

失效风险环境下可替代产品分销网络设计

高 聪¹, 关志民¹, 王 颖²

(1. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东软集团 IA 事业部, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要: 研究了在供应失效风险环境下可替代产品的分销网络设计问题,建立了包括制造商产能设计、产能分配、分销中心选址和应急库存量等决策内容的混合整数规划模型. 在模型中,导致供应失效的突发事件通过情境的形式表现,在同一情境中,允许制造商和多个分销中心同时出现能力受损的情况,这使得问题的情境数急剧增加. 为此使用样本平均估计(SAA)方法进行求解. 通过实验比较上界和下界之间的间隙,证明了SAA方法的有效性,最后给出了供应链中设施的可靠程度、产品间可替代程度与供应链收益之间的关系.

关 键 词: 供应失效风险;可替代性;分销网络;优化设计

中图分类号: TG 335.58

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)11-1664-05

Design of Substitute Product Distribution Network Under the Risk of Supply Failure

GAO Cong¹, GUAN Zhi-min¹, WANG Ying²

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. IA Business Unit, Neusoft, Shenyang 110000, China. Corresponding author: GAO Cong, E-mail: cgao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The distribution network design of substitute products under the risk of supply failure was studied, and a mixed integer programming model including manufacturers' production design, capacity allocation, distribution center location and emergency inventory decision was established. In the model, emergencies causing supply chain failure are represented by scenarios, and within the same scenario, more than one node of the distribution network may break down, which may result in a sharp increase of problematic scenarios. The sample average approximation method (SAA) is used for solution, whose validity is verified by experimentally comparing the gaps between the upper bound and the lower bound. Finally, the reliability of supply chain execution, and the relationship between product substitution degree and supply chain profit are analyzed.

Key words: supply failure risk; substitution; distribution network; optimal design

为了在突发的失效事件发生时仍能够保证一定的服务水平,分销网络往往采取后备冗余生产能力、购买期权和在分销中心保存一定的应急库存等手段. 产品的可替代性在对这些手段的选择和定量决策中具有明显和不可忽视的影响^[1-2].

当发生自然灾害和政治动荡等失效事件时,分销网络中经常存在多个节点同时受到影响,并且所受影响的程度也不尽相同. 因此需要大量的情境来真实地反应失效事件的影响,当分销网络中存在10个分销中心,每个分销中心存在2个受

损状态,出现突发供应失效事件时,需要 $(2+1) \times 10$ 个情境描述可能出现的结果. 大量的情境对问题求解造成了极大的困扰,会导致求解时间非常长,甚至出现不可解的情况(受限于计算机硬件限制,例如内存不足等情况). 为应对这种情况,本文采用样本平均估计(sample average approximation, SAA)方法对问题进行求解.

目前已经出现一些对可替代产品供应链的研究,但主要集中在库存管理方面,关于供应链设计的研究还较少. Bassok等^[3]研究了在产品单向可

替代条件下的单周期库存模型,在将该模型与报童模型进行比较的基础上,分析了参数对订货策略的影响.Chen^[4]研究了产品的可替代性对生产-分销网络的影响,更具体地比较了替换产品的种类以及可以被替换的需求比例对生产-分销网络的影响.Lu 等^[5]研究了当供应链处在随机供应失效风险下,产品可替代性与双源供应之间的关系.Lin 等^[6]以 build-to-order 装配线为对象,研究了零部件单向可替代情况下的供应链设计问题.文中比较了三种策略下的供应链运营成本:不采用零部件替换策略,不利用零部件替代性的延迟策略和利用零部件可替代性的延迟策略.

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述

本文研究了一个三级多产品分销网络的设计问题,包括一个制造商、多个分销中心和多个零售商.制造商包含多条产品生产线的,每一条生产线对应一种产品.产品之间存在单向可替代关系,即产品 1 可以替代产品 2 满足顾客的需求,但产品 2 不能用来替代产品 1.当产品 1 用来替换产品 2 时,其销售价格与产品 2 相同.在本文中假设如果产品 1 可以用来替换产品 2,则产品 1 的原售价不低于产品 2.

