

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210709

燃气表计量检定线首次检定调度技术研究*

姚懋欣¹ 刘桂雄¹ 陈国宇²

(1.华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640; 2.广州能源检测研究院 广州 511447)

摘要: 燃气表应用面广,需定期强制更换,首次检定项目复杂、工作量大,现有燃气表计量检定线离散测试效率较低、没有协同。本文研究基于燃气表计量检定线的首次检定调度技术,首先从燃气表计量检定线构成与首次检定项目需求入手,研究基于柔性车间调度问题的燃气表检定调度建模、使用离散粒子群算法进行调度优化求解,求得最优任务调度序列。对一批待检燃气表进行调度优化实验,结果表明,本文调度技术可缩短 33.3% 总测试时间,提高检定效率以及设备利用率。

关键词: 燃气表;首次检定;任务调度

中图分类号: TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Research on gas meter metering inspection line first-time inspection scheduling technology

Yao Maoxin¹ Liu Guixiong¹ Chen Guoyu²(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangzhou Institute of Energy Testing, Guangzhou 511447, China)

Abstract: Gas meters are widely used and need to be regularly and compulsorily replaced, and the first inspection items are complicated and workload is large, and the existing gas meter metering inspection line has low efficiency and no synergy in discrete testing. In this paper, we study the first inspection scheduling technology based on the gas meter metering inspection line, starting from the composition of the gas meter metering inspection line and the requirements of the first inspection items, and investigate the gas meter inspection scheduling modeling based on flexible job-shop scheduling problem, discrete particle swarm optimization based scheduling solution method to find the optimal task scheduling sequence. The experimental results of scheduling optimization for a batch of gas meters to be inspected show that the scheduling technique in this paper can reduce the total testing time by 33.3% and improve the inspection efficiency and equipment utilization.

Keywords: gas meter; first-time calibration; task scheduling

0 引言

燃气表通常采用柔性膜片计量室方式测量气体体积流量^[1],国家计量检定规程 JJG577-2012 规定以天然气、液化石油气为介质的燃气表使用期限一般不超过 10 年,燃气表需定期强制更换,检定工作量大^[2]。目前对于燃气表计量检定研究主要集中于单一检定项目优化^[3-5],如重庆大学沈甲甲^[6]提出了一种基于数字图像处理燃气表读数识别算法,使用改进量子粒子群优化的粗糙集、支持向量机识别算法,提高燃气表外观检测识别准确率与识别速度;Zhu 等^[7]研究超声波回波信号特性,提出了一种用于

燃气表示值误差计量的变比阈值、过零检测数字信号处理方法。这些研究无法解决燃气表计量检定线多项目测试任务优化需求,多工位多项目测试任务可采用调度方法进行优化^[8-10],如 Borreguero 等^[11]基于混合整数线性规划模型研究航空制造业生产中多项目多工位调度;翟亚飞等^[12]以最小化最大完工时间为目标,应用粒子群优化算法求解混合多处理机任务作业车间调度;上海交通大学卢茜^[13]在遗传算法中引入模拟退火算法、禁忌搜索算法,得到总测试时间最短、并行率最大、资源利用率最高的任务调度序列。

本文开展燃气表计量检定线首次检定调度技术研究,

收稿日期:2022-07-18

* 基金项目:广东省市场监督管理局科技项目(2022CJ04)资助

从燃气表计量检定线构成与首次检定项目需求入手,应用基于柔性车间调度问题(flexible job-shop scheduling problem, FJSP)进行调度问题建模^[14],并使用离散粒子群算法(discrete particle swarm optimization, DPSO)进行调度优化求解,求得最优任务调度序列^[15],这是调度技术应用用于燃气表计量检定线首次检定的一次尝试。

