

# 基于仿真的巡回式 Chaku-Chaku 生产线员工配置与产能分析\*

廖世龙<sup>1,2</sup>, 易树平<sup>1</sup>, 高庆萱<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030; 2. 西北民族大学 数学与计算机科学学院, 兰州 730030)

**摘要:** 为解决巡回式 Chaku-Chaku 生产线员工数量确定及产能计算问题, 对 Chaku-Chaku 型双资源约束制造系统进行了研究, 提出了指派员工数量的计算方法和生产线产能计算方法。建立了基于面向对象 Petri 网逻辑模型并形式化定义了 Chaku-Chaku 规则, 通过仿真方法确认生产线稳态后系统的空间及物理层面特征, 采用数值分析方法分析了同质员工与异质员工两种情况下生产系统的特性, 确定了员工在生产线中的等待时间计算方法及产能计算方法。最后通过案例和仿真验证了计算方法的有效性, 为企业应用该生产线提供了重要指导作用。

**关键词:** Chaku-Chaku; Petri 网; 仿真; 员工指派; 生产线

**中图分类号:** TP391.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1359-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.044

## Modeling and simulation analysis for determining numbers of workers and output for Chaku-Chaku production lines of itineration style

LIAO Shi-long<sup>1,2</sup>, YI Shu-ping<sup>1</sup>, GAO Qing-xuan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Mathematics & Computer Science, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** To solve the problem of determining the operator quantity and capacity for the Chaku-Chaku semi-automatic production lines, this paper studied the production lines constrained by dual resource, and proposed the method for determining the operator quantity and capacity. It built logical model based on colored timed Petri net and formalize defines Chaku-Chaku rules. It was confirmed the steady state of production lines from physical and space aspects by simulation system, studied the system features for the homogeneity staff and heterogeneous staff by the numerical analysis methods. Simultaneously, it worked out concrete calculation algorithm for waiting-time for operator and developed production capacity. Finally, based on the case and discussion of the simulation results, the case study shows that the algorithm is an effective approach to determining system operator quantity and capacity and very useful for the enterprise.

**Key words:** Chaku-Chaku; Petri net; simulation; worker assignment; production lines

## 0 引言

Chaku 日语意为装卸。在日本佳能细胞生产方式<sup>[1,2]</sup>中, Chaku-Chaku 生产线(以下简称 CC 线)因表现为员工只负责工件的装卸而得名。CC 线是基于 CC 规则的手工生产单元, 也是一种先进的生产组织方式。CC 线加工方式<sup>[3]</sup>为: 在一个生产单元内, 第一台机器在它的生产周期结束后, 自动将工件送入缓存, 员工手持缓存中的工件搬运至第二台机器上。而此时, 第二台机器也已结束其上一个周期, 并送出加工完的工件。此员工装载手持工件之后, 启动机器, 并接着把这台机器完成的工件搬运到它后面的那台机器上, 以此类推地在这个单元里进行下去。巡回一圈以完成工件全部加工工序, 完成本单元加工。与普通 U 型生产单元相比, CC 线中机器都包括装夹和自加工两个过程。

CC 线具有以下特点: a) 无工件调试时间<sup>[4,5]</sup>, 员工只需将

工件装夹到每个特定的工位上即可, 然后按下开关后该工件就可在这个工位上继续自动加工; b) 工件由员工手持搬运或用滑槽<sup>[6,7]</sup>, 零件无须等待搬运, 每次移动一个工件形成工件单元内的单件流, 压缩了生产周期及库存, U 型布局节约占地面积; c) 多能工实现了劳动力柔性<sup>[8]</sup>及产能柔性。通过调整员工加工速度及员工数量实现生产节拍动态可调及产能可调, 快速响应动态社会需求; d) 无自动化传送系统, 降低了投资费用和零件加工成本。同时又保证了加工质量, 员工只需在零件完成每一道工序后作简单的质量检查。

如图 1 所示的巡回式 CC 线中。加工过程被分为十个步骤, 每台机器只负责其中的一个步骤, 员工在单元内从 M1 开始装夹原材料后启动开关, 机器开始自动运行; 然后手持 M1 机器缓存处上一周期加工完毕工件逆时针行走至 M2 机器前装夹工件, 启动开关; 搬运上一周期加工完毕的工件行走至下一工位 M3; 重复以上操作直至加工完毕将成品放入成品存放处并开始下一周期的加工。

**收稿日期:** 2011-08-31; **修回日期:** 2011-10-18      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70871127); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070611027); 重庆市科技攻关计划项目(2011GGC027)

**作者简介:** 廖世龙(1980-), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为系统仿真、先进制造系统(longlongliao@163.com); 易树平(1960-), 男, 重庆人, 博导, 主要研究方向为工业工程理论及技术、知识管理; 高庆萱(1970-), 女, 重庆人, 副教授, 博士, 主要研究方向为工业工程理论。

