

航空紧固件生产车间流水线平衡 量化分析及改善

冯 硕,陈 闯

(中国航空制造技术研究院,北京 100024)

[摘要] 为了量化地评价航空紧固件生产流水线的平衡性并对其进行改善,对一种典型的航空紧固件生产流水线进行了分析,结合流水线平衡的概念和航空紧固件生产流水线的特点,通过公式推导建立了一套可以从不同角度量化评价流水线平衡性的指标体系,阐述了其应用的方法和可行性;通过对比几种当前主要的研究流水线平衡的方法,指出航空紧固件生产流水线的平衡更适合采用工业工程的方法进行分析;研究了平衡性改进问题的解决思路,指出瓶颈工序对流水线的平衡性有重要影响,通过缩短瓶颈工序的加工时间可使整条流水线的平衡性得到有效改善,同时也使流水线上各工序的加工效率获得显著提升。最后通过实例计算对以上理论和方法进行了应用和验证。

关键词: 航空紧固件; 流水线平衡; 量化分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.066



冯 硕

工程师,研究方向为飞机机械连接技术及航空紧固件产品的生产管理。

航空紧固件在尺寸精度、产品性能等方面的要求通常高于普通紧固件,其制造工艺更加复杂、生产管理也相对更加困难。车间的生产效率

是最受管理者关注的,目前航空紧固件制造企业的生产方式普遍采用的是流水线生产,由于产品工艺复杂、构成流水线的工序较多,而各工序运转的效率存在差异,这就给平衡整条生产线以使其达到节拍一致的运转造成了困难。管理者会发现总是存在一部分工序任务积压,而同时另一些工序却在停工待料的现象。因此必须采取措施进行改善,使流水线在新的水平上达到平衡。

国内外已有不少学者对流水线的平衡性做过研究,但由于不同车间的加工产品种类、制造工艺、硬件设施、管理方式等方面存在较大差异,生产流水线的运转模式也不尽相同,因而需要视不同的具体情况,结合平衡性的概念进行分析。为了确保质量的可追溯性,航空紧固件通常以炉批为单位在流水线上流转,因而在量化分析和评价其流水线的平衡性时,就要结合这一特点进行研究并寻求

改善的方法。

流水线

紧固件制造通常采用流水线生产的作业方式,这种生产方式最早出现在 20 世纪初的汽车制造业中——美国福特汽车公司创立了世界上第一条汽车流水装配线。目前流水线生产的方式在工业界被广泛应用。

流水线生产是一种高效的生产组织形式,它将生产作业高度细分化、专业化地分配给若干生产单元,并按照产品的工艺顺序排列这些单元,使产品按照一定速度,连续地、有节奏地经过各单元,进行依次地生产加工,直至成品。

采用流水线方式的生产,具有以下优势:

(1) 由于分工细化降低了单个工序的作业难度,易于提高作业的熟练度^[1],方便引入专业化设备,从而提高生产效率、降低产品制造周期;

(2) 分工的细化也使得单个工序的专业化程度高,有利于工序操作者在特定专业上提高水平,进而提高产品质量;

(3) 大批量的流水线生产,便于资源的统一协调安排,资源利用率高,可显著降低单件产品的制造成本。

同时,流水线生产也有其弊端,主要体现在:

(1) 均衡性(平衡性)难以保证。各工序由于分工不同,其作业时间也有差别,故而必定存在工序负荷的不均衡,导致出现高负荷工序产品堆积滞留的同时低负荷工序却在停工待料^[2]。据统计,在一个产品的生产周期中,等待时间所占的比例达到90%~95%^[3]。

(2) 柔性不足。由于高度专业化的分工,流水线只适合少品种、大批量的生产,当需要变动产品种类时,通常面临设备的调整或更换以及人员的培训或变动等,耗时费力,无法适应多品种、少批量的需求。

