

基于Plant Simulation的航空 复合材料生产线工艺布局仿真 建模及评估*

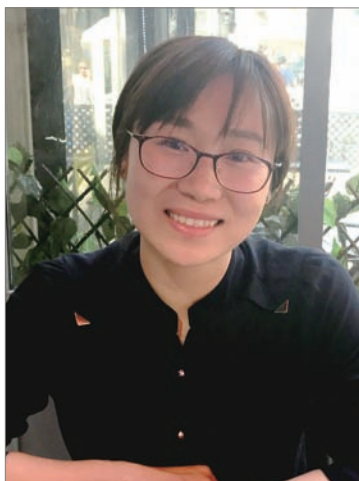
崔晶, 李慧

(中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120)

[摘要] 研究航空复合材料生产线工艺布局仿真评估技术, 建立复合材料工艺流程及生产线布局的数字化模型。以航空复合材料数字化生产线实际项目为依托, 完成复合材料生产线工艺布局仿真建模和模拟试验。通过仿真技术量化分析、论证复合材料生产线的工艺布局方案, 从而指导复合材料生产线的规划设计及运营。

关键词: 航空; 复合材料生产线; 生产线布局; 仿真建模; 评估

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.056



崔晶

硕士, 工程师, 研究方向为生产线布局与仿真、系统集成、数据挖掘。

在航空制造领域, 经过数十年发展的复合材料已实现了从非承力构件、次承力构件到主承力构件的应用。国外军机、直升机、无人机上复合材料用量早已达到或超过 50%, 新一代大型客机上复合材料的用量也超过 50%, 通用航空领域小型飞机复合材料用量更高, 部分机型达到了结构重量的 90%。我国航空工业复合材料技术经过数十年的发展, 已经掌握了大量先进复合材料零件制造技术, 复合材料的垂直安定面、水平尾翼、方向舵、前机身等构件已在多种型号飞机上使用。随着复合材料产量需求的增加, 复合材料生产厂房的建设需求也快速增长。其中, 复合材料厂房的工艺布局对于业主方的产品产量、产品质量、运营成本起着至关重要的作用。企业的设施布局是否合理, 物流是否顺畅有序直接影响着企业的生产效率和生产成本^[1-3]。

工艺仿真研究是设施布局的一项重要环节。生产线工艺建模和仿真技术是对生产线进行分析、试验、诊断、评价的最经济、最安全的一种方法, 尤其在分析复杂程度高的生产系统时, 它几乎是唯一的途径。通过工艺仿真量化分析、论证复合材料生产线的工艺方案设计, 解决工艺布局不合理、生产节拍不稳定的问题, 指导复合材料生产线的设计及运行, 从而促进工艺参数稳定, 提升产品质量和生产效率, 降低企业生产成本, 提升航空复合材料制造的核心竞争力。

工艺布局评估方法

工艺布局即工厂布局, 它是根据企业的经营目标和生产纲领, 在已确定的空间场所内, 按照从材料的接收、零件和产品的制造、装配, 到成品的包装、发运的全过程, 将人员、设备、物料等形成的经济活动单元所需

* 基金项目: 2016 年工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目。

要的空间作最适当的分配和最有效的组合,以便获得最大的生产经济效益^[1-3]。

工艺布局评估方法很多,常用的包括单项指标比较评价法、综合指标比较评价法等。单项指标比较评价是指多个方案中的某些指标基本相同时,只有某项主要指标不同,则可比较该项主要指标的优劣情况而取舍方案。比如,当方案的技术水平基本相同时,则可进行方案的经济比较,根据经济效益高低来评价方案的优劣;当经济效益基本相同时,在技术先进性方面差别较大时,则应根据技术水平的高低评价方案的高低^[4]。在综合指标比较评价法的评价指标体系中,有的是定性指标,有的是定量指标,而且定量指标的计量单位又多不相同。因此,在综合指标比较评价时,对定性指标应划分满足程度等级,对定量指标也应划分数量级别,以便专家评审时,按规定标准,针对不同指标具体打分。同时,由于各种指标对方案的重要程度不完全相同,因此,还应对各指标规定其加权值,以便汇总得到最终结论。综合指标比较评价法包含优缺点比较法和加权因素比较法^[5-8]。

