

平行海上油气田：基于 ACP 的前期开发方案的设计与评估

魏立¹, 王红¹, 黄敏², 魏群², 缪青海²

(1. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 519000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 面向海洋油气田前期开发方案的设计、评估与培训, 研究基于 ACP 理论方法的平行海上油气田系统。首先采用建筑信息模型 (BIM) 技术建立多层次数字模型, 基于我国南海多个开发案例创建人工海上油气田系统; 其次, 在传统 ACP 框架中引入基于案例的推理 (CBR) 技术, 丰富了实际系统与人工系统间交互的方式。基于 BIM 和 CBR 所开发的平行海上油气田系统, 为海洋油气田前期开发方案的设计评估提供快速、准确的三维可视化支持, 为企业提供了智能化工程数据累积平台。

关键词: 平行系统; 建筑信息模型; 基于案例的推理; 油气田前期设计

中图分类号: TP311.134.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201923

Parallel offshore oil/gas field: ACP-based front end engineering design and evaluation

WEI Li¹, WANG Hong¹, HUANG Min², WEI Qun², MIAO Qinghai²

1. China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen 519000, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Front end engineering design (FEED) and its related evaluation plays an important role in the life cycle of offshore oil/gas field development. A digitalized way of FEED based on ACP architecture was provided by the proposed parallel offshore oil/gas field system. Firstly, based on several developed oil/gas fields located in South China Sea, a virtual oil/gas field using building information modeling (BIM) was constructed. Secondly, the case-based reasoning (CBR) to evaluate the FEED based on both BIM and successful cases was introduced. The methods of real-virtual interactions were also enhanced by the introduction of CBR into ACP architecture. The parallel platform has been used to visually design and evaluate oil/gas field FEED, which improves the efficiency and accuracy of users.

Key words: ACP, BIM, CBR, FEED

1 引言

近年来, 人工智能技术正掀起新的浪潮, 引领新一轮的科技革命, 相关研究已经上升到国家战略的高度。然而, 在人工智能繁荣的背后也存在不可忽视的问题。一方面, 人工智能的发展进入后深度学习时代, 理论和方法创新、深度网络的可解释性

依然有待突破; 另一方面, 人工智能在各行业的应用程度参差不齐, 除少数行业领域外, AI 落地依然是需要落实的问题。平行智能为这两个层面的突破提供了理论和方法的支持。

平行智能理论方法源于复杂系统的分析与控制, 其核心是人工系统 (artificial system)、计算实验 (computational experiment) 和平行执行 (parallel

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-05-15

通讯作者: 缪青海, miaoqh@ucas.ac.cn

基金项目: 国家科技重大专项子任务——油气生产系统三维可视化快速评价系统研究与应用基金资助项目 (No.2016ZX05057007)

Foundation Item: National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05057007)

execution), 简称 ACP^[1-5]。经过十几年的发展, 平行智能在交通^[6-19]、物流^[20]、自动驾驶^[21]、视觉计算^[22]领域得到了验证和应用, 在社会计算、智慧农业等领域获得了广泛关注。

石油和天然气作为传统的能源支柱行业, 在国家能源安全中起着举足轻重的作用, 近年来一直进行着信息化、数字化和智能化的革新。随着相关技术的快速发展, 传统能源企业积累的生产数据成为企业自身的宝贵资源。同时, 如何有效管理、利用这些数据资源更好地服务企业生产、决策, 也给企业带来了新的挑战。一方面, 建筑信息模型(building information modeling, BIM) 技术取代传统的设计、管理模式, 成为贯穿整个工程项目生命周期的主流发展趋势; 另一方面, 大数据和人工智能技术的快速发展, 又成为将数据转化为生产力的重要推动力。如何利用这些新技术服务于企业决策、生产, 实现行业内落地, 成为具有挑战性的课题。本文基于平行智能的理论和方法, 结合 BIM 案例库和基于案例的推理(case-based reasoning, CBR) 技术, 服务于海洋油气田前期开发方案的设计与评估。

