

汽车总装线配置的优化模型研究

摘 要

生产具有品牌、配置、动力、驱动、颜色等属性的多种型号的汽车，对总装线和喷涂线上的装配顺序各项提出了各种不同形式的要求，而且不同的装配顺序造成的生产成本也不尽相同。本文主要通过建立数学模型并设计算法，给出符合生产要求、且具有较低生产成本的装配顺序。

首先是数据处理，使用 python 将原附件数据中的生产计划整理成方便数据读取的规范形式，设计 Excel 表格存储每日的装配顺序，并与生产计划数据联动形成相互校验，保证装配顺序的准确性；

接着，通过分析总装线和喷涂线的各项要求，根据汽车的颜色分类情况，先将黑色的汽车手工填入装配顺序表。在确定一些初值后，减小装配顺序问题求解的搜索规模后，建立生产成本最小优化模型，再使用计算机搜索四驱、柴油汽车等关键属性汽车的位置；

然后，配置白色和棕色等可以连续排列的颜色，此时注意蓝色汽车只能与白色间隔等关键要求，尽可能多地将这些汽车连续地填入装配顺序表；

最后，装配顺序表中通常只含有数量不多的连续空余位置，对应着剩余尚未分配的、颜色成分复杂的汽车。按照颜色是否符合在总装线上排列时的具体要求，将符合颜色衔接要求的汽车作为顶点相互连接起来，构成了一个有向图，装配顺序的问题转化成了图的遍历问题。使用基于遗传算法的 TSP 问题和广度优先搜索算法搜索有向图中经过指定起点和终点的所有路径。采用 Matlab 验证各个路径上的特殊颜色能否按顺序分配在指定的 C1 或 C2 喷涂线上，计算各种路径上切换配置和颜色的代价，并且取代价最小的路径填入装配顺序表。

本文在进行充分的理论分析的基础上，综合利用多种计算机工具，在计算结果展示、人工经验介入、计算过程衔接方面取得了较好效果。

关键词：汽车装配顺序 优化模型 邻接矩阵 路径搜索 遗传算法 TSP 问题



1. 问题的重述

某汽车公司生产以下型号的汽车，每种型号由品牌、配置、动力、驱动、颜色 5 种属性确定。品牌分为 A1 和 A2 两种，配置分为 B1、B2、B3、B4、B5 和 B6 六种，动力分为汽油和柴油 2 种，驱动分为两驱和四驱 2 种，颜色分为黑、白、蓝、黄、红、银、棕、灰、金 9 种。

公司每天可装配各种型号的汽车 460 辆，其中白班、晚班（每班 12 小时）各 230 辆。每天生产各种型号车辆的具体数量根据市场需求和销售情况确定。待装配车辆按一定顺序排成一列，首先匀速通过总装线依次进行总装作业，随后按序分为 C1、C2 线进行喷涂作业。

由于工艺流程的制约和质量控制的需要以及降低成本的考虑，总装和喷涂作业对经过生产线车辆型号有多种要求。

1.1 装配要求

1. 每天白班和晚班都是按照先 A1 后 A2 的品牌顺序，装配当天两种品牌各一半数量的汽车。
2. 四驱汽车和柴油汽车连续装配数量不得超过 2 辆，并且两批之间间隔的汽车的数量至少是 10 辆。若间隔数量无法满足要求，仍希望间隔数量越多越好。间隔数量在 5-9 辆仍是可以接受的，但代价很高。
3. 黑色汽车连续排列的数量在 50-70 辆之间，两批黑色汽车在总装线上需间隔至少 20 辆。
4. 装配线上的汽车颜色间隔需要满足一定的规则。

1.2 喷涂要求

1. 蓝、黄、红三种颜色汽车的喷涂只能在 C1 线上进行，金色汽车的喷涂只能在 C2 线上进行。
2. 喷涂线上不同颜色汽车之间的切换次数尽可能少，黑色汽车与其它颜色的汽车之间的切换代价很高。

1.3 需要解决的问题

1. 建立数学模型或者设计算法，使其能给出符合要求、且具有较低生产成本的装配顺序。
2. 给出 9 月 17 日至 9 月 23 日每天的装配顺序。



2. 问题的假设

1. 生产成本只是由题目中所指的装配线上不同汽车配置切换、喷涂线上不同汽车颜色的切换构成。汽车配置切换和普通的颜色切换代价设为 1，黑色切换为其他颜色成本耗费较高，设为 10。
2. 在无法满足柴油、四驱汽车的批次间隔 k 至少是 10 的情况下，间隔 k 必须大于 5，而且间隔越小代价越高，设为 $10-k$ 。
3. 9 月 23 日 A1 和 A2 品牌数量为奇数，在尽可能均衡的情况下，允许白班和晚班装配的汽车数量相差 1 辆。
4. 在考虑不同工作日的装配顺序时，总装线和喷涂线的各项要求对当日晚班与次日白班交接同样适用。
5. 不考虑其他主观或其他题目中未涉及的因素。

3. 符号的说明

符号	含义
I	A1 品牌下标集合，如 20 日 $I = \{1, \dots, 181, 231, \dots, 411\}$
J	A2 品牌下标集合，如 20 日 $J = \{182, \dots, 230, 412, \dots, 460\}$
x_k	k 是黑车 $x_k = 1$ ，否则 $x_k = 0$ ， $k \in I \cup J$
y_k	k 是四驱车 $y_k = 1$ ，否则 $y_k = 0$ ， $k \in I \cup J$
z_k	k 是柴油车 $z_k = 1$ ，否则 $z_k = 0$ ， $k \in I \cup J$

4. 问题的分析与数据处理

4.1 问题的分析

题目所要解决的最终问题是每天 460 个汽车装配的顺序，初步估算寻求可行解的问题规模，460 的阶乘是一个 1027 位数。即使可以设计精巧的约束条件建立通用的数学模型，但在使用计算机搜索可行解时可能会遇到无法及时给出答案的问题。



通过分析 9 月 17 日至 9 月 23 日每天的生产计划可以发现，所产汽车的颜色可以分为黑色、白色与棕色、其他数量较少的颜色等三种情况。根据总装线和喷涂线的各项要求，这几种颜色的汽车有着如下的不同特征：

- 黑色汽车需要连续生产，尽量不要与其他颜色切换，除非付出较高代价切换成其他颜色
- 白色、银色、灰色或棕色可以连续排列且有时数量较多，特别是棕色可以与许多的其他颜色切换
- 其他颜色数量较少，却有复杂的切换规则

根据以上特征，尝试以下逐步按顺序求解的过程

首先，手动排黑色汽车的装配位置，此时尽可能按顺序排列相同配置的汽车，在确定一些初值后，再使用计算机搜索四驱、柴油汽车等较少量的特殊属性汽车的位置；

接着，配置白色和棕色等可以连续排列的颜色，此时注意蓝色汽车只能与白色间隔；

最后，剩余未确定配置顺序的颜色数量较少，并且因为以上两步都是连续排列的，只需将它们按一定的顺序排在剩余的连续空间内，可以使用计算机直接搜索可能的顺序。

4.2 数据处理

以上过程需要计算机搜索和手工介入同步进行，需要设计合适的表格对数据整理。

python 中的模块 xlwt 和 xlrd 可以方便快捷地读写、操纵 excel 单元格，将附件“CUMCM-2018-Problem-D-Chinese-Appendix.xlsx”中的生产计划数据整理成规范形式，程序文件名“problem_D_Data.py”，具体见附件 1-2。设计有关表格如下。

表 1 是使用 python 整理得到的生产计划表（数据文件夹中 excel 文件“schedule.xlsx”的“sheet1”表单），列举了每日所有不同种类汽车的生产数量，添加的最后一列“装配剩余”使用以下公式，统计还没安排装配顺序的剩余汽车数量（以 9 月 17 日为例）。

```
H2=G2-COUNTIFS('9.17'!A:A, sheet1!A2, '9.17'!C:C, sheet1!B2, '9.17'!D:D, sheet1!C2, '9.17'!E:E, sheet1!D2, '9.17'!F:F, sheet1!E2, '9.17'!G:G, sheet1!F2)
```



表 1 生产计划表

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	日期	品牌	配置	动力	驱动	颜色	数量	装配剩余
2	2018/9/17	A1	B1	汽油	四驱	白	2	0
3	2018/9/17	A1	B3	汽油	四驱	白	4	0
4	2018/9/17	A1	B1	汽油	四驱	黑	3	0
5	2018/9/17	A1	B2	汽油	四驱	黑	1	0
6	2018/9/17	A1	B3	汽油	四驱	黑	6	0
7	2018/9/17	A1	B1	汽油	四驱	灰	2	0
8	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	白	109	0
9	2018/9/17	A1	B2	汽油	两驱	白	27	0
10	2018/9/17	A1	B5	汽油	两驱	白	3	0
11	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	黑	101	0
12	2018/9/17	A1	B2	汽油	两驱	黑	75	0
13	2018/9/17	A1	B3	汽油	两驱	黑	2	0
14	2018/9/17	A1	B5	汽油	两驱	黑	2	0
15	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	红	2	0
16	2018/9/17	A1	B2	汽油	两驱	红	1	0
17	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	黄	4	0
18	2018/9/17	A1	B2	汽油	两驱	黄	1	0
19	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	灰	8	0
20	2018/9/17	A1	B2	汽油	两驱	灰	1	0
21	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	蓝	3	0
22	2018/9/17	A1	B1	汽油	两驱	银	4	0
23	2018/9/17	A1	B2	汽油	两驱	银	1	0
24	2018/9/17	A1	B3	汽油	两驱	银	1	0
25	2018/9/17	A1	B5	汽油	两驱	银	1	0
26	2018/9/17	A2	B1	汽油	四驱	白	2	0
27	2018/9/17	A2	B1	汽油	四驱	黑	9	0
28	2018/9/17	A2	B5	汽油	四驱	黑	1	0
29	2018/9/17	A2	B4	汽油	两驱	白	3	0

