

FlexSim系统培训班官方指定用书

FlexSim

仿真建模与分析

主 编 于绍政 陈 靖
副主编 高志蓬 李勇超



东北大学出版社
Northeastern University Press

FlexSim 仿真建模与分析

主 编 于绍政 陈 靖

副主编 高志蓬 李勇超

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 于绍政 陈靖 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

FlexSim 仿真建模与分析 / 于绍政, 陈靖主编. —
沈阳: 东北大学出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5517-1945-2

I. ①F… II. ①于… ②陈… III. ①物流—系统仿真—应用软件 IV. ①F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 158455 号

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331 (市场部) 83680267 (社务部)

传真: 024-83680180 (市场部) 83687332 (社务部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印刷者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 15.25

字 数: 341 千字

出版时间: 2018 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 7 月第 1 次印刷

策划编辑: 汪子珺

责任编辑: 刘 莹

责任校对: 张 媛

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1945-2

定 价: 58.00 元

序 言

仿真 (simulation) 就是通过建立实际系统模型并利用所建模型对实际系统进行实验研究的过程, 仿真的核心内涵是一种人为的试验手段。仿真作为一种成熟的应用技术手段, 在各个行业和领域都有深远的影响, 而本教材只专注仿真这个“大概念”中的一个部分, 即系统仿真 (system simulation)。在现实世界中, 要实验某种设备或者某套系统是否符合既定要求, 或者想要清楚地了解系统演变过程中的发展和变化, 最好的办法就是直接将其应用在实际运作过程中。然而, 直接应用在实际过程中所付出的代价是非常昂贵的。这里所说的代价, 不仅指需要花费大量的金钱, 还指需要消耗大量的时间成本和风险成本。如何在资源和成本有限的情况下, 尽可能地接近实际应用效果, 就是系统仿真要做的工作。除了能够还原现实系统外, 系统仿真还能根据需求去搭建一个完全“人造”的环境或变量元素, 是工程师创新实践的绝佳“舞台”。

2015年5月发布的《中国制造2025》是我国实施制造强国战略的第一个十年行动纲领, 其中强调的主攻方向之一为“智能制造”。在工业和信息化部推动下, 近年来, 工业化和信息化的深度融合, 为制造业的网络化、智能化发展奠定了坚实的基础。在全面“智能制造”浪潮下, 我国企业整体的信息化应用水平与外国发达国家仍有明显的差距, 突出表现在科学管理技术积累和底蕴上, 使得国内企业在经济发展“新常态”下, 面临诸多困境: 为“改造”而“改造”, 盲目地购买自动化设备所花费的成本比原先人工工作的成本还高; 被供应商“忽悠”的改造方案投资不少, 而效果远远达不到预期; 企业一直以来应用的传统规划方式无法适应智能制造和物流的新要求……

“智能制造”要在企业真正落地, 归根到底, 还是要解决: 做什么? 怎么做? 谁来做? 诚然, 想要实现制造业整体的转型升级, 仅凭几篇理论文章和几台机器人是远远不够的。探寻发达国家制造业的发展历程, 可以发现, 应用系统仿真技术来辅助进行系统设计和规划, 是成本低且效果好的智能制造应用切入点。国外企业拥有大量的成熟的应用仿真的实例, 从项目实施前的方案验证到投入运营后的辅助优化, 在现代企业生产和管理过程中, 已经将系统仿真作为重要工具贯穿始终。系统仿真技术是实现“工业4.0”“精益生产”的有力

“武器”，企业级的仿真建模工程师有着强烈的社会需求。然而，现阶段国内尚未设立“系统仿真”专业，高校的相关课程偏向理论和学术研究层面，与企业的实际应用在一定程度上存在脱节，体现在已经出版的教材中，纯建模技术型的指导资料极度匮乏。

本教材正是在上述大背景下，经过4年的实际教学应用检验之后孕育而生的，具有很强的通用性、专业性和实用性。适宜的读者对象包括物流管理、物流工程、工业工程、管理科学与工程、自动化、交通运输、采矿冶金、信息工程、汽车制造、航空管理、港口管理、农林业加工、公共安全等专业的本专科学生或研究生，特别适合于针对从事自动化物流系统设计相关研究或相关工作的研究生或工程师。本书既适合零基础的学生，也适合已有一定仿真建模基础、又想要完善或者拓展仿真建模技巧的相关工程师。

