



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

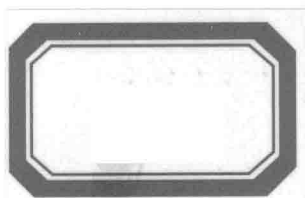
信息化与工业化 两化融合
研究与应用

流程工业组件化 生产执行系统

荣 冈 冯毅萍 赵路军 编著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

流程工业组件化生产执行系统

荣 冈 冯毅萍 赵路军 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书依据协同生产管理 and 控制的国际标准,采用过程系统工程的方法论,以生产执行系统 MES 软件组件为信息化载体,实现两化整合中所需的统一数据集成,统一知识表达和人机协同决策。本书首先介绍了 MES 的基本原理、发展趋势及其在两化整合中的作用。结合流程企业实际,第 3、4 章提出了基于多层次工厂模型的 MES 设计方法,第 5 章详细介绍了组件化 MES 软件设计、开发和应用实施的方法和技术。第 6、7 章针对质量管控和计划优化两个应用案例,分别介绍了各类 MES 组件的协同运行方法。第 8 章介绍了 MES 信息可视化组件的应用场景,第 9 章介绍了 MES 培训组件对改善人机协同工作效率的作用。本书可供流程工业企业各级生产和经营管理人员、管理技术人员、MES 实施与应用人员学习参考,也可作为相关院校教师、研究生的教学教参书。

图书在版编目(CIP)数据

流程工业组件化生产执行系统/荣冈,冯毅萍,赵路军编著. —北京:科学出版社,2014.10

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978

I. ①流… II. ①荣… ②冯… ③赵… III. ①工业生产—管理信息系统—研究 IV. ①F406.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 224240 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:400 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息化与工业化两化融合研究与应用》编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
 吴宏鑫 席裕庚 郭 雷 周 康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴 澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员(按姓氏笔画排序)

于海斌(中国科学院沈阳自动化研究所)

王 龙(北京大学)

王化祥(天津大学)

王红卫(华中科技大学)

王耀南(湖南大学)

卢建刚(浙江大学)

朱群雄(北京化工大学)

乔 非(同济大学)

刘 飞(江南大学)

刘德荣(中国科学院自动化研究所)

关新平(上海交通大学)

许晓鸣(上海理工大学)

孙长银(北京科技大学)

孙彦广(冶金自动化研究设计院)

李少远(上海交通大学)

吴 敏(中南大学)

邹 云(南京理工大学)

张化光(东北大学)

张纪峰(中科院数学与系统科学研究院)

陈 杰(北京理工大学)

陈 虹(吉林大学)

范 铠(上海工业自动化仪表研究院)

周东华(清华大学)

荣 冈(浙江大学)

段广仁(哈尔滨工业大学)

俞 立(浙江工业大学)

胥布工(华南理工大学)

桂卫华(中南大学)

贾 磊(山东大学)

贾英民(北京航空航天大学)

钱 锋(华东理工大学)

徐 昕(国防科学技术大学)

唐 涛(北京交通大学)

曹建福(西安交通大学)

彭 瑜(上海工业自动化仪表研究院)

薛安克(杭州电子科技大学)

《信息化与工业化两化融合研究与应用》序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用》,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化为生

产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为丛书出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A stylized handwritten signature in black ink, reading '孙逸凡' (Sun Yifan). The signature is fluid and expressive, with a long horizontal stroke extending from the left.

中国工程院院士

2010年11月

前 言

流程工业指主要生产过程为连续生产的工业。包括了石化、冶金、电力、轻工、制药、环保等在国民经济中占主导地位的行业，其发展状况直接影响国家的经济基础，是国家的重要基础支柱产业。联合国工业发展组织的统计报告显示，2009年中国已经成为仅次于美国的全球第二大工业制造国，但相比于发达国家，我国制造业产品附加值低，制造过程资源、能源消耗大，污染严重。

近年来，我国流程工业企业非常重视“工业化与信息化”融合，由企业资源管理系统(ERP)、生产执行系统(MES)和生产过程控制系统(PCS)构成的综合自动化系统，已经成为流程行业节能减排、提高竞争力的利器。其中，生产执行系统MES，上联ERP层，下达PCS层，强调制造过程的整体协调和优化，可帮助企业建设完整的企业级闭环生产管理体系，是协同生产管理和控制的核心技术。MES的实施和应用，必须长期不懈地坚持科学研究、技术开发和工程应用三者的有机结合，才能真正取得成效。