(3) 操作者能动性差。处于流水线之中的操作者,通常日复一日做着重复性的工作,不仅劳动强度高,更扼杀了其主观能动性,使其无暇进行学习或创造性的思考。

本文主要研究航空紧固件生产流水线的平衡性,分析如何用量化的方法对其进行评价,进而探讨如何采取措施对其进行改善。

紧固件生产流水线平衡量化分析

1 流水线平衡性

流水线的平衡性也叫节奏性,是指生产过程的各个阶段和各道工序都要按照规定的节奏,在相同的时间间隔内生产和交付等量的成品,使各工序负荷保持相对的一致和稳定,避免发生时松时紧的现象,以均衡状态完成生产任务^[4]。流水线的平衡性直接影响车间的生产效率,并最终影响到企业的利润^[5]。

2 紧固件流水线平衡性及相关效率的计算方法

要改进紧固件生产流水线的平衡性,首先必须对流水线当前的平衡性状态有所了解。“平衡性”是一个全面量化的评价指标,因此需要从流水线的生产作业中收集详细的数据,并按照“平衡性”的定义进行计算。

紧固件生产流水线有其独特的特点:

(1) 加工若干种类型的产品。

(2) 每类产品由于工艺不同,故加工工序不同、工序总数量不同。

(3) 产品按炉批生产,每批产品的数量根据工艺要求、设备情况或客户需求而不同。

(4) 各工序的加工方式不同。对于紧固件生产来讲,大多数工序采用逐件加工的方式,但热、表处理较为特殊,属于整批产品同时作业——这种工序的加工时长通常是重要的工艺参数,一般直接由工艺文件规定,不具备本文所要进一步讨论的改进余地,因此本文仅考虑采用逐件加工方式的各工序组成的流水线,事实上这些工序在紧固件生产中通常也是占据加工时长的主要部分。

(5) 各工序的加工时间不同。

基于以上特点,要计算紧固件生产流水线的效率,必须在一段时间内统计加工产品的种类数、每类产品的总产量、每类产品的工序数,以及每件产品在特定工序的加工时间,只有在掌握以上数据的基础上,才有可能通过进一步的整理和计算获得流水

线效率的真实数据。由此也可以看出基础数据的收集对于紧固件生产的科学化管理,是一个非常重要的基础性环节。

通常在一个紧固件生产流水线车间,可以获得如表1所示的信息。

- 在一段时间内,该车间共生产 k 种产品;

- 每种产品生产的件数为 $n(i)$: 当明确某种产品后,这种产品的产量是可知的(通常在投产时既已确定每种产品的产量),因此每种产品的产量 n 可以表示为产品种类 i 的函数,即 $n(i)$;

- 每件产品需要经历 $m(i)$ 道工序: 当确定某种产品后,该产品的总工序数也是可知的,这取决于该种产品的工艺方案,一般通过查询工艺文件即可获得,因此每种产品的总工序数 m 也可以表示为产品种类 i 的函数,即 $m(i)$;

- 第 i 种产品在第 j 道工序的单元加工时间为 t_{ij} : 通常加工工序都有调试机床、更换工装、试加工等操作,这些操作的时间也应计入加工时间 t_{ij} ,因此 t_{ij} 应是一类产品的“单件综合加工时间”,在一个工艺成熟的紧固件生产车间, t_{ij} 可以通过以下方法获得:

首先记录某类产品 i 的全部数量产品在第 j 道工序完成加工的总时间 $T_{i,j}$ (其中包括调试机床、更换工装、试加工等操作的时间),然后通过以下公式计算 t_{ij} :

$$t_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{n(i)} \quad (1)$$

表1 紧固件生产流水线数据采集表

产品种类 i	生产件数 $n(i)$	需要经历的 工序总数 $m(i)$	在各工序的实际加工时间 (第 i 种产品在第 j 道工序的单元加工时间) t_{ij}				
			1	2	3	...	$m(i)$
1	$n(1)$	$m(1)$	$t_{1,1}$	$t_{1,2}$	$t_{1,3}$...	$t_{1,m(1)}$
2	$n(2)$	$m(2)$	$t_{2,1}$	$t_{2,2}$	$t_{2,3}$...	$t_{2,m(2)}$
3	$n(3)$	$m(3)$	$t_{3,1}$	$t_{3,2}$	$t_{3,3}$...	$t_{3,m(3)}$
...
k	$n(k)$	$m(k)$	$t_{k,1}$	$t_{k,2}$	$t_{k,3}$...	$t_{k,m(k)}$

