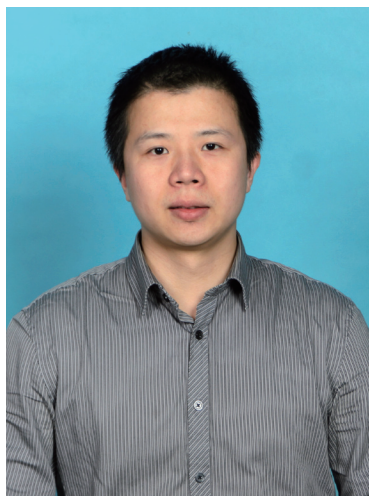


# 基于动态仿真的工艺设计方法和生产效率研究

## Study on Process Design and Production Efficiency Based on Dynamic Simulation

中国航空规划建设发展有限公司工程技术研究院 张超



张超  
工程师,主要从事非标设备设计工作。

生产厂房的工艺设计对厂房建成后的运行效率、生产成本影响极大。在车间内,各种用于电力、动力、照明、控制等目的的电气管线均与作业层的各种工艺设备相对应。布线复杂,而且牵一发而动全身,一旦工艺设备位置发生变动,就会引起各种管道、管线、支管和支线的相应变动。此外,由于不少设备价值高达

将生产效率仿真软件应用于工艺设计是切实可行的,通过本方法,可以对生产线进行全局物流仿真、瓶颈分析、局部加工单元仿真和人机工程仿真分析,从而对工艺规划方案进行验证、调整、更新和优化,既可以为方案的科学性提供佐证,同时能以三维仿真动画的形式将工艺规划方案生动、直观地呈现出来,增强方案的说服力。

几百万美元,并且极为精密,对工作条件要求比较苛刻。对这类设备的位置变动,除可能造成设备损坏外,由于位置的改变还必须对设备重新调整,也会造成人力、物力和财力上的损失。如果设施布置不合理,很容易造成搬运物料时间增加,导致成本增加、生产率降低<sup>[1]</sup>。

由于航空制造业产品复杂,装配任务繁重,多品种、小批量特征明显,在投产前验证和优化工艺规划以及在投产后对生产过程进行高效的管理都变得至关重要。生产制造

系统的布局和配置是否适应所制造的产品,是否是优化的布局和配置?一般的制造系统是非线性离散化的系统,生产制造系统的鲁棒性如何?在某些意外发生的情况下,制造系统是否能够满足生产需求?传统的工艺设计方法均为静态分析方法,不能有效解答前述问题,而动态仿真则是解答前述问题的有效途径。

### 动态仿真技术定义及优势

系统仿真是建立在系统理论、控制理论、相似理论、数理统计、信息技

术和计算机技术等理论基础之上,以计算机和其他专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或假想的系统进行实验,并借助于专家的经验知识、统计数据和系统资料对实验结果进行分析研究,作出决策的一门综合性和实验性的学科。

针对制造系统体系结构设计及优化、生产系统的功能分解,过程组织、生产流程设计的技术正在不断出现。毫无疑问,这些技术将有助于规划、分解工厂的结构、生产设备和制造原料的维护和储存、企业物流系统的设计以及确认企业生产能力和生产瓶颈所在。同样的,在过程组织和生产流程设计方面,也发挥出很大的作用。除此之外,为了解决复杂的设计功能,人们还采用了对生产流程进行模拟的方法。与此同时,还有采用3D动画方式把生产设备及其工作方式,以及由此而产生的对外部环境的影响真实再现出来的3D虚拟现实设备和软件。

通过建模仿真技术对真实工厂的制造资源和工艺数据进行分析,在计算机内建立真实工厂的数字化模型。CAD数据、加工工艺和预计的生产计划作为输入,通过优化仿真系统进行制造过程的模拟,对产品的设计和制造过程进行评价。现在越来越多的优化仿真系统还采用虚拟现实技术进行可视化仿真,并给出优化仿真结果。数字化工厂技术对生产工程的各个环节,不同层次,小到操作步骤,大到生产单元、生产线乃至整个工厂进行设计、仿真、分析和优化。它从并行工程的基本观点出发,在产品阶段就考虑解决生产工程的问题,包括工艺过程设计、工艺装备、机床设备、刀具、生产线或加工单元的布局、人体工程学、生产调度、物料管理等。实现数字化的制造,其结果可用于真实工厂的生产制造。