本书依据协同生产管理和控制的国际标准，采用过程系统工程的方法论，以MES软件组件为信息化载体，将企业的生产管控流程与自动化技术及工艺技术融合在一起，力图实现综合自动化系统的统一数据集成，统一知识表达和人机协同决策。

本书是“工业化与信息化”深度融合的一次努力和尝试，一大批青年学者、软件开发员、行业应用咨询师参与了本书的工作，他们是赵路军，周德营，吴玉成，许祎，冯毅萍，顾海杰，杨佳丽，王强，朱玉涛，肖力壙，朱峰，许华，朱炜，王子豪，李诚，张奇然。

全书共9章，由从事科研开发和工程应用的专业人员编写，荣冈对全书进行了统稿，王成龙、李诚进行了全书的统一排版。具体执笔分工为：荣冈编写第1、2章，冯毅萍编写第3、4、8、9章，荣冈和王子豪编写第6、7章，赵路军编写第5章。

由于编写时间紧迫，书中不妥之处请专家和广大读者批评指正。

荣 冈

2014年7月于求是园

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流程工业企业的信息化	1
1.1.1 工业化与信息化“两化”融合的需求	1
1.1.2 “两化”融合的技术路线	2
1.2 MES 发展历程	4
1.2.1 MES 的背景	4
1.2.2 MES 的定义	5
1.2.3 ISA-95 标准	10
1.3 MES 的行业化应用	11
1.3.1 行业的需求差异	12
1.3.2 MES 的行业应用特点	14
1.4 MES 技术的现状	16
1.4.1 MES 采用的信息化技术	16
1.4.2 MES 采用的体系架构和数据模型	17
1.4.3 互联性和网络	18
1.4.4 数据处理	19
1.4.5 集成模型	20
1.5 当前 MES 的缺陷和挑战	21
1.5.1 架构	21
1.5.2 实时处理	21
1.5.3 集成	21
1.5.4 方法研究和技术开发的挑战	22
1.6 本书的组织	23
第 2 章 制造运营管理与过程优化	25
2.1 制造执行系统功能体系结构	26
2.1.1 MES 功能层次的定位	26
2.1.2 制造执行层的主要活动	27
2.1.3 功能层次间的生产信息交互	28

2.1.4 MES 功能体系结构	30
2.2 从 MES 到制造运行管理 MOM	36
2.2.1 制造运行管理的提出与作用	36
2.2.2 制造运行管理的概念与功能层次定位	36
2.2.3 制造运行管理与制造执行系统的关系	38
2.3 制造运行管理系统构架	39
2.3.1 MOM 整体框架合理性的分析	39
2.3.2 IEC/ISO 62264 标准的主要贡献	40
2.4 制造运行管理系统体系结构及其实现方式	41
2.4.1 工厂资源信息管理平台	42
2.4.2 制造运行管理子系统	43
2.5 MES 与过程系统工程理论	47
2.5.1 MES 与 PSE 领域研究的关系	49
2.5.2 全局生产物流模型的关键作用	53
2.6 理论与实践结合的组件化 MES	55
2.6.1 具备在线应用可行性的理论方法	55
2.6.2 面向全流程多功能集成与优化	57
2.6.3 兼具多种系统特征的系统设计方法论	59
2.6.4 流程工业组件化 MES 设计理念	60
第 3 章 工厂多层次模型	62
3.1 多分辨率层次建模理论的研究现状	65
3.2 模型形式化的基本方法	68
3.2.1 系统模型的形式化表达	68
3.2.2 系统模型特性的若干术语	69
3.2.3 系统模型的离散事件形式化表达	70
3.3 多节点结构模型的形式化	71
3.3.1 有向图结构模型	72
3.3.2 分布式结构模型的有向图描述	72
3.3.3 多节点结构模型形式化	74
3.4 MNSM 的时间基	75
3.4.1 模型生命周期时间基	75
3.4.2 连续动态模型的时间基	76
3.4.3 离散动态模型的时间基	76
3.4.4 模型管控周期与时间基的关系	77
3.5 多分辨率层次结构模型	78

