

摘 要

钻具组合设计是钻井工程设计中的一个技术难度大，又非常重要的环节，特别是定向井与水平井的发展，更使钻具组合设计成为钻井工程关键问题之一。面对当前智能制造的发展趋势，为了提高钻具组合设计的效率和质量，需要一种智能化的设计方法来实现对钻具组合设计知识的继承、共享和重用。目前由于钻井工程设计信息的异构性、分布性，造成知识难以共享和重用、知识管理困难。传统知识建模方法在复杂钻具组合设计概念及其关系上的表达能力、推理能力及灵活性不足，难以解决异构知识的共享与重用问题。本体知识表示方法具有良好的概念层次结构、逻辑推理能力和较强的知识表达能力，在解决知识表示、推理、融合、共享等方面具有明显优势。因此运用信息技术和本体在知识领域的优势，进行钻具组合的智能辅助设计研究具有重要意义。

本文针对钻具组合设计过程中模糊性、随机性等问题，提出了基于本体的钻具组合设计知识模型。首先，在整理分析钻具组合设计知识特点及设计知识间关系的基础上，规范采用钻井设计领域概念和术语，明确概念间的关系，并对钻具组合设计知识进行语义描述，参照 CommonKADS 知识本体模型，构建了钻具组合设计领域知识本体库。其次，在采用本体描述钻具组合设计知识的同时，利用本体推理实现了对钻具组合设计本体库的本体映射，利用本体映射规则以及自定义规则，借助 Jena 推理机完成基于本体知识与规则的推理过程。并且利用本体与案例推理相结合的方法，实现钻具组合本体知识库与钻具组合设计案例知识库有效结合，利用语义匹配相似度以及属性相似度实现钻具组合智能设计。最后，利用本体知识库与钻头选型地层综合系数法相结合实现钻头的智能选型，并对钻具组合智能设计进行了原型实现。实验和运行表明，基于本体的钻具组合智能辅助解决方案可行，能大大提高实际工作效率。

关键词：钻具组合设计，知识表示，本体建模，案例推理

Research and Application on Key Technology of Drilling Assembly

Intelligent Design

Shao Bo(Software Engineering)

Directed by Prof. Pang Shanchen and Prof. Duan Youxiang

Abstract

Drilling assembly design is one of the most difficult and very important steps in drilling engineering design, especially the development of directional and horizontal wells. It also makes drilling assembly design one of the key issues in drilling engineering. Faced with the current trend of intelligent manufacturing, in order to improve the efficiency and quality of the design of the drilling assembly, an intelligent design method is needed to inherit, share and reuse the knowledge of the design of the drilling assembly. At present, due to the heterogeneity and distribution of drilling engineering design information, it is difficult to share and reuse knowledge, and knowledge management is difficult. The traditional knowledge modeling method is lack of expression ability, reasoning ability and flexibility in complex drilling assembly design concept and its relationship, and it is difficult to solve the problem of sharing and reuse of heterogeneous knowledge. Ontology is a new method to apply philosophical concepts to semantic technology. It has good conceptual hierarchy, logical reasoning ability and strong knowledge expression ability. It has obvious advantages in solving knowledge representation, reasoning, integration and sharing. Therefore, in this paper, using the advantages of information technology and ontology in the field of knowledge, it is of great significance to study the intelligent assistant design of the drill assembly.

In this paper, aiming at the large amount of fuzziness, randomness and uncertainty in the design of the drilling assembly, a knowledge-based model of the design of the drilling assembly based on ontology is proposed. Firstly, based on the analysis of the relationship between drilling tool design knowledge and design knowledge, the concept and terminology of drilling design are standardized, the relations between concepts are defined, and the semantics of drilling assembly design knowledge is described. Based on the CommonKADS

knowledge ontology model, a knowledge ontology library is constructed. This model describes the ontology mapping of the drilling assembly design ontology base by using ontology reasoning while using the ontology to describe the assembly design knowledge. By using the ontology mapping rules and the self-defined rules, the model completes the ontology-based knowledge and reasoning process. Secondly, by combining the method of ontology and case-based reasoning, this paper achieves the design of drilling tool assembly by combining the combination of ontology knowledge base and tooling design case knowledge base, using semantic matching similarity and attribute similarity. Finally, the combination of ontology knowledge base and drill bit design stratigraphic comprehensive coefficient method is used to realize the intelligent selection of drill bits, and the prototype of drill bit assembly intelligent design is realized. The experiment and operation show that the ontology-based drilling assembly intelligent auxiliary solution is feasible and can greatly improve the actual work efficiency.

