

面向轨交类零部件制造企业的制造执行系统设计

潘勤涛 金钱余 许永辉

常州中车铁马科技实业有限公司, 江苏 常州 213011

[摘要]针对轨交类零部件制造企业多品种、小批量、交付周期短、质量要求高等特点,设计了一种针对性的制造执行系统。该系统基于微服务架构,采用分布式集群部署模式、RESTful 标准化接口等技术,在充分分析系统需求的基础上,与企业资源管理系统 SAP、仓储管理系统 WMS 等系统实现互通互联,并使用手持终端 PDA、电子看板等硬件技术,建立生产经营管理功能和生产计划业务功能,公司生产运营指标持续改善,经营质量显著提升。

[关键词]制造执行系统;微服务架构;互联互通

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20354

中图分类号: TP311.5; F406.4

文献标识码: A

Design of Manufacturing Execution System for Rail Transit Component Manufacturing Enterprises

PAN Qintao, JIN Qianyu, XU Yonghui

CRRC Changzhou Tech-Mark Industrial Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213011, China

Abstract: A targeted manufacturing execution system has been designed for rail transit component manufacturing enterprises with multiple varieties, small batches, short delivery cycles, and high quality requirements. The system is based on a microservice architecture and adopts distributed cluster deployment mode, RESTful standardized interface and other technologies. Based on a thorough analysis of system requirements, it is interconnected with enterprise resource management systems such as SAP and warehouse management system WMS. Hardware technologies such as handheld terminal PDA and electronic kanban are used to establish production and operation management functions and production planning business functions. The company's production and operation indicators continue to improve, and the quality of operation is significantly enhanced.

Keywords: manufacturing execution system; microservice architecture; interconnection and interoperability

引言

制造业是一个国家重要的经济支柱产业,其制造技术的先进程度直接代表了生产力水平的高低^[1]。世界各国都在加大先进制造业的发展,抢占产业制高点。2008 年金
融危机后,美国为扭转“产业空心化”,重振制造业,推行“再工业化”战略,推出了“工业互联网”计划,侧重通过软件力量提升传统工业,目标是巩固美国在全球制造业的领先地位。2011 年,德国人工智能研究中心提出通过物联网推动第四次工业革命,第二年推出工业 4.0 战略计划,核心是利用信息物理系统(CPS),将传感网与物理世界紧密连接,实现生产全流程的智能化,目标是 2030 年前将 AI 应用推广至工业领域。

中国部署了“中国制造 2025”战略^[2],计划通过五大工程和十大领域,力求通过“三步走”实现从“制造大国”

向“制造强国”的转变。“中国制造 2025”规划将制造业创新发展作为核心主题,融合新一代信息技术为主线,主攻智能制造,实现制造业由“大”变“强”的高质量发展^[3]。

2021 年 12 月,工信部正式发布《“十四五”智能制造发展规划》,系统部署制造业智能化转型的顶层设计,旨在促进制造业高质量发展,提升我国在全球产业链中的核心竞争力^[4]。

2021 年 12 月,工业和信息化部联合国家发展改革委、教育部、科技部等八部门,正式印发《“十四五”智能制造发展规划》,系统部署制造业智能化转型的顶层设计:到 2025 年,规模以上制造业企业大部分实现数字化网络化,重点行业骨干企业初步应用智能化;到 2035 年,规模以上制造业企业全面普及数字化网络化,重点行业骨干企业基本实现智能化。《规划》中将智能制造定义为新一

代信息技术（如人工智能、大数据、物联网）与先进制造技术深度融合的制造模式，通过“数字化、网络化、智能化”手段，实现制造全过程的自主感知、智能决策、精准执行和动态优化，推动生产效率和质量的全面提升^[5]。

制造业的智能制造转型升级离不开生产过程信息化，制造执行系统（Manufacturing Execution System, MES）是制造业信息化架构中的核心环节，是一种用于车间生产的管理系统^[6]，它作为制造企业管理层和执行层的桥梁和引擎，紧密对接上层的信息管理系统和底层的工业控制，具备现场生产计划管理、设备管理、实时监控、库存物料管理等功能，能够实现生产过程透明化、柔性化生产、提供实时决策数据、打通信息孤岛的管理价值。