概括来说,仿真技术具备以下优势:

(1) 处理利用数学模型无法处理的复杂系统。

(2) 能够准确地描述现实情况,确定影响系统行为的关键因素。

(3) 当实际系统不存在,并且直觉以及以往的经验不能给出答案的时候,能够提供进行对比的不同设计方案,提供决策支持。

(4) 能够发现在持续运行的过程中出现的问题,而如果想要在现实的系统中发现这些问题,需要测试非常长的时间,而且可能需要非常大的花费。

(5) 很好地和优化算法结合,避免在真实系统上进行试验所带来的成本。

(6) 有非常好的视觉效果,能够把复杂的、难以解释的系统用直观的方法表现出来。

## 主流仿真软件系统

目前,市场上有许多不同的仿真软件,而且这些软件已经在工业发达国家得到了广泛应用。这些软件具有良好的建模环境并可以再现逼真的仿真动画。以下是对市场上的流行仿真软件进行介绍。

(1) Witness。

Witness 2008 是由英国 Lanner 公司推出的功能强大的仿真软件。它可用于物流系统和离散事件的仿真,也可用于连续流体系统的仿真。Witness 软件目前在世界上很多国家的知名公司有广泛应用。Witness 的主要优点是:采用面向对象的建模机制,建模简便快速,有较为丰富的模型库;采用 VB 语法规则,比较简单易于掌握;仿真动画制作方便;缺点是只能进行平面二维仿真,生成二维动画,开放性相较于其他软件明显不足。

(2) ProModel。

ProModel 是一种通用的仿真软件,它除了可以用来仿真各种物流与供应链系统外,还可以用来对其他各

种领域的系统进行仿真,典型的有生产系统、服务系统、交通运输系统等。通过仿真,可以对系统的绩效进行评价和分析,以及进行各种方案比较。ProModel 将可视化、分析、优化三者合为一体,为客户的决策分析提供功能强大的支持工具,帮助用户更快、更好地作出管理决策。与其他仿真软件相比,ProModel 没有向三维可视化和虚拟视景方向发展,它建立的模型多为二维模型。

(3) Flexsim。

Flexsim 是一款通用的仿真软件,可用于对若干不同行业中的不同系统进行建模。Flexsim 是一套系统仿真模型设计、制作与分析工具软件。它集计算机三维图像处理技术、仿真技术、人工智能技术、数据处理技术为一体,专门面向制造、物流等领域。Flexsim 由对象、连接和方法三部分组成。其中对象是对现实世界中一个实体的描述,采用对象对实际过程中的各元件建模,通过对象之间的连接定义模型的流程。在每个对象的方法中,定义了模型中对象所要完成的作业,其对象可以派生子对象,且子对象拥有其父对象所有的接口和相应功能。

(4) AutoMod。

AutoMod 由美国 Applied Materials 公司出品,于 20 世纪 80 年代开始研发,目前已成为国际上比较成熟、应用广泛的仿真软件之一,可以完成制造系统、物料处理、企业内部物流、港口、配送中心及控制系统等的仿真分析、评价和优化设计。由 5 个模块构成,分别是 Model Editor 模块、RunTime 模块、AutoStat 模块、AutoView 模块以及由一些应用程序构成的辅助模块。其优点是内置模型丰富,提供了输送系统、搬运车、自动化立体仓库、桥式起重机、运动机构等模型库;自然语法规则,适合制作复杂的大系统。

(5) Enterprise Dynamics。

Enterprise Dynamics 是一个面向对象的动态分析和控制系统,是符合动态工程学的比较全面的分析、通信和决策工具。它可以帮助用户分析、预测和执行,减少不必要的风险,提高效益。它的动态运行可以从2D的流图到真实的3D场景渲染,给予用户充分的想象和创造空间,定制和添加用户自定义的套件没有技术的限制。

综合比较这些仿真软件,Enterprise Dynamics 具有以下优点:建模较快捷,有丰富的模型库;4D Script 语言比较容易掌握;有开放的接口,用户可以自定义模型库。因此本文选定该软件为仿真工具,并以某复合材料生产厂的工艺设计为例说明仿真模型的建模过程并进行生产效率分析。