表 2 是 9 月 17 日的装配顺序（数据文件夹中 excel 文件“schedule.xlsx”的“9.17”表单，其他日期的表单类似），在喷涂线后添加了“装配代价”、“喷涂代价”、“其他代价”、“总代价”、“装配校验”、“喷涂校对”等列，对应公式和作用如下

- 装配代价：统计同一品牌下，装配线上不同汽车配置切换代价

$I5=IF(C5=C4,1,0)*IF(D5<>D4,1,0)$

- 喷涂代价：统计喷涂线上的颜色切换代价，其中黑色切换为 10

$J5=IF(G3="黑",10,1)*IF(G5<>G3,1,0)$

- 其他代价：柴油和四驱汽车的批次间隔 k 小于 10，代价为 $10-k$

特殊情况

- 总代价：累计以上三种代价

$L2=SUMIF(A:A,A2,I:I)+SUMIF(A:A,A2,J:J)+SUMIF(A:A,A2,K:K)$



- 装配校对：校对装配顺序中的配置是否是出现在计划表中的有效配置

$O5=COUNTIFS(sheet1!A:A,'9.17'!A5,sheet1!B:B,'9.17'!C5,sheet1!C:C,'9.17'!D5,sheet1!D:D,'9.17'!E5,sheet1!E:E,'9.17'!F5,sheet1!F:F,'9.17'!G5)$

- 喷涂校对：校对装配顺序上的汽车是否交替分配到喷涂线 C1 和 C2 上

$P5=IF(H5=H3,1,0)$

表 2 9 月 17 日的装配顺序

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
日期	装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线	装配代	喷涂代	其他代	总代价	装配校	喷涂校对
2018/9/17	1	A1	B1	汽油	四驱	黑	C2				171	1	
2018/9/17	2	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1	0				1	
2018/9/17	3	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	4	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	5	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	1	0			1	1
2018/9/17	6	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	7	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	1	0			1	1
2018/9/17	8	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	9	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	10	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	11	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	12	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	13	A1	B2	汽油	四驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	14	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	15	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	16	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	17	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	1	0			1	1
2018/9/17	18	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	19	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	1	0			1	1
2018/9/17	20	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	21	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	22	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	23	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	24	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	25	A1	B3	汽油	四驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	26	A1	B3	汽油	四驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	27	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	28	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	29	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	1	0			1	1
2018/9/17	30	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	0			1	1
2018/9/17	31	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	1	10			1	1
2018/9/17	32	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	10			1	1
2018/9/17	33	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1
2018/9/17	34	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1	0	1			1	1
2018/9/17	35	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2	0	0			1	1

上述设计的表格在整理装配情况、手工介入搜索、导入计算结果过程中发挥重要作用。

5. 模型的建立与问题的求解

5.1 生产成本优化模型

根据上一节中的问题分析，建立如下有关四驱、柴油汽车装配问题约束。



1. 各类汽车数量约束

y_k 表示装配顺序 k 是否是四驱汽车，则以下公式分别表示

$$\begin{aligned} \text{A1 黑色四驱: } \sum_{i \in I} x_i y_i, & \quad \text{A2 黑色四驱: } \sum_{j \in J} x_j y_j, \\ \text{A1 非黑色四驱: } \sum_{i \in I} (1 - x_i) y_i, & \quad \text{A2 非黑色四驱: } \sum_{j \in J} (1 - x_j) y_j, \end{aligned} \quad (1)$$

z_k 表示装配顺序 k 是否是柴油动力汽车，则以下公式分别表示

$$\begin{aligned} \text{A1 柴油汽车: } \sum_{i \in I} z_i, & \quad \text{A2 柴油汽车: } \sum_{j \in J} z_j, \\ \text{A1 黑色柴油汽车: } \sum_{i \in I} x_i z_i, & \quad \text{A2 黑色柴油汽车: } \sum_{j \in J} x_j z_j, \\ \text{A1 柴油四驱: } \sum_{i \in I} y_i z_i, & \quad \text{A2 柴油四驱: } \sum_{j \in J} y_j z_j, \end{aligned} \quad (2)$$

2. 柴油和四驱汽车连续排列不能超过两个

如果 $y_k = 1$ 表示装配顺序 k 是四驱汽车，可以通过 y_k 在 k 前后连续 3 个取值的和来约束四驱汽车连续排列不能超过两个，即如果 $y_k = 1$ ， $\sum_{t=k-1}^{k+1} y_t \leq 2$ ，

$k = 2, \dots, 459$ ，可以验证其等价于

$$3 - \sum_{t=k-1}^{k+1} y_t \geq y_k, \quad k = 2, \dots, 459 \quad (3)$$

同理，可以将柴油汽车连续排列不能超过两个表示为

$$3 - \sum_{t=k-1}^{k+1} z_t \geq z_k, \quad k = 2, \dots, 459 \quad (4)$$

3. 柴油和四驱汽车批次间隔约束

可以使用 $1 - y_k$ 连续取值的和表示相邻批次的四驱汽车的间隔，如下表述批次间隔至少为 10

$$\sum_{t=k-11}^k (1 - y_t) \geq 10, \quad k = 12, \dots, 460 \quad (5)$$

同理，可以将柴油汽车相邻批次的间隔不少于 10 表示为

$$\sum_{t=k-11}^k (1 - z_t) \geq 10, \quad k = 12, \dots, 460 \quad (6)$$



4. 生产成本最小的目标函数

如果无法满足柴油和四驱汽车的批次间隔 k 至少是 10 的情况下，间隔 k 必须大于 5，代价为 $10-k$ ，上面 (5-6) 变为

$$\sum_{t=k-6}^k (1 - y_t) \geq 5, \quad \sum_{t=k-6}^k (1 - z_t) \geq 5, \quad k = 7, \dots, 460 \quad (7)$$

此时，成本最小的目标函数可以表示为

$$\text{MIN} = \sum_{k=12}^{460} \left[y_k \left(10 - \sum_{t=k-11}^k (1 - y_t) \right) + z_k \left(10 - \sum_{t=k-11}^k (1 - z_t) \right) \right] \quad (8)$$

由上述 (1-8)，可以得到生产成本最小的优化模型如下

$$\text{MIN} = \sum_{k=12}^{460} \left[y_k \left(10 - \sum_{t=k-11}^k (1 - y_t) \right) + z_k \left(10 - \sum_{t=k-11}^k (1 - z_t) \right) \right]$$

$$\begin{aligned} S.T. \quad & A1 \text{ 黑色四驱} = \sum_{i \in I} x_i y_i & A2 \text{ 黑色四驱} = \sum_{j \in J} x_j y_j \\ & A1 \text{ 非黑色四驱} = \sum_{i \in I} (1 - x_i) y_i & A2 \text{ 非黑色四驱} = \sum_{j \in J} (1 - x_j) y_j \\ & A1 \text{ 柴油汽车} = \sum_{i \in I} z_i & A2 \text{ 柴油汽车} = \sum_{j \in J} z_j \\ & A1 \text{ 黑色柴油汽车} = \sum_{i \in I} x_i z_i & A2 \text{ 黑色柴油汽车} = \sum_{j \in J} x_j z_j \\ & A1 \text{ 柴油四驱} = \sum_{i \in I} y_i z_i & A2 \text{ 柴油四驱} = \sum_{j \in J} y_j z_j \\ & 3 - \sum_{t=k-1}^{k+1} y_t \geq y_k, \quad 3 - \sum_{t=k-1}^{k+1} z_t \geq z_k, \quad k = 2, \dots, 459 \\ & \sum_{t=k-6}^k (1 - y_t) \geq 5, \quad \sum_{t=k-6}^k (1 - z_t) \geq 5, \quad k = 7, \dots, 460 \end{aligned}$$

需要指出的是，上述模型没有约束黑色汽车的配置顺序和成本，这需要手工排入，并且注意优先按顺序排入相同配置的汽车。使用数据处理中设计的 Excel 表格，尽可能多地事先按顺序确定各类汽车配置顺序，然后将初值带入上述生产成本优化模型进行求解，相关程序见附件-3，结合手工介入的调整，可以得到如图 1 所示的 9 月 17 日-9 月 23 日部分装配顺序，相关结果记录在“schedule.xlsx”表单中。



[illegible][illegible][illegible][illegible]

