

流水线系统生产计划与设备维护的集成建模研究

张岳君, 方志梅, 林文文

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对当前生产计划与设备维护集成研究中系统配置局限于单阶段系统的问题, 以流水线为背景对两项计划的集成建模方法开展研究. 以有限产能批量问题为生产计划的基准模型, 建立生产计划与预防性维护集成建模的框架. 采用仿真方法计算流水线的批量生产时间, 并结合二项式回归以建立生产负荷与生产时间之间的映射关系, 仿真测试验证了回归方法的有效性. 再将生产时间二项式引入产能约束, 构建出流水线条件下生产计划与设备维护的集成模型. 算例显示集成模型总成本随缓存空间的增大而逐渐下降, 表明系统配置对计划决策有较大影响.

关键词: 生产计划; 设备维护; 流水线; 仿真; 回归

中图分类号: F273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0030-06

有限产能批量问题 (Capacitated Lot-Sizing Problem, CLSP) 是多产品、动态需求背景下的一个经典生产计划模型, 在工业环境中具有广泛应用性^[1-3]. 一般而言, 生产计划的可行性与制造系统中设备的性能密切相关, 设备故障与维护活动占用有限的产能资源, 容易降低计划的可行性, 因此生产计划的建模和决策必须兼顾设备故障与维护的影响. 从 Weinstein 等^[4]提出生产计划与设备维护的多层次优化模型以来, 两项计划的集成一直是理论研究的热点, 而为提升模型统一性, 后续研究

中的生产计划多选用 CLSP 或相关衍生模型, 表 1 对这方面文献进行了归纳. 从表中可见, 问题的研究对象以单机系统为主, 也有少部分文献尝试将单机拓展为并行机系统^[6,14]以及对设备内部结构进行重新构建^[9-10], 但基本上在产能约束建模方法上与单机系统基本保持一致, 因此这些扩展后的结构配置也只能归类为单阶段系统形式. 目前仅有冷乔等^[15]研究过流水线条件下的集成计划问题, 但其在系统中不包含缓存空间设置, 也未从系统运作的角度对产能评估问题进行深入探讨.

表 1 生产计划与设备维护的集成研究文献

参考文献	年份	配置	故障分布	维护周期	求解算法	其他
文献[5]	2007	单机	威布尔	周期性	CPLEX	-
文献[6]	2008	并行机	威布尔, 伽马	周期性	LBH	-
文献[7]	2011	单机	威布尔	非周期性	Xpress MP	维护窗口
文献[8]	2011	单机	指数	-	启发式	服务水平
文献[9]	2010	单机	威布尔, 伽马	周期性	GA	并行部件
文献[10]	2012	单机	多状态	周期性	规划软件	串并联部件
文献[11]	2013	单机	威布尔	周期性	LBH	可靠性约束
文献[12]	2014	单机	威布尔	非周期性	启发式	-
文献[13]	2014	单机	威布尔	非周期性	Lingo	能耗因素
文献[14]	2015	并行机	威布尔	非周期性	LBH	成组维护
文献[15]	2016	流水线	威布尔	非周期性	启发式	无缓存

收稿日期: 2018-04-03.

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

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

第一作者: 张岳君 (1983-), 男, 浙江宁波人, 讲师, 主要研究方向: 制造系统的集成优化与控制. E-mail: zhangyuejun1@nbu.edu.cn

现代企业制造系统常为复杂的多阶段配置形式. 与单阶段系统不同, 多阶段系统的产能与系统配置、运作方式及设备维护水平等密切相关, 其批量生产时间无法直接推导获得^[16]. 因此多阶段系统条件下, CLSP 和设备维护集成过程中很难直接构建起时间形式的能力约束, 这也是当前研究尚未在系统结构配置层面进行延伸的一个重要原因.

本文针对当前 CLSP 与设备维护集成研究主要局限于单阶段系统的问题, 而将研究对象扩展为流水线形式的多阶段生产系统. 首先, 分析说明了 CLSP 与设备维护的建模框架及在流水线系统进行集成建模时存在的难点. 其次, 根据流水线系统的运作机制, 通过系统仿真方法计算产品的批量生产时间, 采用二项式回归来构建生产负荷与生产时间的映射关系, 并对此方法的有效性进行验证. 进一步将上述生产时间二项式引入产能约束, 构建流水线条件下生产计划与设备维护的集成模型. 最后, 使用 Lingo 算法求解给定系统配置条件下的算例, 验证上述集成模型的有效性及其系统结构配置的影响.