制造商面对新的市场需求,需要重新调整自己的生产能力并设计分销网络.需决策的内容包括产能增加的规模、产品生产线间产能的分配、分销中心的选址、确定应急库存的持有量以及指派分销中心与零售商之间的供应关系.为简化问题,本文假设制造商与分销中心、分销中心与零售商之间的运输时间均为 1 天.

系统面临的风险包括由自然灾害和恐怖袭击等突发事件引起的生产线生产能力和分销中心转运能力受损,进而导致供应部分或完全中断.在已有的大部分关于供应失效的研究中,仅考虑同时只有一个节点发生失效的情况.但面对突发事件,往往发生供应链中多个节点同时受损的情况.因此本文在使用情境方式表达突发事件带来的供应失效时,允许多个生产线和分销中心能力同时受损;并且受损的程度包含多个等级,而不是简单的不受损或完全受损.

本文采用两种手段应对突发事件可能带来的供应能力受损:1)在选择产能增加规模时,预留

一部分冗余产能,以应对制造商能力受损;2)在分销中心和零售商处建立应急库存以应对制造商产能受损和分销中心转运能力受损的情况.当制造商的一条或若干条生产线由于突发事件能力受损时,可以借用其他生产线的产能以满足受损生产线产品的需求,这种产能的调整需要一定的调整费用.

1.2 数学模型

1.2.1 符号

DC 为分销中心候选地址集合,索引为 i ;RT 为零售商集合,索引为 j ;PR 为产品集合,索引为 p, q ;SC 为情境集合,索引为 s ;T 为时刻集合,索引为 t ; p_s 为情境 s 发生的概率; d_{rpts} 为零售商 r 在 t 时刻 s 情境下对产品 p 的需求; A_{pq} 为产品替代关系矩阵,若产品 p 可以替代产品 q ,则 $A_{pq} = 1$,否则 $A_{pq} = 0$; C^{PB} 为制造商已有的产能; R_{ps} 为制造商在情境 s 下产品 p 的产线剩余能力比例; R_{is} 为分销中心 i 在情境 s 下剩余的转运能力比例; Pc_p 为产品 p 的售价; IC_l 为增产方案 l 增加的产能; CP_l^P 为增产方案 l 需要的年化费用; Ct^{Adj} 为产能调整的费用; DG_{ps} 为情境 s 下产品 p 对应的产线是否发生能力受损; DG_{is} 为情境 s 下分销中心 i 是否发生能力受损; Ct_{ip}^s 为分销中心 i 持有的产品 p 的单位成本; Ct_{jp}^s 为零售商 j 持有的产品 p 的单位成本; Ct_p^{PR} 为产品 p 的生产成本; Ct_i^{DC} 为分销中心 i 的年化建设成本; Ct_{ip}^{TR} 为制造商与分销中心 i 之间产品 p 的单位运输成本; Ct_{ij}^{TR} 为分销中心 i 与零售商 j 之间产品 p 的单位运输成本; Ct_p^{INV} 为制造商处产品 p 的单位库存成本; Ct_{ip}^{INV} 为分销中心 i 处产品 p 的单位库存成本; Ct_{jp}^{INV} 为零售商 j 处产品 p 的单位库存成本; e_{jp} 为零售商 j 处产品 p 的缺货单位惩罚系数; M 为充分大的正数.

1.2.2 决策变量

$$Y_i = \begin{cases} 1, & \text{在 } i \text{ 处建立分销中心;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$
$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{由分销中心 } i \text{ 为零售商 } j \text{ 供货;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$
$$U_l = \begin{cases} 1, & \text{选择第 } l \text{ 种产能增加方案;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$
$$CA_{ts} = \begin{cases} 1, & \text{情境 } s \text{ 下时刻 } t \text{ 进行产能调整;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

C_p 为总产能中分配给产品 p 的产能; I_p^s 为分销中心 i 持有的产品 p 的应急库存; I_{jp}^s 为零售商 j

持有的产品 p 的应急库存; X_{ipts} 为在情境 s 下时刻 t 从制造商到分销中心 i 的产品 p 的运输量; X_{ijpts} 为在情境 s 下时刻 t 从分销中心 i 到零售商 j 的产品 p 的运输量; I_{pts}^p 为在情境 s 下时刻 t 制造商处产品 p 的库存量; I_{ipts}^{DC} 为在情境 s 下时刻 t 分销中心 i 处产品 p 的库存量; I_{jpts}^{RT} 为在情境 s 下时刻 t 零售商 j 处产品 p 的库存量; W_{jpqts} 为在情境 s 下时刻 t , 在零售商 j 处以产品 p 替代产品 q 的量; E_{jpts} 为在情境 s 下时刻 t , 在零售商 j 处产品 p 的缺货量; P_{pts} 为在情境 s 下时刻 t , 制造商对产品 p 的产量.