2 平行海上油气田系统架构

2.1 面向海上油气田的 ACP 体系

平行智能的核心是实现 ACP, 通过真实系统与人工系统的交互, 达到对真实系统的提升和优化, 如图 1 所示。

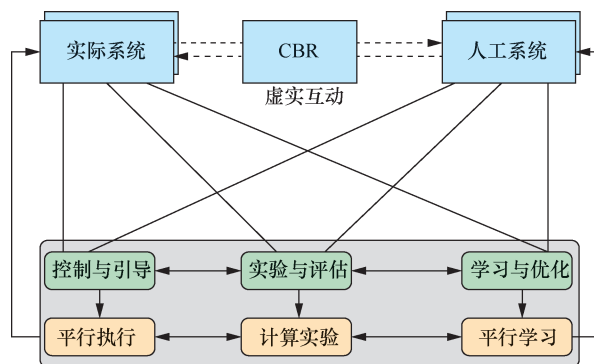


图 1 海上油气田 ACP 基本框架

构建人工系统的核心是采用适当的方法建立与真实系统相对应的虚拟数字系统; 计算实验在人工系统之上开展, 采用来自真实系统的数据进行分析、预测与评估; 利用虚实互动与平行执行进行系统的管理与控制, 最终实现人工系统与实际系统的交互连接。本文的重点是基于 BIM 实现孪生海上油

气田系统, 并通过 CBR 方法实现真实系统与人工系统的交互。需要指出的是, 基于 CBR 的交互并不是实际系统和人工系统的一对一实时连接交互, 而是多对一的离线生成、在线评估、离线反馈, CBR 的引入丰富了 ACP 系统的交互方法, 拓展了平行智能方法的应用领域。

2.2 基于 BIM 的虚拟海上油气田

BIM 在工程建设及实施的全生命周期内, 通过参数模型整合各种项目的相关信息, 对其物理和功能特性进行数字化表达, 在项目策划、运行和维护的全生命周期过程中进行共享和传递, 工程技术人员依此设计、施工、运营, 在提高生产效率、节约成本和缩短工期方面发挥重要作用^[23]。

自 20 世纪 70 年代佐治亚理工大学的 Chuck Eastman 教授提出 BIM 理念以来, BIM 技术历经萌芽阶段、产生阶段和发展阶段, 近年来进入了一个高速发展时期, 已经在场地分析、建筑策划、方案论证、可视化设计、协同设计、性能优化分析、工程量统计、施工进度模拟、物料跟踪、灾害应急模拟等领域得到了广泛应用^[24]。

虽然我国的 BIM 技术起步较晚, 相关软件平台也主要以国外商业软件为主, 但近年来国家相继出台了相关行业标准, 土木工程领域已大量采用 BIM 技术^[25-26], 上海中心大厦、黄登水电站等成为 BIM 应用的代表。与此同时, 由于海洋工程具有复杂性和高风险性, 我国海上 BIM 技术研究与应用的相对不够成熟, 与土木工程领域的 BIM 应用存在较大的差距。本文的工作也是 BIM 技术在海上油气田工程中应用的探索。

2.3 CBR 的平行交互

由于安全、成本等因素限制, ACP 方法中的第三部分往往难以进行一对一的实时交互, 这样 ACP 方法并不能发挥全部作用, 也在很大程度上阻碍了 ACP 系统的应用。本文根据海洋油气田前期开发方案设计、评估的特点, 在孪生系统难以实施一对一交互的情况下, 从多案例的层面出发, 使用 CBR 方法, 实现多对一的离线交互。

CBR 是人工智能技术的一个重要分支, 涉及特征设计、模式分类、知识表示等环节, 综合使用神经网络、模糊逻辑等人工智能技术, 是一种基于实际经验或经历的推理方法, 是传统专家系统的提升^[27]。简单来说, CBR 把当前情况与以往成功解决的问题相匹配, 从中获取答案或启发, 从知识库/案例库中

找到与当前问题最接近的案例,以此案例为参考样本,针对具体问题进行必要的改动,以得到当前需解决问题的最佳方案^[28-30]。在匹配的过程中,必要时可对过去案例的解决方案进行修改,使之能更好地与当前问题的具体情况相适应。

如图2所示,CBR的工作过程可以概括为“4R”的循环迭代过程,即相似案例匹配查找(retrieve)、案例重用(reuse)、案例的修改和调整(revise)、案例学习(retain)4个步骤的循环。

