

文章编号: 1006-5911(2008)01-0118-06

基于自适应遗传算法的虚拟企业伙伴选择求解

韩江洪, 王梅芳, 马学森, 王跃飞

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对虚拟企业伙伴的选择问题, 根据虚拟企业的市场目标, 采用层次分析法确定评价因子的权重, 然后建立多目标的虚拟企业伙伴选择优化模型。为简化模型, 以最短的完工时间、最低的成本和最高的信誉度为目标。在遗传过程中对各个单目标进行排序选择, 通过对交叉、变异算子进行自适应改进, 采用最优保存策略迭代求出最佳合作伙伴及分配的具体工作量。通过与普通遗传算法的对比, 仿真算例验证了改进后的算法的优越性。

关键词: 虚拟企业; 伙伴选择; 层次分析法; 自适应遗传算法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Partner selection solving based on a self-adaptive genetic algorithm for virtual enterprise

HAN Jiang-hong, WANG Mei-fang, MA Xue-sen, WANG Yue-fei

(School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To solve the partner selection problem in virtual enterprises, the weights of evaluation factors were defined based on the market objective by Analytic Hierarchy Process (AHP). And a multi-objective optimization model was proposed and accomplished by a self-adaptive Genetic Algorithm (GA). The objectives of GA were to achieve shortest completion time, lowest costs and best credit so as to simplify the model. This algorithm sorted and selected several single object fitness using quick-sorting algorithm based on total fitness, crossovers and mutates by using the self-adaptive probability, and found the global optimal solution by elitist strategy. Compared to standard GA, superiority of the improved GA was revealed by simulation example.

Key words: virtual enterprise; partner selection; analytic hierarchy process; self-adaptive genetic algorithm

0 引言

虚拟企业是由多个资源互补的企业为增强竞争优势而组成的动态联盟。由于合作目标的临时性和合作伙伴的独立性, 伙伴选择问题成为虚拟企业组建过程中一项直接关系到虚拟企业运行成败的关键工作。

针对这一问题, 国内外很多学者已经做了大量

工作, 但基本上只侧重于定性或定量分析某一方面。文献[1]提出了选择合作伙伴的一个面向成本的混集成模型, 将成本表示为目标函数, 但这个模型没有考虑定性准则; 文献[2]以一个多准则决策问题表述选择过程, 但用于目标规划优化方法的线性数学方程不能适当地表示虚拟企业伙伴选择问题的专有特征。

为兼顾定性和定量分析, 本文提出了一种虚拟

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-06-04。Received 26 Mar. 2007; accepted 04 June 2007.

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20050359004); 安徽省自然科学基金资助项目(070416250)。**Foundation item:** Project supported by the Research Fund for Doctoral Program of High Education, China(No. 20050359004), and the Natural Science Foundation of Anhui Province, China(No. 070416250).

作者简介: 韩江洪(1954-), 男, 江苏南京人, 合肥工业大学计算机与信息学院教授, 博士生导师, 主要从事计算机控制、网络通信技术的研究。

E-mail: hanjh@hfut.edu.cn.

企业伙伴选择的新机制。首先针对该虚拟企业特定的市场目标, 采用层次分析 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 法确定各个评价因子的影响权重。然后搜集候选企业的相关数据, 设计自适应的遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 进行定量求解, 得出最终选择方案和分配任务。

1 层次分析法确定各评价指标的权重

虚拟企业伙伴选择的评价必须建立一套科学、完整的综合评价指标体系。在选择合作伙伴时, 应根据具体的市场机遇对评价指标进行分类, 并确定其权重。评价指标主要有时间 T 、成本 F 、信誉度 C 等。

针对特定的市场目标, 采用 AHP 得出各主要评价指标的权重。具体步骤如下:

步骤 1 建立虚拟企业伙伴选择的简化的层次结构, 这里只确定两层: 最高层表示整体目标; 第二层表示 N 个准则, 如时间、成本、信誉度、质量等。

步骤 2 构造判断矩阵。由专家或盟主根据整体项目的性质进行评价, 得到各目标准则两两之间的相对重要程度比值。一般使用常用的九分位表给出, 如表 1 所示。

表 1 重要程度赋值

两指标 e_i 与 e_j 比较	同样重要	稍微重要些	明显重要些	强烈重要些	极端重要些	介于相邻值之间的重要性
标度 a_{ij} 取值	1	3	5	7	9	2, 4, 6, 8

步骤 3 求解判断矩阵 R 的最大特征 λ_{\max} 值对应的特征向量。

步骤 4 对特征向量进行标准化, 使特征向量的和为 1, 然后将标准化后的特征向量近似地作为相对应的各目标准则的权重。例如针对某一市场目标的自身性质, 专家或盟主对时间、成本、信誉度两两进行相对重要程度的比较, 得到判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \text{时间} & \text{成本} & \text{信誉度} \\ 1 & 4 & 6 \\ 1/4 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \text{求得权重 } w =$$

{0.685, 0.221, 0.094}。

2 建立虚拟企业伙伴选择多目标模型

假设针对市场目标, 已经采用 AHP 确定了评价体系的 M 个指标 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m\}$ 及权重

向量 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_m\}$ 。现盟主将开发项目分解成 N 个相对独立且有时序依赖关系的任务, 每个任务分别招标选择一个或多个合作伙伴。为描述简便, 这里只考虑三个重要的评价指标: 时间 T 、成本 F 和信誉度 C 。下面针对这三个目标建立实际的多目标模型。

任务集合 $Task = \{T_0, T_1, \dots, T_n, T_{n+1}\}$ (T_0 和 T_{n+1} 是虚任务), 工作量 $Quantity = \{0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, 0\}$ 。

$Task_Seq = \{(T_i, T_j) | i, j \in [0, n+1], i \neq j, T_i, T_j \in Task\}$ 表示任务之间的时序关系, T_j 是 T_i 的直接后续任务。

所有候选企业为二维矩阵 $Enterprise = \{E_{ij} | i \in [1, n], j \in [1, m]\}$ 。其中: n 为任务数, $m_i = \max\{j | E_{ij} \neq 0\}$ 是 T_i 这个任务的候选企业个数, $m = \max\{m_i | i \in [1, n]\}$ 表示所有任务中候选企业最多的那个任务对应的候选企业个数。 $E_{ij} \neq 0$ 表示该候选企业有效, T_i 可以从中选择一个或多个候选企业。

每个候选企业的信息 $Ent_Info = \{(start_fee_i, per_fee_i, per_qua_i, credit_i)\}, i \in [1, Num], j \in [1, Param]$, $Num = \sum_{i=1}^n m_i$ 为整个项目候选企业总数, $Param$ 表示评价参数的个数, 这里只考虑启动费用、单位工作量的费用、单位时间的工作量和信誉度四项。

定义 1

$$Selected_{ij} = \begin{cases} 0 & T_i \text{ 没有选中它的第 } j \text{ 个候选企业} \\ 1 & T_i \text{ 选中它的第 } j \text{ 个候选企业} \end{cases}。$$

各个单目标函数如式 (1) ~ 式 (3) 所示:

$$\min(Time) = s_{n+1}。 \tag{1}$$

$$\min(Fee) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (start_fee_i + q_{ij} \times per_fee_i) \times selected_{ij}。 \tag{2}$$

$$\max(Credit) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{selected_{ij} \times c_{ij}}{m}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m selected_{ij}}。 \tag{3}$$

式 (3) 转化为最小化问题, 即:

$$\min(Credit) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{selected_{ij} \times c_{ij}}{m}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m selected_{ij}}。 \tag{4}$$