A1																A2										A1				A2												
路径搜索																柴柴														路径搜索												
10	四	四	10	四	10	四	四	25	12	50							21	23	四	四	10	四	四	10	四	四	3				5	5	50	76	57	四	12	7				3
灰灰银灰银灰银灰银灰银黄银灰											蓝	蓝											棕	棕	棕	棕					银金红金红金红金红金红金			棕	棕	棕	棕					

[illegible][illegible]

9



5.2 路径搜索模型

经过上述成本优化模型的求解，如图 1 所示，装配顺序表中通常只含有数量不多的空余位置，对应着剩余尚未分配的、颜色成分复杂的汽车，如下表 3 所示，是在求解 9 月 20 日的装配顺序表时，最后剩余品牌为 A2 的部分汽车，共有 14 量，颜色和配置型号都较为复杂。

表 3 9 月 20 日未安排装配顺序的汽车

2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	白	8	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	黑	2	0
2018/9/20	A2	B5	汽油	四驱	黑	1	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	银	1	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	白	3	1
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	白	1	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	黑	36	0
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	黑	18	0
2018/9/20	A2	B5	汽油	两驱	黑	1	0
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	黑	4	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	红	3	2
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	红	2	1
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	红	1	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	金	2	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	金	1	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	蓝	1	0
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	蓝	1	0
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	银	2	2
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	棕	5	3
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	棕	1	1
2018/9/20	A2	B1	柴油	两驱	白	1	0
2018/9/20	A2	B1	柴油	两驱	黑	3	0

以这 14 辆车为顶点，按照颜色是否符合在总装线上排列时的具体要求，将顶点相互连接起来。这样，符合颜色衔接要求的汽车作为顶点相互连接起来，构成了一个有向图。装配顺序的问题转化成了图的遍历问题。

1. 生成图的连接矩阵

使用 Matlab 按照颜色是否符合要求生成图的邻接矩阵，程序文件名为“genGraph.m”，具体见附件-3。以表 2 中的装配问题为例，在命令窗口中输入以下指令

```
>>num=[1 1 1 2 1 1 1 2 3 1];
>>config={'B1','B4','B6','B1','B4','B6','B1','B4','B4','B6'};
>>color={'银','白','白','红','红','红','金','银','棕','棕'};
>>Graph=genGraph(config,color,num)
```

生成所求装配顺序对应图的邻接矩阵如下表 4



表 4 按照颜色是否符合在总装线上排列要求生成的图的邻接矩阵

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	Inf	Inf
2	Inf	0	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	1	1	1
3	Inf	1	0	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	1	1	1
4	1	Inf	Inf	0	Inf	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	1
5	1	Inf	Inf	Inf	0	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	1
6	1	Inf	Inf	Inf	Inf	0	Inf	1	1	1	1	1	1	1
7	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	0	1	1	1	1	1	1	1
8	10	Inf	Inf	1	1	1	1	0	10	10	10	10	10	10
9	1	Inf	Inf	1	1	1	1	1	0	1	Inf	Inf	Inf	Inf
10	1	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	0	Inf	Inf	Inf	Inf
11	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	0	1	1	1
12	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	1	0	1	1
13	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	1	1	0	1
14	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	1	1	1	0

2. 基于遗传算法的 TSP 问题求解

旅行商问题，即 TSP 问题（Traveling Salesman Problem）又称旅行推销员问题、货郎担问题，是研究的较为充分的图的顶点遍历问题^[1-4]，并且已经证明是一个 NPC 问题。将现有基于遗传算法的 TSP 求解代码^[5]适当改写为 Matlab 程序“ga_TSP.m”，可以对上述邻接矩阵直接求解，得到如下结果，具体见附件-5。通常，对于将装配顺序问题转化成的 15 个左右顶点的有向图，基于遗传算法的 TSP 问题求解程序在迭代 5000 代以内收敛，如图 2 所示。

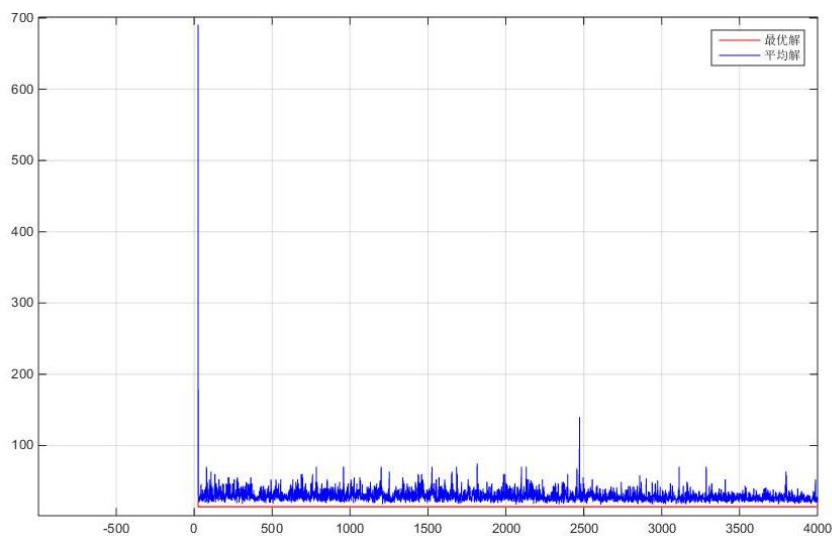


图 2 基于遗传算法的 TSP 问题求解



但还存在以下问题，一是如图 2 所示，因为装配顺序问题转化的有向图不是所有顶点都有边连接的，TSP 问题求解过程不太稳定，时常会出现迭代之后求解失败，没有通路的情况；二是求解 TSP 问题结果得到只是一条路径，颜色和配置切换造成的成本无法在求解过程中确定，一些特定颜色无法保证能按顺序分配在指定的 C1 或 C2 喷涂线上。

3. 广度优先搜索图中指定起点和终点的所有路径

经过以上分析，转化得到的有向图的边并不是太多，顶点规模不是太大，可以考虑搜索图中指定起点和终点的所有路径。采用广度优先搜索算法^[6]，程序文件名称“findPath.m”，具体见附件-6。以表 4 中的邻接矩阵为例，输入以下指令，得到满足颜色转化要求，并且经过所有顶点的路径近 20 万个，如图 3 所示。

```
>>pathsAll = findPath(Graph, 13, 14, 0);
>>paths = pathsAll(pathsAll(:,end-1)~=0,1:end-1);
```

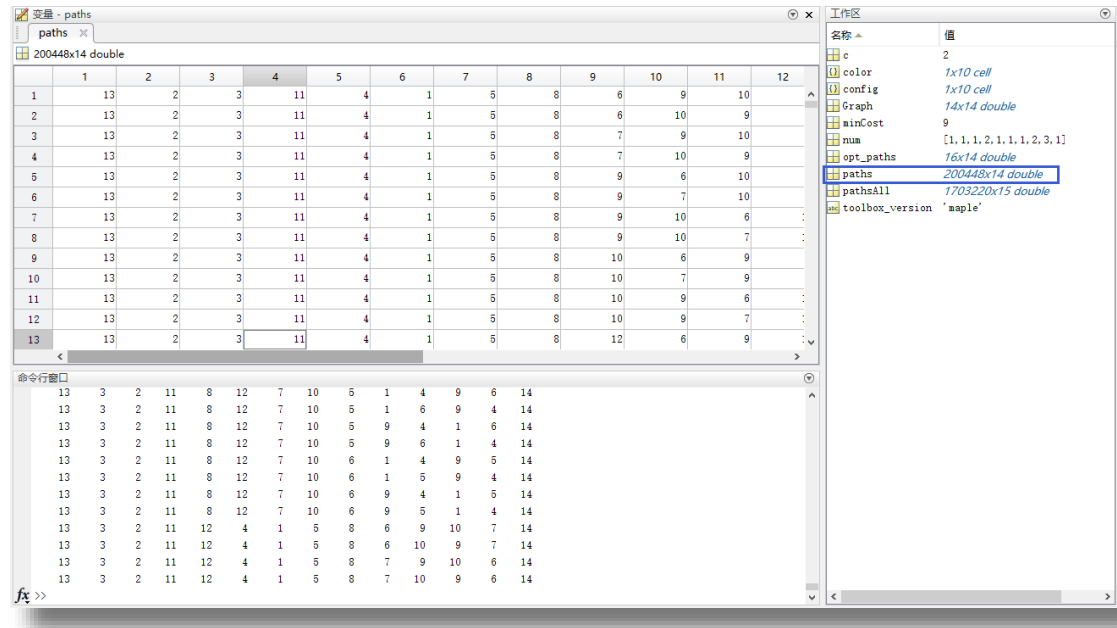


图 3 广度优先搜索图中指定起点和终点的所有路径

4. 路径代价计算

对于上述搜索得到的所有路径，以下采用 Matlab 验证各个路径上的特殊颜色能否按顺序分配在指定的 C1 或 C2 喷涂线上，计算各种路径上切换配置和颜色的代价，并且取代价最小的路径填入装配顺序的整个过程中去，程序文件名称“pathsCost.m”，具体见附件-7。



```
function [minCost,opt_paths]=pathsCost(paths,config,color,num,c)
%paths: 需要验证的所有路径
%config: 汽车配置
%color: 汽车颜色
%num: 对应的汽车数量
%c: 起始点处的喷涂线分配
%miniCost: 最小代价
%opt_paths: 最小代价对应的所有最优路径
```

