考虑设备转运与购置决策的多车间协同整修调度研究

魏陆炀

众言科技股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ASDS.2026100011

摘　　要： 针对多车间整修中工序衔接、移动设备竞争与设备增购的耦合问题，建立以最大完工时间最小化为目标的资源约束调度模型。将五车间重复工艺展开为27道工序，描述同类设备并行、异类设备协同、分项释放及跨车间转运。在同步开工和设备能力线性叠加假设下，分别采用粒子群、遗传和蚁群算法求解单班组、双班组与预算购置情景。三种方案工期分别为159574、82180和54360 s，后两者较前一情景缩短48.50%和33.85%。购置方案在50万元预算内增购9台设备，支出48万元。抛光与检测设备是基准情景的紧缺资源，增购后末完工车间由C转为E。明细核验支持排程可行性，但尚不能证明全局最优或算法优越性。研究为可分工程量和移动设备共享条件下的整修规划提供了分析方法。

关 键 词： 多车间整修；资源约束调度；设备转运；设备购置；启发式算法

Multiworkshop Maintenance Scheduling Considering Equipment Transfer and Acquisition Decisions

Wei Luyang

Zhongyan Technology Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract: This study examines the interaction between operation precedence, mobile equipment sharing, and equipment acquisition in multiworkshop maintenance. A resource-constrained model is developed to minimize makespan. A five-workshop case is expanded into 27 operations, incorporating parallel processing by same-type equipment, joint completion by different equipment types, separate equipment release, and interworkshop transfer. Under synchronized starts and linearly additive capacities, particle swarm optimization, a genetic algorithm, and ant colony optimization are applied to single-team, two-team, and acquisition-enabled scenarios, respectively. The resulting makespans are 159574, 82180, and 54360 s, with successive reductions of 48.50% and 33.85%. Nine machines are purchased for CNY 480000 within a CNY 500000 budget. Polishing and sensing equipment are scarce in the baseline scenario, and the last-finishing workshop shifts from C to E after acquisition. Record-level checks support schedule feasibility but do not establish global optimality or comparative algorithm superiority. The approach supports maintenance planning with divisible workloads and shared mobile equipment.

Keywords: multiworkshop maintenance; resource-constrained scheduling; equipment transfer; equipment acquisition; metaheuristic algorithms

引言

集中整修中，清洗、灌装、抛光和检测设备需在多个车间之间共享。局部工序提前完成，未必能够缩短总体工期，后续作业仍可能等待紧缺设备或受转运限制。因此，整修计划需要同时确定工序起止时间、设备指派与释放时刻，以及新增设备的配置方向。

资源约束项目调度关注工序先后与有限资源分配。Hartmann 和 Briskorn[1]、Ding 等[2]归纳了该类问题的扩展，多项目调度进一步讨论多条任务链的资源竞争[3]。柔性作业车间调度则重点协调工序排序与机器选择[4]。本文以工序链和共享资源为建模基础，借鉴相邻调度研究处理设备选择与移动约束。

运输约束是模型落地时不可省略的环节。Yan 等[5]研究了有限运输条件下的调度与解码，Berterotti è re 等[6]将运输资源显式纳入柔性作业车间模型。张国辉等[7]讨论了有限 AGV 资源配置与调度之间的联系。上述研究主要涉及工件或物料在机器之间流转，本文则以作业对象位置固定、设备跨车间移动为研究对象，并允许多台同类设备共同处理可分工程量。二者均需协调加工与移动，但资源流向

作者简介：魏陆炀，众言科技股份有限公司高级大数据分析师，研究方向为智能决策与数字化管理。主持多项企业自研项目，相关成果包括软件著作权7项、专利5项，发表学术论文3篇。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

和持续时间形成机制不同。

Fan 等 [8] 针对有限辅助模块下的可重构机床调度，设计了专门的编码、解码与局部搜索策略。Chen 等 [9] 进一步研究有限运输资源下的动态重调度。本文聚焦确定性计划阶段，通过设备容量、驻地和预算变化构造资源情景，分析资源配置与排程的耦合，并以作业明细和工期下界检验结果。

一、数据来源与作业机制

（一）算例与工序展开

本文采用包含五个车间和两个班组配置的确定性整修调度算例。输入由工序流程、班组配置和车间距离三类数据构成，包括工程量、设备效率、数量、移动速度、购置单价及位置间距离。算例用于检验调度模型与配置方案，不将计算结果直接解释为企业实际生产绩效。