(1) 相似案例匹配查找

根据新问题的特征描述,在案例库中按相似度测量方法,检索查找最相似的一个或多个案例,作为新方案设计的依据。

(2) 案例重用

如果新问题与案例库中的已有问题在主要特征上足够相似,则尝试用检索出案例的问题解决方案解决当前问题。

(3) 案例的修改和调整

根据检索出的案例与输入案例的差别,对检索出的案例的解决方案进行修改,以适应当前问题的具体特点;不断调整,得到最终的问题解决方案。

(4) 案例学习

将当前问题的特征描述以及最终解决方案合并为新案例放入案例库,进一步扩充案例库以进行知识的储备。必要时,对案例库进行特征的优化重整,以便更好地服务于后续工程。

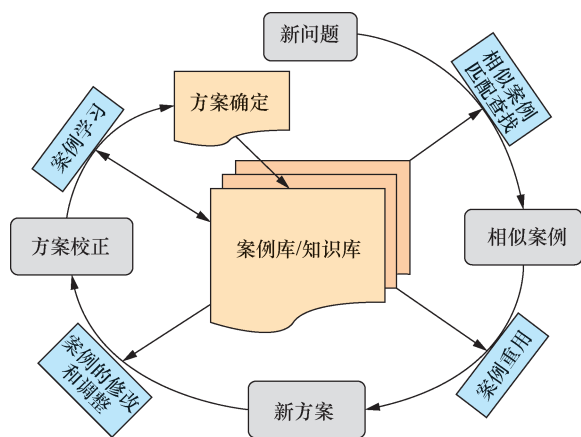


图2 CBR的“4R”工作流程

CBR具有两个特点:一是利用相对固定的特征向量表示已有的成功经验;二是待求解的问题与案例库中的问题通常属于同一个领域,即新旧问题具有较高的性质类比重。海洋油气田开发设计方案具备以上两个特点,CBR作为前期开发方案的快速评

估方法,与基于BIM的案例库相结合,正好可以发挥它的特点和优势。

3 基于BIM的虚拟海洋油气田构建

在CBR应用中,案例库的建立、调整和维护是关键环节,传统的案例仅有一个特性向量和具体方案的数据/文字描述,难以适用于海洋油气田工程这样规模大、复杂度高的应用场景。因此,本文将人工智能中的CBR与目前快速发展的BIM技术相结合,创新性地提出了基于BIM方法建立CBR案例库,从而提高了案例描述的准确度及可视度。

3.1 海洋油气生产三维模型库

典型的海洋油气田开发的主要设施可以分为平台、海底管道、海底脐带缆、水下设施、浮式设施、单点系泊系统等。每一部分又包含多种生产设施,以水下生产设施为例,其又包括采油树、管汇、分配单元、跨接管、PLET(管道终端)等设施;而采油树又可进一步分解为采油树组件、湿气流量计、接头保护帽、油管挂组件、采油树帽、生产导向基盘等,这些设施通常还配备有专用的安装工具。BIM分层次结构如图3所示(以采油树为例,包括部件及安装工具)。

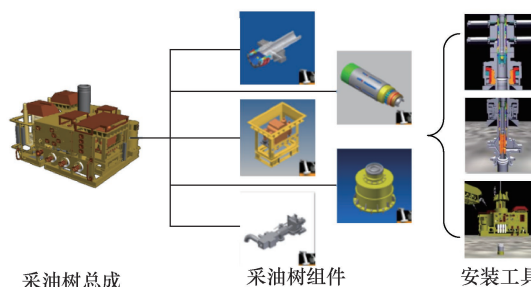


图3 BIM分层次结构

3.2 海洋油气生产系统的BIM化建模

在三维模型的基础上,通过扩展附加属性,建立海洋油气田基础设施的BIM模型库。设施模型的属性维度由原先的三维扩展到“3+X”维,所增加的维度根据设施的属性不同而有所区别,例如这些设施可分为采办型和建造型。采办型设备(例如采油树)一般向国内外厂商定制购买,费用还包含相应的工具和安装费用;建造型设施(例如管汇)一般由国内厂商根据设计进行主体制造,个别设备(流量计等)通过采购进行安装。采油树等采办设备的属性扩展包含采办费用、安装费用以及相关的间接费用等。管汇等建造型设

备主要以钢结构为主,其扩展属性包括钢材型号、重量等。通过这些属性,可以计算出钢结构的成本价格。

3.3 基于 BIM 的海洋油气田开发案例库

基于 BIM,可以方便地创建海洋油气田开发案例,多个案例集成为案例库,从而构成了 CBR 案例库的基础。案例库采用多层级构建:最底层是零件层,最小可以是一个螺丝钉;其上是设备层,例如采油树上的水下控制单元、油管挂等;设备层之上为设施层,包括采油树、管汇、脐带缆、海底管道等;最上层是案例层,由其下的多个设施根据实际的油气田开发方案构建,如图 4 所示。

