

系统动力学在配送中心订货策略优化中的应用

李 旭, 陈雨生, 刘铮铮

复旦大学管理学院, 上海 200433

[摘要] 系统动力学(System Dynamics, SD)是研究复杂系统的重要理论与方法,但 SD 的政策优化问题一直沿用“试凑法”,没得到很好的解决。本文从系统动力学原理出发,对 SD 模型政策优化进行了一般描述,将系统动力学和遗传算法相结合探讨了超市配送中心系统的最优库存和最优订货策略问题。本文对完善与发展 SD 的基本理论和探讨社会经济系统控制与政策优化问题有着较大的理论和现实意义。

[关键词] 系统动力学;政策优化;物流运作;遗传算法

[中图分类号] N941.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)12-0068-05

Application of Systems Dynamics in the Optimization of Ordering Policy in a Distribution Center of Supermarket

LI Xu, CHEN Yusheng, LIU Zhengzheng

School of Management, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: Systems dynamics provides theories and approaches to explore complex systems. However, the optimization in a systems dynamics model still follows the "try-and-error" method, which does not work satisfactorily. According to the principles of systems dynamics, the paper proposes a general formulation for the policy optimization problem in a systems dynamics model by introducing a control policy function. Combining with genetic algorithms, the order policy optimization in a distribution and super-market system is addressed. This paper aims to develop basic principles of systems dynamics and discuss the control and policy optimization for social economic systems.

Key Words: systems dynamics; policy optimization; logistics operation; genetic algorithm

CLC Number: N941.3

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)12-0068-05

1 超市配送中心库存系统及其基本系统动力学模型

1.1 系统描述

配送中心的建立是物流运作技术发展的结果,通过配送中心的集中库存,向零售商进行准时的货物配送,这样零售商可以在面积不大的地方建立连锁超市,而各超市门店无需建立自己的仓库,直接通过配送中心供货而进行销售活动。这种运作模式是现代物流技术的应用,在这种运作模式中对配送中心的要求较高,配送中心必须及时、准确地为超市门店送货,否则将无法形成整个系统的有效运作。配送中为了满足超市门

店的要求,必须对其库存进行科学的管理。传统的库存计算是通过存储论模型来解决的,这种方法有其自身的优点,但也有缺点。其主要不足是计算复杂、不直观、对历史数据的数量和准确性的依赖强。系统动力学(System Dynamics, SD)可以有效地解决配送中心库存的确定与控制问题,并且直观、易于理解、对历史数据的依赖和要求也较低。实际中,配送中心向其供应商订货,保证有一个稳定的期望库存。一般来讲超市向配送中心的订货可以认为不需要提前期,而配送中心向其供应商订货又要有一个提前期。这种情况下,如果处理不当会使配送中心的库存产生波动,即一般所说的“牛

收稿日期: 2007-03-26

作者简介: 李 旭,上海市邯郸路 220 号复旦大学管理学院,副教授,研究方向为系统动力学与管理决策、逆向物流;

E-mail: xuli@fudan.edu.cn

鞭”效应。为了克服这种现象,并从长期上保证整个供应链系统的效益最佳,确定配送中心的库存控制策略问题就变得重要。本文从系统动力学的观点出发,通过建立系统动力学的政策优化模型来探讨这一问题。对这样一个系统,其基本 SD 模型可以描述为如图 1 所示,其变量含义见表 1。

1.2 决策过程分析

图 1 所示有两个策略,一是超市门店向配送中心的订货策略 SO ,另一个是配送中心向供应商的订货策略。现对这两个决策过程分析如下。

1.2.1 超市门店的订货决策

超市门店每天向配送中心订货,且配送中心给超市送货没有延迟,可以认为是即时(Just In Time, JIT)式的服务方式。超市在确定订货量时就是补充货架上的缺货。一般来讲,超市根据历史数据对顾客每天的需求量进行预测,确定货架的空间位置,从而形成超市门店的期望库存 $SDINV$ (Supermarket Desired Inventory)。通

