

基于仿真的车灯装配线缓冲区优化配置

梅仁友

常州星宇车灯股份有限公司

摘要: 车灯装配线的生产过程中, 各工序的节拍差异和设备故障会导致平衡率和 OEE 下降。引入 DBR 方法和爱尔朗分布, 研究工站间缓冲区优化配置。借助 Factory Simulation 软件建立车灯装配生产线的仿真模型, 配置不同容量的缓冲区。分析生产线的设备利用率、产出等信息, 根据结果调整装配线布局, 可以实现缓冲区优化配置, 进而提升整条产线的综合效率。

关键词: 车灯装配; DBR; 爱尔朗; 仿真; 缓冲区; 综合效率

0 前言

车灯是汽车不可或缺的组成部分, 其主要功能是提供照明, 确保夜间或视线不佳的情况下的驾驶安全。车灯的装配工艺按照前灯和后灯分类, 主要包括零件压接或铆接、螺钉锁付、线束插接、灯罩壳体涂胶或熔接压合、冷却静置以及气密电检和其他综合检测。

在车灯装配线方案策划过程中, 由于工厂现有场地的限制, 很大程度上影响了设备的布局 and 缓冲区的配置。配置缓冲区的主要目的是为了平衡生产线上的工作负载, 减少等待时间, 提高生产效率和产品质量。考虑到车灯的装配工艺比较复杂, 关键工序缓冲区的位置和数量难以确定, 会直接影响装配线的正常、高效运行。因此, 对产线的缓冲区进行优化配置是提高车灯装配线效率的关键。

1 缓冲和故障研究

1.1 DBR 方法

约束理论 (TOC) 是一种旨在通过识别并优化生产系统中的关键限制因素来提高整体性能的方法。DBR 方法 (Drum-Buffer-Rope, 即鼓 - 缓冲区 - 绳子) 是 TOC 的一个具体应用, 其中“鼓”代表生产过程的波动, “缓冲区”用于吸收这些波动, 而“绳子”则用来控制生产节奏, 确保生产线上的活动能够平稳进行。通过对缓冲区的设置, DBR 方法能够有效地应对生产过程中的不确定性, 如设备故障率、故障修复率等。根据 DBR 的定义, 生产线系统如图 1 所示。产线被瓶颈分

割为瓶颈前工序、瓶颈后工序和分支装配工序, 这三类工序分别决定了瓶颈缓冲区、产出缓冲区和装配缓冲区的设置。3 种缓冲区设置方法类似, 区别是缓冲区相对瓶颈的位置和“绳子”的控制方法不同。

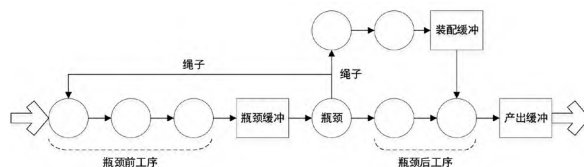


图 1 DBR 方法的控制原理

1.2 爱尔朗分布

车灯装配线主要由压接、热铆、自动锁付、涂胶或焊接、气密和综合检测等设备组成, 这些设备的关键性能指标对于产线来说至关重要, 其中除了首要指标节拍 (CT, 设备加工时间) 外, MTBF (平均故障间隔时间) 和 MTTR (平均故障修复时间) 最为关键。

指数分布是一种常用的故障时间连续概率分布, 特别是在描述独立事件的累积效应时。然而指数分布并不总是能够准确描述实际的故障时间, 因为许多系统和组件的故障率会随时间变化。爱尔朗分布 (Erlang) 与指数分布一样, 多用来表示独立随机事件发生的时间间隔, 能更好地对现实数据进行拟合, 更适用于多个串行过程, 其概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{(\lambda k)^n}{(n-1)!} x^{n-1} e^{-\lambda k x}, x \geq 0$$