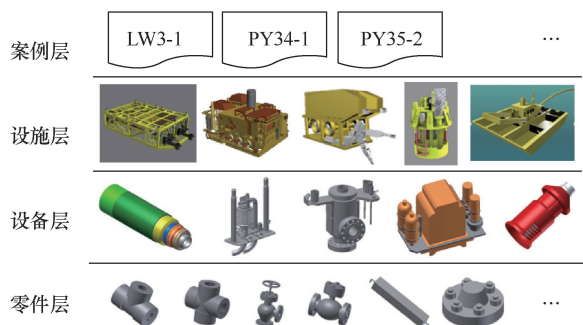


图 4 海洋油气田开发案例库层级结构

4 平行海洋油气田软件系统与应用

以 BIM 案例库为基础,本文作者团队开发了软件系统平台,用于满足海洋油气田前期开发方案的三维可视化快速设计与评估、案例展示、人员培训等需求。基于 Blender 二次开发的软件界面如图 5 所示。

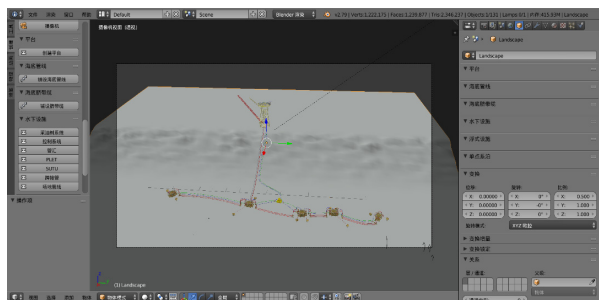


图 5 三维可视化快速设计与评估软件界面

4.1 海上油气田前期开发方案的快速设计

海上油气田前期开发方案是油气田开发生命周期的第一阶段,准确、快速的方案设计将为后续各个环节打下良好的基础。以下将从油气田前期开发方案的特征设计、案例提取、快速设计 3 个方面进行介绍。

(1) 油气田开发方案的特征设计

用于案例索引和查询的特征向量是 CBR 的核心。综合考虑已有海上油气田设计、施工、运行的历史数据,结合相关领域专家的经验知识,本文设计了油气田的关键特征,构建了可用于量化计算的特征向量。这些关键特征包括:类型,用于区别油田和气田;所处的位置,例如南海、东海等;水深,用于区别深水海域和浅水海域;年产量,此特征与投入设施等直接相关;井口数量,涉及施工工期长度;施工季节,将海洋气候环境因素纳入考虑因素。由此,可设计海洋油气田案例的特征向量为

<类型,位置,水深,年产量,井口数,施工季节>

对于案例库中的每一个已有案例,很容易设置其对应的特征向量。

(2) 油气田开发案例提取

从基础零部件创建三维油气田开发方案费时费力,而有效利用既往油气田开发案例则可以大大缩短设计时间。本文提出的三维可视化快速设计正是以既往案例为基础,利用所设计的特征向量做相似性测量(similarity measure),在案例库中查找一个或多个最相似案例,作为新方案设计和评估的基础。相似性测量可采用多种方法,下面给出较为简单的计算式。

$$SM(e, E_i) = \sum_{i=1}^N V_i / N$$

其中, SM 为特征向量的相似性测量值,参数 e 为新方案的特征向量, E_i 为案例库中第 i 个案例的特征向量。 N 为特征向量的维数,在本例中为 6。 V_i 为特征向量中对应元素的模糊相似度,在 0~1 内取值。例如,如果两个气田同属南海,则特征向量中的“位置”元素可取值为 1;如果水深一个为 200 m,一个为 1500 m,则根据案例库的水深范围,“水深”的模糊相似度可能取值为 0.2,即相似度较小。因此,相似性评估的基本原理是:新方案的特征向量与特征向量 E_i 中的相同(似)元素越多、取值越大,两个方案越接近, E_i 对新方案的评估具有越大的参考价值。

(3) 三维可视化快速设计

根据第(2)步的相似度评估,可以提取最接近的已有开发案例,并在三维可视化软件中载入,如图 5 所示,3D 交互区内显示了案例的水下井场三维布局。基于此案例,用户可以进行局部修改——添加或删减部分设备,软件系统则根据 BIM 参数自动

