

文章编号: 1671-7848(2005)06-0505-06

## 制造执行系统的研究现状和发展趋势

柴天佑, 郑秉霖, 胡毅, 黄肖玲  
(东北大学自动化研究中心, 辽宁沈阳 110004)



**摘 要:** 制造执行系统(Manufacturing Execution Systems, MES)是制造(生产)过程的计算机在线管理系统, 处于制造企业计划层与控制层之间的执行层, 是企业资源计划系统和设备控制系统之间的桥梁和纽带, 是制造企业实现敏捷化和全局优化的关键系统。综述了制造执行系统MES的产生与发展过程, 以及MES的功能模型, 给出了协同的MES功能模型和实现综合生产指标优化的流程工业MES功能模型, 分析了MES的应用现状, 提出了MES的发展趋势和实现管理扁平化和综合生产指标优化的流程工业MES所需要的关键技术。

**关 键 词:** 制造执行系统; 敏捷化; 综合生产指标; 流程工业

**中图分类号:** TP 18

**文献标识码:** A

## Current Research Situation and Development of Manufacturing Execution Systems

CHAI Tian-you, ZHENG Bing-lin, HU Yi, HUANG Xiao-ling

(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Manufacturing Execution Systems (MES) is an online manufacture/production process management system. It exists in execution layer between plan layer and control layer of manufacture enterprise. It is the bridge and ligament between the Enterprise Resource Planning and Device Control System, and the key system for enterprise realizing agility and global optimization. In this paper, the generation and development of MES and the function models are summarized, and the function models of collaborative MES and process industry MES for the optimization of global production indices are presented, and the current situation of MES applications is surveyed. In the end, the development tendency of MES and key technology of process industry MES with thin layered management structure and global production indices optimization are proposed.

**Key words:** Manufacture Execution Systems; agility; global production indices; process industry

### 1 引 言

制造(生产)过程管理的作用是把企业有关产品的质量、产量、成本等相关的综合生产指标目标值转化为制造过程的作业计划、作业标准和工艺标准, 从而产生合适的控制指令和生产指令, 驱动设备控制系统使生产线在正确的时间完成正确的动作, 生产出合格的产品, 从而使实际的生产指标处于综合生产指标的目标值范围内。随着信息技术和现代管理技术的发展, 使得计算机管理系统代替传统的人工管理成为可能, 因而产生了制造执行系统MES。随着MES的不断推广应用, 使企业取得了良好的经济效益, 因此MES受到了学术界和工业界的重视。由于全球性激烈的市场竞争, 企业迫切需

要提高产品质量和生产效益、降低生产成本、减少资源消耗和环境污染, 敏捷化和全局优化成为制造企业的发展方向, 这就对MES提出了新的挑战, 促进了MES朝新的方向发展。中国的制造业正在由大向强转变, 对MES的需求日益增长, 加强MES研发与应用推广对推动制造信息化至关重要。因此, 本文综述了制造执行系统的产生与发展过程, 以及MES的功能模型, 分析了MES的应用现状, 提出了MES的发展趋势和应解决的关键技术。

### 2 制造执行系统的产生与发展

制造(生产)管理系统的发展过程, 如图1所示。传统的制造管理靠人工来完成, 因此采用金字塔式的多层组织结构。20世纪60年代初计算机财务系统问世, 从此人工的管理方式开始逐渐被计算机管理系统代替。

收稿日期: 2005-08-10 收修定稿日期: 2005-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534010); 国家973重点基础研究计划资助项目(2002CB312201)

作者简介: 柴天佑(1947-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事自适应控制, 多变量智能解耦控制, 流程工业过程综合自动化理论、方法、技术及应用等方面的教学与研究工作。

