

# RGV 的动态调度优化问题

李璿<sup>1\*</sup>, 符一凡<sup>3\*</sup>, 田欣瑶<sup>1</sup>, 李雨润<sup>1</sup>, 陈国浩<sup>2</sup>

1. 三亚学院 健康产业管理学院, 海南 三亚 572022

2. 三亚学院 新能源与智能网联汽车学院, 海南 三亚 572022

3. 三亚学院 盛宝金融科技商学院, 海南 三亚 572022

DOI: 10.61369/TACS.2025080005

**摘要:** 本文通过构建基于0-1规划的单RGV动态调度模型, 深入分析了智能加工系统中RGV与CNC的协同工作机制。研究表明, 通过合理调度RGV的移动路径和操作时间, 可以显著提高系统的整体运行效率。模型优化后, 一个工期内三组数据分别能够生产熟料的最大数量为382、359、391个, 求解结果逼近理论上界, 偏差率较低, 证明了模型的有效性和求解算法的优越性。此外, 研究还强调了系统效率均衡的重要性, 即RGV与CNC的处理能力应尽量匹配, 以避免产能浪费或阻塞现象。本研究为智能加工系统的优化调度提供了理论依据和实践指导。

**关键词:** 单RGV动态调度模型; 系统效率均衡; 最优状态转移图模型

## Single RGV Dynamic Scheduling Model based on 0-1 Programming

Li Ying<sup>1\*</sup>, Fu Yifan<sup>3\*</sup>, Tian Xinyao<sup>1</sup>, Li Yurun<sup>1</sup>, Chen Guohao<sup>2</sup>

1. School of Health Industry Management, Sanya University, Sanya, Hainan 572022

2. School of New Energy and Intelligent Connected Vehicles, Sanya University, Sanya, Hainan 572022

3. Saxo Financial Technology Business School, Sanya University, Sanya, Hainan 572022

**Abstract:** This paper deeply analyzes the collaborative working mechanism of RGV and CNC in the intelligent processing system by constructing a single RGV dynamic scheduling model based on 0-1 programming. The research results show that by reasonably scheduling the movement path and operation time of RGV, the overall operational efficiency of the system can be significantly improved. After the model optimization, the maximum quantities of clinker that can be produced by the three sets of data within one working hour are 382, 359, and 391 respectively. The solution results approach the theoretical upper bound with a low deviation rate, which proves the validity of the model and the superiority of the solution algorithm. Furthermore, the research also emphasizes the importance of system efficiency balance, that is, the processing capabilities of RGV and CNC should be matched as much as possible to avoid capacity waste or congestion. This research provides a theoretical basis and practical guidance for the optimal scheduling of intelligent processing systems.

**Keywords:** single RGV dynamic scheduling model; system efficiency equilibrium; optimal state transition graph model

## 引言

随着信息技术、控制工程、机械工程等技术的发展与进步, 智能加工系统日益无人化、自动化、智能化, 显著提升了工业加工、物流服务等工作的效率<sup>[1]</sup>。以本文为例, 该智能加工系统由8台计算机数控机床(Computer Number Controller, CNC)、1辆轨道式自动引导车(Rail Guide Vehicle, RGV)、1条RGV直线轨道、1条上料传送带、1条下料传送带及其他附属设备组成。RGV是一种无人驾驶的、能在固定轨道上自由运行的智能车, 能够根据指令完成相关的作业任务。在该类系统中, RGV的运行情况对整个作业系统的工作效率有着巨大影响, 运行过程中, 易出现因不同工作组调度不佳, 而导致空闲等待的情况, 降低了运行效率<sup>[2]</sup>。能否更加合理地调度穿梭车, 提高RGV系统的运行效率, 是进一步促使智能加工系统发展的一个重要因素<sup>[3]</sup>。

## 一、理论基础

在建立模型前, 我们首先对该系统的基本工作状态进行一定的分析。结合分析结论完成模型的构建和改进。对于该问题我们

有以下分析<sup>[4-6]</sup>:

定义1(RGV工作循环)RGV对每个CNC都操作且仅操作一次并最后回到出发位置的过程称为一个循环(周期)。

可证: 对于本文中三组数据, RGV的循环中移动距离为6个

单位长度且中途停止为4次时的循环是所有循环中用时最短的。

证明1在本文中, RGV 一次循环的总耗时为  $t$ ,  $t$  由上下料时间  $t_1$ , 清洗时间  $t_2$  和移动时间  $t_3$  组成。即

$$t = t_1 + t_2 + t_3$$

通过分析可知, 当 CNC 的种类和数量确定时,  $t_1 + t_2$  在同一系统中是常数, 故  $t$  的相对大小仅由  $t_3$  决定。设 RGV 移动  $i(i=1;2;3)$  个单位所需时间  $t_{mi} = \Delta t_1 + (i-1)\Delta t_2$ , 其中  $\Delta t_1$  为移动第 1 个单位的时间,  $\Delta t_2$  为后续每多 1 单位时间所需时间, 且根据数据可知  $\Delta t_1 > \Delta t_2$ 。

可知 RGV 在 4 个位置至少停止一次, 所以至少需要的时间为  $4\Delta t_1$ , 而 RGV 在一个循环中至少要移动 6 个单位才能回到起点, 假设剩余 2 个单位需要的时间都是较短的  $\Delta t_2$ , 我们可以得出单个循环时间的下限为  $4\Delta t_1 + 2\Delta t_2$ 。

所以结论得证。

定义 2(系统效率均衡) 当其他条件确定时, 系统中各个模块的工作效率在匹配(相等或近似相等)时, 整个系统获得最大效益, 该状态定义为系统均衡。

系统均衡优化原则: 在只 CNC 装有一种类型刀片的情况下, RGV 与 CNC 协同工作, 为了使 RGV 和 CNC 的效率达到最大化, 二者对物料的处理能力应当尽量匹配。因为当 RGV 处理能力大于 CNC 的时候, RGV 会等待 CNC 直到空闲的 CNC 出现的, 造成 RGV 的产能浪费, 反之亦然。同理, 在拥有装有两种不同类型刀片的 CNC 的系统中, 两种 CNC 对物料的处理能力也应该尽量均衡, 因为每一个成品物料需要第一类 CNC 和第二类 CNC 各进行一次加工, 在 RGV 服务能力充足的情况下, 如果第一类 CNC 的处理能力大于第二类 CNC, 会造成产生过多的半成品物料而没有足够的第二类 CNC 进行处理, 造成阻塞, 而第二类 CNC 的处理能力大于第一类 CNC, 会造成没有足够的半成品物料供给第二类 CNC 加工, 造成闲置。所以为了最大化整个系统的效率, 我们必须尽量保持第一类 CNC 和第二类 CNC 处理能力的均衡。

## 二、最优状态转移图模型

本文建立最优状态转移图模型来描述整个 RGV-CNC 系统的调度过程。

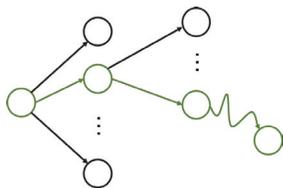


图1 最优状态转移图模型示意图

首先, 我们建立系统的状态向量  $V_k$ , 该状态向量描述了在某一时刻整个系统所处的状态。由于以秒为处理单位会出现大量的重复状态和重复计算, 我们从 RGV 运动的视角作为图模型建立的基准对模型进行离散化处理。该模型将以秒为单位的时间划分, 转换为基于事件的时间划分。

$$V_k = \begin{bmatrix} t_k \\ p_k \\ r_{k,1} \\ r_{k,2} \\ \vdots \\ r_{k,n} \\ M_k \\ 1 \end{bmatrix}, 0 \leq t_k \leq T_m, p_k \in N^+, p_k \leq \lfloor n/2 \rfloor, r_{k,i} \geq 0$$

其中  $M_0=1$ ,  $t_k$  代表系统处于第  $k$  个状态时的时刻,  $p_k$  代表 RGV 在第  $k$  个状态时所处的位置, 在向量  $V_k$  末尾的补充 1 以构建齐次转移矩阵,  $r_{k,i}$  变量代表当系统处于第  $k$  个状态时  $i$  位置处的 CNC 距离下一次空闲状态(完成当前工作所需要)的剩余时间。