本教材编者多年工作在FlexSim培训教学和仿真项目开发的第一线，拥有丰富的实战教学经验。同时，组建了FlexSim在线教育团队，已经为国内FlexSim系统仿真行业培养了大量的工程师。本教材编者团队非常熟悉国内系统仿真的应用现状和技术要点，教材内容直击FlexSim建模的重点和难点，帮助读者在最短的时间内形成FlexSim建模的基本素养。同时，注重梳理软件用户手册中零散的知识点，结合多个生产和物流系统的实际案例，循序渐进地帮助读者建立系统、全面和扎实的仿真建模功底，引导读者进行更加深入的学习和技术应用开发。

本教材作为专业的仿真建模技术指导书，不会为了增加页数而对仿真的理论概念做过多的阐述，读者可以根据需求，自行阅读与仿真及系统仿真相关的专业理论书籍。另外，由于仿真建模技术处于不断发展和变化之中，加之编者水平和时间有限，对于本教材中之不足之处，还望广大专家和同行不吝批评指正。

在本书编写和出版的过程中，北京创时能科技发展有限公司的周向阳博士和汪洋经理为我们提供了大力的帮助和支持，在此对他们表示衷心的感谢。另外，对宁波罗文高端供应链研究中心的支持也表示感谢。

最后感谢我们的家人和朋友，对本书出版提供的帮助和支持，他们是（排名不分先后，按姓氏拼音排序）：蔡慧琴，陈秋蓉，陈小龄，高起读，郝桂珍，李良平，李敏，王海强，王丽真，王小红，吴宗琼，俞海宏，于晓辉，于志平，郑敏芳，周宇波。

编者
2018年3月

作者简介

于绍政，河北唐山人，大连海事大学物流工程与管理专业硕士。物流工程专业高校教师，FlexSim 中国认证授权培训中心讲师。曾任北京创时能科技发展有限公司（FlexSim 软件中国唯一总代理）咨询工程师，主要研究方向为系统仿真建模与分析，具备丰富的仿真教学和项目经验。在国内核心期刊上发表了多篇论文，其中有些被EI检索。

陈靖，福建福州人，宁波大学船舶与海洋工程专业硕士。现任吉利汽车动力总成研究院FlexSim 主管工程师，FlexSim 中国认证授权培训中心高级培训师。曾供职于北京创时能科技发展有限公司，拥有丰富的FlexSim 教学经验和实际项目经验，独立地承担了国内多所科研院校的FlexSim 培训及知名中外企业的FlexSim 项目，组织了目前国内唯一的系统仿真专业认证考试，为国内FlexSim 系统仿真行业培养了大量的人才。

高志蓬，浙江温州人，京东物流FlexSim 仿真工程师，FlexSim 中国认证授权培训中心讲师。曾供职于北京创时能科技发展有限公司，拥有丰富的仓储中心、配送中心和现代港口物流的仿真项目经验与部件开发经验，并长期为FlexSim 汉化提供技术支持。

李勇超，四川西昌人，天纳克亚太区高级仿真工程师，曾任北京创时能科技发展有限公司咨询工程师，为华为、高露洁、万达等多家知名企业提供仿真咨询服务，拥有丰富的仿真项目实施及培训经验。

教材阅读提示

本教材的所有内容适用于FlexSim2017，除了对应版本没有的功能之外，绝大部分内容适用于FlexSim6.0至FlexSim2018在内的所有更新版本，且中英文版通用。本教材内容涉及部分，若不同版本中有较大区别，也会特别提出。

本教材共分为3篇计19章。第1篇“通用篇”从FlexSim的运作机理、建模实体、建模工具、建模技巧等方面，全方位地介绍了FlexSim的通用性建模技术，并结合丰富的案例和例图，帮助读者轻松、高效地掌握技术技巧。第2篇“AGV模块”在通用建模的基础上，全方位地讲解FlexSim中AGV模块的建模应用技巧，包含建模基础、内置逻辑、避碰和脚本代码的编写等方面，并结合典型实例，帮助读者进一步地学习FlexSim的建模技术，并学习AGV领域的仿真建模专业知识。第3篇“Conveyor模块”在通用建模的基础上，全方位地讲解FlexSim中Conveyor模块的建模技术，包含建模基础、建模实体、内置逻辑和脚本代码的编写等方面，帮助读者进一步地学习FlexSim的建模技术，并且更加深入地学习传送带系统的仿真建模技术。

