

# 汽车总装线建模与仿真研究

李波, 王俊

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

**【摘要】**在对某整车制造企业现有的总装配线的生产现状进行分析后,使用物流仿真软件ProModel对该总装线的设施布局、生产状况和物流方式进行全面建模。并通过仿真分析,得出现有总装线上的详细生产状况如装配点的利用率、生产周期、在制品库存,以此分析出装配线的瓶颈环节,从而辅助企业管理者更好地进行产能规划,控制库存,提高生产线效率。

**关键词** 总装线设备; 计算机仿真; 计算机软件; 库存控制; ProModel  
中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Modeling and Simulation of a Truck Assembly Line

LI Bo and WANG Jun

(Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The truck assembly line is one of the most important phases of a vehicle manufacturing. One of the most key factors to make the enterprise more efficient and competitive is how to find and eliminate the bottleneck of the line in time. Based on the current production status of a truck manufacturing enterprise, a whole assembly line is modeled by the computer simulation software named ProModel. The parameters of the line, such as utilization of workstation, cycle time, work-in-process (WIP) etc., are obtained, and therefore, the bottlenecks of the line can be identified. Simulation results can help the factory managers to make better capacity plan and inventory control and improve the production efficiency.

**Key words** assembly machines; computer simulation; computer software; inventory control; ProModel

随着市场竞争加剧及客户需求向着多品种小批量的方向发展,越来越多的以装配生产为主的企业选择能够进行多品种混合生产的柔性生产线以满足市场的需求,如汽车整车制造行业。某汽车制造公司是国家定点生产卡车及农用车的制造企业,经过十多年的发展,产品从单一的农用车发展到现在的小型、中型和重型卡车数十个总成系列,派生车型众多。在其具有混流装配线的总装配车间具有物料繁多、装配时间不确定等问题,所以如何及时发现总装配环节的瓶颈工序,使装配活动流畅、高效的运行是决定企业竞争力的重要因素。国内外利用仿真软件进行总装生产线平衡已有较多研究,文献[1]对直线和U型装配生产线进行了多规则多目标的仿真研究;文献[2]用遗传仿真模型研究了看板式生产的装配线的库存和物料搬运;文献[3]则利用仿真退火算法对混合模型装配线进行研究;文献[4]在Flexsim仿真平台基础上对混流生产线上不同的投

产顺序进行仿真,为不同排产顺序得出了仿真结果;文献[5]在数字化工厂软件eM-Power的平台上建立了轿车总装车间的底盘工段与分装工段部分工位的仿真对象模型及控制逻辑。本文在分析总装线现状的基础上,进行计算机建模和仿真分析总装环节的工序,以达到更好地进行产能规划、消除瓶颈工序、控制在制品库存、提高设备利用率、减小装配过程中的在制品、优化总装车间设施布局和装配过程的目的。

### 1 汽车总装线现状分析

该汽车制造公司的总装车间总装线的装配流程如图1a所示。其中,引擎装配和驾驶室安装由独立地点装配,以适应不同车型选择对应的驾驶室和发动机,驾驶室装配线的装配流程如图1b所示。由于引擎装配线相对比较简单,本文不列出其装配流程图。整个装配过程采用人工装配和机械运输相结合

收稿日期: 2007-04-13; 修回日期: 2007-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(70701007)