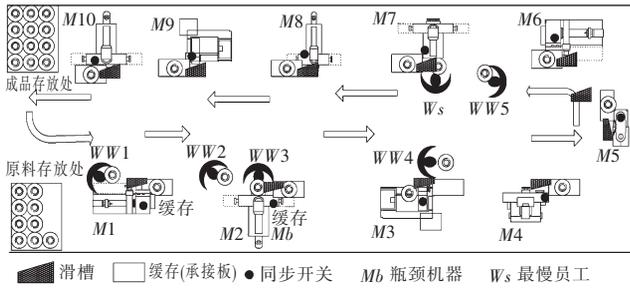


图 1 巡回式 Chaku-Chaku 生产线运行

综上所述,CC 线是一种新颖的、紧凑的、适合机械加工和装配业的柔性半自动化制造系统。但是,由于 CC 线中的员工配置和设备排程是一个典型的双资源约束问题,目前仍然是工业工程等领域中有待解决的难题,对该系统员工配置及系统产能进行研究对企业建立柔性化制造系统、压缩制造成本及提高生产效率具有重大的意义。

### 1 文献综述

巡回式 CC 生产线表现为 U 型员工行走串行类生产系统,考虑到生产线中人员在工位前的等待时间及行走时间,又不同于经典的装配线平衡问题<sup>[9]</sup>。对于普通 U 型生产单元, Cesan 等人<sup>[10]</sup>根据机器与员工的指派关系,采用仿真方法阐明了工作分享水平对系统产出的影响;Ertay 等人<sup>[11]</sup>采用数据包络法确定 U 型单元生产方式下员工数量与产能的关系;而 Fitzpatrick 等人<sup>[12]</sup>从员工性格取向及技术掌握的深度和广度建立了规划模型,提出了 U 型单元团队组建的方法。以上文献虽然研究了 U 型生产线,但都不是 CC 线。

Nakade 等人<sup>[13]</sup>对以最小化同质<sup>[9]</sup>(相同工作效率)及异质(不同的工作效率)多能员工工数量及生产周期为目标函数建模,提出了 U 型生产单元的指派算法,并对两个员工在系统中的情况进行了分析。Zhang 等人<sup>[14]</sup>针对 Nakade 模型对算法进行了改进,缩短了算法运行时间。以上研究局限于分割式(每人固定看守个别机器)U 型 CC 线且只考虑了在静态情况下的员工配置问题。由于系统的动态特征,无法验证系统运行效果及测算该型生产线的产能。

本文首次对巡回式(每位员工会操作生产线中每台设备)CC 生产线员工配置及产能计算问题,采用仿真及数值分析方法进行研究。由于 CC 线是典型的双资源约束下串行生产线,生产能力由机器和员工数量共同决定。因此,向 CC 生产线中分派员工以确定系统产能是设计和运行 CC 生产线的核心问题。同时,串行生产线属于离散事件动态系统(DEDS)。研究表明<sup>[15]</sup>,即使中间存储容量无限的串行生产线的 DEDS,其时间层次上的表现形式也是严重非线性的,导致难以研究系统变化过程的规律性。因此本文采用离散仿真系统模拟追踪巡回式 CC 生产线动态特性,并结合数值分析方法对系统的最佳员工配置数及最大产出进行定量分析,提出员工配置方法及系统产能确定方法,为制造和装配企业应用 CC 生产线提供决策依据。

### 2 CC 机制运行协议形式化定义

如图 1 所示,在 CC 线运行过程中存在排队等待、工作站操作等多种运行规则。因此,本文选择人工智能的谓词逻辑进行 CC 机制的形式化描述以便于 Petri 网运行逻辑建模及仿真

平台中的二次系统开发。

#### 2.1 谓词定义

a) walkworker( $x$ )代表 CC 线员工  $x$ ,若 CC 线有  $i$  位员工,则论域  $A$  为  $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ 。

b) product( $y$ )代表 CC 线上的产品数量,若要加工  $j$  个产品,则论域  $B$  为  $\{y_1, \dots, y_j\}$ 。

c) machine( $z$ )代表 CC 线中的机器,若行走线中有  $k$  台机器,则论域  $C$  为  $\{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ 。

d) buffer( $u$ )代表机器滑槽连接的缓存,论域  $D$  为  $\{u_1, u_2, \dots, u_l\}$ 。其中, $u_l$  为第  $l$  台机器的输出缓存,用于机器自加工后成品工件的收集。

e) manipulate( $x, y$ ) 代表员工  $x$  手持  $y$  工件,其中  $x \in A, y \in B$ 。

f) operate( $x, z$ ) 代表员工  $x$  在机器  $z$  上安装及设置, $x \in A, z \in C$ 。

g) equal( $v, w$ ) 代表  $w = v$ ,其中, $w, v$  取全域。

h) location( $x, z$ ) 代表  $x$  员工启动  $z$  机器开关,其中  $x \in A, z \in C$ 。

#### 2.2 函数定义

公共函数 status( $w$ )为状态函数,描述变量状态,随  $w$  取值不同分别有以下定义:

a) 当  $w \in x$ ,表示员工的状态:

$$\text{status}(w) = \begin{cases} \text{working} & \text{工位安装及设置} \\ \text{free} & \text{空闲、等待} \\ \text{walking} & \text{行走中、离去} \end{cases}$$

b) 当  $w \in y$ ,表示产品的加工状态:

$$\text{status}(w) = \begin{cases} \text{manual} & \text{装夹及设置中} \\ \text{auto} & \text{自动加工中} \\ \text{end} & \text{加工结束} \end{cases}$$

c) 当  $w \in z$  时,表示机器加工状态:

$$\text{status}(w) = \begin{cases} \text{busy} & \text{占用中} \\ \text{free} & \text{闲置中} \end{cases}$$

d) 当  $w \in u$  时,表示缓存的状态:

$$\text{status}(w) = \begin{cases} \text{full} & \text{缓存满} \\ \text{empty} & \text{缓存空} \end{cases}$$