Key words: Drill assembly design, Knowledge representation, Ontology modeling, Case reasoning

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 钻具模型库.....	2
1.2.2 钻具组合设计方法.....	3
1.2.3 钻井设计知识表示.....	5
1.3 主要研究内容.....	6
1.4 章节安排.....	6
第二章 背景知识介绍.....	8
2.1 钻井工程设计.....	8
2.2 知识建模.....	10
2.3 本体.....	10
2.3.1 本体概念.....	10
2.3.2 本体分类.....	11
2.3.3 本体特点.....	11
2.3.4 本体构建方法.....	12
2.4 本章小结.....	13
第三章 基于本体的钻具组合设计知识模型.....	14
3.1 钻具组合设计知识介绍.....	14
3.1.1 钻井的工程地质环境.....	14
3.1.2 钻进参数设计因素.....	14
3.1.3 井眼轨迹控制因素.....	14
3.1.4 钻进工具因素.....	16
3.1.5 钻具组合设计知识特点.....	16
3.2 钻具组合设计知识表示模型.....	17
3.2.1 CommonKADS 知识模型.....	17

3.2.2 钻具组合设计的知识模型.....	19
3.3 钻具组合设计知识表示方法.....	20
3.3.1 本体构建方法.....	20
3.3.2 领域知识表示方法.....	21
3.4 钻具组合设计知识概念本体.....	21
3.4.1 钻井地质因素本体.....	22
3.4.2 钻井参数本体.....	23
3.4.3 钻进工具模型本体。.....	23
3.4.4 本体关系与属性分析.....	24
3.5 本章小结.....	26
第四章 钻具组合智能辅助设计方法.....	27
4.1 钻具组合智能辅助设计方法研究.....	27
4.1.1 本体映射.....	28
4.1.2 基于规则的推理.....	29
4.2 基于本体与 CBR 的钻具组合设计.....	30
4.2.1 本体与 CBR 推理系统框架.....	30
4.2.2 传统相似度计算.....	31
4.2.3 改进的相似度计算方法.....	32
4.2.4 基于属性计算.....	33
4.2.5 基于本体与案例推理的优势.....	34
4.3 钻头选型智能辅助方法.....	35
4.3.1 传统钻头选型方法.....	35
4.3.2 智能钻头选型方法.....	35
4.4 钻具组合设计实验及分析.....	37
4.5 本章小结.....	38
第五章 钻具组合智能辅助设计系统实现.....	39
5.1 系统需求分析.....	39
5.2 系统设计.....	39

5.2.1 功能模块设计.....	39
5.2.2 系统框架设计.....	40
5.3 系统功能实现.....	41
5.3.1 知识获取与管理功能.....	41
5.3.2 钻具组合智能设计功能.....	42
5.3.3 模型显示功能.....	43
5.4 开发工具.....	45
5.4.1 OSG 引擎开发包.....	45
5.4.2 Protege 本体构建工具.....	45
5.5 运行实例.....	46
总结.....	49
总结.....	49
收获.....	50
不足与今后的工作.....	50
参考文献.....	51
攻读硕士学位期间取得的学术成果.....	55
致 谢.....	56

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

石油工业是我国国民经济的基础，随着世界经济快速发展，石油资源可持续利用问题日益突出。石油钻井是勘探与开发油气田资源的重要环节，随着科技的进步和发展，在钻井工艺质量等方面要求更加严格，并要求钻井工程师科学有效地进行钻井工程设计^[1]。石油钻井工程直接关系到钻井成本高低、油气田开发效益以及石油工业的发展速度。地质设计、井身结构设计和钻具组合设计等钻井工程设计内容，直接关系着钻井施工的效益和成败。钻井工程设计是针对地质岩石特征、地层剖面等地质设计要求，对井身结构与钻井参数进行设计以及设计出多种钻具组合结构设计方案，并从中确定最优方案的复杂过程。

对于钻具组合设计来说，钻井工程师在钻井过程中制定的钻具组合设计方案，直接关系到钻井成败^[1]。钻具一旦出现故障，轻则导致钻进偏差，重则引发钻井事故，两者都会造成巨大损失。为了提高钻井成功率及避免钻井事故，必须不断研究钻井工艺技术，调高钻井技术水平和钻井工具设备质量。信息化、智能化及自动化等技术的发展也为油气开发提供了重要的技术支撑，因此探索和研究信息技术特别是智能化技术在复杂钻井工程中的应用具有重大意义。

随着经济的快速发展和石油数字化的趋势，石油公司及钻井研究院已经开始引入一系列国外先进的开发技术和钻井工具来实现钻井过程实时监控及信息共享，从而缩短钻井设计周期，提高钻井质量^[1]。在这种情况下，钻具组合的设计也从早期设计师的手工设计转变为计算机辅助工具设计，并进一步转化为目前使用计算机图形技术软件设计的钻具组合仿真。

