

# 基于 TOC 的精密制造车间 生产系统仿真与优化

## TOC-Based Production System Simulation and Optimization of Precision Manufacturing Plant

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 刘曙光 贾晓亮



刘曙光

西北工业大学硕士。研究方向为制造业信息化。

制造车间生产系统是一个复杂的离散动态系统,其运作成功与否对企业效益影响重大。但是制造车间往往存在生产效率低及资源浪费等问题。由于生产系统的复杂性,以及生产系统所处环境的不确定性,对其定量优化存在一定的困难。

Scott 等<sup>[1]</sup>应用仿真软件 Arena 对一个汽车企业内部的供应链系统建立了仿真模型,对模型中的因素进行了多水平的组合试验,得到了其对

制造车间生产系统是一个复杂的离散动态系统,其运作成功与否对企业效益影响重大。但是制造车间往往存在生产效率低及资源浪费等问题。由于生产系统的复杂性,以及生产系统所处环境的不确定性,对其定量优化存在一定的困难。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.13.094

系统性能影响的相关结论。Bernard 等<sup>[2]</sup>对金刚石生产系统建立仿真模型,预测了某公司生产必须的机器及工人的数量,分析了系统的瓶颈及机器利用率,并以仿真结果结合决策支持系统对生产系统进行优化。杨堃<sup>[3]</sup>通过 eM-Plant 对某钢管制造企业的生产物流系统进行了建模仿真并提出了优化措施。刘力卓等<sup>[4]</sup>使用 Witness 对某立柱制造车间生产线进行建模与仿真,并对其生产线进行优化。

通过以上分析,国内很少对精密制造企业的生产系统进行仿真。本文选择航天精密制造企业为研究背景,并以企业的精密制造车间生产系统为例进行了仿真建模,通过仿真软件件的运行及其仿真结果的分析,提出了可行的优化措施,为企业生产系统

最终优化方案的确定提供决策参考。

### 基于 TOC 的仿真优化法

TOC (theory of constraints, 约束理论)源于 OPT (原指最优生产时刻表: Optimized Production Timetables, 后指最优生产技术: Optimized Production Technology)。OPT 由 Goldratt 博士和其他 3 个合作者创立,后被发展成为约束理论 TOC。OPT 的基本思想体现在其 9 条原则上,在此基础上发展出来的 TOC,其主要思想是:当客户定货量超出企业的生产能力时,产品出产率就会受到“瓶颈”工序零件出产率的限制,其他零件的需求量也是由流经“瓶颈”工序零件的数量而定的。因此,TOC 的主要处理逻辑就在于找出“瓶颈”工序,并使“瓶颈”工序上的资源得到

充分利用,同时安排好非“瓶颈”工序的资源配置,使之能与“瓶颈”工序保持同步,将使制品积压减少到最低程度<sup>[5]</sup>。

制造系统广泛使用仿真方法作为建模工具和性能评价。仿真方法利用模型对实际系统进行试验研究,这种模型既表达了系统的物理特征,又有其逻辑特征;既反映了系统的静态性质,也反映了其动态的性质。对于各种复杂的物流系统,无论是线性的还是非线性的,无论是静态的还是动态的,都可以用系统仿真方法来研究<sup>[6]</sup>。

基于 TOC 的仿真优化法综合利用了计算机仿真与约束理论,它以系统仿真模型为基础,以约束理论作为优化思路,通过优化系统中的参数从而达到优化生产系统的目的。

量的 80% 左右。作为精密产品,产品 A 的零件加工工序长,加工设备多,且在加工过程中需反复进入某加工单元以达到其加工精度要求。在生产过程中,A 产品经常出现因不能及时完成加工任务而延期交货,故本次仿真以 A 产品工艺较为复杂的 5 种主要工件(壳体、框架、转子壳体、浮筒、转子盖)作为待加工对象,并选取某一时期内的订单作为加工任务,要求待加工对象在订单规定的时间内完成加工任务。其中 A 产品壳体工件的工艺信息如表 1 所示。

## 2 车间生产系统模型的建立

为方便表示,对各设备在模型中进行编号,其编号与实际设备名称对应关系如表 2 所示。结合表 2, A 产品 5 种工件在模型中的加工工艺路线如表 3,按照工件的生产工艺流程顺序,建立精密产品制造车间的模

型,如图 1 所示。

针对此模型,设定如下:

(1) 设单件平均加工时间为  $t$ , 则工件在模型中各 CELL 的加工时间服从  $(t, t-2, t+2)$  的三角分布(单位为分);