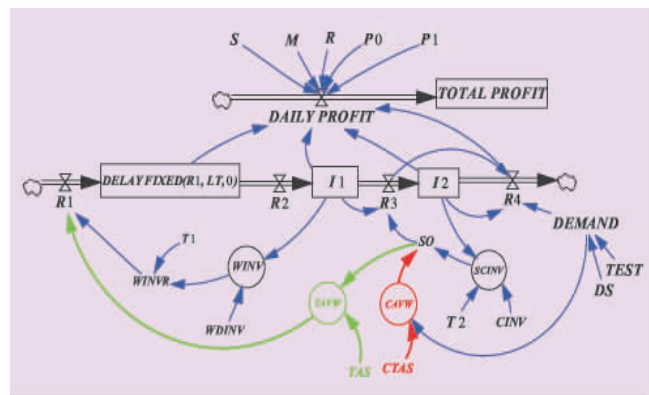


图 1 配送中心与超市库存关系基本结构描述

Fig. 1 Basic SD construction of supermarket inventory and distribution

过向配送中心的订货,使得每天销售开始时货架处于满货状态。即

$$SO = SCINV + DEMAND = (CINV - I2) / T2 + DEMAND$$

表 1 图 1 中各变量含义

Table 1 Definitions of variables in Figure 1

变量	含义	变量	含义
DELAY	管道延迟(件)	T1	配送中心库存调节时间(天)
FIXED	延迟时间	T2	超市库存调节时间(天)
LT	配送中心库存量(件)	CINV	超市期望库存量(件)
I1	超市门店库存(件)	SCINV	超市库存偏差(件)
I2	配送中心订货量(件/周)	WINV	配送中心库存偏差(件)
R1	配送中心到货量(件/周)	WDINV	配送中心期望库存量(件)
R2	配送中心发货量(件/天)	WINVR	配送中心库存调节率(件/周)
R3	超市订货量(件/天)	DAILY PROFIT	供应链每天利润
SO	超市销售量(件/天)	TOTAL PROFIT	总利润
R4	超市平均需求量(件/天)	S	存储成本(元/件/天)
DS	测试函数	M	预付款比例(%)
TEST	超市实际需求(件/天)	R	贷款利率(%/年)
DEMAND	超市销售量移动平均预测的时间长度(天)	P0	产品采购价格
CTAS	超市对其每天需求量的预测值(件)	P1	产品零售价格
CAVW/CTAS	配送中心发货量的移动平均预测的时间长度(周)	CP	流动资金总额
TAS	配送中心对超市每周需求量的预测值(件/周)		
TAVW/TAS			

其中 $DEMAND = TEST + DS$, $DS = 60$ 。上式表明超市每天的订货量 SO 等于其预测值与库存调节量之和。其中, $DEMAND$ 是超市对顾客需求的预测值,是超市平均需求量 DS 与一个测试函数 $TEST$ 之和。其中测试函数主要用来表明发货率受到的其他一些随机影响。此处我们假设它是如下函数

$$TEST = RANDOM\ NORMAL(10, 30, 15, 5, 5)$$

其中 $RANDOM\ NORMAL$ 为随机正态函数。库存调节率 $SCINV$ 是期望库存与当天的实际库存之差与调节时间之商,且令调节时间 $T=1$ 。假设超市门店的期望库存(即货架的空间可以通过统计分析获得) $CINV=20$ 件。通过这个调节率我们可以用来调整订货,避免订货过多造成

库存积压而减少库存费用的增加。

1.2.2 配送中心的订货决策

考虑到每次订货所发生的订货费用等因素,配送中心根据超市的订货量及其自身的库存每周向供应商订一次货,且订货提前期为,即配送中新定货后有天的延迟。配送中心在确定订货量时通常考虑以下两个因素:超市门店每周的需求预测量与库存调节率。超市门店的需求量可以从历史数据中获得,这里采用移动平均法进行预测,若移动平均的时间长度为 TAS ,则