钻具组合设计是钻井工程设计过程中一个技术难度大且非常重要的环节，特别是随着钻井深度的增加以及钻井工艺如定向井和水平井的发展，更使钻具组合设计成为钻井工程设计关键问题之一^[2]。钻具组合设计的核心任务是根据地质设计方案、钻井参数、井身设计结构以及井眼轨迹设计要求，设计能达到所钻目标地层，且与地层岩性及其他钻井工艺设计相适应并能达到轨迹控制目的的钻具组合。钻具组合主要涉及两方面问题：利用井场参数设计一套钻具组合以及利用钻具组合数学模型分析所设计的组合结构的

特性。目前，地层因素、钻井参数、井场情况等都是以设计理论及专家经验的形式表现出来，常规的钻具组合辅助设计程序不能直接处理像地层岩石力学特性这类定性的信息，只能处理量化的数据和信息，无法通过程序直接将设计理论与专家经验知识有效的结合起来，而且目前钻具组合理论设计依赖于力学数学模型分析，由于模型假设与实际情况之间存在较大误差，因此不可能用模型完全严格模拟复杂的井下情况，并且钻具组合设计的整个问题不能单独通过钻井工具的力学分析完全解决^[2]。因此，必须汇集各种专家知识以及钻具组合设计理论知识根据井场的地质设计要求、钻井参数设计出多种钻具组合优化方案及其结构，并对其进行仿真和模拟，通过反馈校正、经过力学分析得到最佳解决方案，最终编入相应的设计方案。

由上述可知，目前的钻具组合设计软件都是独立的平台，不能集成到其他钻井平台上，且无法有效地集成经验知识与设计理论。另外，由于钻井现场条件艰苦和钻井工程专家匮乏的情况下，充分利用钻井设计公司、油田钻井人员在实践工作中积累的钻井工程设计的丰富经验，方法和知识，实现钻具组合在给定井场参数下自动给出设计方案，从而可以降低钻井成本和提高钻井效率。因此由于这些不足，开发相应的钻具组合智能辅助设计软件是非常必要的，有利于钻井工艺的发展，提高钻井效率、质量，降低钻井成本，并对我国钻井工艺整体技术水平的提高，石油钻井行业经济效益水平的提高，以及赶超发达国家技术发展水平都具有重要的意义和巨大的应用价值。

1.2 国内外研究现状

钻井设计内容主要包括地质设计、工程设计。地质设计是钻井工程设计的前提，地质设计包括地下复杂情况勘探设计，如地层孔隙压力、岩性特征，地层剖面图等。工程设计主要以地质设计为依据进行编制，主要包括井眼轨道设计与控制，确定合理的井身结构，钻具组合设计，钻井液设计以及钻井参数设计。钻具组合设计是快速钻井和高质量钻探的关键，其设计的合理性直接影响钻井工程的质量与成本。钻具组合设计研究现状主要包括钻具模型库、钻具组合设计方法、钻具组合设计知识表示方法三个方面。

1.2.1 钻具模型库

国内外软件已经开始使用三维建模方法来构建，但这些模型分散，没有建立专门的钻井工具模型库。因此，建立一个比较完整的常用钻具模型库是非常重要的，可以使钻

井工作人员轻松检索所需要的钻具模型并提高工作效率。特别是近年来出现的虚拟钻井系统，是钻井技术，计算机技术，图像处理技术等科学与钻井工程交叉融合的成果，并应用于油田钻井。钻具模型数据库的建立为钻具组装辅助设计系统的开发奠定了基础。

目前，钻具模型库主要应用于钻井工程设计分析和钻井虚拟仿真，并已推出各种商业软件产品，例如哈里伯顿公司的 Landmark 钻井工程软件和斯伦贝谢公司的钻井软件产品，这些都代表了世界上最高水平的钻井设计软件，实现钻井工程设计智能化、信息化以及钻井过程虚拟仿真。

斯伦贝谢公司的 Drilling-Office 软件^[3]实现科学化和信息化的钻井工程设计，可用于管理，优化和干预全球钻井和完井作业。钻井工程设计的 BHA（钻具与井筒编辑）模块，采用“拖—放”（Drag and Drop）方式，能够快速根据井眼轨迹设计要求设计出一整套钻具组合设计方案。Drilling-Office 软件的钻具模型库^[4]是比较完善的数据信息库，但依然是以二维形式展示。

目前，英国 Drilling System 公司是钻井和控制模拟系统研究的领导者^[3]。Drilling System 公司主要研究开发钻井模拟仿真系统，模拟钻具组合模型在井下运行状态，通过 MWD/LWD 随钻测量技术实时监控钻井过程，钻具模型库存储钻具三维模型。