#### 2.3 员工输入/输出信息

在 CC 线中工件被连续地加工,行走员工通过视觉、语言等传递相互间的信息,一个员工存在多个输入和输出信息,由此定义任务输入/输出函数:

a) input( $x, n$ )表示员工  $x$  的第  $n$  个输入信息

$$\text{input}(x, n) = \begin{cases} \text{false} & \text{输入未知 } x \text{ 不能开始工作} \\ \text{true} & \text{输入已知 } x \text{ 可以开始工作} \\ \text{stop} & \text{输入信息停止 } x \text{ 暂停工作} \\ \text{continue} & \text{暂停的 } x \text{ 继续工作} \end{cases}$$

b) output( $x, m$ )表示员工  $x$  的第  $m$  个输出信息

$$\text{output}(x, m) = \begin{cases} \text{false} & \text{输出未知 } x \text{ 未完成工作} \\ \text{true} & \text{输出已知 } x \text{ 完成工作} \end{cases}$$

#### 2.4 CC 机制下人一机一缓存运行协议

1) 如果工位机器  $z$  空闲且员工  $x$  手持工件  $y_i$ ,则员工  $x$  安装手持工件  $y_i$  于机器  $z$ , $x$  开启自动加工按钮后同时携带缓存中的存放件  $y_{i-1}$  后离去。

$$(\forall x)(\exists y_i)(\forall z)((\text{equal}(\text{status}(z), \text{free}) \wedge \text{manipulate}(x, y_i) \wedge$$

equal(status(u),full)→operate(y<sub>i</sub>,z)∧manipulate(x,y<sub>i</sub>)∧(∃m)equal(status(output(x,m)),true)→equal(status(x),walking)∧manipulate(x<sub>i</sub>,y<sub>i-1</sub>)∧location(x,z)

b)如果工作站机器 z 处于自动加工状态,则员工 x 手持工件 y<sub>i</sub> 等待直到自动加工结束,然后安装工件,开启自动加工按钮后携带缓存中存放的工件 y<sub>i-1</sub> 后离去。

(∀x)(∃y<sub>i</sub>)(∀z)((equal(status(z),working)∧operate(y<sub>i-1</sub>,z)→manipulate(x,y<sub>i</sub>)∧(∃n)equal(status(input(x,n)),true)∧operate(y<sub>i</sub>,z)∧manipulate(x,y<sub>i</sub>))→equal(Status(x),walking)∧manipulate(x,y<sub>i-1</sub>)∧location(x,z))

### 3 巡回式 CC 生产线逻辑模型

基于 CC 规则的形式化定义,本章采用 OOPN 方法建立巡回式 CC 生产系统运行逻辑模型。OOPN 是一种描述系统静态特性和动态特性的图行化建模工具,被应用于复杂系统建模及分析中。OOPN 模型由对象 Petri 网(OPN,有模块化、可重复性特点)及对象间的联系网(OCN,用于结构化描述复杂逻辑关系)组成。CC 生产线的 OOPN 模型如图 2 所示。其中的状态及信息库所含义如表 1 所示,T<sub>10</sub>为抽象模型,代表生产的成品入库。

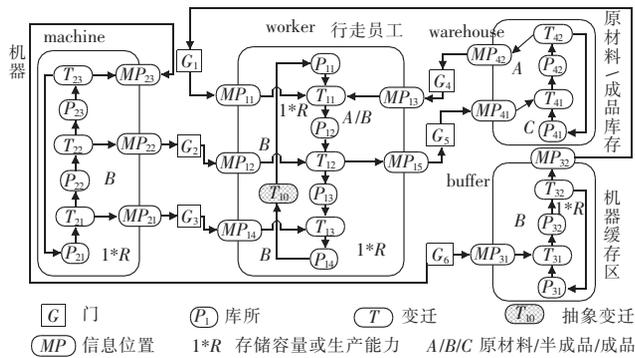


图 2 巡回式 Chaku-Chaku 生产线 OOPN 运行模型

表 1 OOPN 模型中状态及信息库所含义

库所	P 所代表的状态意义	信息	MP 所代表的信息含义
P <sub>11</sub>	员工手中无工件	MP <sub>11</sub>	请求加载半成品信息
P <sub>12</sub>	员工手中持有工件	MP <sub>12</sub>	完成加载信息
P <sub>13</sub>	员工手持工件设置中	MP <sub>13</sub>	请求加载原材料信息
P <sub>14</sub>	员工机器设置完毕	MP <sub>14</sub>	请求设置信息
P <sub>21</sub>	机器空闲状态	MP <sub>15</sub>	成品入库信息
P <sub>22</sub>	机器处于设置状态	MP <sub>21</sub>	机器等待加工信息
P <sub>23</sub>	机器处于自加工状态	MP <sub>22</sub>	机器自加工信息
P <sub>31</sub>	机器输出缓存区为空	MP <sub>23</sub>	工件自卸信息
P <sub>32</sub>	机器输出缓存区为满	MP <sub>31</sub>	工件请求入缓存信息
P <sub>41</sub>	原材料/成品区为空	MP <sub>32</sub>	工件请求出缓存信息
P <sub>42</sub>	原材料/成品区为满	MP <sub>41</sub>	工件请求入库信息
		MP <sub>42</sub>	工件请求出库信息

