

文章编号: 1001-0920(2010)01-0025-06

## 基于节点失效的弹性供应链应急管理策略

闫妍<sup>1</sup>, 刘晓<sup>1,2</sup>, 庄新田<sup>1</sup>

(1. 东北大学 工商管理学院, 沈阳 110004; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘要:** 研究网络正常运行和有单一节点失效情况下供应链的应急调度问题, 建立了在有限资源约束下单目标成本优化数学模型, 以实现供应链运行总成本最小. 采用 CPLEX 软件求解模型, 得到应急调度计划方案. 数值仿真结果表明了应急调度方法的有效性和实用性.

**关键词:** 供应链; 应急; 节点; 失效

**中图分类号:** F270      **文献标识码:** A

### Resilient supply chain emergency management strategy based on node fails

YAN Yan<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>1,2</sup>, ZHUANG Xin-tian<sup>1</sup>

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: YAN Yan, E-mail: yanyan8262@126.com)

**Abstract:** An emergency dispatch problem when the network operates well or one of the nodes fails is studied. And under the constraints of limited resources, an optimal model is developed to minimize the total cost. The emergency dispatch planning solution is got with CPLEX. Simulation results show the effectiveness and practicability of the emergency dispatch solution.

**Key words:** Supply chain; Emergency; Node; Fail

### 1 引言

随着市场需求的不确定性和外部冲击的增加, 全球供应网络变得更加脆弱. 1999 年台湾大地震, 2001 年欧洲口蹄疫以及美国“911”事件都曾使全球供应网络系统遭受到不同程度的破坏, 许多企业因此不能正常运营甚至停产<sup>[1]</sup>. 在竞争激烈的商业环境下, 如果供应网络在某个节点失效时, 不能按时持续地向顾客提供充足的产品, 便会失去市场, 失去客户信任, 降低供应链的整体竞争优势, 对供应网络上的所有企业都会产生严重的影响. 因此, 如何设计弹性供应网络、制定应急管理策略以应对各种失效冲击具有重要的现实和理论意义<sup>[2]</sup>.

所谓供应链弹性, 是指供应链在部分失效时, 仍能保持连续供应且快速恢复到正常供应状态的能力<sup>[3]</sup>. 目前, 供应链弹性正成为学术界和企业界共同关注的一个研究热点. Christopher<sup>[4]</sup>认为获得供应

链弹性最有力的方式是创造能迅速响应状态变化的网络; Rice 等<sup>[5]</sup>建议应用混合柔性和冗余方法来增强供应链弹性. 由于外部环境和需求的持续变化, 供应链网络从未达到稳定态, Haywood 等<sup>[6]</sup>在研究供应链可靠性时发现当供应链发生变化时更易受到攻击, 因此他们认为强化供应链变化期的管理是增强供应链弹性的关键. Muckstadt 等<sup>[7]</sup>提出通过增强供应链成员的合作关系和合作强度, 减少运营环境的不确定性来创造供应链弹性. Kishalay 等<sup>[8]</sup>针对弹性供应链, 使用模糊数学规划的方法解决了不确定环境下供应链的计划问题.

以上文献或是从定性的角度论述构建弹性的供应链, 或是从定量的角度提出了受各种不确定因素扰动情况下增强供应链弹性的方法, 没有涉及供应链在意外中断时的应急管理策略<sup>[9]</sup>. 因此, 本文以多供应商多制造商的供应链为背景, 提出了在网络正

收稿日期: 2009-05-05; 修回日期: 2009-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70571077, 70721001).

作者简介: 闫妍(1982—), 女, 辽宁丹东人, 博士生, 从事弹性供应链、电子商务等研究; 庄新田(1956—), 男, 吉林四平人, 教授, 博士生导师, 从事金融工程、风险管理等研究.

常运行和单一节点失效的情况下,以及有限资源能力约束下,最小化供应链网络运行成本的应急调度问题,建立了单目标的优化模型,并使用 CPLEX 软件进行求解,旨在为供应链节点失效后应急调度问题提供理论基础<sup>[10-13]</sup>.