国内的钻具模型库的研究主要是综合各种下部钻具组合的结构尺寸、钻井工况及钻井特性等信息的数据集合，并没有给出具体的钻具模型。北京怡恒阳光科技发展有限公司开发的 Navigator 定向井水平井设计与计算分析系统^[4]是国内比较完善的应用于定向井水平井设计和工程分析的计算机辅助系统^[4]。其中，TDFEA 摩擦力矩分析软件用于模拟井筒中的钻柱，有限元法用于力学分析，实现钻井工程设计模块化。钻具设计和分析处于数据显示阶段，计算机图形技术尚未引入。

1.2.2 钻具组合设计方法

目前，现有的钻具组合设计方法主要包括基于钻具组合模型力学分析方法、基于知识工程设计方法。

基于模型分析的方法是通过数学模拟与模型力学分析，根据各种轴向载荷，以无量纲和公制单位计算泥浆密度以及钻头与切点（LT）之间的距离，预测出钻具组合对井斜的影响，从而稳定钻井的轨迹，目前主要应用于井控理论与技术中。基于知识工程的设计方法是将知识工程应用到钻井设计领域，通过构建相应的专家经验知识库，通过相应

的关联度分析，通过规则知识推理，实现钻具组合设计智能化。基于知识工程的设计方法能挖掘钻井设计领域知识间的信息，实现钻井领域知识共享。目前知识工程在钻井工程其他领域也取得很大的进展，具有很好的应用前景。

(1) 基于模型分析的方法

Lubinski 和 Woods^[5]提出了旋转钻井曲率的控制问题，将地层的各向异性钻井理论与钻柱力学分析相结合，实现了“平衡井倾角”的定量计算，从而根据钻具组合对井斜控制能力，对钻具组合进行优选设计。

Walker 和 Friedman^[6]将最小势能原理应用于二维和三维常规下部钻具组合分析，并采用变分法将钻柱结构的三维分析程序应用于下部钻具组合，并在计算机上模拟和解算控制方程设计，从而提高钻速，降低了钻井成本。

在国内，模型分析方法的研究起步较晚，三弯矩方程分析主要是白家祉^[7]提出，通过纵横弯曲梁法来分析下部钻具组合的受力与变形。杨勋尧^[8]以主要解决井斜控制技术问题，为了表达地层各向异性对井斜的影响，提出了一种地层造斜力的计算方法，通过求解简单的力学模型分析下部钻具组合受力情况。Panayirci^[9]使用快速数值模拟仿真钻头侧向力优化钻具组合设计。

(2) 基于知识表示的方法

杨辽^[2]等应用专家系统，将钻具模型知识、专家经验知识，引入面向对象和过程相结合的知识表示方法设计，采用元知识求解策略，实现针对不同地层、井眼条件的底部钻具组合设计。

Landmark 钻井工程软件^[4]是钻井工程设计过程知识集成系统，其主要功能是利用钻井设计领域知识协助用户对钻井过程专业分析并做出专家决策。其中钻具模型库主要是以二维模型的形式展示。钻具模型库主要运用在 WellPlan（钻完井工程施工参数设计分析）模块，用来对钻具组合设计进行预测并分析，并在最后导出一套钻具组合设计图纸。钻具组合预测主要是预测当前位置的钻具组合效果以及从当前位置向前钻进一段间隔的钻具组合效果。在大井眼施工中，根据以往的施工经验，随着井眼深度以及井眼水平位移和倾角的增大，为保证井下安全需要，逐步减少钻进的钻铤数量，进而改善钻柱组合结构。对于钻具组合的力学分析模块，主要分析大位移井的钻具受力和疲劳破坏因素分析，确定合理的钻井参数，设计合适的钻具组合，从而确保钻具组合能正常钻进。

A. Tobatayeva 等人^[10]利用人工神经网络,输入轴向载波与井眼曲率,以及一些设计参数,计算半波长度,从而分析当前钻柱弯曲程度,优化 BHA 设计。

方明,李欣^[11]提出一种在大数据环境下,借用 MapReduce 实现钻具间的关联分析,从中挖掘和发现有助于设计人员进行钻具组合设计的有效信息,针对钻具组合的特点,以钻具间关联频次为基础,对以往钻具组合设计中包含的钻具间关联性进行分析,形成钻具间的关联链,通过关联性分析来辅助设计人员对钻具组合进行设计。

1.2.3 钻井设计知识表示

知识工程主要包括知识获取、知识表示、知识利用等,研究目标是通过有效的领域知识信息进行挖掘抽取,对领域知识合理的表示,使之成为能够为计算机所利用的形式,其核心是如何有效地表示知识。知识表示是知识工程研究领域的重点,是程序智能化的核心,而本体知识表示的研究促进知识工程领域向更深入、更本质的方向推进。

