**2019 年度国家自然科学奖提名项目公示**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称 | 高温高压油气井管柱特征分析模型、理论及算法 |
| 提名者 | 教育部 |
| 提名意见：该项目立足于中国石油天然气领域的实情，运用现代微分动力系统理论，以油气井管柱温度、压力、密度、体积及干度等关键因素为参数，成功建构各参数随井深变化的非线性耦合偏、常微分混合方程组及管柱变形量参数计算模型等20个主体模型。证明了某种半连续性和伪单调性映射的强向量变分不等式可解性的公开问题，管柱受力非线性常微分方程模型体系的等价泛函极值问题。利用欧拉多边形理论，证明了“压力-温度-密度-流速”多参数耦合非线性偏、常微分混合方程组解的存在性和收敛性。改组管柱微元体非线性泛函微分方程模型体系，运用无因次化方法实现参数无单位化，将其转化为无因次微分方程组，解决了正弦屈曲和螺旋屈曲的临界载荷问题；对管柱轴向受力、管壁摩阻、正压力及管柱变形量进行耦合迭代计算，改变传统单独计算方法的片面性。以C#为语言、利用不同工况受力、变形以及关键参数多维多角度显示，开发多参数调节界面，打造综合仿真环境，提高了决策水平与效率，增强了战略性资源开发保密性和安全性。 提名该项目为国家自然科学奖 二 等奖。 |

|  |
| --- |
| **项目简介（限1页）** |
| 高温高压油气井深长、温高、压大及地质复杂，严重影响深部油气藏的及时发现和安全开采。构建适合高温高压油气井管柱特征分析模型、理论及算法，是世界公认亟待解决的科学难题。研究历时10年，其科学发现与贡献如下： 1.建立管柱特征分析严整数学模型体系，改变油气井管柱特征分析经验状态。依赖于普通试井模型和经验公式，预测不准确，安全事故隐患大。运用现代微分动力系统理论，以油气井管柱温度、压力、密度、体积及干度等关键因素为参数，成功建构各参数随井深变化的非线性耦合偏、常微分混合方程组及管柱变形量参数计算模型等20个主体模型，突破传统建模方法分析管柱特征的不可行性，结束了经验分析状态。 2.构建管柱特征分析一般数学理论体系，填补油气井管柱特征分析理论空白。证明了某种半连续性和伪单调性映射的强向量变分不等式可解性的公开问题，管柱受力非线性常微分方程模型体系的等价泛函极值问题。利用欧拉多边形理论，证明了“压力-温度-密度-流速”多参数耦合非线性偏、常微分混合方程组解的存在性和收敛性，填补了考虑压力、温度、密度、流速的相互影响以及各种物性参数对上述关键参数交互作的油气井管柱分析的空白。 3.构筑高精度高维度数学模型求解方法，解决油气井管柱特征分析不可计算性。管柱特征模型的复杂、非线性、高维以及偏、常微分混合等特性，精确计算成为公开难题。本成果改组管柱微元体非线性泛函微分方程模型体系，运用无因次化方法实现参数无单位化，将其转化为无因次微分方程组，解决了正弦屈曲和螺旋屈曲的临界载荷问题；对管柱轴向受力、管壁摩阻、正压力及管柱变形量进行耦合迭代计算，改变传统单独计算方法的片面性，突破了管柱受力分析的不可计算性。 4.开发面向对象管柱特征分析计算软件，结束国外对分析计算软件的垄断地位。本成果以C#为语言、油气井发现和安全开采七大工况为软件应用框架，利用不同工况受力、变形以及关键参数多维多角度显示，开发多参数调节界面，打造综合仿真环境，提高了决策水平与效率，改变了长期以来依赖国外对管柱特征分析计算软件的垄断地位，增强了战略性资源开发保密性和安全性。本成果对西南地区LG2、LG6、LG61，大邑3、大邑101、大邑4，川西新11、新201、新202等高温高压深井的管柱受力、变形和安全性能的关键参数进行数值分析和过程模拟，优选施工参数、优化管柱结构，减少事故发生率，增收节支达1亿多元。 教育部组织专家组鉴定，一致认为“该成果在完井管柱受力的数学建模、理论分析、计算方法方面达到国际领先水平。” 8篇代表性论文被SCI合计应用192次，SCI他引170次，单篇最高SCI他引52次。在TOP期刊CES(IF: 2.6)和IECR(IF: 2.2)上的关于干度参数和高温高压三相流建模，匿名评审专家认为此类研究填补了该领域的空缺。 |

|  |
| --- |
| **客观评价（限2页）** |
| 1．成果鉴定教育部于2009年6月2日在成都组织并主持该项目成果鉴定。专家鉴定意见部分摘取如下：“该成果在完井管柱受力的数学建模、理论分析、计算方法方面具有原始创新，在解决完井管柱受力分析难题方面有重大突破，开发出了具有自主知识产权的完井管柱受力分析软件，在石油天然气领域得到了应用，取得了明显的社会效益和经济效益。综上所述，鉴定委员会一致认为，该研究成果在完井管柱受力的数学建模、理论分析、计算方法方面达到国际领先水平。”**成果获得2014年教育部高等学校科学研究优秀成果奖自然科学奖一等奖**。 2. 论著引用及评价为解决管柱受力非线性微分方程组的等价性泛函极值问题，我们对变分法的基础理论：凸性和变分不等式理论进行了深入研究，得到了高度的评价和广泛的应用。著名专家M. S. R. Chowdhury在美国数学评论（Mathematical Reviews）对我们在Applied Mathematics Letters上发表Strong vector variational inequalities in Banach spaces文章给与了高度的评价，认为我们证明了某种半连续性和伪单调性映射的强向量变分不等式的可解性，其研究结果对G. Y. Chen and S. H. Hou提出的公开问题给出肯定的答案。