为尽量精简正文内容，教材中将使用以下FlexSim基本应用术语。

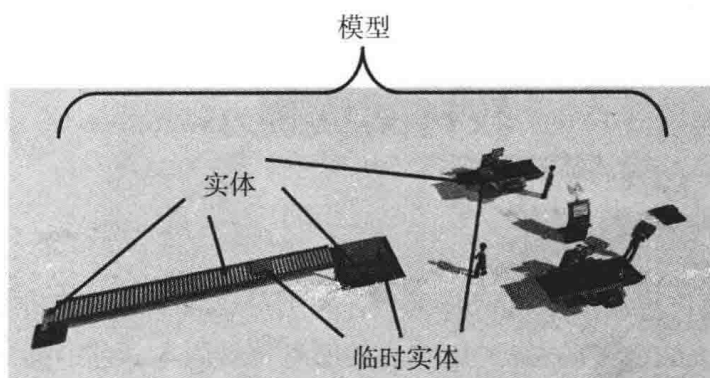
①模型(model)。FlexSim模型是在计算机中建立的一套以排队、加工和运输为主要元素构成的模拟运作系统，其中，“排队”为上游的到达速率超过下游的加工速率而产生的一种状态，“加工”为被加工的临时实体上强制执行的一段延迟时间，“运输”为将临时实体从一个实体移动至另外一个实体的过程。

②实体(object)。组成模型的基础元素，具有行为继承性、支持自定义属性、变量和可视化，用以模拟仿真中不同类型的资源。例如，暂存区可以作为产品存储或缓冲区域或接待大厅的等候区，处理器可以作为车间里的一台机器或分检包裹的员工等。

③临时实体(flowitems)。通常作为驱动模型运行的基本模块，如产品、客户、订单等。除了可以在实体中进行某些操作，还可以使用运输工具将其进行搬运或移动。发生器产生临时实体(因此，发生器是通常模型中必备的实体)，在重置时，自动消失。

④端口(port)。实体之间通过端口建立起互相之间的联系，实体端口数量没有限制，端口分为两种类型：输入/输出端口(A连接)，主要用于设定临时实体在模型中流转的路径，例如，快递分拣传送带根据包裹的目的地，把它们发送到指定输出端口连接的一个传送带上；中间端口(S连接)主要用来通过当前实体获取另一个(无上下游关系的)实体之间的引用，例如，在固定资源实体上，引用任务执行类实体来执行搬运任

务（默认“使用运输工具”设置）。



模型的基本构成

为了使读者阅读英文原版《用户手册》时能够更好地理解指定术语内容，同时为了使行文更加流畅，本教材中会频繁地使用英文简称来表述某些FlexSim的专有词汇，下面将会列出。除此之外，绝大部分的FlexSim专有词汇会在首次出现时，在括号中标注其英文名称，以方便使用英文版软件的读者对照理解。

直接应用的英文简称列表：

临时实体——item

常规选项卡——general

传统的普通传送带——conveyor

发送至端口触发器——sendtoport

分拣传送带——mergesort

任务执行器的无区别称谓——TE

如读者需要通用篇案例配套教学视频，或对本书有任何意见和建议，请联系编者邮箱：15067451119@163.com。

目 录

第1篇 通用篇

第1章 理解FlexSim的运作本质	2
1.1 事件驱动的离散系统	2
1.2 计算机三维仿真建模	4
1.3 FlexSim的特点	5
1.4 FlexSim的企业应用方向	6
第2章 快速入门	9
2.1 基本界面	9
2.2 交互控制	11
2.2.1 视图控制	11
2.2.2 实体操控	11
2.2.3 实体连接	13
2.3 入门案例	13
2.3.1 模型背景和参数	13
2.3.2 模型布局	14
2.3.3 运行参数设置	15
2.3.4 运行和保存	18
第3章 固定资源类实体	19
3.1 共用选项卡	19
3.1.1 临时实体流 (flow)	19
3.1.2 标签 (label)	21
3.1.3 常规 (general)	23
3.2 发生器 (Source)	25
3.3 暂存区 (Queue)	27
案例3.1	28
3.4 处理器 (Processor)	29
3.5 故障/中断 (Breakdowns/Breaks)	31
3.5.1 故障产生和修复表 (MTBF/MTTR)	31