CC 系统的对象 OPN 集合为四元组 OPN = { worker, machine, buffer, warehouse }; 以对象 worker 的 OPN 七元组为例: worker = { SP<sub>1</sub>, AT<sub>1</sub>, IM<sub>1</sub>, OM<sub>1</sub>, I<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> }。其中 SP<sub>1</sub> = { P<sub>11</sub>, P<sub>12</sub>, P<sub>13</sub>, P<sub>14</sub> } 为 worker 状态库所集合; AT<sub>1</sub> = { T<sub>10</sub>, T<sub>11</sub>, T<sub>12</sub>, T<sub>13</sub>, T<sub>14</sub> } 为活动变迁集合; IM<sub>1</sub> = { MP<sub>11</sub>, MP<sub>12</sub>, MP<sub>13</sub>, MP<sub>14</sub> } 为输入信息库所集合; OM<sub>1</sub> = { MP<sub>15</sub> } 为输出信息库所集合; C(P<sub>11</sub>) = { A, B, C }, C(P<sub>12</sub>) = C(P<sub>13</sub>) = { B }, C(P<sub>14</sub>) = { B, C }, 为状态库所的色彩集合; 当库所与变迁对相同种类工件时 I、O 为 1, 其他情况为 0。其他对象类似, 不再赘述。

CC 系统的对象 OCN 集合是以对象 i(发送者)与对象 j(接

收者)信息传递关系 R<sub>ij</sub> = { OM<sub>i</sub>, g<sub>ij</sub>, IM<sub>j</sub>, C(OM<sub>i</sub>), C(IM<sub>j</sub>), C(g<sub>ij</sub>), I<sub>ij</sub>, O<sub>ij</sub> } 为元素集合。以对象 R<sub>machine\_worker</sub> 的七元组为例: OM<sub>machine</sub> = { MP<sub>22</sub> }, g<sub>machine\_worker</sub> = { G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> }, IM<sub>worker</sub> = { MP<sub>12</sub>, MP<sub>14</sub> }。当库所和变迁色彩相同时, I<sub>machine\_worker</sub>, O<sub>machine\_worker</sub> 取值为 1, 其他为 0。其他对象不再赘述。

### 4 系统仿真与分析

#### 4.1 仿真平台设计

基于建立的 OOPN 系统运行逻辑模型,巡回式 CC 生产线的性能可以通过仿真技术进行分析和评价。本文利用 Plant Simulation 9.0 面向对象的仿真软件来观察系统运行过程中物理及时间层面变化规律,为进行数值分析提供可视化分析基础。根据仿真实况,将仿真平台分为模型层、巡回式 CC 规则调度与控制层、系统分析层三层。模型层实现对 CC 线的制造资源进行仿真建模。控制与调度层负责针对巡回式 CC 机制下的人机协议规则的触发条件、时延和路径选择,使用 Simtalk、C 语言编写员工、工件与设备的调度规则和控制策略以实现仿真的控制与调度。性能分析层从不同的视图和数据获取仿真结果,进行定量的性能分析和评价。模型层和调度与控制层的通信用 Plant Simulation 的 socket 对象实现,调度与控制层和分析层的信息交互通过 ODBC 接口实现,如图 3 所示。

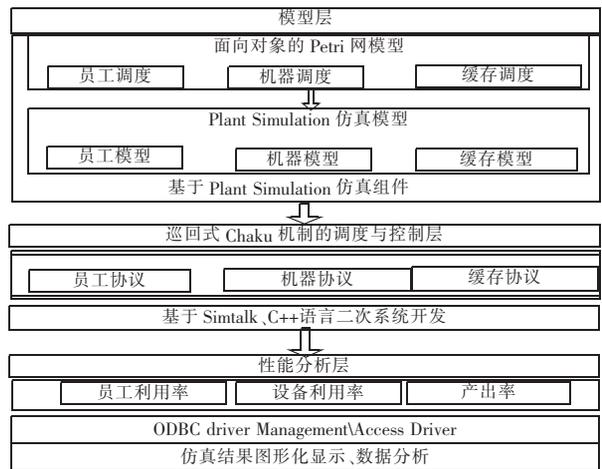


图 3 仿真平台结构

#### 4.2 仿真参数

1)巡回式 CC 线仿真系统输入量 input 由五元组构成: input = { ST, PT, N, M, B, Wv }。其具体含义如下: ST 表示员工设置标准时间,单位为 s,服从 U[10,360]; PT 表示设备自动加工时间,单位为 s,服从 U[10,360]; N 表示多技能工数量, N ∈ {4...10}; M 表示设备数量,本研究为 10 台; B 表示机器缓存容量, B : 1; Wv 表示员工行走速度,为 1.76 m/s。

2)仿真系统输出量 output 三元组为: output = { EUR, OPUT, MUR }。其具体含义如下: EUR (employees utilization rate) 表示员工利用率; OPUT (output per unit of time) 表示单位时间产出量; MUR (machine utilization rate) 表示设备利用率。具体计算为

$$EUR = \frac{\sum_{i=1}^n t_{uei}}{\sum_{i=1}^n (t_{uei} + t_{wfi})}$$

$$OPUT = \frac{\sum_{i=1}^n n_{oi}}{\sum_{i=1}^n n_{ii}}$$

$$MUR = \frac{\sum_{i=1}^n t_{mui} / \sum_{i=1}^n (t_{mui} + t_{mfi})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j \neq b} WT_{ij}} = 0 \quad (3)$$