（The authors obtain two existence theorems for solutions of strong vector variational inequalities without monotonicity in Banach spaces by using fixed point theorems of Brouwer and Browder separately. Applying Ky Fan's lemma [Math. Ann. 266 (1984), no. 4, 519–537; MR0735533 (85i:47060)], they prove the solvability of the strong vector variational inequality problems with some kind of hemi-continuous and pseudo-monotone mappings. Their results give a positive answer to the open problem posed by G. Y. Chen and S. H. Hou [in Vector variational inequalities and vector equilibria, 73–86, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2000; MR1789114].）。 Cheng, LC, Yao, JC 2013年在J. Global Optim.上发表论文Existence theorems for generalized set-valued mixed(quasi-) varational inequalities in Banach spaces（见附件**2-4**）对我们研究工作The generalized f-projection operator with an application（见附件**1-5**）给以积极的评价：“Wu and Huang 介绍和研究了Banach空间中的一类新的广义f-投影算子，扩展了被Alber和Li介绍的广义投影算子的定义”（In 2006, Wu and Huang[33] introduced and studied a new class of generalized f-projection operators in Banach spaces, which extends the definition of the generalized projection operators introduced by Alber[23] and Li[7]）。J. Li and M.A. Noor 2010年在Computer and Mathematics with Applications上发表论文On characterizations of preinvex fuzzy mappings（见附件**2-8**）对我们研究工作Nonconvex fuzzy mappings and the fuzzy pre-variational inequality（见附件**1-10**）评述到：“Wu and Xu介绍了模糊拟凸、模糊不变凸集、模糊不变拟凸集的概念，并获得了模糊向量优化与模糊变分不等式的关系，同时还引用了该论文提出的结论。Wu and Xu证明了一些这些重要的结论，指明了模糊映射半连续与预不变凸性的关系。”（Wu and Xu introduce the concepts of fuzzy pseudoconvex, fuzzy invex, fuzzy pseudoinvex and fuzzy preinvex mapping from R^n to the set of fuzzy numbers, and obtained the relation between fuzzy vector optimization and fuzzy variational inequality。In [18, Theorem 3.1], Wu and Xu proved the following important results which revealed the relationships between emicontinuity and preinvexity of fuzzy mappings.）。在此基础上，作者在更一般化的条件下推广了之前研究中的一些结论，极大地推动了该领域的研究进展。Rufián-Lizana, Antonio在2012年发表于Fuzzy Sets and Systems上第200期84-98页上的论文“On invex fuzzy mappings and fuzzy variational-like inequalities”（见附件**2-10**）对我们发表于Fuzzy Sets and Systems上的论文“Generalized convex fuzzy mappings and fuzzy variational-like inequality“给与了积极的评价，并进一步推广了论文的定义和结论。