## 2 模型

### 2.1 问题描述

图1是一个供应链网络.设该网络中有  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, A$ ) 个供应商,  $b$  ( $b = 1, 2, \dots, B$ ) 个初级制造商,  $c$  ( $c = 1, 2, \dots, C$ ) 个高级制造商,  $d$  ( $d = 1, 2, \dots, D$ ) 个分销商和  $e$  ( $e = 1, 2, \dots, E$ ) 个零售商和用户. 供应商  $a$  向整个网络输送原材料,依次经过  $b, c, d, e$  的各级加工、分销等最终满足用户的需求.假设各节点的供应(或生产、分销、库存)能力有限,各节点企业由于所处的地理位置不同将会造成运输成本之间的差异.在供应链网络的运行过程中,由于外界存在一些不可抗拒的因素(如地震、洪水、飓风等)导致供应链中某节点突然失效,通常的解决办法是提前订货或推迟交货.然而,提前订货会占用大量的流动资金且增加存储费用;拖期交货需要交付拖欠罚金,同时降低了供应链的服务水平,增加了供应链的循环时间.本文提出增加紧急订货量和调用库存的应急策略,力求在中断发生时尽力满足用户需求,使供应链快速恢复到正常状态.应急策略的目标是:在各企业供应能力许可的情况下,根据用户的需求合理制定应急方案,使供应链网络总成本得到优化,合理地选择出应急资源调用的优化配置方案,为供应链的应急管理提供可靠的数学依据.

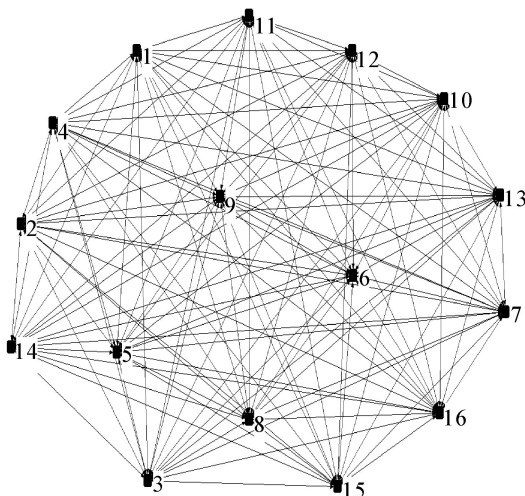


图1 供应链网络

### 2.2 模型建立

#### (1) 假设

1) 假设图1是一个具有6层供应链结构的食物供应链网络,层级分别是  $a, b, c, d, e, f$ , 其中  $a$  层(1,

2, 3 节点) 包含  $A$  个供应商,  $b$  层(4, 5, 6 节点) 包含  $B$  个初级制造商,  $c$  层(7, 8, 9 节点) 包含  $C$  个高级制造商,  $d$  层(10, 11, 12 节点) 包含  $D$  个分销商,  $e$  层(13, 14, 15 节点) 包含  $E$  个零售商,  $f$  层(16 节点) 是用户.

2) 供应链网络中,功能相同的节点称为网络的一层,每一层代表一个加工制造或分销过程.物料从供应链上游开始依次送到下游,层与层之间不允许跳跃.

3) 当网络运行一段时间后,节点11由于某种原因突然失效,为满足用户的需求,供应链需要调用库存,增加紧急订货.

4) 紧急订货调用的库存均为成品库存.由于  $b$  层制造商的库存为半成品库存,紧急调度时供应链不再进行生产,故本文中对  $b$  层库存不做考虑.  $e$  层零售商直接面向用户,不保留库存,因此本文只考虑  $c, d$  二层的库存问题.