表 1 中右侧部分的数据为:

$t_{1,1}$	$t_{1,2}$	$t_{1,3}$	\cdots	$t_{1,m(1)}$
$t_{2,1}$	$t_{2,2}$	$t_{2,3}$	\cdots	$t_{2,m(2)}$
$t_{3,1}$	$t_{3,2}$	$t_{3,3}$	\cdots	$t_{3,m(3)}$
\cdots	\cdots	\cdots	\cdots	\cdots
$t_{k,1}$	$t_{k,2}$	$t_{k,3}$	\cdots	$t_{k,m(k)}$

这些数据在实际中可能并不像表 1 中一样排列形成完整的矩阵,其每一行的长度一般并不相等,这是由于每种产品的加工工序数量 $m(i)$ 是不同的,这时只需按实际情况填写即可,没有的工序处用“/”代替或不填写均可。

通过以上数据即可计算出整个车间的生产线平衡率 η 、某道工序的工作效率 η_j ,以及某种产品的加工效率 η_i ,便于从不同角度考察车间流水线的运行情况,具体计算方法为:

(1) 整个车间的生产线平衡率 η 。

车间在这段时间内,生产所有产品所用的纯加工时间总和可表示为:

$$T = \sum_{i=1}^k [n(i) \sum_{j=1}^{m(i)} t_{i,j}] \quad (2)$$

设第 i 种产品在所有的 $m(i)$ 道工序中加工耗时最长的时间为 tc_i ,则有:

$$tc_i = \max \{t_{i,j} |_{j=1}^{m(i)}\} \quad (3)$$

实际上,在车间的各种产品的工艺方案既定的前提下, tc_i 是一个只与产品种类 i 有关的量,它反映了各种产品按照现有工艺的“最难加工工序”。

由于整条生产线的运转节拍必须按照瓶颈工序(加工耗时最长的那道工序)的加工时间进行,所以可以得到全部产品经过全部工序的总共用时 Tc (这其中包含了所有产品等待加工的时间):

$$Tc = \sum_{i=1}^k n(i) \cdot m(i) \cdot tc_i \quad (4)$$

进而得到整个车间的生产线平衡率 η :

$$\eta = \frac{T}{Tc} = \frac{\sum_{i=1}^k [n(i) \sum_{j=1}^{m(i)} t_{i,j}]}{\sum_{i=1}^k n(i) \cdot m(i) \cdot tc_i} \quad (5)$$

(2) 某道工序的工作效率 η_j 。

可以从某道工序的角度出发,去考察这道工序加工所有产品的工作效率,方法如下:

首先计算该道工序(第 j 道工序)制造所有产品的纯加工时间总和 T_j :

$$T_j = \sum_{i=1}^k n(i) \cdot t_{i,j} \quad (6)$$

而所有产品经过该道工序(第 j 道工序)的总用时 Tc_j 为(这其中包含了所有产品等待加工的时间):

$$Tc_j = \sum_{i=1}^k n(i) \cdot tc_i \quad (7)$$

对于不同工序来讲,由于它们加工某一种特定产品时的 tc_j 是相同的,故它们的 Tc_j 实际上也是相同的。

进而可以获得第 j 道工序加工所有产品的工作效率 η_j :

$$\eta_j = \frac{T_j}{Tc_j} = \frac{\sum_{i=1}^k n(i) \cdot t_{i,j}}{\sum_{i=1}^k n(i) \cdot tc_i} \quad (8)$$

特殊地,可以得到第 j 道工序加工第 i 种产品的效率 η_{ji} :

$$\eta_{ji} = \frac{t_{i,j}}{tc_i} \quad (9)$$

(3) 某种产品的加工效率 η_i 。

还可以从某种产品的角度出发,去检测这种产品在车间流水线的加工效率,方法如下:

首先计算该种产品(第 i 种产品)的实际被加工时间 T_i :

$$T_i = n(i) \sum_{j=1}^{m(i)} t_{i,j} \quad (10)$$

再计算该种产品(第 i 种产品)经过所有工序的总用时 Tc_i (这其中包含了所有产品等待加工的时间):

$$Tc_i = n(i) \cdot m(i) \cdot tc_i \quad (11)$$

从而得到这种产品在车间流水线的加工效率 η_i :

$$\eta_i = \frac{T_i}{Tc_i} = \frac{n(i) \sum_{j=1}^{m(i)} t_{i,j}}{n(i) \cdot m(i) \cdot tc_i} = \frac{\sum_{j=1}^{m(i)} t_{i,j}}{m(i) \cdot tc_i} \quad (12)$$

特殊地,可以得到第 i 种产品在第 j 道工序的加工效率 η_{ij} :

$$\eta_{ij} = \frac{t_{i,j}}{tc_i} \quad (13)$$

可以发现, η_{ij} 与前面计算的 η_{ji} 表达式是一样的,这是因为两种表达方式的含义实际上是相同的,即“第 j 道工序加工第 i 种产品的效率”等价于“第 i 种产品在第 j 道工序的加工效率”,即 $\eta_{ij} = \eta_{ji}$ 。

值得说明的是,以上计算过程看似复杂,实则借助计算机可以轻松获得结果,真正关键的环节在于表 1 中数据的采集过程,这依赖于管理者制定详细、周密、可执行的数据收集计划,以及流水线各工序操作者完善的操作日志,当然这一过程也可由具备加工参数存储功能的自动化设备轻松实现,管理者只需定期从设备中调取需要的数据即可。

平衡性的改进

1 分析方法

流水线平衡(Streamline Balancing)就是对生产线的全部工序进行平均化,调整作业负荷,以使作业时间尽可能相近的技术手段与方法,是生产流程设计及作业标准化中最重要的方法体系^[6-7]。其目的是使流水线运转顺畅,减少等待或滞留的时间,从而提高生产效率^[8]。

目前对流水线平衡问题的研究主要有 3 类方法:最优化方法、启发式方法及工业工程方法。

(1) 最优化方法通过建立数学模型寻找最优解,结果准确,但建模过程复杂,且只适合作业流程较简单的流水线平衡问题。

(2) 启发式方法的建模过程简单,思路贴近实际,但前提是必须依赖管理者的经验建立准则,求得解是静态的,不适合环境或约束条件多变的情况。

(3) 工业工程(Industrial Engineering)方法是一种综合的分析和管理工作,主要运用程序分析、操作分析、动作分析和作业测定等技术

对作业工序进行深入分析,通过对生产过程的作业程序、作业方法、物料配置、空间布局及作业环境等各方面进行改善,使流水线平衡,进而达到提高生产能力的目的。这种方法对管理者的水平要求较高。

航空紧固件生产流水线由于工艺复杂、工序数量多、约束条件多,且近年来新型号产品不断出现,推动工艺及设备的更新和改进,导致流水线的各项参数处于不断变化的状态,因此其流水线平衡性的改进不适于使用最优化方法和启发式方法,而更适合用工业工程的方法。

2 航空紧固件生产流水线平衡性的改进

平衡性改进问题一般可以概括为两类:

第 I 类平衡问题:给定流水线的节拍,求流水线上的最少工作站数。通常出现在流水线的设计和安装阶段。

第 II 类平衡问题:给定流水线的工作站数,求最小化流水线节拍。这种情况是在既定的流水生产线上(设备和人员基本固定),优化节拍使流水线均衡。

通过对该领域内以往取得的成果进行研究,无论哪类问题的求解,其思路都是通过合并及再分配部分工序,使瓶颈工序的加工耗时不再明显多于流水线上的其他工序,从而减少工序间的负荷差异,使各工序负荷更加均匀,达到流水线顺畅运行的目的^[9-10]。但这种方法仅适用于一些装配生产线或工序间作业差别小、操作者能相互替代的情况。紧固件

