

企业云应用演进策略多时段分析

殷星 周剑雄 王明哲

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

摘要 随着云计算技术的发展,企业急需一种有效方法将原本孤立的应用系统向云平台迁移。将网络层次分析法(ANP)及其超级矩阵收敛过程应用于企业云应用演进计划制定,提出一个演进策略的多时段分析方法。通过对企业云应用体系结构的建模与仿真分析,构建ANP多属性决策模型,解析超级矩阵从初始状态到极限状态的收敛过程,挖掘各云应用系统的分时段关键性影响因素,为企业的整体演进策略提供支持。最后,通过一个案例展示多时段分析方法的具体过程,提取出相关关键因素,为企业策略的动态规划提供理论依据。

关键词 网络层次分析法,超级矩阵,云应用架构,演进策略,多时段分析

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

Multi-epoch Analysis to Evolution Strategy of Enterprise Cloud Computing Application

YIN Xing ZHOU Jian-xiong WANG Ming-zhe

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract With the development of cloud computing, many companies are in urgent need of an effective way to migrate the application systems from isolated state to cloud platform. By applying analytic network process (ANP) and the convergence process of supermatrix to formulate enterprise cloud computing application evolution, a multi-epoch analysis approach of evolution strategy was put forward. An ANP model of multi-attribute decision making is built by architecture modeling and simulating to the enterprise cloud computing application systems. And the multi-epoch crucial influence factors to each system are excavated by analyzing the convergence process of supermatrix from initial state to the limit. The factors are used to support the evolution of the enterprise's strategy. At last, a case was given to show the specific process of the method, and extract the corresponding key factors to provide a theoretical basis for dynamic programming of enterprise's strategy.

Keywords Analytic network process, Supermatrix, Cloud computing application architecture, Evolution strategy, Multi-epoch analysis

1 引言

云计算的三层(IaaS, PaaS, SaaS)服务模式以其松耦合、绿色、灵活、高效等特点受到人们青睐。如何制定企业云计算应用演进规划则成为企业体系建设首要研究的问题。

制定企业云计算应用演进策略通常应具备4个基本原则:一是整体性,二是长期性,三是关键性——掌控二成因素获得八成的结果,四是谋略性。本文着重从关键性和谋略性出发,应用网络层次分析法(ANP, Analytic Network Process)探索影响云应用演进计划制定的内部与外部因素,以及其相互依赖关系。通过分析企业云应用架构模型和ANP元素影响矩阵演算过程,提出企业云应用演进计划制定的分时段分析方法。

目前,国内外的相关研究体现在:文献[1]从信息系统角度提出了评价云服务质量的评价指标,但只是给出了评价指

标的层次分析框架,未进行深入探讨;文献[2]利用证据推理的方式对云计算服务适应性做出评价,但其模糊程度太强,导致相关信息的利用率较低。关于企业演进策略的评价与支持,文献[3]与文献[4]应用AHP(Analytic Hierarchy Process)相关方法对企业的演进方案做出评价;文献[5,6]则分别结合MAS(Multi-Agent System)、CAS(Complex Adaptive System)等其它相关理论对企业战略进行分析。这些方法都是在企业规划方案确定的情况下,应用相关方法对既定的规划策略进行分析评价,从中挑选出最优的方案,并不能给出企业在整体演进过程中的指导建议。

针对上述存在的问题,本文首先结合企业系统分析,提取了针对系统云迁移的适合度评价指标,并应用ANP理论构建了完整的评价模型;其次,将ANP中的加权超级矩阵向极限超级矩阵收敛的过程与企业系统云迁移的过程相结合,提出在矩阵收敛过程中挖掘针对各迁移系统的分阶段重要指标

到稿日期:2013-08-26 返修日期:2013-11-14 本文受国家自然科学基金项目:基于行为的SoS体系结构评价研究(61273207)资助。

殷星(1989-),男,硕士生,主要研究方向为体系结构设计及评价、决策与控制理论等,E-mail:yx0906@163.com;周剑雄(1977-),男,硕士生,研究员,主要研究方向为云计算、企业信息系统架构等;王明哲(1948-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为离散事件系统理论、复杂系统建模、仿真与优化等。

