

面向多车型混线生产的汽车柔性装配系统设计与优化

葛晶

正德职业技术学院, 江苏 南京 211106

DOI:10.61369/ME.2026070033

摘 要 : 多车型共线装配的难点不在单站自动化水平,而在车型差异被逐级放大的环节。以燃油、混动与纯电车型同线生产为对象,梳理工时方差、物料品种膨胀与参数追溯不足三类冲突,提出车型族的划分准则与混产差异度指标,给出由执行层、控制层、决策层及车型身份数据主线构成的系统架构与设计要点;将优化问题表述为节拍约束下负荷均衡、投产切换损失与在制品三类目标的联合求解,并说明数字孪生的工时校准与序列预演职能。文中算例为虚拟数据。

关 键 词 : 混线生产; 柔性装配; 装配线平衡; 投产排序; 数字孪生

Design and Optimization of Automotive Flexible Assembly System for Multi Vehicle Hybrid Production

Ge Jing

Zhengde Vocational and Technical College, Nanjing, Jiangsu 211106

Abstract : The difficulty of multi vehicle co line assembly lies not in the level of single station automation, but in the step where the differences between vehicle models are gradually amplified. Taking the production of fuel, hybrid, and pure electric vehicles on the same line as the object, this paper sorts out three types of conflicts: variance of working hours, expansion of material varieties, and insufficient parameter traceability. It proposes the criteria for dividing vehicle families and the index of difference in mixed production, and provides the system architecture and design points composed of the execution layer, control layer, decision layer, and vehicle identity data main line; Expressing the optimization problem as a joint solution of load balancing, production switching loss, and work in progress objectives under beat constraints, and explaining the work hour calibration and sequence rehearsal functions of digital twins. The examples in the text are virtual data.

Keywords : mixed line production; flexible assembly; assembly line balance; production sorting; digital twin

引言

单一车型长周期量产的生产组织方式已难以维持。同一条总装线要同时承担燃油、混动与纯电车型,车身尺寸、底盘结构与装配内容差异显著,刚性线以停线换型应对,代价直接体现为节拍损失。柔性装配要解决的,是把车型差异收敛到可控范围。下文先梳理研究进展与本文定位,再展开冲突诊断、系统架构、关键设计、优化模型与实施边界。

一、相关研究进展与本文定位

已有研究沿三条路径展开。工艺规划一侧关注既有线体如何容纳更多车型:陈伯超等从精益组织、数字化仿真与设备共用性角度归纳多能源乘用车总装的规划要素,孙鑫给出内饰共线、底盘分线后自动合流的方案^[1]。此类研究多依赖经验,缺少可计算的混产适配性指标。

计划优化一侧以模型与算法为主:张炜等建立订单分解为主、投产排序为从的主从联合优化模型,论证联合建模优于分别优化;黄鹏等以平滑指数与产能为目标、缓存区数量为变量寻

优。两项工作均将设备、工装与信息系统视为给定,未讨论其耦合关系。

数字化一侧,黄涵钰等构建数据驱动的产线数字孪生系统,验证虚拟调试可行,其对象为通用离散制造产线,未针对总装混线细化校准对象;钟志良等从设计、工艺、物流、管理四个维度建立总装防错体系^[2]。总体看,方案类研究短于定量判据,模型类研究短于工程约束,框架类研究短于场景适配。本文将其衔接为一条设计链:以混产差异度作前置判据,以工艺、工装、物流与信息耦合为设计对象,以联合优化与孪生校准为落地。

作者简介:葛晶(1984.12-),男,汉族,江苏省南京市人,学历:本科,高级工程师,研究方向:智能制造。

二、混线生产的冲突与适配性评估

（一）三类冲突

车型差异在总装线上并非均匀分布。内饰段工位内容相近，变化集中于拧紧点位与卡扣位置；底盘合装段差异最大，燃油车装油箱与排气系统，纯电车型装电池包与高压线束，混动车型两者兼备；加注与检测项目随动力形式改变。

