

考虑待机能耗的串行生产线模糊控制优化研究

王磊, 林文文*, 屠建飞

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了减少串行生产线上机器在饥饿或堵塞状态下的待机耗能, 提出了对机器进行模糊控制后、停的节能方法. 在不影响生产线产量的前提下, 模糊控制器利用被控制机器上、下游缓存区的实时容量数据, 确定该机器的最大节能停机时长, 并通过遗传算法, 以最大停机节能时长为目标函数, 对模糊控制器的隶属函数进行优化, 提高了模糊控制器的节能性能. 仿真模型试验结果表明, 相对于原始生产线, 在运用经过优化的模糊控制器的串行生产线上, 待机能耗降低达27.35%, 并且生产线产量未受影响.

关键词: 串行生产线; 缓存区; 节能方法; 模糊控制; 遗传算法

中图分类号: TB49

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0023-07

在全球气候变暖的大背景下, 节能高效的生产模式已成为全球各国关注的热点问题之一. 学者们在生产线节能生产方面做了大量工作. Gutowski等^[1]对制造环境进行了研究, 得出85.2%的能量消耗与零件制造过程没有直接关系. Drake等^[2]对加工中心铣削过程的能耗进行监控, 结果显示机器在启动过程和待机状态消耗了大量能量, 在串行生产线中, 机器故障等生产突发事件是不可避免的. Buzacott等^[3]指出机器之间的缓存区能短时间内降低机器间的节拍不平衡对生产线的消极影响, 减少机器堵塞和饥饿情况的发生. 万松^[4]研究了带有缓存区的二级串行生产线的能效分析方法. 张新诚等^[5]基于标准样件的机床能耗分析指导了生产线设计, 减少了生产线不平衡带来的设备待机能耗. Chang等^[6]利用缓存区的作用提出节能机会窗(Energy Saving Windows, ESW)的概念, 将非瓶颈机器关闭特定时长, 防止机器在堵塞和饥饿时待机耗能, 并在文献[7]中用解析方法证明了缓存区最大容量和初始缓存区容量对节能窗的影响. Brundage等^[8-9]分析和证明了利用节能机会窗能有效地提升能量消耗的利润产出, 并在文献[10]中将

机器的节能机会窗和供热通风与空气调节系统相结合, 实现协同节能. 运用此类方法前提是确定生产线的瓶颈机器, 而瓶颈机器的确定, 一方面受到缓存区初始库存量、生产批次量、生产线加工时间等因素的影响, 不能简单地通过加工速率来确定; 另一方面瓶颈机器同样存在待机运行耗能的情况, 因此此类方法存在一定的局限性.

周炳海等^[11]提出在满足一定产出比的前提下, 以节能最大化为优化目标的基于贪婪算法与概率接受准则的演化迭代算法. Chen等^[12]建立了包含2台机器1个缓存区的生产线反馈控制的节能模型, 并计算了动态节能模型的最优解. Li等^[13]利用机器运行状态的马尔可夫性, 研究了多机器多缓存区情况下机器运行状态的动态控制的节能方法. 这些方法为了达到最佳的节能效果, 在一定程度上牺牲了生产线的产量.

模糊控制方法适用于数学模型难以获取, 动态特性不易掌握或变化显著的对象. Sharma^[14]尝试了用模糊层次分析法和模糊技术解决多级制造系统的任务编排问题. 莫巨华等^[15]利用模糊控制技术控制串行饱和生产线的生产节奏, 降低了在

收稿日期: 2018-07-05.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51605263); 浙江省自然科学基金(LQ16G010002); 宁波市自然科学基金(2017A610141).

第一作者: 王磊(1993-), 男, 湖北武汉人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 生产线节能控制. E-mail: 969940146@qq.com

*通信作者: 林文文(1989-), 男, 浙江温州人, 博士/讲师, 主要研究方向: 车间能效意识控制. E-mail: linwenwen@nbu.edu.cn

制品的库存水平. 赵刚等^[16]利用遗传算法优化, 使模糊控制器有了空调的温度控制性能.