其中:

- $t_{wui}$  表示仿真到第  $i$  步员工的操作时间;
- $t_{wfi}$  表示仿真到第  $i$  步员工的空闲时间;
- $n_{oi}$  表示仿真到第  $i$  步系统产品产出量, 单位为件;
- $n_{ii}$  表示仿真到第  $i$  步系统仿真时间, 单位为 d;
- $t_{mui}$  表示仿真到第  $i$  步设备利用时间;
- $t_{mfi}$  表示仿真到第  $i$  步设备的空闲时间;
- $i$  为当前仿真事件激发数;
- $n$  为仿真周期内任务执行总数。

### 4.3 仿真结果及数值分析

在仿真平台上建立了巡回式 CC 生产线仿真模型, 仿真时长为 20 d, 仿真 100 次, 机器的自动加工时间  $PT$  与员工操作时间  $ST$  由服从等区间均匀分布随机产生, 保证了 10 台设备任何一台都可能成为瓶颈机器。仿真显示瓶颈机器为设置时间  $ST$  与自动加工时间  $PT$  之和最大的设备。由于这并不是本文重点, 所以 10 台设备具体  $ST$  和  $PT$  数值在此不再列出。以下对仿真系统进入稳态后从空间和物理层面所表现出的特性分两种情况进行分析。

#### 4.3.1 员工有同等操作效率时

该情况下假设每位工人具有相同的工作速率, 考虑操作水平差异很小。当系统预热达到稳态后, 每位员工的 EUR、系统的 MUR 及 OPUT 值都为定值后, 系统表现为每位员工周期性地瓶颈机器  $Mb$  前产生排队等待队列现象, 如图 1 中  $Mb$  前。而以下根据系统表现出的特征, 推导达到最大产能的员工数量计算公式。

标志:

$$i: 1, \dots, m \quad j: 1, \dots, n$$

参数:

- $M$  表示机器总数  $m$ ;
- $N$  表示员工总数  $n$ ;
- $ST_{ij}$  表示第  $i$  台机器上员工  $j$  的操作时间;
- $PT_i$  表示第  $i$  台机器自动处理时间;
- $WT_{ij}$  表示员工  $j$  在第  $i$  台机器前等待操作时间;
- $TWT_j$  表示员工  $j$  在一次循环中总的等待时间;
- $WAT_{ij}$  表示员工  $j$  到达机器  $i$  的时刻;
- $PAT_i$  表示工件进入机器  $i$  的时刻;
- $QWT_j$  表示员工  $j$  在一次循环中进入工位前的排队等候时间。

因此  $WT_{ij} = ST_{ij-1} + PT_i - (WAT_{ij} - PAT_i)$ , 即  $j-1$  员工 (排在  $j$  员工前) 在  $i$  设备上操作时间与  $i$  自动处理时间之和减去员工  $j$  到达机器  $i$  时刻与工件进入机器  $i$  的时刻之差为开始操作前的等待时间。其满足

$$0 \leq WT_{ij} \leq PT_i \quad (1)$$

则员工  $j$  总等待时间为

$$TWT_j = \sum_{i=1}^M WT_{ij} + QWT_j \quad (2)$$

分析: 系统稳态后瓶颈机器  $Mb$  前产生排队现象, 由于  $ST_b + PT_b \geq \forall i (ST_i + PT_i)$ , 所以工件经过瓶颈机器  $Mb$  后对后续机器产生一个  $ST_b + PT_b$  的时间保护, 防止后续机器产生  $WT_{ij}$  时间, 因此对于所有的  $WT_{ij}$  有

瓶颈机器下游每位员工只产生  $ST_{ij}$  时间, 因此从员工  $j$  离开瓶颈机器时刻到  $j$  再次将进入瓶颈机器且没有进入时刻, 总的经历时间为

$$TT_j^{M-Mb} = \sum_{i=1}^M ST_i - ST_b \quad (4)$$

同时, 其他  $N-1$  位员工在瓶颈机器  $Mb$  上经历的时间为

$$(N-1) \times (ST_b + PT_b) \quad (5)$$

当式(4)  $\geq$  式(5)时, CC 生产线中不产生排队等待现象, 当式(4)  $<$  式(5)时,  $j$  员工存在瓶颈机器  $Mb$  前的排队等待时间。由于  $\sum_{i=1}^M \sum_{j \neq b} WT_{ij} = 0$ , 由式(2)可知总等待时间为

$$TWT_j = \sum_{i=1}^M WT_{ij} + QWT_j = QWT_j = \text{式(5)} - \text{式(4)} = (N-1) \times (ST_b + PT_b) - (\sum_{i=1}^M ST_i - ST_b) \quad (6)$$

所以, 员工  $j$  循环一个周期后生产单位工件所需要的时间为等待时间与操作时间之和

$$T_j = QWT_j + \sum_{i=1}^M ST_i + PT_b \quad (7)$$

即

$$T_j = (N-1) \times (ST_b + PT_b) - \sum_{i=1}^M ST_i + ST_b + \sum_{i=1}^M ST_i + PT_b$$