1 流水线条件下生产计划与设备维护集成建模

1.1 问题描述与建模框架

选取 CLSP 作为生产计划的基准模型, 整个计划期划分为 T 个生产周期, 各周期内的产品需求 d_{it} 事先已知, 需在满足产能约束条件下确立不同周期内生产的产品种类及其批量大小 x_{it} , 不允许发生缺货或延期. CLSP 涉及的成本参数包括单位产品的加工成本 c_{it} 、单位库存持有成本 h_{it} 与每次启动生产的准备成本 s_{it} . 不同产品的生产任务均由 1 条流水线完成, 不同产品批量转换所需的生产准备时间忽略不计. 如图 1 所示, 为了制定有效的生

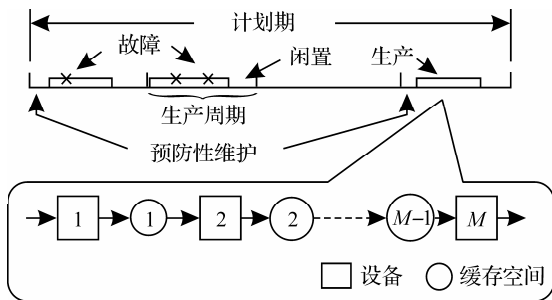


图1 计划期内的生产-维护活动与流水线系统

产计划, 需评估各个周期内流水线系统的产能水平及设备故障与维护活动的影响.

流水线中包含 M 台串行布置的设备及其所对应的缓存空间 B_m , 不同产品在各台设备上的加工时间均为 1 个单位时间. 设备在生产期间可能发生故障停机, 故障节点服从威布尔分布 ($W[\beta_m, \eta_m]$, $\beta_m > 1$), 发生故障后, 采取小修策略使设备修复如旧. 采用基于设备运行的建模策略来构建生产负荷与设备劣化之间的关系, 设备 m 在各个周期的故障次数期望值为 w_{mt} , 此期望值由给定的故障概率密度函数计算获得, 主要用来计算故障小修的成本.

为改善设备状态和系统效率, 对流水线开展统一但不定期的预防性维护, 使各台设备能够修复如新, 用 0~1 变量 u_t 表示是否在各个生产周期的初期对系统进行预防性维护. 这种系统范围内同步性的预防性维护策略具有较强应用性, 如汽车装配线会在换班或特定时期开展统一的维护活动, Sarvar^[17]所定义的预防性维护策略与之类似. 流水线预防性维护与设备小修所需时间分别为 $t_{s,pm}$ 与 $t_{m,mr}$, 单位成本分别为 $c_{s,pm}$ 与 $c_{m,mr}$, 其中, pm 表示预防性维护活动, 而 mr 表示故障小修活动.

与独立的 CLSP 相比, 集成模型引入了系统的配置与设备维护活动, 有助于提升生产计划模型的准确性与可行性. 模型的目标是在确保生产与维护计划可行的基础上, 最小化系统运作的总成本, 已有的研究主要在成本函数与产能约束两个层面建立生产-维护的关联机制, 在此沿用此框架并可建立对应的数学模型:

$$\text{Minimize: } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (s_{it} y_{it} + c_{it} x_{it} + h_{it} I_{it}) + \sum_{t=1}^T c_{s,pm} u_t + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T c_{m,mr} w_{mt}, \quad (1)$$

$$\text{Subject to: } x_{it} + I_{i,t-1} - I_{it} = d_{it}, \forall it, \quad (2)$$

$$x_{it} \leq M y_{it}, \forall it, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N Q(x_{it}) + u_t t_{s,pm} \leq K_t, \forall t, \quad (4)$$

$$z_t = (1 - u_t) z_{t-1} + \sum_{i=1}^N x_{it}, \forall it, \quad (5)$$

$$w_{mt} = \int_{(1-u_t)z_{t-1}}^{z_t} r(\tau) d\tau, \forall it, \quad (6)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0, y_{it}, u_t \in \{0, 1\}, \forall it. \quad (7)$$

