

机电产品装配生产线平衡优化与效率提升探讨

王 玲

浙江春风动力股份有限公司 浙江 杭州 311100

【摘要】：机电产品装配生产线常因工序工时离散、物料到位不稳和检验返修回流出现局部拥塞，此时增加人员投放反而会扩大等待与搬运规模。装配任务按工序单元拆分后，以目标节拍核算负荷，围绕瓶颈工位重组操作内容，并以小容量缓冲、定时配送和质量反馈来约束工位间传递。当作业时间接近目标节拍时，在制品不会持续堆积；而设备故障、缺料或一次合格率下降时，投放速度则应根据负荷状况重新调整。该做法适用于产品型号相对稳定、工艺路线清晰的离散装配场景。

【关键词】：机电产品；装配生产线；线平衡；节拍；生产效率

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.012

机电产品装配由供给、定位、紧固、检测和包装等工序连续组成，任一工位的实际作业时间超过生产节拍，后续工位便会待料，前序载具则在工位间滞留。产品换型、熟练度差异及检具响应时间会放大这种偏差，使日产计划难以转化为稳定产出。线平衡的要点不在于平均分配人员，而在于识别限制流动的单元，依据工序先后关系和质量回路路径调整任务边界，再用节拍、缓冲量和一次合格率校验调整结果。

1 机电产品装配线平衡的基础条件

(1) 机电产品装配任务单元工时构成：机电产品装配任务不宜只按设备或工位名称进行统计，而应拆至可由一名操作人员或一套工装连续完成的动作单元，例如取件定位、紧固、插接、通电确认和放行。每个单元记录正常操作、走动取料及首件确认、换批、异常处置等非循环时间；将非循环时间平均摊入批量后，才能得到排布用的标准工时。若把检验等待、返修搬运遗漏在工时外，表面负荷相近的工位仍会在检验前形成堆积^[1]。动作单元还要标明前置关系，防止把必须连续完成的定位与紧固拆给相距较远的工位。

(2) 机电产品装配线的节拍约束指标：目标节拍由可用生产时间和计划产量共同确定，工位实际时间围绕该值分布时，载具能在相邻工位连续流动。除平均工时外，还应观察最长工位时间、相邻时间差、缓冲载具数量和一次合格率：最长时间决定线路上限，相邻差值决定积压速度，质量波动会把已完成的工时送回前段。班前排产扣除计划停机、换型和点检时间后，可设定略小于理论值的执行节拍，为缺料和设备复位留出余量^[2]。当某工位连续超过执行节拍，调整对象应落到具体动作上。线平衡率用于比较各工位时间与执行节拍的接近程度。

$$B = \frac{T}{mC} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中，B由T与mC的比值确定；最长工位时间已

压至C附近而B仍偏低时，其余工位存在可转移的空闲时间。T以稳定循环记录值计入，换型、停线和故障抢修从可用生产时间扣减，避免把偶发停顿误判为正常负荷。

2 机电产品装配生产线失衡成因

(1) 工序时间差引起的在制品滞留：紧固、功能检测等工序通常受定位精度、程序运行和判定等待影响，实际时间比人工装配工序更容易拉长。若前段装配为46s、检测为61s，而投放仍按46s推进，每完成一件便有15s的时间差累积到检测前；短时间内虽可由载具缓冲吸收，持续运行后会迫使前段停机等待。操作人员为了清空堆积而提前搬运半成品，又会增加错装、磕碰和工位混料的风险。失衡状态还会改变人员行为，前段加快动作、后段压缩确认时间，质量波动随之回流并进一步占用检测能力。

(2) 供料设备波动下的节拍偏移：同一工位的工时并非固定值，料盒补充不及时、紧固件散装取用、治具传感器误触发和程序切换都会形成短暂停顿。配送只按班次集中补给时，缺件常在高负荷工位出现；设备虽未发生长时间故障，反复复位也会侵蚀节拍余量。产品型号混流时，线缆长度、紧固点数量和检测项目不同，若仍以单一标准时间配置人员，复杂型号进入线路后会把排队位置推向后段^[3]。对于这类偏移，应按型号、物料齐套状态和设备报警类别分别记录，才能区分出工艺内容过重和现场供给不稳这两种不同诱因。

3 机电产品装配生产线平衡优化措施

(1) 双夹具下的检测作业内容重组：瓶颈工位的调整从时间占用最长且不必在原位完成的动作开始。检测工位中的扫码、外观核对和结果登记可前移至紧固工位末端，检测人员保留通电、参数判定与异常隔离；必须由同一工位完成的操作，可采用双夹具交替装卸。以50s执行节拍计，扫码和登记共占9s时，前移后仍须在连续20件内复测循环时间，夹具释放空