1.2.3 目标函数与约束条件

$$\begin{aligned} \max \sum_s p_s (& \sum_{jpqt} P_{cpts} W_{jpqts} - \sum_{pt} C_{tp}^{PR} P_{pts} - \\ & \sum_{ipt} C_{ip}^{TR} X_{ipts} - \sum_{ijpt} C_{ijp}^{TR} X_{ijpts} - \sum_{pt} C_{tp}^{INV} I_{pts}^p - \\ & \sum_{ipt} C_{ip}^{INV} I_{ipts}^{DC} - \sum_{pt} C_{tp}^{INV} I_{jpts}^{PT} - \sum_{jq} e_{jq} E_{jpts} - \\ & \sum_t C_t^{Adj} CA_{ts}) - \sum_i C_i^{DC} Y_i - \sum_l C_l^{IP} U_l - \\ & \sum_{ip} C_{ip}^S I_{ip}^S - \sum_{jp} C_{jp}^S I_{jp}^S. \end{aligned} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_j Z_{ij} \leq Y_i, \forall i, \quad (2)$$

$$X_{ipts} \leq M \cdot Y_i, \forall i, p, s, t, \quad (3)$$

$$X_{ijpts} \leq M \cdot Z_{ij}, \forall i, j, p, t, s, \quad (4)$$

$$\sum_i Z_{ij} = 1, \forall j, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{pts}^p &= I_{p,t-1,s}^p + P_{pts} - \sum_i X_{ipts}, \forall i, p, s, t = 2, \\ \dots, | T |, \end{aligned} \quad (6)$$

$$I_{pts}^p = P_{pts} - \sum_i X_{ipts}, \forall i, p, s, t = 1, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_{ipts}^{DC} &= I_{ip(t-1)s}^{DC} + X_{ip(t-1)s} - \sum_j X_{ijpts}, \\ \forall i, p, s, t &= 2, \dots, | T |, \end{aligned} \quad (8)$$

$$I_{ipts}^{DC} = I_{ip}^S, \forall i, p, s, t = 1, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{ipts}^{PT} &= I_{jp(t-1)s}^{PT} + \sum_i X_{ijp(t-1)s} - \sum_q W_{ipqts}, \\ \forall j, p, s, t &= 2, \dots, | T |, \end{aligned} \quad (10)$$

$$I_{jpts}^{PT} = I_{jp}^S, \forall j, p, s, t = 1, \quad (11)$$

$$X_{ijpts} = 0, \forall i, j, p, s, t = 1, \quad (12)$$

$$W_{jpqts} = 0, \forall j, p, q, s, t = 1, \quad (13)$$

$$W_{jpqts} \leq M \cdot A_{pq}, \forall j, p, q, t, s, \quad (14)$$

$$\sum_q W_{jpqts} + E_{jpts} = d_{jpts}, \forall i, p, t, s, \quad (15)$$

$$\sum_l U_l \leq 1, \quad (16)$$

$$\sum_p C_p \leq C^{PB} + \sum_l IC_l U_l, \quad (17)$$

$$P_{pts} \leq R_{ps} C_p + M \cdot CA_{ts}, \forall t, s, \quad (18)$$

$$\sum_p P_{pts} \leq \sum_p R_{ps} C_p, \forall t, s, \quad (19)$$

$$\sum_{jp} X_{ijpts} \leq R_{is} C_i, \forall i, t, s, \quad (20)$$

$$SF_{js} \leq Dg_{is} + (1 - Z_{ij}), \quad \forall i, j, s, \quad (21)$$

$$I_{ipts}^S \geq I_{ip}^S - M \sum_p Dg_{ps}, \quad \forall i, p, t, s, \quad (22)$$

$$I_{jpts}^S \geq I_{jp}^S - M (\sum_p Dg_{ps} + SF_{js}), \quad \forall j, p, t, s. \quad (23)$$