(1)式中最小化的成本包含 CLSP 中与生产相关的各项成本、流水线的预防性维护成本及各台设备故障小修的成本。(2)式是不同生产周期的物料平衡表达式,表示当前需求由前期库存和当期产量共同满足,超额部分以库存形式继续留存。(3)式用于判断产品的生产准备活动与产量的一致性。(4)式是流水线的产能约束,要求批量生产与预防性维护的总时间不能超过给定的最大产能 K_t ,其中故障小修的影响隐含在各批量生产时间 $Q(x_{it})$ 内,而不能像单机系统一样将小修时间进行独立表述。(5)式为生产周期结束后设备的有效役龄,用于计算生产周期内的故障期望,取决于预防性维护节点及各个周期的生产负荷。(6)式给出了各台设备在不同周期内故障期望的计算方法,其中 $r(\tau)_m$ 为设备的故障率,用来计算目标函数中的小修成本。(7)式是变量取值的约束。需要指出的是,(4)式中不同的排序将影响到各个批量的生产初始状态及实际生产时间 $Q(x_{it})$,然而从整个生产周期来看,产品批量次序的变化不会改变系统的负荷水平及其累积运行时间 $\sum_{i=1}^N Q(x_{it})$,因此,集成模型仍将从生产负荷角度来考虑产能约束的总体满足情况,而不关注产品批量的排序问题。

单机条件下,可根据生产负荷来推导不同周期内的故障期望次数,并计算设备用于生产与维护的总时间,从而建立各个周期的产能约束。而在流水线环境下,设备故障与系统运作机制交互以后,系统实际运行时间无法直接推导获得。针对此问题已提出过近似方法和仿真方法,存在不足方面如下:近似方法在大批量、长周期生产环境下的适用性相对较好,在小批量、短周期环境下截余因素影响较大,有效性需要验证;仿真方法的效率较低,无法与外层计划决策模型进行高效的融合。针对上述不足,本文提出一种基于仿真结果的回归方法来快速计算各个周期内流水线的实际运行时间,并将其引入集成模型来构建有效的产能约束,提升模型的整合度和准确性。

1.2 流水线系统的建模与生产时间的回归

流水线运作过程中,在制品依次经过流水线上的每台设备进行加工及相应的缓存空间,直至完成最后一道工序离开系统(图 1),第一台设备不会因物料短缺而发生饥饿,最后一台设备完成在

制品加工以后可立即取走,而不发生阻塞,在制品各阶段的缓存空间内采用先进先出的规则。假设第 j 个在制品在设备 m 上的加工开始时间为 p_{jm} ,则 p_{jm} 取决于上游设备 $m-1$ 的在制品 j 完工时间 $q_{j,m-1}$ 与当前设备中 $j-1$ 的完工时间 $q_{j-1,m}$:

$$p_{jm} = \max \{q_{j,m-1}, q_{j-1,m}\}. \quad (8)$$

如果设备 m 的下游缓存空间 B_m 未发生阻塞,那么在制品 j 可在完工后立即离开,其离开时间 q_{jm} 取决于开始加工时间 p_{jm} 及是否在加工过程中发生故障。这里的设备故障仅在产品生产环节发生,设备在修复后可立即恢复原先生产,故障的直接影响是延长在制品生产时间,并进一步干扰到系统上下游的运作。若下游缓存空间饱和,那么只有当设备 $m+1$ 上在制品 $j-B_m-1$ 释放后才能离开,因此 j 在设备 m 上的离开时间可表示为:

$$q_{jm} = \max \{p_{jm} + 1 + v_{jm} t_{m,mr}, q_{j-B_m-1,m+1}\}, \quad (9)$$

其中, $0 \sim 1$ 变量 v_{jm} 用来判断设备 m 在 j 加工过程中是否发生故障。最后,可根据(8)~(9)式的递推关系构建起整条流水线的运作,完成故障条件下批量生产时间的仿真计算。

