

中压开关制造的数字化探索实践

文/天水长城开关厂有限公司

随着产品的更新换代，天水长开原有的生产模式和技术装备已无法满足新一代产品的生产要求，生产组织、管理等更是无法得到进一步的提升与放大。企业无法实现产品的升级换代，很难发挥规模优势，带动产业链相关企业共同发展。面对困境，天水长开积极应对，大胆创新求变，决定以智能制造为抓手，助力企业的转型升级。

天水长城开关厂有限公司（以下简称“天水长开”）始建于1969年，是国内输配电开关行业的大型专业化国有企业，是兰州长城电工股份有限公司的龙头子公司，具有年产开关柜8 000面、开关元件8 000台的生产能力。多年来，天水长开坚持技术创新，产品以小型化、智能化和高可靠性引领国内行业发展，出口欧、美、澳、亚和非等46个国家和地区，服务于国内电力、石化、煤炭和铁路等20多个行业，并在三峡工程、神五工程、神六工程、青藏铁路、中国航天酒泉发射基地、核电及国防建设等国家重点项目中发挥着重要作用。

天水长开在国内中高压开关设备研发、制造及销售领域一直处于领先地位，各项技术经济指标在国内高压开关行业名列前茅，在激烈的市场竞争中保持了“三个第一”：10 kV开关柜在全国同行业的产量第一，国内重点火电建设项目选用天水长开产品的比例第一，国内重点石化建设项目选用公司产品的比例第一。在国内火电、石化和冶金等大中型重点工程领域的市场占有率保持30%以上，部分领域达到70%以上。

求变：在困境中谋求发展

随着产品的更新换代，天水长开原有的生产模式和技术装备已无法满足新一代产品的生产要求，生产组织、管理等更是无法得到进一步的提升与放大。企业无法实现产品的升级换代，很难

发挥规模优势，带动产业链相关企业共同发展。面对困境，天水长开积极应对，大胆创新求变，决定以智能制造为抓手，助力企业的转型升级。

经过充分的市场调研，天水长开决定通过建设中压开关设备制造数字化车间，实现由传统模式向现代数字化生产模式的转变，在提升公司产能的同时，带动区域电工电器产业实现集群化发展，释放出规模效应。通过数字化车间技术的运用，提升开关设备制造的技术水平、产品实物质量和劳动生产率，大幅降低工人劳动强度和能源消耗，实现清洁生产和低碳生产。通过建设数字化车间，实现天水长开的“三个升级”，即产品升级、产能升级和管理升级，实现精益化生产，并继续引领行业的发展。

1. 产品升级

建设先进的开关元件、设备装配生产线及配套系统，为实现近年来开发的具有自主知识产权、技术性能达到国内乃至国际领先水平的新一代产品的产业化生产，为天水长开“十二五”转型跨越式发展奠定坚实的基础。

2. 产能升级

实现天水长开生产由传统模式向现代数字化生产模式的转变，使天水长开的年生产能力从年产成套开关设备8 000面、开关元件8 000台提升至年产开关设备15 000面、开关元件18 000台。

3. 管理升级

从车间的总体角度出发，对生产设备、物流

设备和在线自动检测设备等引入数字化和智能化技术,并引入MES系统等先进的管控方法,有效提高天水长开的生产管理水平,降低生产人员劳动强度,实现人性化管理,并降低生产对工人技能的依赖程度。此外,项目设计中还充分考虑了环境保护和节能措施。

谋变:开启数字化转型升级

天水长开建的中压空气绝缘开关设备数字化车间主要包含智能化设计、开关元件的生产制造,开关设备的生产制造,以及主回路制造、二次线束制造、钣金加工、箱壳制造和母线制造等分系统,如图1所示;可完成中压开关装置由基础核心元件到整套设备的完整生产过程。数字化车间占地面积 2.3万m^2 ,可达到年产6万只灌封极柱、1.8万台真空断路器和1.5万面成套铠装柜的生产能力。

各系统在数字化车间中发挥不同的作用,相互协同构成完整的智能化制造系统。数字化车间的运行包含车间运行管控系统以及底层的数字化设备,车间运行管控系统是实现智能化制造的核心,它包括制造执行系统(R-MES)、目视化管理(Andon)、仓储管理(WMS)和设备监控等生产现场运行管控系统。运行管控系统从企业资源计划系统(CTCS-ERP)接收命令,下达到各个分系统生产单元或设备,并监控分系统和设备的运行状态,处理生产现场的各种问题,根据实际生产状态进行调度。