在命令窗口中输入指令

```
>> [minCost,opt_paths]=pathsCost(paths,config,color,num,c);
>> minCost
```

最终算得共有 16 条代价最小为 9 的装配顺序，如下图 4 所示。

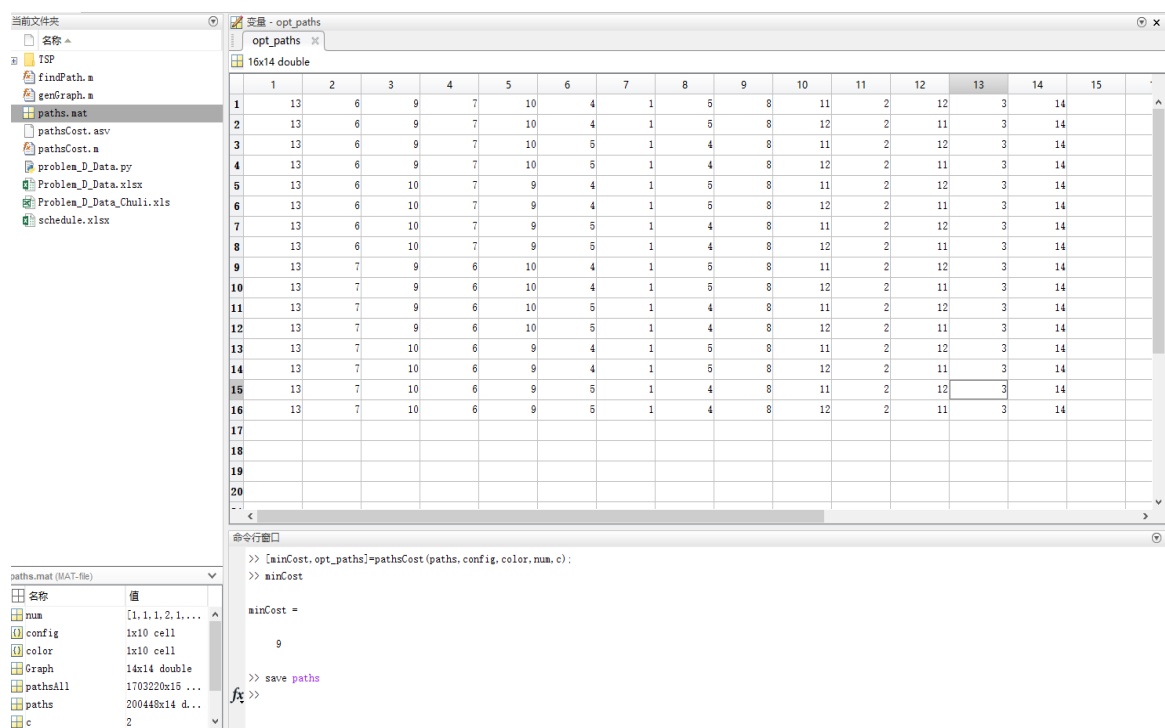


图 4 路径代价计算

取其中一条，完成 20 日尚未完成的部分装配顺序如下表 5，9 月 20 日完整的装配顺序表见附录-8。具体计算结果见数据文件夹“paths.mat”和“schedule.xlsx”文件。



表 5 最优搜索路径代入装配顺序表

2018/9/20	443	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
2018/9/20	444	A2	B1	汽油	四驱	白	C1
2018/9/20	445	A2	B4	汽油	两驱	白	C2
2018/9/20	446	A2	B6	汽油	两驱	白	C1
2018/9/20	447	A2	B6	汽油	两驱	棕	C2
2018/9/20	448	A2	B6	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	449	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
2018/9/20	450	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	451	A2	B4	汽油	两驱	银	C2
2018/9/20	452	A2	B4	汽油	两驱	银	C1
2018/9/20	453	A2	B1	汽油	四驱	银	C2
2018/9/20	454	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	455	A2	B1	汽油	两驱	金	C2
2018/9/20	456	A2	B4	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	457	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
2018/9/20	458	A2	B4	汽油	两驱	棕	C1
2018/9/20	459	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
2018/9/20	460	A2	B1	汽油	四驱	白	C1

6. 模型的评价与推广

6.1 评价与改进

在模型的建立和求解过程中，综合利用多种计算机工具，使用 Excel 汇总展示数据，使用 python 整理规范数据，使用 Lingo 优化配置方案，使用 Matlab 快速实现算法，在计算结果展示、人工经验介入、计算过程衔接方面取得了较好效果。在进行充分的理论分析的基础上，正是综合采用以上手段，才实现了未来一周内的生产配置顺序的设计。

对于原题目中这样复杂的综合问题，本文给出的模型和求解过程仍然显得复杂，自动化和智能化程度不够，需要较多的经验性人工干预，需要进行更高的抽象概括、使用更智能化的算法进行改进。

6.2 模型的推广应用

本文模型适用领域广泛，实现了对数据属性不同、要求形式多样、限制条件多维情况下的装配方案的统筹分析，可以运用于工厂机器的顺序调配、车站班次的调配等实际问题，在提升资源利用率、节约生产成本、提高经济效益方面有着积极作用。

参考文献

- [1]来学伟. 贪心算法在 TSP 问题中的应用[J]. 许昌学院学报,2017,36(02):41-44.
- [2]陈灵佳. 蚁群算法在解决 TSP 问题中的应用[J]. 电子技术与软件工程,2017(10):145.



- [3]李月. 基于遗传算法的免疫算法对 TSP 问题的改进与研究[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版),2017,24(04):58-63.
- [4]袁豪. 旅行商问题的研究与应用[D].南京邮电大学,2017.
- [5]联合开发网. 基于遗传算法的 TSP 算法[EB/OL]. <http://www.pudn.com/Download/item/id/3107168.html>, 2018.9.15.
- [6]Matlab 论坛. 广度优先搜索所有路径[EB/OL]. <http://www.ilovematlab.cn/thread-212175-1-1.htm>, 2018.9.15.



附件-1 使用 python 整理生产计划表

使用 python 将“CUMCM-2018-Problem-D-Chinese-Appendix.xlsx”中的生产计划数据整理成规范形式，程序文件名“problem_D_Data.py”， 具体见数据文件夹。

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import xlwt
import xlrd

data=xlrd.open_workbook('Problem_D_Data.xlsx')
sheet=data.sheet_by_name('Sheet1')
cols = sheet.col_values(0)
riqi_index=([x for x in range(len(cols)) if cols[x] == '日期'])

workbook = xlwt.Workbook(encoding='utf-8')
sheet1 = workbook.add_sheet('sheet1',cell_overwrite_ok=True)
#为样式创建字体
style = xlwt.XFStyle()
font = xlwt.Font()
font.name = 'Times New Roman'
font.bold = False
#设置样式的字体
style.font = font
sheet1.write(0, 0, '日期', style)
sheet1.write(0, 1, '品牌', style)
sheet1.write(0, 2, '配置', style)
sheet1.write(0, 3, '动力', style)
sheet1.write(0, 4, '驱动', style)
sheet1.write(0, 5, '颜色', style)
sheet1.write(0, 6, '数量', style)
idx=0
for k in range(len(riqi_index)-1):
    for t in range(riqi_index[k+1]-riqi_index[k]-2):
        for s in range(5):
            if sheet.cell_value(riqi_index[k]+t+1,s+4) !=0:
                idx = idx + 1
                #每找到一项非 0 的生产计划就记录一行
                sheet1.write(idx, 0, sheet.cell_value(riqi_index[k]+t+1,0), style)
                #日期在原表中位置为第 1 列
                sheet1.write(idx, 1, sheet.cell_value(riqi_index[k]+t+1,1), style)
                #品牌在原表中位置为第 2 列
                sheet1.write(idx, 2, sheet.cell_value(riqi_index[k],s+4), style)
                #配置在原表中位置为上方的第 2 行
                sheet1.write(idx, 3, sheet.cell_value(riqi_index[k]-1,s+4), style)
                #动力在原表中位置为上方的第 1 行
                sheet1.write(idx, 4, sheet.cell_value(riqi_index[k]+t+1,2), style)
                #驱动在原表中位置为第 3 列
                sheet1.write(idx, 5, sheet.cell_value(riqi_index[k]+t+1,3), style)
                #颜色在原表中位置为第 4 列
                sheet1.write(idx, 6, sheet.cell_value(riqi_index[k]+t+1,s+4), style)
                #对应以上属性的汽车生产需求