式中, k 为阶数, 均值为 $1/\lambda$ 。具有阶数 k 的爱尔朗过程被称为 k 阶爱尔朗 (Erlang) 分布, 对应的随机

变量可被视为 k 个独立同参数指数分布随机变量之和。其概率密度函数曲线如图 2 所示。

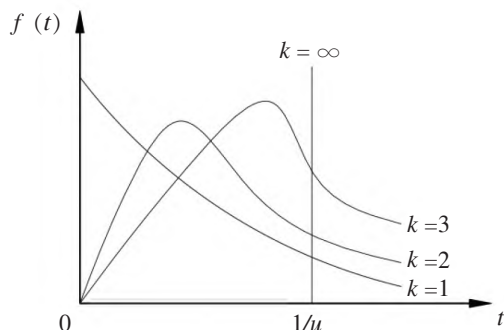


图 2 爱尔朗分布密度函数及曲线

2 仿真建模

2.1 车灯装配线

以某款贯穿式尾灯的支架分总成装配产线为例，产线布局示意如图 3 所示。产线通过倍速链上下回流的形式，将压接、锁付、热铆和视觉检测等工站进行集成，实现从零件到分总成自动化生产。由于灯具本身长度为 1.6 m，导致倍速链托盘长度达到 1.8 m，各工站设计尺寸选定 2 m × 1.2 m。在实际生产中，各工站的节拍差异、工站间缓冲区设置和设备的故障率等都会影响产出率。

2.2 产线仿真模型

Factory Simulation (简称 FS) 是华中科技大学“国家智能设计与数控技术创新中心”自主研发的生产系统建模仿真软件。FS 以离散事件仿真实论为基础，以 Java 为开发平台，实现了仿真建模、仿真引擎、仿真动画、仿真分析及仿真优化等全部功能，可应用于复杂离散型生产系统的模拟运行和性能的定量分析优化，是面向智能工厂的“CAE”软件。

针对上述车灯装配线缓冲区的设置问题，结合工站节拍以及故障率，以 Factory Simulation 软件作为仿真平台，构建生产线的仿真模型。产线各工序的主要参数指标如表 1 所示，其中 OP20 和 OP50 为人工操作，不考虑故障率。压接、锁付、热铆和检测为自动化设

备，故障率为 λ_i ，平均故障间隔时间 (MTBF) 服从指数分布，平均故障修复时间 (MTTR) 服从 2 阶 Erlang 分布。

表 1 产线各工序主要参数

工序 /i	名称	生产节拍 CT/s	故障率 λ_i	MTBF/min	MTTR/min
OP10	压接	35	2.5%	40	3
OP20	装配	39	-	-	-
OP30	锁付	37	5%	20	2
OP40	热铆	38	1.4%	70	4
OP50	插接	40	-	-	-
OP60	检测	36	1%	100	5

3 试验及结果分析

根据上述各工序参数，设置工站的设备属性和故障特征，产线仿真时长为 10 h，供料间隔为 40 s。假设由于场地尺寸限制，最大缓冲区数量为 2 个。分别按照无缓冲区、缓冲区数量为 1、缓冲区数量为 2，按照正交试验法 (5 因素 2 水平) 进行 16 组仿真试验，具体设置参数及仿真结果如表 2 和图 4 所示 (其中“○”表示无缓冲区，“●”表示 1 个缓冲区)。

由图 4 可知，关键工序的缓冲区配置不同，对产线的综合效率影响较大。在无缓冲区状态下产线产出量和综合效率最低，在配置 1 个缓冲区试验中以 OP30 ~ OP40 之间位置结果最好。随着缓冲区数量增加，配置 2 个缓冲区的产线效率明显优于前两者，其中试验 8、9、14、15 的产线效率已趋近甚至超过 90%。综上所述，车灯装配线中在关键工序后配置缓冲区，可以有效提高产线的产出和效率，特别是故障率较高的工序需要配置缓冲区，异常产生时可以保障后道工序不停止能正常运行，因此优化产线的缓冲区配置可以提高产线的平衡和效率。

