

考虑脉冲作用下的航材供应链系统稳定性

高嘉豪, 王超峰

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 航材供应链是保障民用飞机正常运行和正点运营的重要组成部分。考虑航空公司、航材分销商、航材生产商对未来生产计划的预估, 构建基于脉冲的供应链稳定性模型, 使用 MATLAB 进行数值验证, 探讨脉冲强度和发生时机对供应链稳定性的作用。研究结果表明: 脉冲对还未稳定的供应链影响较大, 对已稳定的供应链影响有限; 合适的脉冲加速系统调整, 快速达到稳定状态。

关键词: 航材供应链; 脉冲现象; 供应链稳定性; 动态模型

中图分类号: [U8] **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0114-06

航材是保障民用飞机正常运行和正点运营的重要物质基础之一, 为民用飞机的维修活动提供服务。飞机是由很多复杂的部件与零件组成的, 一架商用飞机有 40 万~600 万个零件, 这些零件在飞机的安全性、效率和性能上扮演着至关重要的角色。相比于其他供应链, 航材供应链是有众多参与者且更加复杂的系统, 需要管理者投入大量的资金和精力。航空公司为了保证飞机的正常运营, 需要维持航材储备充足并且能够及时供应, 把约 25% 的流动资金投入到航材储备, 这一投资不仅仅是对物资的积累, 更是对航空公司运营效率和安全性的保障。充分的航材储备可以减少飞机停场维修的时间, 降低运营成本, 同时提升客户满意度和企业竞争力。因此, 建立一套高效的航材管理系统, 对航空公司来说, 既是挑战, 也是机遇。

学者们对航材供应链进行了许多研究, 主要是对航材需求预测、航材库存配置以及航材供应链系统评价。顾维东^[1]建立了考虑季节因素的航材需求预测模型, 并对航材配置方案进行优化。郭峰等^[2]分析了战时航材的消耗规律, 弄清了战时航材需求的影响因素, 根据战役持续时间、飞机出动强度、飞机出勤率、航材故障率等因素, 建立了战时可用飞机数预测模型、战时航材需求预测模型、战时航材储备决策模型。梅飞朋^[3]构建了上层航材延伸库选址规划模型和下层航材使用中心调度优化模型, 根据上下层优化特点, 采用改进后的非支配排序遗传算法求解上层航材延伸库的选址规划优化模型, 采

用混沌蚂蚁算法求解下层航材使用中心的路径调度优化模型。许浩等^[4], 使用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 寻优支持向量机 (support vector machine, SVM) 参数组合, 然后结合原始数据优化支持向量机参数组合得到 PSO-SVM 航材消耗预测模型。李丽等^[5], 针对航材保障中存在的一些薄弱环节, 充分发挥评估的引导作用, 分析影响航材保障效能的因素, 确定两级评价指标, 将云模型综合评价法应用到航材保障效能评估中, 构建航材保障效能评估指标体系, 运用层次分析法确定各指标权重, 开展基于云模型的航材保障效能评估, 建立各指标的云模型和云重心表示, 解决评估中模糊性与随机性并存的问题。张培^[6]以总移动距离为目标函数, 以多旅行商问题为导向, 以遗传算法为主要验证方法, 以优化航材发料拣货作业流程为目的, 构建了相应的规划模型。史玉敏等^[7]研究了航材保障信息化建设的原因, 给出航材保障信息化可靠性建设模型。欧阳畅^[8]用 ABC (activity based classification) 分类法将不同的航材进行分类, 并对处于不同分类的航材库存控制进行研究, 得到库存优化方案。华树新等^[9]提出主动配送、定期轮换的供应保障机制, 构建层次聚类法和物元可拓法的航材储备中心选址模型。Ahin 等^[10]以成本最小化为目标建立备件库存管理框架, 并将之与传统方式对比, 研究表明该方法可提高库存管理效率。兰志华^[11]以周转件为研究对象, 针对其库存资金占比大、重要等级高、可重复利用等特点, 首先根

收稿日期: 2024-11-04

作者简介: 高嘉豪(1999—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为航空物流; 王超峰(1981—), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 研究方向为航线运输网络、航空物流。

