

MES系统在直缝埋弧焊钢管生产线的设计与应用

郎冠英

天津博杰京力科技有限公司 天津 300110

摘要：直缝埋弧焊钢管（SAWL）广泛应用于油气输送与建筑结构等领域，其生产工序复杂、质量要求高、追溯性强，传统人工管理模式已难以满足现代制造需求。制造执行系统（MES）作为连接ERP与底层自动化控制的桥梁，为此提供了系统性解决方案。本文聚焦SAWL生产线，首先分析JCOE/UOE等典型工艺流程及其信息化管理需求；其次提出基于三层网络架构的MES总体设计方案，并阐述其与ERP、PLC/DCS等系统的集成策略；进而构建涵盖生产计划调度、物料批次追踪、质量管理、设备运维、能源管理及数据可视化六大核心功能模块；最后探讨数据采集、标准体系构建等实施难点。研究表明，科学部署的MES系统可显著提升生产线的数字化、精细化与智能化水平，助力企业降本增效、保障质量并增强竞争力。

关键词：制造执行系统（MES）；直缝埋弧焊钢管；生产管理；质量追溯

引言

在能源转型与国家能源安全战略推动下，直缝埋弧焊钢管（SAWL）迎来增长爆发点，大口径、高钢级SAWL钢管成为油气管线、海洋工程等领域的首选。其JCOE/UOE生产工艺复杂，需经多道精密工序成品，对工艺稳定性与全流程追溯性要求极高。然而，许多企业信息化建设初期缺乏全局考虑，存在信息孤岛，导致计划与执行脱节、物料信息不透明、质量数据分散、设备响应滞后，制约效率与质量。制造执行系统（MES）通过实时采集“人机料法环测”全要素数据，实现生产透明化、规范化与优化。将MES深度应用于SAWL产线，是迈向智能制造、提升核心竞争力的必然路径。本文旨在为此提供系统性的设计方法与应用指南。1直缝埋弧焊钢管生产工艺特点与信息化需求

1.1 典型生产工艺流程概述

直缝埋弧焊钢管的生产始于热轧或冷轧钢板。以JCOE工艺为例，其核心流程包括：（1）原料准备与检验：钢板入厂后，核对材质证明书，并进行超声波探伤（UT）。（2）板端加工：通过铣边机将钢板两侧铣削成坡口。（3）预弯与成型：利用压力机对钢板两端进行预弯，再通过多步冲压（J-C-O）卷制成管坯。（4）合缝与预焊：管坯合缝后，采用气体保护焊（GMAW）进行高速、低热输入的预焊。（5）内/外埋弧焊：在管坯内外，采用多丝埋弧焊（SAW）焊接主焊缝，这是决定钢管强度和韧性的关键工序。（6）扩径与平头：通过机械扩径机对焊后钢管进行扩径，随后对管端进行切割和坡口加工。（7）无损检测与水压试验：对焊缝进行100%超声波（UT）和射线（RT）探伤，并对每支钢管进行静水

压试验。（8）防腐与标识：根据订单要求进行外防腐处理（如3PE涂层），并在管体上喷涂包含规格、钢级、炉批号、生产序列号等信息的永久性标识。

1.2 核心信息化管理诉求

基于上述复杂的工艺流程，直缝埋弧焊钢管生产线对MES系统提出了以下几项核心诉求：

1.2.1 全流程追溯性

必须建立从一块钢板到一支成品管的完整“数字孪生”档案，确保任何一支钢管都能追溯到其使用的钢板炉批、经历的每道工序、操作人员、设备参数、检验结果等全部信息^[1]。这既是产品质量控制的要求，也是行业中客户产品审核、行业现行技术标准（如API 5L）及法规中强制性规定的普遍性要求。

1.2.2 精细化的过程控制

关键工序（如成型、焊接、扩径）的工艺参数（压力、速度、电流、电压、温度等）需要被实时监控和记录，并与预设的标准工艺规程（SOP）进行比对，一旦发生偏差，系统应能及时预警以进行下一步的干预。

1.2.3 高效的生产协同

由于各工序设备昂贵且产能不一，如何根据订单交期、设备状态、物料齐套情况，动态优化生产排程，减少在制品（WIP）积压和设备等待时间，是提升企业生产运转过程中整体效率的关键。