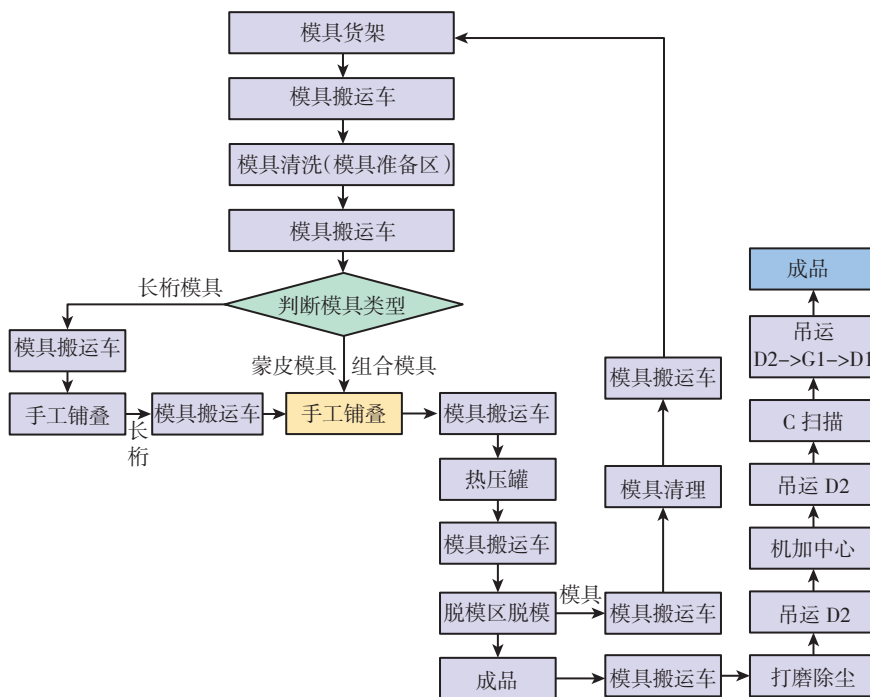


图1 共固化工艺流程图

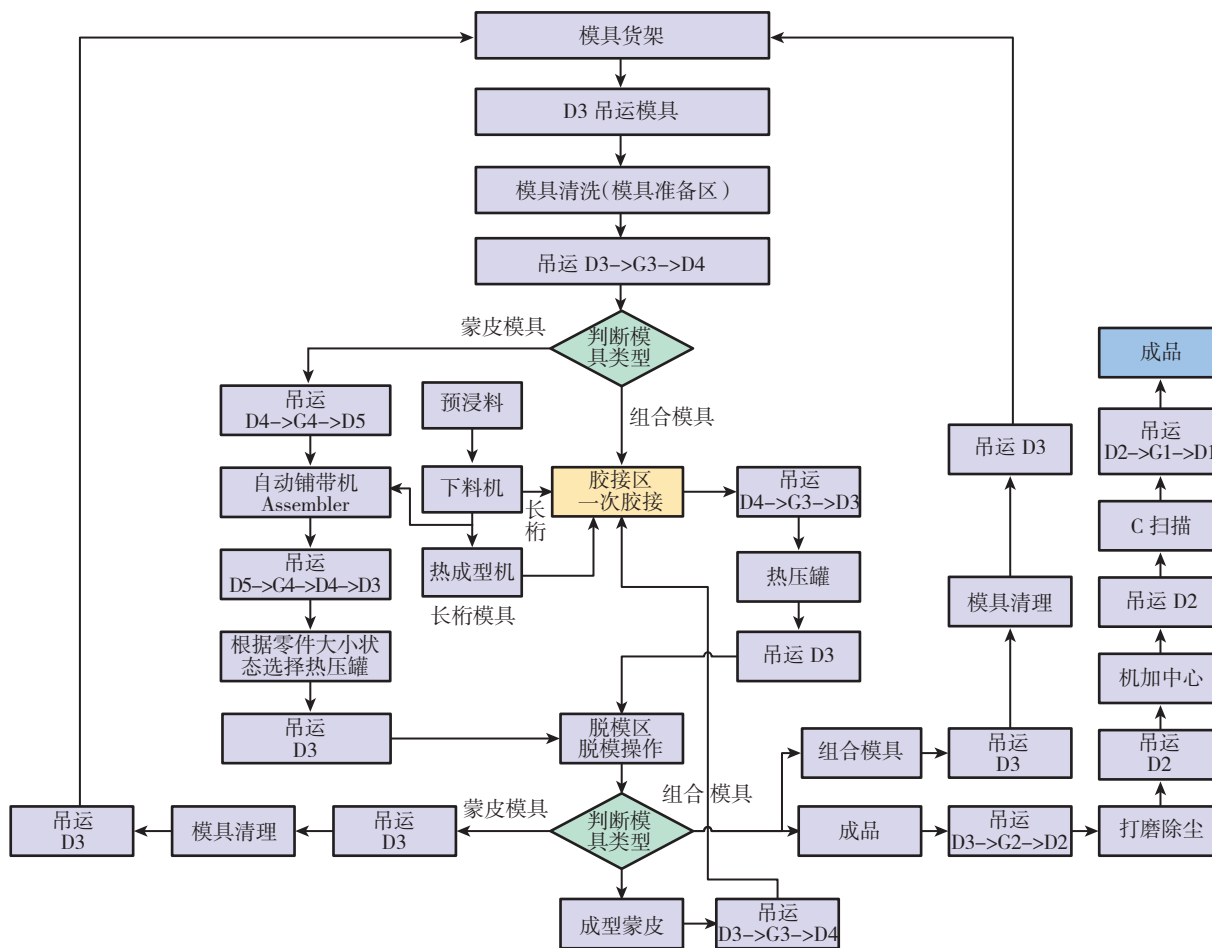


图2 二次胶接固化工艺流程图

## 仿真模型设计实例

### 1 某复合材料生产厂概况

某复合材料生产厂房的主要功能区包括:模具立体存放区、模具准备区、脱模区、自动铺叠间、手工铺叠间、固化区、机械加工区、无损检测区、成品区和装备区。复合材料零件生产工艺主要包括:手工铺叠+热压罐成型工艺;自动铺带+热压罐成型工艺;自动铺带+模压热成型+热压罐成型工艺;编制缝合+RTM成型工艺。

该复材厂的主产品主要用到的生产工艺有:“手工铺叠+热压罐成型工艺”,以某机型尾椎(左/右)壁板为代表产品;“动铺带+模压热成型+热压罐成型工艺”,以某机型垂尾(左/右)壁板为代表产品。两种工艺的流程见图1、图2。

两种工艺的各工艺节点工时统计列表如表1所示。

结合生产纲领、物料运输方式及其他要求,计算工艺设备台套数后得到工艺布置。

值得注意的是,在本复材厂房设计中的一大特色是采用吊车及过轨器作为主要的物料搬运手段,这种搬运方式能够减小大型物料的搬运难度,提高生产效率。

