

从系统动力学观点看社会经济系统的政策作用机制与优化

王其藩 李 旭

(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 的政策优化问题还是沿用“试凑法”,一直没能得到很好的解决。本文从系统动力学原理出发,探讨社会经济系统的政策作用机制与行为优化的原理和方法;在分析社会经济系统结构及其描述的基础上,提出了控制策略函数的概念,形成对社会经济系统控制和优化的一般描述,进而提出 SD 政策优化问题的遗传算法解决方案。这一方案就社会经济复杂系统而言,是一个非常实际和重要的方法。

〔关键词〕 系统动力学 政策分析 系统优化 遗传算法

〔中图分类号〕 C93 C94

一、系统动力学(SD)研究方法的适用范围和特征

社会经济生态系统是一类高阶次、多重反馈回路、高度非线性的复杂大系统,它具有很强的反直观性、对系统内多数参数的变化不敏感性、对政策改变的顽强抵御性,以及远期与近期、整体与局部之间的利益矛盾往往难于调和、向低效益转化倾向等特性。因此,认识和解决这一类系统的问题是难度很大的课题,而如何优化其结构与行为又是更深层次的问题^[7]。因为认识系统的行为规律,是一种面向现实的分析,是对系统实施控制与优化的基础;而优化则是对系统进行再设计,是对现实系统进行改进与完善。

从研究社会、经济、生态和环境等复杂系统和解决实际问题来看,系统动力学的理论和方法是比较成熟的。SD 是一门分析研究非线性信息反馈系统,认识和解决复杂大系统问题的交叉、综合性的学科。SD 方法是一种系统、分析、综合与推理的研究方法;是定性分析与定量分析相统一,并以定性分析为先导、定量分析为支持,两者相辅相成、螺旋上升、逐步深化和解决问题的方法。SD 模型可视为实际系统的“实验室”,特别适合于解决社会、经济、生态等一类非线性复杂大系统的问题。一般来说,政策可以影响系统的参数与结构,所以在进行政策分析时不仅要考虑系统中某些参数的变化,还要研究系统结构的变化;并且,结构变化所导致的结果要远远大于参数变化的影响^[6]。如何对系统施加政策、实现系统结构与行为的优化,是人们一直关注的问题。人们总是希望调控政策是最优的,希望所关注的系统的结构与功能在最佳状态和效益下运行,因此,对系统的结构与行为优化就成为必然。

SD 的优化是政策优化,即最优控制问题。这种

优化在本质上大大不同于人们已熟悉的线性模型,常规的最优化技术对它已无能为力。关于 SD 优化的手段与方法,常用的是“试凑法”,即事先设计政策方案,然后通过模拟在所设计的方案中选优。我们知道,政策可以影响系统的参数与结构,所以在进行政策分析时不仅要考虑系统中某些参数的变化,还要研究系统结构的变化;而“试凑法”一般是对系统的参数而言,主要依靠建模与分析人员的经验和技巧,很难达到数学意义上的优化或满意。

为了克服“试凑法”的缺点,同时也能实现 SD 的结构优化,有人将遗传算法 (Genetic Algorithms, GA) 用于 SD 模型的优化问题,并在参数估计方面进行了尝试。林文浩认为,GA 自适应寻优的智能特征和并行搜索的高速性,可克服“试凑法”的盲目性,保证参数估计的效率和质量^[5]。胡玉奎和程进等人还分析了 GA 用于 SD 结构和边界优化的理论可能性等^{[3][4]}。然而,关于将 GA 用于 SD 优化方面的研究还只是刚刚提出,具体工作不够深入,很多问题需要进一步探讨。将 GA 与 SD 相结合,不只是简单的应用,其中有很多 SD 自身的问题必须首先解决。对于 GA 来讲,如何根据具体问题进行编码更是一个重要而又具体的问题。本文从系统动力学原理出发,形成对社会经济系统控制和优化的一般描述,进而提出将 GA 应用于 SD 政策优化的一般解决方案。

二、从 SD 基本原理看复杂系统的结构与优化、控制和决策

系统动力学认为:回路是组成系统的基本结构单元,通过整理分析,社会经济系统的结构可以抽象成“回路”、“积累”、“信息”、“决策”、“延迟”和“控制策略”,这些因素之间的运动规律类似于流体在回路中流动所呈现的规律。流体在“回路”中流动必然要产生“积累”现象,堆积的物质就要产生压力。

这种压力通过“信息”的传递作用于决策者,迫使决策者利用收到的信息,根据“控制策略”做出必要的“决策”去改变流速,从而改变积累的物质。由于物质和信息在传递过程中需要时间,于是产生了“延迟”现象,而正是因为延迟现象的存在使得系统状态产生波动,增加了系统控制的难度^[2]。