1.2.4 闭环的质量管理

质量检验数据（包括理化性能、无损检测结果、水压数据）需要被系统自动采集或便捷录入，并与产品批次关联。系统不仅应能为合格品自动生成质量报告，而且提供针对不合格品的隔离、评审和处置流程管理，将

全部产出口全部纳入质量管理。

2 MES系统总体架构与集成设计

2.1 三层网络架构

为满足直缝埋弧焊钢管生产线的高可靠性和实时性要求，MES系统宜采用经典的三层网络架构：（1）信息管理层（L3）：此层主要部署MES应用服务器、数据库服务器和Web服务器。它负责业务逻辑处理、数据存储、用户认证授权以及与上层ERP系统的交互。通常位于企业办公网或独立的安全区域。（2）过程监控层（L2）：此层是MES系统的核心，部署在车间控制室内。主要包括工程师站、操作员站（HMI）以及用于与底层设备通信的OPC服务器。该层直接与L1层的PLC/DCS系统对接，负责实时数据的采集、监控画面的展示以及部分控制指令的下发^[2]。（3）现场控制层（L1）：此层由遍布生产线的各类智能物联网设备构成，包括PLC控制器、分布式I/O模块、变频器、智能仪表（压力、温度、流量）、RFID读写器、条码扫描枪以及各类传感器（如焊缝跟踪传感器、管端测量机器人）。它们负责执行具体的控制逻辑和采集原始过程数据。

2.2 与外部系统的集成策略

MES系统作为信息枢纽，因此与外部系统的无缝集成至关重要。（1）与ERP系统的集成：这是实现“计划-执行-反馈”闭环的基础。MES通过标准接口（如WebService, IDoc, 或数据库视图）从ERP接收主生产计划（MPS）、物料清单（BOM）和工艺路线（Routing）等信息。完成生产后，MES将完工汇报、物料消耗、工时统计等数据回传给ERP，用于财务成本核算和库存更新。

（2）与自动化控制系统的集成：MES通过OPC（OLE for Process Control）协议与L1层的PLC/DCS进行高效、稳定的通信。OPC UA（Unified Architecture）作为新一代标准，因其平台无关性和更强的安全性，正逐渐成为首选。通过此集成，MES能够实时获取设备状态、工艺参数、报警等信息，并可向PLC发送启停、配方下载等指令。（3）与实验室信息管理系统（LIMS）的集成：对于理化检验数据（如拉伸、冲击、化学成分），MES可基于标准HTTP协议与LIMS系统通讯，自动获取检验结果，减少人工参与带来的误差、滞后等问题，确保质量数据的及时性、真实性、完整性。

3 MES系统核心功能模块设计

3.1 生产计划与智能调度模块

该模块是MES系统的“大脑”。它首先接收来自ERP的周/日滚动生产计划，根据BOM、工艺路线、原料库存以及设备运转情况，将其分解为具体到每台设备、每个

班次的作业指令。针对直缝焊管生产线设备专用性强、换型时间长的特点，系统应内置高级排程（APS）算法。该算法综合考虑订单优先级、交货期、设备能力约束（如最大壁厚、最小/最大管径）、模具/工装准备状态、物料（钢板）可用性等多种因素，生成最优的生产序列。调度结果以直观的甘特图形式展示，并支持人工微调。一旦生产过程中出现设备故障或紧急插单，系统能快速进行动态重排，最大限度减少对整体计划的影响。

3.2 物料与批次全程追踪模块

该模块是实现全流程追溯的核心。系统为每块入厂钢板赋予唯一的物料编码（通常关联其炉批号），并在其进入生产线时通过扫码或RFID自动识别。随着生产流程的推进，系统自动记录每块钢板被用于哪支（或哪几支）钢管的生产^[3]。对于成品管，系统为其分配唯一的生产序列号（SN）。通过这个SN，可以一键查询到该钢管完整的“血缘”信息，包括所用钢板信息、所有工序的操作记录、设备参数曲线、检验报告等。同时，该模块还管理在制品（WIP）在各工序间的流转，确保物流与信息流同步。

3.3 全面质量管理（TQM）模块

该模块贯穿于生产全过程。从来料环节开始，系统记录钢板的探伤、复验等数据；在生产过程中，系统监控关键质量控制点（如焊接电流电压、扩径量）的SPC（统计过程控制）图表，实现过程预警；在成品检验环节，系统集成水压试验机、无损探伤设备的数据，自动判定合格与否，并生成标准化的电子质量保证书。对于不合格品，系统启动NCR（不合格品报告）流程，记录缺陷类型、位置、原因分析及处置方案（返工、报废），形成完整的质量闭环。