workbook.save('Problem_D_Data_Chuli.xls')
```



附件-2 规范生产计划安排

规范后的生产计划安排，以下图 2018 年 9 月 20 日为例，数据文件名“Problem_D_Data_Chuli.xls”，具体见数据文件夹。

日期	品牌	配置	动力	驱动	颜色	数量
2018/9/20	A1	B1	汽油	四驱	黑	9
2018/9/20	A1	B2	汽油	四驱	黑	3
2018/9/20	A1	B5	汽油	四驱	黑	2
2018/9/20	A1	B5	汽油	四驱	灰	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	四驱	银	2
2018/9/20	A1	B3	汽油	四驱	银	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	白	114
2018/9/20	A1	B2	汽油	两驱	白	27
2018/9/20	A1	B5	汽油	两驱	白	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	黑	92
2018/9/20	A1	B2	汽油	两驱	黑	75
2018/9/20	A1	B3	汽油	两驱	黑	7
2018/9/20	A1	B5	汽油	两驱	黑	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	红	3
2018/9/20	A1	B2	汽油	两驱	红	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	黄	4
2018/9/20	A1	B2	汽油	两驱	黄	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	灰	7
2018/9/20	A1	B2	汽油	两驱	灰	1
2018/9/20	A1	B3	汽油	两驱	灰	3
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	蓝	3
2018/9/20	A1	B3	汽油	两驱	蓝	1
2018/9/20	A1	B1	汽油	两驱	银	2
2018/9/20	A1	B3	汽油	两驱	银	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	白	8
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	黑	2
2018/9/20	A2	B5	汽油	四驱	黑	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	银	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	白	3
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	白	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	黑	36
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	黑	18
2018/9/20	A2	B5	汽油	两驱	黑	1
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	黑	4
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	红	3
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	红	2
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	红	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	金	2
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	金	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	蓝	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	蓝	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	银	2
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	棕	5
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	棕	1
2018/9/20	A2	B1	柴油	两驱	白	1
2018/9/20	A2	B1	柴油	两驱	黑	3



附件-3 求解生产成本优化模型的 Lingo 程序

程序文件名为“生产成本优化模型.lg4”，注意满足于局部最优解，不要勾选“Use Global Solver”选项，求解一段时间后可以手动打断求解过程，具体见数据文件夹。

```
model:
sets:
xiaobiao/1..460/:A1_,A2_,y,z,x;
shuzhi/1..10/:SL;
!A1黑色四驱、A2黑色四驱、 A1非黑色四驱、
A2非黑色四驱、A1柴油、A2柴油、A1黑色柴油
.....等特殊汽车数值;
endsets
init:
y,z=@ole('LingoData.xlsx');
endinit
data:
!打开Excel文件'LingoData.xlsx'读取相关数据;
A1_,A2_,x,SL=@ole('LingoData.xlsx');
enddata
min=@sum(xiaobiao(k) | k #GE# 12:
y(k)*(10-@sum(xiaobiao(t) | (t #GE# k-11) #AND# (t #LE# k) :
(1-y(t))))
+z(k)*(10-@sum(xiaobiao(t) | (t #GE# k-11) #AND# (t #LE# k) :
(1-z(t))))
);
@sum(xiaobiao(I):A1_(I)*x(I)*y(I))=SL(1);
@sum(xiaobiao(I):A2_(I)*x(I)*y(I))=SL(2);
@sum(xiaobiao(I):A1_(I)*y(I)*(1-x(I)))=SL(3);
@sum(xiaobiao(I):A2_(I)*y(I)*(1-x(I)))=SL(4);
@sum(xiaobiao(I):A1_(I)*z(I))=SL(5);
@sum(xiaobiao(I):A2_(I)*z(I))=SL(6);
@sum(xiaobiao(I):A1_(I)*x(I)*z(I))=SL(7);
@sum(xiaobiao(I):A2_(I)*x(I)*z(I))=SL(8);
@sum(xiaobiao(I):A1_(I)*y(I)*z(I))=SL(9);
@sum(xiaobiao(I):A2_(I)*y(I)*z(I))=SL(10);

@for(xiaobiao(I) | (I #GE# 2) #AND# (I #LE# 459) :
3-y(I-1)-y(I)-y(I+1) >= y(I);
3-z(I-1)-z(I)-z(I+1) >= z(I);
);

@for(xiaobiao(k) | k #GE# 7 :
@sum(xiaobiao(t) | (t #GE# k-6) #AND# (t #LE# k) :
(1-y(t)))>=5;
@sum(xiaobiao(t) | (t #GE# k-6) #AND# (t #LE# k) :
(1-z(t)))>=5;
);

@for(xiaobiao(I):
@bin(A1_(I));
@bin(A2_(I));
@bin(y(I));
@bin(z(I));
);
end
```



```

Feasible solution found.
Objective value:          -13.00000
Objective bound:         -39.78077
Infeasibilities:          0.000000
Extended solver steps:    1
Total solver iterations:  466

```

Variable	Value	Reduced Cost
Al_ (1)	1.000000	0.000000
Al_ (2)	1.000000	0.000000
Al_ (3)	1.000000	0.000000
Al_ (4)	1.000000	0.000000
Al_ (5)	1.000000	0.000000
Al_ (6)	1.000000	0.000000
Al_ (7)	1.000000	0.000000
Al_ (8)	1.000000	0.000000
Al_ (9)	1.000000	0.000000
Al_ (10)	1.000000	0.000000
Al_ (11)	1.000000	0.000000
Al_ (12)	1.000000	0.000000
Al_ (13)	1.000000	0.000000
Al_ (14)	1.000000	0.000000
Al_ (15)	1.000000	0.000000
Al_ (16)	1.000000	0.000000
Al_ (17)	1.000000	0.000000
Al_ (18)	1.000000	0.000000
Al_ (19)	1.000000	0.000000
Al_ (20)	1.000000	0.000000
Al_ (21)	1.000000	0.000000
Al_ (22)	1.000000	0.000000
Al_ (23)	1.000000	0.000000
Al_ (24)	1.000000	0.000000
Al_ (25)	1.000000	0.000000
Al_ (26)	1.000000	0.000000
Al_ (27)	1.000000	0.000000
Al_ (28)	1.000000	0.000000
Al_ (29)	1.000000	0.000000
Al_ (30)	1.000000	0.000000



附件-4 邻接矩阵生成

使用 Matlab 将除大部分黑、白色以外的其他杂色汽车，按允许的装配顺序生成邻接矩阵，以求解 2018 年 9 月 20 日装配顺序过程的一些装配顺序为例，程序文件名为“genGraph.m”，具体见数据文件夹。

2018/9/20	443	A2	B1	汽油	四驱	白
2018/9/20	444	A2	B1	汽油	四驱	白
2018/9/20	445	A2				
2018/9/20	446	A2				
2018/9/20	447	A2				
2018/9/20	448	A2				
2018/9/20	449	A2				
2018/9/20	450	A2				
2018/9/20	451	A2				
2018/9/20	452	A2				
2018/9/20	453	A2				
2018/9/20	454	A2				
2018/9/20	455	A2				
2018/9/20	456	A2				
2018/9/20	457	A2				
2018/9/20	458	A2				
2018/9/20	459	A2	B1	汽油	四驱	白
2018/9/20	460	A2	B1	汽油	四驱	白

空余的位置

2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	白	8	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	黑	2	0
2018/9/20	A2	B5	汽油	四驱	黑	1	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	四驱	银	1	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	白	3	1
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	白	1	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	黑	36	0
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	黑	18	0
2018/9/20	A2	B5	汽油	两驱	黑	1	0
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	黑	4	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	红	3	2
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	红	2	1
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	红	1	1
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	金	2	1
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	金	1	0
2018/9/20	A2	B1	汽油	两驱	蓝	1	0
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	蓝	1	0
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	银	2	2
2018/9/20	A2	B4	汽油	两驱	棕	5	3
2018/9/20	A2	B6	汽油	两驱	棕	1	1
2018/9/20	A2	B1	柴油	两驱	白	1	0
2018/9/20	A2	B1	柴油	两驱	黑	3	0

未分配的汽车

```
function Graph=genGraph(config,color,num)

N=sum(num);

Graph=ones(N)*inf; %连接图共有 N 个顶点

idx=zeros(N,1); %用来记录每个顶点的属性类表序号

s=1;

for k = 1:length(num)

    idx(s:(s+num(k)-1))=k;

    s=s+num(k);

end

for k = 1:N
    for t = 1:N
        if t==k
            Graph(k,t) = 0;
        end
        if t ~= k
            if strcmp(color{idx(k)},'白') %白色汽车在装配线上的允许连接情况
                if strcmp(color{idx(t)},'白')
                    Graph(k,t) = 1;
                end
            end
            if strcmp(color{idx(t)},'蓝')
```



```

        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '棕')
        Graph(k,t) = 1;
    end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '黄') %黄色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '银')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '灰')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '棕')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '金')
        Graph(k,t) = 1;
    end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '红') %红色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '银')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '灰')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '棕')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '金')
        Graph(k,t) = 1;
    end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '蓝') %蓝色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '白')
        Graph(k,t) = 1;
    end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '金') %金色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '黄')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '红')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '灰')
        Graph(k,t) = 10; %金色汽车优先与黄、红汽车连接
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '棕')
        Graph(k,t) = 10;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '银')
        Graph(k,t) = 10;
    end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '灰') %灰色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '灰')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '银')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '黄')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '红')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '金')
        Graph(k,t) = 1;
    end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '银') %银色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '灰')
        Graph(k,t) = 1;
    end

```