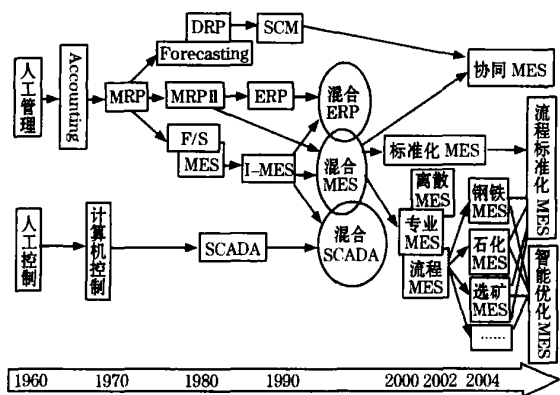


图 1 制造管理系统的发展过程

20 世纪 60 年代末 70 年代初，财务系统扩充了物料计划功能，发展成为物料需求计划系统 (Material Requirements Planning, MRP)。20 世纪 70 年代末 80 年代初，MRP 系统中增加了车间报表管理系统、采购系统等，于是发展成为 MRP II。但是 MRP II 不能配置资源，因此配置资源计划系统 (Distribution Resource Planning, DRP) 出现了，单一功能的制造过程管理系统 (如质量管理系统) 也相继出现。到 20 世纪 80 年代末 90 年代初，MRP II 逐渐演变为企业资源计划 (Enterprise Resource Planning, ERP)，DRP 演变为供应链管理 (Supply Chain Management, SCM)，而车间层应用的专业化制造管理系统演变成集成的 MES<sup>[1]</sup>。1990 年 11 月，美国先进制造研究协会 (Advanced Manufacturing Research, AMR) 首次正式提出制造执行系统 MES 的概念，将物料需求计划系统与控制系统之间的制造过程执行层定义为 MES<sup>[2]</sup>，如图 2 所示。

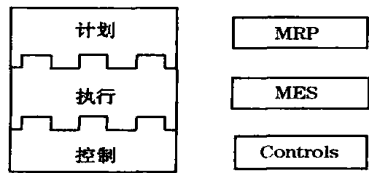


图 2 三层结构企业集成模型

与此同时，计算机控制也逐渐代替了人工控制，产生了过程监控和数据采集系统 (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)。到了 20 世纪 90 年代后期，传统的 SCADA、ERP 和 MES 相互渗透，它们之间的界线变得十分模糊。成立于 1992 年的制造执行系统协会 (Manufacturing Execution Systems Association, MESA) 于 1997 年 9 月发表的白皮书给出了 MES 定义：MES 提供实现从订单下达到完成产品的生产活动优化所需的信息；并运用及时准确的数据，指导、启动、响应并记录车间生产活

动，能够对生产条件的变化做出迅速的响应，从而减少非增值活动，提高效率。MES 不但可以改善资本运作收益率，而且有助于及时交货、加快存货周转、增加企业利润和提高资金利用率。MES 通过双向的信息交互形式，在企业与供应链之间提供生产活动的关键基础信息<sup>[1, 3]</sup>。文献[4]和文献[5]强调 MES 通过系统间的功能集成和信息集成，实现整个生产过程的优化运行和优化管理。然而，不同软件开发商提供的 MES 必须基于同一标准开发才能实现可配置和易集成，因此关于 MES 标准化研究得到了重视，MES 逐渐朝标准化方向发展<sup>[6~8]</sup>。

本世纪初，为了适应协同制造的要求，集成的 MES 发展成为协同的 MES。2004 年 5 月 MESA 提出了协同的制造执行系统 (Collaborative Manufacturing Execution Systems, c-MES) 概念，指出 c-MES 的特征是将原来 MES 的运行与改善企业运作效率的功能和增强 MES 与在价值链和企业中其他系统和人的集成能力结合起来，使制造业的各部分敏捷化和智能化<sup>[9, 10]</sup>。

为了使 MES 应用的效益不断提高，不同行业的制造工艺、设备运行、生产管理等方面的知识不断融于 MES 系统，出现了适合不同离散制造企业与流程企业的 MES。文献[11]提出了基于 BPS/MES/PCS 三层结构的流程工业综合自动化系统，明确指出流程工业 MES 着眼于整个生产过程管理，考虑生产过程的整体平衡，注重生产过程的运行管理，注重产品和批次，以分、小时为单位跟踪产品的制造过程。MES 起着将生产过程控制、生产过程管理和经营管理活动中产生的信息进行转换、加工、传递的作用，是生产过程控制与管理信息集成的重要桥梁和纽带。文献[12]提出了实现综合生产指标优化的智能综合自动化系统，其中智能化的制造执行系统是重要的组成部分。