传统的工艺布局比选/评估方法,以往采用的是静态公式计算前述的各项评价指标,对于产能、设备利用率等指标尚能有大致把握,但对于在制品库存量、灵敏度分析^[8]等,常用的静态方法则无法奏效了,这就是离散事件仿真技术发挥优势的地方。伴随着仿真技术的出现与迅速发展,将仿真技术应用于企业的设施规划与设计、分析和验证,可以动态模拟产品的生产制造流程,不消耗任何真实制造资源,预测制造系统状态,从而可以做出前瞻性的决策和优化实施方案,因而被广泛应用于复杂制造系统的设计、调度和规划中,对于提高设施布置水平、生产线效率具有重要意义。已经有众多研究者利用仿

真工具研究设施规划问题,肖吉军^[7]讨论了在生产物流系统规划中利用 Witness 软件进行仿真的方法,进行方案优选,并通过设置参数达到优化生产过程的目的。谢磊^[8]利用 Em-Plant 对船舶建造流程进行了建模与仿真,对提高造船效率、提高资源平衡进行了具有一定意义的研究。肖超等^[9]以汽车变速器装配线为研究对象,用 SLP 理论和 Em-Plant 仿真相结合的方法进行变速器装配线规划。通过以上研究可以看出,离散事件仿真技术是获得工艺布局方案评价指标的有效手段,能够全面的从技术角度评价工艺布局方案的优劣。

基于 Plant Simulation 的 复合材料生产线工艺布局 仿真建模方法

目前,制造系统应用中具有代表性的仿真软件主要有 Witness、Arena、Flexim、Plant Simulation 等。Plant Simulation 是用 C++ 实现关于生产、物流和工程的仿真软件,是面向对象的、图形化的、集成的建模、仿真工具,是一类典型的离散事件仿真软件工具。由于 Plant Simulation 支持层次化、参数化建模,具有面向对象、可编程控制等特点,因此本文采用其进行仿真建模^[10]。

航空复合材料零件加工过程中,除了零件的流动,还存在模具的流转,且不同典型件的加工路线及所需模具不同,若使用机床设备之间的固

定连接,则非常不利于控制零件/模具的流动方向,费时费力,且容易出错。为提高仿真建模的效率,这里采用软件提供的 SimTalk 语言编写 Method 的方法构建仿真模型^[11],模型中的基本对象如图 1 所示。

基于仿真模型的基本对象建模,首先读入并设置所需表单,包含零件列表、零件工时信息表、设备表,模具相关信息表等;其次根据表单信息进行模型的创建,在各加工区域中添加 Plant Simulation 库元件表示工艺设备及暂存区,并通过连接线或吊车进行逻辑连接;接着对模型工艺设备、暂存区等的加工时间及容量大小等进行设置,并对其进入进出策略进行适当调整,使其更符合需求;然后经过适当人工调整,建模初步完成;最后经过测试无误后,则布设 AGV 运输系统进行连接各区域。

在仿真模型中,物料由零件源 Source_Part 产生,然后根据零件工时信息表按照其工艺流程先后经过各个加工设备,最终到达成品存放区;模具由源 Source_Mould 产生,然后按照模具及工序工时信息表(图 2)中的工艺流程,通过准备工作、与零件合并、随零件流转、最终与零件分离回到模具库。其中,对于多台同型设备的任务分配按等概率进行。

此外,为实时观察各设备的运行情况,监视在制品库存^[12]和自动统计最终产量,另外建立了生产监视看板模块,展示各设备的负荷情况、各

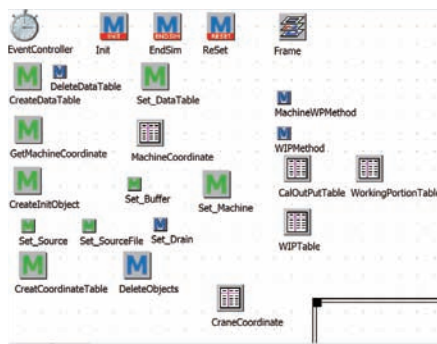


图1 仿真模型中的基本对象

Fig.1 Basic objects in the simulation model

单元的在制品数量以及产量情况等,如图3所示。在开启动画模式进行仿真运行时,可以从各个加工区的显示面板上观察到加工设备的实时效率状态,类似于数字化工厂的生产线实时监控系統。