3.5.2 时间表 (Time Table)	32
3.6 吸收器 (Sink)	33
3.7 合成器 (Combiner)	34
3.8 分解器 (Separator)	35
案例3.2	36
3.9 复合处理器 (MultiProcessor)	37
3.10 货架 (Rack)	38
3.11 尺寸表格 (SizeTable)	41
3.12 传送带 (Conveyor)	42
3.13 布局 (Layout)	44
3.14 分拣 (MergeSort Flow)	44
案例3.3	46
第4章 任务执行类实体	49
4.1 共用选项卡	49
4.1.1 任务分配器 (Dispatcher)	49
4.1.2 碰撞 (Collision)	51
4.1.3 任务执行器 (TaskExecuter)	52
4.2 机器人 (Robot)	55
4.3 起重机 (Crane)	56
第5章 路径网络类实体	58
5.1 路径网络的操控	59
案例5.1	60
5.2 网络节点 (NetworkNode)	62
5.3 交通控制 (Traffic Control) 和速度 (Speeds)	63
第6章 视觉类实体	66
6.1 显示用视觉类实体 (Visual)	66
6.2 背景 (Background)	70
案例6.1	72
第7章 AStar 模块	75
7.1 A*导航器属性	76
7.1.1 AStar	76
7.1.2 外观 (Visual)	78
7.1.3 障碍 (Barriers)	79
7.2 障碍	79
7.3 其他工具	82
案例7.1	83

第8章 触发器 (Triggers)	84
8.1 常用触发器类型	85
8.1.1 必须做出决定	85
8.1.2 可选做出决定	87
8.2 触发流程	89
8.2.1 处理器触发流程 (推式)	89
8.2.2 处理器触发流程 (拉式)	90
8.2.3 发生器和货架的触发流程	91
8.2.4 任务执行类实体执行装卸任务的触发流程	92
8.3 触发器中常用选项设置	94
第9章 工具 (Tools) 与统计 (Statistics)	101
9.1 全局表 (Global Table)	102
案例9.1	103
9.2 临时实体箱 (FlowItem Bin)	105
9.3 统计	106
9.3.1 统计属性栏	107
9.3.2 报告与统计 (Reports and Statistics)	108
9.3.3 Dashboard	108
9.3.4 实验器 (Experimenter)	110
案例9.2	112
第10章 其他实用功能	114
10.1 采集器 (Sample)	114
10.2 编辑选中实体 (Edit Selected Objects)	115
10.3 动画编辑器 (Animations and Components)	116
10.4 常用报错及处理	118
第2篇 AGV 模块	
第11章 建模基础	124
11.1 实体选用 (AGV)	124
11.2 创建路径网络	125
11.3 控制点 (Control Point) 基础	127
案例11.1 (简易 AGV 搬运模型)	127
11.4 控制点分配机制	130
第12章 内置逻辑	135
12.1 路径节点 (Way Points)	135
12.2 搜索重定向	137

案例 12.1 (支线路径卸货)	137
12.3 临时实体移动到控制点	141
案例 12.2 (支线路径装货)	141
12.4 AGV 执行任务的两种模式	144
案例 12.3 (AGV 寻找任务)	145
第 13 章 AGV 避碰	150
13.1 AGV 间的避碰仿真	150
案例 13.1 (控制区域的使用)	150
13.2 混合路径网络下的避碰仿真	158
案例 13.2 (AGV 系统避碰仿真)	158
第 14 章 脚本代码	166
14.1 常用函数	166
14.1.1 AGV 相关函数	166
14.1.2 控制点相关函数	168
14.2 监听机制	169
第 15 章 典型实例	171
15.1 AGV 乘升降机	171
案例 15.1 (AGV 乘升降机)	171
15.2 AGV 充电过程	175
案例 15.2 (AGV 充电模型)	176
15.3 拖挂运输	179
案例 15.3 (拖挂运输)	179
第 16 章 其他内容	184
16.1 AGV 模块的外观调节	184
16.2 案例练习	184
案例 16.1 (AGV 自动选择路径)	185
案例 16.2 (固定搬运数量)	185
案例 16.3 (线边取料)	186

第 3 篇 Conveyor 模块

第 17 章 建模基础	188
17.1 基本操作	188
17.2 传送带	191
17.2.1 系统属性 (System Properties)	191
17.2.2 传送带类型 (Conveyor Type)	192
17.3 衔接点 (Transfer)	193