化简得

$$T_j = N(ST_b + PT_b) \quad (8)$$

#### 4.3.2 员工操作效率不一致时

当  $ST_{i1} \neq ST_{i2}$  时, 即每台机器的员工操作时间不同。为了避免效率高的员工与效率低的员工相撞, 暂不考虑员工超越情况, 所以每位员工不可能有相同的加工速度。随机分配加工效率给七名员工, 效率服从均匀分布  $U[0.8, 1.0]$ , 仿真系统预热后达到稳态, 系统显示了最慢的员工  $Ws$  与其前一员工产生三台机器的时间间隔, 如图 1 中  $Ws$ , 最慢员工限制了其后员工的加工效率, 因此, 在员工加工效率不同的情况下, 最慢员工在瓶颈机器前存在等待的同时又限制其他员工的加工速度。同上, 从最慢员工  $Ws$  离开  $Mb$  机器开始到其即将进入  $Mb$  且没有进入期间, 由于  $Ws$  加工效率阻碍了其快于他的员工, 因此在  $Ws$  后会产生等待队列。与此同时,  $Ws$  的前方瓶颈机器  $Mb$  产生了一个  $ST_b + PT_b$  的时间缓冲, 因此  $Mb$  后的机器在员工到达后也不会产生  $WT_{ij}$  时间, 所以稳态后不产生  $WT_{ij}$ , 即  $\sum_{i=1}^M \sum_{j \neq b} WT_{ij} = 0$ 。那么不包括瓶颈机器  $Mb$  的情况下, 最慢员工  $Ws$  单圈总时间为

$$TT_S^{M-Mb} = \sum_{i=1}^M ST_{i,S} - ST_{b,S} \quad (9)$$

在此期间有  $N-1$  位员工通过瓶颈机器  $Mb$ , 花费时间为

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq S}}^N ST_{i,j} + (N-1)PT_b \quad (10)$$

当式(9)  $\geq$  式(10), 不存在加工排队等待情况。

当式(9)  $<$  式(10)时, 最慢员工  $Ws$  的等待时间为

$$TWT_S = \sum_{i=1}^M WT_{i,S} + QWT_S = QWT_S = \text{式(10)} - \text{式(9)} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq S}}^N ST_{b,j} - TT_S^{M-Mb} =$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq S}}^N ST_{i,j} + (N-1)PT_b - [\sum_{i=1}^M ST_{i,S} - ST_{b,S}]$$

即

$$TWT_S = \sum_{j=1}^N ST_{b,j} - \sum_{i=1}^M ST_{i,S} + (N-1)PT_b \quad (11)$$

由于本研究假设员工没有超越,所以系统的产出由最慢员工  $W_s$  决定(如图 1,瓶颈机器  $M_b$ )。定义  $T$  为每位员工生产单位产品所需时间,以下考虑两种情况:

a) 当最慢员工没有遇到排队等待时由式(11)得

$$T = \sum_{i=1}^M ST_{i,s} = \sum_{j=1}^N ST_{b,j} + (N-1)PT_b$$

b) 当最慢员工存在排队等待时

$$T = QWT_s + \sum_{i=1}^M ST_{i,s} = \sum_{j=1}^N ST_{b,j} - (N-1)PT_b \quad (12)$$

因此对于普通员工  $j$  而言,生产单件产品的等待时间为

$$QWT_j = T - \sum_{i=1}^M ST_{i,j}$$

当  $QWT_s > 0$  时

$$QWT_j = \sum_{j=1}^N ST_{b,j} + (N-1)PT_b - \sum_{i=1}^M ST_{i,j} \quad (13)$$

当  $QWT_s = 0$  时

$$QWT_j = \sum_{i=1}^M ST_{i,s} - \sum_{i=1}^M ST_{i,j} \quad (14)$$

### 5 实例研究

本文以某机械加工有限公司细胞生产项目中初步设计的 CC 生产线实际采集数据情况进行研究,以验证以上结论的有效性。如表 2 所示,  $M_2$  机器总处理时间最大为  $M_b$  设备。

表 2 巡回式 CC 线设备操作及自动加工时间

机器 $i$	操作时间 $ST_i/s$	自动加工时间 $PT_i/s$	总处理时间 $ToTime/s$
$M_1$	105	124	229
$M_2$	96	220	316
$M_3$	137	152	289
$M_4$	76	133	209
$M_5$	110	137	247
$M_6$	58	210	268
$M_7$	210	65	275
$M_8$	87	63	150
$M_9$	66	78	144
$M_{10}$	58	102	160
$\Sigma$	1003	1284	2287

#### 5.1 CC 生产线中员工配置数量计算

由 5.3 节分析可知,当员工工作效率相等时,运行巡回式 CC 生产线只可能在瓶颈机器前出现等待。由精益生产理念可知,排队等待是精益生产七大浪费之一,因此当配置过多的员工时并不能提高 CC 生产线的产出,增加多余的员工导致了排队现象的产生是一种非增值活动,但同时企业也需要根据订单数量及交货期测算 CC 中员工数量以减少库存,避免产生库存浪费现象。因此有必要计算出 CC 生产线最大有效指派员工数量。由分析可知,当每一位员工不存在等待且再增加一位员工会产生排队等待时,员工数量是系统最佳数量,即  $num_{opt}$ ;若增加一位员工则立即产生瓶颈机器  $M_b$  前的  $WT_{ij}$  类型等待时间,其满足  $0 \leq WT_{ij} \leq PT_b$ 。因此利用等待时间小于等于零,即由

$$TWT_j^{num} = QWT_j = (N-1) \times (ST_b + PT_b) - (\sum_{i=1}^M ST_i - ST_b) \leq 0 \quad (15)$$