工时方差不均使节拍失去稳定性。节拍由耗时最长的车型决定，其余车型在该时段内等待，而耗时车型未必是产量主力，为其拉长的节拍须由全部车型共同承担；平衡若仅按平均工时排布，瓶颈将随车型切换转移。

物料品种数成倍放大。混线后线边零件按“车型 × 配置”矩阵展开，品种迅速膨胀，料架面积、拣配工作量与错装风险同步上升，复杂度由此转移至操作者一侧。

参数与追溯粒度同样不足。扭矩值、加注量与检测项目随车型变化，依靠纸质卡片或人工核对，换型频繁时出错概率上升；质量记录须落到具体车辆与工序，否则难以区分问题源于零部件、工艺还是装配动作。

（二）车型族的界定与混产差异度

混线排产的调度单元不宜取单个车型编码。定义车型族为动力形式、底盘主结构相同且各工位标准作业工时差异处于给定范围内的车型集合，划分依据依次为动力形式、底盘主结构与装配工时相似度。族内换型仅涉及配置差异，族间换型涉及工装与设备参数变更，两类代价的差异可在换型损失函数中体现，排序对象应为车型族。

判断一条线是否适合混产，可先算混产差异度。设工位集合 J、车型族集合 K，车型族 k 在工位 j 的单台作业时间为 t_{jk}，则

$$\Delta = \sum_j (\max_k t_{jk} - \min_k t_{jk}) \tag{1}$$

$$D = \Delta / (|J| \cdot \max_k t_{jk}) \tag{2}$$

D 越接近 0，工位内容对车型越不敏感；D 越大，所需柔性手段越多。工时变异系数 $CV_j = \sigma_j / \mu_j$ 显著偏高的工位应设为浮动工位。虚拟算例取四个工位与三个车型族，见表 1。

表 1 虚拟算例的工位—车型族作业时间（min）

车型族	工位1	工位2	工位3	工位4
A（燃油）	8	12	10	9
B（混动）	9	14	11	10
C（纯电）	7	10	9	13

由表 1 可得 $\Delta=12\text{ min}$ ， $D=12/(4\times14) \approx 0.21$ 。加权平均负荷均未超过节拍 12 min，但工位 2 在车型族 B 上的负荷达 14 min，超出节拍约 16.7%。仅以平均负荷为约束不足以描述混线可行性，须允许一定比例超载并由浮动工位吸收， $\beta=(\max t_{jk}-C)/C$ 即为浮动工位的设计依据。

三、柔性装配系统的总体架构

（一）三层结构与数据主线

系统在纵向上分为三层：执行层含输送系统、工位设备与线边料架；控制层负责安全回路、控制器逻辑与车型识别；决策层

承担排产、排序、缓存策略与异常应对。横向为车型身份数据主线：车型信息在焊装下线时写入载码体，各工位读取一次，设备参数调用、作业指导显示与质量记录归集均以该标识为键。主线缺失，通用工装与多能工位便无处附着，陈伯超等^[1]亦将其列为共线生产的先决条件。

（二）识别方式与业务逻辑分界

识别方式宜按层级区分：承载滑板与托盘循环使用且处于油污、振动环境，适合可读写射频载码体；零件与总成一级可采用二维码，成本更低，但要求贴附面可见、取像角度留有余量。控制层不宜承载业务逻辑：车型与参数的对照关系写入控制器，修改一次即需停线重新下载，置于制造执行系统一侧则仅影响数据层。

（三）布局形态与安全策略

直线型布置便于统一节拍，但两支路难以互借产能；环形或闭合布置便于设置旁路与返修工位，代价是输送投资与占地上升。差异集中于底盘段时直线加短支路即可，散布于多个环节时闭合布置才值得投入。安全策略须随车型切换：各车型在同工位触发的位置与动作不同，安全区域应按车型调用配置。

