

研究论文

制造执行系统功能体系结构

肖力墉, 苏宏业, 苗 宇, 褚 健

(工业控制技术国家重点实验室, 浙江大学智能系统与控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在总结现有制造执行系统 (MES) 体系结构的发展、特点和问题的基础上, 提出了面向我国制造企业的 MES 功能体系结构。该功能体系结构以生产管理模型为中心, 详细定义了该模型内部的主要功能及各功能之间的信息流; 同时定义了维护管理、质量管理及库存管理这 3 类直接影响生产的主要功能模型, 并给出其与生产管理模型之间的信息交互; 此外, 还定义了影响生产的其他功能模型, 以保证该功能体系结构的可扩展性。最后, 给出一个该功能体系结构用于实际指导我国流程工业 MES 软件产品的设计与应用的参考实例, 从而说明该功能体系结构的实用性和完备性。

关键词: 制造执行系统; 功能体系结构; 功能层次; 信息交互

中图分类号: TH 166

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 02-0359-06

Functional architecture of manufacturing execution system

XIAO Liyong, SU Hongye, MIAO Yu, CHU Jian

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: Based on summarizing and analyzing the development, characteristics and problems of the existing architecture of manufacturing execution system (MES), a functional architecture of MES was proposed, which was oriented to manufacturing enterprises in China. By taking the production management model as the core, the proposed functional architecture defined the main functions of the production management model and the information flows transferring between these functions. Furthermore, maintenance management, quality management and inventory management, which would affect the production, were provided as the main functional models, and the information exchanges between them and production management were also presented. Additionally, in order to ensure scalability of this functional architecture, other functional models affecting the production were also defined. Finally, an application of the functional architecture to guide the design and establishment of the MES software oriented to the process industry of China was introduced to demonstrate the practicability and completeness.

Key words: manufacturing execution system; functional architecture; functional hierarchy; information exchange

2009-10-20 收到初稿, 2009-11-02 收到修改稿。

联系人: 苏宏业。第一作者: 肖力墉 (1983—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目 (60721062); 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA04Z172)。

Received date: 2009-10-20.

Corresponding author: Prof. SU Hongye, hysu @ iipc. zju. edu. cn

Foundation item: supported by the National Creative Research Groups Science Foundation of China (60721062) and the High-tech Research and Development Program of China (2007AA04Z172).

引 言

在全球商业竞争日益激烈的今天,制造执行系统(MES)已经成为国内外学术界和产业界的研究与应用热点^[1-5]。它能够打破企业内部纵向的信息断层,实现业务系统与控制系统之间信息及时、准确的交互;同时,也可打破企业内部横向的“信息孤岛”,使企业内各种信息化软件系统得以集成,从而充分利用企业的制造资源,提高企业的竞争力。

MES的概念由美国的咨询调查公司AMR(advanced manufacturing research)于1990年首次提出并使用。AMR提出了企业3层体系结构,并指出MES位于计划层与控制层之间,任务是将业务系统生成的生产计划传递给生产现场,并将生产现场的信息及时收集、上传和处理^[6]。该结构目前已成为国内外制造企业层次划分的主要依据。制造执行系统国际联合会(MESA)于1997年提出了MES功能模型^[7]。包括11个功能模块:资源配置和状态、运作/详细调度、分派生产单元、文档管理、数据采集/获取、劳动力管理、质量管理、过程管理、维护管理、产品跟踪和谱系、绩效分析。MESA规定,只具备11个之中的某一个或几个,也属MES系列的单一功能产品。

美国仪器、系统和自动化协会(ISA)于2000年开始发布ISA-SP95标准,即“企业控制系统集成”标准,为制造运行层与其他层次间的集成提供了依据,现在也用作规范MES的标准框架。该标准共分6个部分,其中第一、二、三部分已正式发布,并被IEC/ISO(国际电工委员会/国际标准化组织)采用为国际标准^[8-10];也被我国等同采用为国家标准。其第四、五部分正在制定过程中,第六部分尚处于构思阶段。该标准第一部分是以前美国普度大学企业参考体系结构(PERA)为基础,将企业功能划分为5个层次^[11];同时,又参考普度大学CIM参考模型^[12],定义了企业功能数据流模型;并将业务系统与控制系统之间交互的31种信息流归为4类;最后用UML(unified modeling language)建立了9种对象模型作为描述企业的基本工具。该标准第二部分则为上述对象模型详细定义了模型属性。该标准第三部分将企业的制造运行管理划分为4个典型区域:生产运行、维护运行、质量运行和库存运行;并定义了包含8项子功能的