### 3 MES 的功能模型

随着 MES 的产生与发展，MES 的功能模型也发生了相应变化。1992 年，AMR 提出了三层结构的企业集成模型，指出了 MES 所处的层次<sup>[2]</sup>。1993 年，AMR 推出了 MES 集成系统模型<sup>[2]</sup>，包括车间管理、工艺管理、质量管理和过程管理 4 个功能模型。1997 年，MESA 提出了包括 11 个功能的 MES 集成模型<sup>[1]</sup>，强调 MES 是一个与其他系统相连的信息网络中心，在功能上可以根据行业和企业不同需要与其他系统集成，为实施基于组件技术的可集成的 MES 提供了标准化的功能结构、技术框架和信息结构。1998 年，AMR 提出了制造业过程模

型，即 REPAC (Ready, Execution, Process, Analyze, Co-ordinate)模型。该模型描述了制造企业中完整的制造管理事务流程，不仅强调 MES 的核心作用，而且提出了经营管理、生产过程管理和过程控制的闭环结构<sup>[13]</sup>。随着标准化 MES 研究的深入，出现了分布式面向对象的 MES 功能模型，MES 能够通过基于知识的标准化规则向 workflow、代理以及其他系统(SCM, ERP, Controls 等)请求制造事件或下达生产指令，通过协同机制实现企业生产过程管理<sup>[13]</sup>。

为了适应企业敏捷化的要求，2004 年 MESA 提出了 c-MES 体系结构<sup>[10]</sup>，如图 3 所示。

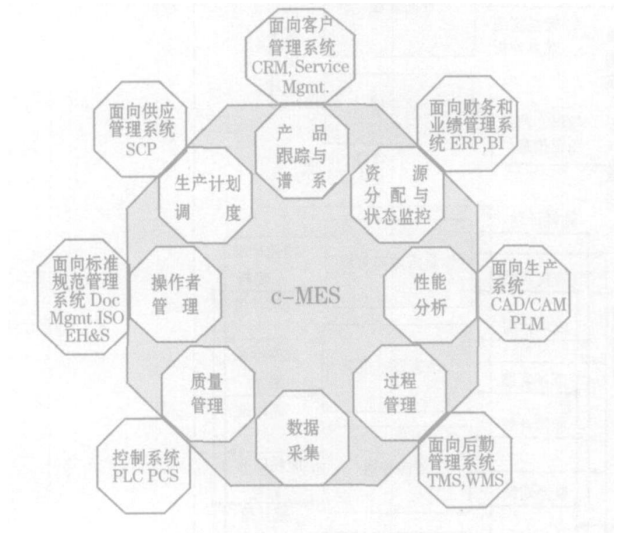


图 3 协同的 MES 功能模型

c-MES 主要包括 8 个功能：资源分配与状态监控、生产计划调度、数据采集、生产者管理、质量管理、过程管理、产品跟踪与谱系、性能分析。c-MES 的功能覆盖了制造过程管理的全过程，并与企业经营计划层的 ERP，CRM，CAD/CAM 等集成，形成在价值链和企业中各种系统和人的更好集成能力，通过协同制造获取更大效益。

为了提高产品质量和生产效率，降低生产成本，减少资源消耗和环境污染，流程企业迫切需要通过实现管理扁平化和综合生产指标优化，本文提出的实现管理扁平化和综合生产指标优化的流程工业 MES 功能模型，如图 4 所示。

合同管理子系统接收订单、客户等信息，整理出产品规格、数量、交货期等产品的需求信息。全流程价值链分析子系统综合考虑合同管理系统提供的产品需求信息、生产资料信息等因素，以企业效益最优化为目标，通过对全流程的价值流进行分析，确定产量、质量、消耗、成本、效益等相关的综合生产指标目标值，然后分别传递到生产计划管理子系统和综合生产指标优化子系统。生产计划管

理子系统根据最优综合生产指标，在资源约束、设备约束、库存约束等限制条件下，编制产量、质量、成本、消耗、设备运行等生产计划，并在不同时间尺度上对生产计划进行分解，然后把生产计划分别传递到生产调度管理子系统、综合生产指标优化子系统以及其他生产管理子系统(生产调度、动态成本控制、质量管理、物料跟踪与管理、设备管理)。生产调度子系统产生作业计划，下达到操作管理子系统、综合生产指标优化子系统和其他生产管理子系统。

综合生产指标优化子系统根据企业综合生产指标、生产计划、作业计划优化分解产生最优的工艺指标和工艺约束条件，并传递给工艺指标优化/先进控制与动态优化子系统，最终产生控制回路最优设定值。