20 世纪 90 年代初，制造执行系统的概念最早由美国先进制造研究机（Advanced Manufacturing Research, AMR）提出，明确其定义：制造执行系统，用于生产数据的采集^[7]。AMR 将 MES 界定为衔接上层计划管理系统与下层生产控制系统的“车间级生产信息管理中枢”，实现车间管理层与基层执行层之间的数据采集、实时传输及双向交互，进而达成生产过程的精细化管理目标^[8]。

最早的 MES 系统是传统单体系统，具备耦合度高、扩展性差、技术栈单一、系统升级困难等特点，限制了制造系统的运用和普及。随着软件架构技术和云计算技术发展，具备低耦合、高扩展性和良好通用性的基于微服务架构的 MES 系统作为这一新兴产物，吸引了众多学者的关注与研究。

北京交通大学的李昊燃^[9]针对传统 MES 单体架构扩展性差、响应慢的问题，提出基于微服务架构的解决方案，

设计了可量化功能分解方法及分层重构模型（人机界面/业务流程/数据访问层），并通过原型系统验证其能快速适应车间需求变化，提升了 MES 的重构效率和柔性生产能力^[9]。重庆交通大学的张旭针对传统 MES 系统耦合度高、可扩展性差和通用性差的问题，设计的基于微服务架构的车间 MES 系统解决了传统单体式架构 MES 系统耦合度高、可扩展性低以及通用性差的诸多问题，还具备较高的可靠性、较快的响应速度、适宜的吞吐量^[10]。

轨道交通制造业属于国家战略性新兴产业，是高端装备制造业的重要组成部分，在国民经济中占据战略地位。但随着市场竞争加剧和产业迭代升级，市场竞争态势陷入恶性循环，成本承压严重；生产过程质量追溯能力不足，存在大量纸质记录和信息孤岛，数据采集主要依赖人工填报，追溯难度高，效率低；生产运营管理能力不足，基础数据互通不足、异常响应不及时、现场柔性制造能力不强等现实问题突出；制造系统存在信息孤岛，制造型企业普遍安装较多信息化系统，比如 SAP、WMS、QMS 等。

为解决上述问题，本文针对轨道交通制造型企业的生产特性，设计了一种集生产过程管理和运营管理相结合的数字制造系统，以此实现生产数据的实时采集、分析与反馈，提升生产效率，保障产品质量，降低运营成本。

1 系统需求分析

系统需求分析是连接业务需求与技术实现的桥梁，作为项目范围基准，可以防止需求蔓延和范围失控，为系统设计、开发、测试提供明确依据和方向。

针对公司现状，结合系统需求目标，有针对性地制定建设方案，如表 1 所列。

表 1 制造执行系统（MES）的需求分析

	现状	需求	方案
计划模式	计划模型均为推动式生产	优化为拉动式生产	针对拉动系统的运算参数，并设定预测调整参数，系统自动计算超市水位。系统基于在制和存货数量提示需要的补货数量，在 MRP 的计算结果基础上投放生产任务。不对生产订单自动投放和创建。
质量追溯	以纸质记录为主，存在较多重复记录、无效记录	实现人、机、料、法、测的信息化追溯	通过工单的批次拆分，按照工单流转批次任务进行串联，在工序过程中实现组件防错，自制件物料实现扫描标记，针对采购件支持手工录入标记。
管理体系	指标和会议均通过线下记录和跟踪	对制造过程业务数据形成数据报表，对任务项实现闭环跟踪	形成质量、存货、损失、计划的指标分析报表，建立数字会议，辅以生产驾驶舱。
产前检查	管理规则不系统	对不同产品确定产前准备管理机制	配置对人、机、料、法、测的产前管理方案，设置开关，实现柔性管理。
计划执行	计划管理缺少系统规则，K3 汇报简单	实现对产品和工序额标准化管理模式，并实现基于现场汇报	建立柔性系统，细化至工序级别派工方式、派工精度、开工条件、报工条件；配置工控机以及移动端，基于工序汇报。
过程质量	过程质量检验以线下单据为主	实现信息化的记录，检验数据支持分析	通过系统设定产品过程质量检验策略、检验方式、检验地点，通过信息化的方式对检验任务进行管控。
设备管理	通过安灯和线下单据管理设备异常，缺少故障模型，难以进行数据统计分析，备品备件管理较难。	在系统平台上进行设备管理，包括计划保养和设备故障处理	对设备故障维修以及计划保全进行信息化流程设计，建立备品备件的安全库存和管理机制