### 2 仿真模型设计

为便于仿真模型的建立,首先应将工艺布置图作为参考底图导入 Enterprise Dynamics 的二维建模空间中,并以工艺布置图中标识各工艺设备的位置为标准,从 Enterprise Dynamics 仿真软件的模型库中选择具有相应功能的 Atom 拖拽到模型空间中的相应位置上,其他一些辅助功能的 Atom,例如状态监视器、全局参数设置表等则布置在合适的位置。

吊车是模型库中已有的元件,已有可以脚本实现起吊、移动、放下物品的动作,但模型库中没有提供

过轨器,本文中以处理器(Server)替代。模具搬运车的运输路线通过模型库中的 NetWork 元件进行设定,最终仿真模型中的 Atom 总数达 239 个。

根据图1、图2所示的工艺流程,将仿真模型中各元件的入口、出口通道进行相应的连接。

为了使仿真系统中的物料流能够按照正确的逻辑关系进行,需要对物料元件增加相应的属性: TechType, 生产工艺标识,1 为二次胶接固化工艺,2 为共固化工艺; SubType, 物料类型标识,1 为蒙皮模具,2 为长桁模具,3 为组合模具; Step, 物料当前所处工艺节点标识。此外,为使物料输送到正确的通道,应在对应的工艺设备元件中编写脚本语句。工艺设备负载、缓存区队列排队原则亦通过脚本语句控制。

为了使仿真模型的三维显示场景更为逼真,用 CATIA 绘制了厂房场景、主要设备的三维模型(图3),并输出为 3ds 格式导入到 Enterprise Dynamics 中,最终的三维场景如图4所示。