式(1)为目标函数,由 5 个分量构成,分别是:分销系统的运营平均收益,建立分销中心的费用,增加制造商产能的费用,在分销中心维持应急库存的费用和在零售商维持应急库存的费用. 分销系统平均运营收益由 9 个分量构成:产品销售收入、产品生产成本、制造商与分销中心之间的运输费用、分销中心与零售商之间的运输费用、制造商的库存费用、分销中心的库存费用、零售商的库存费用、缺货惩罚和能力调整所需的费用.

约束(2)~(5)为网络结构约束:约束(2)表示只有建立了分销中心,才能建立分销中心与零售商的供货关系;约束(3)表示只有建立分销中心,制造商才能使用分销中心;约束(4)表示只有建立分销中心与零售商的供应关系,才可以使用分销中心向零售商供货;约束(5)表示每个零售商只能与一个分销中心建立供货关系. 约束(6)~(13)为物流平衡约束:其中约束(6)~(7)表示制造商的物流平衡;约束(8)~(9)表示分销中心的物流平衡;约束(10)~(11)表示零售商的物流平衡;约束(12)~(13)对 $t=1$ 分销中心和零售商之间的运输量和产品间替代量进行初始化. 约束(14)~(15)为需求满足约束:其中约束(14)表示只有在存在替代关系产品之间才能发生产品替代现象;约束(15)确定了缺货量. 约束(16)表示制造商至多可以选择一种产能增加方案. 约束(17)表示分配给各生产线的产能之和不能超过增产后的总产能. 约束(18)表示当某生产线需要的产能超出其可利用产能时,需要进行产能调整. 约束(19)表示制造商在任意时刻的总产量不能超过其总剩余产能. 约束(20)表示分销中心的转运能力约束. 约束(21)确定在情境 s 下,零售商 j 的分销中心是否能力受损. 约束(22)~(23)表示只有当发生制造商和分销中心能力受损时,才可以使用应急库存.

2 问题求解

SAA 方法最初由 Shapiro 等^[7]提出,其核心

思想是以仿真为基础解决大规模的随机规划问题,后经过 Mak 等^[8]和 Kleywegt 等^[9]的研究,发展为基于抽样的平均估计方法.通过 SAA 方法,可以得到问题的上界和下界(对最大化问题)的估计值.当参数选择适当时,可以将估计值与真实值的偏差以较大概率控制在较小范围内^[9].

令情境集合 SC 等于第 j 组情境集,将原问题的目标函数式(1)改写为式(24)的形式,可计算第 j 组情境集的目标函数.

$$\begin{aligned} \max v_N^j = & \frac{1}{N}(\sum_{jpqts} P_{c_{pts}} W_{jpqts} - \sum_{pts} C_{t_p}^{PR} P_{pts} - \\ & \sum_{ipts} C_{t_{ip}}^{TR} X_{ipts} - \sum_{ijpts} C_{t_{ijp}}^{TR} X_{ijpts} - \sum_{ipts} C_{t_{ip}}^{INV} I_{ipts} - \\ & \sum_{pts} C_{t_{jp}}^{INV} I_{ipts} - \sum_{jqts} e_{jq} E_{jqts} - \sum_{ts} C_{t_{ts}}^{Adj} CA_{ts}) - \\ & \sum_i C_{t_i}^{DC} Y_i - \sum_l C_{t_l}^{IP} U_l - \sum_{ip} C_{t_{ip}}^S I_{ip}^S - \\ & \sum_{jp} C_{t_{jp}}^S I_{jp}^S. \end{aligned} \tag{24}$$

问题的下界,即可行解的目标函数估计值的求解过程如下.选择 M 组情境集中目标函数值最大的一组对应的分销网络结构作为决策方案,分销网络结构包括分销中心选址 Y 、产能分配 U 、分销中心指派 Z 和安全库存量 I^S .在情境空间中随机抽取个情境,代入到由目标函数(25)和约束(2)~(23)组成的模型中.此时模型中的 Y, Z, U, I^S 均已确定,问题的求解难度较原问题大大降低,因此 N' 的取值可以远大于 N .需要注意的是, N' 的取值越大,得到的目标函数值与真实值偏差越小.