2 系统架构设计

在制造企业中，制造执行系统 MES 通过连接企业计划层与车间控制层，能够实现执行数据的实时反馈与生产指令的分解，解决 ERP（Enterprise Resource Planning，企业资源计划）与车间控制层（如 SCADA、PLC 等）之间的信息断层问题^[11]。MES 在 SAP 系统和基础控制模块之间充当“桥梁”作用，能够通过工作指令下发、实时数据采集、生产过程监控、生产过程质量管理等功能，提高生产效率和资源利用效率。

本文设计的制造执行系统 MES，与企业资源管理系统 SAP、仓储管理系统 WMS、供应商委外平台金蝶、信息推送平台中车通、客户服务平台互联互通，系统总体架构如图 1 所示。

通过建设一体化的制造执行系统(MES)，对公司 SAP、WMS、供应商协作、中车通、客诉信息平台等信息系统进行架构集成，打破信息孤岛，建立以 MES 平台为核心

的生产系统。

外部信息系统集成。为了确保系统数据贯通，基于异构系统的接口集成逻辑，对 SAP、WMS、中车通、客诉信息平台进行集成。从 SAP 系统获取“物料主数据以及生产订单”，返回“工序汇报、自动倒冲领料以及自动入库”；从 WMS 系统获取“销售发货记录”，返回“生产拣货任务需求申请和生产入库申请”；向中车通返回“待办任务、生产异常推送、系统集成异常推送”；从供应商委外平台获取“供应商汇报信息”，返回“供应商派工信息”。

外部信息系统改造。为适配制造执行系统需要，对建成的 SAP、WMS、供应商委外平台系统进行升级改造：优化制造 SAP 系统的工艺路线功能模块、替换原供应商委外平台、改造 WMS 拣货和发货功能模块。

3 系统功能设计 & 特点

在制造执行系统 MES 中，系统功能主要分为管理功能、业务功能和基础设置，功能架构如图 2 所示。

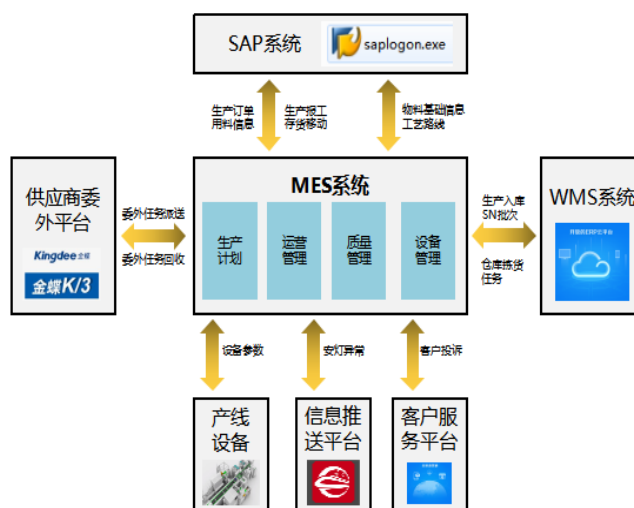


图 1 制造执行系统 MES 架构图

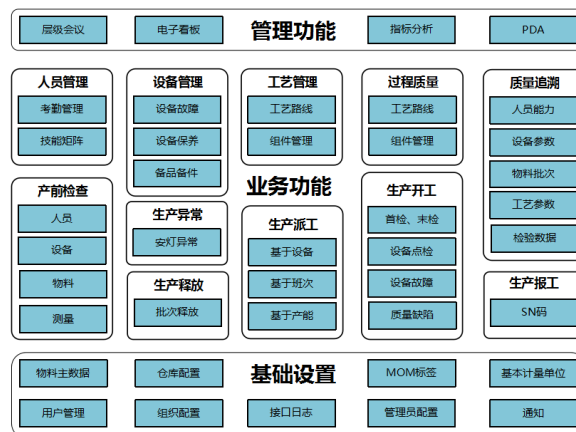


图 2 制造执行系统功能概览

3.1 基础设置

基础设置包括物料主数据、仓库位置配置、追溯标签设置、用户管理、生产组织管理、生产计划管理员配置、异步接口日志等配置。

物料主数据、仓储位置配置和 SAP、WMS 系统同步，物料码、物料名称、计量单位等物料数据信息保持一致，不用单独设置，保证数据互通性。

用户管理是系统用户管理模块，设置用户新增、删除、禁用、重置、操作功能配置等功能。

接口日志涉及多个信息系统交互，如下单、报工、入库申请、委外订单申请、生产订单关闭等，系统接口之间“发送成功”“发送失败”“待发送”“重新推送”等操作都在接口日志中实现。

