
全自动化学发光免疫分析仪芯片检测调度优化模型及算法研究

摘要

随着医疗行业的发展，全自动化学发光免疫分析仪作为一种对人体体液样本进行检测的仪器，通过机器实现全自动化操作，具有效率高、精确度良好、省时省力等优点，已被国内外的各大医院和医疗机构广泛应用于临床。在使用过程中采用合理的检测调度方案可以极大提高检测效率，具有重要现实意义。本文对全自动化学发光免疫分析仪芯片的检测调度方案问题进行了研究，提出了最小输入间隔的决策原则，采用元胞自动机模型对整个检测过程进行了简化和模拟，使用遗传算法优化了检测调度方案。

针对问题一：可以证明，在单一类型芯片投放的过程中，按照最小输入间隔的原则进行输入可以使最终检测效率最高。基于该原则分别对 60 片 A 型芯片和 B 型芯片的检测过程进行模拟，得到最终检测时间即为最短检测时间。截取 1 h 可作为单位时间内芯片检测数量的最大值。最终得到结论如下：1) 只有 A 型芯片的情况下，单位时间内可以检测 A 型芯片为 54 片；2) 只有 B 型芯片的情况下，单位时间内可以检测 B 型芯片为 0 片。

针对问题二：若以最小输入间隔为原则，可以求出固定 A、B 芯片输入顺序时的最短检测时间。因此对检测总时间的优化相当于是对 A、B 两类芯片输入顺序的优化。可以以检测总时间为适应性函数，采用遗传算法对芯片输入顺序进行优化。由于模拟过程计算量太大，采用元胞自动机模型将时间离散化，加速了整个模拟过程，使遗传算法能够高效运行。经过计算，在 A、B 芯片各 80 片的情况下，全部完成检测至少要 11824 s。

针对问题三、四：通过分析，可将问题三、问题四归纳总结为多类型芯片检测调度优化问题。在同样总芯片数量的情况下，多类型芯片检测存在更多投放顺序，使遗传算法解空间变大，导致容易陷入局部最优解，因此需要通过适当策略减小解空间，保持遗传算法的适用性。本文先对多类型芯片输入顺序进行周期化处理，以达到降维目的，再使用问题二用到的基于元胞自动机简化的遗传算法对输入顺序进行优化。最后经过计算得出结论：A、B、C 型芯片分别为 60 片、50 片、50 片时，全部检测完至少用时 11920 s。对于更多类型芯片同时投放的情况，同样可以通过周期化输入顺序缩小解空间的形式，对上述模型进行推广求解。

针对问题五：考虑在 A、B 型芯片检测一段时间后突然加入 C 型芯片，初始 A、B 芯片的输入方法可使用问题二的模型求解，加入 C 型芯片后可使用问题三的模型求解。最终可求出完成检测时间为 11787 s。

本文的模型针对化学发光免疫分析仪芯片检测调度方案进行了研究，先明确了单一类型芯片输入检测时间最短的原则，然后基于元胞自动机简化的遗传算法，优化了两类芯片检测时的输入顺序以求得最小检测时间；接着将两类芯片检测推广至三类芯片甚至更多的情景，对该种情况下的模型求解进行了说明；最后简单研究了输入芯片数突然改变时使检测时间最短的调度方法，取得不错的结果。

关键词： 调度优化 芯片检测 遗传算法 元胞自动机

目录

全自动化学发光免疫分析仪芯片检测调度优化模型及算法研究	I
摘要	I
1 问题综述	1
1.1 问题背景	1
1.2 问题提出	1
1.3 资料条件	1
2 模型假设与符号说明	2
2.1 模型基本假设	2
2.2 符号说明	2
3 问题分析与模型建立	2
3.1 问题分析	2
3.1.1 情形一：单类型芯片检测调度问题	2
3.1.2 情形二：两类型芯片检测调度问题	3
3.1.3 情形三：多类型芯片检测调度问题	3
3.1.4 情形四：检测运行中途添加新类型芯片的调度问题	4
3.2 模型建立	4
3.2.1 单类型芯片检测调度优化问题的建模	4
3.2.2 两类型芯片检测调度优化问题的建模	6
3.2.3 多类型芯片检测调度优化问题的建模	10
3.2.4 检测运行中途添加新类型芯片的调度优化问题的建模	11
4 模型求解	11
4.1 单类型芯片检测调度优化问题的模型求解	11
4.2 两类型芯片检测调度优化问题的模型求解	12
4.3 多类型芯片检测调度优化问题的模型求解	12
4.4 检测运行中途添加新类型芯片调度优化问题的模型求解	13
5 模型评价与推广	14
5.1 模型的优点	14
5.2 模型的不足	14
5.3 模型的推广	14
参考文献	15
附 录	16
附录 A:模型求解的调度结果列表	16
附录 B:程序代码	28

1 问题综述

1.1 问题背景

随着医疗行业的快速发展,全自动化学发光免疫分析仪作为一种对人体体液样本进行检测的仪器,通过机器实现全自动化操作,具有效率高、精确度良好、省时省力等优点,已被国内外的各大医院和医疗机构广泛应用于临床。但是,不同的调度方式会影响化学发光免疫分析仪的运行检测效率,所以,根据实际的检测情况及检测时间要求来合理的优化调度显得尤为重要。

优化调度是指对于一组待检测的芯片,沿检测路径完成六道工序的处理,每道工序每次只能处理一个芯片,在保证各检测工序不发生冲突的前提下,使得这组芯片的检测总的完成时间最小。即在保证顺利完成检测任务的前提下,以使某代价最小,所谓的某代价最小也即优化目标。目前,针对此类调度优化问题,传统方法是基于规则或预定义的规则来处理突发事件,并编写相应算法进行求解^[1],比如线性规划、动态规划等算法,近些年由于高性能计算机的快速发展,还出现 Floyd 算法^[2],粒子群算法^[2],神经网络算法^[3]等。虽然这些算法对求解调度优化问题具有一定的合理性,但是个别情况可能会出现“局部最优”等情况,这也促使我们深入研究问题的特性,围绕问题导向针对性建立更加合理的模型。

综上,为了对化学发光免疫分析仪的调度优化问题进行求解,缩短检测用时,提高检测效率,结合约束条件和影响指标,建立行之有效的调度优化模型,是实现调度资源的合理配置,完善调度优化方法的关键思路。

1.2 问题提出

化学发光免疫分析仪的调度优化需要综合考虑不同类型芯片检测的耗时长短、分析仪各个工序工作的芯片数量上限,从以下五个问题入手对调度方法进行研究:

- (1) 问题 1:一组芯片中,只有 A 类型芯片或者 B 类型芯片,研究在单位时间(1 小时)内可以完成的检测芯片数量的最大值。
- (2) 问题 2: 一组芯片中, A、B 两种类型的芯片都存在的情况下,研究一定数量的两种芯片全部检测完毕的最小用时。
- (3) 问题 3: 一组芯片中, A、B、C 三种类型的芯片都存在的情况下,研究一定数量的三种芯片全部检测完毕的最小用时。
- (4) 问题 4:结合问题 2 和问题 3,将求解模型进行推广,首先推广至芯片数量为 m_i ,其第一次温育时间为 a_i 分钟、第二次温育时间为 b_i 分钟 ($i=1,2,3$) 的一般情况,根据推广模型进行求解。最后再将数学模型推广到 N 种类型芯片的情况,并举例验证。
- (5) 问题 5: 一组芯片中,在原有 A、B 两种类型的芯片正在检测的情况下,新到一定数量的 C 型芯片加入检测序列,求解全部检测完毕用时的最小值。

1.3 资料条件

- 正文图 2:该图直观的提供了化学发光免疫分析仪的工作流程,是模型建立的主要参考对象。
- 正文表 1:该图表提供了化学发光免疫分析仪的各工序所需时长,是模型约束条件的重要参考依据。

2 模型假设与符号说明

2.1 模型基本假设

真实的检测过程十分复杂，必须经过一定的简化才可以进行研究，因此作出如下假设：

- (1) 假设转盘在每次的转动对位过程中，无论如何转动、移动多少距离，所需时长是一样的；
- (2) 假设转盘在同一时刻可以同时进行多个转盘对位过程，且不会发生冲突；
- (3) 假设磁珠工位所需时长恒为 21 s；
- (4) 假设清洗工位所需时长恒为 325 s；

2.2 符号说明

表1 符号说明

符号	含义	单位
S_{ij}	第 i 个芯片是否在第 j 道工序	无
Y_i	第 i 道工序的标准所需时长	秒 (s)
X_{ij}	第 i 个芯片在第 j 道工序开始时刻	秒 (s)
T	总体用时时间	秒 (s)
N	芯片总数量	片
x_i	第 i 个位置上芯片的编码值	无
s_i	处于第 i 道工序的状态	无
l_{Ai}	A 芯片所在第 i 道工序的最大元胞数量	个
l_{Bi}	B 芯片所在第 i 道工序的最大元胞数量	个
$L_{\max}$	最大状态向量长度	无
S_{tot}^{ij}	第 j 片芯片在第 i 个单位 T 时间后状态编号	无
n_i	每个周期中第 i 类芯片的数量	无
$T_0(x)$	初始遗传算法适应性函数	秒 (s)
$T(x)$	元胞自动机简化后的遗传算法适应性函数	30 s

3 问题分析与模型建立

3.1 问题分析

3.1.1 情形一：单类型芯片检测调度问题

针对问题一，求解单类型芯片（A、B）在单位时间内完成芯片检测数量的最大值。以化学发光免疫分析仪检测芯片的工作流程为背景，结合各个检测工序的时长要求，在保证各工序之间不发生冲突的前提下，尽可能提高仪器的利用率，求解单位时间内检测数量的最大值，因此本文将问题一归纳为单类型芯片检测的调度优化问题。

对于单类型芯片检测调度优化问题，我们通过对该仪器的检测流程和各检测工序的所需时长进行分析，发现应当重点考虑两次温育过程和清洗过程。由于两次温育工序均在转盘的卡槽里进行，且耗时较长，所以尽可能保证转盘上的所有卡槽处于满载状态，使检测芯片在温育过程中不会出现断续或等待的情况，进而提高整体工作的效率，清洗盒也是同理。为了便于对工作流程的理解，对当前调度方案进行定性分析，使用工作状态示意图如图 1 所示。