通用活动模型,用以描述这4类典型的制造运行区域。

以上研究成果为MES的发展提供了强有力的支撑,我国MES的实际问题还存在着一些不足。AMR提出了MES的概念和企业的3层架构,但缺乏对MES具体功能的详细描述。MESA定义了MES的11个功能模块,但并未定义这些功能模块的组织方式,各功能模块之间缺少明确的联系。ISA-SP95标准应该说定义得比较深入和完整,但是其采用的普度5层参考体系结构相对较为复杂,而实际生产控制过程中最下面3层功能通常又是密不可分的,因此现阶段我国企业信息化构建中,还是偏向于使用AMR提出的3层体系结构。同时,ISA-SP95标准中的活动模型是针对制造运行管理(manufacturing operations management, MOM)定义的,将生产运行、维护运行、质量运行和库存运行相互独立,并希望用一个统一的通用活动模型模板来描述,然而MES的设计通常是以生产管理为核心,其他几部分则弱化为功能模块,处于辅助生产管理的位置,而且针对维护、质量和库存的管理通常是集成现有成形的软件或独立设计,并未采用与生产管理平行的统一框架来描述。另外,ISA-SP95标准针对这4部分运行管理之间相交互的信息并未详细定义,使得这几部分之间的联系不够紧密。

针对上述问题,本文提出了面向我国制造企业的MES功能体系结构,并具体介绍这一功能体系结构的相关内容,包括:MES功能层次的定义;MES功能体系结构模型的介绍以及MES解决方案的参考实例。

1 MES功能层次的定义

正如本文引言所述,AMR和ISA-SP95标准对企业层次的划分都有各自的优点与不足。本文结合这两种结构划分的优点,参考其各自的模型和相关描述^[6,8,10],给出了如图1所示的制造企业功能层次模型。将制造企业划分为3个功能层次:业务计划层、制造执行层以及过程控制层。

(1) 过程控制层 定义了感知、监测和控制实际物理生产过程的活动的。按照实际生产方式的不同,可细分为连续控制、批控制以及离散控制。过程控制层通常选用的控制系统包括DCS(分布式控制系统)、DNC(分布式数控系统)、PLC、

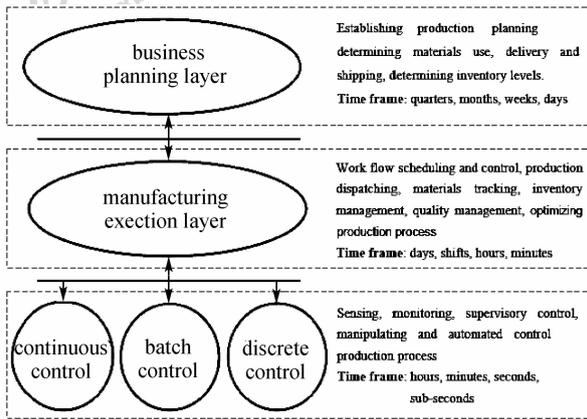


图 1 功能层次模型

Fig. 1 Functional hierarchy model

SCADA 等。过程控制层的活动运行时限通常是小时、分钟、秒、几分之一秒。

(2) 制造执行层 定义了为实现最终期望产品生产的工作流活动，包括生产记录的维护和生产过程的协调与优化等。主要面向制造企业工厂管理的生产调度、设备管理、质量管理、物料跟踪、库存管理等。可通过 MES 实现这些功能。制造执行层的活动运行时限通常是日、轮班、小时和分钟。

(3) 业务计划层 定义了制造企业管理所需的相关业务类活动。包括管理企业的各种资源、管理企业的销售和服务、制定生产计划、确定库存水平，以及确保物料能按时传送到正确的地点进行生产等。通常会选用 ERP（或 MRP II）、SCM、