各生产管理子系统分别接受产量、质量、成本、消耗、设备运行等生产计划，以及作业计划，进行分解、预报、分析，最终产生质量标准、物耗标准等作业标准。操作管理子系统接受作业计划、作业标准、工艺标准，产生操作规范和指令，通过设备运行子系统启停运行生产设备，并向资源供应系统发送资源调配指令，保证整个生产线协调稳定高效的生

产。信息集成平台及时准确地收集并整理生产过程信息、计量信息以及化验信息等。统计管理子系统产生需要的不同时间尺度的数据信息，并反馈到相应的系统，各系统通过对预测值与生产实绩的统计值进行比较分析，并对下一个时间尺度的作业计划、作业标准、工艺标准、操作规范和指令进行调整，保证生产指标的实绩值处于最优综合生产指标目标值范围内。

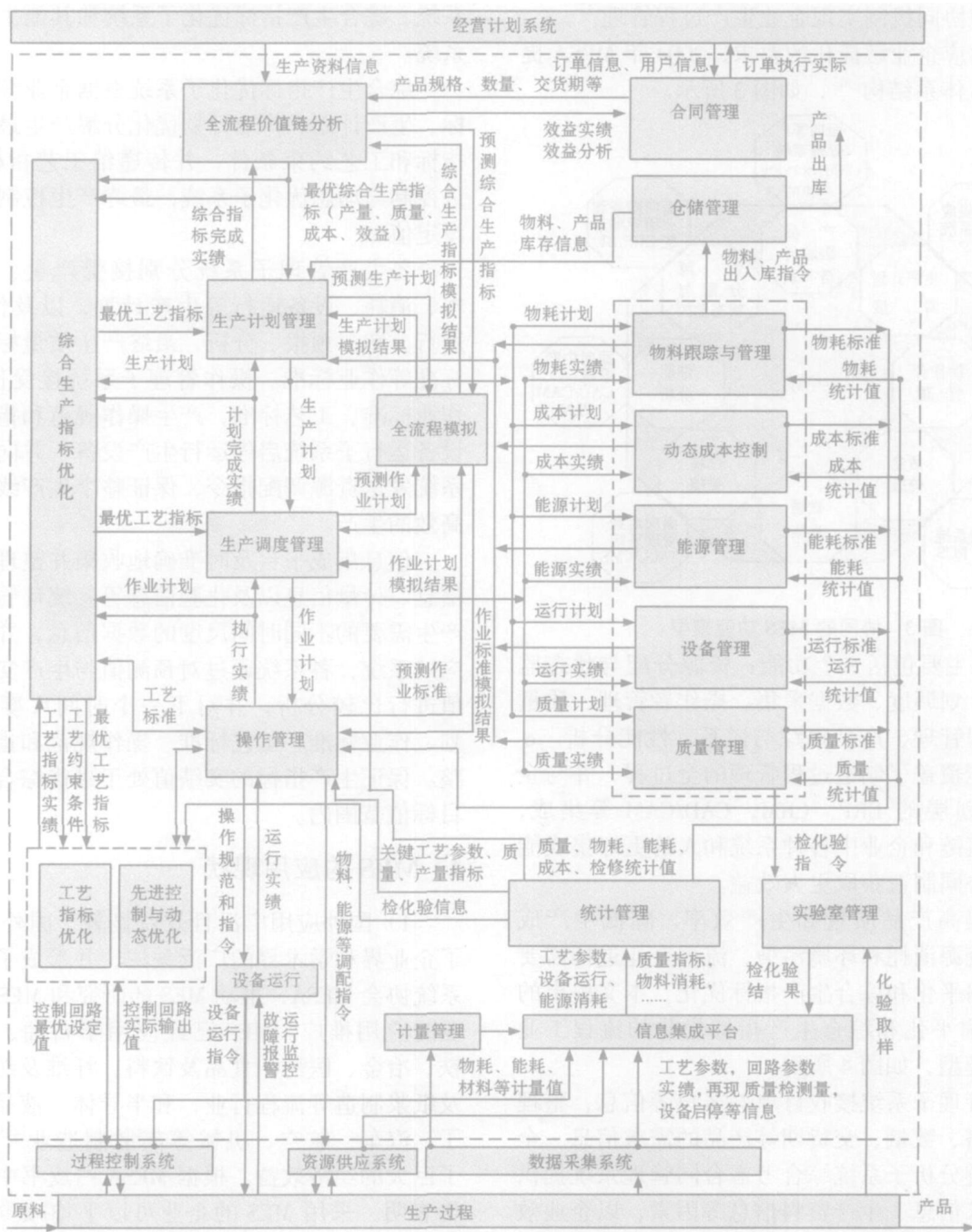
4 MES 的应用现状

1) 国外应用广泛且效益显著 国外 MES 得到了企业界和学术界的广泛关注，并形成了制造执行系统协会 MESA，推动 MES 的研究和 MES 在制造企业的应用推广。MES 已经应用于石油、化工、钢铁、冶金、医药、食品及饮料、纤维及纺织、造纸及纸浆制造等流程行业，和半导体、液晶制品、电子、汽车、航空、机械等离散制造业<sup>[4, 5, 18]</sup>，取得了巨大的经济效益。根据 MESA 白皮书中的统计报告表明，采用 MES 的企业可以平均减少制造循环时间 45 %、减少数据录入时间 75 %、减少生产过程的作

一大批 MES 专业化研发公司, 并开发了一系列的 MES 软件产品。如美国 Consilium 公司面向半导体和电子行业相继开发了 Work Stream (MESI) 和 FAB300 (MESII); 美国 Rockwell 公司开发了 RSsql, RSBatch, Arena 等; 美国 Honeywell 公司面向制药行业开发了 POMSMES。

2) 国内典型企业成功应用且正在推广 制造执行系统是一种生产制造过程的计算机在线管理信

息系统,其基础是控制层。由于国内重要的流程企业控制层广泛采用 DCS/PLC 实现了计算机控制,生产过程管理迫切需要计算机管理系统来代替人工管理,因此一些流程企业开发应用了一些单一功能的生产管理系统,取得了成效,从而对 MES 的需求不断增长,文献[11]提出发展流程工业 MES 是实现流程工业综合自动化的关键。