计算有效指派员工的最佳数  $num_{opt}$ ,代入表 2 中数值。由  $TWT_j^{num} \leq 0$  计算得  $num_{opt} \leq 3.87$ ,即 CC 生产线最佳指派员工为 3 人,超过 3 人后会产生排队等待,但是 3 人并非系统最大产出,对于人员个数而言,4 人情况下系统产出最大,继续增加人数产能不变。同理,由 5.3 节推导公式可以分两种情况进行讨论来计算异质性员工配置数量,篇幅所限不再逐一讨论。图 4 给出了表 2 数据下员工指派数分别为 10、7、5、3 时的等待时

间百分比,其中,当 3 名员工时,员工利用率为 100%,无等待时间浪费,在趋势图中没有反映。

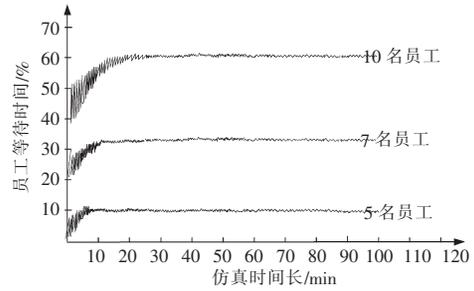


图 4 基于 Plant 9.0 仿真软件的员工等待时间百分比

#### 5.2 产能计算

以下针对异质性员工情况下进行 CC 生产线产能计算。由上文分析可知,当员工加工效率不一致时,系统的生产速度由最慢的员工决定。以下假设在 10 台设备情况下,员工最大效率为 100%,最慢员工的效率为 90%,由 5.1 节可知,系统生产一个工件所需要的时间由最慢员工效率与最长的加工时间确定,在不产生排队等待条件下,生产单位产品所需时间为  $T = \sum_{i=1}^M ST_{i,s}$ 。由于最慢员工效率为普通员工的 90%,则由表 2 数据可得生产单位工件所需时间为 1 115 s。如果每天需要 100 个单位工件,可以计算生产节拍为 288 s,由  $T = \sum_{i=1}^{10} ST_{i,s} \leq 288 \times N$  得  $N \geq 3.87$ ,即配置 4 名员工即可。计算得最佳员工数量为 5 人情况下 223 s 生产一个工件。因此得到每天产能计算公式为每天有效工作时间与生产率之比,即在最佳员工指派水平下 CC 生产线生产能力约为 130 件。

### 6 结束语

本文针对巡回式 CC 生产线的员工指派问题及产能计算问题通过仿真和数值方法得出了计算公式,并且证明了其有效性,但是在 CC 生产线运作过程中要注意以下几点:

- a) 瓶颈机器的总处理时间由两部分构成,压缩员工操作时间或者改变工艺减少自动处理时间都是压缩瓶颈机器处理时间的方法,也都是提高系统产出的途径。
  - b) 运行 CC 生产线时在初始阶段要保证每个工位上都有一个加工完毕的缓冲件以保证能应用 CC 规则。
  - c) 本文研究的内容因考虑员工加工效率相近,假定员工操作过程中超越现象没有发生,在一定程度上简化了模型。
- 下一步笔者将以可超越式 CC 生产线和混合式 CC 生产线作为研究重点。

#### 参考文献:

[1] 刘晨光, 廉洁, 李文娟. 日本式单元化生产—生产方式在日本的最新发展形态[J]. 管理评论, 2010, 22(5): 93-103.

[2] YIN Yong, KAKU I, STECKE K E. The evolution of Seru production systems throughout Canon[J]. Operations Management Education Review, 2008(2): 27-40.

[3] MIYAKE D I. The shift from belt conveyor line to work-cell based assembly systems to cope with increasing demand variation in Japanese industries [J]. Automotive Technology and Management, 2006, 6(4): 419-439.

[4] YIN Yong, KAKU I, MURASE Y, et al. Seru (cell) and reverse conversion, part I: definition, self-evolution, and typology [R]. Japan: Yamagata University, 2008. (下转第 1380 页)

位比率;第4列  $T_1$  是基于扫描阻塞的 BAST 方案需存储的总数据位数,由于伪随机序列是采用 LFSR 实现的,且初始种子是随机选取,所以第4列数据与文献[3]的结果略有不同。第5列  $T_2$  是采用部分数据编码存储的测试方案需存储的总数据位数;第6列的  $T_{FDR}$  为采用 FDR 编码方法压缩后的测试数据位数;第7列数据  $I_1$  为  $T_2$  相比  $T_1$  减少的比率,计算式为  $I_1 = (T_1 - T_2) / T_1 \times 100\%$ ;第8列数据  $I_2$  为  $T_2$  相比  $T_{FDR}$  减少的比率,计算式为  $I_2 = (T_{FDR} - T_2) / T_{FDR} \times 100\%$ 。从表2数据得知,除 s38417 电路外,其他几个被测电路采用部分编码存储的方案需存储的总数据位数最少。

因为序列中0串的长度具有不确定性,本实验只对测试数据中的一部分进行编码压缩,另一部分扫描阻塞信号仍需由 ATE 直接存储,表2的第5列数据是两项之和。除 s38417 电路采用的是5位编码压缩外,其余几个测试电路都采用4位编码,这样选择与测试数据中0串的具体分布有关。