#### (2) 参数确定

$cp_b$  为第  $b$  层所有制造商物料的单位生产成本,  $cp_c$  为第  $c$  层所有制造商物料的单位生产成本;  $pt_{ab}$  为第  $a$  层与第  $b$  层任意节点之间的单位运输成本,  $pt_{bc}$  为第  $b$  层与第  $c$  层任意节点之间的单位运输成本,  $pt_{cd}$  为第  $c$  层与第  $d$  层任意节点之间的单位运输成本,  $pt_{de}$  为第  $d$  层与第  $e$  层任意节点之间的单位运输成本;  $h_{ci}$  为第  $c$  层第  $i$  个节点的库存持有成本,  $h_{di}$  为第  $d$  层第  $i$  个节点的库存持有成本;  $b_i$  为第  $b$  层制造商材料单系数,即输入  $b_i$  单位物料得到一单位物料输出,  $c_i$  为第  $c$  层制造商材料单系数,即输入  $c_i$  单位物料得到一单位物料输出;  $m$  为第  $f$  层用户需求总量;  $l_{ai}$  为第  $a$  层第  $i$  个节点的最大供应能力,  $l_{bi}$  为第  $b$  层第  $i$  个节点的最大生产能力,  $l_{ci}$  为第  $c$  层第  $i$  个节点的最大生产能力,  $l_{di}$  为第  $d$  层第  $i$  个节点的最大分销能力,  $l_{ei}$  为第  $e$  层第  $i$  个节点的最大零售能力;  $Ccd_{ij}$  为第  $d$  层第  $j$  个分销商从第  $c$  层第  $i$  个制造商处紧急订货的单位订货成本,  $Cde_{ij}$  为第  $e$  层第  $j$  个分销商从第  $d$  层第  $i$  个制造商处紧急订货的单位订货成本;  $Kd_i$  为第  $d$  层第  $i$  个分销商缺货的单位惩罚成本;  $Ic_i$  为第  $c$  层第  $i$  个节点的库存量,  $Id_i$  为第  $d$  层第  $i$  个节点的库存量.

#### (3) 决策变量的确定

$Qab_{ij}$  为第  $a$  层第  $i$  个供应商和第  $b$  层第  $j$  个制造商之间的供应量,  $Qbc_{ij}$  为第  $b$  层第  $i$  个供应商和第  $c$  层第  $j$  个制造商之间的供应量,  $Qcd_{ij}$  为第  $c$  层第  $i$  个供应商和第  $d$  层第  $j$  个制造商之间的供应量,  $Qde_{ij}$  为第  $d$  层第  $i$  个供应商和第  $e$  层第  $j$  个制造商之间的供应量;  $Wcd_{ij}$  为节点失效后第  $c$  层第  $i$  个节

点从第  $d$  层第  $j$  个节点处新增的紧急订货量,  $Wde_{ij}$  为节点失效后第  $d$  层第  $i$  个节点从第  $e$  层第  $j$  个节点处新增的紧急订货量;

$$Xcd_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } c \text{ 层第 } i \text{ 个节点和第 } d \text{ 层第 } j \text{ 个} \\ & \text{节点之间有紧急订货量存在;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$$Yde_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } c \text{ 层第 } i \text{ 个节点和第 } d \text{ 层第 } j \text{ 个} \\ & \text{节点之间有紧急订货量存在;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

(4) 目标函数和约束条件

1) 网络正常运行的情况

网络正常运行的情况下物流调度的数学规划模型如下:

$$\min \left\{ \begin{matrix} cp_b & Qab_{ij} & + & cp_c & Qbc_{ij} \\ i=1 & j=1 & & i=1 & j=1 \\ pt_{ab} & Qab_{ij} & + & pt_{bc} & Qbc_{ij} & + \\ C & D & & D & E \\ pt_{cd} & Qcd_{ij} & + & pt_{de} & Qde_{ij} \end{matrix} \right\}.$$

s. t.