作者简介: 李波(1975-),男,博士,副教授,主要从事工业工程与系统工程、生产过程控制与自动化技术、系统可信性技术等方面的研究

的模式来完成,前后两道工序之间采用后道工序拉动前道工序的JIT生产方式。

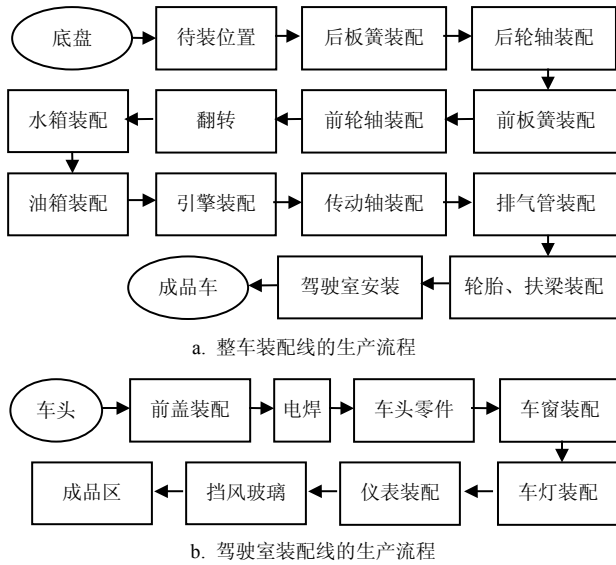


图1 总装线主要装配流程

由上可知,该总装线的装配工序和步骤相对固定,但装配的车型众多导致了生产过程复杂、不同配件的跟踪困难等问题出现,因此通过一般的统计分析难以找出装配过程中的瓶颈工序和需要进一步优化改进的工序。而通过计算机仿真的方法能够充分分析系统,找出一些在实际生产或数据统计中很难发现的变化,并可验证系统在新的生产策略下是否到达预定工作效能,而不必浪费实际资源去验证。因此,应用计算机建模与仿真的方法进行生产过程的工序瓶颈分析和优化改进是目前常用的有效方法<sup>[6]</sup>。

## 2 计算机建模

物流设施规划软件ProModel是美国PROM

ODEL公司推出的一款面向制造、医疗、服务系统的可视化仿真软件,具有交互式图形建模界面、仿真实验设计、多功能动画显示、仿真数据统计分析和动态显示等功能<sup>[7]</sup>,目前已大量用于生产过程的仿真<sup>[8-10]</sup>。应用Promodel建立总装车间仿真模型的过程主要包括数据采集、模型建立、模型的假设规则和运行参数等的设立。

### 2.1 基本数据采集

基本数据采集是仿真分析中最重要也是耗时最多的步骤之一,一般从以下3个方面进行。

#### 2.1.1 车间布局

车间的现有各种设备、人员的实际布局和参数包括:(1) 车间形状、面积(长、宽);(2) 设备的布局方式、占地面积、各自的位置;(3) 设备的功能、名称,对设备进行标号;(4) 设备之间的相对距离;(5) 同种设备的数量;(6) 操作员与设备之间的配给关系。

#### 2.1.2 实体流程图

实体流程图即是最初的原材料通过各种加工和装配工序直至生产出成品整个过程中所经历的一系列的操作过程。对于该公司的总装车间,总共有3种最初的实体:驾驶室框架(驾驶室装配线)、底盘(总装线)和发动机(引擎装配线),其实体流程图如图1所示。

#### 2.1.3 确定各工序操作情况

对流程图中各工序进行时间研究,详细描述每一个操作,如表1所示。表1是驾驶室装配线的部分工序记录,其中,装配加工时间(activity time)是在记录多组数据的基础上提炼出的统计分布,如 $N(5,1)$ 表示服务均值为5,方差为1的正态分布。

表1 驾驶室装配线部分工序记录

装配点	装配加工时间/min	工序所需资源	下一个装配点	搬运触发	搬运时间/min	搬运所需资源	装配能力/unit	缓冲容量/unit
前盖装配	$N(5,1)$	装配工人	电焊	无	1.0	吊项	2	2
电焊	$N(3,1)$	装配工人	车头零件	拉动	1.0	吊项	1	1
车头零件	$N(4,1)$	装配工人	车窗装配	拉动	0.5	传送带	1	4
车窗装配	$N(5,1)$	装配工人	车灯装配	无	0.5	传送带	1	2

### 2.2 总装车间仿真模型的建立

下面通过采集该汽车制造公司总装线实际运行的数据,结合ProModel仿真软件建模要求,采用以下步骤来建立该装配车间的仿真模型。

#### 2.2.1 定义各装配点(location)

根据该装配车间的现有情况,定义以下装配点:

前门、等待前盖装配、前盖装配、前盖装配、前盖装配、等待电焊、电焊、等待车头零件装配、车头零件装配、等待车窗装配、车窗装配、等待车灯装配、车灯装配、等待仪表盘装配、仪表盘装配、等待挡风玻璃装配、挡风玻璃装配、车品车头存放、侧门、滤清器存放、引擎存放、组装引擎、成品引擎存放、

车架存放区、待装车架、后板簧装配、后轮轴装配、等待前板簧装配、前板簧装配、前轮轴装配、等待翻转、翻转、等待水箱装配、水箱装配、等待油箱装配、油箱装配、引擎装配、传动轴装配、等待排气管装配、排气管装配、扶梁\_轮胎装配、扶梁\_轮胎装配、扶梁\_轮胎装配、等待车头装配、安装车头、安装车头、安装车头、后轮轴库存、前轮轴库存、板簧库存、水箱库存、油箱库存、传动轴库存、排气管库存、扶梁库存、轮胎存放。