四、关键设计

（一）共性工序共线、差异工序分流再合流

装配内容相近的内饰等工序保持共线，底盘段按动力形式分流后再合流。设计重点是分流段数量、位置与合流顺序：分流前进入两支路的车辆构成已定，合流须按原序列恢复，要求两支路通过时间差可控；顺序一旦打乱，后续按车排序的物料与参数调用全部失效^[3]。可行做法是在合流点前设序列校验与缓存，把偏差吸收在局部。

（二）载体与工装通用化的边界

输送载体采用通用底架，依靠车型适配块、可调定位销与快换结构换型，换型动作尽量移至工位之外。适配块逐层叠加会累积定位误差，传导至合装环节表现为间隙与面差波动；兼容多车型需在同一工位备置数套适配件，存放与状态管理不到位时，换型反而慢于专用工装。

（三）缓存配置与线边配送

关键位置的缓存数量既决定抗扰动能力，也决定占地面积：不足则波动直接传导为停线，过量则推高在制品并扩大异常追溯范围。黄鹏等以平滑指数与产能为目标寻优缓存区数量，思路可移植至总装混线，但模型须补充换型停机与缺料等待事件，否则结果偏于乐观^[4]。线边库按车型族分区，按车配置的零件前移至物流环节拣选、以随行料架送至工位，使工位只承担装配而不进行选择，这是抑制错装最直接的手段。

（四）工位侧防错与参数随车

参数随车下发后仍需物理确认。加注环节以机械防错最可靠，不同介质配置不同接口，插错在物理上不可能发生；拧紧环节将程序号与车型绑定，同一位置不允许多套程序同时开放，可省去大部分人工确认。钟志良等的四维度防错体系中，结构防错、扫码防错与智能化拧紧与本节最为相关。下线检测项目按车

型调用，其节拍须纳入整线核算，否则装配完成后将堵塞于检测出口。

（五）换型损失的内外分解

需停机方能完成的属内部换型，可在停机前完成的属外部换型；工装准备、料架更换与程序校验应尽可能前置至线外，可外置的动作越多，停机时间越短。该思路对新增车型导入同样适用：首台车试装若与量产车错峰安排，后续换型代价仅剩工装切换本身。

五、多目标优化模型与求解

（一）目标函数与约束条件

以车型族为调度单元，设 n 个车型族与 m 个工位。车型族 k 的需求量为 d_k ，任务 i 在车型族 k 下的作业时间为 t_{ik} ； x_{ij} 为 0-1 变量，表示任务 i 是否分配至工位 j ； s_p 表示投产序列第 p 位的车型族。工位 j 的加权负荷见式 (3)。

$$L_j = \sum_k (d_k / \sum_k d_k) \cdot \sum_i t_{ik} \cdot x_{ij} \quad (3)$$

目标取三项：工位负荷平滑指数、切换损失与线边在制品量，前两项见式 (4)、式 (5)， τ 为换型时间，族内小、族间大。

$$SI = [(1/m) \sum_j (L_j - \bar{L})^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$T_{\text{setup}} = \sum_p \tau (s_p - 1, s_p) \quad (5)$$

综合目标为 $\min F = w_1 \cdot SI + w_2 \cdot T_{\text{setup}} + w_3 \cdot WIP$ ， WIP 为线边在制品量。约束条件为： $\sum_j x_{ij} = 1$ （任务唯一分配）； $L_j \leq C$ （加权平均负荷不超过节拍）； $\sum_i t_{ik} \cdot x_{ij} \leq (1 + \beta) C$ （峰值负荷在浮动工位吸收范围内）； $\sum_p 1(s_p = k) = d_k$ （各车型族出现次数等于需求量）； $\sum_j (j \leq l) x_{ij} \geq \sum_j (j \leq l) x_{i'j}$ （ i' 为 i 的紧前任务）。