用于生产实际, 取得显著效益<sup>[15~17]</sup>。越来越多的流程企业认识到了MES的重要性, 纷纷开始实施MES, 流程企业信息化工程正在从ERP和PCS向MES延伸。

随着我国离散制造业自动化水平的提高, 提出了对MES的需求, 制造业信息化工程开始以CAD/CAM, PLM, ERP信息化系统向MES延伸。一些制造企业也开始建立单一功能的制造执行系统, 如物料跟踪、质量管理等。在国家“十五”863高技术计划支持下, 开展了离散制造业MES关键技术攻关和应用。专门从事MES研发的公司开始形成, 结合行业特点的MES正在开发和实施<sup>[20~29]</sup>。

## 5 MES发展趋势及关键技术

1) MES发展趋势 由于市场竞争环境的变化, 独立企业之间的竞争演变为价值链之间的竞争, 企业需要协同价值链中所有实体共同完成新产品的设计、供料、制造、运输以及服务等工作, 因此, 企业越来越强调MES与在价值链和企业内的其他系统和人的集成能力。MES作为协同制造的必要组成部分, 正朝协同的方向发展。以MES为核心, 向制造业中各个系统之间的经营过程延伸的制造企业整体解决方案正在形成<sup>[10]</sup>。正因为此, MESA改名为制造企业解决方案协会(Manufacturing Enterprise Solution Association)。

为了在更多的行业和企业推广MES, 标准化MES研究得到广泛的重视, 如: ISA (International Federation of the National Standardizing Associations)发布的SP95系列标准, 提出了MES标准模型和术语、对象模型属性、制造信息活动模型、制造操作对象模型<sup>[7]</sup>。

随着市场竞争的激烈化, 企业在产品的质量、成本、交货期等方面提出越来越高的要求, 因此对MES提出了新的挑战。随着敏捷制造、集成制造等先进生产模式的采用和推广, 以及信息技术的发展, 实现以敏捷制造和企业全局优化为目标的智能化MES将成为MES新的发展方向。