由于流水线采取了统一的预防性维护策略,不同维护周期内的系统初始状态相同,设备性能服从特定的下降趋势,对应的整条流水线效率也将保持一定的劣化模式,而仿真和多项式回归的目的就是为了获取此劣化模式,并完成批量生产时间的快速计算。值得注意的是,尽管流水线的生产效率将随时间推移而逐渐降低,但是此下降趋势相对较为平缓。一方面影响设备性能的形状参数 β_m 通常会选取一个相对较小值(见表 1 中的相关文献),意味着单台设备的故障率与生产效率变动较为平缓;另一方面,当故障率显著上升时,容易触发预防性维护,设备性能与系统效率将恢复到原先模式。也就是说,在构建预防性维护周期内,产品数量 x 与生产时间 $Q(x)$ 映射关系时,选取低阶的二项回归式即可获得较为精确的效果:

$$Q(x) = a_2 x^2 + a_1 x + b. \quad (10)$$

根据仿真结果确立(10)式中的各项参数后,可将产能约束(4)式转化为给定初始役龄和生产负荷条件下的表达式:

$$Q(z_t) - Q((1-u_t)z_{t-1}) + u_t t_{s,pm} \leq K_t, \forall t. \quad (11)$$

由于产品单位加工时间均为 1, (11)式中 z_t 和

$(1-u_i)z_{i-1}$ 分别代表与役龄相对应的产品数量.

2 回归方法的有效性

假设一条流水线需完成 1 000 个产品的批量生产, 设备数量为 $M=10$, 设备初始役龄均为 0, 即在生产开始前已执行了预防性维护措施. 各台设备的性能参数与故障小修时间见表 2, 通过随机方法生成 $\beta_m \in U(1,3)$, $\eta_m \in U(500,700)$, $t_{m,mr} \in U(10,50)$. 这里将各阶段缓存空间大小作为流水线配置的主要差异, 分为 3 个水平 $B_m \in \{0, 5, 10\}$, 不同缓存空间水平下仿真次数均为 500 次.

表 2 不同设备的性能参数与故障小修时间

参数	m									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
η_m	618	684	627	548	540	644	587	641	516	552
β_m	2.3	1.5	2.9	1.3	2.9	1.5	1.1	2.5	1.9	1.1
$t_{m,mr}$	40	21	35	16	23	22	18	40	50	17

表 3 统计了不同缓存空间 B_m 条件下的生产时间, 在显著水平 $\alpha=0.05$ 条件下, 仿真误差均能控制在 1%~2%, 表明通过仿真方法可以获得的生产时间值 $Q(x)$ 较为精确. 表 3 还进一步给出了由仿真结果计算获得的二项表达式, 考虑到流水线的配置特点, 将拟合式的截距均设置为 10.

表 3 生产时间的仿真结果与二项回归式

条件	生产时间	相对误差/%	回归式 $Q(x)$
$B_m=0$	1 837.44	1.54	$0.0008345440x^2 + 0.9829389445x + 10$
$B_m=5$	1 571.87	1.26	$0.0005269155x^2 + 0.0005269155x + 10$
$B_m=10$	1 456.15	1.05	$0.0003669468x^2 + 1.0703973952x + 10$

产能约束(11)式主要关注 $(1-u_i)z_{i-1}$ 与 z_i 产品之间的生产时间, 因此这里进一步测试满足一定间距条件下 2 个任意产品(n_1 和 n_2)之间回归式与仿真结果之间的偏差率:

$$\begin{aligned} \text{偏差率} = & ((\text{回归式}(n_2) - \text{回归式}(n_1)) - \\ & (\text{仿真值}(n_2) - \text{仿真值}(n_1))) / \\ & (\text{仿真值}(n_2) - \text{仿真值}(n_1)) \times 100\%, \\ & (n_2 - n_1) > 200. \end{aligned}$$

产品的间距代表了一段时间内的流水线负荷水平, 如果一个生产周期内的负荷过低, 一方面会

与实际生产情况不符, 另一方面, (11)式中的产能约束总能获得满足就变得没有意义, 因此此偏差率的测试对产品间距进行了一定控制. 图 2 通过随机抽样方式评估了偏差率, 并按一定次序进行排列. 在 $B_m=5$ 或 $B_m=10$ 条件下, 二项回归式与仿真值之间的偏差可基本控制在 2%以内; 当 $B_m=0$ 时, 此偏差超过 2%的比例也仅为 12%. 总体而言, 根据仿真结果获得的回归式能较准确地预测产能约束中给定负荷条件下的生产时间.