（二）求解思路与目标权衡

混线平衡与投产排序相互耦合，分别优化易落入局部最优。合理路径是将任务分配与投产序列纳入同一模型，以启发式规则或遗传类算法求取折中解集，再结合订单结构选点，张炜等的主从联合优化即为一例^[6]。作业时间以固定值替代分布，随机波动终将以停线等待返还，模型精度的影响大于算法选择。三项目标存在替代关系：追求负荷均衡会压缩序列的排列自由度，平滑指数下降通常伴随切换次数上升；缓存加大可吸收波动，代价是在制品与面积增加。求解结果为一组帕累托解，权重按订单结构与瓶颈位置确定。

（三）数字孪生驱动的闭环校准

数字孪生在本框架中承担两项职能。一是工时分布校准：虚拟验证可把逻辑错误拦截在现场调机之前，上线后按车型族采集各工位实际节拍与超载持续时间，更新 t_{ik} 的均值与方差，据此重算 L_j 、 SI 与浮动工位设置。二是投产序列预演：在孪生环境中对候选序列做对比试验，比较超载时间、缓存占用与切换次数。所涉数据项包括工位节拍与超载时长、停线与故障码、缓存区在制品数量、物料到位时刻及拧紧与加注参数。采集口径不统一或关键工位数据缺失，孪生模型将退化为三维演示。

六、柔性化的边界与实施策略

（一）工装通用化的取舍

通用化以换型便利换取定位精度与作业效率。精度敏感段应保留专用定位，通用程度宜按工位逐段判定，判断是所引入误差是否仍在公差与节拍余量之内。

（二）换型损失与订单约束

换型时间无法压缩至零，在单次换型上持续投入的边际收益有限。更有效的方式是对订单结构做聚类，将配置相近的车型成批安排，以排序消化换型损失。上层订单承诺方式直接传导为线体的切换频次，按小批量交错下单时，排序算法只能部分弥补。

（三）信息与物料系统成本

柔性带来的复杂度最终转入物料与信息系统。线边品种与随车参数越多，数据治理与系统集成投入越大；该部分投入不足，前端节约的投资将以错装、返修与停线返还。

（四）人员能力约束

工位内容随车型变化，需培养跨车型作业的多能工，作业指导按车型族编制更便于掌握。人员技能结构跟不上，设备柔性再高也无法转化为产出。

（五）分阶段实施策略

柔性改造常与量产交付并行，整线一次性停线改造风险很高。较稳妥的路径是先在一个车型族上验证数据链与工装方案，跑通后向其他族推广，改造窗口分散至非生产时段。

七、结语

多车型混线装配的柔性来自工艺分流、通用工装、缓存与配送、数据主线几项要素的配合，单项拔高均不成立。设计顺序宜从车型身份数据主线入手，再定工艺布局与工装方案，之后以联合优化定任务分配与投产序列，并以孪生环境校准工时分布与缓存配置。

本文属系统框架层面的研究，模型为工程简化形式，未纳入人员疲劳累积、订单动态扰动与设备突发故障的影响；算例为虚拟数据，仅用于说明指标计算过程，实际应用需代入实测工时；方法适用于新建线规划与既有线改造，对节拍余量与工位空间均已受限的老线，调整余地有限。后续可在人员波动下的平衡仿真、订单动态扰动下的在线重排序、老线柔性改造成本量化评估三个方向继续展开。

参考文献

- [1] 陈伯超，黄释金，谢成冬，等. 多能源乘用车总装工艺规划分析 [J]. 汽车工艺与材料，2024(7): 23-27.
- [2] 钟志良，宋卫涛，张瑞军. 汽车总装防错体系研究 [J]. 汽车工艺与材料，2024(7): 28-33.
- [3] 孙鑫. 柔性混流装配线在智能工厂中的研究与应用 [J]. 时代汽车，2024(13): 19-21.
- [4] 黄鹏，唐火红，何其昌，等. 混流汽车装配线缓存区配置优化 [J]. 合肥工业大学学报（自然科学版），2017，40(9): 1168-1171, 1268.
- [5] 张炜，王少杰，甘雅文，等. 面向柔性定制的并行不等效客混装线生产计划主从联合优化 [J]. 机械工程学报，2020，56(22): 24-37.