据周转件在自主供应、航材互援及航材共享模式下的保障过程,分别建立以保障率为约束条件、最低航材保障成本为目标的备件保障成本模型。孙绳山等^[12]利用粗糙集不完备信息系统对航材需求的影响因素进行约简,引入粒子群算法优化向量机模型,建立准确性较高的航材消耗预测模型。吴江等^[13]考虑联合效应对分销量和生产量的影响程度,构建由一个生产商、分销商、零售商组成的供应链系统利用李雅普诺夫稳定性理论、矩阵不等式,得到该供应链系统离散的脉冲同步策略。

本文从供应链整体出发,考虑航材供应链上游对下游销售情况收集到的信息产生失真、各个环节对上下游航材购买航材的联合影响,建立基于脉冲的航材供应链稳定性模型,通过分析脉冲产生的时间与强度对供应链稳定性的影响为航空公司的航材供应链管理提供一个新的思路。

1 航材供应链系统

1.1 供应链系统

供应链是围绕核心企业,通过对信息流、物流、资金流的控制,从采购原材料开始,制成中间产品以及最终产品,最后由销售网络把产品送到消费者手中,将供应商、制造商、分销商、零售商,直到最终用户连成一个整体的功能网络结构模式。供应链围绕核心企业,在最终消费者与供应商之间形成了一种合理链接,这种联系是通过提前计划、过程控制与协调来进行储存、销售、服务等一系列活动形成的,供应链可以使消费者的需求以最快的速度、最真实的状态反映给供应商,使生产材料通过生产、销售等环节实现产品价值的快速增值,并以最快的方式重新回到消费者手中,满足外部客户的需求。供应链系统结构如图1所示。

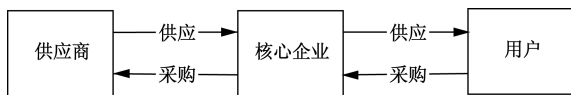


图1 供应链系统结构

1.2 航材供应链系统

航材供应链由飞机及制造商、航材供应商、维修服务提供商、航空公司的航材采购部门以及维修部门组成,通过供应链中各级节点之间的密切协调的合作关系,加快航材的周转效率,降低航材保障费用,优化航材保障资源配置,最终实现航材供应商与航空公司之间的互利共赢。由此可见航材供应链与一般供应链类似,都是一个产品的需求产生、采购和销售过程,是一个典型的供应商与用户

打交道的过程。但是航材供应链也存在明显的个性特征,具体表现在如下两个方面。

(1)航材供应的法规性。民用航空产业科技含量极高,并且飞行安全至关重要,因此对于飞机设计和维修保障的精密性和严谨性具有极高的要求,航材的供应和保障也都有严格的管理措施,并且必须满足相应的适航要求,不满足的航材不被允许销售和使用的。同样,民用飞机的航材供应商必须取得相关资质才能从事航材贸易活动。

(2)行业的垄断性。对于航空公司来说,飞机和航材制造商始终处于强势地位,尤其一些航材供应商在一定时期内具有专属性,航空公司选择余地不大,导致出现了行业垄断现象;而且航材贸易较多把持在少数供应商手中,此类供应商大多为成熟供应商,在航材供应链系统中占据主导地位,航空公司谈判能力较弱。这一特点导致航空公司在航材供求市场上讨价还价的余地有限,对于航材价格、交付期限等一些关键贸易条款只能被动接受。

1.3 航材供应链中的脉冲现象

航材供应链系统在运行过程中会面对许多风险事件,这些风险事件可能会造成航材供应链的中断,航材供应的短缺使飞机处于不适航状态,造成飞机的停场,给航空公司带来经济损失。对航材供应链中外部因素(如市场需求的急剧增减、航空事故、经济危机等)或内部因素(如生产故障、物流延误等)让需求量和供应量产生剧烈变动,导致供应链系统状态在非常短暂的时间内发生的剧烈波动的现象称作脉冲现象。对脉冲现象,航空公司和航材供应链管理者必须建立灵活的供应链策略,增强系统的韧性,降低脉冲现象带来的负面影响,确保航材供应链的稳定性和安全性。