基于 Plant Simulation 的某企业复合材料厂房工艺布局仿真评估案例

1 项目概况

某厂欲新建 5.5 万 m² 复材厂房,地块比较方正。地块周边环境为北边数控厂、南边总装厂、西边动力站、东边有食堂。该厂主要负责主要生产军机型号产品,产品以层压结构件、复杂结构件为主,生产属于多品种、小批量的生产。通过开发的标准化表单零件信息表采集数据,并对零件按尺寸大小进行归类,得到该厂目前主要生产的典型产品列表,多为航空预浸料热压固化零件,包含大型零件 6 类,中型零件 11 类,小型零件 3 类,典型零件生产纲领见表 1。搜集典型零件加工流程图(含模具流转)和工序工时信息,以 G 型件为例,给出典型零件加工流程图,如图 4 所示。

根据对典型产品的工艺分析,该厂房的功能区主要包括手工铺叠区、自动铺叠区、热压罐区、烘箱区、机加区、手工切割区、无损检测区、喷漆区、吹砂喷铝区、装配区。考虑到产品种类多,模具数量和种类较大,因此设置模具库方便模具存储。

2 厂房布局方案图初步分析

根据产品生产工艺流程顺流原则,布置了 2 版初步方案图,如图 5~8 所示。

初步方案 1 中,产品物流在大流程上呈现一字形,工艺流程较为顺流,模具物流主要集中在区域左上角。由于该厂生产的复材产品中部分产品的尺寸较大,配套模具的尺寸大、质量重,加上历史留存模具需要

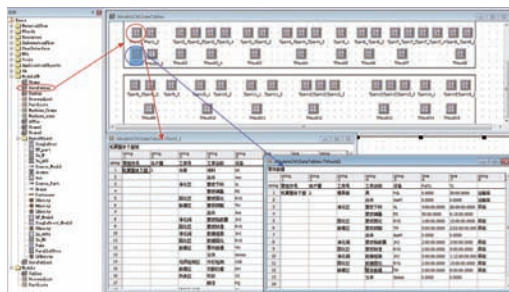


图2 模具及工序工时信息

Fig.2 Mould and working hours information

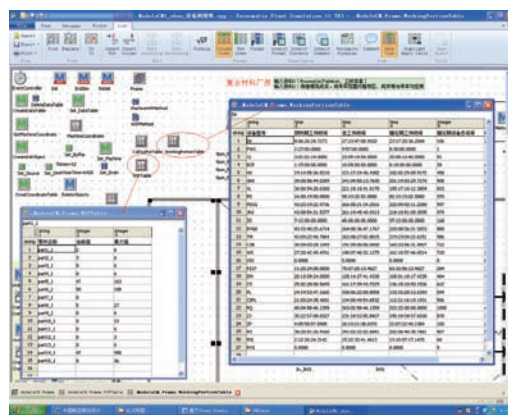


图3 仿真测试设备负荷情况、各单元在制品数量

Fig.3 Simulation experiment on the load of equipment and the number of working in process

表1 典型零件生产纲领

Table 1 Typical parts production program in

	零组件名称	生产纲领
大型件	A 型零件	60
	B 型零件	60
	C 型零件	60
	D 型零件	60
	E 型零件	60
	F 型零件	60
中型件	G 型件	1620
	H 型件	1080
	I 型件	450
	J 型件	60
	K 型件	60
	L 型件	120
	M 型件	60
	N 型件	60
	O 型件	60
	P 型件	60
	Q 型件	90
小型件	R 型件	1200
	S 型件	960
	T 型件	360

存储,若所有模具均放置在模具库中,可能会存在模具存放区域面积不足的问题。吹沙喷铝间位于东北角处,污染较大,而东面是食堂位置,可能会对道路上大量的人流产生影响。固化区位于厂房中间位置,作为散热源,最好尽量与其东面紧邻的机加设备有隔离,同时动力管线需要从地下走线进行布置。