国外对本体知识表示方法研究比较早,从哲学领域起源,目前在知识工程领域已取得重大进展^[12]。本体是知识表示与知识利用的载体^[12]。本体论在知识库系统开发中越来越多地应用于领域知识模型系统的开发,提供必要的基本建模概念并解释概念之间的关系。设计相应的领域知识库是本体设计的关键,并且对组建整个知识库是至关重要的。与国外相比,国内研究相对起步较晚、创新性差,较多引入国外技术,主要应用研究主要在医学领域、夹具设计领域,但在实际应用方面相对落后。

目前,本体在钻井工程中应用主要应用在复杂情况分析,故障预测,钻井参数优化等方面,李云峰^[12]构建钻井复杂情况知识本体,研究基于本体的钻井复杂情况监控案例推理技术。闫东^[13]、李云静^[14]利用本体技术实现对石油地质领域知识表示。Arumugam 等^[15]利用领域本体对钻井工程报告中提取地质构造等钻井关键知识,有助于地质学家更好的规划。王月^[16]利用本体技术构建油田开发知识库,其中包括钻井工程知识以及地质知识。王正^[17]引入 CommonKADS 本体构建方法以及 CBR 推理方法,通过构建钻井参数的知识模型,实现了智能钻井参数优化的决策系统。Flett^[18]等设计了一种以高度结构化的方式存储钻井知识和经验的方法,从而在案例库中检索相似的设计。高晓荣^{[19][20]}建立了本体知识表征模型,构建了钻井应急本体知识库和案例库,使用 SWRL 规则语言,通过 Jena 推理机实现现在钻井事故中钻具组合优选。王晓丽^[21]利用本体技术实现油气勘

探开发知识快速获取，提高油气勘探开发领域知识源的实体提取效率和准确率，有效解决油气勘探开发行业获取知识。

目前，本体知识表示方法在钻井工程领域中主要应用有：钻井复杂情况分析、故障预测、钻井参数优化等。本体虽然在钻井工程领域取得很好的应用，但在钻具组合设计领域未得到充分利用，只是针对钻具组合设计过程中某个影响参数。因此需要运用本体知识表示方法将钻具组合设计知识以及专家经验知识完整有效地结合起来。

1.3 主要研究内容

论文基于钻井工程设计的应用背景，根据知识表示设计方法基本流程，通过研究基于本体的钻具组合设计知识表示方法、基于本体的钻具组合设计推理方法和本体与 CBR 推理方法，实现一个钻具组合辅助设计系统，可以合理表示所钻井段井眼与地层参数知识，并根据现场给出的井场参数，利用相关规则或案例推理方法自动给出的钻具组合设计方案，并从钻具模型库中提取钻具模型，将钻具组合以三维形式更直观地展示给设计人员，并输出设计书。研究内容分为以下几个方面：

(1) 钻具组合设计知识的构成，知识表示和组织方式的研究。根据专家经验和设计理论分析钻具组合设计知识特点，提取钻具组合设计知识概念、关系。研究适合钻具组合设计知识的知识模型与表示方法。

(2) 研究基于本体的钻具组合设计领域知识建模方法。本文针对钻具组合设计过程，在分析复杂钻具组合设计知识的基础上，分析设计知识特点，确定钻具组合设计知识之间存在的概念，概念间关系及约束，利用本体方法构建钻具组合设计知识领域本体。

(3) 钻具组合设计智能推理方法研究。使用本体推理机以及利用案例推理方法对构建的钻具组合本体进行推理，验证使用本体推理实现钻具组合智能设计的可行性。

(4) 实现钻具组合设计智能设计系统。对系统的功能结构和总体架构进行分析，研究系统各功能模块的设计方法和实现方法。

1.4 章节安排

论文的章节安排如下：

第一章 绪论。本章介绍了课题的研究背景及意义，对钻具模型库研究现状、钻具

组合设计方法、知识表示以及本体在钻井工程领域中应用的研究现状进行了介绍，给出了本论文的主要研究内容和相关章节安排。

第二章 背景知识介绍。本章介绍了知识表示研究背景，说明本体的概念、分类，分析本体建模特点，最后分析比较了本体建模方法中几种典型的本体构建方法。

第三章 基于本体的钻具组合设计知识模型。本章整理并提炼钻具组合设计方案与钻井设计说明书，从中整理抽取设计知识，提出基于本体的钻具组合设计模型架构，研究钻具组合设计知识的本体特性及建模方式，形成钻具组合的语义概念、关系及案例。应用 OWL 语言对钻具组合设计知识概念间的关系及属性进行定义，完成钻具组合本体知识库构建。

第四章 钻具组合智能辅助设计方法。本章详细介绍了基于本体的钻具组合智能设计方法，首先对已建成的钻具组合本体库进行本体映射，保证知识语义的一致性和构建相应的设计规则库，并构建钻具组合设计案例库，保存现有的设计方案，实现了基于钻具组合本体库的规则推理方法与 CBR 技术相结合的智能设计方法。

