

文章编号: 1000-8152(2002)05-0681-08

## 汽车综合性能检测线的建模与短期调度

陈昌领<sup>1</sup>, 袁德成<sup>2</sup>, 邵惠鹤<sup>1</sup>, 孙 鹏<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030; 2. 沈阳化工学院 过程系统工程中心, 沈阳 110021;  
3. 上海交通大学 自动化系 智能工程研究所, 上海 200030)

**摘要:** 研究了汽车综合性能检测线批次检测车辆的建模与短期调度问题. 调度的目标是使给定数量车辆检测时间最短. 该过程是一个变存储策略的序贯多目的批处理过程. 建立调度数学模型时, 把 Moon 等人<sup>[1]</sup>的工作推广到了 NW, NIS, FIS 存储策略, 并根据汽车综合性能检测线的实际情况建立了顺序相关存储策略和人力资源约束的数学表达. 该数学模型表达为一个混合整数非线性规划 (MINLP), 经线性化处理转化为一个混合整数线性规划问题 (MILP), 求解使用了分枝定界法 (BAB). 计算结果对汽车综合性能检测线批次车辆检测排序和驾驶员人数安排有指导性作用, 提高了车辆检测效率.

**关键词:** 短期调度; 多目的批处理过程; 存储策略; 混合整数线性规划; 汽车综合性能检测线  
**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Modeling and short-term scheduling of synthetic vehicle performance test line

CHEN Chang-ling<sup>1</sup>, YUAN De-cheng<sup>2</sup>, SHAO Hui-he<sup>1</sup>, SUN Peng<sup>3</sup>

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;  
2. Process System Engineering Center, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110021, China;  
3. Automation Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The modeling and short-term scheduling of synthetic vehicle performance test line are presented. The purpose of scheduling is to minimize the test time of the given number of vehicles. The process of vehicle test is a sequenual multipurpose batch process with variant storage policy. When the mathematic scheduling model is built, the result of Moon and Hrymak [1] is extended to the NW, NIS, FIS storage policies. Then the sequence-dependent storage policy as well as constraint of manpower is formulated as inequalities based on the situation of the test line. The scheduling model is formulated as a mixed integer nonlinear programming (MINLP) problem, and converted to a mixed integer linear programming (MILP) problem by linearization. The branch and bound (BAB) technique is used when the MILP problem is solved. The optimal scheduling has instructive significance for sequencing vehicles, deciding the number of drivers, and improving test efficiency when the given number of vehicles are tested.

**Key words:** short-term scheduling; multipurpose batch plant; storage policy; MILP; synthetic vehicle performance test line

### 1 引言 (Introduction)

汽车综合性能检测线调度的目标是使给定数量车辆检测时间最短. 该过程是一个变存储策略的序贯多目的批处理过程. 批处理过程是现代工业过程的一个重要分支, 它满足生产更新快、产品批量小、多品种、高附加值、系列化等要求. 为了降低生产成本、节约能源、增强生产的柔性和适应性, 优化调度成为批处理过程必不可少的手段. 以生产路径来划

分<sup>[1]</sup>, 批处理过程可分为多产品批处理过程 (multi-product batch plant) 和多目的批处理过程 (multipurpose batch plant). 如果所有的产品处理的步骤都相同, 即经由相同的设备序列处理, 这种批处理过程叫多产品批处理过程; 如果各种产品处理的步骤各不相同, 即经由不同的设备序列处理, 这种批处理过程叫多目的批处理过程. 其中, 多目的批处理过程又分为序贯多目的批处理过程 (sequential multipurpose

batch plant)和非序贯多目的批处理过程(nonsequential multipurpose batch plant).对于序贯多目的批处理过程,产品生产经由相同的设备序列,但是并不一定都在经由的设备上处理,即不同产品处理步骤不同;非序贯多目的批处理过程是指产品生产经由不同的设备序列处理的多目的批处理过程.从上面的定义可看出,多产品批处理过程是序贯多目的批处理过程的一种特例.