本文利用模糊控制器的优点, 在生产线缓存区实时储存量和机器状态无法用数学模型精确表示的情况下, 提出一种考虑缓存区安全的库存量对生产线产量无影响, 对包括瓶颈机器在内的所有机器进行节能控制的模糊控制方法, 并利用遗传算法对所设计的模糊控制器进行优化, 以提高其节能控制性能.

1 生产线节能模糊控制模型

1.1 问题描述

典型的串行生产线如图 1 所示.

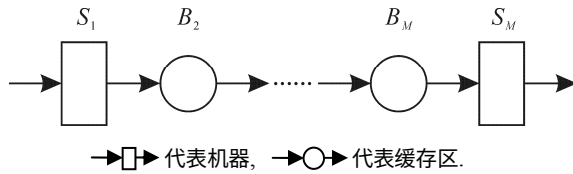


图 1 M 台机器($M-1$)个缓存区的串行生产线

约定生产线的运行遵从以下规则:

(a) 第一台机器 S_1 不会饥饿(原材料充足), 最后一台机器 S_M 不会堵塞.

(b) 机器 S_i 以恒定速率运行, 加工 1 个零件的周期时间为 T_{S_i} .

(c) 缓存区 $B_2, B_3, \dots, B_M$ 为有限库存缓存区, 字母同时也表示缓存区最大容量, $b_i(t)$ 表示缓存区 i 在时刻 t 的存储量, 初始库存量为 $b_i(0)$.

(d) 机器之间相互独立, 操作相关故障(机器在堵塞和饥饿时不会发生故障). 机器无故障工作时间与修复时间分别服从 λ 和 μ 的指数分布, 并且用平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF)和平均修复时间(Mean Time To Repair, MTTR)表示.

(e) 每台机器的能量消耗均可得到检测, 机器 S_i 正常加工运行时功率为 P_i , 待机(饥饿和堵塞)运行时功率为 P'_i , 启动能耗为 W_{up} .

(f) 零件运输时间不计, 并且缓存区存储和传输零件的过程是完全可靠的, 不会出现故障.

串行生产线是一个复杂的动态系统, 理想状态(机器无故障)下, 若机器 S_i 在时刻 t 停机, 且当停机时间达到 $[B_i - b_i(t)]T_{S_{i-1}}$ 后仍未启动, 则其上游机

器 S_{i-1} 才会在加工完最后一个零件后被堵塞. 同理, 当机器 S_i 的停机时间达到 $b_{i+1}(t) \times T_{S_{i+1}}$ 后仍未启动, 其下游机器 S_{i+1} 会饥饿. 换言之, 机器 S_i 在不影响其上游和下游机器正常工作的最大停机时间为:

$$t_{off} = \min \{ [B_i - b_i(t)]T_{S_{i-1}}, b_{i+1}(t)T_{S_{i+1}} \}. \quad (1)$$

当机器 S_i 处于堵塞状态时, 其下游缓存区 B_i 储存量达到最大, 只有当机器 S_{i+1} 从其中取走零件后机器才会从堵塞待机转为正常运行, 每加工 1 个零件将额外消耗待机能量为:

$$w_{s_i} = (T_{S_{i+1}} - T_{S_i})P'_i. \quad (2)$$

而若当机器 S_i 处于堵塞状态之初便将其关闭, 直至下游缓存区 B_i 储存量消耗为零, 将减少待机能耗为:

$$W_{s_i} = (T_{S_{i+1}} - T_{S_i})P'_i B_{i+1}. \quad (3)$$

同样, 当机器 S_i 处于饥饿状态之初将其关闭, 将减少待机能耗为:

$$W_{s_i} = (T_{S_{i-1}} - T_{S_i})P'_i B_i. \quad (4)$$

实际情况是机器会出现故障, 机器 S_i 在关机节能操作结束后的启动时刻其上游缓存区库存量将达到较高水平, 其下游缓存区则接近放空状态, 此时机器 S_i 的故障必然导致其上游机器被堵塞, 下游机器饥饿. 为了避免这种情况对生产线产量的冲击, 根据 Conway 等^[17]研究, 得到机器 S_i 上游缓存区安全库存量最大值为:

$$\max b_i = B_i - \frac{E(t_{MTTR_i})}{T_{S_{i-1}}}.$$

下游缓存区安全库存量最小值为:

$$\min b_i = \frac{E(t_{MTTR_i})}{T_{S_{i+1}}}.$$

机器 S_i 在安全库存量范围内的停机扰动不会传播至瓶颈机器, 确保了生产线产量不受影响. 利用疏松桂^[18]的等效工作站方法, 将故障和修复因素引入生产模型中, 求得机器等效加工周期为:

$$\tilde{T}_{S_i} = (\lambda + \mu)T_{S_i} / \lambda,$$

故在存在随机故障的生产线上, 机器 S_i 对产量无影响的最大停机时长为:

$$t_{off} = \min \{ [B_i - E(t_{MTTR_i}) / T_{S_{i-1}}] \tilde{T}_{S_{i-1}}, [B_{i+1} - E(t_{MTTR_i}) / T_{S_{i+1}}] \tilde{T}_{S_{i+1}} \}, \quad (5)$$

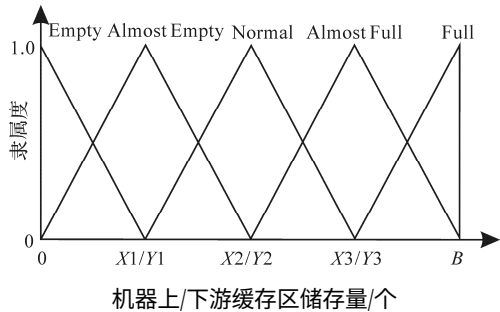
单次停机最大节能量:

$$W_{S_i} = \min \{ [B_i - E(t_{\text{MTTR}_i})/T_{S_{i-1}}](\tilde{T}_{S_{i-1}} - \tilde{T}_{S_i})P'_i, [B_{i+1} - E(t_{\text{MTTR}_i})/T_{S_{i+1}}](\tilde{T}_{S_{i+1}} - \tilde{T}_{S_i})P'_i \}. \quad (6)$$

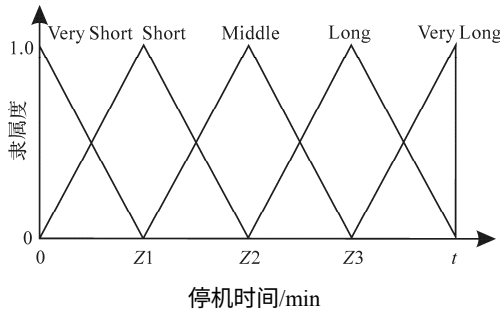
1.2 模糊控制优化模型

模糊控制器是模拟专家控制经验的一种语言控制器. 主要结构包括输入和输出的模糊定义, 模糊推理规则的建立和输出去模糊化. 对缓存区储存量的多和少, 机器停机时间的长和短等模糊概念的处理, 正是模糊控制器的长项所在. 借此, 设计以机器上游和下游缓存区存储量为输入, 停机时长为输出的模糊控制器, 使生产线具备主动节能能力.

为尽可能提高控制精度, 将机器 S_i 上游缓冲区储存量的多少用 5 种语言量表示: “Empty” “Almost Empty” “Normal” “Almost Full” “Full”, 并记作模糊集 A ; 下游缓存区储存量相同划分后, 将模糊集合记作 B , 停机时间长短用 5 种语言量表示: “Very Short” “Short” “Middle” “Long” “Very Long”, 记作模糊集 C . 输入与输出模糊集合的定义如图 2 所示.