A、B、D、E 车间分别含3、4、6、3道工序；C 车间在C1、C2之后重复三轮 C3、C4、C5，展开为11道工序。合计27道工序、41组“工序—设备类型”需求。各车间内部顺序固定，车间之间无预设工序依赖。

（二）设备资源与时间口径

两个班组的初始设备数量相同，每组16台，配置见表1。

表1：初始设备配置与购置单价

Table 1: Initial equipment capacities and unit prices

设备类型	班组1/台	班组2/台	单价/万元
自动化输送臂	4	4	5.0
工业清洗机	5	5	4.0
精密灌装机	5	5	3.5
自动传感多功能机	1	1	8.0
高速抛光机	1	1	7.5

设备移动速度均为2 m/s。班组1、2距 A 车间分别为400、500 m，首次到达需200、250 s。作业后设备位置更新为当前车间，据此计算下一次转运，同车间转移时间为零。

工程量与单台效率分别以 m³ 和 m³/h 计量，持续时间换算为秒后向上取整，超过24 h 的工期按累计小时表示。两个班组原有配置均含高速抛光机，各情景将其计为既有设备。

（三）模型假设与适用边界

工程量和设备效率确定，同类设备均分工程量、能力线性叠加，适用于作业面可分割且相互干扰较弱的情况。异类设备各自完成工序规定的全部工程量，不能将不同类型效率相加。

选定设备在同一工序内同步开工，分项作业结束后立即释放；后继工序须等待前序全部需求类型完成。同步开工是解码策略的附加限制，未覆盖异类设备异步开工的全部排程。

作业不可抢占，单台设备不能同时执行多项作业或边移动边加工。设备可在自身作业结束后提前转运。不考虑故障、道路容量、人员班次和安装准备；新增设备在任务开始前已于所属班组驻地可用，购置费用仅含设备单价。

二、设备配置与调度模型

（一）变量与工序持续时间

设 I、W、K 分别为工序、车间和设备类型集合。工序 i 的需求类型、工程量与类型 k 单台效率分别为 K_i、Q_i、v_{ik}；E_k 为可用设备集合，n_{ik} 为调用数量，取1至可用数量之间的整数。S_i、C_i 分别为工序开始与整体完成时刻，F_{ik} 为类型 k 设备的释放时刻。

$$\mathrm{T_{ik}}=\mathrm{ceil}\left(\frac{3600\mathrm{Q_i}}{\mathrm{n_{ik}v_{ik}}}\right),\qquad \mathrm{F_{ik}}=\mathrm{S_i}+\mathrm{T_{ik}} \tag{1}$$

$$\mathrm{C_i}=\max_{\mathrm{k}\in\mathrm{K_i}}\mathrm{F_{ik}},\qquad \mathrm{minC_{max}}=\min\max_{\mathrm{i}\in\mathrm{I}}\mathrm{C_i} \tag{2}$$

其中，ceil 表示向上取整。设备数量决定加工持续时间，工序在各需求类型全部完成后结束。设备实际占用区间为 S_i 至 F_{ik}，先完成的类型可转向其他车间，无需等待至 C_i。

（二）优先关系与设备路径约束

记 P_i 为工序 i 的直接前序集合，固定流程要求：

$$S_i \ge C_j,\quad j\in P_i \tag{3}$$

每台设备形成按执行次序排列的作业路径。设设备 e 从位置 a 至 b 的距离为 d_{ab}、速度为 u_e、耗时为 τ_{abe}。路径中相邻工序 i、j 须满足：

$$\tau_{abe}=ceil\left(\frac{d_{ab}}{u_e}\right),\quad S_j\ge F_{i,k(e)}+\tau_{w_iw_je} \tag{4}$$

其中，k(e) 为设备类型，w_i、w_j 为工序所属车间。首项作业以班组驻地和零时刻替代上一位置及释放时刻。每台设备在同一工序内只分配一次，类型须匹配，参与设备数须等于 n_{ik}，由此保证数量、初始可达性和作业运输不重叠。

（三）预算约束下的资源扩展

设 b 为班组，N_{kb}、z_{kb} 为既有和新增数量，p_k 为单价，B 为预算。新增设备沿用既有设备的效率与移动规则；固定资源情景令 z_{kb} 为零，购置情景联合选择数量及路径：

$$\sum_{k\in K}\sum_{b}p_kz_{kb}\le B,\quad z_{kb}\in Z_{\ge0} \tag{5}$$

$$N_k(z)=\sum_b(N_{kb}+z_{kb}),\quad 1\le n_{ik}\le N_k(z) \tag{6}$$

取 B=500000元。模型仅最小化总工期，支出作为约束；工期较短的预算可行方案不等于全寿命成本最低或投资回报最佳。

（四）用于解释解质量的下界

给定配置下，类型 k 的理想累计设备工时记为 H_k。忽略运输、等待和取整增加量，得到资源负荷下界：

$$H_k=\sum_{i:k\in K_i}\frac{3600Q_i}{v_{ik}},\quad L_R=\max_k ceil\left(\frac{H_k}{N_k}\right) \tag{7}$$