（见附件**1-8**）（Recently, Wu and Xu [28] introduced the concepts of fuzzy pseudo convex, fuzzy invex, fuzzy pseudo invex and fuzzy preinvex mappings from R^*n* to the set of fuzzy intervals based on the concept of differentiability of fuzzy mapping due to Wang and Wu [26].） 为研究压力、温度、密度、流速耦合微分方程组模型解的存在性、解的收敛性及解的收敛性条件，进一步设计完整、高效、快速计算模型算法，我们研究了应用基础理论微分动力系统（见附件**1-3**），得到了较高的认同和广泛的应用。Giuseppe Quaranta2011年在Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering上发表论文Finite element analysis with uncertain probabilities，对我们研究工作A class of linear differential dynamical systems with fuzzy initial condition (Fuzzy Sets and Systems)（见附件**2-1**）评价：“Xu et al. 提供了一些解决一阶微分动力系统有用的定理，该微分系统具有模糊载荷向量及模糊初值。”(Xu et al. provide useful theorems for solving first-order fuzzy differential dynamical systems when the system matrices are crisps, the load vector is fuzzy and the initial conditions are affected by fuzziness as well.)。Ghazanfari, B., S. Niazi, and A. G. Ghazanfari 2012年在Applied Mathematical Modelling上的论文“Linear matrix differential dynamical systems with fuzzy matrices”（见附件**2-2**）对其评价为：“Xu et al.利用模糊系统的α-截平集表示结构研究了一类线性模糊微分动力系统。”(Xu et al. investigated a class of line fuzzy differential dynamical system by using the representation of theα-level sets of the fuzzy system)。 3．用户报告 在对高温高压管柱特征分析模型、理论及算法研究基础上，针对七大工况性质及工程人员实际应用及操作需求分别编制相应的计算处理程序，开发面向对象的用户界面友好的软件，获得了软件著作权（见附件5-1）。用户报告 (见附件5-3)对我们自主开发的系统给出了积极的评价：系统在中石化元坝一井推广使用，该井为川东超深大斜井，通过优选施工参数、优化管柱结构，利用软件进行数值分析，提高了计算精度，通过过程模拟，形成管柱力学分析的图形显示，使用户可以直观的了解管柱在不同工况下的受力、变形和安全性能；通过协同决策提高了决策水平与效率，减少了事故发生率，系统在现场推广应用过程中，应用效果良好。取得了较大的经济效益和社益。用户报告 (见附件5-4)对我们自主开发的系统给出了肯定的评价：对中石油已完成的两口高温高压深井的测试工程数据进行验算，其结果相符，建议在现场工况控制适应性方面做进一步的研究工作，系统在现场推广应用过程中，应用效果良好。 |

|  |
| --- |
| **代表性论文专著目录（不超过8篇）** |
| 序号 | 论文专著名称/刊名/作者 | 年卷页码 | 发表时间（年月 日） | 通讯作者（含共同） | 第一作者（含共同） | 国内作者 | SCI他引次数 | 他引总次数 | 论文署名单位是否包含国外单位 |
| 1 | Numerical modelling of steam quality in deviated wells under variable (T, P) fieldfield/Chemical Engineering Science/Jiuping Xu, Yunqiang Liu, Shize Wang, Bin Qi | 2012年84卷242-254页 | 2012-08 | Jiuping Xu | Jiuping Xu | Jiuping Xu, Yuanqiang Liu, Shize Wang, Bin Qi | 2 | 4 | 否 |
| 2 | A class of linear differential dynamical systems with fuzzy initial condition /Fuzzy Sets and Systems/ Jiuping Xu, Zhigao Liao, Zhineng Hu | 2007年158卷2339-2358页 | 2007-06 | Jiuping Xu | Jiuping Xu | Jiuping Xu, Zhigao Liao, Zhineng Hu | 28 | 98 | 否 |
| 3 | A new mathematical model for the force analysis of tubular string in HTHP wells/Applied and Computational Mathematics/Jiuping Xu, Zezhong Wu | 2012年11卷110-136页 | 2012-01 | Jiuping Xu | Jiuping Xu | Jiuping Xu, Zezhong Wu | 1 | 2 | 否 |