底层的数字化设备包括智能化输送设备、在线检测设备、现场控制计算机、自动化仓储和运输设备等。通过设备配置的数字化接口和工业以太网,实现生产过程的智能化监控和调度。

1. 智能化设计分系统

智能化设计分系统包括三维数字化仿真与优化设计平台、产品全生命周期数据管理平台。

PDM系统是面向三维产品设计的数据管理系统,它以三维设计工具产生的数据为管理对象,建立对模型文件、工程图样和模型属性数据等静态数据和工作流程、历史印迹等动态数据的管理,实现基于订货参数、设计配置环境等之间的集合关系,为数字化车间实现从订货合同开始到生产计划过程中的产品参数自动配置搭建高效的管理平台。

产品设计管理体系的方案设计包括Pro/E的

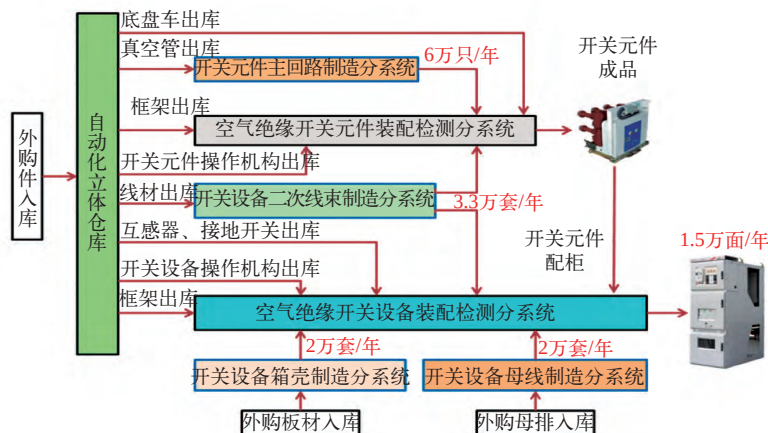


图1 中压空气绝缘开关设备数字化车间系统组成

集成管理、产品设计过程管理、设计更改管理以及工程设计管理体系的方案设计。工程设计的主要工作是如何重新构造一次方案库和工程选项件的管理问题。天水长开的想法是对一次方案和工程选项件设定参数,通过参数化的方式来管理一次方案信息和结构件的工程选项。

本系统的三维基准产品数据正式发布后自动向ERP传递产品数据,发布后的数据传递只是对ERP数据的初始化,工程设计在利用基准产品数据时,PDM系统要作严格控制,工程设计只能利用已发布的基准产品数据;工程设计在明细配置与工程选项配置结束进行3次发布时,向ERP传递完整的、最新版本的产品数据结构与物料。工艺设计CAPP系统在利用基准产品数据时,PDM系统要作严格控制,工艺路线在编制过程中同时向ERP传递完整的工艺路线信息。最终,完成全系统的闭环反馈。

2. 开关设备制造分系统

该分系统用于中压开关设备的组装生产,包括2条 $12\sim 24\text{ kV}$ 及1条 40.5 kV 空气绝缘开关设备(铠装柜)自动化生产线,生产线可完成开关设备(铠装柜)的拼柜、机构装配、一次元件安装、二次元件安装、仪表箱安装、耐压试验和终检测试等工序。实现开关设备由零部件到成品的全程流水线方式批量生产。

3. 开关元件制造分系统

空气绝缘开关元件制造分系统用于中压开关元件(主要是真空断路器)的组装生产与检测,根据产品的电压等级与结构特点设置2条 $12\sim 24\text{ kV}$ 及一条 40.5 kV 真空断路器自动化生产线,生产线可完成断路器的操作机构装配、一次主回路装

配、机械磨合、机械特性测试、耐压测试、开关元件尺寸检测和终检测试等工序；实现开关元件由基础零件到完整成品的自动化生产。

4. 开关设备箱壳制造分系统

开关设备箱壳制造分系统包括全自动钣金立体仓库、数控转塔冲剪复合单元、数控转塔冲床、数控折弯机、液压摆式剪板机和基于机器人的全自动折弯工作站；可实现钣金材料集中化管理和钣金零部件自动化加工，具备为年产量20 000面开关设备提供配套钣金件的生产能力。