(a) 输入模糊集合的定义



(b) 输出模糊集合的定义

图 2 输入与输出模糊集合的定义

以机器上游缓存区储存量的模糊子集 “Normal” 为例, 其隶属函数在模糊控制系统中表示为:

$$\mu_{A_N}(x) = \begin{cases} \frac{x - X1}{X2 - X1}, & X1 < x < X2, \\ \frac{x - X3}{X3 - X2}, & X2 < x < X3. \end{cases} \quad (7)$$

此五划分两输入单输出的模糊控制器, 共存在 $5 \times 5 = 25$ 条规则, 基于 Mamdani 推理算法, 根据专家经验建立模糊推理的规则库:

R_1 : 若 Left Buffer 是 Empty(E), 且 Right Buffer 是 Empty(E), 则停机时长为 Very Short(VS);

⋮

R_{25} : 若 Left Buffer 是 Full(F), 且 Right Buffer 是 Full(F), 则停机时长为 Very Short(VS).

详细规则见表 1.

表 1 串行线模糊控制规则

LB/RB	E	AE	N	AF	F
E	VS	S	M	L	VL
AE	VS	VS	S	M	L
N	VS	VS	VS	S	M
AF	VS	VS	VS	VS	S
F	VS	VS	VS	VS	VS

第 i 条规则包含模糊关系矩阵:

$$R_i = A_i \times B_i \times C_i,$$

其中: $A_i \times B_i \times C_i$ 表示 3 个模糊集合的直集, 该模糊输出隶属度为:

$$\mu_R^i(x, y, z) = \min \{ \mu_A^i(x, X1, X2, X3), \mu_B^i(y, Y1, Y2, Y3), \mu_C^i(z, Z1, Z2, Z3) \}. \quad (8)$$

模糊控制器包含的 25 条规则构成的模糊关系

$R = \bigcup_{i=1}^{25} R_i$, 隶属函数为:

$$\mu_R(X, Y, Z) = \max \{ \mu_R^1(X, Y, Z), \dots, \mu_R^{25}(X, Y, Z) \}. \quad (9)$$

任意时刻, 模糊输出矩阵 $C' = (A' \times B') \circ R$, 其中 $\circ$ 是合成算子, 输出隶属度为:

$$\mu_R(X, Y, Z) = \max \{ \mu_R^1(X, Y, Z), \dots, \mu_R^{25}(X, Y, Z) \}. \quad (10)$$

为了获得较为准确的控制量, 以面积重心法作为输出的去模糊化方法, 实际输出:

$$z = \int_0^{t_{\text{off}}} \mu_{C'}(z) z dz / \int_0^{t_{\text{off}}} \mu_{C'}(z) dz. \quad (11)$$

可见模糊控制器的输出 z 实际上是由隶属函数

的参数 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 、 $Y1$ 、 $Y2$ 、 $Y3$ 、 $Z1$ 、 $Z2$ 、 $Z3$ 和输入状态 x 、 y 共同决定。

2 遗传算法优化隶属函数

遗传算法对所求解的问题没有太多的数学要求, 搜索过程中无需了解问题的内在性质, 适合解决已知模糊控制规则, 并确定了隶属函数形状后的优化隶属函数的问题。

设在时刻 t , 机器 S_i 上游缓存区储存量为 x , 下游缓存区储存量为 y , 模糊逻辑推理输出为 z , 为得到最大待机节能 W_{Si} , 则输出停机时间 z 应取得最大值。由于缓存区容量有限, 输入组合 (x, y) 构成的全集共 $N = (B_i + 1)(B_{i+1} + 1)$ 项(储存量可能为 0), 结合式(7)~(11), 以所有项的输出之和的最大值作为目标函数:

$$F = \sum_{n=1}^N z_n = \sum_{i=0}^{B_i} \sum_{j=0}^{B_{i+1}} \left(\int_0^{t_{\text{off}}} \max_{x,y} \{ \min[\mu_{A' \times B'}(x_i, y_j), \mu_R(X, Y, Z)] \} z dz \right) / \left(\int_0^{t_{\text{off}}} \max_{x,y} \{ \min[\mu_{A' \times B'}(x_i, y_j), \mu_R(X, Y, Z)] \} dz \right). \quad (12)$$