我国流程企业面临的主要问题是原料、能源等资源消耗明显高于国际先进水平, 因此以实现节能降耗为目标的MES是我国流程工业MES发展的趋势和要求。

我国离散制造企业面临的主要问题是产品质量不高、生产效率低, 因此以实现设计、制造、管理一体化的集成制造为目标的MES是我国离散制造业MES发展的趋势和要求。

2) 流程工业MES的关键技术 我国流程工业

MES的发展快于离散制造业MES的发展, 以钢铁等为代表的流程工业已经成为世界制造大国, 正在向强国转变, 实现企业管理扁平化和综合生产指标优化已经成为流程工业综合自动化的发展方向, 要实现如图4所示的流程工业MES需要对下列关键技术开展研究。

①以降低资源消耗为目标的能流、物流综合平衡与协调控制技术 能流、物流综合平衡与协调控制技术的研发支持物料跟踪与管理、能源管理、动态成本控制以及仓储管理等系统, 实现能流、物流的综合平衡, 从而达到降低资源消耗的目标。

②以提高产品质量为目标的产品在加工过程中的性能预测与监控技术 产品在加工过程中的性能预测与监控技术的研发支持质量管理、综合生产指标优化、工艺指标优化及实验室管理等系统实现对产品在加工过程中的质量控制。

③以安全运行为目标的故障预警与设备智能维护技术 故障预警与设备智能维护技术的研发支持设备运行、设备管理等系统, 有效地提高维护决策的准确性, 提高维护效率, 提高设备运行的可靠性与安全性, 保证生产线的安全运行, 并且降低维修费用。

④以综合生产指标为目标的执行层和控制层的不同尺度闭环控制技术 执行层和控制层的不同尺度闭环控制技术的研发支持综合生产指标优化、工艺指标优化/先进控制与动态优化, 并且支持全流程价值链分析、生产计划管理、生产调度管理等系统, 将综合生产指标自动地转化为控制系统的动作, 保证生产过程的实际生产指标达到综合生产指标的目标范围。

⑤以优化运行为目标的智能化生产控制指挥与运行管理平台技术 智能化生产控制指挥与运行管理平台技术的研发支持生产计划管理、生产调度管理、操作管理等系统, 以生产控制指挥中心的方式控制与指挥生产过程, 实现运行优化。

⑥基于行业知识的MES标准化技术 由于行业知识的巨大差异导致了流程工业MES系统必须走行业通用的发展道路, 将领域知识、同类业务以及专家经验等融入到系统的设计和开发中去, 从而实现知识型资源的重用。标准化技术的研发支持钢铁、石化、选矿等流程行业MES在成功案例的基础之上研究和规范行业MES标准, 从而形成一个标准统一的开发环境与规程, 达到以最短的时间、最高的质量、最低的成本开发满足企业要求的MES系统的目标。

⑦以实现MES产业化为目标的组件化开发技

术 组件化的软件开发技术的研发支持基于行业知识的生产过程模型组件、业务流程模型组件、智能优化模型组件、以及应用服务器中间件等, 可以方便地以“即插即用”的方式组装到流程工业 MES 系统中, 从而实现可重用、可重构、可扩充、可伸缩和开放式的流程工业 MES 体系结构, 推动 MES 软件朝产业化方向发展。

## 6 结 语

MES 是基于计划、执行、控制三层结构的先进制造企业的计算机在线制造(生产)过程管理系统, 它不仅能处理制造(生产)过程中难以处理的具有生产与管理双重性质的信息, 而且能起到将生产过程的信息和经营管理的信息进行转换、加工和传递的作用, 是面向过程的生产活动与经营活动的桥梁和纽带, 是制造企业实现敏捷化和全局优化的关键。MES 经历了由单一功能向集成化 MES 的演变, 正在向标准化、协同化、智能化 MES 发展, 以 MES 为核心的制造企业整体解决方案正在形成。当前应当把握我国制造业正在由大变强的历史机遇, 结合制造业信息化工程, 研发 MES 的关键技术, 开展 MES 在典型企业示范应用和推广应用, 促进 MES 产业化, 形成具有自主知识产权的符合中国制造特点的制造执行系统和制造企业整体解决方案。