(2) 设模型中各 CELL 的设备故障率为 95%,故障平均修复时间(MTTR)为 60min;

(3) 车间在暂存区设置上采用统一形式,即在各加工工序前均设置暂存区(Buffer),最大容量为 100;

(4) 相邻两加工工序间运输距离相等,且其间运输速度为恒定值;

(5) 在加工过程中,人力资源总能满足生产要求,并忽略人对生产过程的影响;

(6) 在仿真模型中,暂不考虑生产过程中出现的残次品及报废品情况;

(7) 仿真模型工作时间设置为每周一至周五,班次设置为一班:8:00~18:00,中间 12:00~14:00 为休息时间。

通过对模型中各对象参数的设置及使用 Method 对模型的控制,最终实现对企业精密产品制造车间生产系统的仿真。

## 3 车间生产系统仿真分析

为消除初始状态对稳态统计数据的影响,本模型设定模型运行 5 天后为统计数据的时间起始点。仿真时间设定为订单完成时间 60 天(模

表1 A产品壳体工艺信息表

工序号	工序名称	加工设备	工时	工序号	工序名称	加工设备	工时
1	数车	HTC150	60	8	钳	—	48
2	热	—	20	9	表	—	20
3	数车	QUEST6/42	42	10	热	—	20
4	数铣	W-418	72	11	钳	—	30
5	热	—	20	12	数车	QUEST6/42	87
6	数车	QUEST6/42	50	13	镗	OP3	87
7	铣刻	X420	20	14	钳	—	20

注:表中,“批量”表示订单中要求的工件数量;“工时”为单件平均加工时间,单位为分;“工序”中“热”表示热处理,“表”表示表面处理,下同。

## 精密制造车间生产系统建模分析

### 1 企业制造车间生产现状

某企业在机电惯性器件制造领域具有丰富的经验并形成了一整套成熟的工艺规程。车间的设备采用 U 型布局,由于建模过程中主要参考工件的逻辑加工顺序,故本文对物理布局产生的影响暂不作考虑。

企业制造车间主要生产精密产品 A 的零件,其产量约占车间总产

表2 模型编号与设备对应关系表

编号	工序名称	设备	编号	工序名称	设备
CELL1	数车	HTC150	CELL9	数车	125CNN
CELL2	热	—	CELL10	车	SV102
CELL3	表	—	CELL11	平磨	JE525
CELL4	数车	QUEST6/42	CELL12	研	—
CELL5	数铣	W-418	CELL3	线切割	DK7732
CELL6	铣刻	X420	CELL14	数车	SV110-CNC
CELL7	钳	—	CELL15	车	GL-120
CELL8	镗	OP3	CELL16	数车	HCT42

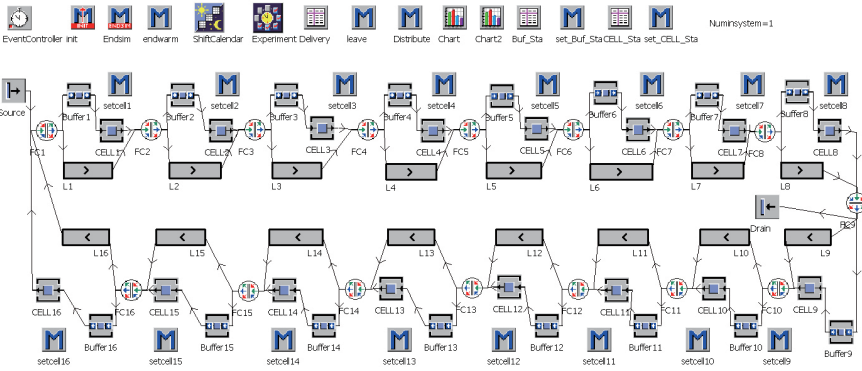


图1 制造车间生产系统模型

表3 A产品5种工件加工工艺路线

名称	加工工艺路线
壳体	CELL1→CELL2→CELL4→CELL5→CELL2→CELL4→CELL6→CELL7→CELL3→CELL2→CELL7→CELL4→CELL8→CELL7
框架	CELL4→CELL5→CELL2→CELL9→CELL5→CELL2→CELL9→CELL5→CELL7→CELL3→CELL2→CELL10
转子壳体	CELL1→CELL2→CELL4→CELL2→CELL11→CELL12→CELL4→CELL13→CELL7→CELL12→CELL3
浮筒	CELL1→CELL2→CELL4→CELL2→CELL4→CELL12→CELL14→CELL3→CELL2→CELL12→CELL10
转子盖	CELL1→CELL2→CELL4→CELL2→CELL15→CELL12→CELL16