SD 的基本理论观点认为,一阶反馈回路是系统的基本结构,无论多么复杂的系统都是一阶反馈回路的有机组合^[6]。例如,对于一个零售商业企业的库存与订货系统,其基本结构可以用包括“订货量”、“库存量”和“销售量”3个基本变量组成的基本一阶反馈回路描述。其中,“订货量”和“销售量”为速率变量,“库存量”为状态变量。显然,“销售量”是依市场因素而变化的不可控变量,“订货量”则是决策者可以控制的变量。如何根据销售情况和库存状态来组织订货,是该系统的决策与优化问题。对这一问题可以有以下几种考虑。

(1) 设定一个期望的库存量,每次订货都是补充实际库存与期望库存的差额部分。这时,系统的优化问题就是如何确定期望库存量和调解时间,优化的对象是模型中的参数。在复杂系统中可能同时有多个参数需要同时优化,但无论参数如何增加都只是增加寻优的工作量,而不会引起系统结构的变化。我们把这类问题称为参数优化。

(2) 众所周知,订货与库存变化之间由于生产和运输等原因存在着延迟,这会使系统的行为大大复杂化,在进行订货决策时不考虑进货延迟,是不合理也是不科学的。这个延迟问题在 SD 模型中可以通过引进“合同订货量”来描述。引进“合同订货量”后,在前述的基本一阶回路中,在订货量与库存量之间串入一个由“合同订货量”和“发货量”组成的又一个一阶回路。“合同订货量”是一个状态变量,“发货量”则为速率变量。系统中的状态变量增加,订货决策所依据的信息源也可能增加。这时,系统优化首先是对决策所依据的信息源进行选择,然后才是确定参数问题。而取舍订货所依据的信息源已经涉及到了系统结构的变化。复杂系统中常常包括多个状态变量,如何从中选择决策所依据的信息源以及如何根据所选定的信息源来决策,是系统动力学模型中重要而又困难的寻优问题。我们称这类问题为结构优化。

(3) 上述问题中只是考虑了一个零售企业的情况,如果扩大所研究系统的范围,即研究从生产到销售的全部过程,就会引出另外一种优化问题,即生产企业为了销售其某种产品,在某个区域内最好设置多少个销售点的问题。对于这类问题,应该根据企业的生产能力、生产成本、市场总需求、每个销售点的销售能力、销售点设置和销售成本,以及销售点的销售量受网点数增加的影响情况等,确定最

佳的生产与销售规模。如果我们把这一过程用 SD 描述,每个销售点在系统中都表现为一个基本结构单元。批发网点与零售网点之间的关系是串联关系,而同类网点之间的关系则为并联关系,其整体构成一个复杂的多重反馈结构。随着销售点的增加,系统中基本结构单元的数量也增加,于是导致系统边界的变化。究其实质,这是由于系统边界及边界条件发生变化时引起的对系统资源的竞争和再分配问题,而这种系统资源的竞争和分配同系统边界紧密相关,所以我们把这类优化问题称为边界优化问题。

以上分析了 SD 中系统结构的描述与优化问题,并将优化问题归类为参数优化、结构优化和边界优化问题。进而,我们可以根据这 3 类优化问题的特点来实现系统的控制和优化。

从系统动力学原理可知:系统动力学模型是以状态变量为中心,以速率变量为驱动的结构模型;系统的结构可以用反馈回路来描述,回路中的基本变量可概括为状态变量和速率变量两类;系统的状态只有通过速率量才能改变,而速率量的变化是系统外部政策通过系统内部机制作用的结果。因此,从系统动力学的观点出发,动态复杂系统的控制是通过政策来实现的,施加于系统的政策会通过系统内部的作用机制导致一系列的决策,每一个决策都使系统从某种状态转移到另一种状态。

由于决策一词在某些场合下已经被赋予了特定的意义,所以我们引用“控制策略”一词来描述社会经济系统的控制与决策。所谓控制策略,是指对系统中的某个状态变量实施控制、进行决策时,从全局和长期来看所遵循的规律。它包括控制信息源、控制策略函数的形式和调节强度 3 大部分。当系统中有 n 个状态变量时,根据系统动力学原理,控制所依据的信息源是这 n 个状态变量的不同数量组合,控制规律由控制策略函数的形式确定,某个信息源对决策的影响程度由控制策略函数中相应的系数决定。可见,控制策略函数具体地反映了系统外部政策与内部机制的作用关系,系统的优化也转化为构造和确定控制策略函数问题。

三、结合遗传算法实现系统优化

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。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,从某个随机的初始种群出发,采用某种选择策略在当前种群中选择个体,进行交叉和变异而产生下一代种群。采用的选择策略总是使适者有更多的机会生存,于是后代优于上一代,群体将逐渐朝着更优解的方向进化^[1]。