批处理过程的调度研究方兴未艾.基于均匀离散时间(uniform time discretization)描述所建模型<sup>[2,3]</sup>取决于离散化时间的长短,离散时间段越短,模型越大;而且当处理时间与批量大小相关时,模型表达非常复杂<sup>[4]</sup>.因此,现在调度研究的时间表达主要采用连续时间描述.Schilling和Pantelides<sup>[5]</sup>采用连续时间描述,基于资源任务网络(RTN)提出了多目的批处理过程的短期调度模型.该模型的线性规划和MILP最优解之差(integrality gap)非常大,Schilling和Pantelides采用了一种特殊的分枝定界法求解了该模型.Ierapetritou和Floudas<sup>[6~8]</sup>基于STN与连续时间描述,在考虑中间产品及产品交货期的情况下,将设备和任务分配表达为两类0-1变量,建立了多目的间歇(批处理)、连续及半连续过程的调度模型.Pinto和Grossmann<sup>[9]</sup>研究了多阶段批处理过程(multistage batch plant)的调度,文章采用双时间轴的观点:一个时间轴表示定单生产,一个时间轴表示设备分配,然后匹配这两个时间轴,建立了多阶段批处理过程的数学模型.而后,Pinto和Grossmann<sup>[10]</sup>重新表达了该调度数学模型,将预先排序(pre-ordering)融入调度数学模型,简化了约束的表达,使得求解加快.Moon和Hrymak<sup>[11]</sup>建立了混合产品生产(mixed product campaign)的序贯多目的批处理过程的数学模型.该数学模型简单,易于求解,但是该数学模型只考虑了无限存储的情况,且没有表达人力资源的约束.

建立批处理过程的调度模型时,一般都引入存储策略.存储策略的引入,一方面反映了批处理过程的实际情况,事实上,化工过程的缓冲存储罐、零件加工厂各个设备间的空间都有一定容纳中间产品的能力;另一方面,存储策略的引入,减小了设备之间的耦合.根据实际情况,存储策略一般分为四种:无限中间产品存储UIS(unlimited intermediate storage)、有限中间产品存储FIS(finite intermediate storage)、无中间产品存储NIS(no intermediate storage)和零等待ZW(zero wait).文献[1,9,10]考虑了UIS的情况;

文献[2,3,5~8]考虑四种存储策略.但是这些文献都假定同一缓冲设备对各种中间产品的存储能力相同.实际情况往往并不如此,比如:对于化工过程,一个缓冲罐可以存储不同摩尔的中间产品,甚至可以存储一种中间产品而不可以存储另一种中间产品;在零件加工中,一定空间可以存储不同数量的不同产品.因此,建立变存储策略(variant storage policy)调度具有很大的工程和理论意义.

本文首先介绍汽车综合性能检测线的流程,然后把Moon和Hrymak<sup>[11]</sup>的工作扩展到FIS,NIS,ZW存储策略.在此基础上建立了汽车综合性能检测线的调度数学模型,该模型考虑了顺序相关存储策略(sequence dependent storage policy)和人力资源的约束.最后对求解进行了研究,求解结果为批次车辆检测排序和驾驶员人数安排提供指导性方案,大大提高检测效率,值得在汽车检测行业推广应用.

## 2 汽车综合性能检测线(Synthetic vehicle performance test line)

近几年,我国汽车性能检测行业发展迅速,仅综合性能检测线就有千余条.在进行车辆检测时,现在汽车综合性能检测站的通常做法是安排固定数量的驾驶员,按照车辆到达先后次序组织车辆检测.但是这种检测方式导致检测效率和设备利用率低下,驾驶员数量安排不合理.鉴于这种情况,本文对给定车辆队列进行优化排序,以提高车辆检测和设备利用率,合理化驾驶员数量的安排.

汽车综合性能检测线主要包括如下设备和操作:

- ① HC/CO分析仪——测量汽油车排放中的一氧化碳和碳氢化合物的含量;
- ② 烟度分析仪——测量柴油车排放中烟度的含量;
- ③ 燃烧效率分析仪——测量车辆油料的燃烧效率;
- ④ 发动机综检仪——包括两套传感器,一套用于测量汽油车发动机的性能;另一套用于测量柴油车发动机的性能;
- ⑤ 底盘测功机——测量车辆的底盘功率、加速时间、滑行距离及进行速度表校验;
- ⑥ 轴重台——测量车辆的轴重;
- ⑦ 制动台——测量车辆制动力;
- ⑧ 侧滑台——测量车轮向内、向外倾角;
- ⑨ 底盘检查——测量传动轴间隙、检查各轴承的工作状况;
- ⑩ 大灯仪——测量车辆大灯的光度、上下偏、

左右偏。

对于不同的检测线,各个设备在顺序安排上有所不同,最典型设备布置如图 1 所示.由于投资的原因,检测线不可能建得很长,各设备之间的距离有限.尾气检测仪、发动机热效率分析仪、发动机综检仪四个设备紧靠在一起,构成第一工位.尾气和燃烧效率检测可同时进行.HC/CO 分析仪和烟度分析仪传感器少,车辆一到位即可准备好.发动机综检仪传感器比较多,当检测完汽油车再检柴油车或检测完柴油车再检汽油车,传感器准备必须花费一定时间.检测线在工艺上作了如下安排:第一工位由两个操作员负责,当车辆到达第一工位时,一个操作员负责检测车辆排放和燃烧效率,另一个操作员负责准备发动机检测的传感器.因此在该工位,各设备的顺序相关建立时间可不考虑.第二工位包括底盘测功机、轴重台、制动台.测量轴重的目的是为了计算制动力的百分数,因此,测量轴重和制动可视为测量制动操作.事实上,日产制动台既能测量轴重又能测量制动力,因此这样处理是合理的.侧滑台、底盘检查和大灯仪紧靠在一起构成第三工位.由于只要车辆低速驶过测滑台,即可测出车轮的向内/向外倾角.因此,车辆检测侧滑所花费的时间可忽略不计.