式中: s_{n+1} 表示最后一个任务 T_{n+1} 完成时刻, 即整个项目最终完成时刻, 计算过程见式(5)~式(7); q_{ij} 表示盟主给每个候选企业 E_{ij} 分配的工作量; l_{ij} 表示候选企业 E_{ij} 完成分配给它的工作量 q_{ij} 所需的时间; t_i 表示第 i 个任务 T_i 全部完成所需的时间; s_i 表示第 i 个任务 T_i 开始执行的时刻, 它依赖于任务间的时序关系, 根据 $Task_Seq$ 中确定的有向无环图来计算。

$$s_0 = 0, t_0 = 0, t_{n+1} = 0, l_{ij} = q_{ij} / per_qua_{ij}; \quad (5)$$

$$t_i = \max\{l_{ij} \mid j \in [1, m]\}, i = 1, \dots, n; \quad (6)$$

$$s_i = \max\{s_j + t_i \mid (T_j, T_i) \in Task_Seq\}, \\ i = 1, \dots, n+1. \quad (7)$$

最终将多目标问题转化为单目标问题, 模型见式(8)。本文采用 AHP 根据项目的性质确定 w_i 。

$$\min(Total) = w_1 \times \min(Time) + \\ w_2 \times \min(Fee) + w_3 \times (1 - \max(Credit)); \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \quad q_{ij} \geq 0, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^m q_{ij} = Q_i, i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

$$selected_{ij} = \begin{cases} 0 & q_{ij} = 0 \\ 1 & q_{ij} > 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} selected_{ij} = 0 \\ q_{ij} = 0 \end{cases}, m_i < j < m. \quad (12)$$

3 遗传算法的优化和问题求解

3.1 编码策略

根据模型(8)要求, 每个虚拟企业的编码至少需要包含两部分信息:

$$I = \begin{pmatrix} s \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & \dots & s_{1m} & \dots & s_{n1} & \dots & s_{nm} \\ q_{11} & \dots & q_{1m} & \dots & q_{n1} & \dots & q_{nm} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

式中: s 为所有候选企业的选择向量, 采用整数 0~1 编码, $s_{ij} = 1$ 或 0, 表示每个候选企业是否选中; q 为所有候选企业分配的任务量向量, 采用实数编码, q_{ij} 为 E_{ij} 被分配的工作量。

3.2 目标函数转化和选择

设群体的规模为 $popsiz$ e。根据式(1)、式(2)和式(4)分别计算同一代中个体的单个目标值 $\min(Time)$, $\min(Fee)$, $\min(Credit)$ 。按照从小到大的顺序分别对每个目标值进行快速排序, 得到该个体对应的三个名次 $Time_Place$, Fee_Place , $Credit_Place$ 。该个体的综合适应值记为

$$Total_Fitness = w_1 \times Time_Place + w_2 \times Fee_Place + w_3 \times Credit_Place. \quad (14)$$

再根据 $Total_Fitness$ 对每个个体从小到大进行快速排序, 得到最终的名次 $Total_Place$ 。按照线性排序法^[3]指定排在第 k 位的个体的选择概率 P_k (见式(15)), q_{\max} , q_{\min} 分别表示最好和最差染色体的选择概率。确定每个个体的选择概率后, 按照轮盘赌算法进行选择。

$$P_k = q_{\max} - (k-1) \times (q_{\max} - q_{\min}) / (popsiz - 1). \quad (15)$$

3.3 自适应的交叉和变异

传统 GA 易出现早熟或后期收敛缓慢等缺点。这里设计了自适应的交叉和变异概率, 将适应值和代数影响体现到交叉和变异操作中。

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c_{\max}} - (P_{c_{\max}} - P_{c_{\min}})(k - midst)}{popsiz - midst} \times \delta(g) & k \geq midst \\ P_{c_{\max}} \times \delta(g) & k < midst \end{cases}. \quad (16)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{m_{\max}} - (P_{m_{\max}} - P_{m_{\min}})(popsiz - k')}{popsiz - midst} \times \delta(g) & k \geq midst \\ P_{m_{\max}} \times \delta(g) & k < midst \end{cases}. \quad (17)$$