$$TAVW = (R3_{t-1} + R3_{t-2} + \dots + R3_{t-TAS}) / TAS$$

库存调节率是指当期的实际库存与期望库存产生差异时进行调节的速度,即

$$WINVR = WINV/T1 = (WDINV - I1)/T1$$

通过这个调节率可以调整订货率,使配送中心有一个期望的安全库存。

于是,配送中心的订货量为

$$R1 = TAVW/TAS + WINVR$$

2 超市配送中心库存系统的基本仿真分析

在模拟时,首先要解决几个技术问题。

1) 超市门店的库存不能出现负值。也就是说超市每天能提供的最大销售量 $R4$ 不能超过其库存 $I2$ 与配送中心每天的发货量之和,即

$$R4 = \min(I2 + R3, DEMAND)$$

2) 超市对其向配送中心订货量的预测。如上所述,如果采用移动平均法进行预测,关键是确定 $CAVW$ 。在用 Vensim 模拟时,可用如下结构处理这一问题。如图 2 所示, $CAVW/CTAS$ 是超市利用移动平均法对其每天需求量的预测值,则超市订货量为

$$SO = CAVW/CTAS + SCINV$$

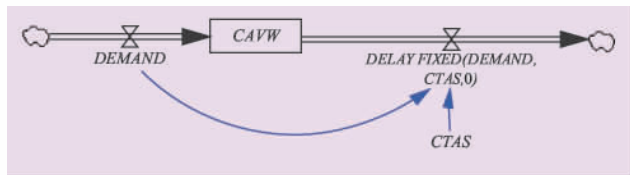


图 2 超市订货时对其销售量进行移动平均法预测流程图

Fig. 2 Flow chart of moving average forecast for supermarket sales

3) 配送中心向上级供应商的订货量。同超市门店对其订货量进行预测的方法一样,配送中心通过对超市过去一段时间(TAS)的订货量进行移动平均,从而预测出其向上级供应商订货的数量。由于是对超市每天的订货量进行移动平均,而配送中心每周一订货,因此配送中心的订货量(参见 4)

$$R1 = \text{脉冲函数}(0, 0, 7, TL) \times (7 \times TAVW/TAS + WINVR)$$

4) 对每周订货和每天订货进行调整。配送中心每周订货,超市每天订货,故仿真的时间单位应为天,因此仿真时要进行调整。这里用 Vensim 的脉冲函数 对此过程进行处理,即

$$R1 = \text{脉冲函数}(0, 0, 7, TL) \times (7 \times TAVW/TAS + WINVR)$$

其中, TL 为仿真的时间长度。

5) 配送中心库存不出现负值。配送中心每天的发货量应为其库存与超市订货量的最小值,即

$$R3 = \min(I1, SO)$$

另外,每单位产品的采购价格为 150 元;售价为 200 元;贷款利率为 6.0%;预付款比例为 30%,其余部分采用货到付款;库存费用为 1 元/(件·天)。先假设配送中心的期望安全库存是 400 件,配送中心发货量的移动平均预测的时间长度 $TAS=5$ 周, $T1=7$ 天, $LT=3$ 天,运行 365 步(1 年)后得到 $TOTAL PROFIT=1\ 230\ 790$ 元。根据上述决策规则和参数,并保持 $T1=7$,改变 TAS 和配送中心的期望安全库存 ($WDINV$) 的值时,用 Vensim 对 1 年($TL=365$)的运行情况进行仿真,则对比分析结果如表 2 所示。

表 2 $T1=7$ 时, TAS 和 $WDINV$ 值改变时供应链总利润 ($TOTAL PROFIT$) 变化情况 (单位: 元)
Table 2 Different $TOTAL PROFIT$ corresponding to different TAS and $WDINV$ (unit: RMB yuan)

$WDINV, TAS$	250	275	300	325	350	400	450
3	1 239 450	1 246 170	1 253 990	1 253 430	1 246 550	1 229 020	1 211 320
4	1 245 100	1 253 270	1 257 970	1 255 790	1 247 660	1 229 960	1 212 260
5	1 237 170	1 253 190	1 259 290	1 256 790	1 248 490	1 230 790	1 213 090
6	1 237 830	1 253 040	1 260 990	1 257 660	1 249 280	1 231 580	1 213 880
7	1 234 090	1 251 420	1 261 100	1 257 640	1 249 450	1 231 750	1 214 050