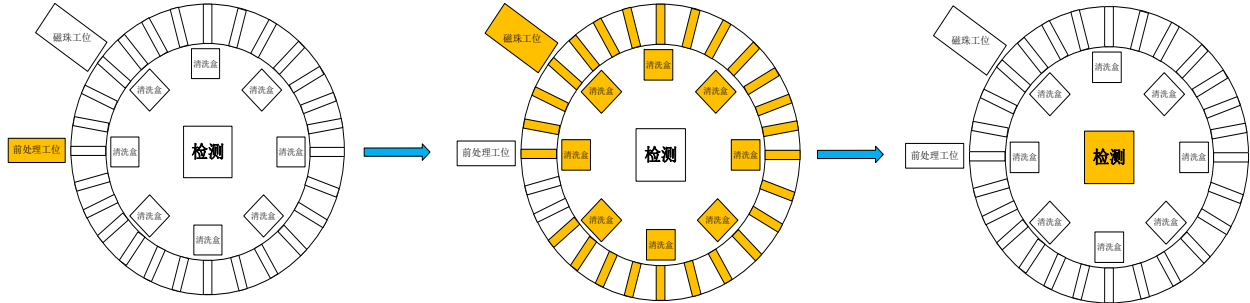


图1 工作状态示意图

在图 1 中，标黄部分表示该工位处于满载状态。当第一片芯片在前处理工位上进行前期处理，其他工序的工位尚处于空闲状态，然后转盘转动对位，前处理完毕后的芯片被推入转盘上的一个空着的卡槽中开始温育工序，一段时间后，转盘再次转动对位，下一片芯片从前处理工位进入空着的卡槽中开始温育工序，依次循环。经过一段时间，分析仪的磁珠工位、清洗盒和转盘上的多数卡槽均处于满载状态，此时整个分析仪工作状态接近饱和，只需要尽量保持工序满载状态，就可以使检测时间最短。

因此可以采用最短输入间隔原则，即：在输入每一片新芯片前，先模拟新芯片的检测全过程，若期间与其余芯片的检测发生冲突则延后输入，若不发生冲突则直接输入。

可以证明，采用最短输入间隔原则可以在保证各工序不发生冲突的前提下，尽可能的让所有工序处于满载状态，得到最短的检测时间。

3.1.2 情形二：两类型芯片检测调度问题

由 3.1.1 节可知，确定输入顺序后，采用最短输入时间原则可以求出在此情形下的最短检测时间。则给定 A、B 两类芯片数目时，对检测时间的优化相当于对输入顺序的优化。可采用遗传算法对输入顺序进行优化，以检测时间 $T_0(x)$ 为适应性函数，冲突条件为约束条件。考虑到模拟整个过程计算量很大，可以对时间离散化，采用元胞自动机对遗传算法的适应性函数进行适当简化，最终发现元胞自动机简化后的适应性函数 $T(x)$ 能够反应实际检测时间的大小关系，因此可以直接用于遗传算法进行优化，得到最优输入顺序 x_0 后，代入原适应性函数得到最小检测时间 $T_0(x_0)$ ，即最终得到的最小检测时间。

3.1.3 情形三：多类型芯片检测调度问题

问题三、四在问题二的基础上，均涉及到三类型及以上的芯片检测问题，在相同总芯片数的前提下，芯片类型的增多会使芯片输入顺序的可能性极大增多，即极大增加解空间的范围，这会给遗传算法带来巨大挑战。但是如果能够减小解空间规模至问题二的情况，则遗传算法依旧可以算出较好的结果，可以采用周期化输入顺序的方法，即将全部芯片的输入分为几个相同的周期进行，每个周期内芯片数量和输入顺序完全相同，显然周期分得越多则解空间越小，提高了计算量但是牺牲了很多输入方式，因此需要综合考虑精度和计算速度确定周期划分。由于在问题二中遗传算法取得了不错的效果，因此周期化输入顺序的目标是得到与问题二近似相同的解空间大小。

3.1.4 情形四：检测运行中途添加新类型芯片的调度问题

针对问题五，题设条件与之前不变，考虑在 A、B 两种类型芯片同时检测过程中，加入若干 C 类型芯片，求解全部芯片检测完成所用时间的最小值。所以本文将问题五归纳为检测运行中途添加新类型芯片的调度问题。

此类问题，可以理解为是定额数量的 A、B 型芯片在规定时间内先两类型芯片检测情形进行检测，检测一段时间后，向剩下的 A、B 芯片中加入 C 类型芯片，三类型芯片再重新考虑输入顺序，其实就是将问题二和问题三的情形按照时间节点进行划分，划分前后分别结合问题二模型和问题三模型求解，正好也是对问题二、问题三模型的应用。

3.2 模型建立

3.2.1 单类型芯片检测调度优化问题的建模

根据 3.1.1 节的分析，将问题一归纳为单类型芯片检测调度优化问题，针对这类问题的求解，本文提出最短输入时间间隔原则，可以使最终检测效率最高。最短输入时间间隔可以让化学发光免疫分析仪最大程度地工作在满载状态，提高仪器检测效率，保证全部芯片的检测所需时间最短。因此，根据最短输入时间间隔原则，将各种工序“冲突”情况转化为约束条件，求解最高效的芯片检测方案。最后通过对各工序加工时间节点进行统计，推断出分析仪在单位时间内的加工芯片数量。

首先，由分析可证明，在不冲突的前提下，每片芯片按最小间隔时间（30 s）输入检测时，检测效率最高。

假设在可以输入新芯片时，第一次故意不输入，即进行延迟操作，则后续过程分两种情况：

1° 在检测运行中无冲突发生或从冲突出现至冲突结束时新输入芯片未跟上，此时延时输入会造成时间浪费；

2° 在检测运行中发生冲突且后续芯片已经赶上，则此时新芯片由于阻塞延迟输入，使阻塞结束后，此时用时等于工序所需时长加延时时间。

因此可以说明，在分析仪按最小间隔时间原则输入芯片时，能够使其的检测时间最短。

求单位时间内最多完成的芯片检测数，可反过来考虑，即先计算检测 60 片芯片所需最短时间，再截取 1 h 的芯片检测数作为结果。

最小输入间隔时间原则，在模拟中实施方法如下：

Step1. 当前处理结束后总时间 $t = 150\text{s}$ 时立刻开始转盘转动对位，第一片芯片输入；

Step2. 每过 30 s 后预输入下一片新芯片；

Step3. 模拟此时分析仪上各工位运行情况，判断是否发生阻塞，若是则延迟 1 s 继续输入重复 Step3；若无阻塞，则正式输入新芯片；

Step4. 输入新芯片后判断芯片是否全部输入，若不是，则重复 Step2 操作，若是，则输出当前检测时间；

Step5. 运行完毕。

模型运行流程示意图如图 2 所示：

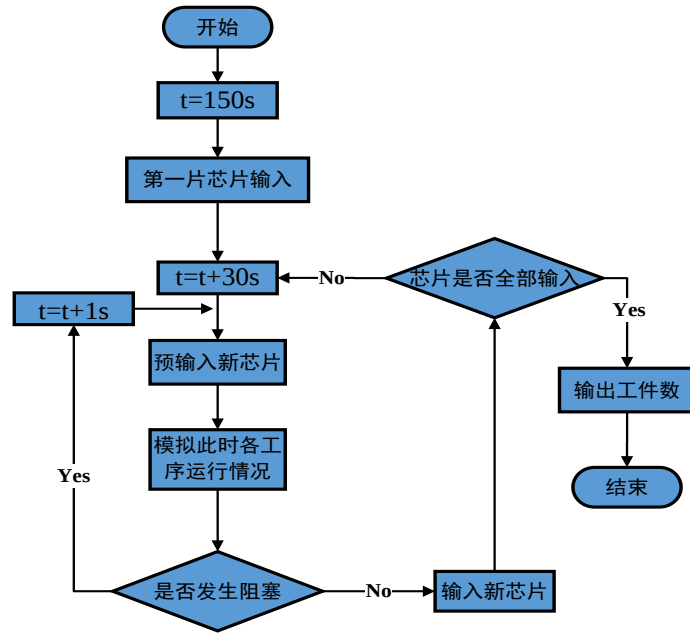


图2 模型运行流程示意图

模型约束条件如下。首先，根据芯片检测的工作流程，对各工序按照顺序进行编序号，如表 2 所示：

表2 各工序所需时长及序号

工序	前处理	转盘转动对位	第一次温育	转盘对位磁珠盒	磁珠工位	转盘转动对位	第二次温育	转盘对位清洗盒	清洗工位	检测盘对位	检测工位
所需时长	150 s	6 s	0~60min	8 s	21 s	8 s	0~30min	16 s	325 s	12 s	25 s
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

根据芯片检测的工作流程和各工序时间要求，得出公式（1）。

$$X_{i,j} + Y_i = X_{i,j+1} \quad (1)$$

在公式（1）中， $X_{i,j}$ 表示第 i 个芯片在第 j 道工序的开始时间， Y_i 表示第 i 道工序的工作所需时长。其次，根据题目要求，相邻两块芯片的输入时间不小于 30 s，则有：

$$X_{i,j+1} - X_{i,j} \geq 30 \quad (2)$$

为了便于统计处于每道工序上的芯片数量，引入状态矩阵 S ， S 中的每个元素 $S_{i,j}$ 表示第 i 个芯片是否在第 j 道工序上：

$$S_{i,j} = \begin{cases} 0, \text{第} i \text{号芯片不在} j \text{工序上} \\ 1, \text{第} i \text{号芯片在} j \text{工序上} \end{cases} \quad (3)$$

通过对题目中芯片检测流程的分析理解，总结以下四类可能会出现的情况：

- 1) 处于转盘上的芯片数不得超过转盘的温育工位数量上限 40 个；

- 2) 处于清洗工位的芯片不得超过清洗工位数量上限 8 个；
- 3) 处于磁珠工位的芯片不得超过磁珠工位数量上限 1 个；
- 4) 处于检测工位的芯片不得超过检测工位数量上限 1 个；