更新费用投资, 新设计的方案效果如图 6 所示。

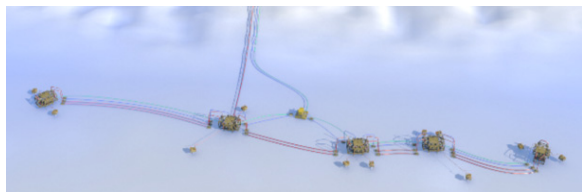


图 6 某油气田开发方案三维设计方案效果

4.2 海上油气田前期开发方案评估

由于 BIM 所附属的属性信息都来自真实工程数据, 案例库的建立完成成为 CBR 对新油气田前期开发方案的评估打下了基础。油气田开发全生命周期涉及的环节众多, 总体包含工程直接费、工程间接费以及基本预备费等, 但本文仅对工程直接费部分进行估算。工程直接费涉及的设施主要有: 平台、海底管道、海底脐带缆、水下设施、浮式设施、单点系泊系统等, 每个设施又可细分为四级。图 7 以水下设施为例, 给出了顶层以下三级目录。

“水下生产设施”费用组成分级

1. 水下系统设备费	2. 水下系统保护结构费用	3. 钻井船改造费
(1) 采油树系统	(1) PLET	4. 安装费
(2) 控制系统	(2) PLEM (管道管汇基盘)	
(3) 管汇和PLET	(3) SUTU (水下脐带缆终端单元)	
(4) 跨接管	(4) 在线管线	
(5) 卖方设计费及管理费	(5) 中心汇管	
(6) 其他费用	(6) 采油树	
(7) 运费	(7) 涂漆	
	(8) 采管费	
	(9) 其他费用	
	(10) 国内运费	

图 7 水下设施投资费用三级科目

其中, 设备费、保护结构费用等虽然受经济形势、市场景气度等因素的影响, 但整体可以较好地估算出来, 可由 BIM 数据直接计算得到; 而安装费容易受洋流、台风等不确定自然因素的影响, 相对波动较大, 预估难度也较大, 因此可用 CBR 方法进行估算。

(1) 设施采办费用估算

使用基于 BIM 的油气田前期开发方案的快速设计与评估功能, 可根据关键设计参数自动生成评估结果。例如, 可根据井口数量快速计算采油树的总采办价格, 根据井口位置估算海底管道和脐带缆的总体费用。

图 6 所示的开发方案包含采油树 11 部、中心管汇一部、其他管汇 4 部、分配单元一部, 以及设施之间的海底管道与脐带缆。假设采油树的采办费用为 X , 中心管汇的费用为 M_0 , 其他管汇的费用为

M_1 , 分配单元费用为 D , 则主要设施的费用可估算为

$$E_1 = 11X + M_0 + 4M_1 + D$$

在完成了开发方案的快速可视化设计后, 由于采油树、管汇的位置已经确定, 可进行海底管道、脐带缆、MEG 管线的虚拟铺设, 进而确定线缆的长度。假定图 6 所示的设计中, 直径为 56 cm 的海底管道总长度为 80 km, 直径为 30 cm 的海底管道长度为 30 km, 直径为 15 cm 的海底管道长度为 10 km, MEG 管道长度为 20 km, 脐带缆长度为 60 km, 则海底管道、脐带缆的成本可估算为

$$E_2 = 80P_{56} + 30P_{30} + 10P_{15} + 20P_{MEG} + 60U$$

(2) 设施安装费用估算

由于受到施工技术、自然条件、国际形势的影响, 设施安装费用波动较大, 难以准确计算。因此, 本文采用人工智能中的 CBR 方法进行估算。CBR 方法在本文的具体应用包括油气田开发方案的特征表示、基于特征的相似案例查找、根据相似度的安装费用估算以及案例的添加及案例库的维护等。

以上计算得出的 SM , 经过逐项归一化折算后得到 SM_N , 用于估算水下设施 (例如采油树) 的安装费用。假设通过相似性测量, 在案例库中找到 E_1 和 E_4 两个相似案例, 而案例 E_1 的安装费为 A 、案例 E_4 的安装费为 B , 则新方案的安装费用估算为

$$E = (E_1 \times SM_N_1 + E_4 \times SM_N_4) / 2 \times Coef$$

其中, $Coef$ 为校正经验系数, 是综合案例库得出的经验值。

4.3 油气田开发方案的案例添加和案例库维护

油气田根据新方案建设完成之后, 需要对方案的各项估算费用进行重新校正, 将真实的投资数据录入案例库, 同时对估算公式校正系数进行重新计算。当案例库中的案例数量较多时, 有必要对案例库进行分类整理, 以便使得相似度测量更加准确和高效。