由本文2.2节的分析可知,若电路  $r$  与  $N$  的乘积增大,则改进方案的编码位数可以更大,压缩效果会更好,但前提是移入扫描链的测试向量中确定位较均匀地分布于各个测试片段。

#### 4 结束语

本文在基于扫描阻塞的 BAST 测试方案基础上,充分考虑到确定位分布较均匀的测试向量分割成多个测试片段后,每个片段与伪随机序列匹配时所需要的扫描阻塞控制信号串是相差不大的0游程序列。对这些信号用编码方式压缩,可以得到更好的压缩效果,节省存储资源,而多余付出的硬件代价是非常小的。

下一步可以考虑分段编码压缩。将需存储的控制信号串分成多个部分,分别由计数器产生或用 ATE 直接存储,前者存储原始数据串的编码。两者轮流输出扫描阻塞信号控制 PRPG 和 PS 产生的序列片段是否移入 CUT。此方案对应的关键问题是如何分段以及如何控制两部分数据的转换,还需考虑为此而增加的解码电路硬件开销。

#### 参考文献:

- [1] BUSHNELL M L, AGRAWAL V D. Essentials of electronic testing for digital, memory, and mixed-signal VLSI circuits[M]. 蒋安平, 冯建华, 王新安, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 梁华国, 蒋翠云. 基于交替与连续长度码的有效测试数据压缩和解压[J]. 计算机学报, 2004, 27(4): 548-553.
- [3] YOU Zhi-qiang, WANG Wei-zheng, DOU Zhi-ping, et al. A scan disabling-BAST scheme for test cost reduction[J]. IEICE Electronics Express, 2011, 8(16): 1367-1373.
- [4] HOSOKAWA T, CHEN Y, WAN L, et al. A test pattern matching method on BAST architecture using don't care identification for random pattern resistant faults[C]//Proc of IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies. 2010: 738-743.
- [5] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. Test data compression and decompression based on internal scan chains and golomb coding[J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2002, 21(6): 715-722.
- [6] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. Test data compression and test resource partitioning for system-on-chip using frequency-directed run-length(FDR) codes[J]. IEEE Trans on Computers, 2003, 52(8): 1076-1088.
- [7] GONCIARI P T, HASHIMI B M. Variable-length input Huffman coding for system-on-a-chip test[J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2003, 22(6): 783-796.
- [8] 詹文法, 梁华国, 时峰, 等. 混合定变长码的测试数据压缩方案[J]. 计算机学报, 2008, 31(10): 1826-1834.
- [9] KRISHNA C V, TOUBA N A. Reducing test data volume using LFSR reseeding with seed compression[C]//Proc of International Test Conference. 2002: 321-330.
- [10] FU Y H, WANG S J. Test data compression with partial LFSR reseeding[C]//Proc of the 14th Asian Test Symposium. 2005: 343-347.
- [11] WANG S, WEI W L, CHAKRADHAR S T. A high compression and short test sequence test compression technique to enhance compressions of LFSR reseeding[C]//Proc of the 16th Asian Test Symposium. 2007: 79-86.
- [12] DAI Gui, YOU Zhi-qiang, KUANG Ji-shun, et al. DCScan: a power-aware scan testing architecture[C]//Proc of the 17th Asian Test Symposium. 2008: 343-348.
- [13] ARAI M, FUKUMOTO S, IWASAKI K. Test data compression of 100x for scan-based BIST [C]//Proc of IEEE International Test Conference. 2006: 23-26.
- [4] 梁华国, 蒋翠云. 基于交替与连续长度码的有效测试数据压缩和解压[J]. 计算机学报, 2004, 27(4): 548-553.
- [5] YIN Yong, KAKU I, MURASE Y, et al. Seru (cell) and reverse conversion, part II: homogenous manufacturing organizations[R]. Japan: Yamagata University, 2008.
- [6] CHIANG W C, URBAN T L. The stochastic u-line balancing problem: a heuristic procedure[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(3): 1767-1781.
- [7] YIN YONG, KAKU I, MURASE Y, et al. Converting flow lines to manufacturing cells-another revolution? Cellular manufacturing implementations in Japan[C]//Proc of the 3rd International Conference on Group Technology/Cellular Manufacturing GT/CM. 2006.
- [8] HOPP W J, TEKIN E, Van OYEN M P. Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers [J]. Management Science, 2004, 50(1): 83-98.
- [9] NAKADE K, OHNO K. An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line [J]. International Journal of Production Economics, 1999, 60(1): 353-358.
- [10] CESAN V I, STEUDEL H J. A study of labor assignment flexibility in cellular manufacturing systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(3): 571-591.
- [11] ERTAY T, RUAN D. Data envelopment analysis based decision model for optimal operator allocation in CMS [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(3): 800-810.
- [12] FITZPATRICK E L, ASKIN R G. Forming effective worker teams with multi-functional skill requirements [J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(3): 593-608.
- [13] NAKADE K, NISHIWAKI R. Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line [J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(3): 432-440.
- [14] ZHANG Wen-ming, DEUSE J. Cell staffing and standardized work design in Chaku-Chaku production lines using a hybrid optimization algorithm[C]//Proc of International Conference on Computers & Industrial Engineering. 2009.
- [15] NAHAS N, NOURELFATH M, AIT-KADI D. Selecting machines and buffers in unreliable series-parallel production lines[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(14): 3741-3774.

(上接第1363页)