生产流程中的各工序专业化程度非常高,特定的加工作业必须且仅能由专门的设备完成,设备间没有替代性可言,故这种“重新分配”的方法对于紧固件生产流水线是不适用的。

尽管如此,可以看到无论采用何种方法,在试图均衡流水线负荷而进行的各种尝试中,都是以瓶颈工序的作业时间 tc_i 为着眼点的,也就是说,要想使流水线的平衡性提高,关键是缩短瓶颈工序的加工时间 tc_i ,这可以从公式(5)、(8)和(12)看出, tc_i 的值直接影响了整个流水线的节拍,其效果类似于“木桶原理”中的短板效应,它导致流水线上的其余工序不得不放慢流转节奏等待瓶颈工序的节拍。

因此,可采用工业工程的方法,深入分析瓶颈工序的“人、机、料、法、环、测”等各项因素,找出影响该工序加工时间的主要原因,并加以改进,从而缩短 tc_i 值,使工序间的负荷趋于均衡。

3 实例分析

以某航空紧固件生产车间的实例进行说明。该车间共生产两种产品,分别为:A 型号高锁螺栓 $\Phi 5$ (第 1 种产品);D 型号干涉型高锁螺栓 $\Phi 6$ (第 2 种产品)。

通过在生产现场的收集和整理可以得到如表 2 所示的一系列数据。通过以上所述方法进行计算,可以得到整个车间的生产线平衡率 η 、某道工序 j 加工所有产品的工作效率 η_j ,以及某种产品 i 在车间流水线的加工效率 η_i 等各项评价指标的具体数值。计算结果见表 3 中工艺改进前部分。

表2 某航空紧固件生产车间的流水线数据

产品种类 i	生产件数 $n(i)$	需要经历的工序总数 $m(i)$	在各工序的实际加工时间(第 i 种产品在第 j 道工序的单元加工时间) $t_{i,j}/s$									
			$j=1$, 热锻	$j=2$, 预磨	$j=3$,车 削飞边	$j=4$,车 削长度	$j=5$,车 削毛坯	$j=6$, 精磨	$j=7$, 滚丝	$j=8$, 制底孔	$j=9$, 冲孔	$j=10$, 强化
A 型号高锁螺栓 $\Phi 5$	10000	10	5.90	2.40	5.30	5.30	8.10	24.70	9.60	10.00	9.20	10.00
D 型号干涉型高锁螺栓 $\Phi 6$	15000	10	5.90	2.40	5.30	5.30	9.30	32.80	9.60	10.50	9.20	10.00

可以看到,精磨工序在第一种产品和第二种产品的流水线中都是加工时间最长的工序(分别为 24.7s 和 32.8s),因此可以确定是瓶颈工序,由于它的存在致使整个流水线的效率偏低,形成了流水线的“短板”。这其中又以第二种产品的精磨工序用时更长,短板效应更加明显,因此应该以第二种产品的精磨工序作为改进的重点对象进行研究。下面采用工业工程中常用的“5W1H”方法进行提问,以期发现问题所在,详细过程见表 4。

经过表 4 所示的分析已经发现了改进的方向,接下来运用工业工程中的“E.C.R.S.”四大原则(Eliminate, Combine, Rearrange, Simple 即消除、合并、重排、简化)进行改善,这里主要使用合并和重排,即将发现的工艺尺寸加工过程分成两步,产品首先在精磨的紧前工序车削毛坯中去除绝大部分余量,再在精磨工序进行精加工,这样做使精磨工序的切削量显著减少,缓解了刀具的磨损,从而降低了修整刀具的频率,节约了加工时间。调整工艺方案后的流水线各项参数及指标计算结果见表 3 中工艺改进后部分。

可以看到调整工艺方案后,虽然车削毛坯工序的加工时间有所增加(由原来的 9.3s 增加到 12.1s),但是瓶颈工序精磨的加工时间却得到了有效的减少(由原来的 32.8s 降低到 24.9s);计算得到的流水线各项指标也均有明显提高:如产品 2 的加工效率由 30.58% 提高到 38.23%,整个车间的生产线平衡率由 32.60% 提