$$Qab_{ij} = \begin{matrix} B \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qbc_{ij}; \quad (1)$$

$$Qbc_{ij} = \begin{matrix} C & D \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qcd_{ij} + I_{ci}; \quad (2)$$

$$Qcd_{ij} = \begin{matrix} D & E \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qde_{ij} + Id_i; \quad (3)$$

$$Qde_{ij} = m; \quad (4)$$

$$Qab_{ij} \leq l_{ai}, i \in [1, 2, \dots, A]; \quad (5)$$

$$Qab_{ij} \leq l_{bi}, j \in [1, 2, \dots, B]; \quad (6)$$

$$Qbc_{ij} \leq l_{ci}, j \in [1, 2, \dots, C]; \quad (7)$$

$$Qcd_{ij} \leq l_{di}, j \in [1, 2, \dots, D]; \quad (8)$$

$$Qde_{ij} \leq l_{ei}, j \in [1, 2, \dots, E]; \quad (9)$$

$$Qab_{ij}, Qbc_{ij}, Qcd_{ij}, Qde_{ij} \geq 0, \forall i, j. \quad (10)$$

鉴于成本在供应链中的重要性, 本文提出一个由供应链总成本为目标的网络运行方案. 总成本分为 3 部分: 制造成本、运输成本和库存成本. 库存成本是常数, 在目标函数中没有列出, 所以目标函数只对整个网络的生产成本和运输成本求最小值. 其中, 生产成本为

$$cp_b \begin{matrix} A & B \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qab_{ij} + cp_c \begin{matrix} B & C \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qbc_{ij},$$

整个网络的运输成本为

$$pt_{ab} \begin{matrix} A & B \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qab_{ij} + pt_{bc} \begin{matrix} B & C \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qbc_{ij} +$$

$$pt_{cd} \begin{matrix} C & D \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qcd_{ij} + pt_{de} \begin{matrix} D & E \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qde_{ij}.$$

库存成本  $Ic_i h_{ci} + Id_i h_{di}$  为已知量. 在约束条件下, 式(1) ~ (4) 为  $b, c, d, e$  层的物流平衡约束, 其中  $b$  和  $c$  为  $b$  层和  $c$  层制造商的材料单系数, 表示在该层制造商输入 1 单位物料后得到 1 单位物料输出. 式(5) ~ (9) 为各层供应链的最大供应、生产或分销能力的约束, 式(10) 是非零约束.

2) 单一节点失效的情况

最小化供应链总成本. 总成本由制造成本、运输成本、紧急订货成本、缺货惩罚成本和库存成本组成. 其中制造成本是  $b$  层、 $c$  层制造商制造成本之和, 即

$$cp_b \begin{matrix} A & B \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qab_{ij} + cp_c \begin{matrix} B & C \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qbc_{ij};$$

运输成本是原网络运输成本与新增订货量运输成本之和减掉中断弧运输成本, 具体表示为

$$pt_{ab} \begin{matrix} A & B \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qab_{ij} + pt_{bc} \begin{matrix} B & C \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Qbc_{ij} +$$

$$pt_{cd} \begin{matrix} C & D \\ i=1 & j=1 \end{matrix} (Qbc_{ij} + Wcd_{ij} Xcd_{ij}) +$$

$$pt_{de} \begin{matrix} D & E \\ i=1 & j=1 \end{matrix} (Qde_{ij} + Wde_{ij} Ycd_{ij});$$

紧急订货成本为  $cd$  层与  $de$  层之间新增的紧急订货成本之和, 即

$$co_c \begin{matrix} C & D \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Wcd_{ij} Xcd_{ij} + co_d \begin{matrix} D & E \\ i=1 & j=1 \end{matrix} Wde_{ij} Yde_{ij};$$

缺货惩罚成本是第  $d$  层第 2 个节点向第  $e$  层所有节点供应链的总和, 即

$$ch_d \begin{matrix} E \\ j=1 \end{matrix} Qde_{2j}.$$

当节点失效时, 紧急订货量从已有库存中调用. 紧急调用是瞬时行为, 前期的库存费用已经发生, 因此节点失效情况下库存费用和网络正常运行时库存费用一致, 仍为常量  $Ic_i h_{ci} + Id_i h_{di}$ , 故在目标函数中没有列出. 所以总成本目标函数为