5. 开关设备母线制造分系统

开关设备母线制造分系统包括母线立体料库、数控母线冲剪一体设备及折弯机、三工位母线加工设备、数控母线圆弧加工中心以及母线打磨台、超声波清洗、喷漆设备、搪锡和热缩套管加工等辅助设备和配套的排风、污水处理设备，具备年产20 000面开关设备配套母线的生产能力。

6. 开关设备二次线束制造分系统

二次线束制造系统主要由Komax Gamma 333 PC全自动电线束加工系统、SuperWorks工程软件以及微机剥线机、全自动端子压接机、强力粗线型微机剥线机、自动尼龙扎带机和端子号打印机等二次线制作设备以及配线台案等工位器具组成；可将由导线CAE系统自动生成的开关设备内二次线束相关信息自动输入线号打印机、下线机，完成从切线、剥线、线号打印和到端头压接等工艺环节的全过程自动化加工，实现二次导线的全自动批量生产，满足年产20 000面开关设备及20 000台开关元件配套所需二次线束的生产能力。

7. 开关元件主回路制造分系统

开关元件主回路制造分系统包括极柱装配台、极柱灌封单元，以及用于局放试验的多通道数字式局部放电综合分析仪、校准脉冲发生器及其附件、试验自动控制系统软件、高压试验系统和局放试验屏蔽室等，主要用于固封主回路灌封以及局部放电检测等。

8. 仓储及物流分系统

自动化仓储及物流分系统包括1座4巷道3 876货位的自动化立体仓库、4台巷道堆垛机、配套托盘、库端自动输送设备、电器控制单元以及仓储管理系统（WMS），可实现自动化进出物料及管理。

9. 制造执行系统

制造执行系统用于将车间生产现场的诸多生产设备、检测设备和物流输送设备的控制系统通过必要的软硬件接口与企业资源计划联系起来，能够实时收集生产过程中数据信息，并作出相应的分析和处理，实现数字化车间信息全集成。

应变：数字化、智能化和自动化

天水长开的数字化车间通过检验工序化、加工设备数控化、关键设备智能化、仓储物流自动化和车间管理信息化，达到了加工、装配和检测一体化，实现了开关设备制造的自动化、信息化和智能化。

1. 产品设计的智能化

在产品设计中将虚拟仿真技术真正融入到产品研发的全过程中，使仿真分析工程师与设计、工艺和制造工程师协同工作，实现从事多个学科虚拟仿真的工程师之间的协作，并以产品数据管理系统为集成平台，真正实现仿真驱动产品设计，产品设计引领工程设计和工艺设计，实现产品建模、虚拟装配和干涉分析的产品设计智能化的硬软件环境。图2所示为产品设计智能化总体示意图。