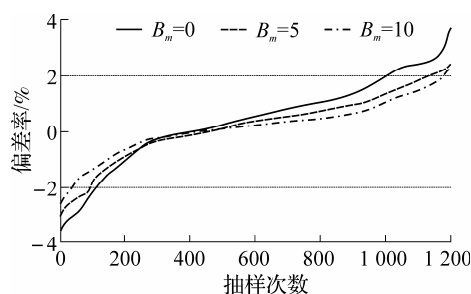


图 2 回归式计算结果与仿真值的偏差率统计

3 集成模型算例

假设某个 CLSP 生产计划问题包含 8 个生产周期, 需安排 2 种产品生产, 表 4 则为产品在各个周期内的需求量, 由(0,200)范围内随机生成, 各项生产成本参数分别为 $s_{it}=600$, $c_{it}=2$ 和 $h_{it}=1$. 所有产品的生产由一条流水线完成, 系统配置、设备性能及小修所需时间等与前文一致, 预防性维护的单位成本与所需时间分别为 $c_{s,pm}=300$ 和 $t_{s,pm}=40$, 小修单位成本为 $c_{m,mr}=20$, 每个周期最大产能为 500 个单位时间. 缓存空间仍分为 3 个水平 $B_m \in \{0, 5, 10\}$, 同时继续沿用表 3 中的二项回归式来计算产能约束中的批量生产时间, 采用 Lingo 对包含故障期望与生产时间非线性表达式的小规模集成模型进行求解.

表 4 各个生产周期的产品需求

名称	周期							
	1	2	3	4	5	6	7	8
产品 1	103	62	162	5	17	385	295	89
产品 2	191	139	252	394	224	24	171	264

3.1 产能利用率与成本比较

表 5 统计了由生产计划(CLSP)与集成模型(CLSP-M)计算获得的产能利用率及各项成本. 根据产品的需求信息, 独立 CLSP 条件下产能的平均

利用率约为 69%, 表明处于相对宽松的水平; 而考虑到设备维护活动及流水线多阶段的运作特性, 计划期内的实际产能利用率将攀升至 91%~96% 不等, 导致生产活动在不同周期之间进行柔性调整空间非常有限. 也就是说, CLSP-M 中与生产相关的可行解空间比 CLSP 要小, 使得生产成本有不同程度的上升, 约为 6%~12% 左右, 但是这种成本的上升确保了生产计划在实施阶段的可行性.

表 5 产能利用率与各项成本比较

组别	CLSP	CLSP-M ($B_m=0$)	CLSP-M ($B_m=5$)	CLSP-M ($B_m=10$)
产能利用率/%	69.43	96.42	92.56	91.34
生产成本	11 649	13 063.00	12 441.00	12 351.00
维护成本	0	7 412.29	7 453.64	74 77.18
总成本	11 649	20 475.29	19 894.64	19 828.18

对集成模型而言, 缓存空间越大, 所对应的流水线生产效率就越高, 使计划期内的产能利用率水平随缓存空间的增大而逐渐降低, 集成模型中的产能约束也会越宽松, 生产与维护活动的可调整性越高, 因此可以看到, 集成模型的总成本随缓存空间的增大而逐步降低, 但是单项的生产成本或维护成本不一定会出现此趋势.

3.2 产能约束的有效性

算例中各个周期内的生产时间由二项回归式直接计算获得, 这里在决策模型基础上, 对给定生产负荷与系统初始状况条件下的生产时间与产能约束有效性进行仿真验证, 仿真方法与 2.2 节部分一致. 如图 3 显示, 在部分产能约束较为紧张的周期内出现了违反产能约束的情况, 但是未超出前期测试的回归表达式与仿真值间的偏差水平. 降低此违法产能约束现象的方法主要是提高回归表达式精度, 如提高回归式的阶数或者结合具体的集成模型来控制前期仿真测试的产品数量; 也可

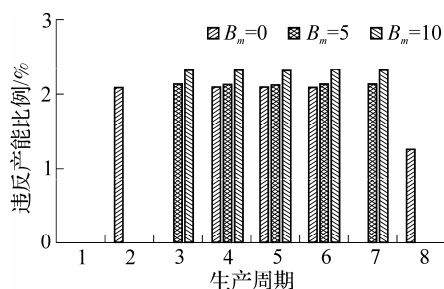


图 3 各个周期违反产能约束的水平

以对已有的决策结果进行适当调整, 在总成本变化不大的情况下确保产能约束有效性.