表3 改进工艺方案前后生产流水线各项指标计算结果对比

参数	工艺改进前			工艺改进后		
	A 型号 高锁螺栓 Φ5	D 型号干涉型 高锁螺栓 Φ6	生产线 所有产品	A 型号 高锁螺栓 Φ5	D 型号干涉型 高锁螺栓 Φ6	生产线 所有产品
产品生产件数 $n(i)$	10000	15000	—	10000	15000	—
工序总数 $m(i)$	10	10	—	10	10	—
1~10 各工序的 实际加工 时间 $t_{i,j}/s$	5.90;2.40;5.30; 5.30;8.10;24.70; 9.60;10.00;9.20; 10.00	5.90;2.40;5.30; 5.30;9.30;32.80; 9.60;10.50;9.20; 10.00	—	5.90;2.40;5.30; 5.30;8.10;24.70; 9.60;10.00;9.20; 10.00	5.90;2.40;5.30; 5.30;12.10;24.90; 9.60;10.50;9.20; 10.00	—
瓶颈工序及 加工时间 t_c/s	精磨,24.70	精磨,32.80	—	精磨,24.70	精磨,24.90	—
1~10 各工序加工 所有产品的 纯加工时间 T_j/s	—	—	147500;60000; 132500;132500; 220500;739000; 240000;257500; 230000;250000	—	—	147500;60000; 132500;132500; 262500;620500; 240000;257500; 230000;250000
产品的纯加工 时间 T/s	905000	1504500	2409500	905000	1428000	2333000
1~10 各工序加工 所有产品的 总时间 T_c/s	—	—	均为 739000	—	—	均为 620500
产品经过所有工序 总用时 T_c/s	2470000	4920000	7390000	2470000	3735000	6205000
1~10 各工序加工 效率 $\eta_{i,j}/\%$	23.89;9.72;21.46; 21.46;32.79; 100.00;38.87; 40.49;37.25;40.49	17.99;7.32;16.16; 16.16;28.35; 100.00;29.27; 32.01;28.05;30.49;	—	23.89;9.72;21.46; 21.46;32.79; 100.00;38.87; 40.49;37.25;40.49	23.69;9.64;21.29; 21.29;48.59; 100.00;38.55; 42.17;36.95;40.16	—
产品加工效率 $\eta_j/\%$	36.64	30.58	—	36.64	38.23	—
1~10 各工序加工 所有产品的 效率 $\eta_j/\%$	—	—	19.96;8.12;17.93; 17.93;29.84; 100.00;32.48; 34.84;31.12;33.83	—	—	23.77;9.67;21.35; 21.35;42.30; 100.00;38.68; 41.50;37.07;40.29;
整个生产线 平衡率 $\eta/\%$	—	—	32.60	—	—	37.60

注: 工序 1~10 依次为热锻—预磨—车削飞边—车削长度—车削毛坯—精磨—滚丝—制底孔—冲孔—强化。

表4 寻找精磨工序影响加工时间的因素 (加工D型号干涉型高锁螺栓Φ6)

	问	答
what	精磨工序完成什么工作?	精磨工序主要对零件外形进行整体去除加工,形成产品主要的最终外形尺寸
	是否必要?	是必要的
	为什么?	因为前序加工无法满足产品最终的精度要求,而精磨工序是产品精加工的最好选择
	有无其他更好的方案可以代替之?	暂时没有
where	在何处加工?	在主车间数控无心磨机床上
	为什么要在此加工?	精磨工序设备精度高,要求环境必须恒温,故必须在恒温的主车间进行加工
	换个地方是否可行?	换成非恒温车间肯定不行;换成其他恒温车间没有意义
when	产品在什么时候进行此道加工?	在完成精磨的紧前工序车削毛坯之后,即开始精磨工序的加工
	为什么要在这个时候干?	因为车削毛坯工序是粗加工工序,产品在车削毛坯工序去除大量加工余量后再进入精磨工序,有利于精磨工序的加工
	能不能在其他时候干?	发现精磨工序中存在一项工艺尺寸可以通过紧前工序车削毛坯完成大部分余量的去除,精磨工序仅需对其进行少量、精确的切削即可