### 2.2.2 定义实体、运输路径和运输工具

根据总装配车间所需要的原材料和半成品，定义如下的实体：库存车头、车头、滤清器、库存引擎、引擎、车架、后轮轴、前轮轴、板簧、水箱、油箱、传动轴、排气管、扶梁、轮胎、装配车架。

与各实体对应的运输路径的定义如下：车头路径、引擎路径、轮胎路径、车架路径、引擎搬运路径、板轴路径、水油路径、综合路径、搬运车头。

最后定义各路径的运输工具的运动规则和单位运输量，如图2所示。

Icon	Name	Units	DTs...	Stats	Specs...
	运送车头	1	None	By Unit	车头lujin
	运送引擎	1	None	By Unit	引擎路径
	运送轮胎	1	None	By Unit	轮胎路径
	运送车架	1	None	By Unit	车架路径
	搬运引擎	1	None	By Unit	引擎搬运
	搬运板轴	1	None	By Unit	板轴路径
	搬运水油	1	None	By Unit	水油路径
	搬运综合	1	None	By Unit	综合路径
	车头搬运	1	None	By Unit	搬运车头

图2 定义各路径的运输工具

### 2.2.3 定义实体的流程和路线

在ProModel中实体的流程(process)定义是指在一个装配点所进行的装配操作及操作运输量，如图2所示。所耗的时间、路线(routing)定义是指加工后的实体从一个装配点到另一个装配点所经过的路线和所消耗的时间。这里以其中的一个实体“车头”的流程和路线定义说明，如图3所示。其中“车头”实体在装配点“挡风玻璃装配”处经过一定的装配时间(等待N(5, 2) min)，装配点输出还是“车头”，目的地是装配点“成品车头存放”，移动逻辑是使用“搬运引擎”工具经过2 min的搬运后到达下一个装配点，然后增加车头数量Qty\_chetou。根据图1中的装配流程在ProModel中定义对应的实体流程和路线，如图4所示。



图3 流程和路线定义

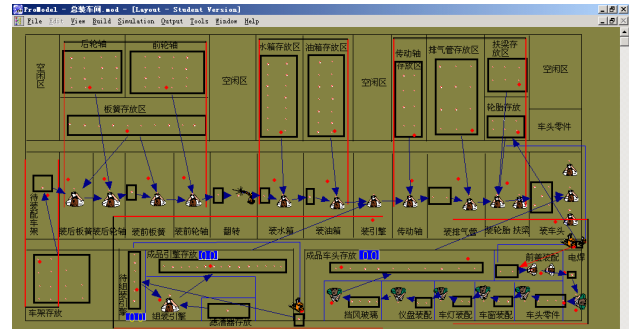


图4 实体的流程和路线定义

### 2.2.4 定义监控变量(variables)

监控变量用于显示仿真系统中车头在制品量、车头的已使用量、车头成品量、引擎在制品量、引擎的已使用量、引擎成品量、总装过程的在制品量和总装成品量等系统的实际运行状态。各变量的变化规则在实体流程和路线中相对应地设置。

完成以上的各步骤的定义和设置后，得到该总装车间的仿真模型如图5所示。

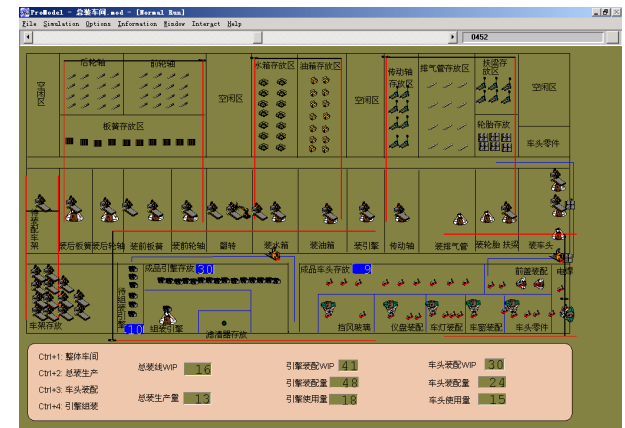


图5 总装车间仿真模型

### 2.3 假设、规则和运行参数

该仿真模型中用到如下的假设：模型的基本单元是装配点；基本的移动实体是车架；多种车型按一种车型计算生产量；原材料的数量是有限的；装配点有一定的缓冲容量。模型中确定的规则有：对于后道工序的缓存为满时，前道工序的产成品采取排队的先进先出规则；在后道工序缓存已满的时候，采取后道工序拉动前道工序的JIT规则。