初步工艺布局方案2中,产品物流在大流程上呈现回字形,工艺流程顺流。厂房考虑到将部件装配区纳入厂房中,因此再南方区域分割出一长条形装配区,装配完的部件产品可以直接拉到总装厂进行总装,距离路程较短。净化间位于厂房中间区域,由于该厂很多零部件的铺叠工序仍是手工铺叠,需要铺叠台进行工作,因此铺叠间面积是制约净化间能力的重要因素,净化间面积需要核算。同时将蜂窝芯加工间、下料间又割出净化间的一部分面积。冻库、蜂窝芯库等原材料库房位于厂房东南区,其运送到蜂窝芯加工间、下料间需要穿过或越过装配区,造成物料运输较为不便。

3 仿真建模及假设

航空复合材料零件加工过程中,除了零件的流动,还存在模具的流转,且不同典型件的加工路线及所需模具不同。这里采用 Plant Simulation 软件进行仿真模型,模具和零件使用不同模块控制。仿真输入为典型零件数量表、典型零件加工工序表(含模具)、典型零件工序工时表、工艺设备表、初步方案图等。建立的仿真模型如图9和图10所示。

就本项目而言,仿真主要解决两方面问题:(1)优化,通过在不同参数下的仿真运行,实现工艺设备台套数、模具数量、运输设备数量等的优化;(2)比选,从物流量、设备占用率等方面定量分析比较,实现工艺布置方案的优选。在本项目的仿真中,有如下假设条件:

(1)根据《航空工业工程设计规程》的要求,仿真模型中设备年时基数按照5350h计算,数控设备的设备负荷率按85%计算;复合材料手工铺叠工序生产班制采用一

班制每班工作8h,工位年时基数为1740h,人员负荷率按80%计算,仿真运算考虑准备时间对最终结果的影响。

(2)对于冻库、蜂窝芯库、材料

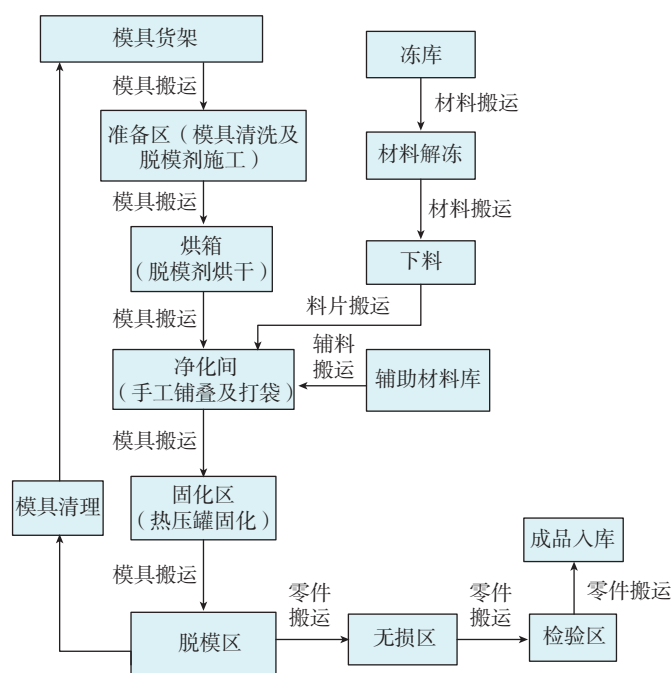


图4 G型件加工流程图

Fig.4 Processing flow chart of G type parts

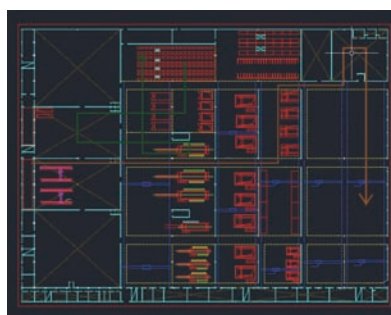


图5 初步工艺布局方案1

Fig.5 No.1 process layout plan

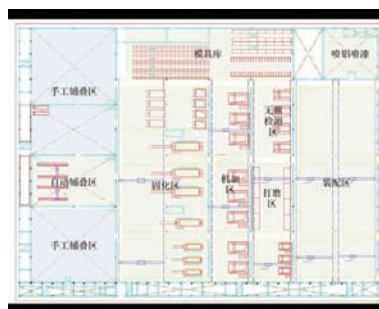


图6 初步工艺布局方案1功能区分布

Fig.6 Functional area distribution of No.1 process layout plan

库、半成品库、脱模设备、喷漆设备、吹砂、喷铝设备等依靠人力或未明确给出设备数量的设备均按生产能力足够计算。

(3) 由于没有各产品的具体交付规定,仅有年产量要求,因此生产排程问题简化为将产品分若干个批次投产。

(4) 仿真过程中需求产量按预计生产纲领计算,零件数量由典型零件数量表、零件组成表及典型零件工序表共同确定,部分零件中由其他辅助复材产品组成,如XX产品组成包括蒙皮2张、蜂窝夹心、肋3个梁、肋等,若其工序流程中不包含复材梁、肋的制造过程,则需在单制梁、肋的数量上进行扩充。