高到 37.60%；热锻工序的效率由 19.96% 提高到 23.77%，车削毛坯的效率由 29.84% 提高到 42.30%，滚丝工序的效率由 32.48% 提高到 38.68% 等。改进后的精磨工序虽然仍是瓶颈工序，但其加工时间 t_{ci} 却得到了有效的降低，进而使整个流水线的节拍加快，提高了平衡性和生产效率。此外还可以看到，虽然仅对一种产品的一道瓶颈工序进行了优化，却使得整个车间的各项效率指标都得到了提升，可见瓶颈工序对流水生产线的平衡性起到了重要的影响作用。

结论

本文采用量化评价和分析的方式，探讨如何评测航空紧固件生产流水线的平衡性，推导出这类车间的流水线平衡性指标的计算方法，论证并指出了一种改善其平衡性的方案，揭示出瓶颈工序对流水线平衡性的重要影响。最后以某公司航空紧固件生产车间为例，对上述方法和理论进行了应用和验证。本文研究成果对科学指导航空紧固件生产、精确管理制造流水线，提高其生产效率有重要的意义。

参考文献

- [1] 高广章. 生产线的平衡及优化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- GAO Guangzhang. Research on methods in streamline balancing and optimization[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [2] 乔欣. 生产线平衡及优化方法研究[J]. 大科技, 2014(7): 337-338.
- QIAO Xin. Research on line balance and optimization method[J]. Super Science, 2014(7):337-338.
- [3] 陈泽人. CAD/CAM/CAE 在塑料模具设计和制造中的应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- CHEN Zeren. CAD/CAM/CAE in plastic mold design and manufacturing applications[M]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [4] 杨召凯. 生产加工车间的布局及生产线平衡研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- YANG Zhaokai. Research on the layout and the balance of production line in production workshop[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [5] 张学谦, 高清. 生产线平衡与企业利润临界值关系的研究[J]. 大众科技, 2015, 17(11): 145-148.
- ZHANG Xueqian, GAO Qing. Research on the critical value of line balance and enterprise profit[J]. Popular Science & Technology, 2015, 17(11): 145-148.
- [6] 吴杰明. 应用 FOG 方法提高生产线平衡率浅析[J]. 上海电力学院学报, 2004, 20(2): 49-53.
- WU Jieming. Increasing line balancing rate by applying FOG method[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2004, 20(2): 49-53.
- [7] JOHNSON R V. Assembly line balancing algorithms: computation comparisons[J]. International Journal of Production Research, 1981, 19(3): 277-287.
- [8] 陈震强. 汽车总成零件柔性化生产流水线平衡改善[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- CHEN Zhenqiang. Improvement of automotive module parts flexible production assembly line balance[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [9] 岑昊, 蔡三发. 装配生产线平衡的改善[J]. 上海管理科学, 2005, 27(5): 16-17.
- CEN Hao, CAI Sanfa. Improvement of assembly line balancing[J]. Shanghai Management Science, 2005, 27(5): 16-17.
- [10] 王佳佳. 基于 IE 的航空制造企业生产线平衡应用研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2016(11): 102-104.
- WANG Jiajia. Research on the balance of production line of aeronautical manufacturing enterprises based on IE[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2016(11): 102-104.

通讯作者: 冯硕, E-mail: simonsquall@sina.com。

Quantitative Study and Improvement of Streamline Balance in Production Workshop of Aviation Fasteners

FENG Shuo, CHEN Chuang

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In order to quantitatively evaluate the balance of aviation fastener production line and improve it, a typical aviation fasteners production line is analyzed. Combining with the concept of streamline balance and the characteristics of aviation fasteners production line, a set of quantitative evaluation index system is established by means of formula derivation, through which the streamline balance can be measured from different angles, the method and feasibility of its application are also expounded. By comparing several methods of current research on streamline balance, a conclusion is drawn that the streamline balance of aviation fastener is more suitable for the method of industrial engineering in analysis; the solution of streamline balancing is studied, which points out that the bottleneck process has important influence on streamline balance. By shortening the processing time of a bottleneck process, the balance of the entire production line can be improved, and also a significant increase in efficiency is obtained for each process on the production line. Finally, the above theories and methods are applied and verified by calculation in an example.

Keywords: Aviation fastener; Streamline balance; Quantitative study

(责编 逸飞)