第五章 钻具组合智能辅助设计系统实现。本章介绍了系统的功能结构和总体架构，详细介绍了各个功能模块的设计方法、实现方法以及运行效果图，最后对开发过程中涉及的开发工具进行简要介绍。

本文最后对整个论文所做的工作进行了总结。

第二章 背景知识介绍

2.1 钻井工程设计

高质量的钻井是油气勘探开发的重要环节。钻井工程的质量是油气田开发的重要前提，直接关系到钻井效率与钻井成本。钻井设计的科学性是提高单井作业效益的重要因素。好的钻井设计是提高技术管理与实现科学钻井的重要前提，下面针对钻井设计的具体情况，对钻井设计内容、原则、方法进行介绍。

在钻井过程中，针对井眼轨迹设计，在综合考虑井眼稳定等各种因素的情况下如何确定合理的井身结构和钻具组合、钻头的选择以及在临井数据的基础上进行钻井参数的优选等这些问题都属于钻井工程设计内容，贯穿于钻井设计和钻进过程中的各个环节。这些问题概括起来钻井工程设计内容主要有：

- (1) 井身结构合理设计
- (2) 钻头、钻具组合设计及优化
- (3) 钻井参数设计
- (4) 固井工程设计

钻井工程设计需要依据地质设计，根据地质设计提供的钻探目的和要求、地层特性、岩性特征、地层剖面等资料，并提供邻井的油气藏复杂情况，编制合理的井身结构和套管程序，确定合适的钻具组合结构，选择合适的钻井参数，进而对钻头进行选型。在此地质设计基础上，按钻井工程总体设计程序框图 2-1 进行。

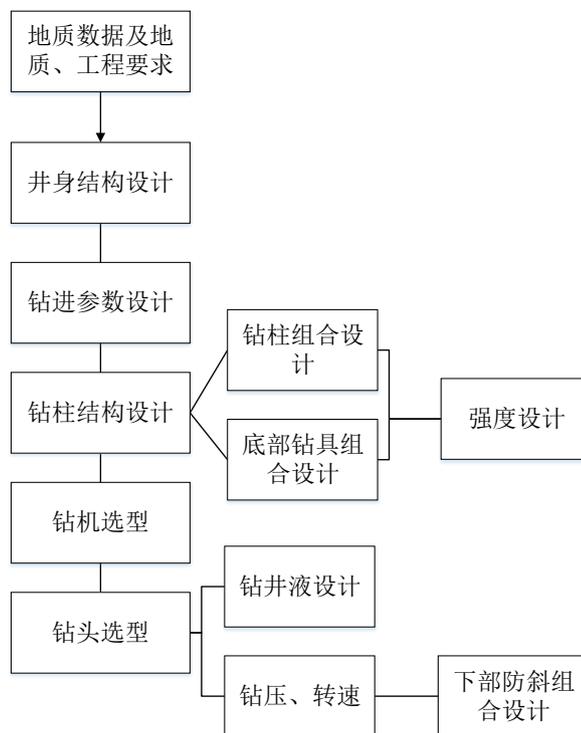


图 2-1 钻井工程设计程序图

Fig2-1 Drilling Engineering Design

钻具组合设计是快速和高质量钻探的重要条件，其设计的合理性直接影响钻井项目成败及其效益。论文研究钻井工程设计中的钻具组合设计，钻具组合设计包括钻头选型、钻柱结构设计两部分，其中钻柱结构设计又分为钻柱组合设计和底部钻具组合设计，如图 2-2 所示。如何运用知识表示方法合理有效的表示钻井工程设计过程是实现钻具组合自动化、信息化设计的重要内容。

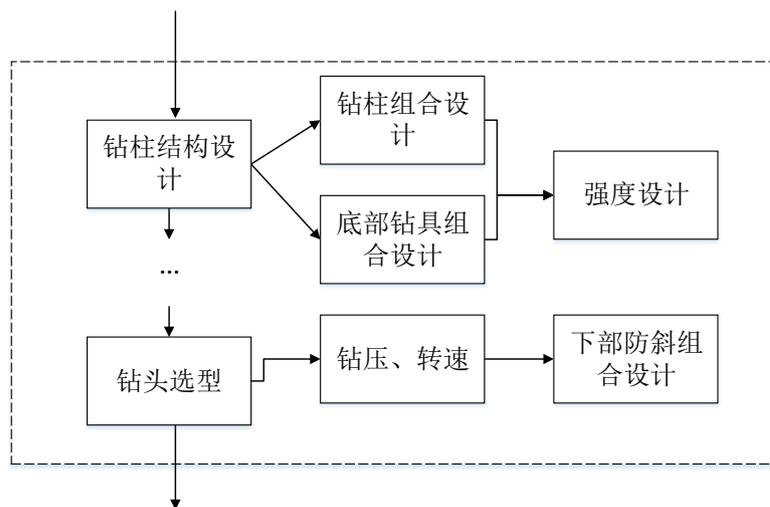


图 2-2 钻具组合设计程序图

Fig2-2 Drilling Assembly Design

2.2 知识建模

知识模型^[22]是指通过标准化的结构和形式对领域知识进行抽象表示。经典的知识系统使用的知识模型主要有产生式系统、框架、语义网络、面向对象的知识模型等^[23]。知识模型主要包括知识获取、表示与利用。好的知识模型是对应用领域知识的高度规范化、统一化，可以使领域专家更清楚了解知识系统，明确知识范围，保证知识一致性。