4 结语

针对车灯装配线设计过程中缓冲区的配置问题，本文重点研究了 DBR 缓冲控制原理和设备故障率分布

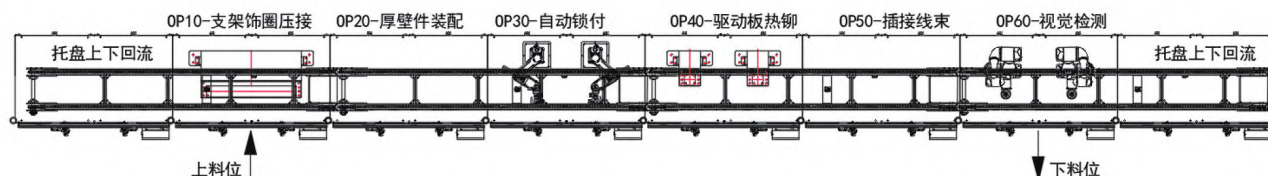


图 3 支架分总成装配产线

表 2 FS 缓冲区仿真试验及结果

试验数	缓冲区位置					产出量	综合效率
	OP10 ~ OP20	OP20 ~ OP30	OP30 ~ OP40	OP40 ~ OP50	OP50 ~ OP60		
1	○	○	○	○	○	711	79.0%
2	●	○	○	○	○	732	81.3%
3	○	●	○	○	○	722	80.2%
4	○	○	●	○	○	755	83.9%
5	○	○	○	●	○	731	81.2%
6	○	○	○	○	●	728	80.9%
7	●	●	○	○	○	738	82.0%
8	●	○	●	○	○	826	91.8%
9	●	○	○	●	○	798	88.7%
10	●	○	○	○	●	761	84.6%
11	○	●	●	○	○	782	86.9%
12	○	●	○	●	○	766	85.1%
13	○	●	○	○	●	758	84.2%
14	○	○	●	●	○	799	88.8%
15	○	○	●	○	●	805	89.4%
16	○	○	○	●	●	751	83.4%

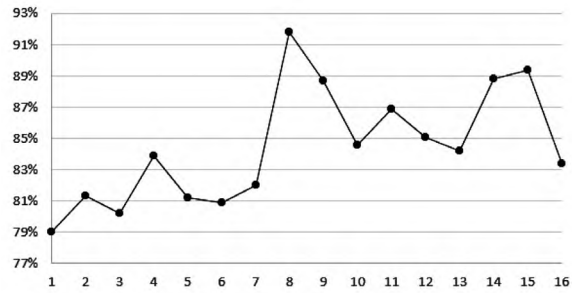


图 4 不同缓冲区的产线效率

函数；应用 Factory Simulation 软件建立车灯装配产线仿真模型，根据正交试验设计方法设计仿真试验，以

产线最佳产出量和效率为优化目标，通过仿真结果分析得到缓冲区的优化配置；研究表明，缓冲区对产线效率有重要影响，通过对缓冲区优化配置可以有效提高产线的综合效率。

参考文献

[1] 吴运铨. LED 汽车灯及其应用 [J]. 光源与照明, 2023(03):81-83.

[2] 陶永亮, 田原, 周宗杰, 等. 汽车车灯前灯与后灯装配工艺介绍 [J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(06):24-28.

[3] 刘明德, 苏芸, 黄小欢. 一种简易的柔性装配流水线 [J]. 南方农机, 2019, 50(23):58-59.

[4] 刘雪梅, 刘涛, 顾佳巍, 等. 随机型装配线平衡与缓冲区配置集成优化 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2018, 46(08):1098-1106.

[5] 王坤艳. 基于 TOC 的 A 公司产品生产周期管理研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2023.

[6] 徐云天, 张力菠. 考虑系统波动因素的 DBR 瓶颈缓冲区容量设置 [J]. 工业工程, 2014, 17(6):24-28.

[7] 张祥, 尹志书, 石崧等. 服从负指数分布的设备维修时间仿真分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(03):7-9.

[8] 黄超. 埃尔朗分布的有关特性 [J]. 高等数学研究, 2019, 22(01):45-46.

[9] 朱海平. 生产系统建模与仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.

[10] 王玄静. 正交试验设计的应用及分析 [J]. 兰州文理学院学报 (自然科学版), 2016, 30(01):17-22.