17.3.1 进入衔接点 (Entry Transfer)	193
17.3.2 离开衔接点 (Exit Transfer)	196
17.3.3 内联和侧联衔接点 (Inline/Side Transfer)	197
17.4 动力控制器 (Motor)	198
17.5 合流控制器 (MergeController)	200
案例 17.1 (合流控制)	200
第 18 章 内置逻辑	203
18.1 逻辑载体	203
18.1.1 决策点 (Decision Point) 和站点 (Station)	203
18.1.2 光电传感器 (Photo Eye)	205
18.2 发送实体	207
案例 18.1 (简易分拣)	207
18.3 停止或恢复	209
案例 18.2 (传送系统加工仿真)	210
18.4 控制区域	213
案例 18.3 (简易控制区域模型)	214
18.5 运动学	216
案例 18.4 (舞动的操作员)	217
案例 18.5 (光电传感器应用)	219
第 19 章 其他内容	220
19.1 模块函数	220
19.1.1 conveyorinfo	220
19.1.2 item 和传送带控制	221
19.1.3 合流控制	222
19.2 函数应用	223
应用 19.1 (复杂分拣模型)	223
应用 19.2 (自定义合流顺序)	225
19.3 案例练习	227
练习 19.1 (窄进宽出和宽进窄出)	227
练习 19.2 (自动分拣)	228

第1篇 通用篇



第1章 理解FlexSim的运作本质

系统仿真可以把一个复杂系统降阶成若干子系统，以便于分析，并且能够真实地描述系统的运行、演变及其发展过程。现实中的任何一个系统都不是孤立存在的，作为仿真工程师，既不可能也没有必要将整个运作系统的所有细节一一还原，只需要仿真出核心关注的那个部分或环节。比如，要仿真一条流水线的生产运作效率，不需要还原整个工厂或整个车间的运作流程，也不需要知道原料仓库和成品仓库的出入库情况，只需要知道供给此条流水线的原料存量、工序流程、时间以及上线补料的策略和方式等信息即可。

系统仿真根据模型不同，可以分为物理仿真、数学仿真和物理-数学仿真（半实物仿真）；根据系统特性不同，可以分为连续系统仿真和离散系统仿真；根据仿真时钟与实际时钟关系不同，可以分为实时仿真、欠实时仿真和超实时仿真等。而FlexSim是事件驱动的三维计算机离散系统仿真软件，借助FlexSim仿真软件，工程师或管理者能够自由地选择和组合系统运作过程中的各类元素，在保持较低成本的同时，更为快速、有效、准确地达成分析目标。

FlexSim 可以进行实时、欠实时和超实时仿真。

1.1 事件驱动的离散系统

何为事件驱动？

系统之所以能够持续运行，是因为一个事件的结束会导致另一个事件的发生，当前后相关联的一系列事件完成之后，还需要不断地产生新的初始事件。比如顾客进入超市的营业区域，他会先从入口进入，再决定走哪条路径，拣选哪些商品……直到抵达收银处结账，带着货物（也可能没有购物）离开超市。这些拥有因果联系的单个行为被称为事件，可以明显地看出，是前一个事件发生之后，驱动着下一个事件发生，进而使得整个系统保持运作。如果前一个事件由于某种原因没有完成，那么就不会进行下一个步骤。当系统中所有的事件都无法进行，那么这个系统就会中止运行，正如最后一个顾客离开超市之后，再也没有新的顾客进入超市了，那么这家超市自然也就关门了（也是FlexSim模型自动停止运行的主要原因之一）。

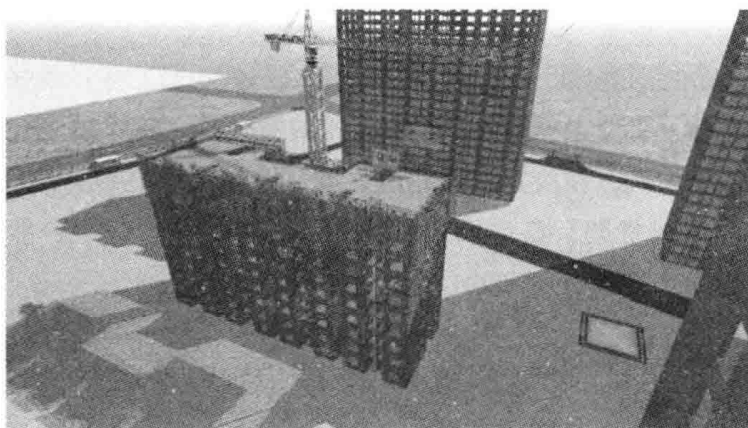


图 1-1 FlexSim 建筑施工流程仿真

为了更好地达成仿真目标，建模工程师编制的事件触发和执行的顺序可以与现实生活中的不完全一致，甚至是完全不一致。因为仿真模型的目标是还原某个系统运作的状态，而不是完全还原该系统运作的方式，也就是说，只要仿真运行过程中所关注的设备、产品、工具等目标状态改变的时间点与现实一致，具体事件发生的先后顺序可以不与现实一致。这一点对于初学者来说，可能需要积累一定的仿真建模经验之后，才能理解得比较好，这是仿真建模工程师需要掌握的一种核心建模思想，充分地理解了这一点之后，会大大地提高建模工作的效率，如图 1-1 所示为 FlexSim 建筑施工流程仿真。