CRM 等系统。业务计划层的活动运行时限通常是季度、月、旬、周、日。

2 MES 功能体系结构

目前几种常用的 MES 体系结构都存在着一一定的问题。针对上述问题，本文提出了如图 2 所示的制造执行系统功能体系结构模型。该模型以“生产管理模型”为中心，对制造执行层进行了功能结构的划分，并给出了制造执行层内部的主要功能及各功能间的信息流。具体分 3 部分模型详细描述，分别是：生产管理模型（图 2 中左侧虚线框内表示部分）、影响生产的主要功能模型（图 2 中右侧虚线框表示部分）以及影响生产的其他功能模型（图 2 中右下角椭圆表示部分）。

2.1 生产管理模型

“生产管理”定义为—组协调、指导、管理和跟踪原材料、中间物料、能源、设备、人员和信息等资源来制造产品的活动集合。本文在参考 ISA-SP95 标准^[8-10]的基础上，结合我国实际情况，给出如图 3 所示的“生产管理模型”，它是制造执行系统的核心部分，对应图 2 中左侧虚线框内表示部分。该模型可进一步细分为 9 个相对独立的子功能，分别是：产品定义管理、资源管理、生产调度、生产分派、操作管理、数据收集、生产跟踪、绩效分析、生产统计。图 3 中的实线框代表了这些子功能；带箭头的实线则表示了各个子功能之间的

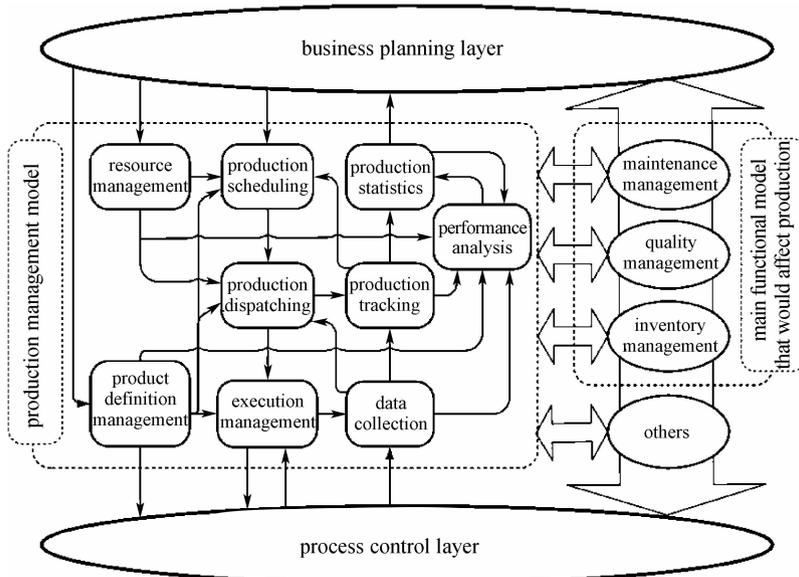


图 2 MES 功能体系结构模型

Fig. 2 Functional architecture model for MES

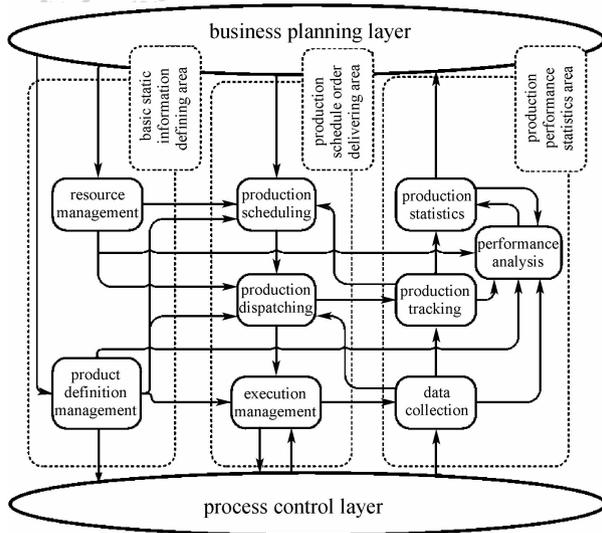


图 3 生产管理模型

Fig. 3 Production management model

信息交互, 以及特定功能模块与上层业务计划层和下层过程控制层之间传递的信息流。图 3 中的 3 个虚线框表示了 3 个不同性质的区域。通过这 3 个区域的划分, 使生产管理模型形成一个完整的逻辑闭环, 从而可以有效控制整个生产运行过程。这 3 个区域如下。