将以上约束条件转换为数学表达，目标函数为输入 60 个单类型芯片所需的时间：

$$\begin{aligned} & \min T \\ & s.t. \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N (S_{i,3} + S_{i,7}) \leq 40 \\ \sum_{i=1}^N S_{i,9} \leq 8 \\ \sum_{i=1}^N S_{i,5} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^N S_{i,11} \leq 1 \\ N \leq 60 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (4)$$

公式 (4) 中的角标 11 代表最后一道工序（即检测工序）的序号。值得注意的是，上式仅用于描述模拟时的约束条件，并不能通过线性规划求解，根据前文的证明，最小检测时间就是按照最小输入间隔原则模拟的检测时间。

3.2.2 两类型芯片检测调度优化问题的建模

根据 3.1.2 节的分析，对总检测时间的优化可以转化为对输入顺序的优化。可以以检测总时间为适应性函数，采用遗传算法对芯片输入顺序进行优化。遗传算法模型的实现过程如下：

Step1. 遗传算法模型输入

遗传算法是一种基于顺序表达的整数编码方式，染色体的长度等于 A 类型芯片和 B 类型芯片的总数，将全部芯片的加工顺序编码为一组 0-1 编码的字符串作为染色体，其中 A 类型芯片的编码设置为 0，B 类型芯片的编码设置为 1。经过编码后的染色体需满足公式 (5)。

$$\sum_{i=1}^{160} x_i = 80 \quad (5)$$

公式 (5) 中， x_i 代表第 i 个位置上芯片的编码值。

Step2. 计算适应度函数

在确定完 x 后，可以以最小时间间隔原则对全过程进行模拟，得到一个检测时间。根据前文证明，该检测时间为输入顺序一定的情况下最小检测时间。可以将这个时间作为模型的适应度函数：

$$f_{fitness} = T_0(x) \quad (6)$$

Step3. 遗传种群初始化

初始种群中的染色体随机产生，初始种群数量设置为 100，即种群中有 100 个染色体个体。种群初始化的结果如图所示：

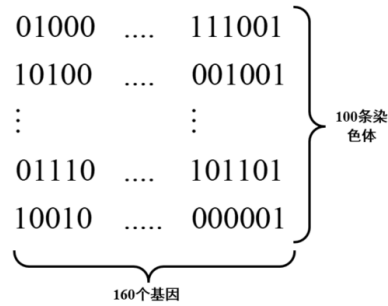


图3 种群初始化结果图

Step4. 复制、交叉、变异算子的选取

在复制过程中，运用轮盘赌法来选择染色体以形成下一代种群，较优的染色体被选择的概率较大，而较差的染色体被选择的概率则相对较小。但是毕竟染色体是随机进行选择的，所以有可能存在最好的染色体不会被选择的情况，如果发生那样的情况，则将最优的染色体去替代以被选择的染色体之一。在交叉的过程中，单点交叉（single-point crossover）作为交叉算子。单点交叉随机选择一个交叉点，在该点将两个父代个体切割，并交换切割点之后的基因片段。在变异的过程中，使用的是位变异（bit-wise mutation）作为变异算子。位变异会对个体的每个基因位进行翻转或随机生成新值。在所有的操作中，确保下代的种群规模仍保持和初始种群规模一致。

Step5. 终止条件

遗传算法的终止条件有两类常见条件：

第一类：采用最大遗传迭代数的方法，一般设置为 50 代或者 100 代，此时可以得出最优解。

第二类：根据个体的差异来判断，同规格计算种群中基因的多样性测度，用所有的基因相似度来进行控制。

遗传算法流程如图（4）所示。

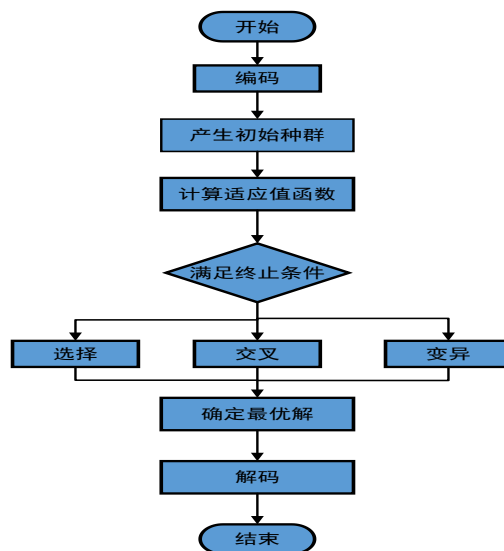


图4 遗传算法流程图

本文会综合考量两类终止方法，在满足基因的多样性相似度的情况下，会提前停止迭代，并计算出对应的适度值，输出最优解；如果不满足基因的多样性相似度的情况下，将一直迭代到最大迭代次数结束，计算适度值并输出最优解。

适应性函数为最小输入间隔原则进行输入的总检测时间，则会存在一个问题：遗传算法要求适应性函数计算速度较快，然而按照最短间隔时间原则进行工况模拟程序计算量巨大，并且还会随着芯片数量的增加整体计算量成指数增长。本文采用元胞自动机模型将时间离散化，来进一步提升遗传算法的计算效率。元胞自动机（Cellular Automaton，简称 CA）是一种离散的计算模型，由一组规则相同、相互作用的“元胞”组成。每个元胞可以处于不同的状态，并根据预定义的局部规则与其邻近元胞进行交互。通过迭代更新每个元胞的状态，整个系统的演化可以被模拟和观察。

根据观察，我们以 30 s 为一个时间单位，对芯片 A 和芯片 B 的整体工序进行了离散化表示。首先对 11 步标准工序进行了合并处理，经过合并后的工序共分为五个状态。

表3 合并后的 5 种工序类型

工序序号	1	2	3	4	5
工序名称	第一次温育	磁珠加工	第二次温育	清洗	检测工位检测
所需时间	$a_i+6\text{ s}$	40 s	$b_i+16\text{ s}$	350 s	25 s
对应元胞数	$a_i/30\text{ s}$	1	$b_i/30\text{ s}$	11	1

合并工序时间后，芯片 A 和芯片 B 工序的元胞结构示意图如下：

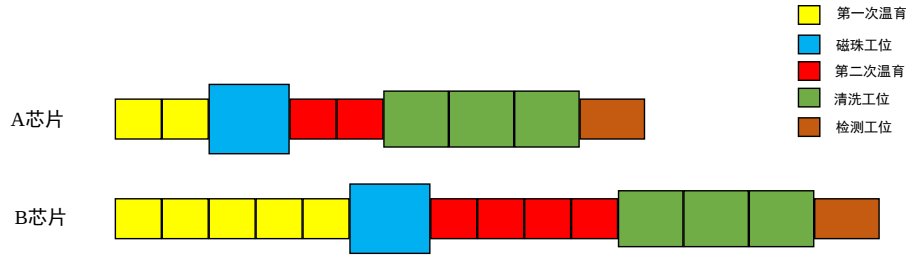


图5 芯片 A 和芯片 B 的加工示意图

根据新的工序流程安排，针对不同类型的芯片分别定义了状态向量 S_A 和 S_B 。

$$S_A = [s_1^0, \dots, s_1^{l_{A1}}, s_2^0, \dots, s_2^{l_{A2}}, s_3^0, \dots, s_3^{l_{A3}}, s_4^0, \dots, s_4^{l_{A4}}, s_5^0, \dots, s_5^{l_{A5}}] \quad (7)$$

$$S_B = [s_1^0, \dots, s_1^{l_{B1}}, s_2^0, \dots, s_2^{l_{B2}}, s_3^0, \dots, s_3^{l_{B3}}, s_4^0, \dots, s_4^{l_{B4}}, s_5^0, \dots, s_5^{l_{B5}}] \quad (8)$$

其中， s_i ($1 < i < 5$) 分别代表处于第 i 道工序的状态，其中 $s_i = i$ ， l_{Ai} 和 l_{Bi} 分别表示 A 芯片和 B 芯片所在第 i 道工序的最大元胞数量。由于不同类型芯片的第一次温育和第二次温育所需时间不同，导致 S_A 和 S_B 的维度不同，无法直接进行拼接。故在维度较小的向量后补充 ΔL 个 0，使得二者的维度一致，完成后续的矩阵运算， ΔL 的表达式如下：

$$\Delta L = L_{\max} - \sum_{i=1}^5 L_{Ai} \quad (9)$$

式 (9) 中的 $L_{\max}$ 为最大状态向量长度。由芯片的状态向量 S_A 和 S_B 组成的状态矩阵称为标准工况矩阵，记作 S_{cell} ：

$$S_{cell} = \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

根据不同的芯片的加工流程，定义了 A、B 芯片在 T 时刻的工况向量 S_{AW} 和 S_{BW} ，其中 S_{AW} 和 S_{BW} 均为 0-1 向量，表示每类芯片在每个 T 时刻的状态分布。

$$S_{AW} = [S_{AW_1} \quad S_{AW_2} \quad \cdots \quad S_{AW_n}] \quad (11)$$

$$S_{AW_i} = \begin{cases} 0 & \text{第 } i \text{ 个芯片不在检测} \\ 1 & \text{第 } i \text{ 个芯片正在检测} \end{cases} \quad (12)$$

若 $S_{AW_i} = 1$ 说明 T 时刻存在 A 芯片已经开始加工了 i 个单位时间。同理，结合工况向量，得出了当前时刻工况矩阵 S_w ：

$$S_w = \begin{bmatrix} S_{AW} \\ S_{BW} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

根据和标准工况矩阵 S_{cell} 和当前工况矩阵 S_w ，求得在 T 时刻的实时工况状态矩阵 S_{tot} ，为式 (14) 所示：

$$S_{tot} = S_w \cdot S_{cell} \quad (14)$$

S_{tot}^{ij} 表示第 j 片芯片在第 i 个单位 T 时间后状态编号，比如 $S_{tot}^{ij} = 2$ 说明第 j 片芯片在第 i 个单位 T 时间后处于磁珠工位。