元素,用于指导企业演进路线的制定与修订。

2 云应用系统迁移适合度评价

为了支持企业面向服务的云迁移策略评价,完成各系统结构和功能分解,首先明确顶层架构设计和面向服务的体系结构框架^[7],通过对各系统体系结构设计建模分析,挖掘科学评价系统的指标;同时参考目前针对信息资源云服务质量评价的指标体系,针对企业信息系统云迁移的特定环境,构建了一套科学、可操作的评价指标体系,如图1所示。

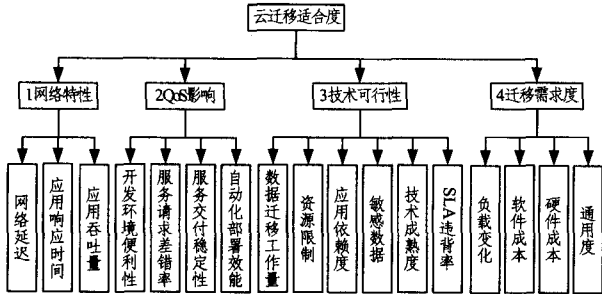


图1 指标体系结构

分析所获得的指标,确定各个指标所归属的层次,构造层次分析结构模型:在目标层面,整个测评模型的目的是获得企业各系统云迁移的适合度,分别从QoS影响、平台特性、技术可行性以及迁移需求度4个方面去考虑各个系统的云迁移适合度;最底层的是可以从体系结构模型以及交互仿真中获得相应数据的指标。

利用上述指标体系,构造网络层次分析模型(ANP),如图2所示。

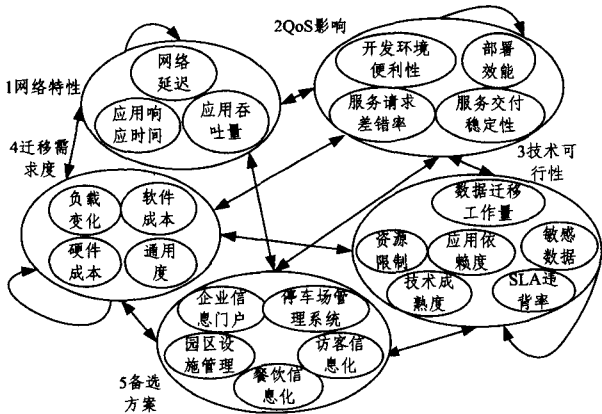


图2 网络层次分析模型

此ANP模型在备选方案元素集中选取了某企业信息化系统待迁入云环境的5个系统。ANP评价模型与传统评价模型不同的是考虑到了元素之间的相互影响作用^[8]。比如“数据迁移工作量”与“敏感数据”之间存在着明显的依赖关系:敏感数据由于含有用户的隐私,因此是不适合放入云中,系统含有的敏感数据越多,其需要迁移的数据就越少,从而数据迁移工作量就越小。

为了对元素之间相互影响的程度赋权,采用1-9标度法来比较元素之间相互影响的大小,并构造相应的判断矩阵。最后判断矩阵归一化的特征向量即表征了影响的权重。以“负载变化”为例,在技术可行性元素集中,“数据迁移工作量”、“资源限制”、“应用信赖度”和“技术成熟度”都对“负载变化”有一定的影响。但影响的程度有所不同,“应用信赖度”和“数据迁移工作量”对其影响的程度要比“资源限制”和“技术

成熟度”大。构造的判断矩阵如表1所列。

表1 针对“负载变化”的判断矩阵

负载变化	应用信赖度	数据迁移	资源限制	技术成熟度	特征向量
应用信赖度	1	2	3	4	0.472
数据迁移	1/2	1	3	2	0.274
资源限制	1/3	1/3	1	1/2	0.104
技术成熟度	1/4	1/2	2	1	0.15

针对每一元素,将其有影响的元素构造判断矩阵,获得归一化的特征向量作为相应的权重,最终将这些特征向量置于超级矩阵中对应的列,构成ANP的非加权超级矩阵。

在ANP中,另一个需要考虑的是每个元素集的重要性^[9]。正如Saaty教授所说,元素集的重要性体现的是元素集中元素所处的大环境的特性^[10]。同样是“主席”这一称谓,但是一个公司的执行主席和一个国家的主席所代表的层次是有很大的区别的。与指标元素的比较方式一样,将元素集进行两两比较,最终获得的特征向量构成加权矩阵A。加权矩阵的另一作用是使非加权超级矩阵成为列随机矩阵——各列数值之和为1。最终获得的加权超级矩阵A如表2所列。