$$\min \left\{ \begin{matrix} cp_b & Qab_{ij} & + & cp_c & Qbc_{ij} & + \\ i=1 & j=1 & & i=1 & j=1 \\ pt_{ab} & Qab_{ij} & + & pt_{bc} & Qbc_{ij} & + \\ A & B & & B & C \\ i=1 & j=1 & & i=1 & j=1 \end{matrix} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^D (Qbc_{ij} + Wcd_{ij} Xcd_{ij}) + \\
 & pt_{de} \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E (Qde_{ij} + Wde_{ij} Yde_{ij}) + \\
 & coc \sum_{i=1}^C \sum_{i=1}^D Wcd_{ij} Xcd_{ij} + \\
 & cod \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E Wde_{ij} Yde_{ij} + ch_d \sum_{j=1}^E Qde_{2j}.
 \end{aligned}$$

约束条件共分为 2 种情景：

**情景 1** 通过调用库存和增加紧急订货可以满足用户需求,即

$$\sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E Wde_{ij} Yde_{ij} + \sum_{i=1}^E Wde_{2i}.$$

**最大分销和零售能力约束**

由于供应商的能力有限,决定了网络中各层各节点原处理的物流量与新增紧急订货量之和不能超过该节点的最大分销 / 零售能力上限. 有如下不等式:

$$\sum_{j=1}^B Qab_{ij} \leq l_{ai}, i \in [1, 2, \dots, A]; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^A Qab_{ij} \leq l_{bi}, j \in [1, 2, \dots, B]; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^B Qbc_{ij} \leq l_{ci}, j \in [1, 2, \dots, C]; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^C (Qcd_{ij} + Wcd_{ij} Xcd_{ij}) \leq l_{dj}; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^D (Qde_{ij} + Wde_{ij} Yde_{ij}) \leq l_{ej}. \quad (15)$$

**紧急订货量上限约束**

紧急订货量是从节点的库存中调用,因此第  $d$  层第  $j$  个节点从第  $c$  层第  $i$  个节点处的紧急订货量不得超过该节点库存量的上限,于是有如下公式:

$$\sum_{j=1}^D Wcd_{1j} Xcd_{1j} \leq Ic_i + Qi, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^E Wde_{ij} Yde_{ij} \leq Id_i. \quad (17)$$

其中:  $Q_i$  表示由于节点 11 失效,  $c$  层第  $i$  个节点未能正常供货而产生的产品剩余,该值可由网络正常运行时的模型求解得到.

**非零约束**

供应链层级之间的紧急订货量显然要满足非负约束条件

$$Wcd_{ij}, Wde_{ij} \geq 0. \quad (18)$$

**情景 2** 通过调用库存,增加紧急订货量不一定能满足用户的需求,即松弛约束

$$\sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E Wde_{ij} Yde_{ij} + \sum_{i=1}^E Wde_{2i},$$

其他约束条件同情景 1.

单一节点失效情况下,供应网络应急调度数学模型如下:

$$\begin{aligned}
 \min \{ & cp_b \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B Qab_{ij} + cp_c \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^C Qbc_{ij} + \\
 & pt_{ab} \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B Qab_{ij} + pt_{bc} \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^C Qbc_{ij} + \\
 & pt_{cd} \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^D (Qbc_{ij} + Wcd_{ij} Xcd_{ij}) + \\
 & pt_{de} \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E (Qde_{ij} + Wde_{ij} Yde_{ij}) + \\
 & coc \sum_{i=1}^C \sum_{i=1}^D Wcd_{ij} Xcd_{ij} + \\
 & cod \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^E Wde_{ij} Yde_{ij} + ch_d \sum_{j=1}^E Qde_{2j} \};
 \end{aligned}$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^B Qab_{ij} \leq l_{ai}, i \in [1, 2, \dots, A];$$