2 建立航材供应链稳定性模型

2.1 问题说明

本文的研究对象为由航材采购部门、航材分销商和航材生产商组成的供应链系统,如图2所示。各个环节在制定生产、销售计划时,会考虑收集到的销售、购买量的信息,这些信息会对制定的计划产生联合影响。在供应链系统的运行过程中由于脉冲产生的信息变化在传递过程中会偏离真实性,如延迟、误解或简化处理等,迫使供应链系统内的各环节迅速调整其生产和销售策略,导致供应链系统出现混乱现象。本文研究受脉冲影响后,航材供应链系统各环节由于自身决策,航材供应链系统的稳定性改变情况。



图 2 航材供应链系统

2.2 模型假设

(1)航材采购部门在制定当前期的采购订单时,不考虑上一时期航材生产商和航材分销商的供应量对订单量的联合影响。

(2)航材采购部门此时期的订单量与航材分销商的供应量呈线性耦合关系,订单量的变动直接与分销商的供应量成正比。

(3)忽略运输过程中可能发生的货物损耗,认为所有订购的货物都能完好无损地运抵客户手中。

(4)航材生产商和航材分销商均具备充分的生产和购买能力,能够满足来自航材采购部门的所有需求,不会发生供应短缺的情况。

2.3 模型参数

计算符号含义见表 1。

表 1 计算符号含义

符号	含义
i	订货时期
t	脉冲爆发的时间点
B	脉冲强度
x_i	第 i 期航材采购部门的需求量
y_i	第 i 期航材分销商供应量
z_i	第 i 期航材生产商的供应量
a	航材采购部门使用剩余的比例系数
b	航材分销商交付的比例系数
c	航材分销商销售剩余的比例系数
d	航材生产商的销售剩余的比例系数
q	航材采购部门订货量的信息失真系数
p	航材分销商订货量的信息失真系数
w	航材采购部门的订单量和航材生产商供应量的联合影响系数
u	航材分销商和航材采购部门的订单量的联合影响系数

2.4 模型建立

航材采购部门的采购计划由航材分销商的供应量和上一时期使用剩余的航材数量组成,即

$$x_i = -ax_{i-1} + by_i \quad (1)$$

航材分销商的采购计划由上一期对航材采购部门销售剩余的航材、对上一期航材采购部门的订单信息失真程度和上一期的航材制造商的生产量和航材采购部门的订货量会产生联合效应组成,即

$$y_i = qx_{i-1} + wx_{i-1}z_{i-1} + cy_{i-1} \quad (2)$$

航材供应商的产量由航材分销商的信息失真、航材采购部门和航材分销商订单的联合效应与上一时期的销售剩余组成,即

$$z_i = py_{i-1} + ux_{i-1}y_{i-1} + dz_{i-1} \quad (3)$$

初始时刻记为 $t_0, t_0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k$, 此一系列时刻记为脉冲的发生时刻,其他时刻不产生脉冲现象。

2.5 考虑脉冲影响的供应链模型

联立方程(1)~方程(3),建立以下供应链模型:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \varphi(\mathbf{X}) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \varphi(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} 0 \\ wxz \\ uxy \end{bmatrix}, \mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} -(a+1) & b & 0 \\ q & c-1 & 0 \\ p & 0 & d-1 \end{bmatrix}.$$

在式(4)的基础上,加入脉冲影响,建立考虑脉冲的现象的供应链模型:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \varphi(\mathbf{X}), t \neq t_k \\ \Delta\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{X}, t = t_k, k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}(t_k) - \mathbf{X}(t_k^-)$ 为系统跳跃值,体现在受到风险冲击后,航材采购部门、航材分销商和航材生产商的采购与供应的波动。

2.6 脉冲现象对供应链系统的影响

在供应链系统中,虽然点 $(0,0,0)^T$ 是系统的一个平衡点,但在实际应用中,系统的各状态分量通常不会全为 0。当供应链系统的平衡点不为 0 时,可以通过向量平移,将系统转化为初始值为 0 的形式。因此,在实验中通常选取 $(0,0,0)^T$ 作为系统的平衡点。在分析中,初始值则取非平衡状态 $(1,0,0)^T$ 。

使供应链稳定运营的参数很多,如当参数取 $a=2, b=3, c=1, w=1, u=1, q=1, p=0.9, d=-5/3$ 时,由图 3 可知,系统能快速回到平衡点 $(0,0,0)^T$,说明此时供应链系统是稳定的。