S_{tot}^{ij} 方便对工序进行“冲突”检测，根据问题一中提出四种的“冲突”原则，其表示式 (15) 为：

$$\begin{cases} \text{sum}(S_{tot} == 1) + \text{sum}(S_{tot} == 3) \leq 40 \\ \text{sum}(S_{tot} == 4) \leq 8 \\ \text{sum}(S_{tot} == 2) \leq 1 \\ \text{sum}(S_{tot} == 5) \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

至此，对整个流程的模拟转化成了对元胞自动机的流程模拟，其检测时间从 $T_0(x)$ 变为了 $T(x)$ 。由于在表 3 中对时间的离散化基本上比较贴合，因此可以认为从 $T_0(x)$ 到 $T(x)$ 过程中误差不大，为了验证这一点，列举了一些简单情况如下表所示：

表4 适应性函数 $T_0(x)$ 和 $T(x)$ 的对比，时间单位为 s

输入顺序	$T_0(x)$	$T(x) * 30$
先 A 后 B	12483	12385
先 B 后 A	12568	12475
AB	12495	12355
BA	12465	12325
AAB（剩余的 B 最后加入）	12774	12505
BBA（剩余的 B 最后加入）	11983	11815

从表 4 可知, $T_0(x)$ 和 $T(x)$ 虽然在数值上有差异, 但是大小关系是一致的, 比如说分别看两种适应函数都可以看出, 表中最好的输入顺序为 BBA, 最差的输入顺序为 AAB, 两个适应函数的结果是一致的。

因此求解的基本思路为: 使用 $T(x)$ 作为适应性函数放到遗传算法中进行计算, 得到最优输入顺序 x_0 , 然后将该顺序反代会原适应性函数中得到实际最小检测时间 $T_0(x_0)$ 。

3.2.3 多类型芯片检测调度优化问题的建模

随着芯片类型与数量的增加, 芯片输入顺序的总数就会大大增多, 即解空间的规模会成指数倍增加。对此, 本文采用周期化解空间的思想来减小解空间规模。在理论上, 对整段输入所分配的周期越少, 每个周期中的解空间数量会越多。并且在每个周期中, 会按照每类芯片的个数 m_i 对该周期内的芯片数进行等比例划分。

首先对一般情况进行建模, 假设有 n 类型芯片, 每种芯片数量 $m_i (1 \leq i \leq n)$ 片, P 表示多类型芯片的排列组合情况, 例如, 针对问题二中的 A、B 两种类型芯片的全排列组合为:

$$P_{A,B} = C_{160}^{80} \cdot C_{80}^{80} \quad (16)$$

根据公式 (16), 问题三中的 A、B、C 三种类型芯片的全排列组合为:

$$P_{A,B} < P_{A,B,C} = C_{160}^{50} \cdot C_{110}^{50} \cdot C_{60}^{60} \quad (17)$$

若将问题三中的输入顺序分成两个周期, 则此时解空间的全排列为 $P'_{A,B,C} = C_{80}^{25} \cdot C_{55}^{25} \cdot C_{30}^{30} < P_{A,B}$, 此时已达到减小解空间规模的目的, 可以直接展开计算。

值得注意的是, 为了保证周期完成后所有芯片全部处理完, 需要保证每个周期内的芯片数 n_i 满足如下关系:

$$m_1 : m_2 : \dots : m_i = n_1 : n_2 : \dots : n_i \quad (18)$$

对于问题三, 则可以将原本的 160 位输入减小到 80 位输入, 解向量 x 为元素为 -1、0、1 的矩阵, 其中 -1 代表 A 类芯片, 0 代表 B 类芯片, 1 代表 C 类芯片, 则周期减半后, 每个周期内存在 30 个 A, 25 个 B, 25 个 C, 则有如下关系:

$$\begin{aligned} & \min T(x) \\ & s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^N x_i \leq -5 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 \leq 55 \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

采用遗传算法求解即可。

考虑更多芯片数, 第一步要考虑周期的长度, 即寻找一个合适的周期数 N , 使得 $P'_{A,B,\dots,L}$ 的值在一个合适的范围, 让遗传算法有能力得到最优解, 再开展计算, 此时约束条件也有了一定的增加, 可以参考三种类型的情况。进行遗传算法求解后, 再将周期扩充 N 倍得到最小检测时间。

3.2.4 检测运行中途添加新类型芯片的调度优化问题的建模

根据 3.1.3 节的分析,可以将问题五按照时间节点上的划分,按照时间节点的前后,将问题五分成两个子模块,子模块一直接套用问题二的数学模型进行求解,子模块二直接套用问题三的数学模型进行求解,最后将求解的结果进行优化和汇总,得出问题五的结论。

4 模型求解

4.1 单类型芯片检测调度优化问题的模型求解

根据最小输入间隔原则,直接分别对 60 片 A、B 型芯片进行模拟,结果在附录 1 中,甘特图的可视化如图 6 所示。在图 6 中,A 型芯片第 55 片芯片检测完毕需要 3601 s 才能完成,所以 1 小时内最多可以完成 54 片 A 类型芯片的检测;检测 1 片 B 型芯片至少需要 4171 s,所以 1 小时内无法完成 1 片 B 类型芯片的检测,求解出来的详细结果分别在附表 1 和附表 2 中。

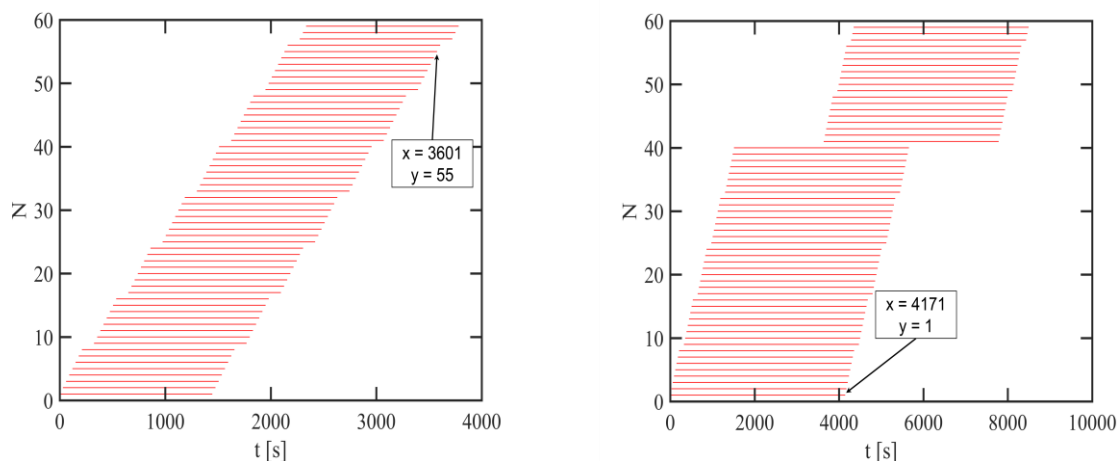


图6 单类型芯片检测甘特图

从图 6 中得出结论,对于化学发光免疫分析仪而言,如果每 30 s 输入一片新芯片,则每连续输入 9 片芯片将会在清洁工位出现一次小冲突,每连续输入 41 片芯片将会在转盘上的卡槽出现一次大冲突,因此,当每 8 个芯片输入后,下一片芯片的输入必须小延迟才能保证不会出现冲突,且当每 40 个芯片输入后,下一片芯片的输入必须大延迟才能保证不会出现冲突。

4.2 两类型芯片检测调度优化问题的模型求解

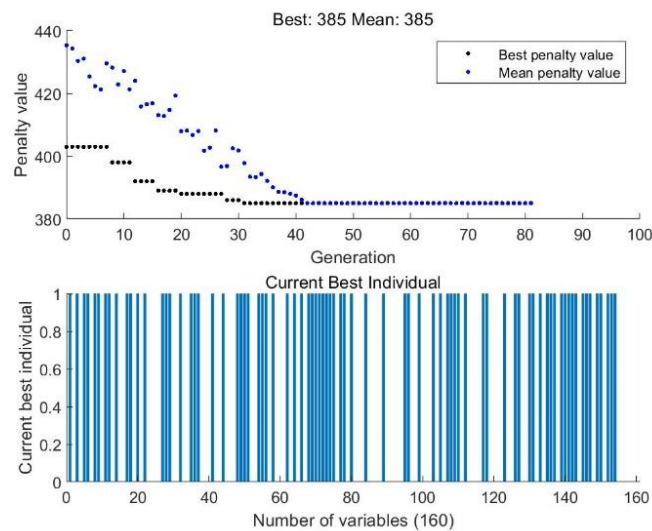


图7 遗传算法迭代过程图

遗传算法迭代过程如图 7 所示：种群进化到 41 代时出现了最优值，进化到第 82 代时算法推出，得到的最好优化结果为 385，即对应检测估计时间为 $385 \times 30 \text{ s} = 11550 \text{ s}$ ，这是元胞自动机模型的结果。将该排列代入初始模拟程序中进行计算，可以得到该排列实际检测时间，为 11824 s。求解出来的详细结果在附表 3 中。