$$\begin{aligned} \max \hat{v}_{N'} = & \frac{1}{N'}(\sum_{jpqts} P_{c_{pts}} W_{jpqts} - \sum_{pts} C_{t_p}^{PR} P_{pts} - \\ & \sum_{ipts} C_{t_{ip}}^{TR} X_{ipts} - \sum_{ijpts} C_{t_{ijp}}^{TR} X_{ijpts} - \sum_{ipts} C_{t_{ip}}^{INV} I_{ipts} - \\ & \sum_{pts} C_{t_{jp}}^{INV} I_{ipts} - \sum_{jqts} e_{jq} E_{jqts} - \sum_{ts} C_{t_{ts}}^{Adj} CA_{ts}) - \\ & \sum_i C_{t_i}^{DC} Y_i - \sum_l C_{t_l}^{IP} U_l - \sum_{ip} C_{t_{ip}}^S I_{ip}^S - \\ & \sum_{jp} C_{t_{jp}}^S I_{jp}^S. \end{aligned} \tag{25}$$

现将 SAA 方法介绍如下:

第 1 步 产生 M 组情境集,每组包含 N 个情境.对每组情境求解包含目标函数(24)和约束(2)~(23)的混合整数规划模型.令 v_N^j 和 $(\hat{Y}, \hat{Z}, \hat{U}, \hat{I}^S)_N^j$ 分别表示第 j 组情境的目标函数值和对应的供应链网络结构.供应链网络结构包括分销中心的选址、分销中心和零售商的指派关系、制造商的产能增加决策和安全库存的数量.

第 2 步 以各情境集为基础,计算 v_N^j ,并计算其无偏估计量 $\bar{v}_{N,M}$,令

$$\bar{v}_{N,M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v_N^j. \tag{26}$$

第 3 步 令 $k = \arg \min \{v_N^j | j = 1, 2, \cdots, M\}$,即 M 组情境集中目标函数值最大情境集,即 $(\bar{Y}, \bar{Z}, \bar{U}, \bar{I}^S) = (\hat{Y}, \hat{Z}, \hat{U}, \hat{I}^S)_N^k$.随机产生 N' 个情境,将 $(\bar{Y}, \bar{Z}, \bar{U}, \bar{I}^S)$ 和 N' 个情境代入到式(25)中,即目标函数值为 $\hat{v}_{N'}$.显然, $\bar{v}_{N'}$ 是原问题对于给定的供应链结构 $(\bar{Y}, \bar{Z}, \bar{U}, \bar{I}^S)$ 条件下的最优值的无偏估计.而 $(\bar{Y}, \bar{Z}, \bar{U}, \bar{I}^S)$ 是原问题的一个可行的分销网络结构,因此 $\hat{v}_{N'}$ 是原问题的一个可行解的无偏估计量,即下界.

第 4 步 计算对偶间隙,即

$$\text{gap}_{N,M,N'} = \bar{v}_{N,M} - \hat{v}_{N'}. \tag{27}$$

3 实验结果

本文随机产生 3 个包含 10 个零售商、5 个候选分销中心和 2 种产品的算例.制造商生产线能力受损状态与概率、分销中心能力受损状态与概率以及各零售商面临的需求状态与概率分别如表 1 和表 2 所示.

表 1 各类结点不同状态下的参数值

Table 1 Values of different status of all nodes

节点状态	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
产线剩余能力	1.0	0.5	0.2	0	/
DC 剩余能力	1.0	0.8	0.5	0.3	/
市场需求状态	1.5	1.2	1	0.8	0.5

表 2 各类结点不同状态发生的概率

Table 2 Probabilities of different status of all nodes

节点状态	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
产线剩余能力	$1 - \alpha$	0.5α	0.3α	0.2α	/
DC 剩余能力	$1 - \alpha$	0.5α	0.3α	0.2α	/
市场需求状态	$1 - \alpha$	0.5α	0.3α	0.1α	0.1α

测试算例中包含 3 种产品.为考察不同替代关系对分销网络的影响,设计了 4 种替代关系 A0~A3. A3 表示 3 种产品间存在 3 对替代关系:产品 1 可以替代产品 2,3,产品 2 可以替代产品 3; A2 表示 3 种产品间存在 2 对替代关系:产品 1 可以替代产品 2,3; A1 表示 3 种产品间只有产品 1 可以替代产品 2; A0 表示产品间没有可替代关系.计算结果如图 1 所示.