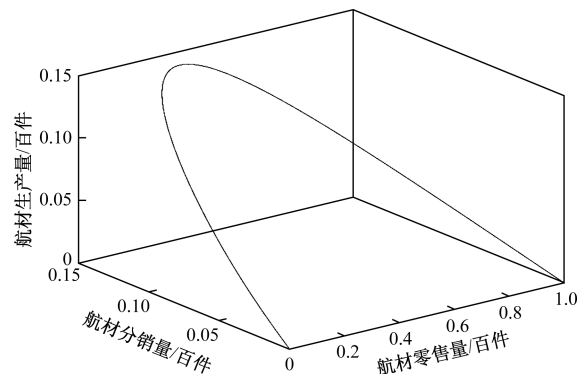


图 3 稳定的航材供应链系统

使供应链出现非稳定运营的参数也很多,如当 $a = 12, b = 7, c = 2, w = 1, u = 1, q = 24, p = -0.7, d = -7/3$ 时,由图 4 可以看出,大多数时候系统处于非周期震荡状态。

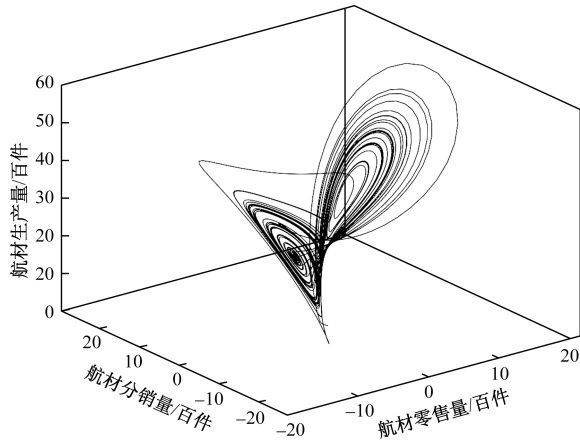


图 4 震荡中的航材供应链系统

3 数值实验

设置系统的初始值为 $(1 \ 0 \ 0)^T$, 使用 MATLAB 进行数值实验。

3.1 脉冲对航材供应链稳定性的影响

取 $a = 0.7, b = 0.6, c = 0.5, d = 1/3, q = 0.3, p = 0.4, w = -2, u = 2$, 得到一个航材供应链系统到达稳定状态的过程图。脉冲强度设置为 $B=5$, 设置脉冲发生时间为 $t=6$, 模拟市场由于脉冲发生扩张, 航材生产商、航材分销商和航材采购部门各自根据自身对市场判断制定生产计划, 得到航材供应链在受到冲击后的恢复稳定的图像。

如图 5 所示, 在 $t=15$ 时, 无脉冲发生状态下的供应链系统达到稳定状态。当脉冲爆发在 $t=6$ 时, 市场需求扩大, 航材供应链系统产生混乱, 这种混乱不仅立即影响了系统的运行效率, 也使得各个环节的协调变得更加困难, 导致决策滞后和资源分配不均。混乱过程持续到 $t=50$, 才趋于平稳。在整个达到稳定状态过程中, 此脉冲还会使供应链系统产生多次混乱, 尽管混乱程度逐渐减小, 但延长了航材供应链系统达到完全稳定状态的时间。

这一现象强调了脉冲事件在供应链动态中的复杂性。当市场需求激增时, 虽然短期内可能带来机会, 但随之而来的混乱和不确定性却可能造成更深远的影响。系统需要花费额外的时间和资源来应对这些连续的波动, 最终影响整体的运行效率和响应能力。