4.4 水下井场设备虚拟安装

面向采油树、管汇、分配单元、跨接管安装、线缆的虚拟安装, 本文使用 Ogre 渲染引擎和 Bullet 物理引擎实时模拟 (如图 8 至图 10 所示), 用于检查水下设备的布局、ROV 路径干涉检查、安装人员的操作培训等。

5 结束语

本文提出了基于 BIM 案例库和 CBR 技术相结

合的海洋油气田开发方案投资估算方法。使用 BIM 案例库可以较为准确地得到设施投资费用；而使用 CBR 技术也可以对不确定的、较大的施工安装费用得到定量的估算。案例库在实际工程中累积丰富经验的同时，不断校正优化估算系数，从而提高估算的准确度。本文所提出的方案目前还处于初步调试阶段，一方面案例还比较少，另一方面只考虑了投资费用科目表中较高的层级。下一步需要深入研究更具体的科目，充分利用企业数据资源，综合使用信息建模技术和人工智能技术，提高海洋油气田开发方案投资估计的可信度。

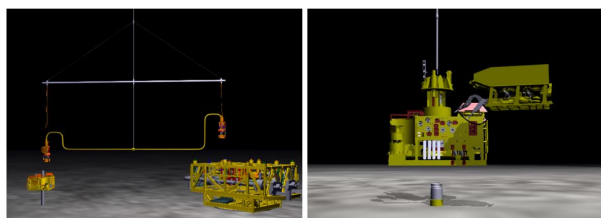


图8 水下设备（采油树、跨接管）的虚拟安装

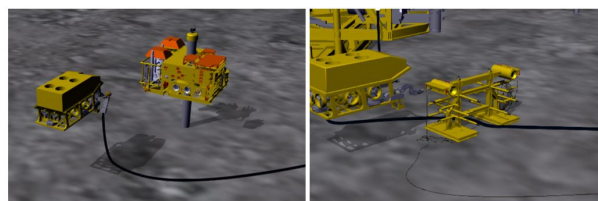


图9 水下脐带缆、电液控制线的虚拟安装（实时物理模拟）

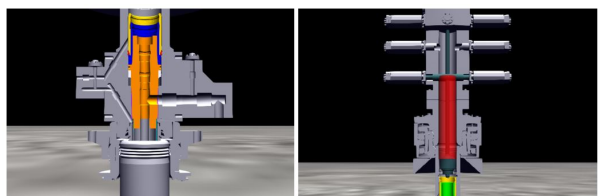


图10 设备（油管挂）安装液压动作及密封测试原理动画展示

参考文献：

- [1] WANG F Y, WANG X, LI L, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 345-348.
- [2] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [3] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 893-897.
WANG F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 893-897.
- [4] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [5] 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法[J]. 中国基础科学, 2004, 5: 5-12.
WANG F Y. Computational theory and method for complex system research[J]. China Basic Science, 2004, 5: 5-12.
- [6] WANG F Y. Agent-based control for networked traffic management systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(5): 92-96.
- [7] WANG F Y. Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2008, 23(6): 8-13.
- [8] ZHAO Y, GAO H, WANG S, et al. A novel approach for traffic signal control: a recommendation perspective[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(3): 127-135.
- [9] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [10] XIONG G, DONG X, FAN D, et al. Parallel traffic management system and its application to the 2010 Asian games[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 225-235.
- [11] LV Y, DUAN Y, KANG W, et al. Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 865-873.
- [12] LV Y, ZHANG X, KANG W, et al. Managing emergency traffic evacuation with a partially random destination allocation strategy: a computational-experiment-based optimization approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2182-2191.
- [13] DUAN Y, LV Y, LIU Y L, et al. An efficient realization of deep learning for traffic data imputation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 168-181.
- [14] HUANG W, WANG K, LV Y, et al. Autonomous vehicles testing methods review[C]// in 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2016: 163-168.
- [15] DUAN Y, LV Y, WANG F Y. Travel time prediction with LSTM neural network[C]// in 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2016: 1053-1058.
- [16] CHEN Y, LV Y, LI Z, et al. Long short-term memory model for traffic congestion prediction with online open data[C]// in 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2016: 132-137.
- [17] YE P, WANG F Y. Hybrid calibration of agent-based travel model using traffic counts and AVI data[C]// IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2017). 2017: 16-19.
- [18] LV Y, CHEN Y, ZHANG X, et al. Social media based transportation research: the state of the work and the networking[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 19-26.
- [19] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通：虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
LV Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [20] 沈大勇, 王晓, 刘胜. 平行装卸：迈向智慧物流的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 34-39.
SHEN D Y, WANG X, LIU S. Parallel loading and unloading: smart

technology toward intelligent logistics[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 34-39.