```

end
if strcmp(color{idx(t)}, '银')
    Graph(k,t) = 1;
end
if strcmp(color{idx(t)}, '黄')
    Graph(k,t) = 1;
end
if strcmp(color{idx(t)}, '红')
    Graph(k,t) = 1;
end
if strcmp(color{idx(t)}, '金')
    Graph(k,t) = 1;
end
end
if strcmp(color{idx(k)}, '棕') %棕色汽车在装配线上的允许连接情况
    if strcmp(color{idx(t)}, '棕')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '白')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '黄')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '红')
        Graph(k,t) = 1;
    end
    if strcmp(color{idx(t)}, '金')
        Graph(k,t) = 1;
    end
end
end
end
end

>>num=[1 1 1 2 1 1 1 2 3 1];
>>config={'B1','B4','B6','B1','B4','B6','B1','B4','B4','B6'};
>>color={'银','白','白','红','红','红','金','银','棕','棕'};
>>Graph=genGraph(config,color,num)

```

生成所求装配顺序对应图的邻接矩阵如下：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	Inf	Inf
2	Inf	0	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	1	1	1
3	Inf	1	0	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	1	1	1
4	1	Inf	Inf	0	Inf	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	1
5	1	Inf	Inf	Inf	0	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	1
6	1	Inf	Inf	Inf	Inf	0	Inf	1	1	1	1	1	1	1
7	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	0	1	1	1	1	1	1	1
8	10	Inf	Inf	1	1	1	1	0	10	10	10	10	10	10
9	1	Inf	Inf	1	1	1	1	1	0	1	Inf	Inf	Inf	Inf
10	1	Inf	Inf	1	1	1	1	1	1	0	Inf	Inf	Inf	Inf
11	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	0	1	1	1
12	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	1	0	1	1
13	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	1	1	0	1
14	Inf	1	1	1	1	1	1	1	Inf	Inf	1	1	1	0



附件-5 使用遗传算法求解 TSP 问题

使用 Matlab 采用遗传算法搜索给定邻接矩阵为 Graph 的图对应的 TSP 问题，程序文件名称“ga_TSP.m”，具体见数据文件夹。

(以下代码改写自联合开发网：<http://www.pudn.com/Download/item/id/3107168.html>)

```
function ga_TSP(dislist)
    CityNum=size(dislist,2)
    inn=30; %初始种群大小
    gnmax=500000; %最大代数
    pc=0.8; %交叉概率
    pm=0.8; %变异概率
    %产生初始种群
    s=zeros(inn, CityNum);
    for i=1:inn
        s(i,:)=randperm(CityNum);
    end
    [~,p]=objf(s, dislist);
    gn=1;
    ymean=zeros(gn,1);
    ymax=zeros(gn,1);
    xmax=zeros(inn, CityNum);
    scnew=zeros(inn, CityNum);
    smnew=zeros(inn, CityNum);
    while gn<gnmax+1
        for j=1:2:inn
            seln=sel(p); %选择操作
            scro=cro(s, seln, pc); %交叉操作
            scnew(j,:)=scro(1,:);
            scnew(j+1,:)=scro(2,:);
            smnew(j,:)=mut(scnew(j,:), pm); %变异操作
            smnew(j+1,:)=mut(scnew(j+1,:), pm);
        end
        s=smnew; %产生了新的种群
        [f,p]=objf(s, dislist); %计算新种群的适应度
        %记录当前代最好和平均的适应度
        [fmax, nmax]=max(f);
        ymean(gn)=1000/mean(f);
        ymax(gn)=1000/fmax;
        %记录当前代的最佳个体
        x=s(nmax,:);
        xmax(gn,:)=x;
        gn=gn+1;
    end

    [min_ymax, index]=min(ymax);
    figure;
    plot(ymax, 'r'); hold on;
    plot(ymean, 'b'); grid;
    title('搜索过程');
    legend('最优解', '平均解');
    fprintf('遗传算法得到的最短距离: %.2f\n', min_ymax);
    fprintf('遗传算法得到的最短路线');
    disp(xmax(index,:));
end

%-----
%计算所有种群的适应度
function [f,p]=objf(s, dislist)

    inn=size(s,1); %读取种群大小
    f=zeros(inn,1);
    for i=1:inn
        f(i)=CalDist(dislist, s(i,:)); %计算函数值，即适应度
    end
    f=1000./f; %取距离倒数
    %根据个体的适应度计算其被选择的概率
    fsum=0;
    for i=1:inn
        fsum=fsum+f(i)^15; %让适应度越好的个体被选择概率越高
    end
    ps=zeros(inn,1);
    for i=1:inn
        ps(i)=f(i)^15/fsum;
    end
    %计算累积概率
    p=zeros(inn,1);
    p(1)=ps(1);
    for i=2:inn
        p(i)=p(i-1)+ps(i);
    end
    p=p';
end
```



```

%根据变异概率判断是否变异
function pcc=pro(pc)
test(1:100)=0;
l=round(100*pc);
test(1:l)=1;
n=round(rand*99)+1;
pcc=test(n);
end

%-----
% “选择” 操作
function seln=selp

seln=zeros(2,1);
%从种群中选择两个个体，最好不要两次选择同一个个体
for i=1:2
    r=rand; %产生一个随机数
    prand=p-r;
    j=1;
    while prand(j)<0
        j=j+1;
    end
    seln(i)=j; %选中个体的序号
    if i==2&&j==seln(i-1) %若相同就再选一次
        r=rand; %产生一个随机数
        prand=p-r;
        j=1;
        while prand(j)<0
            j=j+1;
        end
    end
end
end

%-----
% “交叉” 操作
function scro=cro(s,seln,pc)

bn=size(s,2);
pcc=pro(pc); %根据交叉概率决定是否进行交叉操作，1则是，0则否
scro(1,:)=s(seln(1,:),:);

scro(2,:)=s(seln(2,:),:);
if pcc==1
    c1=round(rand*(bn-2))+1; %在[1,bn-1]范围内随机产生一个交叉位
    c2=round(rand*(bn-2))+1;
    chb1=min(c1,c2);
    chb2=max(c1,c2);
    middle=scro(1, chb1+1: chb2);
    scro(1, chb1+1: chb2)=scro(2, chb1+1: chb2);
    scro(2, chb1+1: chb2)=middle;
    for i=1: chb1 %似乎有问题
        while find(scro(1, chb1+1: chb2)==scro(1,i))
            zhi=find(scro(1, chb1+1: chb2)==scro(1,i));
            y=scro(2, chb1+zhi);
            scro(1,i)=y;
        end
        while find(scro(2, chb1+1: chb2)==scro(2,i))
            zhi=find(scro(2, chb1+1: chb2)==scro(2,i));
            y=scro(1, chb1+zhi);
            scro(2,i)=y;
        end
    end
    for i=chb2+1:bn
        while find(scro(1,1: chb2)==scro(1,i))
            zhi=find(scro(1,1: chb2)==scro(1,i));
            y=scro(2, zhi);
            scro(1,i)=y;
        end
        while find(scro(2,1: chb2)==scro(2,i))
            zhi=find(scro(2,1: chb2)==scro(2,i));
            y=scro(1, zhi);
            scro(2,i)=y;
        end
    end
end
end

%-----
% “变异” 操作
function snnew=mut(snew,pm)

bn=size(snew,2);
snnew=snew;

```



```

pmm=pro(pm); %根据变异概率决定是否进行变异操作，1则是，0则否
if pmm==1
    c1=round(rand*(bn-2))+1; %在[1,bn-1]范围内随机产生一个变异位
    c2=round(rand*(bn-2))+1;
    chb1=min(c1,c2);
    chb2=max(c1,c2);
    x=snew(chb1+1:chb2);
    snnew(chb1+1:chb2)=fliplr(x);
end
end

%-----

%-----

%适应度函数
function F=CalDist(dislist,s)

DistanV=0;
n=size(s,2);
for i=1:(n-1)
    DistanV=DistanV+dislist(s(i),s(i+1));
end
DistanV=DistanV+dislist(s(n),s(1));
F=DistanV;
end

>> load paths
>> ga_TSP(Graph)

```



附件-6 广度优先搜索图中指定起点和终点的所有路径

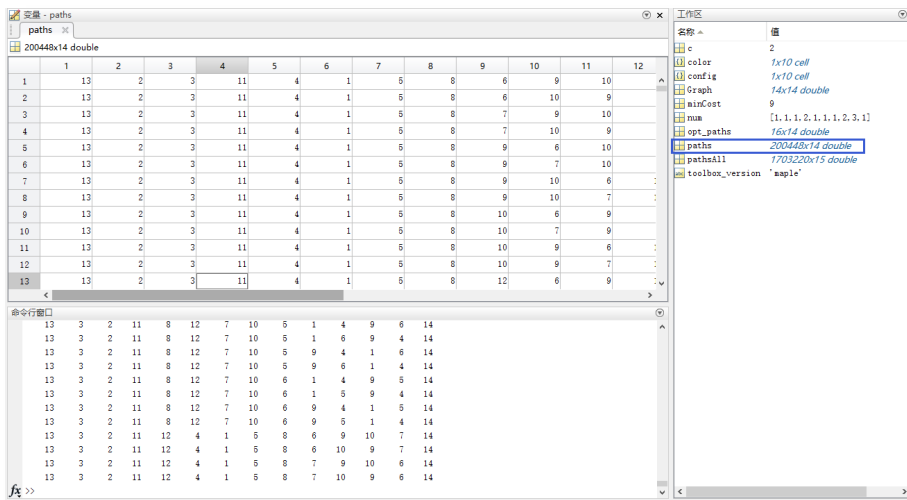
使用 Matlab 按广度优先搜索给定邻接矩阵为 Graph 的图中从顶点 partialPath 到顶点 destination 间的所有路径，程序文件名称“findPath.m”，具体见数据文件夹。

(以下代码来自 Matlab 论坛: <http://www.ilovematlab.cn/thread-212175-1-1.html>)