表2 加权矩阵A

序号	1	2	3	4	5
1	0.208	0.255	0.221	0.267	0.244
2	0.074	0.08	0.085	0.129	0.098
3	0.454	0.43	0.495	0.477	0.512
4	0.132	0.166	0.131	0.112	0.146
5	0.132	0.069	0.068	0.015	0

将加权矩阵A与非加权超级矩阵的对应块相乘,获得加权超级矩阵;将加权超级矩阵自乘直至收敛,从而获得极限超级矩阵。最终的测评结果可在极限超级矩阵中体现出来。表3为ANP方法的综合测评结果。

表3 ANP的测评结果

备选方案	测评得分	系统排序
停车场管理系统	0.1782	3
企业信息门户	0.2977	1
餐饮信息化	0.1502	5
访客信息化	0.1658	4
园区设施管理	0.2081	2

上述结果表明企业信息门户与园区设施管理系统拥有较高的得分,在目前情况下最适合迁入云中,而其他系统由于某些方面的指标值处于劣势,造成最终获得较低的测评得分。这一结果即可用于支持企业管理者进行相关决策。

3 企业演进策略支持

3.1 演进策略多时段分析

在利用ANP方法获得了备选方案的测评得分之后,即可用来支持决策者对方案进行选择。本文考虑进一步利用构造的ANP模型挖掘支持企业演进策略的有效信息。

企业的发展策略应当与企业所处的环境相匹配。从企业战略角度分析企业的外部环境,是要把握环境的现状及变化趋势,利用有利于企业发展的机会,避开环境可能带来的威胁,这是企业发展的首要问题。企业外部环境因素可概括为以下4类,即PEST(political, economic, social, technological):政治和法律环境,经济环境,社会、文化与自然环境,技术环境。本文所选取的17个指标因素主要是在一定程度上反映技术发展环境对企业的影响。

在这些指标因素中,各个指标的重要性存在差异,即存在

着不同的关键因素。这主要表现在：不同产业的关键因素存在差异；不同企业的关键因素存在差异；企业产品寿命周期的各个阶段关键因素有所差异。因此，本文提出一种多时段的分析方法来解析企业演进过程。由于 ANP 加权超级矩阵到极限超级矩阵的过程反映的是指标元素之间以及指标与备选方案之间的相互影响变化的过程；同时，企业各系统向云平台迁移也是一个综合各方面考虑的演进过程。因此，考虑从矩阵幂乘的过程中挖掘更多指标之间相互影响的信息，以指导各系统更好地向云平台迁移，支持企业的演进策略。

在 ANP 评价模型中，极限超级矩阵反映了影响在 ANP 模型中的所有元素相互传递的最终结果。初始超级矩阵中的值表示元素 i 与元素 j 之间的直接联系，元素 i 与 j 之间也存在着间接联系。当影响从元素 i 通过所有可能的单个中间元素 k 传递到元素 j 时，所有间接影响值的和可用 W^2 中 $w_{ij} = \sum w_{ik} w_{kj}$ 表示。同样地， W^k 表示从元素 i 逐步通过所有间接的 $k-1$ 个元素到元素 j 的影响过程的综合作用，它是第 k 阶段中元素的直接影响矩阵。

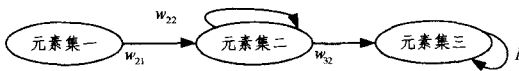


图3 ANP 典型结构

以图3中的 ANP 网络结构为例，此时超级矩阵结构如下：

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ w_{21} & w_{22} & 0 \\ 0 & w_{32} & I \end{bmatrix} \quad (1)$$

这一矩阵反映了在初始状态下各元素之间的直接相互影响。 W 幂乘所得的结果反映的是各元素之间间接影响的累积作用。如 W 的 k 次幂所得的结果为：

$$W^k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ w_{22}^{k-1} & w_{22} & 0 \\ w_{32} \sum_{i=0}^{k-2} w_{22}^i w_{21} & w_{32} \sum_{i=0}^{k-1} w_{22}^i & I \end{bmatrix} \quad (2)$$

这一矩阵实际反映的是当前状态下各元素之间的相互直接影响，同时也是反映初始状态下元素集之间间接影响 k 次累积的结果。针对这一结构中的元素集三，其发生的变化如图4所示。

