

# 涂装车间生产线瓶颈深度分析应用

李 洋, 闫宇灿, 张泽志, 白 璐  
(北京奔驰汽车有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 主要介绍在涂装车间自动生产线中,通过电气自动控制系统和数据分析,查找并发现生产线瓶颈的方法,通过进一步的设备数据深入分析影响生产线表现的具体细节和根本原因,以便针对性地提出更多解决方案。本方法已在涂装生产线测试并投入使用,解决了多个现场疑难瓶颈问题,对提高涂装车间生产运营效率有显著作用。

**关键词:** 瓶颈分析; 涂装节拍分析; 数据分析; 设备综合效率; 智能制造

中图分类号:TQ639 文献标志码:B 文章编号:1007-9548(2024)01-0011-03

## Analysis and Application of Bottleneck Depth for Production Line in Painting Workshop

LI Yang, YAN Yu-can, ZHANG Ze-zhi, BAI Jun  
(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** The method of identifying production line bottlenecks through automatic control systems and data analysis in the automatic production line of painting workshop was introduced. Specific details and root causes that affect the performance of the production line by further in-depth analysis of equipment data, in order to propose more targeted solutions. This method has been tested and implemented in painting workshop, solving several on-site bottleneck problems and significantly improving the production and operation efficiency for painting workshop.

**Key words:** bottleneck analysis; paint cycle time analysis; data analysis; overall equipment efficiency; intelligent manufacturing

### 0 引言

近年来,随着汽车需求的不断提高,汽车制造业着力提升工厂自动化水平,提高生产线能力,保证产品及时交付。在这个背景下,对于生产线效率的评估和优化方法受到更多重视<sup>[1-3]</sup>。衡量生产线效率有很多方法,当前普遍使用的方法是对生产线进行观察,通过视频等手段监控生产线,尤其是观察人工操作过程对于生产线的影响。由于生产线自动化率不断提高,人工操作影响因素逐步减弱,自动化设备因素更多影响生产线的实际表现<sup>[4-5]</sup>。

对于自动化生产的效率分析,生产线平衡中的瓶

颈分析方法被广泛应用,也即分析解决生产线能力最差的位置<sup>[6]</sup>。瓶颈分析方法目前更多停留在对于设备故障、质量停机损失、物流原因、空位满位等影响,分析时也经常使用计时器或者秒表等工具进行测量,测量精度基本为分秒级,而且数据量相对较小,存在测量误差的可能。当前的生产线瓶颈分析,更多的指出工厂内哪片区域或者哪条线为生产线瓶颈位置,对于瓶颈的产生原因深入分析较少。

综上所述,在涂装车间自动生产线中,需要引入电气自动控制系统,实现对节拍时间的精确测量,并根据所得数据,由区域、线体到工位,可以逐步查找并发现生产线瓶颈的具体位置。后续通过进一步的设备数据深入分析,分析生产工位每个步骤的具体时间,可以找出影响生产线表现的具体细节和根本原因,便于针对性地提出和实施解决方案。通过设备数据分析找出汽

收稿日期:2023-04-06

作者简介:李洋(1988—),男,硕士,工程师,主要从事汽车制造设备技术维护相关工作。E-mail:liyong3@bbac.com.cn。

车自动化生产线的瓶颈,对于当前汽车企业提高生产效率,降低生产运营成本,具有非常重要的意义。

## 1 生产线效率评估指标

为了提高生产线产出,节约生产制造成本,众多用于衡量生产效率的指标被开发和定义,其中比较主流的指标包括节拍时间、每小时产出 JPH、设备综合效率 OEE、设备表现因子 EPF 等,通过对生产线效率的评估,可以掌握生产线实时运行状态,从而找出优化提高制造工厂效率的可能,下面简要介绍几个主要的评估方法。

### 1.1 节拍时间/每小时产出 JPH

节拍时间有时被称为工作周期 Cycle time,是从一个流程结束到下一个流程结束的时间,对应汽车行业,简单来说就是一辆车完成所有工序到下一辆车完成所有工序的间隔时间。节拍时间一般包含所有的增值活动时间、等待时间和停机时间,反映生产现场的实际表现。

JPH 为当前生产线每小时的生产能力,实时 JPH 由节拍时间决定,现场实际运用时,一般取一段时间内的总生产时间与完成生产总量的比值,反映这段时间内生产线的生产速度。