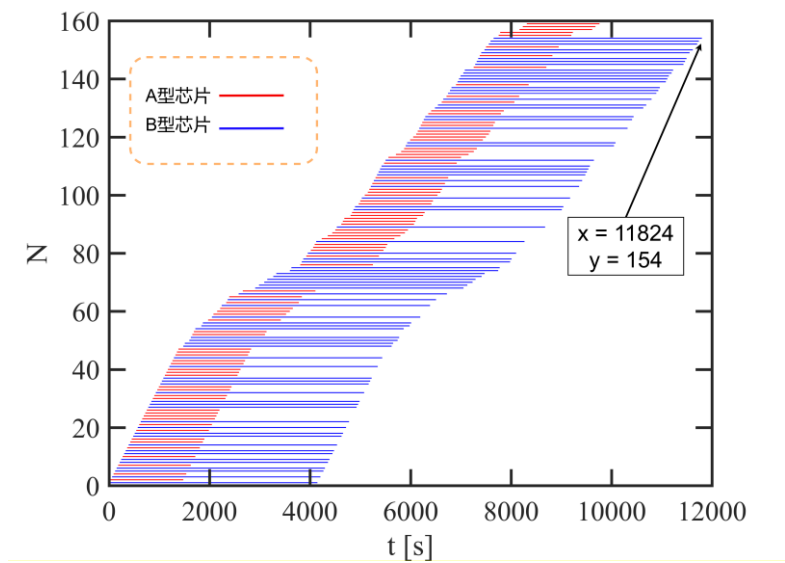


图8 A、B 两类型芯片检测甘特图

由图 8 可以看出清楚的看出 A、B 两类型芯片检测过程各时段长短。

4.3 多类型芯片检测调度优化问题的模型求解

根据模型求解为：当 A 型芯片 60 片、B 型芯片 50 片、C 型芯片 50 片共同检测需要花费 11920 s。

求解出来的详细结果在附表 4 中。

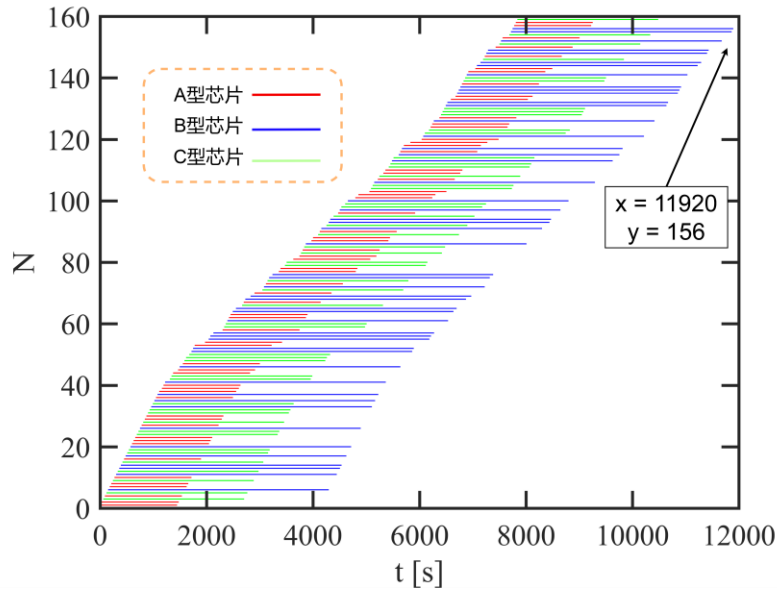


图9 A、B、C 三类型芯片检测甘特图

由图 9 可以看出清楚的看出 A、B、C 三类型芯片检测过程各时段长短。

4.4 检测运行中途添加新类型芯片调度优化问题的模型求解

根据模型求解为：当 A 型芯片 60 片、B 型芯片 70 片，运行 30 分钟后，新到 C 型芯片 20 片，全部检测需要花费 11787 s。

求解出来的详细结果在附表 5 中。

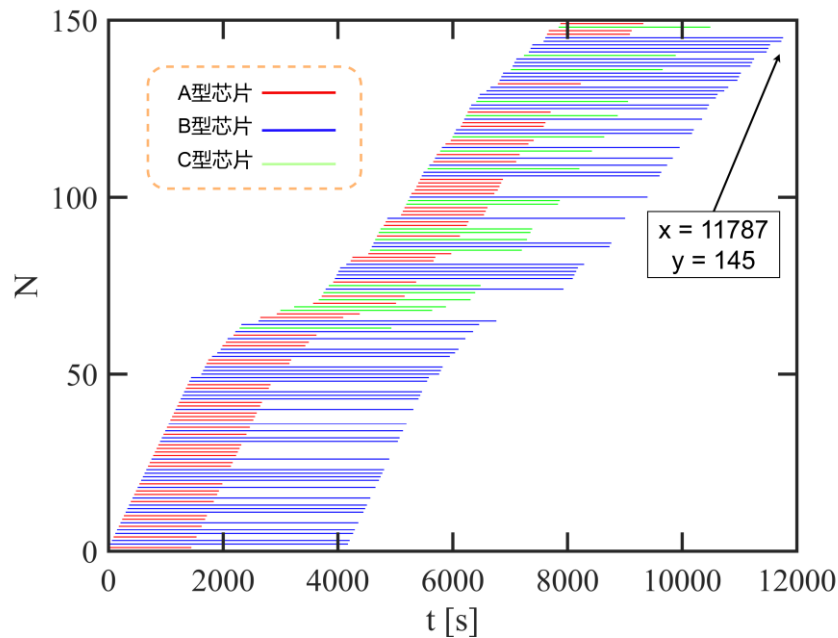


图10 先 A、B，后 C 三类型芯片检测甘特图

由图 10 可以看出清楚的看出先 A、B 型芯片检测 30 分钟后，C 类型芯片加入检测过程各时段长短。

5 模型评价与推广

5.1 模型的优点

- (1) 模型充分结合实际，建模思路清洗，简单易懂，算法易于实现；
- (2) 模型充分考虑分析仪在运行中会产生的各类“冲突”，设置约束条件，最后也引入了时间利用率评价指标，更准确评估分析机整体的工作效率；
- (3) 本文使用甘特图对加工流程进行可视化展示，并且编写评价程序对模型进行测试评估，进一步增强了检测结果的可信度，保证了检测结果的准确性；

5.2 模型的不足

- (1) 在模型中全部进行了线性关系的假设，但在某些工序流程中，存在着非线性的影响因素，忽略非线性关系的影响可能导致模型的准确性和可靠性降低；
- (2) 为了建立数学模型，对实际工序运作中可能遇到的问题进行简化处理。这可能导致模型对真实情况的过度简化和忽略某些重要因素，从而影响模型的准确性和可靠性；

5.3 模型的推广

全自动化学发光免疫分析仪是检测人体体液芯片的有效方法之一，合理的优化调度方式可以大大缩短一组芯片的检测时长。本文模型从提高检测效率出发，贴切实际，能合理解决提出的问题，具有实用性强，算法效率高等特点，该模型的思想在其他优化调度问题上也可以借鉴使用。为使得模型进一步优化，可从分析仪的工作流程等进行分析，加以深化和完善。

参考文献

- [1] Hu H , Jia X , He Q ,et al.Deep reinforcement learning based AGVs real-time scheduling with mixed rule for flexible shop floor in industry 4.0[J].Computers & Industrial Engineering, 2020, 149:106749.DOI:10.1016/j.cie.2020.106749.
- [2] 卓金武.MATLAB 在数学建模中的应用.第 2 版[M].北京航空航天大学出版社,2014.
- [3] 王小川.MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M].北京航空航天大学出版社,2013.
- [4] 程辉.设计流水线的建模,平衡及调度研究[J].上海交通大学, 2013.

附 录

附录 A:模型求解的调度结果列表

以下为本文各问题的模型求解结果列表。

附表 1:

问题 1.A 型芯片的调度结果 (单位: s)

芯片序号	进仓时间	第一次温育起始时间	磁珠加样起始时间	第二次温育起始时间	清洗起始时间	检测起始时间	检测结束时间
1	0	156	764	793	1109	1446	1471
2	30	186	794	823	1139	1476	1501
3	60	216	824	853	1169	1506	1531
4	90	246	854	883	1199	1536	1561
5	120	276	884	913	1229	1566	1591
6	150	306	914	943	1259	1596	1621
7	180	336	944	973	1289	1626	1651
8	210	366	974	1003	1319	1656	1681
9	325	481	1089	1118	1434	1771	1796
10	355	511	1119	1148	1464	1801	1826
11	385	541	1149	1178	1494	1831	1856
12	415	571	1179	1208	1524	1861	1886
13	445	601	1209	1238	1554	1891	1916
14	475	631	1239	1268	1584	1921	1946
15	505	661	1269	1298	1614	1951	1976
16	535	691	1299	1328	1644	1981	2006
17	650	806	1414	1443	1759	2096	2121
18	680	836	1444	1473	1789	2126	2151
19	710	866	1474	1503	1819	2156	2181
20	740	896	1504	1533	1849	2186	2211
21	770	926	1534	1563	1879	2216	2241
22	800	956	1564	1593	1909	2246	2271
23	830	986	1594	1623	1939	2276	2301
24	860	1016	1624	1653	1969	2306	2331
25	975	1131	1739	1768	2084	2421	2446
26	1005	1161	1769	1798	2114	2451	2476
27	1035	1191	1799	1828	2144	2481	2506
28	1065	1221	1829	1858	2174	2511	2536
29	1095	1251	1859	1888	2204	2541	2566
30	1125	1281	1889	1918	2234	2571	2596
31	1155	1311	1919	1948	2264	2601	2626
32	1185	1341	1949	1978	2294	2631	2656
33	1300	1456	2064	2093	2409	2746	2771
34	1330	1486	2094	2123	2439	2776	2801
35	1360	1516	2124	2153	2469	2806	2831
36	1390	1546	2154	2183	2499	2836	2861
37	1420	1576	2184	2213	2529	2866	2891

38	1450	1606	2214	2243	2559	2896	2921
39	1480	1636	2244	2273	2589	2926	2951
40	1510	1666	2274	2303	2619	2956	2981
41	1625	1781	2389	2418	2734	3071	3096
42	1655	1811	2419	2448	2764	3101	3126
43	1685	1841	2449	2478	2794	3131	3156
44	1715	1871	2479	2508	2824	3161	3186
45	1745	1901	2509	2538	2854	3191	3216
46	1775	1931	2539	2568	2884	3221	3246
47	1805	1961	2569	2598	2914	3251	3276
48	1835	1991	2599	2628	2944	3281	3306
49	1950	2106	2714	2743	3059	3396	3421
50	1980	2136	2744	2773	3089	3426	3451
51	2010	2166	2774	2803	3119	3456	3481
52	2040	2196	2804	2833	3149	3486	3511
53	2070	2226	2834	2863	3179	3516	3541
54	2100	2256	2864	2893	3209	3546	3571

附表 2:

问题 1.B 型芯片的调度结果 (单位: s)