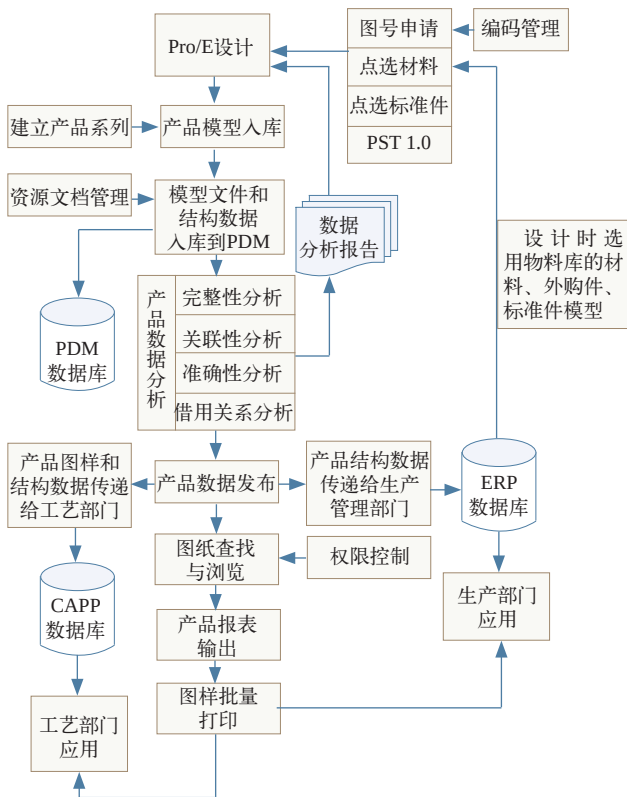


图2 产品设计智能化总体示意图

2. 钣金加工的全自动化

钣金制造系统由自动上下料系统、自动化冲压单元、小料分选出料系统、自动化冲剪复合加工单元、机器人自动折弯单元和自动化大型钣金立体仓库单元组成。

制造系统各子单元均采用工业以太网线与现场总线互联，实现加工信息按需上传和下达，通过向仓库发出所需板材的规格、数量等信息的请求信号以及完成批量加工后的出料或入库的请求信号，仓库按照请求信号的紧急系数等级，自动排序响应各加工单元的请求并完成相应进出料任务及计划核销工作。

3. 仓库系统的智能化

针对立体仓库的库存智能化管理遵循以下原则：就近入库原则；按入库时间优先出库原则；层优先原则；路径优化原则；空托盘出库优先原则；满托盘出库优先原则；库存报警信息。

4. 车间调度管理的智能化

MES系统作为企业信息化系统的中间层，专注于制造执行过程的管控一体化，在企业总体信息流中起着承上启下的关键作用，通过上接ERP、PDM等管理系统，下连生产线、专机设备等底层控制系统，实现上层指令的下达执行，以及底层数据的实时采集、反馈，综合管理制造过程计划、装配、物料、质量和设备运行监控等业务流程，实现制造过程物流、信息流的统一管理。

ERP系统与MES系统无缝集成，主要实现以下功能：计划下达、工作单下达、限额领料（物料调达反馈）、完工入库、质量信息收集或即时评判以及设备运行情况记录等。

5. 断路器视觉检测的智能化

基于机器视觉的开关元件智能检测技术可替代国内外一直使用的模拟配柜检测方法，实现定性测试到定量测试的进步，适应检验工艺化以及精益生产的要求。

该检测单元通过检测元件提取产品特征形状，并根据形状特征判别所装配零件的类别及产品型号，数字控制系统根据产品型号调用相应的处理程序对检测元件所测得的数据进行智能处理，并可进行开关元件外形尺寸以及开关元件与开关成套设备配合尺寸的检查，检测项目包括相间距离、含触头的触臂长度以及提门弯板高度与位置等内容，对检测数据与产品数据库的内容进行比对，并可根据预设的规则进行产品质量的判断分析。



图3 开关设备制造数字化车间

改变：先进生产模式提升企业综合实力

开关设备制造数字化车间（如图3所示）集产品设计的智能化、钣金加工的智能化、仓储系统的智能化、车间调度管理的智能化和断路器视觉检测的智能化于一体，这种先进生产模式有利于行业技术水平的整体提升。

1) 通过该数字化车间建设，将多项研究成果进行了应用转化。如机器视觉技术应用于断路器非接触测量，将高压隔离防护领域相关技术运用在断路器产品耐压测试过程的无人化自动操作，自动化物流技术应用在全自动磨合，特种电源技术应用在开关检测专用设备中。这些研究成果于数字化车间中的应用，在实现其自身的潜在价值的同时，提升了数字化车间的整体技术水平，其中多项技术的应用在国内外开关设备生产行业属于首创，促进了行业技术水平的提升。

2) 中压开关设备制造数字化车间由多个分系统组成，各分系统涉及到物流仓储、机器人控制、钣金自动加工、自动化装配、自动检测、车间生产管理、能源管理和ERP管理等多项专业领域，有机整合形成数字化车间这一完整的中压开关设备生产系统。提供从零部件自动化生产、车间自动化仓储与物流管理到整机装配、自动化检测的整体解决方案，这种整合不是有关设备简单的组合和成套，而是相关技术的深度集成与融合，产生了 $1+1>2$ 的效果。

3) 数字化车间使天水长开在未增加人员的情况下，成套开关设备年生产能力从8 000面提高到15 000面、开关元件年生产能力从8 000台提高到18 000台（一班工作制）。实现了产品升级、产能升级和管理升级，开关设备年销售收入可达到14.2亿元，如果根据市场需要执行2班或3班工作制，生产能力还有进一步提升的余地，天水长开的经济效益得到了大幅提升。EA