### 3 仿真模型的运行规则

本文中的仿真模型设计中存在以下基本假定:

(1) 全年工作日按 250 天计,生产按 3 班制进行,各工艺设备按 3 班制 24h 运转,即运行 6000h 后,仿真模型即停止运行。

(2) 生产线的运转按理想方式进行,不考虑工艺设备的维修保养时间、宕机时间。

(3) 生产节拍的设定以均衡生产、准时化供应为原则,物料在各工艺节点的缓存区内无明显堆积。

(4) 二次胶接固化工艺的物料搬运完全通过吊车与过轨器实现,共固化工艺的物料搬运主要通过模具运输车实现。

(5) 根据工艺工时表,用 Arrival List 控制模具进入系统的时间从而控制生产节拍。

表1 工艺工时表

工序	工艺设备	生产工时/h					
		垂尾壁板			尾椎壁板		
		蒙皮	长桁	壁板	蒙皮	长桁	壁板
模具准备	人工清理	2	1	1	1	0.5	0.5
下料	自动下料机	-	-	-	0.4	0.7	-
铺叠	自动铺带机	4.4	2	-	-	-	-
	人工铺叠	-	-	-	3.9	13	3.7
切割	自动下料机	-	1	-	-	-	-
预成型	热成型机	-	6	-	-	-	-
固化	热压罐	10	-	-	-	-	-
胶接	人工胶接	-	-	4	-	-	-
共固化	热压罐	-	-	10	-	-	10
打磨	打磨除尘室	-	-	4	-	-	2
机加	数控机床	-	-	6	-	-	3
无损检测	C 扫描仪	-	-	12	-	-	5
合计		63.4			43.7		

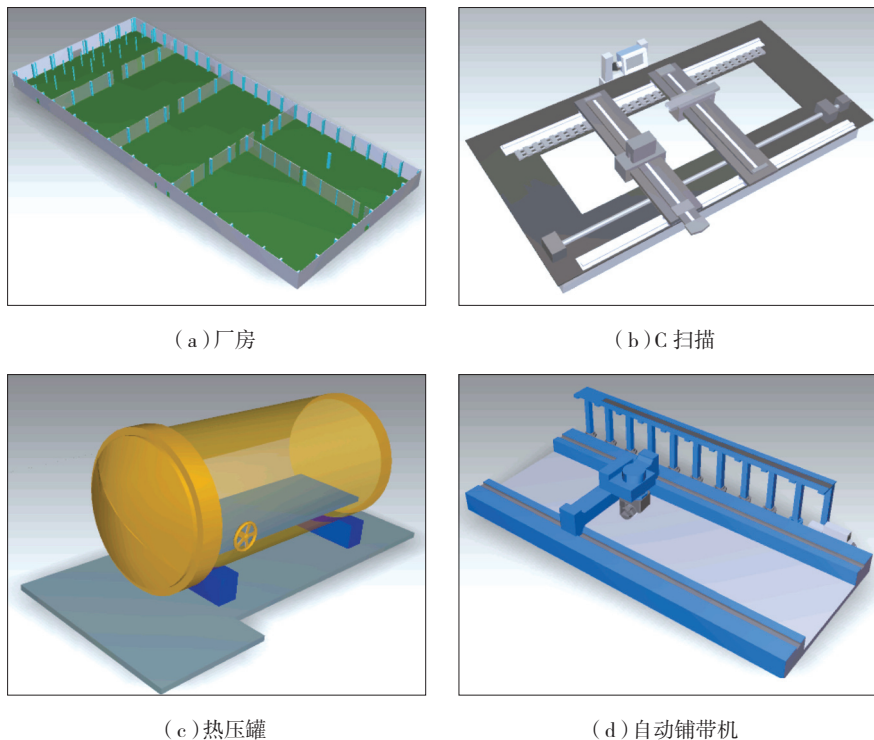


图3 主要设备三维模型

表2 模具进入系统时间列表

时间/h	模具类型	类型标识	数量	生产线标识
1	长桁模具	1	1	1
2	长桁模具	1	1	1
3	蒙皮模具	2	1	1
4	壁板模具	3	1	1
5	长桁模具	1	1	2
6	长桁模具	1	1	2
7	蒙皮模具	2	1	2
8	壁板模具	3	1	2

