异形地板安装及工艺检查	调试员完成异形地板安装、舱内屏柜布置和屏柜外观检查等工作
围框安装	围框采用专用转运车进行摆放, 并采用AGV自动运送至围框安装工位; 工位配备龙门框架吊装系统, 且配备专用机械手, 辅助围框安装; 配备移动登高台适合人的高度作业
顶盖安装	顶盖作为一个整体运输至预制舱组装区; 采用行吊进行顶盖的吊装工作, 由人工进行螺栓固定, 配置移动登高台, 适合人的高度作业
金邦板安装	金邦板采用专用转运车进行摆放, 并采用AGV自动运送至金邦板安装工位; 工位配备龙门框架吊装系统, 且配备专用机械手, 辅助金邦板安装; 工位两侧及周围配备移动升降台; 移动升降台自带轨道, 可沿轨道自动行走、升降, 以便于人的高度作业
密封处理	人工完成舱体密封处理工作
舱体质检	人工进行舱体环控及外观检查



◎ 柔性制造信息系统

准备进行总装的下一台产品则紧接着进入到1区。等到产品从最后一个工作区下线后，就完成了全部总装工作，进入到出厂交付前的调试阶段。因为这种生产线上不同工作区内的产品都是按照统一的时间间隔完成工作后，移动到下一个工作区的，很像是人类血液的脉动，故而得名。

以预制舱脉动式组装生产线分为9道工序为例，每个工序节拍为4 h，根据流水线的特点，理想情况下4 h生产出一台成品预制舱，则年产能最大可达到近500台。由于预制舱产品的尺寸大、重量大，在实际生产过程中可能会出现一些异常情况，保守估计可实现年产能200台。

通过对比，选用第二种实现方式，即脉动式自动化生产线。

预制舱柔性制造实践

1. 自动化生产线

预制舱自动化生产线由线缆铺设、地板和屏体安装、屏柜固定接线、异形地板安装及工艺检查、围框安装、顶盖安装、金邦板安装、密封处理和舱体质检共9道工序组成。各工位作业具体如

表所示。

在模块化设计的基础上，生产线实现了自动化作业，在地板和屏体安装、围框安装、顶盖安装和金邦板安装等大部分核心工序上均采用机器人、AGV实现自动运输和自动安装，解决了空间狭小作业困难及产品质量难以保证等问题，大幅度降低了工人的劳动强度。

2. 智能化信息系统

(1) 制造执行系统 (MES)

MES系统主要通过数据采集接口来获取各种信息，包括产品跟踪信息、生产过程信息、报警信息、批次信息、工程信息和设备信息等。当车间发生实时事件时，MES系统能对此及时做出反应、报告，并用当前的准确数据对它们进行指导和处理。

预制舱MES系统可以实现以下功能：①MES系统与企业的ERP、产线（含设备）进行有效互联互通，实现企业的订单拉动式生产管控。②对预制舱物料（模块、半成品和成品）、工艺装备（包括产线、生产设备和专用工具装备等）参数等数据的采集、分类和统计等，通过MES系统进行分

类查询，实现可追溯性。③实现生产状态可视化、生产管理信息化，实时监控生产运营状态。

其主要的应用场景如下：

1) 工艺管理：定义预制舱装配对应的工艺步骤和工艺操作，每个工艺点所关联的作业指导、要求及标准。可按人员权限自主设置审批流程，当工艺文件需要改动时，需上传对应改动原因文档，与原工艺文件相关联。实现人-机-信息有效交互，为向HCPS进行探索和发展打下基础。

2) 生产计划管理：能够通过集成从ERP自动获取生产合同，根据生产合同由MES系统按模块进行拆分，实现对预制舱各模块的生产计划、修改变更的调整与排布。同时，实现对生产批次及各个工序工单的生产状态、完成时间及完成数量等进行实时查看。

3) 质量追溯：追溯管理主要功能是能够通过产品的特征信息查询产品生产过程中所经过的信息，主要包括设备参数信息、环境参数信息、质量参数信息、班组信息和批次信息。可精确追溯到工厂、生产线、工段、工序、

(下转第23页)