另将全部同类设备分别供各车间独占，并忽略运输与外部竞

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

争，按固定工序链累加最短加工时间，得到链长下界 L_P。取 L=max{ L_R， L_P }，则任何可行方案工期 C 均不小于 L。本文用（C − L）/L 表示相对下界的偏离程度。该值用于刻画可证明下界与当前方案之间的距离，不是已知真实最优解时的实际最优差距。购置情景的下界只对其选定配置成立，不能用于证明该购置组合在全部预算可行组合中最优。

三、求解策略与计算设置

（一）可行排程的串行生成

固定资源情景采用27个工序优先级基因和41个调用数量基因，总维度68。数量基因 g 位于 [0，1]，映射为：

$$n_{ik} = min\left\{N_k, 1 + floor\left(g_{ik} N_k\right)\right\} \tag{8}$$

其中，floor 表示向下取整。先从前序已排定的工序中选优先级最高者，再逐类型选取所需数量的最早可达设备。设 F_e、l_e 为设备释放时刻和当前位置，E_i 为所选集合，则：

$$A_{ie} = F_e + \tau_{l_e w_j e},\quad S_i = max\left\{\underset{j\in P_i}{max}\, C_j, \underset{e\in E_i}{max}\, A_{ie}\right\} \tag{9}$$

无前序时，式（9）的前序完成项取零。排定后更新设备释放时刻、位置及工序完成时刻。“已排定”指完成时刻已确定，不要求先排定作业在时间上先完成，车间仍可并行。设备任务按现有路径尾部追加，通过时间递推保证可行，但未搜索全部空闲插入区间。

（二）搜索方法与参数

单班组采用粒子群优化 [10]，以个体和群体历史最优更新优先级及调用数量，并设置递减惯性权重、速度截断和随机重置。双班组采用遗传算法，通过锦标赛选择、混合或均匀交叉、随机扰动与精英保留搜索排程。

购置情景采用蚁群搜索，分别构造设备购置、工序顺序与设备调用数量。购置阶段仅从剩余预算允许的候选项中选择；工序选择同时参考信息素和剩余工序链的启发信息，随后由同一时间递推规则完成设备指派。按方案工期给予信息素反馈并进行挥发，使预算配置与调度效果共同影响后续构造。信息素协同搜索的基本机制见文献 [11]。

参数见表2，主要随机生成器种子均为2026。各情景采用已有单次运行，未进行多随机种子或同资源条件的算法对照，不能推断均值、方差及统计显著性。

表2：算法计算设置

Table 2: Computational settings

情景与算法	规模与轮数	主要参数
单班组 PSO	90个粒子；260次	惯性权重0.90→0.40；学习因子均1.80；速度上限0.25；重置概率0.01
双班组 GA	140个个体；320代	精英6个；交叉概率0.88；变异概率0.055；扰动尺度0.12
购置 ACO	90只蚂蚁；220次	信息素指数1.2；启发指数2.5；挥发系数0.18；精英权重2.0

（三）结果核验规则

从设备作业明细逐条检查起止差与记录时长是否一致，按工序与设备类型重新聚合调用数量，并检查工程量是否完成；按车间检查后继工序不早于前序整体完成；按设备路径检查前一作业结束、转运与下一作业开始的时间衔接；最后核对新增设备、购置支出及最大完工时间。收敛日志仅用于识别单次运行首次达到最终值的轮次，曲线后段平稳不作为全局最优或跨运行稳定性的证明。

四、算例结果与分析

（一）单车间时间核算

班组1独立承担 A 车间时，设备到达需200 s。A1投入5台灌装机和4台输送臂，处理300 m³，两类设备均需1080 s；A2投入1台抛光机和5台清洗机，处理500 m³，分别需18000、1440 s；A3由1台传感设备处理500 m³，需18000 s。总工期为200 + 1080 + 18000 + 18000=37280 s，即10:21:20。