(1) 基础静态信息定义区域 包括产品定义管理模块和资源管理模块, 主要功能是管理企业生产运行中必备的产品定义类信息和基础资源类信息。如产品生产规则 (SOP、SOC 等) 的确定与维护; 生产方案、资源清单及物料清单的定义与维护; 人员、设备和物料等基础信息的定义与维护; 企业资源信息的控制和产能利用情况的管理等。

(2) 生产调度指令下达区域 包括生产调度模块、生产分派模块和操作管理模块等。主要功能是将业务计划层传递下来的生产计划调度信息通过生产调度模块细化为详细生产调度信息, 再经生产分派模块转化为生产分派清单, 最后经过操作管理模块转化为操作命令下达给过程控制层, 从而指导实际的生产运行过程。

(3) 生产绩效统计反馈区域 包括数据收集模块、生产跟踪模块、绩效分析模块, 以及生产统计模块。主要功能是将过程控制层中的生产和资源过程数据通过数据收集模块采集上来, 然后传递给生产跟踪模块和绩效分析模块进行跟踪、处理和分析, 再将处理好的数据传递给生产统计模块, 最终整理成为生产绩效统计信息反馈给业务计划层。

2.2 影响生产的主要功能模型

“维护管理”、“质量管理”、“库存管理”对于制造企业是必不可少的组成部分, 它们对生产将会产生极为重要的影响, 有时甚至是决定性的影响。例如, 在制药行业, “质量管理”可能指导其他的活动过程; 又如在配送中心, “库存管理”可指导其他的活动过程。本节将给出“维护管理”、“质量管理”、“库存管理”的功能定义, 并给出它们与“生产管理”之间主要传递的信息流。

2.2.1 维护管理 维护管理定义为协调、指导和跟踪设备、工具及相关资产的维护功能的集合。该功能保证了设备、工具及相关资产的可用性, 并保证反应性的、周期性的、预防性的以及基于状态的维护调度得以顺利执行。同时, 维护问题和维护事件的相关历史信息, 也可用于支持故障诊断。

2.2.2 质量管理 质量管理定义为协调、指导和跟踪质量测量和报告等功能的集合。广义的质量管理同时包括质量操作和那些以保证中间产品或最终产品质量为目的的操作管理。它提供对测量数据的实时分析, 以保证正确的产品质量控制, 并识别需要注意的问题。它还包括了统计过程控制/统计质量控制、离线检测操作的跟踪和管理以及实验室信息管理系统 (LIMS) 中的分析等。

2.2.3 库存管理 库存管理定义为在企业生产运行过程中协调、指导、管理和跟踪库存和物料移动的活动集合。它通常包括基于需求的库存量控制, 计算和报告期间的库存平衡, 出入库物料的数量确认, 库存运行的指示、报警与控制, 与库存相关联的活动请求, 质量保证测试请求, 库存质量报告, 库存存储条件的测量与控制以及与其他管理活动的协同等。

2.2.4 各模型间的信息交互 图 4 给出了“维护管理”、“质量管理”、“库存管理”与“生产管理”之间主要传递的信息流。这里所定义的信息流只是各模型之间最通用的信息交互, 由于行业间差异较大, 具体企业应用该模型时, 需要根据实际情况, 对信息流进行细化、扩展或删减。

2.3 影响生产的其他功能模型

除 2.2 节所定义的影响生产的主要功能以外, 还有些业务功能可能会对制造企业产生一定程度的影响, 它们并不是对于所有制造企业都是必须的, 但有时它们对生产的影响也非常重要, 或可对生产