$$\sum_{i=1}^A Qab_{ij} \leq l_{bi}, j \in [1, 2, \dots, B];$$

$$\sum_{i=1}^B Qbc_{ij} \leq l_{ci}, j \in [1, 2, \dots, C];$$

$$\sum_{i=1}^C (Qcd_{ij} + Wcd_{ij} Xcd_{ij}) \leq l_{dj};$$

$$\sum_{i=1}^D (Qde_{ij} + Wde_{ij} Yde_{ij}) \leq l_{ej};$$

$$\sum_{j=1}^D Wcd_{1j} Xcd_{1j} \leq Ic_i + Qi;$$

$$\sum_{j=1}^E Wde_{ij} Yde_{ij} \leq Id_i;$$

$$Wcd_{ij}, Wde_{ij} \geq 0;$$

**3 模型的求解方法**

本问题是混合整数规划问题,可用 CLPEX 软件编程序对其求解. 在运行环境 CPU AMD2800 + (1.61 GHz) 内存 512 MB 下,利用 CLPEX9.0 编写程序求解.

**4 计算结果**

以上程序在计算机上对大量例子进行了计算,均取得满意结果,限于篇幅,下面给出一个小规模的例子.

在图 1 所示的供应网络中,设节点 1,2,3 为供

表 1 各企业初始能力相关数据

	生产 成本 $cp_i$	材料 单系数 $i$	库存持有成本 $h_{ij}$			最大供应 / 生产 / 分销能力 $l_{ij}$			最节点库存量 $I_{ij}$		
			$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = a$	25	0.8				2000	3000	3000			
$i = b$	20	0.7	5	7	6	3000	2000	3000			
$i = c$			6	8	6	3000	3500	3000	150	100	150
$i = d$			5	5	6	4000	4000	4000	300	200	350
$i = e$						4000	2500	1500			

表 2 各路径单位运输成本

$pt_{ij}$	$a \rightarrow b$			$b \rightarrow c$			$c \rightarrow d$			$d \rightarrow e$		
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = 1$	15	20	23	10	18	15	10	18	18	11	14	18
$i = 2$	20	15	18	12	10	12	18	10	13	18	11	18
$i = 3$	20	20	15	18	12	10	17	18	18	17	14	11

表 3 各路径紧急订货成本

	$c \rightarrow d (Wcd_{ij})$			$d \rightarrow e (Wde_{ij})$		
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = 1$	120	0	0	140	0	0
$i = 2$	0	0	130	0	0	0
$i = 3$	125	0	125	0	0	150

表 4 网络正常运行时计算结果(目标函数值为 787274)

	$Qab$			$Qbc$			$Qcd$			$Qde$		
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = 1$	2000	0	0	3000	0	190	3110	0	0	3700	0	0
$i = 2$	999	2000	0	0	2127	0	0	3000	704	300	2500	0
$i = 3$	0	0	3000	0	1372	1819	889	0	1145	0	0	1500

表 5 节点失效时计算结果(目标函数值为 1931474)

	$Wcd$			$Wde$			$Xcd$			$Yde$		
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = 1$	150	0	0	600	0	0	1	0	0	1	0	0
$i = 2$	0	0	2500	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$i = 3$	150	0	0	0	0	2200	1	0	0	0	0	1

供应商;节点 4,5,6 为初级制造商;节点 7,8,9 为高级制造商;节点 10,11,12 为分销商;节点 13,14,15 为零售商;节点 16 是用户,共同组成了一个供应链网络.该网络生产和配送同一种产品,用户需求和缺货惩罚成本分别是 8000 和 145,各节点企业提供的其他初始数据如表 1,表 2 和表 3 所示.

本文使用 CPLEX9.0 对模型进行求解,历时小于 0.01s,得出目标函数的最优值及决策变量的结果详见表 4 和表 5.表 4 给出了网络正常运行的情况下,各层级之间的物流路径及物流量.该运行方案可在供需平衡的情况下最小化网络成本.当节点 11 失

效时,本文给出了失效节点左右两层的紧急订货量及订货路径,如表 5 所示.该应急方案可在满足用户需求的情况下极小化网络运行的总成本,以最大的程度降低节点失效带来的损失.