用 GA 优化的关键是对拟优化的问题进行编码,根据具体问题的不同,编码的方式也不同。本文从最基本的二进制编码原理出发,分析 SD 政策优化的 GA 解决方案。

参数优化是 SD 优化的基本问题和基础。对于该类问题,控制策略函数的形式和变量都已确定,只需要规划模型中的某些参数。根据 GA 算法原理可知,直接编码即可解决问题。

结构优化是 SD 政策优化的重点和难点,以前的研究很少涉及。这主要是由于复杂系统反馈结构的变化在时空两域中都是不连续的,无法用数学函数描述,亦无从进行求极值的优化运算。胡玉奎和程进等认为:利用 GA 构造出一些初始解,模型将不断适应环境的变化,按照“优胜劣汰,适者生存”的原则,老模型不断向新模型传递信息,新模型在生物进化过程中不断发育而成,实现组织结构的创发,即 SD 模型由简单的、低级的结构产生出高级的、复杂的网络结构,而这种结构使模型具有自适应、自进化的能力^{[3][4]}。控制策略函数的提出,明确了 SD 优化的具体内容是 SD 与 GA 的结合点,通过控制策略函数可以具体实现“老模型向新模型传递信息,新模型在进化过程中不断发育,实现组织结构创发的自适应、自进化过程”。社会经济系统不同于工程技术系统,系统的层次结构比较明显;系统的哪些状态是可观测的,以及观测这些状态的成本等均是可预知的,所以我们可事先确定一个控制信息源的初始集合,再通过 GA 寻优过程对初始集合进行选择。因为控制策略函数的形可以是任意的(线性或非线性等),所以从 GA 的特点出发,构造控制策略函数的一般做法是采用多项式的形式。可以通过调整多项式的项数,选择寻优过程的精度,通过规划多项式的系数实现对控制信息源的取舍和确定各个信息源的影响程度。

边界优化是 SD 优化的新领域。SD 的研究对象是具有自组织耗散结构性质的开放系统,系统内部组成部分之间相互作用形成一种动态结构,并在内外力的作用下按照一定规律发展演化;完全孤立和与外界绝对隔绝的系统是不存在的。程进等认为:传统的 SD 将研究对象与周围的环境割裂起来,基本忽略了外界环境对研究对象的影响;GA 能有效地确定 SD 模型的系统边界与周围环境的关系,采用 GA 可以构造特定的环境、对 SD 模型进行选优,使其研究对象与外界环境之间成为一个有机的整体,提高模型的适应性^[3]。根据 SD 原理可知,一阶反馈回路是系统的基本结构单元,复杂系统是简单的一阶反馈回路的有机组合,而组合的基本方式有“串联”和“并联”两种。根据所研究问题的具体情况,可以知道系统边界变化时基本回路的组合方式。这样,可以根据 GA 原理,先对基本回路的组合方式进行编码,然后再对组合后的特定问题进行结构优化。这一从整体上的循环过程,可使 SD 边界优化问题得到解决。

参考文献

- [1]Herbert Dawid, Adaptive learning by genetic algorithms—analytical results and applications to economical models, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [2]Jay W Forrester, Principles of systems: text and workbook chapters 1 through 10, 2d preliminary ed., Wright-Allen Press, 238 main street, Cambridge, Massachusetts, 02142, U.S.A, 1968
- [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
- [4]胡玉奎,韩于羹,曹铮韵.系统动力学模型的进化[J].系统工程理论与实践,1997,(10):132-136
- [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
- [6]王其藩.高级系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1995
- [7]王其藩.复杂大系统综合动态分析与模型体系[J].管理科学学报.1999,2,(2):15-19,27

(责任编辑 王宏章)

封面说明

我国“枭龙 03”战机首飞成功

2004 年 4 月 9 日,由中国航空工业第一集团公司所属单位研制的新型多用途轻型战斗机——“枭龙 03”在成都首飞成功。“枭龙 03”战机是针对 21 世纪作战环境,由中国和巴基斯坦按照“共同投资、共同开发、共担风险、共享利益”的原则开发研制的先进的多用途轻型战斗机。该飞机机身长约 15 米、高约 5 米,为单座、单发轻型战斗机,装有 1 台推力大、耗油省的高推重比涡扇发动机,采用两侧肋下进气,机头可容纳大口径雷达天线。全机共有 7 个外挂点,可悬挂多种空空、空地武器,并可外挂 3 个

副油箱,总外挂能力 3 600 千克,正常起飞重量为 9 100 千克,最大航程为 3 500 千米,作战半径大于 1 200 千米,已经达到第三代战斗机的综合作战效能,具备与当今先进战斗机抗衡的能力。“枭龙”系列飞机的研制构想始于 20 世纪 80 年代后期,1999 年全面展开研制。从冻结技术状态到“枭龙 01”战机首飞成功,仅用了 23 个月的时间;从“枭龙 01”首飞成功到“枭龙 03”首飞成功,仅用了 8 个月的时间,在研制周期方面创造了中国航空工业发展史上的两个奇迹。