3.2 业务管理

业务功能是制造执行系统 MES 的核心业务模块，包括人员管理、设备管理、工艺管理、过程质量、质量追溯、生产检查、生产释放、生产派工、生产开工、生产报工、生产异常管理等。

人员管理主要围绕一线生产人员考勤和技能，技能等级分为学徒、不能独立作业、独立作业、可进行培训、专家五个等级，不同等级对应现场人员的作业范围。

设备管理属于制造执行系统的核心功能。建立设备全生命周期管理，设备实现一物一码，从入固开始建立履历单，到报废结束，设备的一切变化均可在系统内记录、查询。设备日常点检、故障报修流程，均在系统完成，相关故障总结均能一键查询，相关的 MTTR、MTBF、OEE 设备指标可由系统生成，并能够基于数据库给出设备维修建议、维保时间等。同时关联设备备品备件，可实时统计消耗情况及库存，并基于大数据统计备品备件采购数量与频次。

制造执行系统 MES 的工艺路线由 SAP 同步而来，但比 SAP 更为完善。MES 系统可以完善和补充更多工艺信息，包括可以上传每个工序对应的工艺文件和版本号。当工艺路线和工艺文件发生变更时，可以在工艺路线配置中进行维护，相对应的工艺信息自动和工单绑定，实现工艺路线和工艺版本的过程追溯。

在过程质量方面，主要以软件开发的形式，将过程质量检验流程按照既定标准实现与生产进度的融合，大幅提升检验过程的透明化与质量管理合规性，降低过程质量管理风险。

质量追溯是制造执行系统 MES 开发的核心功能。以线下数据追溯的要求与实践逻辑为基础，通过软件开发，建立了产品过程数据双向追溯机制，以产品发生问题的节点，向前可追溯来料批次、设备、工艺、人员、生产日期等信息，向后可追溯问题产品的流向、库存等信息，准确高效定位产品质量问题的关键点，实现快速围堵，冻结相关批次产品流转，减少二次损失。最终能够基于产品编号以及产品批次号，实现一键式追溯，响应时间达到秒级，部分产品生产过程无纸化记录达到 100%、自动数据记录达到 90%，大幅提升数据记录准确率及效率，同时基于信息化系统进行处置以及跟踪闭环。

生产任务单执行过程包括：生产检查、生产释放、生产派工、生产开工、生产报工。基于不同产品的特点要求，通过人、机、料、法、环和测的产前预管理，充分对生产要素检查和控制，提高生产制程的稳定性及周转速度；基于不同的产线以及区域实现灵活的派工方案，基于班次派工、设备派工以及人员派工。

按照异常的特点，生产异常主要分为设计异常、人员不足异常、计划异常、设备异常、能源异常、质量异常、物料异常、工艺异常、信息软件异常。表 2 罗列制造执行系统 MES 的异常分类。为提高异常的快速响应和关闭，在 MES 系统中建立异常快速升级和响应机制，依托中车通信息推送，实现生产异常的“逐层”升级。“处理层”通过系统建立的“OPL”功能及时填写解决方案，形成无纸化记录。

3.3 管理功能

管理功能包含层级会议、指标分析、电子看板、PDA 辅助等核心功能，属于生产精益运营功能范畴。

层级会议利用现代信息技术手段，对传统会议模式进行升级改造的会议形式，包含 T1/T2/T3 层级会议。通过数字化工具和平台，实现会议的全流程在线化、智能化，提升会议效率、降低运营成本。

搭建涵盖结果型、关键型、监控型、改善型的指标树，“工位级-班组级-部门级-公司级”四级指标能够实现按年度、月度、日度实时统计监控与分析。

以指标为基础，建立了公司生产运营数据可视化电子看板，构造了工厂级、产线级的数字化精益运营指挥驾驶舱，工厂级驾驶舱包含流程、安全、质量、成本、存货、产值、交付等运营指标；产线级驾驶舱包含了生产核心三要素：质量、成本、交付。