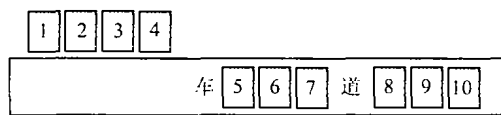


图 1 汽车综合性能检测线各设备的布置  
Fig. 1 Unit layout of synthetic vehicle performance test line

在进行车辆检测时,不同车辆在各个设备上检测的时间不同.一般检测站把车辆分为大柴油车、大汽油车、小柴油车、小汽油车四种类型.各种类型的车辆执行不同的检测项目所花费的时间如表 1 所示.

表 1 每种车辆检测各个项目所花费的时间(单位:分钟)

Table 1 Processing time for each test item of different vehicles (unit: minute)

类别	项目					
	第一工位 尾气	第一工位 发动机综检	第二工位 测功	第二工位 制动	第三工位 底盘	第三工位 大灯
大柴油车	3	10	3	5	4	4
大汽油车	2	10	3	5	4	4
小柴油车	3	10	2	4	3	3
小汽油车	2	10	2	4	3	3

对于给定的车辆,检测时,只能依次从左至右,经由各个设备并完成相应操作后,才能到下一设备检测相应项目,因此检车的过程可看作一个序贯批处理过程;对于给定的车辆,由于存在 6 个检测项目,而每个检测项目根据车辆情况确定是否执行,因此每种车辆存在 $(2^6 - 1)$ 种检测可能性,所以本过程可看作一个多目的过程.本文在建立调度模型时,把每一工位看作一台设备,这样本过程就可看作是一个需加工 $(2^6 - 1) \times 4$ 种产品,三道加工工序的多目的过程.

汽车综合性能检测线工位安排表明,每一工位能同时检测一辆大车,而不相互影响.因此当相邻两个工位  $j$  和  $j + 1$  只要有一个工位检测的是大车,工位  $j$  和  $j + 1$  之间只能采用 NIS 的存储策略,如图 2 所示.但是工位  $j + 1$  正在检测小车  $k$ ,工位  $j$  检测完小车  $k + 1$ ,如果小车  $k + 2$  检完工位  $j - 1$ ,可立即进入工位  $j$  检测.此时工位  $j$  和  $j + 1$  之间能停下一辆小车,即采用 FIS 存储策略,如图 3 所示.由上述可知,汽车综合性能检测的过程是一个采用与检测顺序相关存储策略的序贯多目的过程.另一方面,汽车综合性能检测线的驾驶员有限,因此,建模时还必须考虑人力资源的约束.

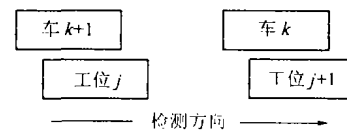


图 2 工位  $j$  和  $j + 1$  之间采用 NIS 存储策略  
Fig. 2 NIS storage policy between service positions  $j$  and  $j + 1$

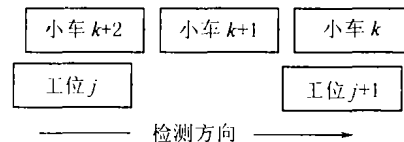


图 3 工位  $j$  和  $j + 1$  之间采用 FIS 存储策略  
Fig. 3 FIS storage policy between service positions  $j$  and  $j + 1$

### 3 调度模型的建立 (Scheduling model development)

这一节主要介绍数学模型的建立.在建模之前,本文根据第 2 节的叙述和汽车综合性能检测线的实际情况作如下假设:

- 本文把汽车检测视为一个确定性过程.在各个工位,汽车检测时间有一定的随机性,表 1 中的数据是各种车型在不同工位检测的平均时间;
- 各个设备检测不同汽车的顺序相关建立时间

忽略不计;

- 汽车从一个工位到另一工位需要花费一定时间,这个时间相对于检测时间可忽略不计;

- 车辆检测不合格,下线进行检修,编为下一批次进行检测.