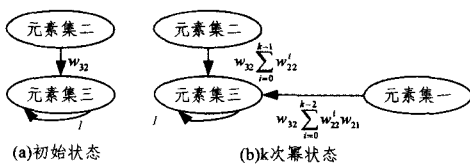


图4 元素集变化情况

图4(a)、(b)分别表示初始状态与 k 次幂时对元素集三的影响情况。可以看出，元素集一在初始状态下对元素集三没有影响，但随着影响的间接作用，在传递了 k 次之后，元素集一对元素集三产生了 $w_{32} \sum_{i=0}^{k-2} w_{22}^i w_{21}$ 的直接影响作用。因此，在矩阵幂乘的过程中，元素之间的影响作用都在发生变化。针对每一元素而言，对其影响最大的元素也在不断变更。

在矩阵幂乘过程中，矩阵序列 $\{W, W^2, W^3, \dots, W^i, \dots\}$ 反映的是影响作用的迭代过程。对于 W^i 的每一列而言，每个数值是对应行元素对这一列元素的直接影响，它们列和为1。

针对第 j 列元素而言， $w_{ij} = \max_{i=1}^n w_{ij}$ 即反映对元素 e_j 影响最

大的元素，称为最重要直接因素 E_k ； $w_{ik} = \max_{i=1}^n w_{ik}$ 即反映对元素 E_k 直接影响最大的元素 E_i ，同时 E_i 亦是对元素 e_j 间接影响最大的元素，称其为最重要间接因素；将矩阵序列中相邻两个矩阵相减，在差值矩阵中每列数值最大的项反映的是影响作用变化最大的元素，称其为变化最大指标因素 E_m 。

针对企业系统中每个待迁移的系统而言，需要发掘出在不同阶段的关键性因素来指导迁移的过程。因此，基于以上的分析，本文提出企业云应用演进策略多时段分析方法，其具体过程如下：

(1)通过构建 ANP 评价模型，获得系统加权超级矩阵 W ；

(2)加权超级矩阵 W 幂乘一次，获得 W^2 ；

(3)针对备选方案 A_i ，在 W^2 对应的列中搜索最大数值，其对应的行元素即为当前阶段影响 A_i 测评得分的最重要直接因素 E_k ；

(4)在 W^2 中，搜索在 E_k 对应的列中的最大值，其对应的行元素即为当前阶段影响 E_k 的最重要直接因素，同时也是影响 A_i 测评得分的最重要间接因素 E_i ；

(5)作差值矩阵 $\Delta 1 = W^2 - W$ ，在 A_i 对应的列中搜索变化最大的数值，其对应的行元素即为备选方案测评指标中变化最大的指标因素 E_m ；

(6)针对差值矩阵 $\Delta 1$ ，若矩阵中数值的变化量大于事先设定的阈值 δ ，说明各个元素的权重还在发生较大变化，则将矩阵继续幂乘一次，重复步骤(3)–(5)的内容，获得对应阶段的 E_k 、 E_i 、 E_m ；若矩阵中数值变化量小于 δ ，说明各元素的权重已趋于稳定，停止搜索。

通过以上步骤，获得分阶段的关键因素向量序列 $K(n) = \{E_k, E_i, E_m\}$ ，这一序列指出了针对系统 A_i 在云迁移过程中的关键指标因素。发掘出的重要因素，包括最重要直接因素 E_k 、最重要间接因素 E_i 、变化最大指标因素 E_m ，用于指导系统的迁移过程。最重要直接因素指明了现阶段系统建设的重点，所有战略建设资源都应以此为焦点，支持当前重点方面的建设；最重要间接因素最大程度上影响着重点建设项目的质量，应当作为辅助建设的重点；变化最大的元素反映的是元素之间影响作用的波动情况，这一指标元素所涉及的相关建设如果没有得到充分的重视，一旦出现故障就将对整个企业建设质量带来毁灭性的影响。

3.2 案例分析

企业为了在最大程度上提高各应用系统云迁移的质量，应当结合分时段的关键性指标做出合理的规划。下面以某园区企业信息门户这一系统为例，对这一过程进行说明。

企业系统向云平台的迁移需要从 IaaS 层硬件资源规划、PaaS 层与 SaaS 层系统整合、应用系统部署以及相应管理支撑技术的完善等几个方面来考虑。初期的主要任务是做好整个园区资源池规划以及相应的服务团队的组合，同时也应当考虑针对园区的业务系统建立相应的模型，用于后一阶段的仿真分析；接着除了资源整合的完善及管理机制的优化之外，主要针对各个园区应用系统进行仿真分析，得出各个系统的云迁移适合度分数，对迁移的效益进行评价；针对上一阶段的分析结果，将整个系统进行有计划的迁移，将服务功能模块有效组合，全面搭载整个云平台的架构；最后，管理支撑部门需要通过自动化手段，对大规模的云架构内系统进行维护，及时合理地对其进行更新，提高运维管理效率和管理质量，提高