$$\text{式中: } \delta(g) = 1 - g / (r \times Gen)^{[4]}; \quad (18)$$

$midst = \lfloor popsiz / 2 \rfloor$; g 为当代的编号; Gen 为最大代数; r 为因子, 暂定为 1.1; $P_{c_{\max}}$ 和 $P_{c_{\min}}$ 表示最大和最小的交叉概率, $P_{m_{\max}}$ 和 $P_{m_{\min}}$ 表示最大和最小的变异概率。由于个体的适应值由排序决定, 这里用每个个体的最终排名位置 $Total_Place$ 来取代真正的适应值。 k 表示交叉个体的排名位置, k' 表示变异个体的排名位置; $midst$ 表示该代该群体的最中间位置; $popsiz$ 为该群体的末尾位置。

交叉操作采用双点交叉。对每个个体生成随机数 $r \in [0, 1]$, 如果 $r < P_c$ (按式(16)和式(18)), 则选中该个体; 再产生随机数 $line_1, line_2 \in [1, n]$, $row_1, row_2 \in [1, m]$ 。交换两个个体染色体位于随机数之间的值, 然后按式(9)~式(12)修改两端的值, 实例如图 1 所示。

变异操作采用单点变异。生成 $popsiz \times n \times m$ 次随机数 $r \in [0, 1]$, 如果对应的候选企业有效, 且随机数 $r < P_m$ (按式(17)和式(18)计算), 则该基因变异。最后按式(9)~式(12)修改两端的值, 过程类似于交叉操作。算法流程图如图 2 所示。

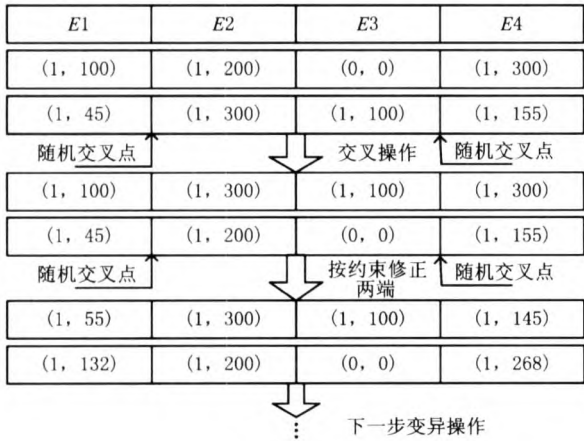


图1 交叉过程图

4 仿真算例

为验证算法设计的有效性, 在 VC6.0 上对算法进行了实现。通过大量数据测试与普通 GA 进行对比实验, 给出其中一个算例。假设某专业摄像头公司发现市场需求, 决定开发一套基于 Internet 监控系统车载定位器, 并装车产品化投入使用。产品由 Web 网上监控系统、硬件设备、GSM 网传输信息等部分组成。该企业的核心能力是专业摄像头及其驱动程序, 而其余功能模块需要寻求伙伴完成。时序关系如图 3 所示, 各功能模块可根据情况再细分。任务的总工作量(行业平均工作小时) $Quantity = \{160, 250, 500, 200, 800, 600, 100, 500\}$ 。各实际任务的候选企业个数分别为 $\{5, 4, 6, 6, 6, 3, 3, 2\}$ 。每个候选企业的各种参数如表 2 所示。设各评价因子的权重已由 AHP 求出, $w_1 = 0.685$, $w_2 = 0.221$, $w_3 = 0.094$ 。种群规模 $popsize = 100$, 最大迭代次数 $Gen = 1000$ 。线性排