| 4 | The generalized f-projection operator with an application/ ull. Austral. Math. Soc. /Keqing Wu and Nanjing Huang  | 2012年84卷242-254页 | 2006-04 | Nanjing Huang | Keqing Wu | Keqing Wu, Nanjing Huang | 52 | 90 | 否 |
| 5 | On vector variational inequalities in reflexive Banach spaces/ J. Global Optim. /Nanjing Huang, Yaping Fang | 2005年32卷495-505页 | 2005-08 | Nanjing Huang | Nanjing Huang | Nanjing Huang, Yaping Fang | 36 | 62 | 否 |
| 6 | Generalized convex fuzzy mappings and fuzzy variational-like inequality /Fuzzy Sets and Systems/ Zezhong Wu, Jiuping Xu | 2009年160卷1590-1619页 | 2009-06 | Jiuping Xu | Zezhong Wu | Zezhong Wu, Jiuping Xu | 13 | 31 | 否 |
| 7 | Strong vector variational inequalities in Banach spaces/ Applied Mathematics Letters/ Yaping Fang, Nanjing Huang | 2006年19卷362-368页 | 2006-04 | Nanjing Huang | Yaping Fang | Yaping Fang, Nanjing Huang | 26 | 65 | 否 |
| 8 | Nonconvex fuzzy mappings and the fuzzy pre-variational inequality/ Fuzzy Sets and Systems/ Zezhong Wu, Jiuping Xu  | 2008年159卷2090-2013页 | 2008-08 | Jiuping Xu | Zezhong Wu | Zezhong Wu, Jiuping Xu | 12 | 23 | 否 |
| 合 计 | 170 | 375 |  |

|  |
| --- |
| **主要完成人情况** |
| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目主要学术贡献 |
| 徐玖平 | 1 | 校长助理 | 教授 | 四川大学 | 四川大学 | 投入此项研究的工作量占本人总工作量的70%。1. 主持课题，组织协调项目实施2. 总体设计项目研究框架，组织完成重要科学发现点1, 2, 33. 代表性论文3的第一作者，代表性论文1, 2, 3, 6, 8的通讯作者（证明材料见附件2, 附件3, 附件4, 附件8） |
| 吴泽忠 | 2 | 副院长 | 教授 | 成都信息工程大学 | 四川大学 | 对“重要科学发现”中第1-4项做出贡献。参与完成13篇论文，是4篇论文的第一作者，代表性论文4、6重要贡献者，8的主要贡献者。 |
| 黄南京 | 3 | 无 | 教授 | 四川大学 | 四川大学 | 投入此项研究的工作量占本人总工作量的70%。1. 参与和主持课题，撰写论文2. 合作完成重要科学发现点1, 2, 33. 代表性论文7的第二作者，代表性论文2,3,4的第一作者（证明材料见附件2, 附件3, 附件4, 附件8） |
| 刘云强 | 4 | 无 | 副教授 | 四川农业大学 | 四川大学 | 对“重要科学发现”中第1、2项做出贡献。参与完成6论文，是1篇论文的第一作者，代表性论文1、2的重要贡献者。 |

|  |
| --- |
| **完成人合作关系说明** |
| 针对高温高压油气井管柱特征分析模型、理论及算法这一科学问题，项目组充分发挥各自学科优势联合攻关，创新研究。主要合作情况如下：1. **四川大学徐玖平教授、吴泽忠教授**，于2003年开始合作，运用机理分析法，以工程力学、流体力学、空气动力学、非稳态热传导理论等为基础，在全面、系统地研究管柱受力机理的基础上，利用微分几何理论对已有三维弯曲井眼中屈曲变形规律和载荷分布规律的非线性常微分方程组模型进行了改进，期间发表SCI论文数十篇，包括代表性论文3和8**。**2. **四川大学徐玖平、刘云强，**于2003年开始合作，就井况实际特点，分别研究单相流瞬态稳态模型体系，气、液两相以及气、液、水三相瞬态、稳态模型体系问题展开研究，发表代表性论文1。3. **四川大学徐玖平、黄南京，**于2003年开始合作，提出和发展了管柱微元体受力非线性微分方程组模型的等价问题，合作发表代表论文5。 **承诺：**本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。 **第一完成人签名：**  |