在严格串行、线性能力和无故障假设下，各工序投入全部可用同类设备，达到加工时间下界，故该单车间结果可证明为条件最优，但不能与五车间情景直接比较降幅。

（二）多车间资源情景比较

表3中，单班组16台设备的工期为159574 s（44:19:34）；双班组32台设备时为82180 s（22:49:40），缩短48.50%；增购后41台设备时为54360 s（15:06:00），较双班组缩短33.85%，较单班组累计缩短65.93%。

表3：五车间情景的工期与下界

Table 3: Makespans and lower bounds across scenarios

情景	工期 /s	下界 /s	相对下界偏离 /%	较前情景缩短 /%
单班组	159574	135000	18.20	—
双班组	82180	67500	21.75	48.50
双班组增购	54360	39120	38.96	33.85

三情景链长下界为93734、46867、26675 s，均低于资源负荷下界。当前工期与下界存在间隔，不能称为全局最短。不同情景的配置与搜索对象同时变化，偏离幅度不宜用于比较算法优劣。

情景差异反映资源条件与求解方案的联合结果，说明本算例存在通过共享和增购压缩工期的可行途径，但不能单独识别资源扩容的净效应。

（三）设备负荷与车间完工差异

单班组抛光设备累计作业135000 s，利用率84.60%；传感设备累计作业117360 s，利用率73.55%。利用率按加工时间与总工期之比计算，不含转运。两类设备各仅1台且被多个车间反复调用，其负荷与占用可解释部分等待，其他设备空闲不能替代其能力。

表4显示，C 车间在前两情景均最后完成，重复工序链多次竞争抛光和检测设备。A 车间在单班组多车间方案中于140899 s结束，显著晚于独占设备时的37280 s，反映跨车间共享引起的等待。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

表4：各车间完成时刻

Table 4: Workshop completion times in seconds

车间	单班组 /s	双班组 /s	双班组增购 /s
A	140899	60607	41405
B	64664	55592	52680
C	159574	82180	46730
D	132914	67752	52280
E	31604	75957	54360

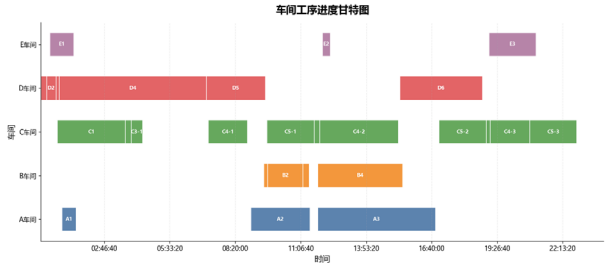


图1 双班组条件下的车间工序进度

Figure 1 Workshop operation schedules with two teams

E 车间在单班组时最早完成，双班组时却延后至75957 s。总体工期缩短不保证每个车间都提前，因为目标仅约束最大完工时间。图1呈现双班组工序进度，空档受设备可用性与运输衔接共同影响。

（四）设备购置方案与瓶颈变化

表5的方案向班组1、2分别增购7、2台设备，共9台、48万元，使用预算的96%。余款2万元低于最低单价3.5万元，既定组合无法继续增购，但不代表已达到成本与工期的最佳权衡。

表5：新增设备的数量与支出

Table 5: Equipment acquisition quantities and expenditure

设备类型	班组1/ 台	班组2/ 台	合计 / 台	支出 / 万元
自动化输送臂	2	0	2	10.0
工业清洗机	1	1	2	8.0
精密灌装机	2	0	2	7.0
自动传感多功能机	1	0	1	8.0
高速抛光机	1	1	2	15.0
合计	7	2	9	48.0

抛光设备从2台增至4台，传感设备从2台增至3台，其余类型各增2台。C 车间提前至46730s，较双班组减少35450s；E 车间以54360s 成为末完工车间。图2显示 C 车间重复工艺跨度缩小，E 车间末端检测决定当前方案结束时刻。该变化是排程观察，不能替代增购边际效应试验。

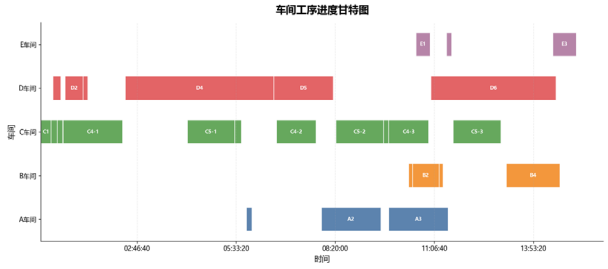


图2：增购设备后的车间工序进度

Figure 2: Workshop operation schedules after acquisition

原有与新增设备累计作业约101.8、39.4 h。双班组增购后，设备累计运输时间由66200 s 增至99105 s，但总工期下降。多台设备可并行移动，累计运输时间不能直接从工期扣除；实施时仍需评估相应运输能力。