```
1 function possiblePaths = findPath(Graph, partialPath, destination, partialWeight)
2 % findPath按深度优先搜索所有可能的从partialPath出发到destination的路径, 这些路径中不包含环路
3 % Graph: 路网图, 非无穷或0表示两节点之间直接连通, 矩阵值即为路网权值
4 % partialPath: 出发的路径, 如果partialPath就一个数, 表示这个就是起始点
5 % destination: 目标节点
6 % partialWeight: partialPath的权值, 当partialPath为一个数时, partialWeight为0
7 pathLength = length(partialPath);
8 lastNode = partialPath(pathLength); %得到最后一个节点
9 nextNodes = find(0<Graph(lastNode,:) & Graph(lastNode,:)<inf); %根据Graph图得到最后一个节点的下一个节点
10 GLength = length(Graph);
11 possiblePaths = [];
12 if lastNode == destination
13     % 如果lastNode与目标节点相等, 则说明partialPath就是从其出发到目标节点的路径, 结果只有这一个, 直接返回
14     possiblePaths = partialPath;
15     possiblePaths(GLength + 1) = partialWeight;
16     return;
17 elseif ~isempty( find( partialPath == destination ) ) %ok<EFIND>
18     return;
19 end
20 %nextNodes中的数一定大于0,所以为了让nextNodes(i)去掉, 先将其赋值为0
21 for i=1:length(nextNodes)
22     if destination == nextNodes(i)
23         %输出路径
24         tmpPath = cat(2, partialPath, destination); %串接成一条完整的路径
25         tmpPath(GLength + 1) = partialWeight + Graph(lastNode, destination);
26         %延长数组长度至GLength+1, 最后一个元素用于存放该路径的总路阻
27         possiblePaths( length(possiblePaths) + 1, : ) = tmpPath;
28         nextNodes(i) = 0;
29     elseif ~isempty( find( partialPath == nextNodes(i) ) )
30         nextNodes(i) = 0;
31     end
32 end
33 nextNodes = nextNodes(nextNodes ~= 0);
34 %将nextNodes中为0的值去掉, 因为下一个节点可能已经遍历过或者它就是目标节点
35 for i=1:length(nextNodes)
36     tmpPath = cat(2, partialPath, nextNodes(i));
37     tmpPsbPaths = findPath(Graph, tmpPath, destination, partialWeight + Graph(lastNode, nextNodes(i)));
38     possiblePaths = cat(1, possiblePaths, tmpPsbPaths);
39 end
```

使用路径搜索算法搜索得到路径（部分）如下

```
>>pathsAll = findPath(Graph, 13, 14, 0);
>>paths = pathsAll(pathsAll(:,end-1)~=0,1:end-1);
```



附件-7 路径代价计算

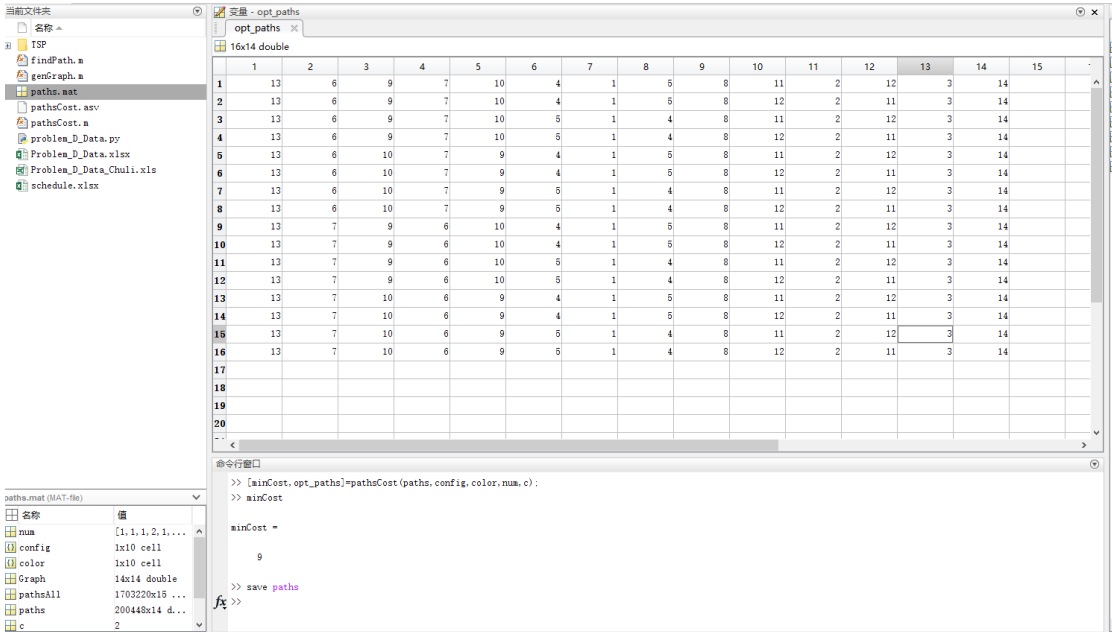
由于各种汽车的颜色在装配线上的组合形式多样,使用路径搜索算法给出的可能路径非常多。以下采用 Matlab 计算各种路径的代价,并且取代价最小的路径填入装配顺序的整个过程中去,程序文件名称“pathsCost.m”,具体见数据文件夹。

```
function [minCost,opt_paths]=pathsCost(paths,config,color,num,c)
%paths: 需要验证的所有路径
%config: 汽车配置
%color: 汽车颜色
%num: 对应的汽车数量
%c: 起始点处的喷涂线分配
%miniCost: 最小代价
%opt_paths: 最小代价对应的所有最优路径
N=sum(num);
idx=zeros(N,1); %用来记录每个顶点的属性类表序号
s=1;
for k = 1:length(num)
    idx(s:(s+num(k)-1))=k;
    s=s+num(k);
end
maxpath=size(paths,1);
Cost = zeros(maxpath,1);
for k=1:maxpath
    path = paths(k,1:end-1);
    Cost0 = 0;
    for t = 1:N
        if t>=2
            if ~strcmp(config{idx(t)},config{idx(t-1)})
                %装配线上配置改变代价+1
                Cost0 = Cost0+1;
            end
        end
        if t>=3
            if ~strcmp(color{idx(t)},color{idx(t-2)})
                %喷涂线上颜色改变代价+1
                Cost0 = Cost0+1;
            end
        end
        %金色汽车喷绘线为 C2
        if strcmp(color{idx(t)},'金')
            if (c == 1 && mod(t,2) == 1) || (c == 2 && mod(t,2) == 0)
                Cost0 = Cost0+100000;
            end
        end
        %黄、蓝、红色汽车喷绘线为 C1
        if strcmp(color{idx(t)},'黄') || strcmp(color{idx(t)},'蓝') || strcmp(color{idx(t)},'红')
            if (c == 1 && mod(t,2) == 0) || (c == 2 && mod(t,2) == 1)
                Cost0 = Cost0+100000;
            end
        end
    end
    Cost(k) = Cost0;
end
minCost = min(Cost);
mink = Cost==minCost;
opt_paths=paths(mink,1:end-1);
```