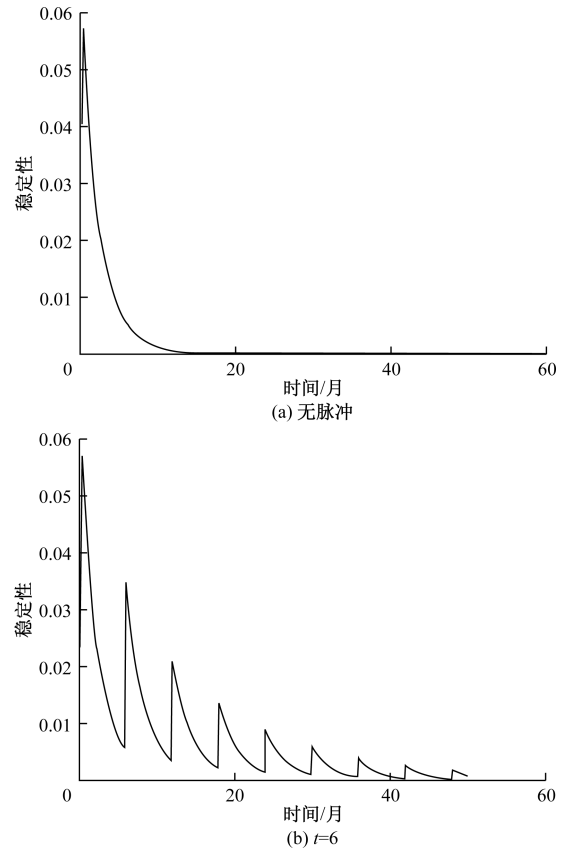


图 5 脉冲时间为 $t=6$ 时, 对航材供应链系统产生的影响

3.2 脉冲出现的时间点对航材供应链稳定性影响

取 $a = 3, b = 2, c = 2, d = -2, q = 1.2, p = 1.1, w = -1, u = 1$, 得到一个航材供应链系统到达稳定状态的过程图。将脉冲强度设置为 $B=2$, 设置脉冲发生时间为 $t=6$ 与 $t=14$, 得到如图 6 所示在不同时间点受到脉冲时的图像。

如图 6 所示, 在不同的时间点发生的相同强度的脉冲对同一个航材供应链的稳定性产生的影响也不同。在 $t=6$ 时, 供应链系统尚未达到稳定状态, 系统内部的调节机制和响应能力尚未充分建立, 脉冲事件发生会对系统造成较大的冲击, 延长了达到稳定状态所需的时间。在 $t=14$ 时, 由于系统内部已经建立了有效的运行机制和反馈回路, 脉冲对系统的影响则相对较小。这种情况下, 脉冲事件虽然会导致供应链系统出现一些细微的混乱, 但由于系统具备较强的自我调节能力, 它能够迅速识别并纠正这些偏差, 恢复到稳定状态。

这种现象突显了时间因素在供应链管理中的重要性。脉冲事件的影响不仅取决于其强度和频率, 还与系统的当前状态密切相关。当系统处于不稳定阶段时, 脉冲事件的干扰会加剧系统的混乱; 而在系统达到稳定状态后, 相同的脉冲事件则更容

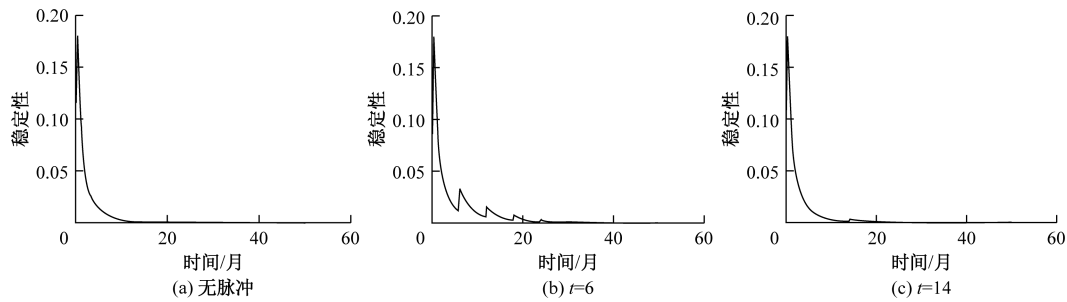


图 6 脉冲爆发时间不同时,对航材供应链系统稳定性产生的影响

易被吸收和调整,导致恢复时间显著缩短。

3.3 利用脉冲加快稳定航材供应链

取 $a=4$ 、 $b=3$ 、 $c=3$ 、 $d=4$ 、 $q=1$ 、 $p=0.9$ 、 $w=-0.3$ 、 $u=0.4$,得到一个当前状态稳定的系统。将脉冲强度设置为 $B=-0.4$,设置脉冲发生时间为 $t=6$,得到图 7 在 $t=6$ 时受到脉冲时的图像。

如图 7 所示,无脉冲情况下,航材供应链系统在第 15 个月时,才能达到稳定状态。当发生导致产量和订单量减少的脉冲事件时,供应链的响应机制发生了变化,反而使得系统能够更快地达到稳定状态。