1 燃气表计量检定线构成与首次检定项目需求

图1为一般燃气表计量检定线整体流程,可一次性、批

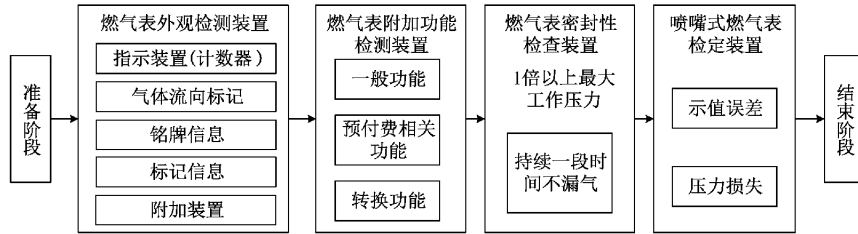


图1 燃气表计量检定线整体流程

JJG 577-2012 规定膜式燃气表的首次检定,检定项目包括外观、密封性、压力损失、示值误差及附加装置功能检测,由于部分检定项目存在较多等待时间,测试效率较低、设备利用率也低,若对检定流程进行智能调度,可合理利用等待时间,缩短检定时间,提高检定效率。

2 燃气表计量检定线首次检定调度的 FJSP 建模方法与求解

2.1 首次检定调度的 FJSP 建模

燃气表计量检定线具有多工位、多项目特点,对于燃气表首次检定调度问题,可以基于 FJSP 进行数学模型建立。FJSP 实质是在 m 台机器上合理组织 l 个工件共 n 项工序执行,每道工序可由多台机器加工,工序可在一组相同功能机器中任选一台加工,该问题中存在一个加工任务集 $P = \{P_{i,p_i}\}_{i=1}^n$ 及一个加工机器集 $R = \{r_k\}_{k=1}^m$,其优化目标为调度策略 T^P 的最大完工时间 $\min t(T^P) = \max(E_{i,j}^k)$ 。

基于柔性车间调度问题 FJSP 思想对燃气表首次检定调度进行建模如式(1)、(2),矩阵 T_i 为第 i 个燃气表调度信息,信息包括第 j 项工序 $P_{i,j}$ 所对应开始时间 $S_{i,j}$ 、完成时间 $E_{i,j}$ 以及 $P_{i,j}$ 所分配机器 $r_{i,j}$,多个燃气表调度信息组成整体调度策略 T^P 。

$$T_i = \begin{pmatrix} P_{i,1} & S_{i,1}^{r_{i,1}} & E_{i,1}^{r_{i,1}} & r_{i,1} \\ P_{i,2} & S_{i,2}^{r_{i,2}} & E_{i,2}^{r_{i,2}} & r_{i,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{i,p_i} & S_{i,p_i}^{r_{i,p_i}} & E_{i,p_i}^{r_{i,p_i}} & r_{i,p_i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$T^P = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_l\} \quad (2)$$

图2为整体调度策略所构建相对应的 FJSP 调度甘特

图,横轴、纵轴分别代表时间进程 t 、机器 r_k ,通过燃气表整体调度策略及调度甘特图,可直观显示燃气表检定过程各个检定工序 $P_{i,j}$ 分配情况及检定资源利用情况。

图,横轴、纵轴分别代表时间进程 t 、机器 r_k ,通过燃气表整体调度策略及调度甘特图,可直观显示燃气表检定过程各个检定工序 $P_{i,j}$ 分配情况及检定资源利用情况。

图,横轴、纵轴分别代表时间进程 t 、机器 r_k ,通过燃气表整体调度策略及调度甘特图,可直观显示燃气表检定过程各个检定工序 $P_{i,j}$ 分配情况及检定资源利用情况。