- [21] 刘腾, 王晓, 邢阳, 等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 40-51.
LIUT, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 40-51.
- [22] 王坤峰, 苟超, 王飞跃. 平行视觉: 基于 ACP 的智能视觉计算方法[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1490-1500.
WANG K F, GOU C, WANG F Y. Parallel vision: an ACP-based approach to intelligent vision computing[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(10): 1490-1500.
- [23] 建筑信息模型应用统一标准[S]. GB/T 51212-2016.
Unified standard for building information modeling[S]. GB/T 51212-2016.
- [24] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 基于 BIM 建筑结构设计模型集成框架应用开发[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 948-953.
LIU Z Q, LI Y G, LV X L, et al. BIM-based integrated information framework for architectural and structural design model[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(7): 948-953.
- [25] 李俊松, 董凤翔, 张毅, 等. 基于达索平台的铁路隧道工程全生命周期 BIM 技术应用探讨[J]. 铁路技术创新, 2014(2): 53-56.
LI J S, DONG F X, ZHANG Y, et al. Discussion on the application of BIM technology in the whole life cycle of railway tunnel engineering based on Dassault systems[J]. Railway Technology Innovation, 2014(2): 53-56.
- [26] 张连营, 于飞. 基于 BIM 的建筑工程项目进度-成本协同管理系统框架构建[J]. 项目管理技术, 2014, 12(12): 43-46.
ZHANG L Y, YU F. Construction of BIM-based construction project progress-cost collaborative management system framework [J]. Project Management Technology, 2014, 12(12): 43-46.
- [27] SHIU S C K, PAL S K. Foundations of soft case-based reasoning, Wiley series on intelligent systems[M]. John Wiley and Sons, 2004.
- [28] 卢梅, 张代亚. 基于 CBR 与 RBR 的国际工程风险费用预测[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(1): 38-43.
LU M, ZHANG D Y. Risk cost forecast based on CBR and RBR[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(1): 38-43.
- [29] 张自林, 黄水燕. 引入哑变量的 CBR 早期成本估算修正模型研究[J]. 房地产导刊, 2016(7): 234.
ZHANG Z L, HUANG S Y. Research on correction model of CBR early cost estimation introducing dummy variables[J]. Real Estate Bi-weekly, 2016(7): 234.
- [30] 田钰, 朱文姝, 陈建友. 一种基于 CBR 技术的工程施工成本估算模型[J]. 价值工程, 2016, 35(16): 203-205.
TAIN Y, ZHU W S, CHEN J Y. A construction cost estimation model based on CBR technology[J]. Value Engineering, 2016, 35(16): 203-205.

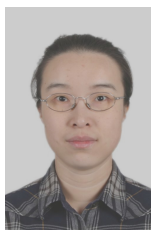
[作者简介]



魏立 (1975-), 男, 湖北武汉人, 中海石油深海开发有限公司高级工程师, 主要研究方向为海洋石油开发项目计划管理、费用控制、项目管理等。



王红 (1966-), 女, 广东深圳人, 中海石油深海开发有限公司高级工程师, 主要研究方向为海洋石油开发工程管理等。



黄敏 (1979-), 女, 湖北鄂州人, 中国科学院大学人工智能学院副教授, 主要研究方向为大数据、自然语言处理等。



魏群 (1947-), 男, 山东诸城人, 中国科学院大学人工智能学院特聘教授, 工程计算中心副主任, 主要研究方向为三维可视化仿真与虚拟现实技术、钢结构工程技术、散体元数值计算方法、结构模型试验及激光散斑测试技术和图形计算力学方法等。



缪青海 (1979-), 男, 山东东营人, 中国科学院大学人工智能学院副教授, 主要研究方向为平行智能系统、并行计算与数值模拟方法等。