知识获取^[24]是指从领域专家和资料文献获取领域知识来构建知识库，是知识工程一个公认的难题。目前比较广泛的知识获取方法主要有：（1）通过收集领域专家的方案以及资料获取知识，利用知识表示存储到知识库中；（2）领域专家通过知识编辑直接将他们的知识和经验带入知识库，如 IBM 的 TextMinerE、OntoPrise 的 OntoEdit 等；（3）通过知识学习方法直接从广泛的知识中自动获取知识。

知识表示是知识模型最核心的部分。知识表示对知识模型的抽象以及对领域知识比较注重的几个方面建立一种好的描述，目标是分析并建立静态的和动态的领域知识模型。在知识系统开发过程中，知识模型的构建是概念化、结构化领域知识，是知识库核心的模型。近年来，知识表示方法已经取得了一定的成果并应用在较成熟的知识建模系统中，比较有代表性的知识表示方法有本体表示方法、面向对象法，所构建的知识系统框架主要有 KADS 模型、CommonKADS 模型等。然而，基于这些表示方法构建的知识模型仍然存在缺陷，主要表现在两个方面：表达的模糊性以及由于领域知识中复杂问题增加导致知识表示较繁琐。为了解决上述问题，专家提出了一个基于本体的知识模型。本体的引入保证了领域知识建模后的概念一致性和关系逻辑正确性，利用知识的重用，有利于知识系统标准化。因此，本体在知识工程研究领域中的应用比较广泛。

2.3 本体

2.3.1 本体概念

本体是一种广泛使用的知识表达方法，是对领域知识概念化、层次化的抽象描述，已经在很多领域都取得比较突出成果，如医学诊断领域等。本体是针对领域知识的基本概念以及关系的抽象表示，直觉上讲，本体是对领域知识的组织和表示，Guarino 和 Giaretta 通过对本体定义的分析，给出本体定义四方面含义：概念模型、明确、形式化、共享。本体建模是揭示出领域知识中各个元素（如实体，属性，过程等）以及各个元素之间的关系，对应了知识库中的事实和规则，并且用明确的标准化定义描述和表示出来，

本体建模实质就是对领域知识库的构建。本体的构建过程依赖于高质量的本体表示语言，目前，运用比较成熟的本体表示方法有：基于知识模型框架的语言、基于概念语义逻辑的语言、基于 XML 的本体描述语言。

2.3.2 本体分类

本体在很大程度上依赖于领域知识的概括与结构化描述，按概括程度从低到高，本体通常分为五种^[25]。

- (1) 领域本体：描述特定领域中的概念与关系。
- (2) 通用本体：描述几个领域中共有的知识。
- (3) 应用本体：描述的是对特定领域建模时所需的所有知识，从定义可以看出应用本体包含了领域本体与任务方法本体。
- (4) 表示本体：不包含具体的领域知识，提供一套通用的知识表示框架。
- (5) 方法和任务本体：用于描述特定任务中概念和问题的解决方法。

2.3.3 本体特点

在知识工程领域中，本体主要应用在传统人工智能和知识表示，已经在机械工程学、医学、生物信息、石油开发等众多领域中得到了广泛应用，这主要是由于本体具有以下突出的特点^[26]：

(1) 本体为领域知识提供一套结构化表示方法^[27]。本体可以描述静态对象，包括事物或概念的各个元素和这些元素之间的静态关系；它也可以描述事物或概念的动态关系。知识库可以使用这种本体结构来表达现场的大量复杂知识。

(2) 本体描述了领域中重要的实体、属性、过程及其相互关系，更加明确了隐含的领域关系，更加精确地界定了知识的概念和相互关系。

(3) 本体具有异构系统相互操作性^[28-30]。由于目前本体构建工具种类比较多，本体表示形式多样化，但本体是对领域知识的标准化，因此本体在不同的系统间是可以重用本体知识模型。本体为异构实体之间的信息交换提供结构化共识，保障了语义的一致性。

(4) 本体在功能上与数据库相似，但是本体所表达的知识与知识类型更加丰富。首先，本体语言比数据库语言可以表示的词汇和语义信息更丰富。本体严谨地描述了领域知识中的概念、概念间关系以及本体具有逻辑推理能，而数据库只是存放数据的结构。