3.5.1	模型分辨率	79
3.5.2	多分辨率层次模型框架	79
3.5.3	多分辨率层次模型形式化表达	80
3.5.4	多分辨率层次模型的映射	81
3.5.5	几种形式化模型的比较	84
3.6	多分辨率层次模型的评价指标	85
3.6.1	多分辨率层次模型的一致性	88
3.6.2	多分辨率层次模型 I/O 一致	88
3.6.3	多分辨率层次模型状态一致	89
3.6.4	多分辨率层次模型结构一致	90
3.6.5	多分辨率层次模型描述一致	90
3.7	多分辨率层次模型的准确性	91
3.7.1	传统模型的准确性	91
3.7.2	多分辨率层次模型的准确度	92
3.8	多分辨率层次模型完备性	93
3.8.1	复杂系统模型的信息需求	93
3.8.2	模型静态属性的完备性	94
3.8.3	单层次模型状态可观测性	95
3.8.4	多层次模型状态可观测性	95
第4章	基于多层次工厂模型的 MES 设计	97
4.1	炼油生产过程及其建模需求	98
4.1.1	炼油生产物流过程	98
4.1.2	物流模型层次需求分析	101
4.2	层次物流模型架构及形式化描述	103
4.3	炼厂物流模型的建模策略	107
4.3.1	现有层次建模方法特点	107
4.3.2	需求扩展建模法	108
4.3.3	中间层优先建模方法	108
4.4	以物流加工为主线的 MES 模型设计	109
4.4.1	设备层物流模型	110
4.4.2	生产计划统计层物流模型	119
4.4.3	调度层物流模型	120
4.5	层次模型的一致化映射	121
4.5.1	模型的时间聚集	121
4.5.2	层次模型的空间映射	122

4.6 层次物流模型在组件化 MES 中的应用	125
4.6.1 MES 对多层次物流模型的需求	126
4.6.2 石化 MES 工厂模型的设计和实现	126
第 5 章 组件化 MES 设计	130
5.1 问题的提出	130
5.2 组件化 MES 架构设计	131
5.2.1 系统设计理念	131
5.2.2 系统设计原则	131
5.2.3 系统设计目标	132
5.2.4 系统设计架构	132
5.2.5 MES 组件定义	133
5.2.6 组件化 MES 平台功能设计	136
5.3 组件化 MES 应用场景搭建	157
5.4 组件化 MES 工程应用实践	162
第 6 章 MES 质量跟踪与管理	167
6.1 质量跟踪和管理的研究现状	167
6.2 质量跟踪和管理的工作流	168
6.3 质量跟踪和管理的方法和应用	169
6.3.1 支持质量计划决策的优化	169
6.3.2 支持质量计划决策的模拟仿真	170
6.3.3 支持质量检测标识的工具	171
6.3.4 支持质量管理的信息化系统	172
6.4 石化企业油品质量跟踪模型	172
6.4.1 过程单元的质量传递模型	172
6.4.2 原油调和和原油的物性传递	174
6.4.3 常减压切割原理和模型	178
6.4.4 二次加工装置的工艺原理	182
6.4.5 催化裂化装置的物性传递模型	182
6.4.6 其他二次加工装置的物性建模	183
6.4.7 油品调和的质量跟踪与物性传递模型	184
6.5 石化企业 MES 质量跟踪和管理组件	186
6.5.1 组件功能设计	189
6.5.2 优化组件的设计和开发	189
6.6 带质量约束的生产计划组件设计和实现	191
6.6.1 生产计划优化模型设计	191

6.6.2 运算功能模块设计及实现	193
6.6.3 优化求解器	194
6.6.4 Access 数据库模块	196
6.7 本章符号说明	197
第7章 产率评估组件与生产计划优化组件的集成	199
7.1 生产计划优化和 MES 产率评估组件	199
7.1.1 石化企业的生产计划优化	199
7.1.2 MES 的生产计划优化	199
7.1.3 MES 产率评估组件	200
7.2 MES 生产优化的工作流	201
7.3 结合产率评估的生产计划优化研究	203
7.3.1 产率评估的生产计划模型和调度模型	203
7.3.2 调度仿真模型的建立	204
7.3.3 产率及其波动性的评估方法	206
7.3.4 调度仿真系统的配置	208
7.3.5 实验案例	210
7.4 利用 MES 产率评估组件的生产计划优化	215
7.4.1 产率评估的需求分析	215
7.4.2 产率评估组件的应用	216
第8章 流程工业信息可视化组件	219
8.1 信息可视化主要理论和技术成果	220
8.1.1 数据向可视化形式的映射	220
8.1.2 可视化结构组成	221
8.1.3 视图变换	221
8.1.4 交互和变换控制	222
8.2 信息可视化的研究热点和发展现状	222
8.3 可视化任务的分类	225
8.3.1 分类定义介绍	226
8.3.2 用于生产管理的信息可视化	228
8.3.3 用于经营决策的信息可视化	230
8.4 可视化任务的解决方案	232
8.4.1 物流关系呈现	232
8.4.2 实现原理及效果展示	234
8.5 生产过程呈现及指令处理	237