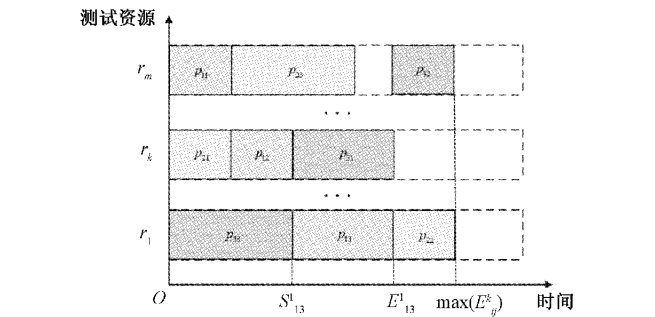


图2 FJSP 调度甘特图

2.2 FJSP 模型的 DPSO 算法求解

粒子群优化算法 PSO 是解决优化问题的有效元启发式算法^[16],可用于燃气表计量检定调度求解。PSO 算法中粒子具有如下属性:搜索空间内的当前位置 $x_i(t)$ 、当前速度 $v_i(t)$ 以及粒子群在搜索过程中找到最佳位置 $x_g^*(t)$ 。算法原理是通过粒子移动以搜索最优解 $p_g^*(t)$,粒子搜索轨迹根据其自身、相邻粒子的移动经验进行调整。设个体最优优化学习因子、种群最优优化学习因子分别为 c_1, c_2 ,个体历史最佳位置为 $x_i^*(t)$,均匀随机数 a_1, a_2 在 $[0, 1]$ 范围内, w 为惯性权值,那么算法更新速度、位置公式如下:

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot a_1 \cdot [x_i^*(t) - x_i(t)] + c_2 \cdot a_2 \cdot [x_g^*(t) - x_i(t)] \quad (3)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4)$$

FJSP 问题对于工件不同工序调度属于离散问题,本文采用离散编码方式(一般 PSO 算法采用实数编码方式)进行编码,并使用 DPSO 算法进行调度求解。设粒子交叉

操作、变异算子分别为 f_1, f_2 , 均匀随机数 a 在 $[0, 1]$ 范围内, DPSO 算法采用离散粒子公式更新粒子:

$$x_i(t+1) = c_2 \otimes f_1\{c_1 \otimes f_1[\omega \otimes f_2(x_i(t)), x_i^*(t)], x_g^*(t)\} \quad (5)$$

式中: \otimes 表示一种运算关系, $f(y), f(y, z)$ 受到随机数 a 与阈值 x 控制, 若 $a < x$ 则输出函数值, 其他情况则输出函数自变量, 代表粒子在最优化学学习因子控制下以一定概率进行自身变异或交叉操作, 即:

$$x \otimes f(y) = \begin{cases} f(y), & a < x \\ y, & \text{其他} \end{cases};$$

$$x \otimes f(y, z) = \begin{cases} f(y, z), & a < x \\ y, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

算法 1 为本文所使用 DPSO 算法过程, 算法首先进行种群初始化, 进行各粒子初始位置 x_i 编码, 计算适应度 $F(i)$, 在之后的每一次迭代中, 通过式(5)更新每个粒子的位置, 评估适应度函数以更新个体历史最优位置 $x_i^*(t)$ 及全局最优位置 $x_g^*(t)$, 迭代结束后算法解码输出最优整体加工调度策略 T^P 。

算法 1: DPSO 算法

输入: 初始化粒子群 $P = \{i_1, \dots, i_n\}$, 个体数目 N , 个体最优化学学习因子 c_1 , 种群最优化学学习因子 c_2 , 惯性权值 ω , 最大迭代次数 G_{\max}

输出: 整体加工调度策略 T^P 、最小完工时间 $\min t(T^P)$

```

1: for  $i$  in  $P$ 
2:   Initialize( $x_i$ )
3:    $F(i) = \frac{1}{\min t(T^P)}$ 
4:    $p_g^*(t) = x_i^*(t)$ 
5: end for
6: Iteration  $G=0$ 
7: while ( $G < G_{\max}$ )
8:   if ( $F(i) > F(g)$ )
9:      $x_g^*(t) = x_i(t)$ 
10:  选取当前粒子群中最佳粒子  $i^*$ ;
11:  if ( $F(i^*) > F(i)$ )
12:     $p_g^*(t) = x_g^*(t)$ 
13:  for  $i$  in  $P$ 
14:     $x_i(t+1) = c_2 \otimes f_3\{c_1 \otimes f_2[\omega \otimes f_1(x_i(t), x_i^*(t))], x_g^*(t)\}$ 
15:     $F(i) = \frac{1}{\min t(T^P)}$ 
16:  end for
17:   $G=G+1$ 
18: end
    
```