档宜压至3s以内。随后再以线平衡率判断任务分配是否接近目标。图1展示了五个工位的节拍关系和检测前载具积压位置。

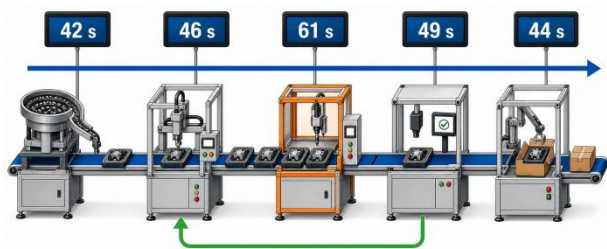


图1 装配工位节拍与检测缓冲关系

图1中检测工位的61s高于相邻预装配工位的46s，三件载具集中在检测前，说明积压由单点时间差持续累积。蓝色箭头给出产品的单向传递顺序，绿色箭头从检测端返回预装配端，返修件不应逆向混入正常载具；把扫码和登记前移后，需再次核对61s是否回落至执行节拍附近。

(2) 检测工位前的有限缓冲设置：缓冲区的容量不是越大越好，其规模只需覆盖设备短暂停顿和物料补充所需的时间窗，并以先进先出规则限制载具滞留。检测前的缓冲可按执行节拍设置2—4件载具上限；达到上限时停止前段投放，待排除检测工位异常后再恢复输送。执行节拍为50s时，3件载具可覆盖150s的短暂停顿；超过3min仍未恢复，前段应转入限速投放并核对报警记录。缓冲内每件载具设置进入时刻，滞留超过两个节拍的产品应优先复查定位状态和待检原因。表1列出同一班内六个时段的节拍观察参数。

表1 装配线节拍观察参数示例

生产时段	计划 投放 (个)	完成 数量 (个)	检测 前积 压 (个)	节拍 偏差 (s)	一次 合格 率 (%)	设备 待机 (min)
08:00—09:00	72	68	3	8.00	97.1	6.00
09:00—10:00	72	70	2	5.00	98.6	3.00

参考文献:

- [1] 徐斌,冯楨.基于整数规划与仿真的电子产品装配生产线平衡研究[J].机电工程技术,2024,53(8):52-56.
- [2] 王发麟,郭耀文,龚建华.基于改进快速搜索随机树算法的复杂机电产品线缆装配路径求解[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2024,36(8):1298-1310.
- [3] 邓凯博,汤辉,谢乃明,等.考虑并行批处理的复杂机电产品装配排程优化[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(3): 547-556.
- [4] 戴琳琳.基于装配动素相似性的汽车总装混流生产线平衡研究[J].机械设计与制造工程,2023,52(8):103-106.

10:00—11:00	72	66	4	12.00	95.5	9.00
11:00—12:00	72	69	3	7.00	97.1	5.00
13:00—14:00	72	71	1	3.00	98.6	2.00
14:00—15:00	72	70	2	4.00	100.0	3.00

表1中10:00—11:00的节拍偏差为12s、检测前积压为4件，且设备待机达到9min，完成数量降至66件；这一组合应先检查设备复位和物料齐套情况。13:00—14:00的节拍偏差回落到3s，积压仅1件、一次合格率为98.6%，表明缓冲容量可随工位恢复而收紧，避免半成品长期占用场地。

(3) 执行节拍约束下的物料配送窗口：物料配送应按上工位消耗速度，而非只按仓库拣选方便性集中送达。紧固件、连接器和易混型号部件可采用定容料盒，当剩余量降至一个配送周期的消耗量时触发补给；配送人员在固定时间窗放入满盒并回收空盒。多型号共线装配时，料盒标签应写明产品型号、工位和零件版本，防止临时借料后失去批次识别。若补给频次偏高，则核对单位用量、料盒容量和工位节拍是否匹配。

(4) 装配质量反馈调节工位负荷：质量判定数据应回到产生偏差的动作单元。检测发现扭矩不足、插接不到位或通电异常时，先隔离该件及同批次在制品，再核对紧固工具参数、定位治具状态和操作顺序；重复出现同类异常时，可临时降低投放速度，为工位复核留出时间。返修件应使用独立标识沿规定路线返回，不得与待检或合格品共用缓冲位。质量问题压缩的是有效产出时间，若只追求输送速度，返修占用会使检测工位再次成为瓶颈^[4]。以一次合格率和返修停留时间共同评价工位负荷，能够避免把短期产量上升误作线路效率改善。

4 结语

机电产品装配生产线的平衡优化从动作单元工时和工序先后关系入手，识别超过执行节拍的瓶颈工位，再把可前移或可并行的作业重新分配。小容量缓冲、定时物料配送和质量反馈分别控制等待、缺料和返修对节拍的干扰。持续记录最长工位时间、检测前积压、一次合格率和设备待机时间，能够判断调整是否减少无效等待。产品换型时，标准工时和缓冲上限随产品族重新核定。