规则条件下,二次胶接工艺的蒙皮模具进入系统的节拍为:1s 蒙皮,7h 蒙皮,进入周期为 18h;壁板模具进入系统的时间间隔为 7h。共固化工艺的模具进入系统的周期为 16h,进入节拍见表 2。系统内最多有 3 个某机型垂尾壁板蒙皮模具和 3 个某机型垂尾壁板模具。

仿真运行 6000h 后,二次胶接固化工艺的产量为 661 件,共固化工艺的产量为 1117 件,两种工艺过程的产量过程线见图 5、图 6。

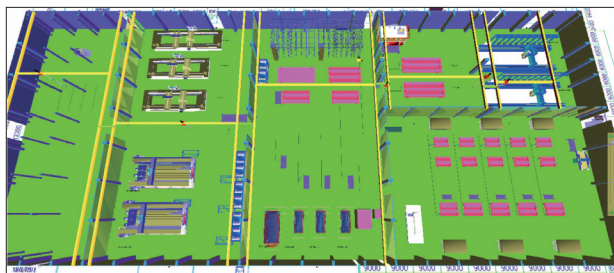


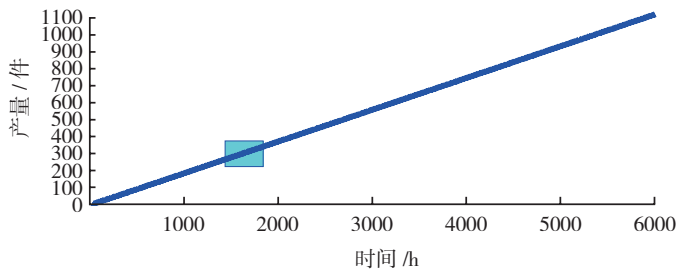
图4 仿真场景

(6) 1 个蒙皮模具、2 个(套)长桁模具、1 个壁板组合模具生产出一个 C 系列垂尾壁板件。对于二次胶接固化工艺,长桁的生产工时较短,忽略长桁模具的供应要求进行简化考虑。

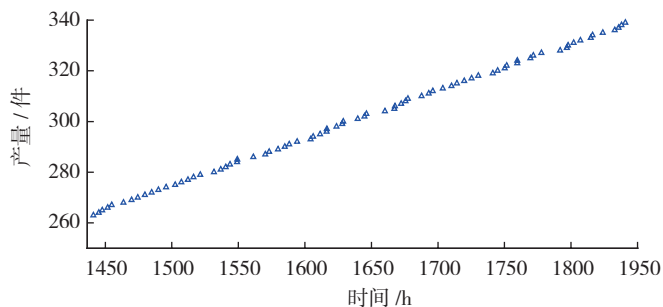
(7) 为简化仿真流程,不考虑组合进罐的情况,假设每热压罐一次进一个壁板件。手工铺叠按生产线的方式进行,考虑到共有 4 个热压罐,假设共有 5 条手工铺叠生产线。