对服务需求的响应速度。

系统迁移是一个分阶段的有序过程，每一步的结果都直接影响着园区云建设的整体质量。上述规划给出了整体层面的园区建设实施步骤，但未能落到底层，针对每一系统指出迁移时的注意事项，提出更加实际的实施方案。针对各个系统迁移时的注意事项，落到底层就应该是在对系统进行测评时的各个指标元素。而各个指标元素之间亦是相互影响的，这一影响过程体现在超级矩阵幕乘的过程中。

表4为加权超级矩阵幕乘一次后的部分结果。对于企业信息门户，在 W^2 中“企业门户”一列中最大的数值项为“数据迁移”，表明在初始阶段，数据迁移工作量是影响企业信息门户云迁移质量的关键因素。为此，必须合理规划企业信息门户中的数据迁移工作：数据内容按用户群体、使用频率等归类，先迁入使用频率高、数据隐私等级低的数据，后考虑涉及特殊群体的数据迁移工作。在“数据迁移”一列中，最大的数值项为“应用依赖”，说明此时应用模块间的相互依赖程度最能够直接影响数据迁移工作量所占的权重，同时也说明应用依赖度在最大程度上间接影响了企业信息门户云迁移的质量。考虑到云环境中的系统之间具有松耦合的特性，系统在迁移时应当避免将关联度较大的模块迁入云中，这样才能确保平台按需提供灵活、高效的服务。

表4 超级矩阵幕乘结果 W^2 (部分)

	企业门户	停车场	负载变化	...	数据迁移
企业门户	0.0375	0.0375	0.0464	...	0.0087
停车场	0.0254	0.0254	0.0324	...	0.054
...
应用依赖	0.0795	0.0795	0.0265	...	0.2718
数据迁移	0.2213	0.2213	0.2687	...	0.1140

针对差值矩阵 $\Delta 1=W^2-W$ ，在“企业门户”一列中“资源限制”的权重发生了最大变化，说明当前阶段，资源限制这一因素对企业信息门户的云迁移质量影响产生了最大变化。在迁移过程中，应当利用这一有效信息，减小资源限制这一因素对系统迁移的牵制作用。资源限制主要是硬件方面的资源限制，包括CPU资源限制、I/O资源限制以及内存资源限制。可以完善调度策略来主动减弱资源的限制作用，也可以扩充资源容量、增加硬件投入来被动地减弱资源的限制作用。

上述步骤获得了一个阶段的关键性因素 $K(1)=\{\text{数据迁移、应用依赖、资源限制}\}$ 。重复以上步骤，可获得其他阶段的关键因素序列。由这些序列共同组合，构成了针对企业信息门户的分阶段演进策略支持方案。表5为部分关键因素序列。

表5 企业信息门户关键因素(部分)

阶段编号	直接因素 E_k	间接因素 E_n	变化最大因素 E_m
1	数据迁移	应用依赖	资源限制
2	数据迁移	资源限制	应用依赖
3	数据迁移	通用度	数据迁移
4	数据迁移	应用依赖	通用度
5	数据迁移	通用度	应用依赖

上述为部分针对企业信息门户的分阶段关键性因素，当上述步骤迭代到第十步时，差值矩阵中的数值元素趋于零，说明此时各个指标的权重趋于稳定，可停止迭代的过程。

分析获得的关键性因素，不难看出“数据迁移”始终是影响企业信息门户云迁移质量的直接因素。对于信息系统而言，其核心部分是它所涉及到的数据，无论采用何种技术来架

构信息系统，针对数据的架构是无法规避的。因此数据的迁移对系统的建设质量起着决定性的作用，这一作用会贯穿这一过程的始终。此外，间接因素和变化最大因素在不同的阶段会有不同的指向，所以必须在不同阶段针对不同的方面对系统做出合理的优化；同时，某些指标元素会在不同的阶段重复出现，如“应用依赖”，表明这方面的建设并不是一蹴而就的，需要在后续阶段不断地进行完善。