取汇报，参观工厂运行效果。无疑，这些成功经验对于智能制造路径探索具有研究和借鉴意义。

合作思考一：相互信任，规范落实。在项目中，艾比森的IT部门被设为一级部门，项目也被设为优先等级。丁彦辉董事长在项目启动会上曾要求：“除非是根据艾比森的产品和行业特点做了调整，哪怕我们自己削足适履也要按照系统规范去做”。目前一期项目目标已经圆满达成，未来需要进行新的思考，解决先进制造面临的多种课题。

合作思考二：实战中培育人才

团队。艾比森通过实战，已经培养起一支40多人的队伍。王次平在项目总结会上说：“艾比森善于选择同一格局的合作伙伴，和优秀的企业一起，在项目实践中积累，这也是艾比森选择三菱电机的重要原因。”这与三菱电机的合作初衷相契合，三菱电机期望通过各种渠道培养行业人才，为自动化发展和智能制造实现提供坚强支持。

结束语

艾比森在18年的发展历程中，不断鼎新革故，率先在业内突破10亿元销售额大关，出口份额占比

70%以上，在美国、德国、日本、巴西、墨西哥、迪拜、俄罗斯和阿联酋等国家均设立了子公司，已成为全球领先的全彩LED显示应用与服务提供商。

三菱电机e-F@ctory基于近百年的制造经验，致力于FA和IT的深度融合，促进自动化控制技术的迭代更新，并不断导入AI技术、边缘计算和TSN技术，实现立足制造现场、贯通供应链和工程链的智能制造。现在，艾比森与三菱电机携手夯实智能制造基础，未来必将实现由数据驱动的智能制造。EA

(上接第20页)

班组、产品质量状态以及设备物料批次。质量追溯包括正向追溯和反向追溯。

(2) 智能物流系统

产线上采用AGV运送，每个用料工位配置AGV呼叫按钮，当物料进场时，MES系统智能判断线边物料消耗情况，当产线上需要原料时，按下要料按钮，此时AGV系统自动产生搬运任务。当任务分配到具体AGV车上时，该AGV会按照既定路线进行自动取料和运送，运送物料至线边后，按下AGV车上“卸货完毕”按钮，此时AGV自动返回原料上料区等待执行下一个任务。

(3) 系统集成

1) 信息基础：围绕预制舱产品组装车间，完成包含外网、内网和局域网的3层网络铺设。

2) 柔性制造信息系统：信息系统方面，将涉及产品全生产周期的信息系统，进行有效集成，打通各环节，实现信息实时查

看、实时决策等功能。

PLM与MES集成：PLM将产品工艺数据以及产品BOM发布于MES系统中，指导MES按照规范的工艺标准进行实际生产；同时MES也会将实际工艺的执行情况反馈于PLM，有助于PLM进行验证和改进。

ERP与MES集成：ERP除了将主数据（人员、系统和物料等数据）传递给MES，还将生产计划传递给MES，有助于MES进行生产计划管理和执行；MES也会将生产计划的实际执行结果反馈给ERP，便于ERP对订单计划的改进。

MES与SCADA层：MES将生产计划传递给SCADA层，方便车间按其计划进行生产，MES会通过数据采集和监视控制进行实时数据的采集，便于相关报表分析，同时各系统也将实际运行的数据传递给MES，有助于MES的生产监控。

结束语

柔性制造的核心是对传统的生产线进行改造，建设包括数控机床、智能机器人、自动化的立体仓库和柔性控制系统等。基于生产数据的自动流动，柔性制造拥有高度数字化的生产流程，可以实现小批量、多批次生产，快速响应用户的需求，是离散型传统制造向智能制造转型的关键所在。

预制舱自动化产线的核心工序如地板和屏体安装、围框安装、顶盖安装等均采用机器人、AGV实现自动运输、自动安装，解决了人工搬运、空间狭小和作业困难等问题，提升了产品质量，并大幅度降低了工人的劳动强度。生产过程实现全流程的数字化管理，预制舱组装从82 h缩短至38 h，效率提升53.66%。

预制舱脉动式柔性制造的研究和实践，为企业的转型升级提供了智能制造解决方案，给企业带来了显著的效率效益提升。EA