(5) 热压罐由于缺少组合进罐数据资料,仿真中只能将热压罐设置为同时可容纳5个零件,且大型零件只能进大罐。

(6) 仿真过程中,发现当下料机按照所给工时加工时,其前暂存区堆积大量零件,严重影响后续工序进行,从复材厂了解到下料是一个非常快的过程,基本不可能构成瓶颈,因此这里将下料机生产能力适量扩大,认为其生产能力足够。

4 仿真试验结果分析

对2版初步方案图进行仿真建模和试验评估,分别对设备利用率、物流情况、模具数量等进行模拟试验。

(1) 模具数量对比。

模具是复材零件生产中的重要工具,同时模具制造价值较高。由于蒙皮、加筋壁板以及内外副桁肋零件的年产量特别大,因此单独对以上3类零件的模具数量进行仿真试验。按照蒙皮、加筋壁板、桁肋零件制造时,均以完成生产纲领要求为目标。经试验,得到两版初步方案图的结果为方案1:蒙皮10、加筋壁板14、桁肋22;方案2:蒙皮11、加筋壁板15、桁肋24。

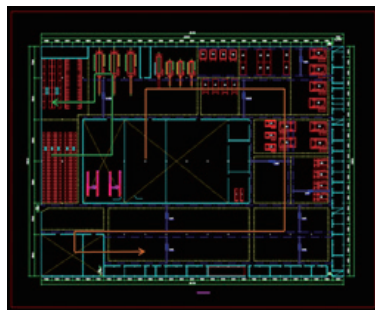


图7 初步工艺布局方案2
Fig.7 No.2 process layout plan

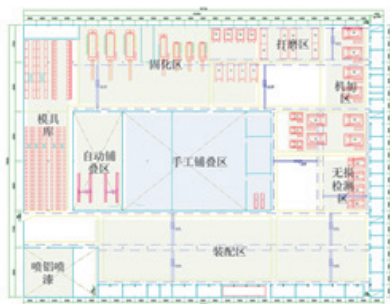


图8 初步工艺布局方案2功能区分布

Fig.8 Functional area distribution of No.2 process layout plan



图9 初步工艺布局方案1仿真模型图

Fig.9 Simulation modeling of No.1 process layout plan

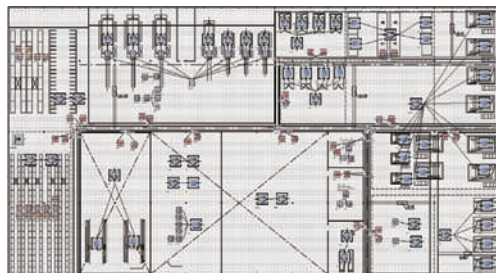


图10 初步工艺布局方案2仿真模型图

Fig.10 Simulation modeling of No.2 process layout plan

(2) 铺叠区面积对比。

净化间是重要的铺叠工序,其面积大小将对铺叠能力产生影响。根据调研得知,蒙皮、壁板类等大型形状较为规则的零件可使用自动铺带

机进行铺叠,而小型零件或者形状不规则的产品通常使用手工铺叠的方式进行。在仿真试验中,定义大中型零件的蒙皮壁板使用自动铺带机进行铺叠,小型件及辅助零件梁、肋等

使用手工铺叠。默认1个铺叠台1次只能完成1件产品,以完成年内生产产量为目标,通过多次试验,得到2版初步方案图的铺叠台数量为方案1:铺叠台数量17;方案2:铺叠台数量16。

(3) 设备利用率对比。

设备利用率是生产线利用情况的重要指标,通过多次仿真试验对重要设备的设备利用率进行分析,如图11所示。其中对热压罐的设置,由于没有获取到组合进罐的规律,仿真中设定为一罐同时可容纳5个零件,且大型零件只能进大罐,热压罐能力充足。