3 应用案例分析

某燃气表自动检定线其检定资源情况如表 1 所示, 现有一批 12 台待检燃气表做首次检定。

表 1 燃气表检定资源情况

检定项目	装置编号	数目	检定时间/min
外观检测	r_1	1	2
附加功能检测	r_2, r_3	2	3
密封性检测	r_3, r_4	2	3
示值误差、压力损失检测	r_5, r_6, r_7, r_8	4	10

该调度问题基于 FJSP 进行建模, 优化目标为调度策略 T^P 的最大完工时间 $\min t(T^P) = \max(E_{i,j}^k)$, 根据现有工序资源情况, 确立以下模型约束条件, 约束条件用式(7)~(10)进行表达, 即检测开始时间 $S_{i,j}^k$ 小于完成时间 $E_{i,j}^k$; 工序按固定路线进行; 同一时刻, 一台检定装置 r_k 上只进行一道工序 $P_{i,j}$ 的测试; 同一个燃气表, 同一时刻只进行一道工序 $P_{i,j}$ 的测试。

$$\begin{cases} S_{i,j}^k > 0, E_{i,j}^k > 0 \\ E_{i,j}^k = S_{i,j}^k + t_{i,j}^k \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} j_1 < j_2, j_1 \in [1, 4], j_2 \in [1, 4] \\ E_{i,j_1}^k < S_{i,j_2}^k \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} r_a \neq r_b, r_a \in \mathbf{R}, r_b \in \mathbf{R} \\ (S_{i,j_1}^a - E_{i,j_2}^a)(S_{i,j_2}^a - E_{i,j_1}^a) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} j_1 \neq j_2, j_1 \in [1, 4], j_2 \in [1, 4] \\ (S_{i,j_1}^k - E_{i,j_2}^k)(S_{i,j_2}^k - E_{i,j_1}^k) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

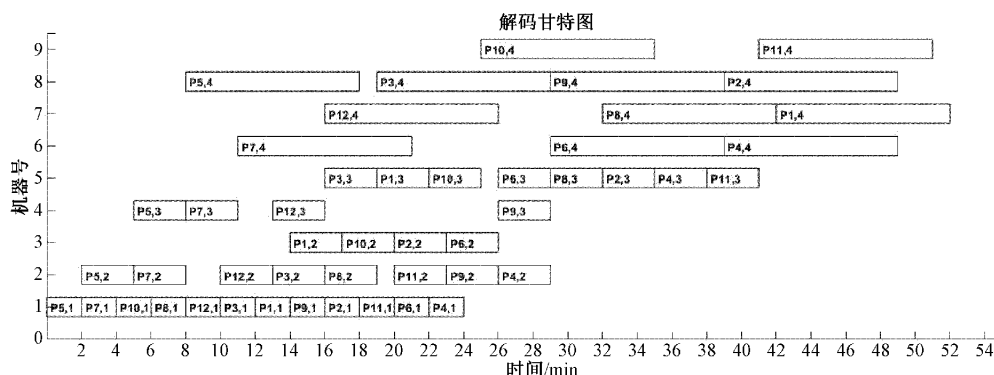
采用 DPSO 对模型求解, 设迭代最大次数 $G_{\max} = 100$, 粒子群规模 $N = 50$, 个体最优化学学习因子及整体最优化学学习因子分别为 $c_1 = 1.6, c_2 = 1.6$, 惯性权值 $\omega = 0.8$, 对上述调度问题进行优化求解, 使用加工调度策略 T^P 最大完工时间的倒数作为适应度函数:

$$F = \frac{1}{\max(E_{i,j}^k)} \quad (11)$$

经过 100 次迭代之后, 算法终止并输出最优解 $\min t(T^P) = 52 \text{ min}$, 图 3 为 DPSO 算法输出最优整体加工调度策略 T^P 所对应调度甘特图, 横轴、纵轴分别代表时间 t 、装置 r_k , 可直观显示燃气表检定过程各个检定工序 $P_{i,j}$ (第 i 个燃气表的第 j 道工序) 所分配装置 r_k (第 k 个工位)、检测开始时间 $S_{i,j}^k$ 、检测完成时间 $E_{i,j}^k$ 。