#### 4 仿真模型的运行及结果分析

假设二次胶接固化工艺与共固化工艺的产品生产同时进行,以获取系统满负荷运行下的生产能力。经多次仿真实验,在满足仿真模型运行



(a) 产量过程

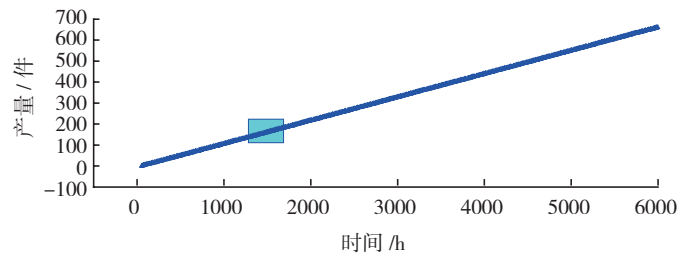


(b) 产量过程局部放大

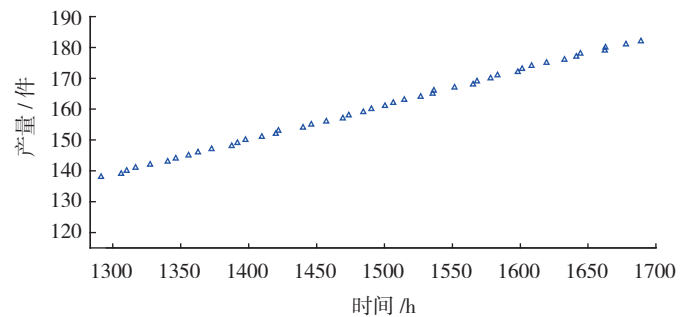
图5 共固化工艺产量过程线

而主要工艺设备的利用率见图7、图8。

在设定的生产节拍下,热压罐的平均利用率达87%,C扫描的平均利用率为76%,自动铺带机的利用率为60%。在本实例中设定的工况条件下,零件在热压罐、C扫描仪等设备上的工时远大于搬运系统的工时,5台吊车的利用率为1%左右,而3台模具搬运车利用也不足1%,因此搬运系统基本不会构成生产瓶颈。此外,从仿真运行的过程及结果可以看出,各工艺节点运行均衡流畅,按准时化供应原则运行时没有出现库存堆积,没有出现明显的瓶颈,因此可以认为本实例中设计的工艺设备数量是科学合理的,并且设备之间具有较好的匹配性。



(a)产量过程



(b)产量过程局部放大

图6 二次胶接固化工艺产量过程线

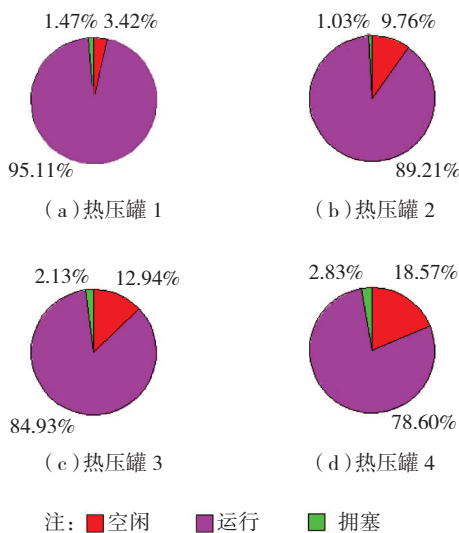


图7 主要设备利用率-1

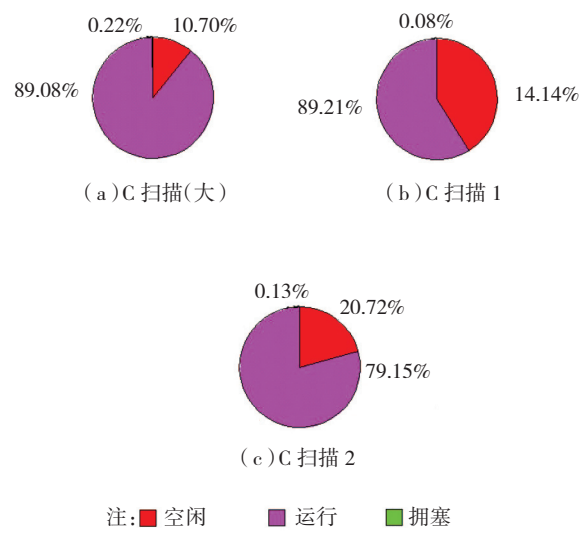


图8 主要设备利用率-2

## 结论

本文所述的工艺流程动态仿真的关注点在于生产效率、生产能力的仿真优化——降低产品生产成本,节约投资,提高单位时间产量。本文结合设计实例探讨了将系统仿真手段用于工艺设计、验证的方法。结果表明,将生产效率仿真软件应用于工艺

设计是切实可行的,通过本方法,可以对生产线进行全局物流仿真、瓶颈分析、局部加工单元仿真和人机工程仿真分析,从而对工艺规划方案进行验证、调整、更新和优化,既可以为方案的科学性提供佐证,同时能以三维仿真动画的形式将工艺规划方案生动、直观地呈现出来,增强方案的说服力。除规划设计阶段、技改阶段的

工艺方案仿真外,仿真方法还可应用于既有生产系统的生产效率评估、生产瓶颈诊断、提出优化措施并进行仿真验证。

## 参考文献

- [1] 俞静,钱省三,邵志芳. 半导体制造车间设施规划浅析. 制造技术,2003,28(6): 21-24.

(责编 三丰)