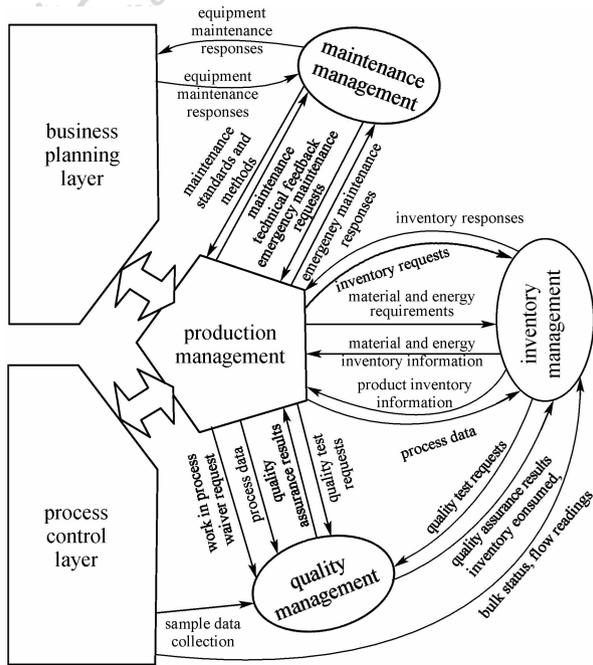


图 4 “生产、维护、质量、库存”间的信息交互
Fig. 4 Information exchange between “production, maintenance, quality testing and inventory”

管理提供非常有益的帮助。同时，对不同行业而言，所需这样的业务功能扩展也将会有所区别。本文将给出“能源管理”、“生产安全管理”、“文档管理”、“系统仿真”这几个功能的定义作为参考，它们对大多数制造企业将会产生较为重要影响。

2.3.1 能源管理 能源管理主要功能包括能耗统计和能源优化。能耗统计是以能源介质为基本对象，构建能源拓扑网络，进行能源核算和能源平衡管理。能源优化是基于生产计划和能源产耗预测数据，利用优化技术，实现能源的优化利用和控制，从而降低消耗，减少损失和污染物排放，有效、合理地利用能源。

2.3.2 生产安全管理 生产安全管理基于业务流程和安全生产规范，针对资产、人员、边界的安全需求，构建包括安全评估、安全检查、教育培训、上岗管理、风险源管理、作业管理、应急响应等在内的生产安全管理体系，并通过生产过程、消防、安防以及环保、气象监测等实时信息，构建综合预警、防灾系统。

2.3.3 文档管理 文档管理的功能是管理企业生产运行中所需的各种文档，如标准操作程序(SOP)、工作说明、控制系统程序、图表、批记录、工程变更通知、警报日志以及突发事件报告；

有时还包括了对环境、健康、安全等方面的规定以及与 ISO 标准信息的管理和整合。对这些信息的管理通常是企业能够更好运转所必需的。

2.3.4 系统仿真 系统仿真常用于生产装置的物流建模和过程变化响应评价。其主要功能是模拟过程中的变化、产品线的变化或者制造流程的变化；还可以基于当前运行过程状况来预测物料特性。仿真可在装置的生命周期中用于性能的跟踪，过程变化的跟踪及操作员的训练。

3 应用实例

浙江中控软件技术有限公司参照本文提出的MES功能体系结构，结合多年在流程工业MES的设计开发与实施经验，逐渐完善了其针对流程工业的MES解决方案——MES-Suite。该软件产品的整体框架与本文所定义的MES功能体系结构有很高的一致性，可以作为该功能体系结构在流程工业中应用的一个参考实例。

MES-Suite 由一个工厂建模平台和 8 个功能应用套件共同组成，其体系结构如图 5 所示。该结构与本文定义的MES功能体系结构的整体思路相一致，并针对流程行业，进行了修改、扩展和删减。其中工厂建模平台对应了本文中的基础静态信息定义区域，实现产品定义管理和资源管理的主要功能，通过生产调度管理套件实现本文定义的生产调度和生产分派功能，通过物料移动与跟踪套件实现本文定义的生产跟踪和生产统计功能，通过运行绩效管理套件实现本文定义的绩效分析功能，通过设备维护管理套件实现本文定义的维护管理功能，通过生产质量管理套件实现本文定义的质量管理的主要功能，通过能源计量管理套件实现本文定义的能