芯片序号	进仓时间	第一次温育起始时间	磁珠加样起始时间	第二次温育起始时间	清洗起始时间	检测起始时间	检测结束时间
1	0	156	2564	2593	3809	4146	4171

附表 3:

问题 2.A、B 型芯片的调度结果 (单位: s)

芯片序号	芯片类型 (A 型为 1, B 型为 2)	进仓时间	第一次温育起始时间	磁珠加样起始时间	第二次温育起始时间	清洗起始时间	检测起始时间	检测结束时间
1	2	0	156	2564	2593	3809	4146	4171
2	1	30	186	794	823	1139	1476	1501
3	2	60	216	2624	2653	3869	4206	4231
4	1	90	246	854	883	1199	1536	1561
5	2	120	276	2684	2713	3929	4266	4291
6	2	150	306	2714	2743	3959	4296	4321
7	1	180	336	944	973	1289	1626	1651
8	2	210	366	2774	2803	4019	4356	4381
9	2	240	396	2804	2833	4049	4386	4411
10	1	270	426	1034	1063	1379	1716	1741
11	2	300	456	2864	2893	4109	4446	4471
12	2	330	486	2894	2923	4139	4476	4501
13	1	360	516	1124	1153	1469	1806	1831
14	2	390	546	2954	2983	4199	4536	4561
15	1	420	576	1184	1213	1529	1866	1891
16	1	450	606	1214	1243	1559	1896	1921

17	2	480	636	3044	3073	4289	4626	4651
18	2	510	666	3074	3103	4319	4656	4681
19	1	540	696	1304	1333	1649	1986	2011
20	2	570	726	3134	3163	4379	4716	4741
21	1	600	756	1364	1393	1709	2046	2071
22	2	630	786	3194	3223	4439	4776	4801
23	1	660	816	1424	1453	1769	2106	2131
24	1	690	846	1454	1483	1799	2136	2161
25	1	720	876	1484	1513	1829	2166	2191
26	1	750	906	1514	1543	1859	2196	2221
27	2	780	936	3344	3373	4589	4926	4951
28	2	810	966	3374	3403	4619	4956	4981
29	2	840	996	3404	3433	4649	4986	5011
30	1	870	1026	1634	1663	1979	2316	2341
31	1	900	1056	1664	1693	2009	2346	2371
32	2	930	1086	3494	3523	4739	5076	5101
33	1	960	1116	1724	1753	2069	2406	2431
34	1	990	1146	1754	1783	2099	2436	2461
35	2	1020	1176	3584	3613	4829	5166	5191
36	2	1050	1206	3614	3643	4859	5196	5221
37	2	1080	1236	3644	3673	4889	5226	5251
38	1	1110	1266	1874	1903	2219	2556	2581
39	1	1140	1296	1904	1933	2249	2586	2611
40	1	1170	1326	1934	1963	2279	2616	2641
41	2	1200	1356	3764	3793	5009	5346	5371
42	1	1230	1386	1994	2023	2339	2676	2701
43	1	1260	1416	2024	2053	2369	2706	2731
44	2	1290	1446	3854	3883	5099	5436	5461
45	1	1320	1476	2084	2113	2429	2766	2791
46	1	1350	1506	2114	2143	2459	2796	2821
47	1	1380	1536	2144	2173	2489	2826	2851
48	2	1477	1633	4041	4070	5286	5623	5648
49	2	1507	1663	4071	4100	5316	5653	5678
50	2	1597	1753	4161	4190	5406	5743	5768
51	2	1627	1783	4191	4220	5436	5773	5798
52	1	1657	1813	2421	2450	2766	3103	3128
53	1	1687	1843	2451	2480	2796	3133	3158
54	2	1717	1873	4281	4310	5526	5863	5888
55	2	1836	1992	4400	4429	5645	5982	6007
56	2	1866	2022	4430	4459	5675	6012	6037
57	1	1971	2127	2735	2764	3080	3417	3442
58	2	2047	2203	4611	4640	5856	6193	6218
59	1	2077	2233	2841	2870	3186	3523	3548
60	1	2151	2307	2915	2944	3260	3597	3622
61	1	2211	2367	2975	3004	3320	3657	3682
62	2	2241	2397	4805	4834	6050	6387	6412
63	1	2331	2487	3095	3124	3440	3777	3802
64	2	2361	2517	4925	4954	6170	6507	6532

65	1	2391	2547	3155	3184	3500	3837	3862
66	2	2578	2734	5142	5171	6387	6724	6749
67	1	2661	2817	3425	3454	3770	4107	4132
68	2	2908	3064	5472	5501	6717	7054	7079
69	2	2984	3140	5548	5577	6793	7130	7155
70	2	3088	3244	5652	5681	6897	7234	7259
71	2	3148	3304	5712	5741	6957	7294	7319
72	2	3268	3424	5832	5861	7077	7414	7439
73	2	3328	3484	5892	5921	7137	7474	7499
74	2	3598	3754	6162	6191	7407	7744	7769
75	2	3628	3784	6192	6221	7437	7774	7799
76	1	3805	3961	4569	4598	4914	5251	5276
77	2	3835	3991	6399	6428	7644	7981	8006
78	2	3865	4021	6429	6458	7674	8011	8036
79	1	3925	4081	4689	4718	5034	5371	5396
80	2	3955	4111	6519	6548	7764	8101	8126
81	1	4015	4171	4779	4808	5124	5461	5486
82	1	4062	4218	4826	4855	5171	5508	5533
83	1	4092	4248	4856	4885	5201	5538	5563
84	2	4122	4278	6686	6715	7931	8268	8293
85	1	4232	4388	4996	5025	5341	5678	5703
86	1	4352	4508	5116	5145	5461	5798	5823
87	1	4442	4598	5206	5235	5551	5888	5913
88	1	4502	4658	5266	5295	5611	5948	5973
89	2	4532	4688	7096	7125	8341	8678	8703
90	1	4622	4778	5386	5415	5731	6068	6093
91	1	4652	4808	5416	5445	5761	6098	6123
92	1	4682	4838	5446	5475	5791	6128	6153
93	1	4805	4961	5569	5598	5914	6251	6276
94	1	4835	4991	5599	5628	5944	6281	6306
95	2	4865	5021	7429	7458	8674	9011	9036
96	2	4895	5051	7459	7488	8704	9041	9066
97	1	4969	5125	5733	5762	6078	6415	6440
98	1	4999	5155	5763	5792	6108	6445	6470
99	2	5029	5185	7593	7622	8838	9175	9200
100	1	5089	5245	5853	5882	6198	6535	6560
101	1	5149	5305	5913	5942	6258	6595	6620
102	1	5179	5335	5943	5972	6288	6625	6650
103	2	5209	5365	7773	7802	9018	9355	9380
104	1	5239	5395	6003	6032	6348	6685	6710
105	2	5269	5425	7833	7862	9078	9415	9440
106	1	5303	5459	6067	6096	6412	6749	6774
107	2	5333	5489	7897	7926	9142	9479	9504
108	2	5363	5519	7927	7956	9172	9509	9534
109	2	5393	5549	7957	7986	9202	9539	9564
110	2	5423	5579	7987	8016	9232	9569	9594
111	1	5473	5629	6237	6266	6582	6919	6944
112	2	5503	5659	8067	8096	9312	9649	9674

113	1	5559	5715	6323	6352	6668	7005	7030
114	1	5709	5865	6473	6502	6818	7155	7180
115	1	5813	5969	6577	6606	6922	7259	7284
116	1	5873	6029	6637	6666	6982	7319	7344
117	2	5903	6059	8467	8496	9712	10049	10074
118	2	5933	6089	8497	8526	9742	10079	10104
119	1	5993	6149	6757	6786	7102	7439	7464
120	1	6053	6209	6817	6846	7162	7499	7524
121	1	6113	6269	6877	6906	7222	7559	7584
122	1	6143	6299	6907	6936	7252	7589	7614
123	2	6173	6329	8737	8766	9982	10319	10344
124	1	6203	6359	6967	6996	7312	7649	7674
125	1	6233	6389	6997	7026	7342	7679	7704
126	2	6263	6419	8827	8856	10072	10409	10434
127	2	6293	6449	8857	8886	10102	10439	10464
128	1	6353	6509	7117	7146	7462	7799	7824
129	1	6410	6566	7174	7203	7519	7856	7881
130	2	6486	6642	9050	9079	10295	10632	10657
131	2	6545	6701	9109	9138	10354	10691	10716
132	1	6621	6777	7385	7414	7730	8067	8092
133	2	6651	6807	9215	9244	10460	10797	10822
134	1	6716	6872	7480	7509	7825	8162	8187
135	2	6746	6902	9310	9339	10555	10892	10917
136	2	6785	6941	9349	9378	10594	10931	10956
137	2	6815	6971	9379	9408	10624	10961	10986
138	1	6905	7061	7669	7698	8014	8351	8376
139	2	6935	7091	9499	9528	10744	11081	11106
140	2	6965	7121	9529	9558	10774	11111	11136
141	2	6995	7151	9559	9588	10804	11141	11166
142	2	7050	7206	9614	9643	10859	11196	11221
143	2	7080	7236	9644	9673	10889	11226	11251
144	1	7257	7413	8021	8050	8366	8703	8728
145	2	7287	7443	9851	9880	11096	11433	11458
146	2	7317	7473	9881	9910	11126	11463	11488
147	2	7347	7503	9911	9940	11156	11493	11518
148	1	7377	7533	8141	8170	8486	8823	8848
149	2	7407	7563	9971	10000	11216	11553	11578
150	2	7472	7628	10036	10065	11281	11618	11643
151	1	7502	7658	8266	8295	8611	8948	8973
152	2	7558	7714	10122	10151	11367	11704	11729
153	2	7592	7748	10156	10185	11401	11738	11763
154	2	7653	7809	10217	10246	11462	11799	11824
155	1	7754	7910	8518	8547	8863	9200	9225
156	1	7784	7940	8548	8577	8893	9230	9255
157	1	8169	8325	8933	8962	9278	9615	9640
158	1	8234	8390	8998	9027	9343	9680	9705
159	1	8314	8470	9078	9107	9423	9760	9785
160	1	8472	8628	9236	9265	9581	9918	9943