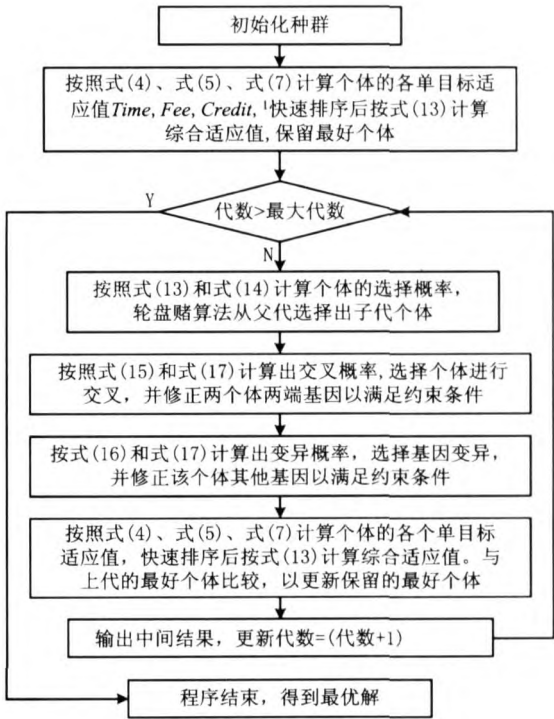


图2 算法流程图

序时 $q_{\max} = 1$, $q_{\min} = 0$ 。 $P_{c_{\max}} = 0.8$, $P_{c_{\min}} = 0.3$, $P_{m_{\max}} = 0.05$, $P_{m_{\min}} = 0.005$ 。

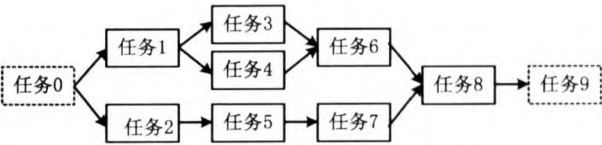


图3 任务的时序图

按图 2 描述的算法实现, 运行到 365 代时得到最好解。如表 3 所示(总运行时间为 1.8 min)。

表 2 候选企业的参数表($start_fee$, per_fee , per_qua , $credit$)

任务	候选企业					
	候选企业 1	候选企业 2	候选企业 3	候选企业 4	候选企业 5	候选企业 6
任务 1	0.5, 0.03, 10, 0.94	1, 0.029, 9, 0.88	1.2, 0.025, 7.5, 0.8	1.5, 0.024, 10, 0.84	0.9, 0.0275, 8, 0.88	/
任务 2	1, 0.04, 11, 0.87	2, 0.03, 9, 0.90	1.6, 0.037, 7, 0.89	1.8, 0.031, 8, 0.92	/	/
任务 3	4, 0.05, 10, 0.88	3, 0.048, 11, 0.93	5, 0.042, 8.5, 0.9	3.5, 0.046, 9, 0.86	4.5, 0.045, 2.9, 0.89	6, 0.043, 12, 0.91
任务 4	5, 0.26, 10, 0.97	4.5, 0.28, 9, 0.94	6, 0.25, 7.6, 0.93	4, 0.27, 9, 0.96	7, 0.259, 9.4, 0.85	5.25, 0.278, 5.7, 0.89
任务 5	6, 0.08, 9.6, 0.92	7, 0.08, 9, 0.89	6.5, 0.076, 8.5, 0.91	8, 0.092, 10, 0.95	7.6, 0.115, 11, 0.83	5, 0.112, 8.2, 0.87
任务 6	0.45, 0.024, 8.5, 0.92	0.6, 0.023, 7, 0.83	0.5, 0.024, 5, 11, 0.93	/	/	/
任务 7	0.3, 0.004, 8.2, 0.98	0.4, 0.004, 9, 0.92	0.5, 0.003, 6, 10, 0.96	/	/	/
任务 8	4.8, 0.05, 10, 0.93	5, 0.048, 8.3, 0.91	/	/	/	/

表 3 最优解的基因

分配工作量	企业 1	企业 2	企业 3	企业 4	企业 5	企业 6	每个任务的结束时刻 /d
任务 1	13	0	5	45	102	/	12.750 0
任务 2	30	183	17	20	/	/	20.333 3
任务 3	195	0	0	0	0	305	38.166 7
任务 4	0	0	0	100	0	100	26.083 3
任务 5	396	404	0	0	0	0	65.222 2
任务 6	244	48	308	/	/	/	66.872 5
任务 7	0	0	100	/	/	/	75.222 2
任务 8	262	238	/	/	/	/	103.897 0
总结果	时间: 103.897 d		费用: 254.354 万元		信誉度: 0.903 18		