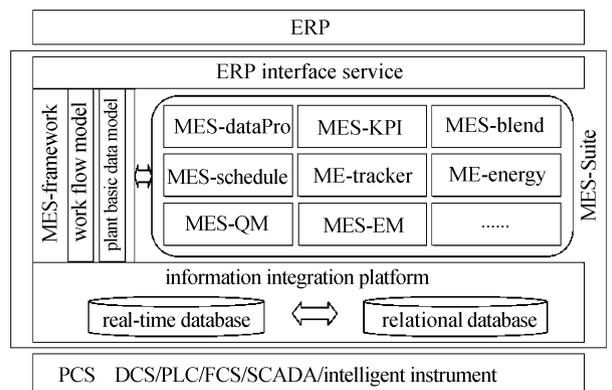


图 5 MES-Suite 体系结构

Fig. 5 Functional architecture of MES-Suite

源管理功能, 通过 ERP 接口服务实现与上层业务计划层的信息交互, 通过综合数据集成平台实现本文定义的数据收集功能及与下层过程控制层的信息交互。同时, 针对流程行业特点, 扩展了数据校正与物料平衡套件, 以实现物流数据的调理, 从而保证生产跟踪和生产统计的可靠性与准确性。另外, 根据该产品在石化行业应用时的特定需要, 设计了产品调合套件, 提供优化的调合配方, 确保产品在满足质量指标的前提下获取最大的效益。

目前, MES-Suite 已在石化、冶金、造纸、电力等典型流程工业中得到了成功的推广应用, 并为企业带来了显著的经济效益和社会效益。典型应用业绩包括: 中石化 62 家子公司、中石油、全国最大铅锌冶炼企业、纯碱行业第一家 MES 项目、全国最大的煤化工企业、全国最大磷化工企业、全球最大 DMF (二甲基甲酰胺) 生产企业、全国最大的纯碱企业、全国第四大造纸企业等。

4 结 论

针对现有 MES 体系结构用于指导我国制造企业 MES 产品设计的问题与不足, 提出了面向我国制造企业的 MES 功能体系结构, 定义了该功能体系结构中的主要功能模型和信息交互, 并确保该功能体系结构的可扩展性。通过该功能体系结构在浙江中控软件技术有限公司的成功使用以及在我国典型的流程企业的成功推广, 说明了其实用性和完备性。

References

[1] MESA International. The benefits of MES: a report from

the field [R]. Chandler, Ariz., USA: MESA International White Paper Number 1, 1997

- [2] Cheng F T, Shen E, Deng J Y, Nguyen K. Development of a system framework for the computer-integrated manufacturing execution system: a distributed object-oriented approach. *Computer Integrated Manufacturing*, 1999, **12** (5): 384-402
- [3] Chai Tianyou (柴天佑), Zheng Binglin (郑秉霖), Hu Yi (胡毅), Huang Xiaoling (黄肖玲). Current research situation and development of manufacturing execution systems. *Control Engineering of China* (控制工程), 2005, **12** (6): 505-510
- [4] Wang Hong'an (王宏安), Rong Gang (荣冈), Feng Mei (冯梅), Zhang Zhaojun (张朝俊). *Manufacturing Execution System of Chemical Engineering* (化工生产执行系统 MES). Beijing: Chemical Industry Press, 2006
- [5] Sun Yanguang (孙彦广), Chen Jingping (陈靖屏). *Manufacturing Execution System of Process Industry* (流程工业制造执行系统). Beijing: Chemical Industry Press, 2006
- [6] Bruce M R. *Back to the Future: MES from 1999—2000*. Boston: AMR Inc., 1995
- [7] MESA International. MES explained: a high level vision [R]. Chandler, Ariz., USA: MESA International White Paper Number 6, 1997
- [8] IEC/ISO 62264. 1-2000
- [9] IEC/ISO 62264. 2-2004
- [10] IEC/ISO 62264. 3-2007
- [11] Williams T J. The purdue enterprise reference architecture. *Computers in Industry*, 1994, **24** (2/3): 141-158
- [12] Williams T J. A Reference Model for Computer Integrated Manufacturing (CIM). A Description from the Viewpoint of Industrial Automation. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of American, 1989