由于缓存区为有限库存缓存区, 储存量也应为整数, 输入变量满足约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq x_i \leq B_i, \\ 0 \leq y_j \leq B_{i+1}, \\ x_i, y_j \in N. \end{cases}$$

遗传算法在计算过程中以适应度函数值来判断每一代中各个体的优劣, 在目标函数为求最大值的情况下, 取目标函数为适应度函数。

此五个模糊划分两输入单输出模糊控制器, 每个模糊划分的隶属函数存在 3 个参数需要调整: 两斜边与水平坐标轴的 2 个交点和 2 斜边的交点横坐标。例如输入量的 Normal 划分, 有待优化参数 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 相邻模糊划分隶属函数所构成的三角形的端点和顶点相重合(图 2), 总共存在 $3 \times 3 = 9$ 个参数待优化。编码串 $X1X2X3Y1Y2Y3Z1Z2Z3$ 代表了模糊控制器的寻优参数。由于缓存区储存量为整数, 即待优化的 9 个参数中的前 6 位为整数, 例如当 B_i 和 B_{i+1} 最大值均为 70 时, 设定待优化参数取值范围: $X1 \in [4, 19]$, $X2 \in [19, 50]$, $X3 \in [50, 65]$,

$Y1 \in [4, 19]$, $Y2 \in [19, 50]$, $Y3 \in [50, 65]$, 4 位数方式能满足 16 个整数编码, 5 位数二进制编码方式能满足 32 个整数编码, 前 6 位待优化的整数参数只需 26 位二进制编码。故采用二进制编码方式也不至于使得染色体过长, 能满足优化要求。

在确定初始种群大小时, 应该注意: 如果太小, 可能导致提前收敛; 太大会增加计算量, 降低收敛速度。一般初始种群为 20~100。

交叉操作是遗传算法产生新个体的主要手段, 通常建议交叉概率取值范围为 0.40~0.99。变异操作能防止搜索陷入局部最优解而不能摆脱, 太大会破坏一些好的模式, 一般建议取值范围为 0.001~0.200。本文采用轮盘赌方法进行选择操作, 单点交叉的方式进行交叉操作。

3 案例分析

使用面向对象的生产系统仿真软件 Simio, 在 Win10 操作系统, 英特尔双核 i7 处理器的笔记本电脑上, 模拟由 5 台机器 4 个缓存区组成的串行生产线运行 40 h 的生产情况。机器运行和能耗相关数据及缓存区配置见表 2 和表 3。

表 2 机器运行和能耗

机器	T/s	$t_{\text{MTBF}}/\text{min}$	$t_{\text{MTTR}}/\text{min}$	P_i/kW	P'_i/kW	W_{up}/kWh
S_1	91	200	10	20	15	0.10
S_2	77	130	18	14	10	0.08
S_3	60	180	30	20	15	0.10
S_4	75	400	35	20	15	0.10
S_5	82	220	23	15	10	0.08

表 3 缓存区最大和初始容量

缓存区	最大容量/件	初始容量/件
B_1	70	30
B_2	70	30
B_3	70	30
B_4	70	30

仿真运行原始生产线 40 次的结果数据经统计处理后, 取 $\alpha=0.1$ 的显著性水平, 95% 的置信区间范围, 各台机器的运行状况统计见表 4。

运用等效工作站理论, 计算得到 5 台机器的等效工作加工周期为 $\bar{T}_{S1}=95.55 \text{ s}$, $\bar{T}_{S2}=87.66 \text{ s}$, $\bar{T}_{S3}=70 \text{ s}$,