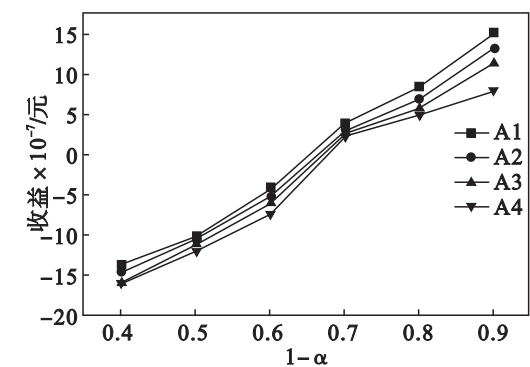


图 1 供应失效风险下产品间替代程度对供应链收益影响的比较

Fig. 1 Comparison between supply chains' profits under different substantial degrees

从图 1 中可以看出,生产线和分销中心的可靠程度是影响供应链业绩的最主要因素. 产品间的可替代性在一定程度上可以减少供应失效风险对供应链整体造成的损失. 当突发事件造成的供应能力受损程度较轻时,产品间可替代性可以较好地降低损失;当供应能力受损程度严重时,可替代性对减少损失的作用较小. 这是因为当受损程度较轻时,总产能相对于总需求缺口并不大,因此可以通过产品间的替代减少缺货损失;当供应能力受损严重时,各产品的库存和产线产能相对于需求均严重不足,为获得最大收益,各产品按照各自的原售价销售,留给产品间替代的空间很小.

4 结 论

- 1) 研究了在供应失效风险环境下可替代产品的分销网络设计问题. 建立了包括制造商产能设计、产能分配、分销中心选址和应急库存量等决策内容的混合整数规划模型.
- 2) 鉴于 SAA 方法不受问题情境数量限制的特点,本文采用 SAA 算法进行求解. 计算结果显

示 SAA 算法可以有效求解所提出的数学模型,对偶间隙值比较理想.

3) 通过分析比较产品间的可替代程度,得出产品间的可替代性可以降低供应失效风险,以此来降低供应链受到的损失,改善供应链的表现,并且改善程度与设施可靠性相关.

参考文献:

- [1] Wagner H,Whitin T W. Dynamic version of the economic lot size model[J]. *Management Science*,1958,5(1):89-96.
- [2] Leachman R. Preliminary design and development of a corporate-level production system for the semiconductor industry[R]. Berkeley:University of California at Berkeley,1987.
- [3] Bassok Y,Anupindi R,Akella R. Single-period multiproduct inventory model with substitution[J]. *Operations Research*,1999,47(4):632-642.
- [4] Chen H Y. The impact of item substitutions on production-distribution networks for supply chain[J]. *Transportation Research Part E*,2010,46(6):803-819.
- [5] Lu M S,Huang S M,Shen Z J M. Product substitution and dual sourcing under random supply failures [J]. *Transportation Research Part B—Methodological*,2011,45(8):1251-1265.
- [6] Lin C C, Wang T H. Build-to-order supply chain network design under supply and demand uncertainties [J]. *Transportation Research Part B—Methodological*,2011,45(8):1162-1176.
- [7] Shapiro A,de Mello T H. A simulation-based approach to stochastic programming with resource [J]. *Mathematical Programming*,1998,81(2):301-325.
- [8] Mak W K,Morton D P, Wood R K. Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs[J]. *Operations Research Letters*,1999,24(1):47-56.
- [9] Kleywegt A J,Shapiro A,de Mello T H. The sample average approximation method for stochastic discrete optimization[J]. *SIAM Journal of Optimization*,2001,12(2):479-502.