建模逻辑与现实逻辑的区别比较抽象，这里还以超市营业系统为例：顾客既可能带着明确的目标完成购物（拥有一个购物清单）；也可能不带有目标随意逛街（看到什么买什么或者什么都不买）；更可能有一定目标，但还会顺路带上其他产品（或者中途放弃购物）……在现实逻辑中，顾客是走到一个区域（完成购物）再决定前往的下一个区域，如果在仿真模型中，按照这样的逻辑顺序还原，不同的购物特征都要还原，那么建模过程就会相当烦琐。因此，首先根据历史的购物结算清单；然后结合顾客特性，当他一迈入超市，模型就一次性生成该顾客本次购物的清单；最后安排顾客通过指定的路线完成购物流程。如此，建模的复杂程度大大地降低，但不影响模拟得到顾客最终购得的货物和花费的时间等仿真绩效指标。



图 1-2 典型的 FlexSim 离散物流仿真模型

何为离散系统？

离散系统是一个相对概念，与之对应的是连续系统。日常生产生活中需要分析的绝大部分都是离散系统。所谓“离散”，其最重要的特征是，状态的变化有明显的先后顺序。仍然以超市系统为例，在决定进入超市之后，首先决定好购买某个商品，然后花费一定时间到达商品所在货架，最后取得目标商品。在这个过程中，能够明确预计事件的执行导致对象目标状态发生的变化。而连续系统事件的发生没有明确的时间点，比如化工造成反应流程，反应的过程是一直存在的，不是在某个时刻产生了某种物质，而是在持续的不断变化中，流动运输的过程中甚至会发生对产品性质产生重要变化的反应；再比如台风的形成和移动，也是典型的连续系统。连续系统通常由于变化大、影响因素复杂、众多影响因素无法量化等原因，很难进行准确的仿真。FlexSim 是针对离散系统进行仿真的，关注的是系统运作流程中各个参与者之间的变化和互相之间的关系，如图 1-2 所示为典型的 FlexSim 离散物流仿真模型。

实际上，不存在完全离散的系统流程，关键在于用什么尺度去观察这个系统。比如，在生产汽车内饰过程中，需要进行喷漆，喷漆的流程就是连续过程，但并不关注喷漆流程本身，只需要关注进入喷漆作业，喷漆作业结束之后，车身的颜色发生了变化即可。FlexSim 关注、研究、分析、优化的是这种离散过程。因此，如果在流体生产过程中，由于化学反应导致的消耗量是可以预计的，而且关注的核心是在生产过程中，流体的流向和储存量，此时可以使用 FlexSim 的流体部件库来完成相关仿真建模。

1.2 计算机三维仿真建模

“系统仿真是 20 世纪 40 年代末以来伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一门新兴学科”。这是很容易在网上找到的对于系统仿真的概念，实际上，这种说法并不是十分准确的。系统仿真并不一定要利用计算机，古代军队指挥官使用沙盘对两军交锋情况进行验算，就是利用系统仿真手段来寻求解决现实问题的一种方式。计算机技术的应用只是使得系统仿真应用的结果能够更加直观和有效，如图 1-3 所示为 FlexSim 仿真分析生产流水线运作示意图。

20 世纪的计算机仿真受到计算机运算性能的限制，仿真的流程和结果是以二维图表和数字报表来显示的。早期的系统仿真之所以无法进行商业化的推广应用，正是由于数字或者二维仿真拥有严重的局限性：即使仿真结果符合计划要求，但由于无法完全地还原系统运作的全部流程，无法确定仿真的过程是否完全符合要求（当然，这也延伸出学术上很多验证仿真模型有效性的方法）。仿真的三维化，绝不仅仅是为了满足视觉上的需求（三维动画软件的动画显示效果要远远超过仿真软件的动画显示效果），而是为了能够直接地检验仿真模型的有效性。即使是不懂仿真的人，也可以快速地判断出仿真模型是否按照真实系统在运行（这种情况在国内的制造业中非常普遍，国内企业现场管