当 RGV 的一次上料行为完成时, 模型状态发生转移, RGV 移动到下一个位置进行上料(移动之前 RGV 可能会执行在原地“停止等待”信号), 相邻两次上料完成的时间作为状态之间的时间。值得注意的是, 该模型中所求的最优路线的深度(节点数)即为系统在约束条件下所能生产熟料的最大值, 记为  $M$ 。

模型应当满足下面的约束:

约束一: RGV 在某一时刻只能为一台机器上料或下料。

约束二: 从第  $i$  次上料到第  $i+1$  次上料的间隔时间大于 RGV 从第一个位置运动到第二个位置的时间。

上述约束将在状态转移的过程中得到保持。为了便于描述, 我们定义了下列变量。

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n,1} & \cdots & c_{n,n} \end{bmatrix}$$

其中  $c_{i,j}$  为 RGV 从位置  $i$  移动到到位置  $j$  需要的时间,  $c_{i,j}=c_{j,i}$ , 易知, 当  $i=j$  时  $c_{i,j}=0$ 。

$$E_k = \begin{bmatrix} e_{k,1} \\ \vdots \\ e_{k,n} \end{bmatrix}$$

$$e_{k,i} = \begin{cases} 0 & \text{状态 } V_k \text{ 的 } CNC_i \text{ 上工作没有工作} \\ 1 & \text{状态 } V_k \text{ 的 } CNC_i \text{ 上面有正在处理或者处理完成的工件} \end{cases}$$

构建状态转移方程如下:

$$V_{k+1} = f(V_k A_k)$$

它表示从第  $k$  阶段到  $k+1$  阶段的的状态转移规律。其中  $V_k$  为第  $k$  个状态的系统状态向量。

其中,  $p_k$  表示为 RGV 处于第  $k$  个状态时的位置;  $t_{li}$  表示转移目标位置处 CNC 的上料时间;  $t_s$  表示下一次上料的开始时间, 为行走时间和目标 CNC 剩余工作时间的较大值;  $t_c$  表示当前状态后工件清洗的时间, 代表如果 CNC 空置则清洗, 否则不清

洗 ;cpk,i 表示从当前状态 (k) 转移到下一个状态 (k+1) 需要的移动时间。对于公式, 函数 f(Vk) 定义如下,

$$f(V_k) = \max\{0, rk, i\}, 1 \leq i \leq n, i \in N+$$

函数 f(Vk) 对状态 Vk 的 CNC 剩余时间 rk,i 取 max{0, Rk,i}, 因为剩余时间非负, 并且 rk+1,i=tp, ek+1,i=1

此外, 在一个班次 (8小时) 的时间内, RGV 必须回到原点并且所有的工件必须全部完成, 所以在状态转移的时候引入约束三、四。

约束三: RGV 一定能够回到原点。tk+ts+tl+ci,0 ≤ Tm

约束四: 所有的 CNC 在8小时结束时处于非工作状态。

$$tk+ts+2tl+tp+tc+ci,0 \leq Tm$$

易知约束四是约束三时条件更为严格的表达。

由于系统的上下料合并为一个步骤, 所以在求解的时候将模型中8个 CNC 的最后一个工件的上下料操作视为纯粹的下料操作, 可以消除这个约束。

所以模型最优化模型目标为最大化 M 值, 换言之, 最大化状态转移图中状态传递的深度 (长度)。

总的数学模型描述如下:

$$\begin{aligned} & \max M_k \\ & s.t. \begin{cases} V_{k+1} = f(V_k A_k), \\ t_k + t_s + t_i + c_{i,0} \leq T_m, \forall i \in [1..n] \\ t_k + t_s + 2t_i + t_p + t_c + c_{i,0} \leq T_m, \forall i \in [1..n], \\ (1 - q_{pk})e_{k,p_k} - q_{pk+1} \neq 1, \\ t_{ii} = (i \bmod 2)t_{i0} + ((i + 1) \bmod 2)t_{i1}. \end{cases} \end{aligned}$$