通过对比可以发现:两版方案的设备占用率差别不大,有区别的在于:下料、手工铺叠、吹沙、喷铝(方案2略高),热压罐、装配(方案1略高)。手工铺叠、无损检测、固化,仍是生产加工设备占用率较大的工序。

经仿真试验,两版布局方案设备占用率均未达到满负荷,未出现在制品堆积情况。如实际生产过程中出现在制品堆积、设备超能力运转,方案1和方案2均可在出现在制品堆积的区域使用预留零件暂存区面积(固化区前和机加无损区附近),或在固化区和装配区的预留空间增加关键加工设备扩大产能。

(4) 物流距离及能流图。

物流是影响厂房生产运营的重要影响因素,通过仿真试验对物流运输距离进行测算,方案1物流运输距离约为38438km,方案2物流运输距离约为78200km,由于方案1为直线型布局,所以在物流运输上距离占据较大优势。

图12和图13给出了两版初步方案的物流图,蓝色线表示经过的物流路径。经分析,可以发现两版初步方案图,物流量大的部分集中在模具库到净化间、原材料库到净化间、净化间到固化区、机加、切割打磨、无损区域间、无损到装配区。因此,在

布局时,将物流量较大的区域集中布置,或者利用区域空余位置作为暂存区,可有效物流运输距离。

方案1比方案2的物流运输距离短得多,原因可能有以下几个方面:

(1) 方案1为直线型布局,在物流运输上距离比回型布置的方案2占据较大优势。

(2) 方案2中原材料库、冻库、半成品库均离净化间的位置较远,使

得的前期物流运输距离较大。

(3) 方案2装配区位于地块最南端,离其上步工序使用的打磨设备较远;仿真过程中装配区设备位置的选取在正中间,离机加设备、打磨设备较远,这也可能导致较大的物流量。

经仿真试验结果对比发现,两版初步工艺布局方案在设备占用率、铺叠区面积等指标相差不大,而初步方案1在物流运输上距离占据较大优

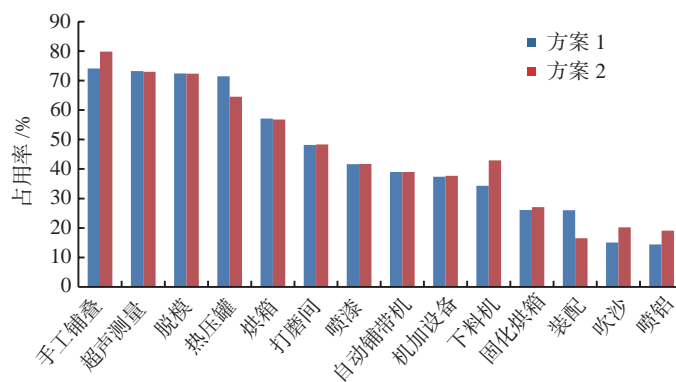


图11 设备占用率柱形图

Fig.11 Simulation results of equipment utilization

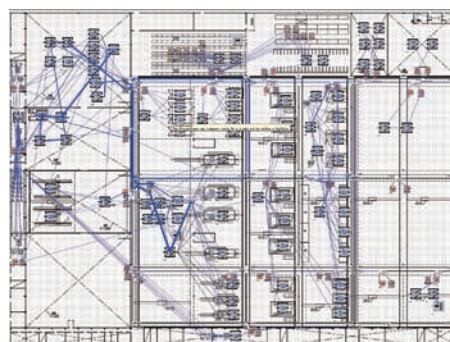


图12 初步工艺布局方案1物流图

Fig.12 Simulation results of material flow of No.1 process layout plan

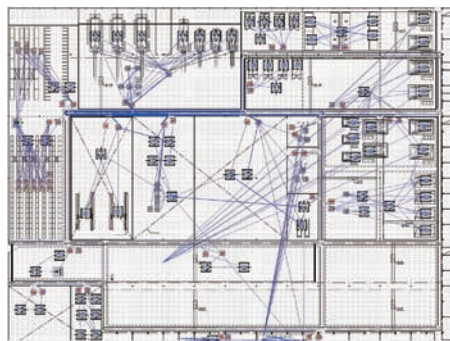


图13 初步工艺布局方案2物流图

Fig.13 Simulation results of material flow of No.2 process layout plan

势。航空复合材料产品由于部分产品尺寸较大,物流运输是制约厂房运营的重要因素之一,因此在本文假设条件下,初步方案 1 较初步方案 2 具有一定优势。

结论

复合材料厂房的工艺布局对于业主方的产品产量、产品质量、运营成本起着至关重要的作用。生产线工艺建模和仿真技术是对生产线进行分析、试验、诊断、评价的最经济、最安全的一种方法。本文研究航空复合材料智能生产线工艺仿真建模技术,建立复合材料生产线工艺流程及布局的数字化模型,以航空复合材料智能制造生产线的实际项目为依托,完成复合材料生产线布局工艺仿真建模及模拟试验,通过仿真评估量化分析、论证和比较复合材料生产线的工艺方案设计,从而指导航空复合材料生产线的设计及运行。

参考文献

[1] 齐二石,方庆瑄. 物流工程[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
 [2] 董海,梁迪. 设施规划与物流分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

DONG Hai, LIANG Di. Facilities planning and design[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[3] 马文峰,奚文. 设施规划在我国的应用与发展[J]. 机械设计与制造, 2005(10): 168-170.

MA Wenfeng, XI Wen. Application and development of facilities planning in China[J]. Machinery Design and Manufacture, 2005(10): 168-170.

[4] 齐二石,田青,宋宁华. 物流系统规划设计方法综述[J]. 天津大学学报(自然科学版), 2003, 5(3): 225-228.

QI Ershi, TIAN Qing, SONG Ninghua. Review of methods of the planning for the logistic chain network[J]. Journal of Tianjin University(Social Science), 2003, 5(3): 225-228.

[5] 马汉武. 设施规划与物流系统设计[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

MA Hanwu. The planning and designing of logistics equipments and facilities[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.

[6] 胡运权,郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2012.

HU Yunquan, GUO Yaohuang. Operational research tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

[7] 肖吉军,李军. Witness 仿真在企业生产物流系统规划中的应用[C]//全国第十届企业信息化与工业工程学术年会. 北京, 2006.

XIAO Jijun, LI Jun. Application of Witness simulation in the planning of enterprise production logistics system[C]//The tenth Session of the Conference of Enterprise

Informatization and Industrial Engineering. Beijing, 2006.

[8] 谢磊. 基于 Em-Plant 的船舶建造流程建模与仿真[D]. 上海:上海交通大学, 2009.

XIE Lei. Modeling and simulation of shipbuilding process based on Em-Plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[9] 肖超,陈书宏. 基于 SLP 和 Em-Plant 的变速器装配线规划研究[J]. 工程设计学报, 2010, 17(6): 430-434.

XIAO Chao, CHEN Shuhong. Transmission assembly planning study based on SLP and Em-Plant[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(6): 430-434.

[10] 施於人,邓易元,蒋维. Em-Plant 仿真技术教程[M]. 北京:科学出版社,2009.

SHI Yuren, DENG Yiyuan, JIANG Wei. Em-Plant simulation technology course[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[11] SIEMENS. Tecnomatix Plant Simulation UserManual[M]. Munich: SIEMENS, 2009.

[12] 孙继忠. 基于 Em-Plant 的汽车混流装配线物流系统优化与仿真[D]. 成都:西南交通大学, 2010.

SUN Jizhong. Logiscits system optimization and simulation of automoblie mixed model assembly line based on eM-Plant[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

通讯作者: 崔晶, E-mail: cuijing@avic-capdi.com.

Simulation Modeling and Evaluation of Aeronautical Composite Material Production Line Layout Based on Plant Simulation

CUI Jing, LI Hui

(China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China)

[ABSTRACT] This essay studies the layout simulation evaluation technology of aeronautical composite production line, and constructs the digital model of aviation composite material process flow and production line layout. Based on actual projects of aeronautical composite materials digital production line, the simulation modeling and simulation experiment of the process layout of composite production line are completed. Through simulation technology, the process layout design of composite material production line has been quantitatively analyzed and demonstrated, so as to guide the instructand operation of composite production line.

Keywords: Aviation; Composite material production line; Production line layout; Simulation modeling; Evaluation

(责编 大漠)