（五）可行性核验与收敛记录

三方案分别含96、182、316条设备作业记录，均覆盖27道工序，未发现设备重叠、转运时间不足或后继提前开工。按单价与数量复算购置费为480000元。

复算发现购置情景 D4 由3台抛光机处理1500 m^3，单台效率120 m^3/h，理论耗时15000 s，记录为15001 s，源于浮点计算后向上取整。该保守误差不影响工程量完成，保留原作业区间及54360 s 工期，其余分项时长与式（1）一致。

粒子群、遗传和蚁群分别在第73次、第75代和第48次首次达到最终报告值，此后在设定轮数内未改善。这说明单次搜索趋于平台，尚不足以评价初始化敏感性或跨运行稳定性。

五、讨论

设备增配应结合工艺位置与负荷判断。抛光和检测被多车间反复调用，增加普通设备未必能消除排队。采购前应识别紧缺类型与可替代性，再用完整排程评价候选组合。增购后末完工车间从 C 转为 E，提示管理重点需随配置调整；若车间恢复生产期限不同，应加入完工上限或延期惩罚。

线性能力、同步开工和确定性运输假设限制了结果外推。现场存在作业面拥挤、协同损耗或道路容量约束时，设备翻倍未必使工时减半。应用前应由作业记录校准数量与效率关系，并考虑准备时间和安全裕量，不能直接套用本算例的工期降幅。

研究尚缺少同一资源情景下的多算法等计算预算比较，也未开展多随机种子试验、预算梯度与效率扰动分析。因此，不能报告统计显著优势或普遍适用的最优购置比例。后续可采用混合整数规划或约束规划验证小规模实例，在固定资源条件下重复比较算法，再分析资源变化的净效应。对于设备故障和订单取消，可借鉴动态重调度研究[9]；人员因素、能源消耗与运行韧性亦应纳入扩展评价[12]。

六、结论

本文将工序先后、同类设备并行、异类协同、分项释放和跨车间转运纳入统一调度模型，以设备集合变化描述班组共享及预算购置，得到可落实至设备起止时刻的计划。

在给定假设与单次搜索下，单班组、双班组和增购方案工期为159574、82180、54360 s，后两者较前情景缩短48.50%、33.85%，增购支出48万元满足预算。基准情景的抛光和检测设备需重点关注，增购后末完工车间由 C 转为 E。明细核验支持可行性，下界比较则表明尚缺全局最优证明。

该方法可用于计划阶段比较设备配置方案。实际采购仍需结合现场约束、重复试验和同情景基准比较，补充解质量与长期价值的证据。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

参考文献

[1]HARTMANN S, BRISKORN D. An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 297(1): 1-14.

[2]DING H, ZHUANG C, LIU J. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem[J]. Automation in Construction, 2023, 153: 104958.

[3]GÓMEZ SÁNCHEZ M, LALLA-RUIZ E, FERNÁNDEZ GIL A, et al. Resource-constrained multi-project scheduling problem: A survey[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 309(3): 958-976.

[4]DAUZÈRE-PÉRÈS S, DING J, SHEN L, et al. The flexible job shop scheduling problem: A review[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 314(2): 409-432.

[5]YAN J, LIU Z, ZHANG C, et al. Research on flexible job shop scheduling under finite transportation conditions for digital twin workshop[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 72: 102198.

[6]BERTEROTTIÈRE L, DAUZÈRE-PÉRÈS S, YUGMA C. Flexible job-shop scheduling with transportation resources[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 312(3): 890-909.

[7] 张国辉 , 蔡翌豪 , 李志霄 , 等 . 考虑有限 AGV 运输资源的柔性作业车间调度研究 [J]. 中国机械工程 ,2025,36(8):1811-1823.

[8]FAN J, ZHANG C, LIU Q, et al. An improved genetic algorithm for flexible job shop scheduling problem considering reconfigurable machine tools with limited auxiliary modules[J].Journal of Manufacturing Systems, 2022, 62: 650-667.

[9]CHEN R, WU B, WANG H, et al. A Q-Learning based NSGA-II for dynamic flexible job shop scheduling with limited transportation resources[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 90: 101658.

[10]KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia: IEEE, 1995, 4: 1942-1948.

[11]DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.

[12]DESTOUET C, TLAHIG H, BETTAYEB B, et al. Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 67: 155-173.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License