### 三、最优状态转移图模型求解结果

一个工时 (8小时) 内第一、二、三组能够生产熟料的最大数量分别为 382、359、391 个, CNC 与 RGV 具体的调度规则见支撑材料。

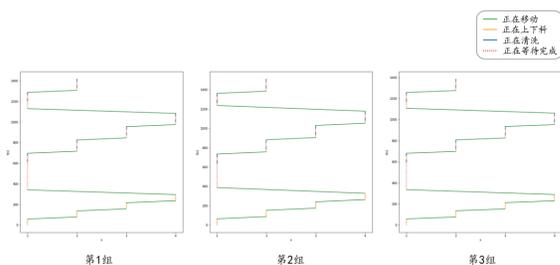


图2 优化后 RGV 的运动路线和各项操作时间图

将 RGV 的路径和操作时间进行绘制可得:

在该图中, x 轴描述了 RGV 的空间分布, y 轴描述了 RGV 的时间分布。其中绿色实线部分描述了在 CNC 只安装一种刀片时移动的路径情况, 而黄蓝相见的“竖线”部分则刻画了 RGV 正在上下料与清洗交替进行。红色虚线则表示在最优调度下此时 RGV 需要等待 CNC 完成操作, 即 RGV 此时处于空闲状态。注意到该方案是两个上下料、清洗动作交替进行, 即应该在 RGV 在某处重复执行该操作组合, 更具体地, 由于 RGV 不会对在工作的 CNC 进行操作, 因此其模式是在某处先后操作者两侧 CNC; 此外可

以从结果中看到, 最终结果在中间过程呈现一定的周期性, 在首尾部分存在打破循环, 这与我们的周期性假设和估计基本吻合。

根据定义3, CNC 满载条件下的系统具有工作上限, 将其定义为超额上限值。超额上限值高于理论最优解且接近该模型的最优解, 这是因为 CNC 满载条件在系统运行过程中是较难满足的, 因此系统在时间上会有一些的损耗, 导致减少规定时间内生产的熟料数目。因此以该上界作为近似解的评估标准具有较大参考价值。

下面定义模型结果偏差率计算公式:

$$\lambda = \frac{|A - U|}{U}$$

其中 A 为求解值, U 为上界值, λ 刻画了求解算法所得解与超额上限值 (CNC 满载条件下的系统具有工作上限) 的近似程度。

表1 最优状态转移图模型结果分析表

数据组数	第1组	第2组	第3组
超额上限值	384	372	396
求解值	382	359	391
结果偏差率	0.9948	0.9651	0.9899

结合该结果可知, 对于情况一下的三组数据而言, 该模型的求解算法求解效果较好: 一方面计算速度较快; 另一方面, 所求结果十分逼近理论上限, 认为得到满意的近似解。

#### 4、结语

本文通过构建基于0-1规划的单 RGV 动态调度模型, 深入分析了智能加工系统中 RGV 与 CNC 的协同工作机制。研究表明, 通过合理调度 RGV 的移动路径和操作时间, 可以显著提高系统的整体运行效率。模型优化后, 一个工时内三组数据分别能够生产熟料的最大数量为 382、359、391 个, 求解结果逼近理论上限, 偏差率较低, 证明了模型的有效性和求解算法的优越性。此外, 研究还强调了系统效率均衡的重要性, 即 RGV 与 CNC 的处理能力应尽量匹配, 以避免产能浪费或阻塞现象。本研究为智能加工系统的优化调度提供了理论依据和实践指导。

### 参考文献

- [1] 顿一凡. 基于动态规划与蚁群算法的智能 RGV 动态调度策略探究 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(07): 193-195.
- [2] 李东. 基于 RGV 的环形横移式循环电梯起重创新设计探究 [J]. 中国设备工程, 2025, (07): 126-128.
- [3] 张哲, 南田媛, 何江涛, 等. 智能加工系统 RGV 的动态调度问题 [J]. 中国科技信息, 2025, (06): 78-81.
- [4] 王健. 物料转运中环轨 RGV 设计优化与应用 [J]. 有色设备, 2025, 39(01): 69-73+85.
- [5] 胡帅. 铁路货车始发列检智能 RGV 检车系统研究 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(04): 123-126.
- [6] 何长江, 周德强, 盛卫锋, 等. 环形轨道 RGV 非对称 S 型速度曲线的应用研究 [J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(10): 17-21+109. DOI: 10.20033/j.1003-7241.(2025)10-0017-06.