3.4 设备全生命周期运维模块

直缝焊管生产线的设备（如万吨油压机、多丝焊机、扩径机）价值高昂，其稳定运行是生产的前提。该模块建立了完整的设备台账，记录设备的技术参数、异常历史、维修历史、备件清单、定检计划、点检润滑计划、维修预案等。通过与PLC集成，系统实时监控设备的运行状态（运行、停止、故障）、累计运行时间、能耗等关键绩效指标（KPI）。基于预设的保养计划，系统可自动触发预防性维护（PM）工单，根据备件采购周期及备件库存提交非常备件的采购请求。当设备发生故障时，维修人员可通过移动端APP接收报警，查看设备历史数据和维修手册，快速定位问题并完成维修记录，从而缩短平均修复时间（MTTR）。

3.5 能源与成本精细化管理模块

钢管生产是能源密集型过程。该模块通过安装在各主要用电单元（如液压站、焊机、空压机）的智能电表，实时采集电能消耗数据。系统将能耗数据与具体的生产订单、产品规格、生产时段进行关联分析，计算出单位产品的能耗成本。通过对历史数据的挖掘，可以识别出高能耗的工序或设备，为节能改造提供数据依据^[4]。同时，结合物料消耗和人工工时数据，系统能够进行更精确的产品成本核算。

3.6 数据可视化与决策支持模块

该模块通过大屏看板、移动APP、Web报表等形式，对系统数据进行多维度可视化呈现，支撑管理层、车间主任及操作工的分层级信息获取，以透明化管理提升决策效率与响应速度。

4 系统实施的关键技术与挑战

4.1 多源异构数据的可靠采集

直缝焊管生产线设备年代跨度大，通信协议各异（如Modbus, Profibus, Ethernet/IP）。如何经济、可靠地采集这些设备的数据是首要挑战。解决方案通常是采用协议转换网关，将不同协议统一转换为OPC UA标准，再由MES系统集中读取。对于无法联网的老设备，则可通过加装传感器和数据采集模块（DAQ）来实现。

4.2 统一的数据模型与标准体系

要实现全流程追溯和数据贯通，必须建立统一的产品数据模型（PDM）和主数据管理体系。这包括定义清晰的物料编码规则、工序代码、设备编码、质量缺陷代码等。所有业务操作都必须遵循这套统一的标准，才能保证数据的一致性和可分析性。

4.3 网络安全与系统可靠性

MES系统横跨IT（信息）与OT（运营）网络，其安全性至关重要。必须采用部署工业防火墙、网络隔离

（如DMZ区）、访问控制列表（ACL）、VLAN分区、核心数据加密等安全措施，防止来自办公网或互联网的攻击渗透到生产控制网。同时，系统应具备高可靠性设计，如服务器双机热备、数据库集群、UPS电源、关键核心网络采用双环网备份等，确保7x24小时不间断运行。

5 结语

直缝埋弧焊钢管生产线的复杂性和高要求，决定了其对先进制造执行系统（MES）的迫切需求。本文系统地阐述了针对该特定场景的MES系统设计与应用框架。通过构建一个基于三层网络架构、深度集成ERP与自动化系统的平台，并围绕生产计划、物料追溯、质量管理、设备运维、能源成本和数据可视化六大核心功能模块进行精细化设计，能够有效打通信息孤岛，实现生产全过程的透明化、规范化和最优化。尽管在数据采集、标准统一和安全保障等方面仍存在挑战，但随着技术的不断进步，MES系统必将在推动直缝埋弧焊钢管制造业向数字化、网络化、智能化转型升级的过程中，扮演越来越重要的角色，为打造世界一流的智能钢管工厂奠定坚实基础。

参考文献

- [1]贺松松,卢舟进,蒯心雨,等.MES系统在直缝埋弧焊钢管生产线的设计与应用[J].设备管理与维修,2023,(16):112-113.
- [2]王慧霞.MES系统与数字工厂建设对钢铁行业转型升级的推动[J].全面腐蚀控制,2025,39(12):234-237.
- [3]翁翔宇.马钢热轧直装MES系统的优化改造[J].冶金动力,2025,(05):11-14.
- [4]侯玉杰.MES系统管控下的数字化车间在“智改数转”项目的应用分析[J].数字技术与应用,2025,43(08):7-11.