- 汽车驾驶员检测完一辆车交付到客户(检测合格)或维修车间(检测不合格)需要2分钟,然后才能检测其它未检测的车辆;

### 3.1 目标函数(Objective function)

汽车综合性能检测线调度的目的是使给定批量车辆检测时间最短,即使 Makespan (MS)最小.假定第一辆车开始检测第一道工序的时间为0,则 MS 可看作是最后一辆车  $\bar{k}$  检测完最后一个工位  $\bar{j}$  的时刻  $Te_{\bar{k}\bar{j}}$ , 即调度的目标函数为:

$$\min MS = Te_{\bar{k}\bar{j}}. \quad (1)$$

### 3.2 时间间隙的分配(Allocation of time slots)

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = n_i, \quad \forall i \in I, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ik} = 1, \quad \forall k \in K. \quad (3)$$

其中

$$X_{ik} =$$

$$\begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 类车辆其中之一在时间间隙 } k \text{ 检测,} \\ 0, & \text{任何第 } i \text{ 类车辆都不在时间间隙 } k \text{ 检测,} \end{cases}$$

$n_i$  为第  $i$  类检测车辆的数目.

时间间隙和被检车辆是一一对应的关系,即时间间隙集合  $K$  的元素个数应等于被检测车辆的数量  $\sum_{i \in I} n_i$ . 式(2)规定被分配到所有时间间隙检测的第  $i$  类车辆的总和应等于该类检测车辆的数量.而约束(3)规定每一个时间间隙只能分配给一辆被检测的车辆.

### 3.3 车辆在一个工位检测的时间约束(Time constraints of vehicles tested in a service position)

$$Te_{kj} - Ts_{kj} = \sum_{i \in I} X_{ik} P_{ij}, \quad \forall k \in K, j \in J. \quad (4)$$

其中:  $Te_{kj}$  为被分配到时间间隙  $k$  检测的车辆在工位  $j$  检测结束时间;  $Ts_{kj}$  为被分配到时间间隙  $k$  检测的车辆在工位  $j$  检测开始时间;  $P_{ij}$  为第  $i$  类检测车辆在工位  $j$  检测所需时间.

式(4)规定:在任何一工位  $j$  任何一车辆  $k$  检测结束和开始时间之差都必须等于该车在该工位检测应当花费的时间.

### 3.4 同一车辆在不同工位检测的时间约束(Time constraints of the same vehicle tested in different service positions)

$$Ts_{k,j+1} - Te_{kj} \geq 0, \quad \forall k \in K, j \in J - \{\bar{j}\}. \quad (5)$$

式(5)规定:对于分配到时间间隙  $k$  检测的车辆,只有检测完工位  $j$  后才可进入下一工位  $j+1$  检测.

### 3.5 UIS 存储策略的时间约束(Time constraints of UIS storage policy)

$$Ts_{k+1,j} - Te_{kj} \geq 0, \quad \forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J. \quad (6)$$

式(6)表达了第  $k$  辆车和第  $k+1$  辆车到工位  $j$  进行检测的时间关系.因为工位  $j$  和  $j+1$  之间采用无限存储策略,所以只要工位  $j$  检完第  $k$  辆车,不管工位  $j$  以前检完的车辆是否进入  $j+1$  工位,就可检测第  $k+1$  辆车.

### 3.6 NIS 存储策略的时间约束(Time constraints of NIS storage policy)

如图2所示,只有当第  $k$  辆车进入第  $j+1$  工位后,第  $k+1$  辆车才能进入第  $j$  工位检测,因此有如下不等式约束:

$$Ts_{k+1,j} - Ts_{k,j+1} \geq 0, \quad \forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J - \{\bar{j}\}. \quad (7)$$

因为:

$$\begin{aligned} Ts_{k+1,j} - Te_{kj} &\geq Ts_{k+1,j} - Ts_{k,j+1} \geq 0, \\ \forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J - \{\bar{j}\}, \end{aligned}$$

所以式(7)不但表明了 NIS 存储策略,而且还表达了第  $k$  辆车和第  $k+1$  辆车到工位  $j$  (除工位  $\bar{j}$  外)进行检测的时间关系.但是式(7)并没有说明第  $k$  辆车和第  $k+1$  辆车在最后一个工位  $\bar{j}$  检测时间的关系,因此,还必须加上如下约束:

$$Ts_{k+1,\bar{j}} - Te_{k,\bar{j}} > 0, \quad \forall k \in K - \{\bar{k}\}. \quad (8)$$

于是,式(1)~(5)和式(7),(8)组合表达了 NIS 存储策略的序贯多目的批处理过程调度数学模型.