3.3 小结

上述分析过程针对企业信息门户提出了分阶段的演进策略支持方案，用于指导企业信息门户能够以最佳的性能迁入云中。将上述过程应用到其他待迁移的系统，分析获得针对各自系统的关键性因素序列，结合企业战略演进路线，辅助企业整体演进策略框架，在细节上支持每个系统平滑、高效地过渡到云中。

相比传统的企业战略研究方法，上述多时段分析方法具有的特点如表6所列。

表6 战略分析方法比较

比较内容	传统方法	多时段分析
依据	主观	主观+客观
形式	静态	动态
层次	高层	底层

1. 决策的依据更加合理。传统模式下，战略产生于一个受控的、有意识的规划过程：企业在制定未来发展规划时，通过具有丰富经验的决策者，依据其对企业目前所处环境的认识以及自己的经验，制定企业的发展路线。这一模式假定企业的环境是相对稳定和可以预测的，企业决策者具有充分的时间和信息来制定策略。这样对决策者感性认识的依赖性较大，因此提出的战略的正确性在很大程度上依赖于企业决策者思维过程的理想化程度和决策方法的科学性。而本文提出的演进策略多时段分析方法，通过提取决策者的主观偏好，并利用相关仿真分析获得的数据，挖掘出影响企业的关键指标。这样，既利用了决策者的主观认识，同时也进行了一定的数学分析，融入了对客观现实的考虑，将主观认识与客观依据相结合，提高了决策方法的科学性，使得最终的规划战略正确性有所增加。

2. 对发展过程的动态考虑。战略规划中的SWOT企业战略分析方法^[11]，根据企业自身当前的内、外条件，探索企业的优势、劣势、机会和威胁。这一类型的传统方法将战略制定与战略实施相互分离，一旦战略确定，企业的发展路线也就此敲定，剩下的任务就是遵循时间节点按期完成战略规划中的目标。这类方法的缺陷是忽略了企业外部环境的变化，包括自身的经济情况、竞争对手的实力变化以及技术的变革等都会影响到企业规划的实施效果。因此，应该考虑在相对动态的环境下，实时更新用于决策的信息，在发展的过程中决策。本文的多时段分析方法针对企业所面临的环境，分时段、分系统地提出了企业云应用在迁移过程应该关注的方方面面，并且指出在不同时段的不同的关键影响因素，提供的是一个动态发展的指导策略，是针对传统方法这一缺陷的有效完善与补充。

3. 突出对细节层面的分析。一般企业的战略规划会涉及到人员的安排、设备的供应、流程的确定以及管理的规范，这些是从宏观上给出的一个战略规划。演进策略多时段分析方法则关注的是诸如网络性能、硬件成本等更加具体的底层因

素的影响作用,突出对底层细节方面的策略支持。实际操作时,可将此方法与传统方法相结合,两种方法互相辅佐,各取所长,从高到低制定企业的规划策略。

结束语 本文应用 ANP 方法对企业应用系统的云迁移适合度进行评价,并结合 ANP 中的超级矩阵提出了挖掘系统迁移过程中关键影响因素的分析方法,用于支持完善企业演进策略。其评价模型会因决策人认识的不同而有所差异。本文的重点是将 ANP 方法与企业战略相结合,提出一种支持企业战略演进的新思路。但由这一方法所提取的分时段关键影响因素与企业演进路线之间的契合性还有待进一步论证;同时,由于方法本身缺乏实践,未能与企业进行互动,因此缺少了相关数据来证明方法给企业所带来的效益,需要在后期对相关方法进行更深层次的探索,这些也都是下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] 邓仲华,汪宜晟,李志芳,等. 信息资源云服务的质量评价指标研究[J]. 图书与情报,2012(4):12-15
- [2] 付超,桂鹏飞. 基于证据推理的云计算服务适应性评估[J]. 计算机应用研究,2012,29(11):4304-4308
- [3] Davoudi M R, Sheykhvand K. Enterprise Architecture Analysis using AHP and Fuzzy AHP[C]//Proceedings of 2011 4th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology(ICCSIT 2011). VOL07,2007:202-207
- [4] Ginty R M, Carrasco R, Oddershede A, et al. Strategic foresight

(上接第 179 页)