每一代中最优个体的各单个目标值随代数的变化如图 4~ 图 6 所示。

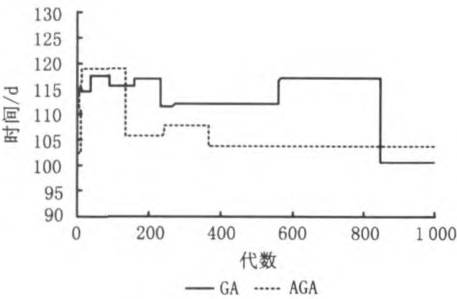


图4 min(Time)的变化

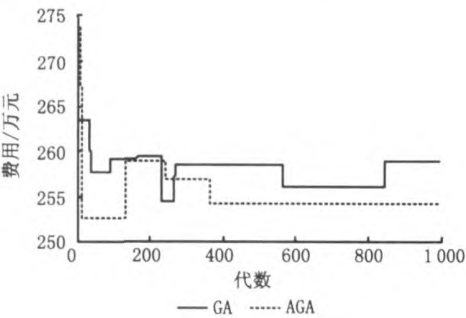


图5 min(Fee)的变化

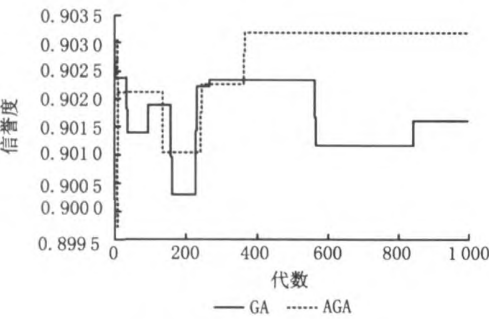


图6 max(Credit)的变化

通过自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, AGA)和传统 GA 的比较, 可以看到, 采用自适应算法改进后, 得到最优解的代数明显提前(由之前的 844 代提前到 365 代), 最优解在多个不同优先级的目标中取得更好的折中和平衡。试验结果表明, 本文设计的自适应遗传算法在收敛速度和解的有效性上都优于一般的遗传算法。

5 结束语

针对伙伴选择这一关键问题, 本文建立了伙伴选择的多目标非线性规划模型, 设计了自适应交叉和变异概率, 使群体中个体对环境的变化具有自适应调节能力, 从而保证更加有效地向最优解迭代。反复多次算例结果证明了该算法的有效性, 同时验证了自适应算子的设计对算法起到了很好的优化作用。

参考文献:

[1] KASILIN GAM R, LEE C. Selection of vendors—a mixed integer programming approach [J]. Computers and Industrial Engineering, 1996, 31(1): 347-350

[2] TALLURI S, BAKER R, SARKIS J. A framework for designing efficient value chain networks [J]. International Journal on Production Economics, 1999, 62(1/2): 133-144.

[3] MITSUO G, CHENG Runwei. Genetic algorithms and engineering design[M]. Beijing: Science Press, 2000: 19-21, 53-58 (in Chinese). [玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 19-21, 53-58.]

[4] DU Wei, HAN Zhengzhi. Float-point genetic algorithm with self-adaptive crossover operator[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1711-1713(in Chinese). [都伟, 韩正之. 一种自适应杂交算子的浮点遗传算法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1711-1713.]

- [5] FONSECA C, FLEMING P. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. San Francisco, Cal., USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1993: 416-423.
- [6] ZHENG Wenjun, ZHANG Xumei, LIU Fei, et al. Evaluation

architecture and optimization decision of partner choice in virtual enterprises [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2000, 6(5): 63-67 (in Chinese). [郑文军, 张旭梅, 刘飞, 等. 虚拟企业合作伙伴评价体系及优化决策 [J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(5): 63-67.]