节拍时间与每小时产出直观反映生产线的运行状态,一般在项目规划阶段会给出设计标准值,便于找到实际运行与规划之间的偏差。

### 1.2 设备综合效率 OEE

设备综合效率 OEE 是一种简单实用的生产管理工具,在欧美的制造业和中国的跨国企业中已得到广泛应用,用来衡量生产线实际生产能力与理论产能的比率,从而测量生产线总体效率的方法。实际计算过程可以用合格品数量与计划节拍时间的乘积作为分子,总生产时间减去计划停机时间作为分母。

影响设备综合效率的因素很多,主要可分为 2 个方面:使用损失和有效性损失。使用损失主要包括生产过程中的休息时间、会议时间、用餐时间等。有效性损失又分为可用性损失、表现损失和质量损失 3 个类别。现场的技术设备停机主要为可用性损失,上下游工序的物流不足为表现损失,质量原因造成的停机或额外返工为质量损失。设备综合效率 OEE 综合反映生产过程的运行状态,通过对生产线设备 OEE 在一段时间内的跟踪,可以找出该生产线 OEE 的运行标准,从而识别可以进行提升的方面。

### 1.3 设备表现因子 EPF

相对于设备综合效率 OEE,有时需要单纯测量本工位的设备表现,这时需要将上下游工序物流不足的影响从计算中去除。在计算设备表现因子 EPF 的过程

中,在设备综合效率计算的基础上,需要额外减小等待损失,包括空线时间和堵线时间。

设备表现因子更多地反映生产线设备的性能表现,而不是综合效率,便于更好地定位由设备可用性和质量原因导致的损失。

需要说明的是,设备表现因子 EPF 评估方法受到生产线设计节拍能力的影响比较大。当车间内各生产线设计节拍能力相差较大(超过 10%)时,EPF 评估方法准确率相对不高,此时需要考虑设计节拍对瓶颈的方法,具体是将 EPF 计算得到的效率与设计标准 JPH 相乘,得到每小时产出可用性指标 JPH Availability,用以评估设计节拍差距较大的不同产线。

## 2 瓶颈分析与瓶颈管理

### 2.1 瓶颈

在生产作业过程中,当一个流程使相邻的上下游流程陷入停顿时,这个流程的位置会被视为瓶颈。瓶颈一般是生产线中节拍时间最长的工位,瓶颈位置的生产效率损失会造成整条生产线的效率损失,只有瓶颈处的性能优化才能提高生产线的生产效率。在非瓶颈位置提高性能只会导致这些工序有更多的空闲时间,并且会形成更多的效率浪费。

### 2.2 瓶颈分析方法

瓶颈分析是查找、锁定和分析长期瓶颈的方法。根据上文所述的生产线效率评估指标,辅助确定生产线瓶颈位置。由于汽车工厂生产线规模一般较大,在进行瓶颈分析时,优先分析出主要的几个瓶颈区域,然后进一步寻找瓶颈区域内的瓶颈单元及瓶颈工位。瓶颈分析方法有很多种,以设备表现因子方法和瓶颈遍历方法为代表。实际使用中,通过对比各条主要生产线的效率指标,找出生产线出现瓶颈的区域。

## 3 电气控制系统检测瓶颈数据方法

对于自动生产线来说,生产线上的手工工位更多地被自动化设备所取代,使用录像或者秒表的工具和方法时常不能精确测量生产线的表现。电气控制系统作为自动生产线的核心控制系统,主要承担生产线设备的动作步骤控制和运转的作用。随着电控系统核心—可编程逻辑控制器 PLC 的不断发展,PLC 的处理能力有了很大的提高,为使用电控系统 PLC 检测瓶颈数据提供了可能。通过 PLC 对现场工位进行节拍统计,考虑到控制器扫描周期等制约因素,时间测量精度可精确到 0.1 s 级别。

### 3.1 停机时间监控

现场停机时间主要监控设备停机时间和质量停机时间,从 PLC 中可提取到相应的设备报警信号和质量停机信号,通过 PLC 中的计时器模块,可得到单次设

备停机时长。为满足一段时间内停机数据分析需求,可以使用 RTO 计时器模块进行累计计时统计,并在分析后清零数据,方便进行下一次停机时间监控。

### 3.2 节拍时间监控

如前文所述,节拍时间为一辆车完成所有工序到下一辆车完成所有工序的间隔时间,也即取得相邻两辆车达到同一个状态的时间差。现场经常使用自动输送设备的占位信号作为产量计数点,占位信号在工厂现场逻辑清晰,信号相对稳定,故此推荐使用两辆车占位信号的时间差统计节拍时间。对于生产线来说,一般选取生产线中最后一个工位作为统计节拍时间的工位,也有少量关注上线数量的生产线使用最先一个工位进行节拍时间统计。