### 3.7 ZW 存储策略的时间约束(Time constraints of ZW storage policy)

ZW 存储策略要求一道工序处理完毕,必须马上进入下一道工序进行检测,因此式(6)必须作如下改变:

$$Ts_{k,j+1} - Te_{kj} = 0, \quad \forall k \in K, j \in J - \{\bar{j}\}. \quad (9)$$

这样,式(1)~(4),(7)~(9)表达了 ZW 存储策略的

序贯多目的批处理过程调度数学模型。

在汽车综合性能检测流程中,每一个工位中不同的设备之间的距离非常小,可以采用 ZW 存储策略,但是为了减少连续变量  $Ts_{kj}$ ,  $Te_{kj}$  的数目和约束的数量,本文把每一个工位当成一台设备.这样处理并不影响调度的结果,而且减小了计算量。

### 3.8 FIS 存储策略的约束 (Time constraints of FIS storage policy)

假定工位  $j$  与  $j+1$  之间能停留  $n$  辆车,在检测时,只有当第  $k$  辆车进入第  $j+1$  工位检测时,第  $k+n+1$  辆才能进入工位  $j$  进行检测,如图 4 所示.因此, FIS 存储策略可表达如下:

$$\begin{cases} Ts_{k+n+1,j} - Ts_{k,j+1} \geq 0, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - (n+1)\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $n$  为工位  $j$  和工位  $j+1$  之间能停下车辆的数量。

显然,上式并没有表达不同车辆在同一工位检测的约束,必须加入式(6).这样,式(1)~(6)和式(10)构成 FIS 存储策略的约束.事实上,当  $n=0$  时,式(1)~(6)和式(10)也表达了 NIS 存储策略的情况。

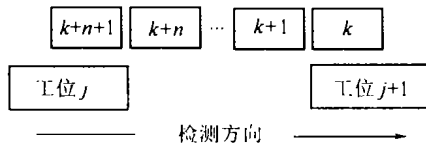


图 4 工位  $j$  和  $j+1$  之间采用 FIS 存储策略

Fig. 4 FIS storage policy between service position  $j$  and  $j+1$

在汽车综合性能检测线中,当出现连续三辆小车的检测序列时,工位  $j$  和  $j+1$  之间可采用存储一辆车的策略,只要令(10)式中的  $n=1$  即可。

### 3.9 顺序相关存储策略的表达 (Time constraints of sequence-dependent storage policy)

$$\begin{cases} Ts_{k+1,j} - Ts_{k,j+1} \geq -U \cdot \left( \sum_{i \in I} X_{ik} F_i \right) \cdot \left( \sum_{i \in I} X_{i,k+1} F_i \right), \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+2,j} - Ts_{k+1,j+1} \geq \\ -U \cdot \left( \sum_{i \in I} X_{ik} F_i \right) \cdot \left( \sum_{i \in I} X_{i,k+1} F_i \right) \cdot \left( \sum_{i \in I} X_{i,k+2} F_i \right), \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (12)$$

$$Ts_{k+2,j} - Ts_{k,j} \geq 0, \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}. \quad (13)$$

其中:  $U$  是一个足够大的正数,

$$F_i = \begin{cases} 1, & \text{当第 } i \text{ 类车辆为小车时,} \\ 0, & \text{当第 } i \text{ 类车辆为小车时.} \end{cases}$$

联立(1)~(6)和(11)~(13),构成了汽车综合性能检测线的调度数学模型.因为时间间隙和车辆是一对一的,当分配到时间间隙  $k$  检测的车辆为大车时,  $\sum_{i \in I} X_{ik} F_i = 0$ ,反之  $\sum_{i \in I} X_{ik} F_i = 1$ .对于任一车辆序列  $k, k+1, k+2$ ,当车辆  $k(k+1)$  和  $k+1(k+2)$  中任意有一辆是大车,式(11)右端等于 0,规定了第  $k(k+1)$  到工位  $j+1$  检测后,第  $k+1(k+2)$  辆车才能到工位  $j$  进行检测,即工位  $j$  和  $j+1$  之间采用 NIS 存储策略.但是,当第  $k$  辆车为大车,第  $k+1$  和  $k+2$  辆车为小车时,只有当第  $k$  辆车到第  $j+2$  工位去检测后,第  $k+1$  辆车和第  $k+2$  辆车才可以分别到  $j+1$  工位和第  $j$  工位进行检测.此时,(11)式并不能保证这种检测时序,而(12)式的引入能保证这一点.(11)式要求只有当第  $k$  辆车到  $j+2$  工位检测后,第  $k+1$  辆车才能进入第  $j+1$  工位检测;而(12)要求只有当第  $k+1$  辆车进入第  $j+1$  工位检测后,第  $k+2$  辆车才能进入工位  $j$  检测.因此式(11)和(12)能保证这种情况下车辆检测的时序关系.当第  $k, k+1, k+2$  辆车全是小车时,式(11)和(12)右端等于  $-U$ ,不起作用,式(13)保证了它们在工位  $j$  和  $j+1$  上检测,可以采用 FIS 的存储策略。