型运行中使用相对时间)。图2为初始生产系统中各设备利用率统计情况(统计数据以班次工作时间总和为100%)。

从模型运行的数据统计中可以看出,CELL1和CELL2存在着不同程度的堵塞。各工序的设备利用率差异较大,其中CELL4设备利用率达到91%,说明CELL4可能是存在的“瓶颈”工序。在仿真结束后,仍有工件滞留在模型中未加工完,说明未能按照订单要求的期限内完成加工。

通过对以上数据的分析,发现该机加车间生产系统主要存在以下几个问题:(1)车间物流不通畅。仿真中CELL1和CELL2都出现了堵塞现象,这不仅对其他工序产生不利影响,而且还影响整个生产物流系统的平衡。(2)存在生产“瓶颈”。通过对比,CELL4的设备利用率明显高于其他单元的设备利用率,这很有可能造成后续工序出现停车等料的现

象,从而对其他单元的设备利用率及物流系统的平衡产生不利影响。(3)暂存区设置不合理。在此车间各工序负荷相差较大,这影响到暂存区容量的大小。若暂存区容量设置过大,势必会造成资源的浪费,而暂存区容量设置过小,极易产生堵塞现象。本车间暂存区设置上采取统一的方式,不同的工序使用相同的空间及其他

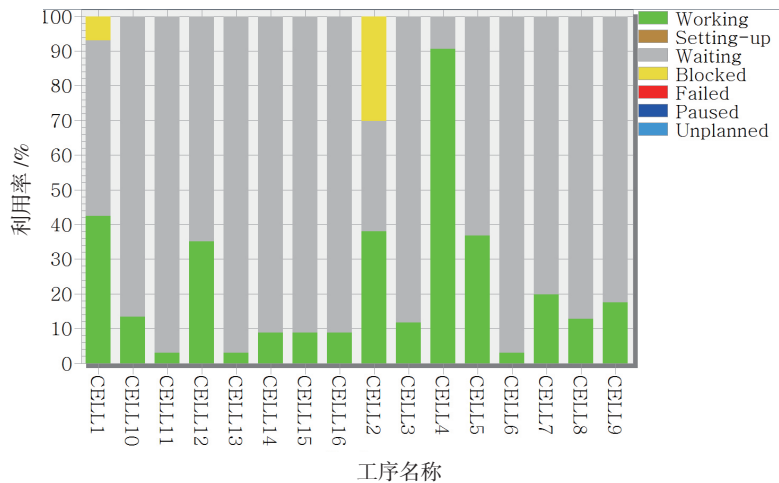


图2 初始生产系统中设备利用率

资源分配,资源利用率低。

## 精密制造车间生产系统优化

### 1 瓶颈工序的利用

TOC理论9条原则中指出:瓶颈资源损失1小时相当于整个系统损失1小时而且是无法补救的,在“非瓶颈”工序上节约1小时不会得到任何实际效益。由此得到的优化思路即找到“瓶颈”工序,通过调整模型中的参数等措施充分利用“瓶颈”工序。

通过对车间生产系统的初步仿真分析,CELL4可能为“瓶颈工序”,为使“瓶颈”工序得到充分利用,并且使生产系统得到平衡,现采取以下措施:(1)在此工序增加一台QUEST6/42数控机床。(2)在此工序单独设置周六周日加班。

针对以上优化措施,对仿真模型进行适当修改,统计结果如图3所示。

对比优化前各单元的设备利用率可以发现:(1)生产物流系统中的堵塞得到消除;(2)虽然CELL4中两台机床的利用率(CELL\_1为78.02%,CELL\_2为78.24%)相对于优化前一台机床的利用率(91%)有所下降,但其它各单元的设备利用率均有不同程度的提升,变化情况见表4;(3)完成订单要求的时间是第56