在 PLC 中统计占位信号的时间差可以通过使用 PLC 中的计时器和计算模块,精确得出被测量工位的实时节拍时间和每小时产出。

现场实际节拍分析需求要跟踪一段时间内的节拍时间数据,可以使用 PLC 中的堆栈存储功能进行数据的存储。获得存储的节拍时间数据之后,可以制作由节拍时间为横轴、出现次数为纵轴的节拍分布图,直观显示该测量点节拍时间分布状态。

由于瓶颈分析有时需要持续较长时间,在 PLC 内使用堆栈的方法将不能满足大量数据的使用需求。随着现场数据采集设备和低代码工具在工业现场的普及,PLC 的数据可以通过数据采集 IoT 设备的工具,将 PLC 数据存储在服务数据库中的数据库中。这样有效降低了 PLC 的内存使用负荷,在满足网络通信负载的条件下,可以实现大量设备、大量数据的存储记录,分析长时间内的生产线节拍状态,检查生产线瓶颈位置。

### 3.3 瓶颈数据分析案例

某涂装车间内电泳烘烤工序是电泳工序的下游工位,在现场生产过程中,电泳工序会不时出现堵线的情况,这样会造成车身停滞在电泳线中,容易造成车身沉淀甚至导致车身报废的缺陷。通过标准的瓶颈分析理论,位于上游的电泳工序堵线一般是由于下游存在瓶颈工位,电泳烘房作为电泳工序下游的第一个工位,节拍时间问题的可能性最大,这里使用 PLC 对生产线节拍时间进行监控,得到电泳烘房和电泳工序节拍统计。由测量结果分析,电泳烘房节拍时间稳定在 84 s 左右,同时电泳工序节拍时间稳定在 82~83 s 之间,也即下游烘房工序比上游电泳工序慢了 1~2 s。每个从电泳工序出来的车身需要在烘房入口处等待,不仅造成生产可用性的损失,也有影响电泳工序质量的风险。

通过对烘房线各个输送工位的节拍检查,找到烘房入口为烘房线节拍最慢区域,经过节拍优化之后,烤

箱节拍得到明显改善,通过 PLC 验证了节拍提速效果后,得到优化后电泳烘房节拍由 84 s 降低至 82 s, JPH 由 42.8 提升到 44.0,且节拍稳定性很高,同时验证了电泳工序原有的堵线情况已经基本消除。

## 4 基于设备数据的瓶颈深度分析

瓶颈分析方法在自动化生产线实际应用过程中,可以找出瓶颈区域、瓶颈线体和瓶颈工位。分析复杂工位瓶颈的根本原因往往是瓶颈分析中的难点,这也使得瓶颈工位的解决方案难以设计和实施。在这个情况下,对于瓶颈分析有了更进一步的需求,瓶颈深度分析在分析到瓶颈工位位置之后,需要对复杂瓶颈工位中的设备数据进行梳理和分析。

### 4.1 输送设备深度分析

深度分析生产线中的普通输送设备瓶颈,以常见的输送工位为例,总节拍时间可以细化为输送接车时间、工位工艺时间及输送送车时间。通过 PLC 中的计时程序对以上细化时间进行测量,可以得出相应时间的最低值和时间分布等数据。当输送接车的时间分布总是大于最低值时,该输送工位经常存在等候上游的现象,也即该工位空线;当输送送车的时间分布总是大于最低值时,该工位经常存在等候下游放行的情况,也即该工位堵线。通过对比工位工艺时间的时间分布,可以监控该工位工艺过程的稳定性。

### 4.2 机器人工位深度分析

对于更复杂的瓶颈工位,以机器人自动化生产工位为例,瓶颈深度分析需要输送设备运行时间、各个机器人的运行时间、辅助设备运行时间等细节数据。通过对整个复杂瓶颈工位的节拍分解,将节拍时间拆解为按时序排列、不重叠的多个运行步骤。

使用模板程序在 PLC 进行各个分解步骤的运行时间测量,可以得出在总节拍时间内各个分解步骤占用节拍时间的比例,从而更精准定位节拍问题产生的具体步骤。

### 4.3 瓶颈深度分析应用

对于多个设备协作同时工作的工位来说,可以监控多个协作设备的运行时间,找出运行时间最长的设备,考虑向其他运行时间较短的设备进行运行时间平衡优化。

柔性化是自动化生产线发展的趋势,通过 PLC 中的产品类型和配置的识别及统计,可以区别产品类型和配置显示相应的节拍分解时间和总节拍时间,便于识别节拍时间变化与产品类型及配置的关联程度,针对性地进行节拍的优化和改善工作。

在工厂实践中,自动化节拍监控系统也可用于改造项目前期验证安装调试工作的效果,(下转第 22 页)