这一现象揭示了脉冲事件在供应链管理中的潜在积极作用。具体来说,脉冲事件通过迅速减少航材供应链的输出,迫使各个环节进行快速调整。

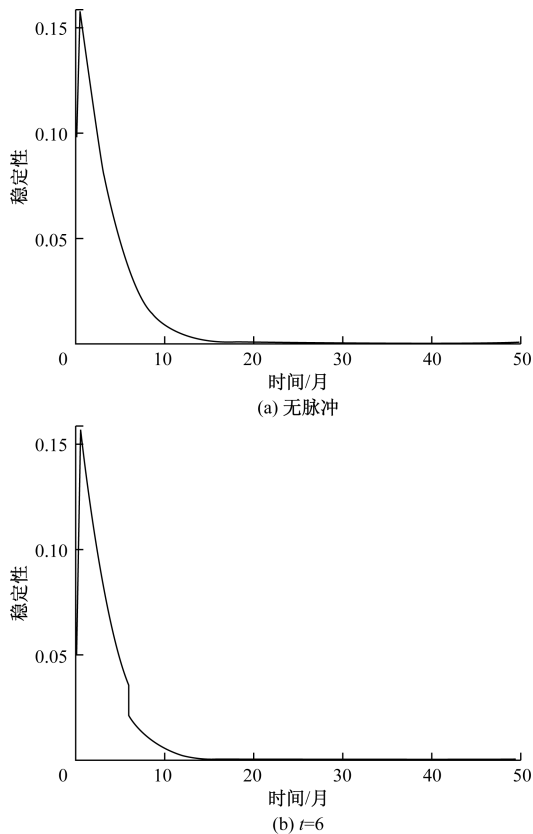


图 7 通过脉冲作用,使航材供应链系统达到稳定状态

这种快速响应有助于系统在面对外部冲击时,迅速找到新的平衡点,避免了因信息滞后而可能导致的更大混乱和成本浪费。

4 实例验证

西南地区某航空公司对地平仪的订购周期为 2 年,上一期使用量为 80%,航材分销商对上一期航空公司航材采购订单满足率为 90%,航材分销商的库存保有率 5%,航材生产商库存保有率 10%。航材分销商根据航空公司历年采购量,对未来能销售的航材估计能增加 40%;航材生产商和航空公司对航材分销商的影响为 0.2。航材生产商根据航材分销商的采购计划,制定生产计划为增产 30%,航空公司和航材分销商的购买量对航材生产的影响为 0.5。航材供应链运行过程中,在第 7 个月的时候,全国出现旅游热潮,市场扩张,对航材的需求扩大了 4 倍,生产计划面临调整。

由上述问题可以得到 $a=0.2$ 、 $b=0.9$ 、 $c=0.05$ 、 $d=0.1$ 、 $q=0.4$ 、 $p=0.3$ 、 $w=0.2$ 、 $u=0.5$ 、 $B=4$,计算可得航材供应链系统的稳定性变化图。

由图 8 可以看出该航材供应链一直处于调整状态,在发生脉冲现象后供应链出现剧烈震荡,延长了供应链恢复稳定的时间,因此航空公司应该缩短周转件的采购周期,尽快使供应链达到稳定状态,以应对脉冲现象,避免更多的经济损失。

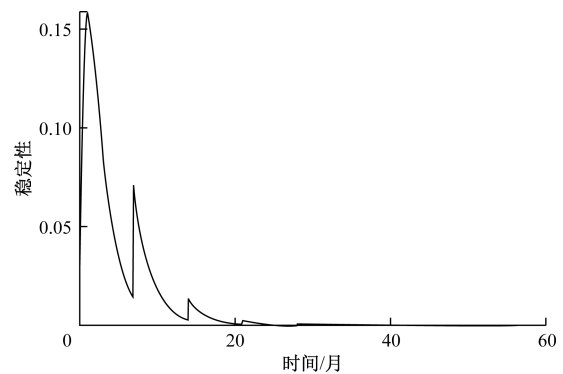


图 8 航材供应链在第 7 个月面对风险脉冲后的稳定性变化

5 结论

通过构建一个基于脉冲的航材供应链稳定性模型,考虑了航空公司、航材分销商、航材生产商处于各自的角度对未来生产计划的预计,分析了脉冲事件对航材供应链系统稳定性的影响。当航材供应链遭遇产量和订单量骤变的脉冲事件时,由于信息传递延迟、信息不对称以及公司内部决策流程等机制存在,导致供应链系统的响应速度和调整过程表现出不同的特点。