表 2 生产异常类型分类及表现

序号	异常类别	异常现象描述
1	设计异常	因自主设计图纸、BOM 或技术条件等问题导致的生产停滞
2	人员异常	(1) 人员紧缺、临时请假等异常导致的生产停滞
3	计划异常	(1) 因无订单导致的无法领料、派工等引起的计划异常 (2) 紧急变更的生产计划, 包括插单、停工、换型等 (3) 无 SAP 任务单支撑的生产任务
4	设备异常	(1) 设备故障, 导致的停产 (2) 设备性能下降, 导致的减产 (3) 现有设备的改造, 导致停产
5	能源异常	(1) 因水、电能源方面导致的生产停滞
6	质量异常	(1) 物料配送至生产现场, 物料质量异常导致的生产停滞, 包括物料尺寸异常、外观异常等 (2) 定期检测的设备、工量具过期导致的生产停滞 (3) 过程检验不合格, 包括随线检查、中间工序停止点检查 (4) 成品检验项点不合格, 包含内部成品检验、验收检验
7	物料配送异常	(1) 物料未按计划配送到现场导致的生产停滞 (2) 未按 BOM 表进行配送 (整批) (3) 配送混料 (4) 产品汇报入库时, 因物料成本差异导致无法报工 (5) 因物料价格未维护导致的无法领料、派工等引起的异常 (6) 根据生产计划提前获悉的缺料, 导致计划无法正常开展
8	工艺异常	(1) 工艺 (标准) 方法未明确, 无法生产导致的生产停滞, 如无作业指导书、无工艺交底等 (2) 新产品、新工艺的模具、工装、夹具缺失, 无法开展生产 (3) 工艺 (标准) 方法不适用导致的生产停滞 (4) 首次不明原因的工艺难题, 如例行试验报警、漏气、压力值不合格、零件无法装配 (5) 因成品价格未维护导致的无法领料、派工等引起的异常 (6) 因工艺路线或者工艺 BOM 问题导致无法领料、派工等引起的异常
9	信息流异常	原因不明的信息软件操作异常, 包括 SAP/WMS/MES/CRM 软件等

PDA 属于系统辅助设备。MES 系统主要在网页 WEB 端操作, 但部分生产操作指令嵌入 PDA 中。PDA 辅助设备可以执行生产任务单派工、开工和报工; 开工前, 通过 PDA 对设备点检, 相关设备信息通过 PDA 采集进入数据库; 生产开工过程中, 发现设备故障、质量异常, 可以通过 PDA 呼叫, 录入信息会传入相关责任人 WEB 端; 同时, PDA 可以执行物料防错和质量追溯。

4 系统技术特点及优势

制造执行系统 (MES) 采用微服务架构设计, 具备系统扩展性、集群性、集成性、安全性。

采用微服务架构设计, 兼容整体横向和纵向扩展。横向通过新增服务节点, 确保负载均衡, 满足当前和未来的扩容; 纵向通过服务器配置升级、核心算法优化, 高效处理海量生产数据, 实现移动端管理、大数据分析等场景。

系统搭建分布式集群部署模式, 部署 3 个应用节点、2 个数据库节点, 配置 Nginx 负载均衡器, 核心实现分层和冗余。Nginx 负载均衡器整体调度, 接收所有请求, 按策略分发到 3 台后端服务上, 实现分流和故障自动转移, 保证服务可用。3 个应用节点共同运行一套系统, 分别具体执行 MES 系统的核心功能, 统一由 Nginx 指派。Nginx

设置轮询方式分发, 3 个节点并行工作, 共同处理系统业务。数据库节点采用主从复制方案, 主节点设置可读写, 从节点设置只读, 数据通过半同步复制方式同步。

采用 RESTful 标准化接口, 集成 SAP、WMS 系统, 消除批量接口的数据延缓。设置业务流程自动化, 实现“从下单到发货”的全流程自动化。以 BPM 为源头, 在 SAP、MES、WMS 使用统一的数据标准, 相同的物料编码、库位编码、订单编号、产品名称等数据体系。根据 ISA-95 国际标准, 标准化 JSON 数据格式和接口规范。同时, 集成接口之间采用“同步转异步”模式, MES 收到请求后, 立即返回“202 Accepted”及“taskId”, SAP 和 WMS 通过“GET/task/{taskId}”轮询状态。MES 系统设置 10 分钟的超时阈值, 以防任务卡死导致系统崩溃。按照业务功能分为供应链管理、生产管理、质量管理、设备管理、生产指挥驾驶舱核心模块, 各模块功能集中, 模块之间通过标准化接口进行数据交互, 无过度耦合。