最后设定模型的运行参数，预热时间(warm up time)为2 h，运行时间为8 h，最小计时单位为min。

表2 各装配线的生产情况

变量名	总数量	每次变化的平均时间	最小值	最大值	实际值	平均值
车头装配WIP	82	5.65	22	33	33	30.65
车头装配量	36	12.86	11	47	47	29.59
车头使用量	36	12.86	1	37	37	19.61
引擎装配WIP	104	4.60	19	51	51	42.73
引擎装配量	52	9.18	19	71	71	50.38
引擎使用量	36	13.26	5	41	41	22.73
总装WIP	73	6.55	14	18	16	15.68
总装生产量	36	13.29	1	37	37	18.69

### 3 仿真运行及结果分析

经过以上步骤，整体的模型已经建立完毕，可以输入仿真参数，直接在ProModel中点选运行即可。模型运行完后，可以从生产量和在制品量、设备利用率等两个方面对仿真结果进行分析。

在生产量和在制品量方面，各装配线8 min后的生产情况的仿真结果如表2所示，该仿真数据基本与车间现有的实际生产情况符合。在设备利用率方面，选取的是整车总装线各装配点设备利用情况，仿真结果如图6所示。

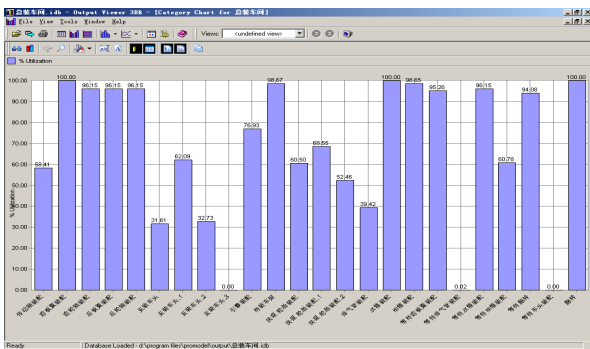


图6 整车装配线各装配点利用率柱状图

从图中可以看出，有接近一半的装配点利用率较低，甚至有些装配点的利用率为0，如装配点“安装车头3”，主要是瓶颈工序处消耗时间过长只需两处安装车头即可，有3处装配点的利用率为100%。由此可以得出有必要采取一定措施提高利用率较低的装配点，同时降低使用率较高的装配点。如对于前板簧装配、水箱装配这些高利用率的装配点可以采取增加装配人员和加快搬运设备速度等方式来降低利用率，对于排气管装配这样利用率较低的装配点可采用减少作业人员或与其他利用率较低的装配点进行合并装配的操作来提高其利用率。

### 4 结束语

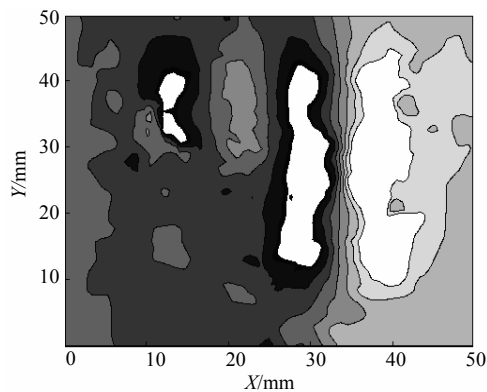
随着制造企业向多品种、小批量的生产方向发

展，如何在较短的时间内完成既定的生产任务是企业能否成功的重要因素之一。本文通过对某整车制造企业现有的总装配线的分析，使用物流仿真软件ProModel对该总装线的设施布局、生产状况和物流方式进行全面建模，根据仿真，从生产量和在制品量、设备利用率等方面对现有的总装配线进行分析，为企业生产管理人员提供决策支持。同时，当企业生产管理人员在进行新的生产决策如产能更新、在制品控制时，还能不通过实际生产线的运行，而借助该仿真模型就能预知结果，为企业节约时间和资源。