由此可见,当 TAS 和 $WDINV$ 同时改变时,总利润随之变化且无规律可循,一开始确定的 TAS 和 $WDINV$ 的值并不能保证全局最优,从而有必要对上述模型中的变量 TAS 和 $WDINV$ 进行优化,找出最优解。虽然传统上使用系统动力学进行模拟时,常常使用“试凑法”,即通过人为设计模拟方案的办法来从中选优,通过计算,比较多次模拟结果从而找出最优解。但从表 2 可以看出当只有 TAS 和 $WDINV$ 两个变量、且只仅仅取有限个值时,就需要计算几十次。而如果增加变量的维数,如 3 个、4 个或更多变量,且无法有效预测各变量变化范围时,人为设计模拟方案和选优的难度很大,并且很

难判断是否求得了最优的政策。因此对于优化复杂系统问题,“试凑法”不再是一个理想可行的方法。

3 超市配送中心库存系统中的控制策略优化模型

在该系统中,如果库存控制的策略框架不变,可以控制的因素有配送中心的期望安全库存 $WDINV$ 、超市门店需求量预测所用移动平均时间 TAS 。本研究将从 SD 政策优化的角度来寻求配送中心订货策略的相关参数,这也是本研究与传统的以系统模拟为目标的 SD 模型的主要区别。

系统动力学模型有“政策实验室”之称,可以通过模

型进行政策模拟与分析。所谓用模型进行政策分析是指在模型已经被认定能够反映现实系统的前提下,借助模型研究某个特定政策的作用结果是否能改善实际系统中待解决问题,以及何种政策参数的组合能使系统更有效地向预定的目标运行^[1]。

如何求得系统的最优政策形式及政策强度是 SD 分析中的一个重要问题。在 SD 模型中,政策是指对系统中的某个状态变量实施控制、进行决策时,从长期和全局来看所遵循的规律,它包括控制信息源的选择、控制策略函数的形式和调节强度三大部分^[2]。所谓控制信息源是指实施某种控制的依据;控制策略函数的形式是指控制策略函数的数学表达式的形式;调节的强度是指控制策略函数中的相关系数。

此问题中,控制信息源和控制策略函数的形式都已经确定,问题就是如何根据系统的目标,在给定的约束条件下来寻求 TAS 和 $WDINV$ 的最优组合。配送中心与超市系统的目标,在此定义为整个供应链系统的利润最大。而约束条件为系统必须遵循其状态转移规律和总资金占用不能超过企业的资金提供能力。即:

$$\begin{aligned} \max Z &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [R4P1 - (MR(DF_1(t) + \dots + DF_L(t)) \\ &\quad + I1(t)P0 + S(I1(t) + I2(t)))] \\ \text{s.t. } DF_1(t) &= R1(t-1) \\ DF_2(t) &= DF_1(t-1) \\ &\dots \\ DF_T(t) &= DF_{T-1}(t-1) \\ R2(t) &= DF_T(t-1) \\ I1(t) &= I1(t-1) + (R2(t) - R3(t)) \\ I2(t) &= I2(t-1) + (R3(t) - R4(t)) \\ (M(DF_1(t) + DF_2(t) + \dots + DFT(t)) + (1-M)I1(t))P0 &\leq CP, \forall t \\ I1(t) &\geq 0, I2(t) \geq 0, \forall t \end{aligned}$$

上式的目标函数是最大化整条供应链每天的利润,其中利润为超市营业额与成本之差。成本包括采购成本与库存成本。约束条件中的 $DF_i(t)$ 是指在延迟函数 (DELAY FIXED) 中第 T 天 (假设时间单位为天) 的在途订货量。如果 DELEY FIXED $\{\{in\}, \{dtime\}, \{init\}\}$ 中 $dtime=3$, 则 $DF_1(t)$ 是第 1 天的在途订货量, $DF_2(t)$ 是第 2 天在途订货量且等于第 1 天在途订货量, 第 3 天在途订货量等于第 2 天在途的订货量, 即每天的在途订货量是相等的。 $R2(t)$ 是配送中心每天收到的订货量, 从上式中可以看出, 每天收到的订货量等于前一天在途的订货量。此外, 约束条件中的式 (1) 表明配送中心订货时的产品总金额应小于其流动资金总量 (CP)。

满足上式的控制策略即为最优控制策略。其中, CP 为企业可用于该项采购的资金限度。上式中, SD 模型作为系统的状态转移规律是优化问题的约束条件, 要优化的参数 TAS 和 $WDINV$ 在订货策略 SO 的表达式中。