设计“账号密码+NFC”双因素认证、分级授权架构。采用“账号密码+NFC”身份认证模式, 验证使用者、数据发送者及接收者的身份合法性, 对数据修改、权限变更等敏感操作, 额外增设数据审核环节; 设计分级授权认证,

根据岗位职能划分管理员、操作员等角色,权限界定明确;设置账号锁定机制,认证失败3次后自动锁定账号,1小时后可解锁;建立安全日志审计机制,全程记录用户操作及系统运行日志,用作安全追溯;建立异常数据实时监测机制,及时捕捉数据异常,向管理员发出预警。

5 结论

面向轨道交通类装备制造企业的制造执行系统已成功在江苏某零部件制造企业运用。通过系统的上线运用,实现了不同信息化系统的串联贯通,形成了以物料 BOM、工艺路线、生产管理方案、异常推送为代表的数字化管理基础库。完善了数字化管理流程的标准化建设,建立了以留样质量控制管理流程、委外物料管理流程、供应商送料以及批次为代表的改善流程。建立了数字化运营管理体系,包括基于数字化的 SQDCI 指标树、监控、目视化、层级会议与指标的联动,开展指标达成分析等内容。同时,通过系统运用,公司生产运营指标持续改善,经营质量显著提升。产品制造过程的质量问题持续下降,产品整体合格率提升 2%;生产订单的执行过程更加通畅,订单关闭及时率提升 25%,异常处置时长降低 51.3%;现场物料堆积情况大幅改善,半成品存货下降 29.7%,设备 OEE 提升 4.54%,达到 75%左右。部分关键产品的过程检验数据采集实现 100%,工艺参数采集实现 45%,设备状态采集实现 45%。因此,极大地改善了企业的生产过程管理能力,全面提升公司综合竞争力。

6 结束语

当前,智能制造技术日新月异,朝着“信息化、智能化、数字化”方向迅速迭代发展。随着 AI 时代到来,AI 正从“赋能工具”转变为重塑全球制造业竞争格局的核心引擎。面向轨道交通装备制造业的制造执行系统将借助 AI 技术,进一步朝着智能检测、预测性维护、供应链优

化、生产智能排产等方向迅猛发展。企业在当前系统建设基础上,总结经验,深入挖掘,公司经营效益将更加明显。

[参考文献]

- [1]王娟.面向智能制造的雾计算关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2019.
 - [2]周济.智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015(17):2273-2284.
 - [3]王喜文.中国制造 2025 解读[M].北京:机械工业出版社,2015.
 - [4]董凯.“十四五”智能制造发展规划解读及趋势研判[J].中国工业和信息化,2022(1):26-29.
 - [5]朱志刚,周杰.以客户为中心的离散智能制造思路范式与整体模式研究[J].中国安防,2022(12):64-71.
 - [6]潘志强,朱硕,江志刚,等.加工要素数据驱动的再制造产品工艺可靠性预测方法[J].计算机集成制造系统,2023(3):143-152.
 - [7]Mancarella P.MES (multi-energy systems):An over view of concepts and evaluation models[J].Energy,2014,65(2):89.
 - [8]MES A International.MES Explained:A High Level Vision[J].WhitePaperNumber,1997(6):77.
 - [9]李昊燃.基于微服务的 MES 可重构架构及关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2022.
 - [10]张旭.基于微服务架构的车间 MES 系统设计与实现[D].重庆:重庆交通大学,2023.
 - [11]饶运清,李培根,李淑霞,等.制造执行系统的现状与发展趋势[J].机械科学与技术,2002(6):1011-1016.
- 作者简介:潘勤涛(1975—),男,汉族,江苏省常州人,高级技师,本科,毕业于河海大学机械设计及自动化专业,生产管理。