## 参考文献:

- [1] MESA. Execution-driven manufacturing management for competitive advantage[M]. Pittsburgh: MESA International White Paper Number 5, 1997.
- [2] Bill Swanton. MES five years later: prelude to phase III[R]. USA: AMR Report 13725, 1995.
- [3] MESA. MES explained: a high level vision[M]. Pittsburgh: MESA International White Paper Number 6, 1997.
- [4] 中村隆, 正田耕一. MES 入门[M]. 日本: 工业调查会, 2000.
- [5] Michael McClellan. Applying manufacturing execution systems[M]. Boca Raton Florida: St. Lucie Press, 1997.
- [6] MESA. Controls definition & MES to controls data flow possibilities[M]. Pittsburgh: MESA International White Paper Number 3, 2000.
- [7] ANSI/ISA-95. 00. 01-2000. Enterprise-control system Integration Part 1: Models and Terminology[S].
- [8] Cheng F T, et al. Development of a distributed object-oriented system framework for the computer-integrated Manufacturing Execution System[A]. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven Belgium: Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998.
- [9] MESA. Collaborative manufacturing explained[M]. Pittsburgh: MESA International White Paper, 2004.
- [10] MESA. MESA's next generation collaborative MES model[M]. Pittsburgh: MESA International White Paper Number 8, 2004.
- [11] 柴天佑, 郑秉霖, 等. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 1-6.
- [12] Chai T Y. An intelligently automation system for process industries and its applications[R]. Edmonton, Alberta, Canada: Plenary Talk, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2005.
- [13] Bill Swanton. Do we need a new model for plant systems[R]. USA: AMR Report 13550, 1998.
- [14] MESA. MES Functionalities & MRP to MES data flow possibilities[M]. Pittsburgh: MESA International White Paper Number 2, 1997.
- [15] 李伯虎, 戴国忠. CIMS 应用示范工程 10 年回顾与展望[J]. 计算机集成制造系统 CIMS, 1998, 4(3): 3-9.
- [16] 何浩然. 宝信 MES 在上海宝钢集团一钢公司的应用[A]. MES 技术国际研讨会[C]. 北京: 中国金属学会, 2002.
- [17] 黄肖玲, 初延刚, 李慧莹, 等. 选矿制造执行系统的研究与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(9): 1079-1083.
- [18] 中村隆, 中村一世. 图解 MES 应用前沿[M]. 日本: 工业调查会, 2000.
- [19] Jonathan G. Manufacturing execution and distributed control systems[A]. Proceedings of the 3rd Annual Conference of the Industrial Computing Society[C]. America: Industrial Computing Society and Industrial Society of Publ, 1993.
- [20] 李铁克. 制造执行系统模型综述与分析[J]. 冶金自动化, 2003, 28(4): 13-17.
- [21] 刘威, 王冠, 等. 钢铁企业生产过程动态成本控制模式研究[J]. 控制工程, 2004, 11(1): 59-62.
- [22] 温艳芬, 李化民, 贾九林, 等. 氧化铝生产过程制造执行系统的研究[J]. 控制工程, 2004, 11(S0): 124-126.
- [23] 张志樵. 国内外制造执行系统(MES)的应用与发展[J]. 自动化博览, 2004(5): 5-14.
- [24] 柴天佑. 科研、开发、应用共促 MES 发展[J]. 中国制造业信息化, 2005(6): 19-20.
- [25] 房明, 魏祥云, 余明辉. 基于合同网的技术项目集成机制的研究[J]. 控制工程, 2004, 11(2): 177-180.
- [26] 李耀华, 宁树实, 王伟, 等. 基于准时制的轧钢厂生产计划模型及算法[J]. 控制工程, 2004, 11(4): 321-324.

## “森兰变频、节能中国”有奖征文活动投稿截止日延期

在大家的支持下, 森兰变频器已发展成为国内领先品牌。为了感谢大家的厚爱, 促进国内变频器行业的整体提升, 我们举办了“森兰变频、节能中国”有奖征文活动。此活动推出后, 得到了社会各界的大力支持和关注, 各界朋友投稿十分踊跃。来稿作者从 20 多岁的一线销售人员, 到 70 多岁的专家、工程师; 从自经销商、系统集成商、终端用户, 到大专院校、设计院和科研机构。……。在此我们深表谢意! 所有来稿已按相关程序转交专家评审组进行评审。同时, 因广大用户朋友对此次活动的踊跃参与, 经组委会研究决定, 本次活动投稿截止日从 2005 年 12 月 31 日延期至 2006 年 3 月 31 日, 希望有意参加本活动的各位朋友继续踊跃投稿, 共同交流, 见证国产变频器的发展和飞跃!