令燃气表各检定项目检定时间为 $t(P_i)$, 待检燃气表数量为 l 台, 检定项目对应工位数为 m_i , 则采用串行测试方式最小完工时间 $t(T)$ 为:

$$t(T) = \sum_{i=1}^l t(P_i) \cdot \frac{l}{m_i} \quad (12)$$

图3 最优整体加工调度策略 T^P 所对应调度甘特图

可以计算,12台待检燃气表做首次检定使用串行测试最小完工时间 $t(T)$ 为 78 min,而使用本文调度策略最小完工时间 $t(T^P)$ 为 52 min,优化缩短 26 min,效率提升 33.3%。

4 结 论

本文针对燃气表计量检定线多工位、多项目、检定工序可不固定等特点,基于 FJSP 进行建模优化,构建整体加工调度策略及调度甘特图;利用 DPSO 算法求解燃气表计量首次检定最优调度策略及最小完工时间。结果表明,调度优化算法可有效缩短燃气表计量首次检定最小完工时间,提高燃气表多工位多项目检定效率与设备使用效率。下一步将继续深化燃气表计量检定线调度技术研究,将调度技术应用于燃气表后续检定、使用中检查等订单式需求中,提高燃气表计量检定线使用灵活性、通用性。

参考文献

- [1] 高柱荣. 温压补偿智能燃气表的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24):158-162.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 膜式燃气表: GB/T 6968-2019[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2012.
- [3] 国家市场监督管理总局. 膜式燃气表: GB/T 6968-2011[S]. 中国机械工业联合会, 2019.
- [4] 陈晓鹏. 基于微弱信号周期检测的膜式燃气表间接计量终端设计[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [5] 苗成强. 基于卷积神经网络的燃气表码字识别系统的设计与实现[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [6] 沈甲甲. 基于数字图像处理的燃气表读数识别算法[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [7] ZHU W, XU M, FANG M, et al. Variable ratio threshold and zero-crossing detection based signal processing method for ultrasonic gas flow meter[J]. Measurement, 2017, 103: 343-352.
- [8] NOUIRI M, BEKRAR A, JEMAI A, et al. An effective and distributed particle swarm optimization

algorithm for flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(3): 603-615.

- [9] 李文娟. 改进粒子群优化算法的云计算任务调度策略[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10):55-59.
- [10] 徐雪松, 曾智, 邵红燕, 等. 基于个体-协同触发强化学习的多机器人行为决策方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5):66-75.
- [11] BORREGUERO S T, PULIDO R, GARCIA S A, et al. Flexible job shop scheduling with operators in aeronautical manufacturing: A case study[J]. IEEE Access, 2018, 6: 224-233.
- [12] 翟亚飞, 樊坤, 王蒙, 等. 求解混合多处理机任务作业车间调度的改进粒子群算法[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(9): 2107-2113.
- [13] 卢茜. 基于模拟退火禁忌遗传算法的并行测试任务调度[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [14] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines [J]. Computing, 1990, 45(4): 369-375.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [C]. 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation. IEEE, 1997, 5: 4104-4108.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]. Proceedings of ICNN' 95-International Conference on Neural Networks, IEEE, 1995, 4: 1942-1948.

作者简介

姚懋欣, 硕士研究生, 主要研究方向为制造工程智能化检测与仪器。

刘桂雄(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为先进传感与仪器研究。

E-mail: megxliu@scut.edu.cn