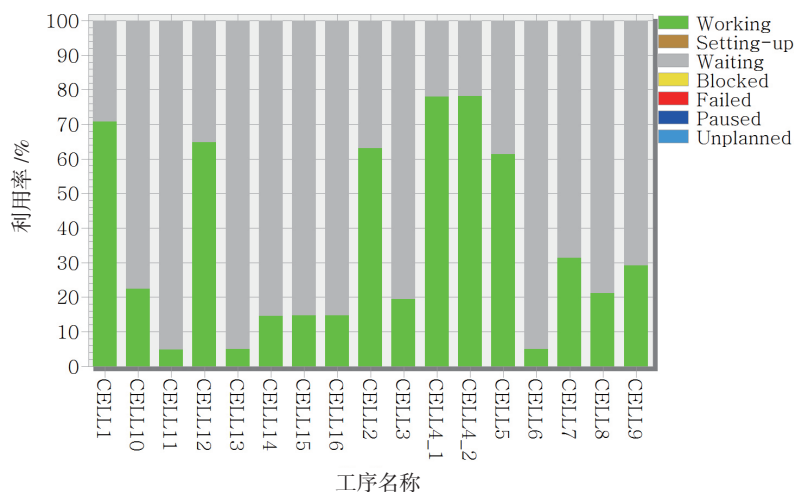


图3 瓶颈优化后设备利用率

表4 瓶颈优化前后设备利用率对比

编号	优化前 /%	优化后 /%	提高幅度 /%
CELL1	42	71	69
CELL2	38	63	66
CELL3	12	19	58
CELL5	37	61	65
CELL6	3	5	67
CELL7	20	31	55
CELL8	13	21	62
CELL9	18	29	61
CELL10	13	22	69
CELL11	3	5	67
CELL12	35	65	46
CELL13	3	5	67
CELL14	9	15	67
CELL15	9	15	67
CELL16	9	15	67

天 11 时,提前完成订单任务。

## 2 暂存区的优化

TOC 对于生产系统的计划与控制是通过“鼓-缓冲器-绳”(Drum-Buffer-Rope, 简称 DBR) 系统实现的。DBR 系统的主要目的是使车间实现最大的有效产出和最小的库存,而 DBR 系统中的 Buffer 对于实现此目的具有重要作用,它是一种时间缓冲,其设置目的为希望加工

机器总有工作要做,以解决库存积压和机器组堵塞等问题。在实际的生产中,由于成本、空间及人力的限制,工位之间的暂存区(Buffer)面积不能太大,因此必须合理设置暂存区的位置及面积。在仿真模型中,暂存区面积是通过暂存区容量大小来体现的。此外,由于精密工件在加工及存放过程中要避免外界对其加工精度的影响,故需要特殊的装置予以存放,而暂存区的容量决定了存放装置的数量,进而影响工件的制造成本。所以对于暂存区的优化主要是对其容量的优化。

在瓶颈优化基础上,运行仿真模型,得到各暂存区的统计数据如表 5 所示,从统计数据可以看出 Buffer3、Buffer9、Buffer11、Buffer14、Buffer16 的最大容量较小,均小于 20,其可优化空间不大,故暂时不考虑对它们的优化。下面针对 Buffer1、Buffer2、Buffer4、Buffer5、Buffer12,讨论其优化问题。

对于暂存区的优化可抽象为多因素对单指标的影响问题,此类问题可通过试验设计得到优化解<sup>[7]</sup>。

第一步做多因素两水平试验设计。以 Buffer1、Buffer2、Buffer4、Buffer5、Buffer12 的容量作为输入,且将这 5 个输入的高低水平设为 20 和 100,以订单完成时间为输出,从

而完成输入因素对输出影响的仿真,仿真结果如表 6 所示。

在暂存区容量因子分析表中, $H$  表示因子主效应,其绝对值越大表明影响越明显, $W$  表示交互效应。由于  $H$  值皆不为零,故这 5 个暂存区都可作为配比试验的输入。

第二步做多水平配比试验设计。在此试验中仍然以暂存区的容量为输入,假设各暂存区的容量由 20 变化到 100 并且每次递增 20,以订单完成时间为输出,共需 3125 次试验。

仿真结果显示,订单完成时间最大值为 76 天 18 时,最小值为 51 天 14 时,极差(25 天 4 时)还是比较明显。通过各种配比结果可以发现,最小配比(20/20/20/20/20)输出的订单完成时间为 65 天 11 时,并不是最大订单完工时间,说明盲目加大暂存区容量并不能保证缩短订单完成时间,而最大配比(100/100/100/100/100)输出的订单完成时间为 51 天 16 时,并不是最小订单完工时间,说明各暂

表5 瓶颈优化后各暂存区数据统计

名称	最大容量
Buffer1	100
Buffer2	68
Buffer3	2
Buffer4	42
Buffer5	88
Buffer6	9
Buffer7	13
Buffer8	6
Buffer9	1
Buffer10	5
Buffer11	1
Buffer12	91
Buffer13	8
Buffer14	1
Buffer15	10
Buffer16	1

(下转第 108 页)

国向其介绍机器人技术开始,日本立即踏踏实实行动。1972年10月由44个企业迅速组织成立“日本工业机器人协会”(JIRA,1994年改为JARA)充分发挥团队精神、攻克技术关键,占领技术制高点。协会平时重视对世界形势、市场需求的深入调查研究、积累资料,有详细准确的统计数据;协会认真组织协调、统计分析、交流技术。