研究表明:①脉冲的爆发导致供应链系统各个环节改变计划,使供应链系统产生混乱状态,延长达到稳定状态的时间;②在供应链系统运行到稳定状态前,脉冲的出现可能导致系统不稳定,但是当脉冲发生的时间适当时,脉冲的出现是无法使供应链系统出现混乱状态;③当供应链系统在达到稳定状态的过程中,可以利用脉冲策略使供应链系统更快达到稳定状态。

在设计和管理航材供应链时,不仅要考虑系统平稳状态下的运作效率,还应考虑其对突发事件的响应能力和恢复力。理解并利用脉冲加速达到稳态的特性,可以在实际操作中优化库存控制策略、加强风险管理、增加技术投入,增强供应链的韧性,更好地应对可能的市场和环境变化。

通过建立更加灵活和敏捷的供应链响应机制,提升信息共享的准确性和及时性,从而降低信息失真的可能性。同时,强化与分销商的沟通与协作,通过有效的需求预测模型和库存管理策略,帮助分销商更好地应对市场变化,减少库存剩余的情况。

此外,引入先进的数据分析和预测技术,如机器学习 and 大数据分析,可以进一步增强供应链对市场变化的响应能力。这些技术不仅能够帮助生产

商和分销商更准确地预测需求,还能够优化生产和库存决策,提升整体供应链的稳定性。通过这些综合措施,航空公司能够更好地管理航材供应链,确保飞机的正常运行和高效运营,降低潜在风险。

参考文献

- [1] 顾维东. A 航材库存管理策略研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
- [2] 郭峰, 朱洪伟, 谈斌, 等. 战时航材需求预测和储备决策模型研究[J]. 环境技术, 2024, 42(9): 99-117.
- [3] 梅飞朋. 基于智能算法的航材管理中心双层优化方法研究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(20): 19-22.
- [4] 许浩, 田才艳, 毛瑞柯, 等. 基于 PSO-SVM 的航材消耗预测模型研究[J]. 现代信息科技, 2024, 8(8): 142-145.
- [5] 李丽, 闫树森, 孙伟奇. 基于云模型的航材保障效能评估研究[J]. 环境技术, 2023, 41(11): 141-145.
- [6] 张培. 基于遗传算法的多人航材发料任务规划研究[J]. 航空维修工程, 2024(1): 68-70.
- [7] 史玉敏, 周伟, 李丽. 航材保障信息化可靠性研究[J]. 环境技术, 2023, 41(6): 47-49.
- [8] 欧阳畅. K 航空维修公司航材库存管理优化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [9] 华树新, 谢福哲, 崔崇立. 基于层次聚类法和物元可拓法的航材储备中心选址研究[J]. 信息工程大学学报, 2023, 24(3): 370-378.
- [10] AHIN M, ELDEMIR F, TURKYILMAZ A. Inventory cost minimization of spare parts in aviation industry[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 59: 29-37.
- [11] 兰志华. 备件供应方式对航空公司航材保障成本的影响研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- [12] 孙绳山, 徐常凯, 何亚群. 基于 RS-PSO-SVM 的航材消耗预测模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 881-887.
- [13] 吴江, 彭扬, 邹黎敏, 等. 不确定因素下的混沌供应链系统脉冲同步策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(11): 80-89.

Stability of Aircraft Maintenance Supply Chain System Considering Pulse Impact

GAO Jiahao, WANG Chaofeng

(College of Airport, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: The aviation material supply chain is an important part of ensuring the normal operation and punctual operation of civilian aircraft. A supply chain stability model based on pulses and uses MATLAB for numerical verification was constructed to explore the role of pulse intensity and occurrence in the stability of the supply chain. The research results show that pulses have a greater impact on supply chains that are not yet stable, and a limited impact on supply chains that are already stable. Appropriate pulses accelerate system adjustments and quickly reach a stable state.

Keywords: aviation material supply chain; pulse phenomenon; supply chain stability; dynamic model