4 总结

生产计划与设备维护的集成建模是近些年的一个研究热点, 但在系统配置的扩展思路上一一直存在局限. 本文将问题的研究对象从常见的单机/单阶段系统扩展至典型的流水线系统, 提出由二项式回归拟合生产时间的仿真值, 并通过在产能约束中引入该多项式来实现流水线系统条件下生产与维护计划的集成建模, 有效地提升了模型的整合度与准确性. 仿真测试也验证了二项式回归方法在仿真结果上的有效性, 而集成模型算例显示, 变动负荷条件下基于仿真结果的回归方法能准确计算不同周期的生产时间. 此外, 流水线的结构配置(缓存空间的大小)将影响到系统的运作效率与成本, 因此集成计划的制定需要充分考虑系统配置因素的影响.

本文在建模过程中对设备预防性维护节点作了严格假设, 需要统一执行流水线范围内的维护活动, 而未考虑对各台设备进行独立维护的可能性, 后者在成本控制上应该可以获得更经济的效果, 而难点在于无法采用有限的多项式对大量不同役龄组合条件下的生产时间展开有效的拟合, 因此如何快速准确地评估上述维护节点松弛后的系统产能是一个十分有意义的研究内容.

参考文献:

- [1] Karimi B, Ghomi S M T, Wilson J M. The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms [J]. Omega, 2003, 31(5):365-378.
- [2] Jans R, Degraeve Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3):1855-1875.
- [3] Quadt D, Kuhn H. Capacitated lot-sizing with extensions: A review[J]. A Quarterly Journal of Operations Research, 2008, 6(1):61-83.
- [4] Weinstein L, Chung C H. Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment[J]. Computers & Operations Research, 1999, 26(10/11):1059-1074.
- [5] Aghezzaf E H, Jamali M A, Ait-Kadi D. An integrated

- production and preventive maintenance planning model [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(2):676-685.
- [6] Aghezzaf E H, Najid M N. Integrated production and preventive maintenance in production systems subject to random failures[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(17): 3382-3392.
- [7] Najid M N, Alaoui-Selsouli M, Mohafid A. An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(8):2265-2283.
- [8] Nourelfath M. Service level robustness in stochastic production planning under random machine breakdowns [J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 212(1):81-88.
- [9] Nourelfath M, Yalaoui F. Integrated load distribution and production planning in series-parallel multi-state systems with failure rate depending on load[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 106:138-145.
- [10] Nourelfath M, Chatelet E E. Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 101:59-66.
- [11] Lu Z, Zhang Y, Han X. Integrating run-based preventive maintenance into the capacitated lot sizing problem with reliability constraint[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(5):1379-1391.
- [12] 赵世雄, 郑宇, 王丽亚. 生产批量计划与预防性维护的集成优化[J]. *工业工程与管理*, 2014, 19(1):23-29.
- [13] Yildirim M B, Nezami F G. Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74(9-12):1419-1430.
- [14] 张博文, 陆志强, 张岳君. 并行机系统生产计划与预防性维护集成建模[J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(4): 564-571.
- [15] 冷乔, 王丽亚, 赵世雄, 郑宇. 多机串行系统的生产批量与维护计划集成优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(8):1945-1952.
- [16] Li J, Blumenfeld D E, Huang N, Alden J M. Throughput analysis of production systems: Recent advances and future topics[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(14):3823-3851.
- [17] Sarvar M. Modelling of multi-stage production lines with maintenance operations[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2008, 21(4):396-406.

Integrated modelling of production planning and preventive maintenance for the flow line system

ZHANG Yue-jun, FANG Zhi-mei, LIN Wen-wen

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

Abstract: In order to extend the system configuration in the planning for both production and maintenance, this work presents an integrated modelling approach for two plans. The capacitated lot-sizing problem is set as the basis for production planning and a model framework integrating both planning and preventive maintenance is established. The production time is then calculated by simulation. The relationship between the production load and the production time is fitted by quadratic polynomial regression. The simulation result verifies the effectiveness of the regression approach. Further, the polynomial expression is introduced into the capacity constraint to complete the integrated model. The numerical example demonstrates that the total cost of the integrated model declines as the buffer space minimizes, which indicates the impact of system configuration on the planning.

Key words: production planning; maintenance; flow line; simulation; regression

(责任编辑 章践立)