8.5.1	任务定义	237
8.5.2	实现原理及效果展示	237
8.5.3	生产报表的多层次可视化	241
8.6	MES 平台信息综合展示	244
8.6.1	综合展示可视化设计器	244
8.6.2	综合展示关键技术	246
8.6.3	综合展示应用效果	248
8.7	装置数据校正组件信息可视化实例	251
8.7.1	装置数据校正组件功能	252
8.7.2	工程应用实践	254
第9章	MES 业务培训组件	258
9.1	仿真培训系统的发展历程	258
9.2	MES 培训系统的需求分析	260
9.2.1	基础培训	262
9.2.2	操作培训	263
9.2.3	石化 MES 培训的特点	264
9.3	石化 MES 培训组件的总体设计	265
9.3.1	培训组件设计原则	265
9.3.2	培训组件的运行方式	265
9.3.3	培训组件的软件结构	266
9.4	生产调度仿真平台与实际工厂的匹配	270
9.4.1	生产调度仿真平台的仿真策略	270
9.4.2	调度仿真结果与工厂数据的匹配	271
9.5	培训测评系统的设计与实现	273
9.5.1	培训测评原理	274
9.5.2	装置校正培训测评	274
9.5.3	调度平衡培训测评	281
9.5.4	统计平衡培训测评	285
9.6	操作培训实例	289
9.6.1	装置校正培训实例	289
9.6.2	调度平衡培训实例	290
9.6.3	统计平衡培训实例	291
9.7	培训系统应用效果	292
9.7.1	本科生应用效果	292

9.7.2 研究生应用效果	294
9.7.3 MES 工程师应用效果	296
参考文献	298
缩略语一览表	310
索引	314

第 1 章 绪 论

1.1 流程工业企业的信息化

1.1.1 工业化与信息化“两化”融合的需求

流程工业涵盖石油、化工、冶金、制药等多种产业,是至关重要且规模庞大的基础产业,也是国家的经济命脉之一。

流程工业的生产过程通常具有大规模连续或间歇的物料转化、混合、分离等一系列复杂及动态的生产制造方式,大多是资金密集、技术密集的大型企业和企业集团。流程工业的可持续发展,不仅需要供应链层面进行宏观的合理布局和资源优化,也需要企业内部生产和经营各环节的有效控制和协同管理,通过各项技术经济指标的最优化,实现安全生产,降低成本,提高能源利用率,减少有害物排放。

20 世纪 90 年代以来,我国工业化向着更大的加工与制造规模发展,以应对更激烈的市场竞争。流程工业企业的发展也不例外,企业的生产规模不断扩大,占全国企业年总产值的比例不断攀升,2011 年达 66%。然而,我国流程工业企业的技术进步、企业生产经营效益等指标远未达到发达国家水平,尤其是综合能耗水平远高于全球的平均水平。电力、钢铁、有色、石化、建材、化工、轻工、纺织 8 个行业主要产品单位能耗平均比国际先进水平高 40%,我国的能源利用效率仅为 33%,比发达国家低 10 个百分点左右。

信息化是我国加快实现工业化和现代化的必然选择。近十年来,专家学者和国家科技部等相关部门的领导,倡导以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子。流程企业信息化水平不断提高,计算机、通信与软件技术在流程工业中的应用得到发展与普及,引进和自主开发了大量信息化技术与工程软件,并且以各类工业控制计算机和工业级通信网络为载体,广泛应用于企业生产营运、经营管理、设计研发的全过程。“十二五”以来,中国流程工业企业加快了转型升级步伐,由规模发展向科学发展、内涵发展转变,更加注重发展的质量和效益,也更加需要工业化与信息化的深度融合。

1.1.2 “两化”融合的技术路线

自动化技术是实现大规模工业生产安全、平稳、优质、高效的基本条件和重要保证。工业现代化程度越高,其成套技术装备的主辅机依赖于工业自动化仪表与系统的程度越大,对工业自动化仪表与系统的要求也越高,一般来说,在工程建设中,自动化仪表的投资与工业设备的总投资之比(自动化投资率)也越高,电力工业已由 20 世纪 60~70 年代的 3%~5%,提高到目前的 10%~12%;钢铁工业从 8% 提高到 12%~15%,化学工业从 10% 提高到 15%~18%。这表明工业自动化仪表与系统在工业生产中的作用越来越大,其应用水平不断提高。

自动化技术是传统产业改造升级的有效手段。应用工业自动化仪表与系统能改变技术设备和管理的面貌,使传统产业实现低消耗、高质量、高效益的目标,提高新产品开发能力和市场竞争能力,确立现代先进制造业新形象。