问题 3.A、B、C 型芯片的调度结果 (单位: s)

芯片序号	芯片类型 (A 型为 1, B 型为 2, C 型为 3)	进仓 时间	第一次 温育起 始时间	磁珠加 样起始 时间	第二次温 育起始时 间	清洗起 始时间	检测起 始时间	检测结 束时间
1	1	0	156	764	793	1109	1446	1471
2	1	30	186	794	823	1139	1476	1501
3	3	60	216	1724	1753	2369	2706	2731
4	1	90	246	854	883	1199	1536	1561
5	3	120	276	1784	1813	2429	2766	2791
6	2	150	306	2714	2743	3959	4296	4321
7	1	180	336	944	973	1289	1626	1651
8	1	210	366	974	1003	1319	1656	1681
9	3	240	396	1904	1933	2549	2886	2911
10	1	270	426	1034	1063	1379	1716	1741
11	2	300	456	2864	2893	4109	4446	4471
12	3	330	486	1994	2023	2639	2976	3001
13	2	360	516	2924	2953	4169	4506	4531
14	2	390	546	2954	2983	4199	4536	4561
15	3	420	576	2084	2113	2729	3066	3091
16	1	450	606	1214	1243	1559	1896	1921
17	2	480	636	3044	3073	4289	4626	4651
18	3	510	666	2174	2203	2819	3156	3181
19	3	540	696	2204	2233	2849	3186	3211
20	2	570	726	3134	3163	4379	4716	4741
21	1	600	756	1364	1393	1709	2046	2071
22	1	630	786	1394	1423	1739	2076	2101
23	1	660	816	1424	1453	1769	2106	2131
24	3	690	846	2354	2383	2999	3336	3361
25	3	720	876	2384	2413	3029	3366	3391
26	2	750	906	3314	3343	4559	4896	4921
27	1	780	936	1544	1573	1889	2226	2251
28	3	810	966	2474	2503	3119	3456	3481
29	1	840	996	1604	1633	1949	2286	2311
30	1	870	1026	1634	1663	1979	2316	2341
31	3	900	1056	2564	2593	3209	3546	3571
32	3	930	1086	2594	2623	3239	3576	3601
33	2	960	1116	3524	3553	4769	5106	5131
34	3	990	1146	2654	2683	3299	3636	3661
35	2	1020	1176	3584	3613	4829	5166	5191
36	1	1050	1206	1814	1843	2159	2496	2521
37	2	1080	1236	3644	3673	4889	5226	5251
38	1	1110	1266	1874	1903	2219	2556	2581

39	1	1161	1317	1925	1954	2270	2607	2632
40	1	1191	1347	1955	1984	2300	2637	2662
41	2	1221	1377	3785	3814	5030	5367	5392
42	3	1311	1467	2975	3004	3620	3957	3982
43	3	1341	1497	3005	3034	3650	3987	4012
44	1	1371	1527	2135	2164	2480	2817	2842
45	1	1465	1621	2229	2258	2574	2911	2936
46	2	1495	1651	4059	4088	5304	5641	5666
47	1	1555	1711	2319	2348	2664	3001	3026
48	3	1585	1741	3249	3278	3894	4231	4256
49	3	1615	1771	3279	3308	3924	4261	4286
50	3	1675	1831	3339	3368	3984	4321	4346
51	2	1717	1873	4281	4310	5526	5863	5888
52	2	1747	1903	4311	4340	5556	5893	5918
53	1	1777	1933	2541	2570	2886	3223	3248
54	1	1971	2127	2735	2764	3080	3417	3442
55	2	2040	2196	4604	4633	5849	6186	6211
56	2	2070	2226	4634	4663	5879	6216	6241
57	2	2128	2284	4692	4721	5937	6274	6299
58	1	2301	2457	3065	3094	3410	3747	3772
59	3	2331	2487	3995	4024	4640	4977	5002
60	3	2361	2517	4025	4054	4670	5007	5032
61	2	2391	2547	4955	4984	6200	6537	6562
62	1	2421	2577	3185	3214	3530	3867	3892
63	1	2451	2607	3215	3244	3560	3897	3922
64	2	2492	2648	5056	5085	6301	6638	6663
65	2	2552	2708	5116	5145	6361	6698	6723
66	3	2668	2824	4332	4361	4977	5314	5339
67	1	2698	2854	3462	3491	3807	4144	4169
68	2	2728	2884	5292	5321	6537	6874	6899
69	2	2827	2983	5391	5420	6636	6973	6998
70	1	2901	3057	3665	3694	4010	4347	4372
71	3	3049	3205	4713	4742	5358	5695	5720
72	2	3079	3235	5643	5672	6888	7225	7250
73	1	3115	3271	3879	3908	4224	4561	4586
74	3	3145	3301	4809	4838	5454	5791	5816
75	2	3175	3331	5739	5768	6984	7321	7346
76	2	3238	3394	5802	5831	7047	7384	7409
77	1	3358	3514	4122	4151	4467	4804	4829
78	1	3388	3544	4152	4181	4497	4834	4859
79	3	3473	3629	5137	5166	5782	6119	6144
80	3	3503	3659	5167	5196	5812	6149	6174
81	1	3630	3786	4394	4423	4739	5076	5101
82	1	3745	3901	4509	4538	4854	5191	5216
83	3	3775	3931	5439	5468	6084	6421	6446

84	1	3805	3961	4569	4598	4914	5251	5276
85	3	3835	3991	5499	5528	6144	6481	6506
86	2	3865	4021	6429	6458	7674	8011	8036
87	1	3970	4126	4734	4763	5079	5416	5441
88	1	4000	4156	4764	4793	5109	5446	5471
89	3	4096	4252	5760	5789	6405	6742	6767
90	1	4126	4282	4890	4919	5235	5572	5597
91	2	4156	4312	6720	6749	7965	8302	8327
92	3	4253	4409	5917	5946	6562	6899	6924
93	2	4295	4451	6859	6888	8104	8441	8466
94	2	4325	4481	6889	6918	8134	8471	8496
95	3	4387	4543	6051	6080	6696	7033	7058
96	1	4472	4628	5236	5265	5581	5918	5943
97	2	4502	4658	7066	7095	8311	8648	8673
98	3	4532	4688	6196	6225	6841	7178	7203
99	3	4604	4760	6268	6297	6913	7250	7275
100	2	4654	4810	7218	7247	8463	8800	8825
101	1	4795	4951	5559	5588	5904	6241	6266
102	1	4853	5009	5617	5646	5962	6299	6324
103	1	5060	5216	5824	5853	6169	6506	6531
104	3	5090	5246	6754	6783	7399	7736	7761
105	3	5120	5276	6784	6813	7429	7766	7791
106	2	5150	5306	7714	7743	8959	9296	9321
107	1	5217	5373	5981	6010	6326	6663	6688
108	3	5247	5403	6911	6940	7556	7893	7918
109	1	5321	5477	6085	6114	6430	6767	6792
110	1	5360	5516	6124	6153	6469	6806	6831
111	3	5423	5579	7087	7116	7732	8069	8094
112	3	5453	5609	7117	7146	7762	8099	8124
113	2	5483	5639	8047	8076	9292	9629	9654
114	3	5513	5669	7177	7206	7822	8159	8184
115	2	5610	5766	8174	8203	9419	9756	9781
116	1	5640	5796	6404	6433	6749	7086	7111
117	2	5670	5826	8234	8263	9479	9816	9841
118	1	5707	5863	6471	6500	6816	7153	7178
119	1	5829	5985	6593	6622	6938	7275	7300
120	1	6041	6197	6805	6834	7150	7487	7512
121	2	6071	6227	8635	8664	9880	10217	10242
122	3	6101	6257	7765	7794	8410	8747	8772
123	3	6179	6335	7843	7872	8488	8825	8850
124	1	6209	6365	6973	7002	7318	7655	7680
125	1	6239	6395	7003	7032	7348	7685	7710
126	2	6269	6425	8833	8862	10078	10415	10440
127	1	6374	6530	7138	7167	7483	7820	7845
128	3	6404	6560	8068	8097	8713	9050	9075

129	3	6434	6590	8098	8127	8743	9080	9105
130	3	6464	6620	8128	8157	8773	9110	9135
131	2	6494	6650	9058	9087	10303	10640	10665
132	2	6524	6680	9088	9117	10333	10670	10695
133	1	6590	6746	7354	7383	7699	8036	8061
134	1	6678	6834	7442	7471	7787	8124	8149
135	2	6708	6864	9272	9301	10517	10854	10879
136	2	6738	6894	9302	9331	10547	10884	10909
137	2	6768	6924	9332	9361	10577	10914	10939
138	1	6798	6954	7562	7591	7907	8244	8269
139	3	6828	6984	8492	8521	9137	9474	9499
140	3	6858	7014	8522	8551	9167	9504	9529
141	2	6888	7044	9452	9481	10697	11034	11059
142	1	6918	7074	7682	7711	8027	8364	8389
143	1	7050	7206	7814	7843	8159	8496	8521
144	2	7080	7236	9644	9673	10889	11226	11251
145	2	7146	7302	9710	9739	10955	11292	11317
146	3	7195	7351	8859	8888	9504	9841	9866
147	1	7227	7383	7991	8020	8336	8673	8698
148	2	7257	7413	9821	9850	11066	11403	11428
149	2	7287	7443	9851	9880	11096	11433	11458
150	1	7431	7587	8195	8224	8540	8877	8902
151	3	7502	7658	9166	9195	9811	10148	10173
152	2	7532	7688	10096	10125	11341	11678	11703
153	1	7562	7718	8326	8355	8671	9008	9033
154	3	7689	7845	9353	9382	9998	10335	10360
155	2	7719	7875	10283	10312	11528	11865	11890
156	2	7749	7905	10313	10342	11558	11895	11920
157	1	7779	7935	8543	8572	8888	9225	9250
158	1	7809	7965	8573	8602	8918	9255	9280
159	3	7839	7995	9503	9532	10148	10485	10510
160	3	7932	8088	9596	9625	10241	10578	10603