### 3.10 人力资源的约束 (Constraints of manpower)

因为驾驶员有限,因此必须加上人力资源的约束:

$$Ts_{k+m+1,1} - Te_{k,j} \geq 2, \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - (m+1)\}. \quad (14)$$

$m$  为驾驶员的数量,式(14)规定在汽车综合性能检测线上最多只能同时检测  $m$  辆车,且规定了汽车驾驶员检测完车辆  $k$ ,再检测车辆  $k+m+1$  的时差必须大于等于汽车驾驶员交付车辆  $k$  的时间。

上述汽车综合性能检测线的调度模型是基于 Moon 和 Hrymak<sup>[1]</sup>的工作推导来的.与 Moon 和 Hrymak<sup>[1]</sup>的数学模型相比, Moon 和 Hrymak<sup>[1]</sup>只考虑了 UIS 存储策略,本文在此基础上把该模型推广到 FIS, NIS, ZW 存储策略,并考虑了顺序相关存储策略和人力资源约束,模型表达为一个 MINLP 问题。

#### 4 模型的线性化及求解 (Model linearization and computation)

上述汽车综合性能检测线调度模型是一个 MINLP 问题. 本节的主要工作是线性化该问题, 减少调度模型的中间变量  $Te_{kj}$ , 消去约束(4). 通过代入运算和简单的线性化可得到如下表达:

$$\min MS = \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^j W_{kj} Ts_{kj}, \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = n_i, \quad \forall i \in I, \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ik} = 1, \quad \forall k \in K, \quad (17)$$

$$Ts_{k,j+1} - Ts_{k,j} - \sum_{i \in I} X_{ik} P_{ij} > 0, \quad \forall k \in K, j \in J - \{\bar{j}\}, \quad (18)$$

$$Ts_{k+1,j} - Ts_{k,j} - \sum_{i \in I} X_{ik} P_{ij} > 0, \quad \forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J, \quad (19)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+2,j} - Ts_{k,j+1} \geq 0, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+1,j} - Ts_{k,j+1} \geq -U \sum_{i \in I} X_{ik} F_i, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (21a)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+1,j} - Ts_{k,j+1} \geq -U \sum_{i \in I} X_{i,k+1} F_i, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (21b)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+2,j} - Ts_{k+1,j+1} \geq -U \sum_{i \in I} X_{ik} F_i, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (22a)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+2,j} - Ts_{k+1,j+1} \geq -U \sum_{i \in I} X_{i,k+1} F_i, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (22b)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+2,j} - Ts_{k+1,j+1} \geq -U \sum_{i \in I} X_{i,k+2} F_i, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - 2\}, \forall j \in J - \{\bar{j}\}, \end{cases} \quad (22c)$$

$$\begin{cases} Ts_{k+m+1,1} - Ts_{k,\bar{j}} - \sum_{i \in I} X_{ik} P_{ij} \geq 2, \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, \bar{k} - (m+1)\}. \end{cases} \quad (23)$$

当  $k = \bar{k}, j = \bar{j}$  时,  $W_{kj} = 1$ , 其它取比较小的正数  $\epsilon$ . 目标函数(15)意味着, 不但要使 MS 最小, 而且要求各辆车在各工位检测开始时间尽量小. 而且  $W_{kj}$  和  $\epsilon$  的引入还有利于克服线性规划问题的退化<sup>[9]</sup>.

因为式(11)右端是一个逻辑与的关系, 而不同

约束之间是“而且”的关系, 因此式(11)和(21)等价. 同理(12)和(22)式等价.

上述问题是一个 MILP 问题, 可用一般的整数规划软件包如: CPLEX, LINDO 等求解. 作者选用了 SAS V8.0 版软件包, 应用了其中的 LP PROC 求解, 该算法是一种基于分枝定界法(BAB)求解算法.

#### 5 示例 (Examples)

下面给出一个实际计算的例子. 检测 12 辆车, 各车的检测项目及检测时间如表 2 所示. 由表 2 及对汽车综合性能检测线的描述可知, 该例中  $|K| = 12, |J| = 3$  (1·1 表示集合的势).