表4 各机器运行状况

机器	待机耗能/kWh		总运行耗能/kWh		堵塞和饥饿次数/次		加工量/件	
	均值	置信区间	均值	置信区间	均值	置信区间	均值	置信区间
S_1	39.02	(33.65, 44.39)	786.99	(785.20, 788.79)	8.73	(7.93, 9.53)	1 473.88	(1 458.32, 1 489.44)
S_2	83.20	(79.48, 86.91)	526.72	(525.24, 528.21)	102.45	(98.51, 106.39)	1 482.23	(1 465.61, 1 498.84)
S_3	227.35	(222.33, 232.37)	724.22	(722.58, 725.85)	252.13	(231.31, 272.94)	1 492.75	(1 474.56, 1 510.94)
S_4	133.13	(126.82, 139.43)	755.62	(747.22, 764.03)	99.05	(87.24, 111.86)	1 494.15	(1 472.17, 1 516.13)
S_5	60.73	(55.53, 65.93)	569.64	(567.03, 572.24)	32.98	(26.78, 39.18)	1 490.93	(1 467.32, 1 514.53)
合计	543.42	(541.48, 545.36)	3 363.19	(3 355.27, 3 371.11)	495.34	(487.48, 503.20)		

$\bar{T}_{S4}=81.56$ s, $\bar{T}_{S5}=90.57$ s, 最大停机时长 $t_{\text{off}S_1}=90.88$ min, $t_{\text{off}S_2}=60.67$ min, $t_{\text{off}S_3}=62.53$ min, $t_{\text{off}S_4}=40.83$ min. 以机器 S_3 为例, 模糊控制器的设计和优化过程为: 分别给 9 个待优化参数定义搜索范围 $X1 \in [4, 19]$, $X2 \in [19, 50]$, $X3 \in [50, 65]$, $Y1 \in [4, 19]$, $Y2 \in [19, 50]$, $Y3 \in [50, 65]$, $Z1 \in [2, 17]$, $Z2 \in [17, 45]$, $Z3 \in [45, 60]$. 经过多次尝试后设置初始种群规模 $N=30$, 筛选后的种群规模 $M=24$, 最大进化代数 $G=200$, 交叉概率 $P_c=0.8000$, 变异概率 $P_m=0.0015$. 适应度函数值随进化代数增加的变化情况如图 3 所示. 算法迭代 200 次后收敛, 得到优化值 $X1=19$, $X2=49$, $X3=65$, $Y1=4$, $Y2=38$, $Y3=52$, $Z1=15.83$, $Z2=43.19$, $Z3=59.03$.

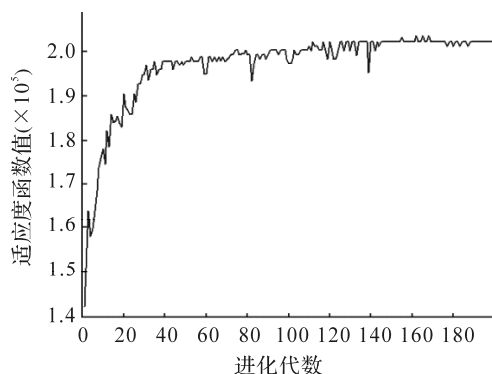


图3 适应度函数值进化过程

程序寻优结束后, 模糊控制器的 2 个输入和 1 个输出的隶属函数被完全确定. 上游缓存区 LB 作为模糊控制器 2 个输入中的 1 个, 其隶属函数如图 4 所示. 从生产线最后一台机器流出生产线的零件决定生产线最终的产量, 因此, 关闭机器 S_5 必定会降低生产线的产量, 所以不对其进行启动和停机的模糊控制. 同样, 对机器 S_1 , S_2 , S_4 采用上述方法设计模糊控制器.