问题 5.先有 A、B 型芯片后有 C 型芯片的调度结果（单位：s）

芯片序号	芯片类型 (A 型为 1, B 型为 2, C 型为 3)	进仓 时间	第一次 温育起 始时间	磁珠加 样起始 时间	第二次温 育起始时 间	清洗起 始时间	检测起 始时间	检测结 束时间
1	1	0	156	764	793	1109	1446	1471
2	2	30	186	2594	2623	3839	4176	4201
3	2	60	216	2624	2653	3869	4206	4231
4	1	90	246	854	883	1199	1536	1561
5	2	120	276	2684	2713	3929	4266	4291
6	2	150	306	2714	2743	3959	4296	4321

7	1	180	336	944	973	1289	1626	1651
8	2	210	366	2774	2803	4019	4356	4381
9	1	240	396	1004	1033	1349	1686	1711
10	1	270	426	1034	1063	1379	1716	1741
11	2	300	456	2864	2893	4109	4446	4471
12	2	330	486	2894	2923	4139	4476	4501
13	2	360	516	2924	2953	4169	4506	4531
14	1	390	546	1154	1183	1499	1836	1861
15	2	420	576	2984	3013	4229	4566	4591
16	1	450	606	1214	1243	1559	1896	1921
17	1	480	636	1244	1273	1589	1926	1951
18	2	510	666	3074	3103	4319	4656	4681
19	1	540	696	1304	1333	1649	1986	2011
20	2	570	726	3134	3163	4379	4716	4741
21	2	600	756	3164	3193	4409	4746	4771
22	2	630	786	3194	3223	4439	4776	4801
23	2	660	816	3224	3253	4469	4806	4831
24	1	690	846	1454	1483	1799	2136	2161
25	1	720	876	1484	1513	1829	2166	2191
26	2	750	906	3314	3343	4559	4896	4921
27	1	780	936	1544	1573	1889	2226	2251
28	1	810	966	1574	1603	1919	2256	2281
29	1	840	996	1604	1633	1949	2286	2311
30	1	870	1026	1634	1663	1979	2316	2341
31	2	900	1056	3464	3493	4709	5046	5071
32	2	930	1086	3494	3523	4739	5076	5101
33	1	960	1116	1724	1753	2069	2406	2431
34	2	990	1146	3554	3583	4799	5136	5161
35	1	1020	1176	1784	1813	2129	2466	2491
36	2	1050	1206	3614	3643	4859	5196	5221
37	1	1080	1236	1844	1873	2189	2526	2551
38	1	1110	1266	1874	1903	2219	2556	2581
39	1	1140	1296	1904	1933	2249	2586	2611
40	2	1170	1326	3734	3763	4979	5316	5341
41	1	1200	1356	1964	1993	2309	2646	2671
42	1	1230	1386	1994	2023	2339	2676	2701
43	2	1260	1416	3824	3853	5069	5406	5431
44	2	1290	1446	3854	3883	5099	5436	5461
45	2	1320	1476	3884	3913	5129	5466	5491
46	1	1350	1506	2114	2143	2459	2796	2821
47	1	1380	1536	2144	2173	2489	2826	2851
48	2	1410	1566	3974	4003	5219	5556	5581
49	2	1440	1596	4004	4033	5249	5586	5611
50	2	1620	1776	4184	4213	5429	5766	5791
51	2	1650	1806	4214	4243	5459	5796	5821

52	2	1680	1836	4244	4273	5489	5826	5851
53	1	1710	1866	2474	2503	2819	3156	3181
54	1	1740	1896	2504	2533	2849	3186	3211
55	2	1806	1962	4370	4399	5615	5952	5977
56	2	1897	2053	4461	4490	5706	6043	6068
57	2	1957	2113	4521	4550	5766	6103	6128
58	1	1987	2143	2751	2780	3096	3433	3458
59	1	2047	2203	2811	2840	3156	3493	3518
60	2	2077	2233	4641	4670	5886	6223	6248
61	1	2181	2337	2945	2974	3290	3627	3652
62	2	2211	2367	4775	4804	6020	6357	6382
63	3	2287	2443	3951	3980	4596	4933	4958
64	2	2317	2473	4881	4910	6126	6463	6488
65	2	2617	2773	5181	5210	6426	6763	6788
66	1	2647	2803	3411	3440	3756	4093	4118
67	1	2935	3091	3699	3728	4044	4381	4406
68	3	2998	3154	4662	4691	5307	5644	5669
69	3	3238	3394	4902	4931	5547	5884	5909
70	1	3568	3724	4332	4361	4677	5014	5039
71	3	3667	3823	5331	5360	5976	6313	6338
72	1	3718	3874	4482	4511	4827	5164	5189
73	3	3748	3904	5412	5441	6057	6394	6419
74	2	3787	3943	6351	6380	7596	7933	7958
75	3	3842	3998	5506	5535	6151	6488	6513
76	1	3919	4075	4683	4712	5028	5365	5390
77	2	3949	4105	6513	6542	7758	8095	8120
78	2	3979	4135	6543	6572	7788	8125	8150
79	2	4009	4165	6573	6602	7818	8155	8180
80	2	4039	4195	6603	6632	7848	8185	8210
81	2	4147	4303	6711	6740	7956	8293	8318
82	1	4223	4379	4987	5016	5332	5669	5694
83	1	4253	4409	5017	5046	5362	5699	5724
84	1	4531	4687	5295	5324	5640	5977	6002
85	3	4561	4717	6225	6254	6870	7207	7232
86	2	4591	4747	7155	7184	8400	8737	8762
87	2	4621	4777	7185	7214	8430	8767	8792
88	3	4651	4807	6315	6344	6960	7297	7322
89	1	4682	4838	5446	5475	5791	6128	6153
90	3	4712	4868	6376	6405	7021	7358	7383
91	3	4742	4898	6406	6435	7051	7388	7413
92	1	4802	4958	5566	5595	5911	6248	6273
93	1	4832	4988	5596	5625	5941	6278	6303
94	2	4862	5018	7426	7455	8671	9008	9033
95	1	5102	5258	5866	5895	6211	6548	6573
96	1	5132	5288	5896	5925	6241	6578	6603

97	1	5162	5318	5926	5955	6271	6608	6633
98	3	5192	5348	6856	6885	7501	7838	7863
99	3	5222	5378	6886	6915	7531	7868	7893
100	2	5252	5408	7816	7845	9061	9398	9423
101	1	5282	5438	6046	6075	6391	6728	6753
102	1	5342	5498	6106	6135	6451	6788	6813
103	1	5372	5528	6136	6165	6481	6818	6843
104	1	5402	5558	6166	6195	6511	6848	6873
105	1	5432	5588	6196	6225	6541	6878	6903
106	2	5462	5618	8026	8055	9271	9608	9633
107	2	5492	5648	8056	8085	9301	9638	9663
108	3	5564	5720	7228	7257	7873	8210	8235
109	2	5594	5750	8158	8187	9403	9740	9765
110	1	5663	5819	6427	6456	6772	7109	7134
111	2	5693	5849	8257	8286	9502	9839	9864
112	1	5723	5879	6487	6516	6832	7169	7194
113	3	5783	5939	7447	7476	8092	8429	8454
114	2	5813	5969	8377	8406	9622	9959	9984
115	1	5876	6032	6640	6669	6985	7322	7347
116	1	5968	6124	6732	6761	7077	7414	7439
117	3	5998	6154	7662	7691	8307	8644	8669
118	2	6028	6184	8592	8621	9837	10174	10199
119	2	6058	6214	8622	8651	9867	10204	10229
120	1	6143	6299	6907	6936	7252	7589	7614
121	1	6173	6329	6937	6966	7282	7619	7644
122	2	6203	6359	8767	8796	10012	10349	10374
123	3	6233	6389	7897	7926	8542	8879	8904
124	1	6263	6419	7027	7056	7372	7709	7734
125	2	6293	6449	8857	8886	10102	10439	10464
126	2	6323	6479	8887	8916	10132	10469	10494
127	3	6413	6569	8077	8106	8722	9059	9084
128	2	6443	6599	9007	9036	10252	10589	10614
129	2	6473	6629	9037	9066	10282	10619	10644
130	2	6590	6746	9154	9183	10399	10736	10761
131	2	6660	6816	9224	9253	10469	10806	10831
132	1	6789	6945	7553	7582	7898	8235	8260
133	2	6819	6975	9383	9412	10628	10965	10990
134	2	6849	7005	9413	9442	10658	10995	11020
135	2	6879	7035	9443	9472	10688	11025	11050
136	3	7017	7173	8681	8710	9326	9663	9688
137	2	7047	7203	9611	9640	10856	11193	11218
138	2	7077	7233	9641	9670	10886	11223	11248
139	2	7110	7266	9674	9703	10919	11256	11281
140	3	7244	7400	8908	8937	9553	9890	9915
141	2	7329	7485	9893	9922	11138	11475	11500

142	2	7359	7515	9923	9952	11168	11505	11530
143	2	7389	7545	9953	9982	11198	11535	11560
144	2	7586	7742	10150	10179	11395	11732	11757
145	2	7616	7772	10180	10209	11425	11762	11787
146	1	7646	7802	8410	8439	8755	9092	9117
147	1	7676	7832	8440	8469	8785	9122	9147
148	3	7848	8004	9512	9541	10157	10494	10519
149	1	7879	8035	8643	8672	8988	9325	9350
150	1	7977	8133	8741	8770	9086	9423	9448

由于数据量较大，详见附录.zip 中的模型求解的调度结果列表文件夹。

表5 模型求解的优化调度结果列表

序号	文件名	材料说明
1	附表1-问题1.A型芯片的调度结果	问题1的优化调度结果
2	附表2-问题1.B型芯片的调度结果	问题1的优化调度结果
3	附表3-问题2.A、B型芯片的调度结果	问题2的优化调度结果
4	附表4-问题3.A、B、C型芯片的调度结果	问题3的优化调度结果
5	附表5-问题5.先有A、B型芯片后有C型芯片的调度结果	问题5的优化调度结果

附录 B:程序代码

由于程序代码较大，详见附录.zip 中的程序代码文件夹。