表 2 例子所给车辆数目及检测项目

Table 2 Data for example

类别	项目							
	编号	数量	第一工位		第二工位		第三工位	
			尾气	发动机 综检	测功	制动	底盘	大灯
大柴油车	1	2	3	0	0	5	4	4
大汽油车	2	1	0	10	3	5	4	4
小柴油车	3	6	3	0	2	0	3	3
小汽油车	4	3	0	10	2	4	3	3

当驾驶员人数为  $m = 4, U = 13, \epsilon = 10^{-5}$  时, 所得到的 MILP 共有 202 个约束、整数变量 48 个、连续变量 36 个. 该问题求解在 PC 机下完成, 该机的 CPU 是 Pentium II 350、内存为 128M, 计算花费时间 26.50 秒, 查找了 2708 个节点, 检测时间 MS = 85 分钟, 优化结果的 Gantt 图如图 5 所示. 图 5 中, 每个方框上面的数字表示不同检测类别车辆的编号, 下面的数字表示该检测车辆的排序. 从图 5 可看出, 在任一时刻, 检测线上的车辆数不超过驾驶员的人数 4, 并且第  $k+4$  辆车检测开始时间与第  $k$  辆车检测结束时间之差大于等于驾驶员交付车辆的时间. 排序为 1, 2 的车辆是一辆小车和一辆大车的序列, 它们在检测时, 各个工位之间采用了 NIS 的存储策略. 排序为 3~9 的车辆是小车的序列, 它们在检测时, 各个工位之间可以采用 FIS 的存储策略. 如当工位 2(3) 在检测第 7(3) 辆车时, 工位 1(2) 检测完车辆 8(4), 车辆停留在工位 1(2) 和 2(3) 之间, 工位 1(2) 又紧接着检测车辆 9(5), 工位 1(2) 和 2(3) 之间采用了 FIS 的存储策略. 从图中还可发现各个工位在检测车辆 9 和 10 时, 有一定的时差, 这是由于各个工位之间采用 NIS 的存储策略引起的.

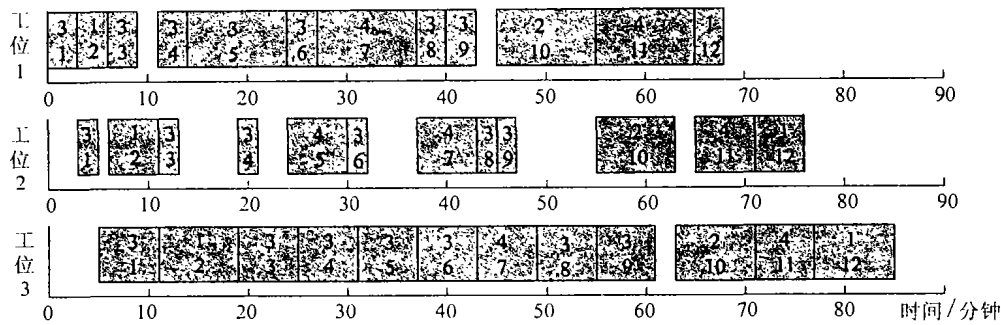


图 5 调度结果的 Gantt 图

Fig. 5 Gantt chart of optimal scheduling for example

表 3 不同  $U$  值对计算的影响

Table 3 The effects of different values for  $U$  on computational effort

$U$	查找节点次数	CPU 花费时间/s	车辆排序
5	1791	19.65	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1
10	1885	21.14	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1
13	2708	26.50	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1
20	2405	24.04	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1
30	2729	26.43	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1
50	3017	31.56	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1

$U$  的取值严重影响计算时间,表 3 给出了当  $U$  取不同值时的计算时间和查找节点的次数.当  $U$  增大,所求解的问题 Integrality Gap 增大,使得计算时间和查找节点次数呈总体增加趋势.但是  $U$  不能取得过小,因为当  $k, k + 1, k + 2$  为小车序列,根据 (13)及(12)式有:

$$T_{S_{k+2,j}} - T_{S_{k,j+1}} \geq 0, \quad (24)$$

$$T_{S_{k+2,j}} - T_{S_{k+1,j+1}} \geq -U. \quad (25)$$

当  $U$  取值较小时,(25)式会影响(24)的 FIS 存储策略.本文 Gantt 图示例中,  $U$  取值为 13.该值是所有车辆在所有工位检测最大时间,它对于驾驶员  $m \geq 3$  都是适用的.很明显这个  $U$  值不是最好的,在实际应用中,只能根据检测的车辆、驾驶员人数和计

算试验确定.

对给定的车辆队列进行优化排序能有效提高检测效率.对表 2 中给定的 12 辆车按本文提出的模型进行优化排序,当安排驾驶员 1~5 人时,检测时间如表 4 第 3 列所示;在相同的情况下,采用给定的顺序,如:4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3,检测时间如表 4 第 5 列所示.通过比较可看出,优化排序大大节省了检测时间.如当驾驶员为 4 人时,按优化排序检测,检测时间为 85 分钟;而采用顺序 4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3,检测时间延长了 22.4%.需要指出的是,当仅有一个驾驶员时,优化排序对检测时间没有影响.因为在此时,驾驶员只能检测完一辆车,然后再检测其他未检测的车辆.