下面将探讨如何对要优化的参数 TAS 和 $WDINV$ 进行求解。

4 政策优化的遗传算法设计

遗传算法是由美国 Holland 教授于 1975 年提出的, 它是一种基于生物进化论和自然遗传学说的自适应、随机全局优化的并行算法, 有较强的鲁棒性, 并具有收敛到全局最优的能力, 对目标函数既不要求连续也不要求可微^[3]。它将每个可能的问题表示成个体, 从而得到一个由个体而组成的“群体”, 这些群体限制在特定的环境里, 根据预定的目标函数对每个个体进行评价, 给出一个适应度值。开始时, 总是随机地产生一些个体 (即候选解), 从初始种群出发, 采用基于适应度比例的选择策略在当前种群中选择个体, 进行交叉和变异产生下一代种群, 使适者有更多的机会进行生存; 由于继承了上一代的优良性状, 后代明显优于上一代个体。这样, “个体”的群体将逐渐朝着更优解的方向进化^[4]。

这里采用二进制编码, 取字长 $n=64$, 取群体容量 $m=150$, 采用基于目标函数取值排列顺序的等差序列放缩和联赛选择方式, 采用一致交叉, 取交叉系数 $(P)_c=0.80$ 和代沟系数 $G=0.64$ 。另外, 由于在群体中控制策略函数的形式不同, 交叉操作在同种控制策略函数形式的个体中进行。为了减少计算的浪费, 首先根据编码矩阵中的每位二进制等位基因的变异概率 (P_m) 确定群体中个体的变异概率, 然后再根据群体变异次数期望值相等的原则确定变异个体基因变异的概率^[5], 先取 $P_m=0.01$, 当群体中目标函数值从优到劣排序的前 30% 的平均变化率小于 1% 时, 将变异概率变为 $P_m=0.005$, 固定 $T1=7$, 并将 $WDINV$ 的取值范围设为 $[0, 500]$, 当 $TAS \leq 2$ 时, 结果波动很大, 因此把 TAS 的取值范围设为 $[3, 7]$ 。

5 结论

1) 利用遗传算法优化后的结果

模拟时, $M, P0, P1, R$ 的取值与用 Vensim 进行模拟时相同, 并假设 $CP=150\ 000$ 。利用遗传算法进行优化得到 $TAS=7$, $WDINV=305$ 。把此结果代入 Vensim 进行模拟, 得到 $TOTAL\ PROFIT=1\ 261\ 440$ 元。因此利用遗传算法对参数进行优化后 1 年的总利润较优化前增加 30 650 元。

2) 优化结果分析

当该单位库存成本为 S 时, 用上述遗传算法求解得到最优的期望库存 $WDINV$ 和 $DAILY\ PROFIT$, 计算结果表明供应链的最优收益会随之有很大的波动。当 $S=2$ 时, 通过优化确定, 当 $TAS=7$, $WDINV=295$ 时, 最优的 $TOTAL\ PROFIT=1\ 148\ 960$ 元。当把 S 增加到 3 时, 最优的 $TOTAL\ PROFIT$ 为 1 038 480 元。此时 $TAS=7$, $WDINV=288$ 。由此可见单位库存成本的高低会显著影

响供应链的收益,因此从上述优化结果来看,当库存单位成本增加时,应努力降低库存水平,保证供应链年度总收益达到最优。计算结果还表明,当资金使用成本率较低时,期望库存水平的变化对目标函数的影响不明显,此时充分利用可利用资金、保证不缺货的策略为最优。

此外,研究结果还表明,参数存在范围的初始设定对寻优过程的收敛性和最优解的影响较大。在采用线性策略时,由于各参数的物理意义比较明确,其存在区间能够较准确地确定,寻优过程简单而迅捷。

参考文献 (References)

- [1] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
WANG Qifan. Advanced system dynamics [M]. Beijing: Tshinghua University Press, 1995.
- [2] 王其藩, 李 旭. 从系统动力学观点看社会经济系统的政策作用机制与行为优化[J]. 科技导报, 2004, (5): 34-36.
WANG Qifan, LI Xu. Policy mechanism and policy optimization in a social economic system from the viewpoint

of system dynamics [J]. Science & Technology Review, 2004, 5: 34-36.