(上接第 106 页)

4 结束语

本文在分析 IT 项目特点的基础上, 构建了基于模糊理论的 IT 项目组合决策模型。事实上, 本文提供的不仅是一个方法或工具, 重要的是一种思想和选择 IT 项目的流程, 即选择 IT 项目时需从整体的角度考虑企业的业务需要, 并权衡企业的长、短期目标及项目的收益、成本和风险, 而不是单独评估 IT 项目。其流程为: 确定企业成功的关键因素和 IT 战略 \rightarrow 判断项目目标对企业战略实现的贡献程度 \rightarrow 权衡组合的收益、成本和风险 \rightarrow 确定 IT 项目投资组合。由于每次进行项目组合分析时, 都会把在建项目及已完成项目与新项目放在一起考虑, 该流程亦包含了对项目建设的跟踪和对新老项目的整合。

参考文献:

- [1] JAMES J, JIANG G K. Project selection criteria by strategic orientation [J]. Information & Management, 1999, 36(2): 63-75.
- [2] MARK J. Best practices in IT portfolio management [J]. MIT Sloan Management Review, 2004, 45(3): 40-50
- [3] IT Governance Institute. Enterprise value: governance of IT investments [R]. Rolling Meadows, Ill., USA: IT Governance Institute, 2006.
- [4] YANG Min. IT project portfolio selection based on multi-criteria analysis [J]. Management Science in China, 2006, 19(2): 55-61 (in Chinese). [杨敏. 基于多因素分析的 IT 项目组合选择模型 [J]. 管理科学, 2006, 19(2): 55-61.]
- [5] VERHOEF C. Quantifying the value of IT-investments [J]. Science of Computer Programming, 2005, 56(3): 315-342.
- [6] SANTHANAM R, KYPARISIS J. A decision model for interdependent information system project selection [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 89(2): 380-399.
- [7] LU Xianghua. Information system project decision based on strategic alignment [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(10): 1668-1673 (in Chinese). [卢向华. 基于战略对应的信息系统项目决策研究 [J]. 计算机集成制造系统,

2006, 12(10): 1668-1673.]

- [8] YANG Qing, HUANG Lihua. Empirical study on strategic alignment of business plan and information system planning [J]. Chinese Management Science, 2003, 6(4): 43-55 (in Chinese). [杨青, 黄丽华. 企业规划与信息系统规划战略一致性实证研究 [J]. 管理科学学报, 2003, 6(4): 43-45.]
- [9] BENKO C, MCFARLAN F W. Connecting the dot: aligning projects with objectives in unpredictable times [M]. Boston, Mass., USA: Harvard Business School Press, 2003.
- [10] LAURINDO F J B, DE OLIVEIRA MORAES R. IT projects portfolio management: a Brazilian case study [J]. International Journal of Management and Decision Making, 2006, 7(6): 586-603.
- [11] ROCKART J F. Chief executives define their own data needs [J]. Harvard Business Review, 1979, 57(2): 81-92.
- [12] SATTY T L. Decision making with dependence and feedback: the analytic net process [M]. Pittsburgh, Pa., USA: RWS Publications, 1996.
- [13] MCFARLAN W E. Information technology changes the way you compete [J]. Harvard Business Review, 1984, 62(3): 98-103.
- [14] ZADEH L. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [15] TÜYSÜZ F, KAHRAMAN C. Project risk evaluation using a fuzzy analytic hierarchy process: an application to information technology projects [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2006, 21(6): 559-584.
- [16] ANANDA RAJAN M. Using an activity-based approach to determine the cost of client/server systems [M] // Measuring Information Technology Investment Payoff: Contemporary Approaches. Hershey, Pa., USA: Idea Group Publishing, 2002: 282-300.
- [17] INUIGUCHI M, RAMIK J. Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and comparison with stochastic programming in portfolio selection problem [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 111(1): 3-28.
- [18] DUBOIS D, PRADE H. Qualitative possibility theory and its applications to constraint satisfaction and decision under uncertainty [J]. International Journal of Intelligent Systems, 1999, 14(1): 45-61.