结束语 在规划解未知的多 agent 规划领域进行观察信息约简,主要面临两大难题,即如何求出对应的协同规划解和如何进行观察信息约简。针对此难题,本文设计了算法 OR-MAP,首先对多 agent 领域进行状态分层,将分层信息通过以最小代价优先的回溯法求出协同规划解。然后进行观察信息约简,对已经搜索到的协同规划解,记录其观察变量集合大小,若在下次搜索过程中,部分规划解所需要的观察变量集合的大小大于或等于已经存在的观察变量集合的大小,则中止当前搜索。如此反复,直到找不到协同规划解为止。OR-MAP 算法可以在规划解未知的条件下,找出多 agent 规划领域的一个协同规划解,并使得执行这个协同规划解所需要的观察信息较少。

将来还可以继续在这几个方面进行研究:1)在求多 agent 规划领域的协同规划解时,分层的方法有待提高,算法中使用的方法不能求出含有循环结构的情况,在今后的工作中可以继续这方面的研究;2)本文是在完全可观察条件下进行观察信息约简,那么如何在部分可观察条件下进行观察信息约简可以做进一步的研究;3)若通过观察变量得出的观察信息是错误的,那么如何设计一个具有容错能力的算法来进行观察信息约简。

参考文献

- [1] Standley T. Finding Optimal Solutions to the Multi-agent Pathfinding Problem Using Heuristic Search[C]//Proceedings of the 2010 AAAI. Atlanta,2010:173-178
- [2] Jansen R, Sturtevant N. A new approach to cooperative pathfinding[C]//Proceedings of the 2008 AAMAS, Estoril,2008:

using an analytic hierarchy process: environmental impact assessment of the electric grid in 2025[C]//The 12th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, 2013. Kuala Lumpur, Malaysia, 2013

- [5] Xu Jun-li, Liu Lei, Shao Zeng-zhen. Research on the evolution of enterprise clusters based on theory of MAS[C]//Proceedings of 2011 4th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology(ICCSIT 2011). VOL01,2011:676-680
- [6] Ke Xing, Duan Ning-dong. Analysis on the evolution mechanism of enterprise organizational capability system from the perspective of CAS theory[C]//第七届中国管理学年会组织与战略分会场论文集. 天津,2012
- [7] 冯秀珍,郝鹏. 云计算环境下的信息资源云服务模式研究[J]. 计算机科学,2012,39(10):110-114
- [8] Saaty R. A validation of the effectiveness of inner dependence in an ANP model[C]//The 12th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, 2013. Kuala Lumpur, Malaysia, 2013
- [9] 孙宏才,田平,王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京:国防工业出版社,2011
- [10] Saaty T L. Principia Mathematica Decernendi; Mathematical Principles of Decision Making [M]. Pittsburgh: RWS Publication, 2010
- [11] 孙超平,杨善林. 战略 SWOT 决策模型的构建及其实证研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(3):868-872

1401-1404

- [3] Larbi R B, Konieczny S, Marquis P. Extending Classical Planning to the Multi-agent Case: A Game-theoretic Approach[C]//Proceedings of the ECSQARU-07. Hammamet, 2007:731-742
- [4] Wang K-H C, Botea A. Fast and Memory-Efficient Multi-agent Pathfinding[C]//Proceedings of the ICAPS-08, Sydney, 2008: 380-387
- [5] Huang Wei, Zhang Dong-mo, Zhang Yan, et al. Bargain over Joint Plans[C]//Proceedings of the PRICAI-10. Hanoi, 2010: 608-613
- [6] Huang Wei, Wen Zhong-hua, Jiang Yun-fei, et al. Observation reduction for strong plans[C]//Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI-07). Hyderabad, 2007:1930-1935
- [7] 饶东宁,蒋志华,姜云飞,等. 对不确定规划中观察约简的进一步研究[J]. 软件学报,2009,20(5):1254-1268
- [8] 周俊萍,殷明浩,谷文祥,等. 部分可观察强规划中约减观察变量的研究[J]. 软件学报,2009,20(2):290-304
- [9] Huang Wei, Peng Hong. Observation Reduction for State-action Tables[C]//Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Security. Beijing, 2009:10-14
- [10] Huang Wei, Wen Zhong-hua, Jiang Yun-fei, et al. Structured Plans and Observation Reduction for Plans with Context[C]//Proceeding of 21th International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI 09). Pasadena, 2009:1721-1727
- [11] 常青,文中华,胡雨隆,等. 强循环规划的观察信息约简[J]. 计算机工程与应用,2012,48(2):148-150
- [12] 文中华,黄巍,刘任任,等. 模型检测规划中的状态分层方法[J]. 软件学报,2009,20(4):858-869