- [3] 程 进, 王华伟, 何祖玉. 基于遗传算法的系统动力学仿真模型研究[J]. 系统工程, 2002, 20(3): 77-80.
CHENG Jin, WANG Huawei, HE Zuyu. Research on system dynamics models based -on genetic algorithm [J]. Systems Engeneering, 2002, 20(3): 77-80.
- [4] 李敏强, 寇纪淦, 林 丹. 遗传算法的基本理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LI Minqiang, KOU Jisong, LIN Dan. Basic theory and application of genetic algorithms[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] 林文浩. 系统动力学模型关键参数的遗传算法估计 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(3): 404-407.
LIN Wenhao. The application of genetic algorithms in estimation of important parameters in system dynamics model [J]. Journal of Fujian Agricultural and Forestry University (Natural Science ed), 2002, 31(3): 404-407.

(责任编辑 王士泉)

·科技智力游戏·

如果将本栏目正确答案寄至本刊编辑部, 您将有机会获得自下期至 2008 年底的《科技导报》一套。

轻松一刻——填空补白

纵:

1. 北宋苏轼《食荔枝二首·之二》的一句诗, 下句是“不辞长作岭南人”。
2. 战国时代屈原的代表作, 是中国古代文学史上最长的一首浪漫主义政治抒情诗。
3. 4 字成语, 原意为针尖对针尖, 比喻双方策略、论点及行动等尖锐对立。出自宋·释道原《景德传灯录》。
4. 《隋唐演义》里瓦岗寨的军师, 历史上的唐初名将, 原名徐世绩, 后赐姓李, 遂以李绩之名闻名于世, 封英国公。
5. 自然界中的某种粒子, 它是传递夸克之间强相互作用(强力)的粒子, 由诺贝尔奖物理学奖获得者丁肇中领导的实验小组发现。
6. 朝鲜地名, 位于五圣山附近, 在以此地命名的战役中诞生了特级战斗英雄黄继光、一级战斗英雄邱少云、孙占元等。
7. 刊物名称, 创刊于 1980 年 5 月, 由中宣部根据新时期加强基层思想政治工作的需要, 委托新华社主办的、面向广大基层读者的重要党刊。
8. 中国某海域地名统称, 它是中国南海诸岛四大群岛中位置最南、岛礁最多、散布最广的群岛。主要岛屿有太平岛、南威岛、中业岛、郑和群礁、万安滩等。

横:

- 一、4 字成语, 形容地位、名声、价值等迅速往上升, 出自《庄子·逍遥游》。
- 二、4 字成语, 词义为枝叶繁密茂盛, 常用来比喻后代儿孙很多, 出自明·孙柚《琴心记》。
- 三、中国南方五岭之南的地区的统称, 地域涵盖广东、广西全境, 以及湖南、江西等省的部分地区。
- 四、事业分类的一种, 包括直接或间接地为经济活动、社会活动和居民生活服务的部门、企业及其设施。
- 五、我国繁荣文化事业基本方针的简称, 该方针倡导在文艺创作上允许不同的风格、流派、题材、手法的作品同时存在, 自由发展; 在学术理论上提倡不同学派、观点互相争鸣, 自由讨论。
- 六、我国某一地域名称, 该地域又称山东半岛, 位于山东省东部, 伸入渤海、黄海间。
- 七、4 字熟语, 古代礼仪中对婚后女性的基本要求, 指能够辅助丈夫和养育孩子。
- 八、化学名词, 指原子或原子团由于得失电子而形成带电微粒并成对存在的状态。

(供稿 李建才 责任编辑 赵佳)

	1								
					一			6	
				4					
	二							三	8
				四					
五			3						
						六 5		7	
			七						
	八 2								

上期答案

		李	代	桃	僵				
任	弼	时					七		贗
		珍	惜	生	命	拒	绝	毒	品
					的				理
		杨	利	伟			路	学	长
	杜			大					
	十	年	生	死	两	茫	茫		
红	娘			的					
旗				光	学	学	会		
渠		杨	子	荣					