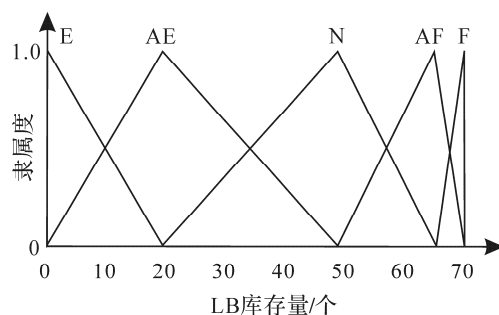


图4 优化后 LB 隶属函数

3.1 单机器节能控制

针对原生产线中机器 S_3 是待机运行能耗最大机器的情况, 对机器 S_3 进行模糊节能控制. 由于机器的启动过程耗电量较大, 若停机时间过短, 节能量不能弥补启动能耗, 频繁的启动还会对机器带来不良损耗. 为使单次停机获得尽可能长的节能时间, 设置机器停机时间 $t_{\text{off}S_3} > 25$ min 为启动停机操作的必要条件. 比较生产线 1 (原生产线)、生产线 2 (单机器控制情况下, 均匀分布隶属函数模糊控制生产线) 和生产线 3 (单机器控制情况下, 经过遗传算法优化隶属函数的生产线) 三者间运行状况, 仿真模型运行 40 次后, 取 $\alpha=0.1$ 的显著性水平, 95% 的置信区间, 各项数据的均值统计结果见表 5.

表 5 统计结果显示, 单机模糊控制情况下, 生产线 2 中机器 S_3 待机能耗为 117.90 kWh, 较原产线能耗 227.35 kWh 下降了 109.45 kWh, 下降率达到了 48.14%, 改善效果显著. 生产线总能耗也因此减少了 108.71 kWh, 堵塞和饥饿的次数大幅减少; 而在此基础上经过优化后生产线 3 上, 机器 S_3 待机能耗再次降低 24.24 kWh, 总降幅达到 58.80%. 从模型看, 堵塞和饥饿次数也较优化前降低近 20 次. 尤为重要的是, 生产线经过节能控制后产量并没

有减少。由此可见,模糊控制器在生产线的节能控制效果明显。

表5 生产线在单机器控制模型下的运行状况

生产线	待机能耗/kWh	总能耗/kWh	S_3 待机能耗/kWh	产量/件
生产线1	543.42	3 363.19	227.35	1 490.93
生产线2	431.04	3 254.48	117.90	1 492.08
生产线3	408.39	3 232.19	93.60	1 487.35

3.2 多机器节能控制

对单台机器 S_3 进行模糊控制,节能效果明显,将此方法推广到对生产线上其他机器。由于机器 S_5 位于生产线末端,直接影响生产线产量,对其不进行模糊控制后停。同样,设置模糊控制器输出机器停机时间 $t_{\text{off}} > 25 \text{ min}$ 为启动停机操作的必要条件。比较生产线1(原生产线)、生产线4(多机器控制情况下,均匀分布隶属函数模糊控制生产线)和生产线5(多机器控制情况下,经过遗传算法优化隶属函数生产线),以上3种模型运行40次后,取 $\alpha=0.1$ 的显著性水平,95%的置信区间,各项数据的均值统计见表6。

表6 生产线在多机器控制模型下的运行状况

生产线	待机能耗/kWh	总能耗/kWh	产量/件
生产线1	543.42	3 363.19	1 490.93
生产线4	421.56	3 216.27	1 488.43
生产线5	394.77	3 192.24	1 486.14

表6统计结果显示,生产线4待机能耗较原生产线降低了121.86 kWh,降低幅度高达22.4%。在此基础上生产线5将待机能耗再次降低了26.79 kWh,总待机耗能减少了27.35%。在多机器节能控制的情况下,生产线的产量同样得到了保证,没有因此而下降。

结合表5和表6中生产线1~5的待机能耗数据可以发现,单机节能控制和多机节能控制的生产线相对原生产线待机能耗均有大幅度降低,其中生产线5节能效果最佳。

4 结语

将模糊控制运用到离散串行生产线节能上,为提高控制效果,利用遗传算法对模糊隶属函数

进行优化,并在仿真实验中比较和讨论了在单台机器和多台机器上进行模糊控制的节能效果。结果显示:在多机器控制情况下,经过遗传算法优化隶属函数的生产线,机器的堵塞和饥饿情况大为改观,待机能耗较原始生产线降低了27.35%,并且生产线产量没有受到影响。