### 5 结 论

基于节点失效的应急管理策略是供应链管理中的一重要研究工作.本文提出了网络正常运行及单一节点失效情况下的单目标数学规划模型,并运用 CPLEX 软件进行求解.数值计算表明所提出的方案不仅能在节点失效的情况下满足用户需求,同时合理地选择紧急供应商和资源的优化配置,最小

化网络运行成本,最大程度地弥补节点失效造成的损失,为供应链管理中的应急管理研究提供了一条有效的途径.

### 参考文献(References)

- [1] 刘希龙,季建华. 基于应急供应链的弹性供应网络设计研究[J]. 控制与决策, 2002, 22(11): 1224-1227.  
(Liu X L, Ji J H. Resilient supply network design based on contingency supply[J]. Control and Decision, 2002, 22(11): 1224-1227.)
- [2] 肖为群. 基于资源外取的供应链弹性研究[J]. 物流技术, 2008, 27(1): 77-80.  
(Xiao W Q. Research on SC flexibility based on outsourcing[J]. Logistics Technology, 2008, 27(1): 77-80.)
- [3] 李怡娜,徐学军. 弹性需求下可控提前期供应链库存优化的信用期机制[J]. 运筹与管理, 2008, 17(2): 32-37.  
(Li Y N, Xu X J. Research on credit period mechanism for optimizing supply chain inventory with controllable lead time and elastic demand[J]. Operations Research and Management Science, 2008, 17(2): 32-37.)
- [4] Christopher. Creating resilient supply chain[J]. Int J of Operations of Production Management, 2003, 24(6): 589-601.
- [5] Rice J B, Caniato F. Building a secure and resilient supply network[J]. Supply Chain Management Review, 2003, 7(5): 22-30.
- [6] Haywood M, Peck H. Improving the management of supply chain vulnerability in UK aerospace manufacturing[C]. Proc of the 1st EUROMA/POMs Conf. London, 2003: 121-130.
- [7] Muckstadt J A, Murray D H. Guidelines for collaborative supply chain system design and operation[J]. Information Systems Frontiers: Special Issue on Supply Chain Management. London, 2007, 3(4): 427-453.
- [8] Kishalay Mitra, Ravindra D. Towards resilient supply chains: Uncertainty analysis using fuzzy mathematical programming[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 15(3): 172-184.
- [9] 赵林度. 基于细胞弹性模型的供应链弹性研究[J]. 物流技术, 2009, 28(1): 101-104.  
(Zhao L D. Analysis on supply chain resilience based on cell resilience model[J]. Logistics Technology, 2009, 28(1): 101-104.)
- [10] Tomlin Brian T. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks[J]. Management Science, 2006, 52(5): 639-657.
- [11] Qi X T, Bard J, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions[J]. Omega, 2004, 32(4): 301-312.
- [12] Christian Kuhnert, Dirk Helbing. Scaling laws in urban supply networks[J]. Physica A, 2006, 363(1): 89-95.
- [13] Marco Laumanns, Erjen Lefebber. Robust optimal control of material flows in demand-driven supply networks[J]. Physica A, 2006, 363(1): 24-31.

(上接第24页)

- [12] Liu B, Wang L, Jin Y H, et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2005, 25: 1261-1271.
- [13] Shelokar P S, Jayaraman V K, Kulkarni B D. Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for improved continuous optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188: 129-142.
- [14] Esmin A A A, Lambert-Torres G, Alvarenga G B. Hybrid evolutionary algorithm based on PSO and GA mutation[C]. Proc of the Sixth Int Conf on Hybrid Intelligent Systems. Auckland, 2006: 57-59.
- [15] Zhang T, Zhang C M, Zhang Y J, et al. A mixed PSO algorithm for the VRPSD[C]. 2008 Chinese Control and Decision Conf. Yantai, 2008: 4017-4021.
- [16] Fan S K S, Liang Y C, Zahara E. Hybrid simplex search and particle swarm optimization for the weight[C]. Proc of the 7th World Congress on Engineering Optimization. Novosibirsk, 2004: 401-418.