表 4 驾驶员人数和优化排序对检测效率的影响

Table 4 The effects of the number of drivers and optimal sequencing on test efficiency

驾驶员人数	优化排序	检测时间/min	给定顺序	检测时间/min
1	3-3-3-3-3-3-1-1-4-4-4-2	212	4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3	212
2	3-2-4-3-3-3-3-3-1-4-4-1	111	4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3	130
3	3-3-4-3-4-1-2-4-3-3-3-1	94	4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3	108
4	3-1-3-3-4-3-4-3-3-2-4-1	85	4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3	104
5	3-1-3-3-3-3-4-3-4-2-4-1	85	4-3-1-4-3-2-3-3-1-4-3-3	104

对给定的车辆队列进行优化排序对驾驶员人数安排还具有指导性的作用.从表 4 中可看出,当驾驶员人数小于等于 4 时,检测时间随驾驶员人数增多

而减小;但是当驾驶员人数大于等于 5 时,驾驶员人数的增多对检测时间没有影响.因为汽车综合性能检测线最多可同时检测 5 辆车,所以驾驶员人数不

得大于5.从表4中可看出,安排2个驾驶员的检测时间相对于安排1个驾驶员,检测效率提高了将近50%.而安排3个或4个驾驶员相对于安排2个驾驶员的,检测效率没有明显的提高.因此从上面的分析可看出,汽车综合性能检测线安排2个驾驶员是非常合理的.分析结果与汽车综合性能检测线得出的经验一致.当然,根据检测任务,可以安排3个或4个驾驶员,以进一步提高检测效率.

## 6 结论(Conclusion)

本文提出了变存储策略和顺序相关存储策略的概念,并分析指出汽车综合性能检测线批次检测车辆是一个采用顺序相关存储策略的序贯多目的批处理过程.建模时,首先将 Moon 和 Hrymak<sup>[1]</sup>的工作扩展到 NW, NIS 和 FIS 存储策略,然后建立了汽车综合性能检测线批次检测车辆的短期调度数学模型,建模时考虑了顺序相关存储策略和人力资源的约束.模型表达为 MINLP,经线性化转化为 MILP 问题.计算表明该模型求解速度快,适合现场需要.调度结果对批次检测车辆排序和驾驶员人数安排均有指导性作用,提高了检测效率.

## 参考文献(References)

- [1] Moon S, Hrymak A N. Mixed-integer linear programming model for short-term scheduling of a special class of multipurpose batch plants [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999,38:2144 - 2150
- [2] Kondili E, Pantelides C C, Sargent R W H. A general algorithm for scheduling for batch operation - I [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1993,17:211 - 227
- [3] Shah N, Pantelides C C, Sargent R W H. A general algorithm for scheduling for batch operation-II [J]. *Computers & Chemical Engi-*

neering, 1993,17:229 - 244

- [4] Shah N. Single and multisite planning and scheduling: current status and future challenges [A]. In Pekney J, Blau G. *Foundations of Computer Aided Process Operations [M]*. USA: American Institute of Chemical Engineers Symposium Series 320, 1998,94:75 - 90
- [5] Schilling G, Pantelides C C. A simplified continuous-time process scheduling formulation and a novel solution algorithm [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996,20:1221 - 1226
- [6] Ierapetritou M G, Floudas C A. Effective continuous-time for short-term scheduling-1: Multipurpose batch processes [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998,37:4341 - 4359
- [7] Ierapetritou M G, Floudas C A. Effective continuous-time for short-term scheduling-2: Continuous and semicontinuous processes [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998,37:4360 - 4374
- [8] Ierapetritou M G, Floudas C A. Effective continuous-time for short-term scheduling-3: Multiple intermediate due dates [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999,38:,3446 - 3461
- [9] Pinto J M, Grossman I E. A continuous time mixed linear programming for short term scheduling of multistage batch plant [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1995,34:,3037 - 3051
- [10] Pinto J M, Grossman I E. A continuous-time MILP model for short term scheduling of multistage batch plant with pre-ordering constraints [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996,20:1197 - 1202

## 本文作者简介

陈昌领 1972年生.上海交通大学在读博士.主要研究方向为过程控制,批处理过程调度. Email: clchen72@sina.com

袁德成 1960年生.沈阳化工学院自动化系系主任,教授.主要研究兴趣为高级过程控制,预测控制,非线性控制.

邵惠鹤 1936年生.上海交通大学教授,博士生导师.主要研究方向为过程优化,多变量约束控制.

孙鹏 1972年生.上海交通大学博士.研究方向:网络控制与过程优化.