后续将会在更为复杂的并行装配线上运用模糊控制,进行节能研究。

参考文献:

- [1] Gutowski T, Murphy C, Allen D, et al. Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(1):1-17.
- [2] Drake R, Yildirim M B, Twomey J M, et al. Data collection framework on energy consumption in manufacturing[C]//Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference, Institute of Industrial Engineers Annual Meeting, Orlando, FL, 2006:1-6.
- [3] Buzacott J A, Shanthikumar J G. Stochastic Models of Manufacturing Systems[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993:145-148.
- [4] 万松. 串行生产线设备能耗状态建模与能效分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [5] 张新诚, 贾敏忠, 李小水. 基于标准样件的机床能耗分析与加工生产线优化[J]. 福建工程学院学报, 2017, 15(3):247-252.
- [6] Chang Q, Xiao G, Biller S, et al. Energy saving opportunity analysis of automotive serial production systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2013, 10(2):334-342.
- [7] Chang Q, Biller S, Xiao G, et al. Transient analysis of downtimes and bottleneck dynamics in serial manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2010, 132(5):635-645.
- [8] Brundage M P, Chang Q, Li Y, et al. Energy efficiency management of an integrated serial production line and HVAC system[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2014, 11(3):789-797.
- [9] Brundage M P, Chang Q, Zou J, et al. Energy economics in the manufacturing industry: A return on investment strategy[J]. Energy, 2015, 93:1426-1435.
- [10] Brundage M P, Chang Q, Li Y, et al. Utilizing energy opportunity windows and energy profit bottlenecks to reduce energy consumption per part for a serial production line[C]//IEEE International Conference on

- Automation Science and Engineering, 2014:461-466.
- [11] 周炳海, 苏谊. 基于可变速缓冲区存储量的串行生产线节能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(6):832-836.
- [12] Chen G, Zhang L, Arinez J, et al. Feedback control of machine startup for energy-efficient manufacturing in Bernoulli serial lines[C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2011:666-671.
- [13] Li L, Sun Z. Dynamic energy control for energy efficiency improvement of sustainable manufacturing systems using Markov decision process[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2013, 43(5):1195-1205.
- [14] Sharma S. Application of fuzzy techniques in a multistage manufacturing system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(1/4):397-407.
- [15] 莫巨华, 黄敏, 王兴伟. 串行饱和生产线模糊控制方法的研究[J]. 控制工程, 2007, 14(1):34-36.
- [16] 赵刚, 张九根, 杨珊珊, 等. 基于改进遗传算法的模糊温度控制在空调中的应用[J]. 科技通报, 2017, 33(8):156-161.
- [17] Conway R, Maxwell W, McClain J O, et al. The role of work-in-process inventory in serial production lines[J]. Operations Research, 1988, 36(2):229-241.
- [18] 疏松桂. 带有缓冲库的综合制造系统(CIMS)分析及其可靠性的研究[J]. 自动化学报, 2000, 18(1):15-22.
- [14] Sharma S. Application of fuzzy techniques in a multistage

Fuzzy control optimization of serial production line considering standby energy consumption

WANG Lei, LIN Wen-wen^{*}, TU Jian-fei

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of the machines in the state of starvation or blockage on the serial production line, an energy-saving method based on fuzzy control is proposed. The fuzzy controller uses the data of the real-time capacity of the upper and lower buffer of the controlled machine to determine the maximum energy-saving downtime of the machine, on the premise of not affecting the output. The energy-saving performance of the fuzzy controller is improved by optimizing the membership function of the fuzzy controller by genetic algorithm. The experiment by simulation modeling indicates that in the serial production line with optimized fuzzy controller, the standby energy consumption is reduced by 27.35% compared with the original production line, with no influence on the output of the production line.

Key words: serial production line; buffer; energy saving method; fuzzy control; genetic algorithm

(责任编辑 史小丽)