```
>> [minCost,opt_paths]=pathsCost(paths,config,color,num,c);
>> minCost
```

最终算得共有 16 条代价最小为 9 的装配顺序，如下图所示。



取其中一条（注意四驱汽车的位置），完成 20 日的装配顺序如下。具体计算结果见数据文件夹“paths.mat”和“schedule.xlsx”。

2018/9/20	443	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
2018/9/20	444	A2	B1	汽油	四驱	白	C1
2018/9/20	445	A2	B4	汽油	两驱	白	C2
2018/9/20	446	A2	B6	汽油	两驱	白	C1
2018/9/20	447	A2	B6	汽油	两驱	棕	C2
2018/9/20	448	A2	B6	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	449	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
2018/9/20	450	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	451	A2	B4	汽油	两驱	银	C2
2018/9/20	452	A2	B4	汽油	两驱	银	C1
2018/9/20	453	A2	B1	汽油	四驱	银	C2
2018/9/20	454	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	455	A2	B1	汽油	两驱	金	C2
2018/9/20	456	A2	B4	汽油	两驱	红	C1
2018/9/20	457	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
2018/9/20	458	A2	B4	汽油	两驱	棕	C1
2018/9/20	459	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
2018/9/20	460	A2	B1	汽油	四驱	白	C1



附件-8 9月20日的装配顺序

装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
1	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
2	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
3	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
4	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
5	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
6	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
7	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
8	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
9	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
10	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
11	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
12	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
13	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
14	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
15	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
16	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
17	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
18	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
19	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
20	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
21	A1	B1	汽油	四驱	黑	C2
22	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1
23	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
24	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
25	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
26	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
27	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
28	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
29	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
30	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
31	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
32	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
33	A1	B1	汽油	四驱	黑	C2
34	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1
35	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
36	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
37	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
38	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
39	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
40	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1



关注数学模型
获取更多资讯

装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
41	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
42	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
43	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
44	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
45	A1	B1	汽油	四驱	黑	C2
46	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1
47	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
48	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
49	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
50	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
51	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
52	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
53	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
54	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
55	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
56	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
57	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
58	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1
59	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
60	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
61	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
62	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
63	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
64	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
65	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
66	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
67	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
68	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
69	A1	B1	汽油	四驱	黑	C2
70	A1	B1	汽油	四驱	黑	C1
71	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
72	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
73	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
74	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
75	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
76	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
77	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
78	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
79	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
80	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
81	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
82	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
83	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
84	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
85	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
86	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
87	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
88	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
89	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
90	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
91	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
92	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
93	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
94	A1	B1	汽油	两驱	蓝	C1
95	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
96	A1	B1	汽油	两驱	蓝	C1
97	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
98	A1	B1	汽油	两驱	蓝	C1
99	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
100	A1	B3	汽油	两驱	蓝	C1
101	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
102	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
103	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
104	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
105	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
106	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
107	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
108	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
109	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
110	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
111	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
112	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
113	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
114	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
115	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
116	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
117	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
118	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
119	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
120	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
121	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
122	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
123	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
124	A1	B1	汽油	两驱	白	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
125	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
126	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
127	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
128	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
129	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
130	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
131	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
132	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
133	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
134	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
135	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
136	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
137	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
138	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
139	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
140	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
141	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
142	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
143	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
144	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
145	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
146	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
147	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
148	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
149	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
150	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
151	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
152	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
153	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
154	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
155	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
156	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
157	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
158	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
159	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
160	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
161	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
162	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
163	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
164	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
165	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
166	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
167	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
168	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
169	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
170	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
171	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
172	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
173	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
174	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
175	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
176	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
177	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
178	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
179	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
180	A1	B1	汽油	两驱	黑	C1
181	A1	B1	汽油	两驱	黑	C2
182	A2	B1	汽油	四驱	黑	C1
183	A2	B1	汽油	四驱	黑	C2
184	A2	B1	柴油	两驱	黑	C1
185	A2	B1	柴油	两驱	黑	C2
186	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
187	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
188	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
189	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
190	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
191	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
192	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
193	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
194	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
195	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
196	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
197	A2	B1	柴油	两驱	黑	C2
198	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
199	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
200	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
201	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
202	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
203	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
204	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
205	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
206	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
207	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
208	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
209	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
210	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
211	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
212	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
213	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
214	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
215	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
216	A2	B1	汽油	四驱	白	C1
217	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
218	A2	B1	汽油	两驱	蓝	C1
219	A2	B4	汽油	两驱	白	C2
220	A2	B4	汽油	两驱	蓝	C1
221	A2	B4	汽油	两驱	白	C2
222	A2	B4	汽油	两驱	棕	C1
223	A2	B4	汽油	两驱	金	C2
224	A2	B4	汽油	两驱	红	C1
225	A2	B1	汽油	两驱	金	C2
226	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
227	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
228	A2	B1	柴油	两驱	白	C1
229	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
230	A2	B1	汽油	四驱	白	C1
231	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
232	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
233	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
234	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
235	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
236	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
237	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
238	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
239	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
240	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
241	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
242	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
243	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
244	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
245	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
246	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
247	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
248	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
249	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
250	A1	B1	汽油	两驱	白	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
251	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
252	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
253	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
254	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
255	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
256	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
257	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
258	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
259	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
260	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
261	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
262	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
263	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
264	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
265	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
266	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
267	A1	B1	汽油	两驱	白	C2
268	A1	B1	汽油	两驱	白	C1
269	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
270	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
271	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
272	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
273	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
274	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
275	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
276	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
277	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
278	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
279	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
280	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
281	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
282	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
283	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
284	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
285	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
286	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
287	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
288	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
289	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
290	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
291	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
292	A1	B2	汽油	两驱	白	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
293	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
294	A1	B2	汽油	两驱	白	C1
295	A1	B2	汽油	两驱	白	C2
296	A1	B5	汽油	两驱	白	C1
297	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
298	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
299	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
300	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
301	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
302	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
303	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
304	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
305	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
306	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
307	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
308	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
309	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
310	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
311	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
312	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
313	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
314	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
315	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
316	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
317	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
318	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
319	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
320	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
321	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
322	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
323	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
324	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
325	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
326	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
327	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
328	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
329	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
330	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
331	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
332	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
333	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
334	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
335	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
336	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
337	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
338	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
339	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
340	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
341	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
342	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
343	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
344	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
345	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
346	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
347	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
348	A1	B1	汽油	四驱	银	C1
349	A1	B1	汽油	四驱	银	C2
350	A1	B1	汽油	两驱	红	C1
351	A1	B1	汽油	两驱	银	C2
352	A1	B1	汽油	两驱	红	C1
353	A1	B1	汽油	两驱	银	C2
354	A1	B1	汽油	两驱	黄	C1
355	A1	B1	汽油	两驱	灰	C2
356	A1	B1	汽油	两驱	黄	C1
357	A1	B1	汽油	两驱	灰	C2
358	A1	B1	汽油	两驱	黄	C1
359	A1	B1	汽油	两驱	灰	C2
360	A1	B1	汽油	两驱	黄	C1
361	A1	B3	汽油	四驱	银	C2
362	A1	B5	汽油	四驱	灰	C1
363	A1	B1	汽油	两驱	灰	C2
364	A1	B1	汽油	两驱	灰	C1
365	A1	B1	汽油	两驱	灰	C2
366	A1	B1	汽油	两驱	红	C1
367	A1	B1	汽油	两驱	灰	C2
368	A1	B3	汽油	两驱	灰	C1
369	A1	B3	汽油	两驱	灰	C2
370	A1	B3	汽油	两驱	银	C1
371	A1	B3	汽油	两驱	灰	C2
372	A1	B2	汽油	两驱	黄	C1
373	A1	B2	汽油	两驱	灰	C2
374	A1	B2	汽油	两驱	红	C1
375	A1	B2	汽油	四驱	黑	C2
376	A1	B2	汽油	四驱	黑	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
377	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
378	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
379	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
380	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
381	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
382	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
383	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
384	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
385	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
386	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
387	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
388	A1	B2	汽油	四驱	黑	C1
389	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
390	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
391	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
392	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
393	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
394	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
395	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
396	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
397	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
398	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
399	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
400	A1	B2	汽油	两驱	黑	C1
401	A1	B2	汽油	两驱	黑	C2
402	A1	B5	汽油	四驱	黑	C1
403	A1	B5	汽油	四驱	黑	C2
404	A1	B5	汽油	两驱	黑	C1
405	A1	B3	汽油	两驱	黑	C2
406	A1	B3	汽油	两驱	黑	C1
407	A1	B3	汽油	两驱	黑	C2
408	A1	B3	汽油	两驱	黑	C1
409	A1	B3	汽油	两驱	黑	C2
410	A1	B3	汽油	两驱	黑	C1
411	A1	B3	汽油	两驱	黑	C2
412	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
413	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
414	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
415	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
416	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
417	A2	B1	汽油	两驱	黑	C2
418	A2	B5	汽油	两驱	黑	C1



装配顺序	品牌	配置	动力	驱动	颜色	喷涂线
419	A2	B5	汽油	四驱	黑	C2
420	A2	B6	汽油	两驱	黑	C1
421	A2	B6	汽油	两驱	黑	C2
422	A2	B6	汽油	两驱	黑	C1
423	A2	B6	汽油	两驱	黑	C2
424	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
425	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
426	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
427	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
428	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
429	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
430	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
431	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
432	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
433	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
434	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
435	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
436	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
437	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
438	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
439	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
440	A2	B4	汽油	两驱	黑	C1
441	A2	B4	汽油	两驱	黑	C2
442	A2	B1	汽油	两驱	黑	C1
443	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
444	A2	B1	汽油	四驱	白	C1
445	A2	B4	汽油	两驱	白	C2
446	A2	B6	汽油	两驱	白	C1
447	A2	B6	汽油	两驱	棕	C2
448	A2	B6	汽油	两驱	红	C1
449	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
450	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
451	A2	B4	汽油	两驱	银	C2
452	A2	B4	汽油	两驱	银	C1
453	A2	B1	汽油	四驱	银	C2
454	A2	B1	汽油	两驱	红	C1
455	A2	B1	汽油	两驱	金	C2
456	A2	B4	汽油	两驱	红	C1
457	A2	B4	汽油	两驱	棕	C2
458	A2	B4	汽油	两驱	棕	C1
459	A2	B1	汽油	四驱	白	C2
460	A2	B1	汽油	四驱	白	C1





关注数学模型
获取更多资讯