流程工业生产通常是使原材料和其他物质资源在形态上发生改变,在人参与下,使原材料价值增加的一个综合过程。也就是说根据用户的需求,在企业内部管理人员和操作人员共同控制与操作下,经过一定的生产设备,把一些物资的形态转变成为用户所要求的具有使用价值的产品,如图 1-1 所示。在转变过程中,企业经营者希望产品价值逐步高于原材料的价值。

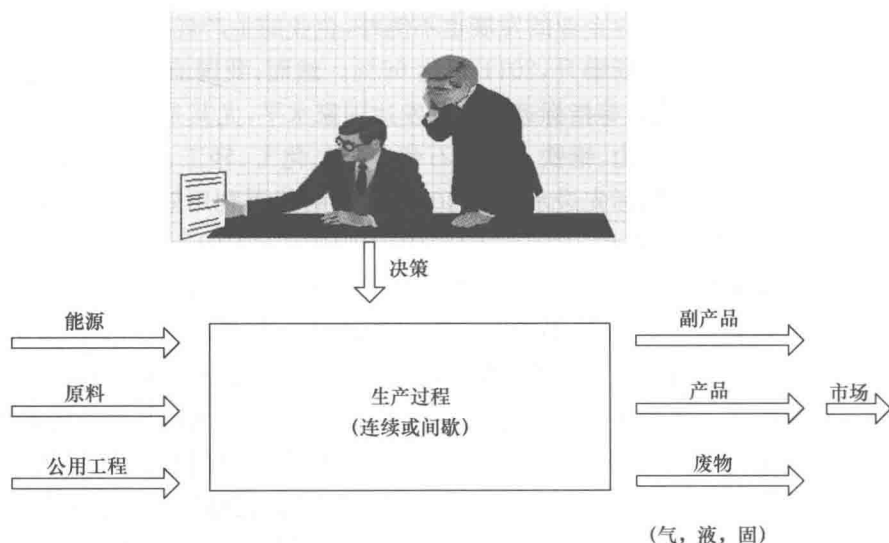


图 1-1 流程工业企业的运作过程

在这一转变过程中,流程工业企业的经营采用综合自动化技术解决以下四方面的问题。① 安全:需要用高可靠性的控制系统、检测和执行机构对设备与装

置的运行提供保证,进而对关键装置进行故障诊断与健康维护;② 低成本:通过先进的工艺及工艺参数以降低能耗和原料消耗,以及通过先进的建模技术、控制技术和实时优化技术来提高产品的合格率和转化率;③ 高效率:通过先进的计划调度与排产技术和流程模拟技术来提高设备利用率和劳动生产率;④ 提高竞争力:通过数据和信息的综合集成,如先进的管理技术(包括 ERP、CRM、SCM 等)、电子商务、价值链分析技术等,促进企业价值的增值,最终提高企业的综合竞争力。

自 20 世纪 90 年代以来,在流程工业企业普遍沿着更大的加工与制造规模和更激烈的市场竞争趋势发展的同时,计算机、通信与软件技术在流程工业中的应用得到发展与普及,大量的新型系统理论、技术与软件被开发出来,并且以各类工业控制计算机和工业级通信网络为载体,应用于流程工业,承担起对于生产过程全局的协同控制、管理及优化。在此共识的基础上,学术界与产业界将这类技术体系化地归纳为由 ERP、MES 和 PCS 三个层面组成的管理与控制一体化系统,国际上称为计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS),如图 1-2 所示。该结构体系及其内部组织的指导思想本质上仍然是在长期研究中积累的过程系统工程(Process Systems Engineering, PSE)领域的系统方法论。



图 1-2 三层体系结构示意图

最底层是以 PCS(过程控制系统)为代表的基础自动化层。主要内容包括先进控制、软测量技术、实时数据库、可靠性技术、数据融合与数据处理技术、集散控制系统(DCS)、多总线网络化控制系统、基于高速以太网和无线技术的现场控制设备、传感器技术等。

中间层是以 MES(生产制造执行系统)为代表的生产执行及过程运行优化层。主要内容包括先进建模与流程模拟技术(Advanced Modeling Technologies, AMT)、先进计划与调度技术(Advanced Planning and Scheduling, APS)、生产实时跟踪技术、故障诊断与健康维护技术、数据挖掘与数据校正技术、动态质量控制与管理技术、物料平衡技术、产品储运与配送技术等。

最上层是以 ERP(企业资源管理)为代表的企业生产经营计划和优化层。主