中国由于严重缺乏充足的各种

配套专家人才、熟练技术工人,在硬件、软件各个方面,都存在不少关键技术问题。特别是谐波减速器、伺服电机、控制系统、自动化、智能化、集成化等先进技术。许多关键零部件、功能部件、控制系统,大量依赖高价进口,因此,在各类机器人产品的成本、质量、性能、配套等方面,都难以同国外产品竞争。

机器人本身的结构、动作、关节、控制,随用途多变。智能化大小不

同,机器人“特殊”、“复杂”程度则不同。机器人与NC机床的技术,既有共性、又有特性。目前,在中国关键技术不能掌握,缺乏深入的远近规划、严密的组织、紧密的合作。盲目性、表面性、浮夸性较大,常常看到市场需要,一哄而上;遇到技术资金困难,又一哄而下。如何踏踏实实真正从根本上培养成套的专家、人才、熟练技术工人,需要提高职业道德、产品质量、科技水平,互相间紧密合作、加强深入细致的调查研究,有详细的数据、资料,进行对比分析。针对用户、市场需求,处处坚持“质量第一”进行批量生产。加强深入系统的“科研”,有明确的近远期奋斗目标,坚持有恒。只有切切实实做到这些,真正改变过去单干、松散、混乱做法,中国“机器人”在未来的发展,才有可能出现新的局面。

(责编 春早)

表5 目前美国、欧盟、日本、韩国机器人的技术水平和发 展重点

国家	美国	欧盟	日本	韩国
工业机器人技术	一般	很突出	极为突出	一般
仿人型机器人技术	一般	一般	极为突出	很突出
个人、家庭机器人技术	一般	一般	极为突出	很突出
服务机器人技术	突出	突出	突出	很突出
生物医疗机器人技术	很突出	很突出	一般	一般
国防空间机器人技术	极为突出	突出	一般	不突出

(上接第 97 页)

表6 暂存区容量因子分析表

	Buffer1	Buffer 2	Buffer 4	Buffer 5	Buffer 12
Buffer1	H1=-205812.5	W1,2=-55812.5	W1,3=-44437.5	W1,4=-44062.5	W1,5=62.5
Buffer 2		H2=-20187.5	W2,3=-15062.5	W2,4=-13437.5	W2,5=-62.5
Buffer 4			H3=1437.5	W3,4=-81312.5	W3,5=62.5
Buffer 5				H4=-937.5	W4,5=-62.5
Buffer 12					H5=-62.5

存区不必采用最大容量,否则会造成资源浪费。

在对数据进行整理后,符合订单完成时间达到最小值且各暂存区容量之和最小的只有一组配比40/20/60/100/40,即当暂存区 Buffer1、Buffer2、Buffer4、Buffer5、Buffer12 的容量分别为 40、20、60、100、40 时,既可保证企业在最短时间内完成订单,又可使暂存区占用资源达到最小。

### 结束语

精密制造车间生产系统具有复

杂性及不确定性等特点,对其定量优化往往存在一定的困难。结合基于 TOC 的仿真优化法,并利用 Plant Simulation 对某航天企业精密制造车间生产系统进行建模仿真与优化。瓶颈优化后生产系统各设备的利用率明显提高,并由此缩短了产品生产周期。在此基础上对暂存区进行优化,避免了资源浪费。在采取诸多优化措施后,精密制造车间生产系统得到明显改善,企业因此提高了生产效率,降低了生产成本,最终在订单规定时间内完成加工任务。

### 参考文献

- [1] Scott J M, RIBERA P M, JENNIFER A F. Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain. Transportation Research, 2003, 39(2): 141-159.
- [2] Berna D, Tolga B A, Eren Ultanir. Simulation optimization based DSS application: A diamond tool production line in industry. Simulation Modeling Practice and Theory, 2006, 14(3): 296-312.
- [3] 杨堃. 基于 eM-Plant 的生产物流系统仿真与应用. 工业工程, 2008, 13(5):95-100.
- [4] 刘力卓,王丹. 基于 Witness 的某制造车间生产线仿真优化. 工业工程, 2012, 15(1):109-114.
- [5] 杨依依,李必强. 制约因素理论及其在生产管理中的应用. 科技与管理, 2004(6): 35-37.
- [6] 彭旺明. 基于 eM-plant 的天津港集装箱码头物流系统建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [7] 周金平. 生产系统仿真-Plant Simulation 应用教程. 北京: 电子工业出版社, 2011.

(责编 一帆)