### 参考文献

- [1] ADIL B. Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(2): 217-232.
- [2] ONUR U, CHRIS D. Kanban Sim: Assembly line kanban inventory and material handling simulator[C]//6th Annual Simulation Solutions Conference 2004, Conference Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [3] KIM Ho-Gyun, CHO Hyung-Soo. Sequencing in a mixed-model final assembly line with three goals: Simulated annealing approach[J]. International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice, 2003, 10(4): 607-613.
- [4] 赵建辉, 王红军. 基于Flexsim的混流装配线投产顺序的仿真[J]. 微计算机信息, 2007, 23(8-3): 29-31. ZHAO Jian-hui, WANG Hong-jun. The simulation of the production sequence in mixed model assemble line based on flexsim[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(8-3): 29-31.
- [5] 曹振新, 朱云龙, 李富明. 混流轿车总装配线的动态规划与仿真优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 526-532; 551. CAO Zhen-xin, ZHU Yun-long, LI Fu-ming. Research on dynamic planning & simulation optimization of mixed model general automobile assembly lines[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(4): 526-532; 551.

(下转第800页)



b. 缺陷漏磁场等值线图

图7 组合缺陷

## 4 结束语

本文针对实际钢管腐蚀缺陷中缺陷相邻的情况,采用三维有限元方法计算了相邻缺陷之间的漏磁场,并分析了相邻缺陷之间漏磁场的相互影响。计算的结果可以为实际的钢管缺陷识别提供可靠的依据。

### 参考文献

- [1] 刘贵民. 无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 324-325.  
LIU Gui-min. Nondestructive testing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006
- [2] 吴先梅, 钱梦录. 有限元法在管道漏磁检测中的应用[J]. 无损检测, 2000, 4: 147-150.  
WU Xian-mei, QIAN Meng-lu. Application of finite-element method to magnetic flux leakage inspection of pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2000, 4: 147-150.

- [3] HUANG Z Y, QUE W, CHEN L. 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method[J]. NDT&E International, 2006, 39(1): 61-66.
- [4] KATOH M, MASUMOTO N, NISHIO K, et al. Modeling of the yoke-magnetization in MFL-testing by finite elements[J]. NDT&E International, 2003, 36: 479-486.
- [5] MAO W H, CLAPHAM L, ATHERTON D L. Effects of alignment of nearby corrosion pits on MFL[J]. NDT&E International, 2003, 36: 111-116.
- [6] LENONARD S, ATHERTON D L. Calculations of the effects of anisotropy on magnetic flux leakage detector signals[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 1905-1909.
- [7] BABBAR V, SHIARI B, CLAPHAM L. Mechanical damage detection with magnetic flux leakage tools: modeling the effect of localized residual stresses[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(1): 43-48.
- [8] GYIMESI M, LAVERS D, PAWLAK T, et al. Application of the general potential formulation in the ansys®program[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 29: 1345-1347.
- [9] GYIMESI M, LAVERS J D. Generalized potential formulation for 3-D magnetostatic problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(4): 1924-1929.
- [10] 武保剑, 孙开良, 邱 昆. 静磁波变分计算与磁光 Bragg 衍射效率的提高[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(S1): 642-644.  
WU Bao-jian, SUN Kai-liang, QIU Kun. Variational approach to magnetostatic waves and improvement of diffraction efficiency for magneto-optic bragg cells[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(S1): 642-644.

编辑 黄 莘

(上接第792页)

- [6] SEPPANEN M S. Operator-paced assembly line simulation[C]//Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. [S.l.]: [s.n.], 2005: 1343-1348.
- [7] HARRELL C R. Simulation modeling using promodel technology[C]//Winter Simulation Conference Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 2003, 1: 175-181.
- [8] SU Ping, LU Ye. Combining genetic algorithm and simulation for the mixed-model assembly line balancing problem[C]// Proceedings-Third International Conference on Natural Computation, ICNC 2007: 314-318.
- [9] NASEREDDIN M, MULLENS M A, COPE D. Automated simulator development: A strategy for modeling modular housing production[J]. Automation in Construction, 2007, 16(2): 212-223.
- [10] BAJAJ G, SAYGIN C, GRASMAN S E, et al. Performance evaluation of an auction-based job allocation model for small and medium-sized enterprises[J]. International Journal of Networking and Virtual Organisations, 2006, 3(2): 202-219.

编辑 漆 蓉