(5) 本体复用、映射和集成等方法可以提高知识积累、知识搜索和知识共享的效

率，为领域本体在不同方面的应用提供有效手段和方法。

2.3.4 本体构建方法

本体知识表示是知识工程中研究热门，是对某个应用领域的知识标准化，其知识模型需要通过领域专家检验^[31-32]。因此，开发基于本体知识的应用，选择适合当前领域的本体构建方法是十分重要的。目前基于本体的知识系统中应用比较成熟的构建方法有：七步法、Methontology 法、TOVE 法、骨架法等^[28]。

Methontology 法^[28]本体构建方法是由马德里大学的 AI 实验室提出的，首先项目管理的第一阶段包括收集领域知识，分析设计任务等，然后详细设计阶段，将知识概念化，形式化，最后维护阶段主要包括整合和维护知识。

TOVE 方法^[28]是由多伦多大学 Gruninger 与 Fox 提出的，构建思路是首先设计本体的需求，然后通过需求分析非形式化的能力问题，规范化领域知识本体内概念，通过谓词逻辑定义概念间关系，建立知识模型，最后本体的维护与完善。

骨架法^[28]是 Uschold 和 King 提出的，主要步骤是首先确定本体应用领域的研究对象，其次通过整合分析领域内相关知识，对知识中的概念及概念间的关系，利用本体表示方法合理的表示。最后进行本体评估与完善，通过本体映射技术判断本体一致性与正确性。

七步法是由美国斯坦福大学医学院开发的^[28]，是目前最成熟的半自动化构建方法，设计思想是分析知识中的概念及概念间关系，将其定义为类和属性。构建流程如下：（1）确定需要建立本体的专业领域和应用范围；（2）考察复用现有本体的可能性；（3）分析领域知识中概念及关系；（4）定义类及类之间的关系；（5）定义类的属性；（6）定义类的分面；（7）建立案例。

目前，虽然本体知识系统应用比较广泛，但本体构建技术仍然处于研究初始阶段，通过介绍常用的四种本体构建方法，可以看出，这几种本体构建方法都存在一定的缺陷，如缺乏本体一致性检测、本体构建是否自动化，领域知识概念标准不统一等问题，这几种本体构建方法都不是自动化构建方法，但本体构建完成不可能随时扩充，因此需要循环改进方法完善本体知识库。表 2-1 给出几种领域本体构建方法在几个方面的比较，其中七步法与 Methontology 法是当前最流行的方法。

表 2-1 领域本体构建方法比较

Table2-1 Domain Ontology Construction Method Comparison

本体构建方法	生命周期	相关技术	本体应用	方法细节
IDEF5 法	无	不确定	多个域	详细
TOVE 法	无	不确定	一个域	少
Methontology 法	不完全	不全	多个域	详细
骨架法	无	不确定	一个域	很少
七步法	不完全	有	多个域	详细

2.4 本章小结

本章通过介绍钻井工程设计知识以及知识建模理论，研究基于本体的知识库原型，分析钻具组合设计知识表示其可行性，详细介绍了本体知识表示相关概念，类型、特点以及本体构建方法，比较本体构建方法的优劣。

第三章 基于本体的钻具组合设计知识模型

3.1 钻具组合设计知识介绍

钻具组合设计的核心任务^[2]是根据地质设计要求、钻井参数设计要求，结合钻具组合设计理论知识，设计出一套能与所钻地层和其他钻井工艺相适应的钻具组合。钻具组合设计是钻井工程设计中不可缺少的一部分，钻具组合设计主要涉及钻井的工程地质环境、钻进工具、钻井液，井眼轨道设计以及钻进参数设计等方面。

3.1.1 钻井的工程地质环境

钻具组合设计主要涉及的钻井工程地质条件是指与钻井工程有关的地质因素的整合^[33]。地质因素包括地层岩性特征，油气储量以及地层的工程力学性质，地质构造，地层流体参数和地层参数。钻井地质条件下的岩石工程力学性质是选择合适的钻具组合，确定最佳钻井参数的基础。

3.1.2 钻进参数设计因素

在钻井过程中，钻井的速度，成本和质量受各种因素的影响和约束，可分为可控因素和不可控因素^[34]。不可控因素指自然形成的客观因素，如被钻地层的岩性，埋藏深度和地层压力。可控因素是指可以通过某些设备和技术人为调整的因素，如钻具组合的设计类型，钻头的选择，钻井液的性能，钻压，速度旋转等等。因此，钻井参数的优化意味着在一定的客观条件下，根据影响钻进速度的不同参数，采用优化方法选择合适的钻井参数，使钻井过程取得最好的结果，即对于钻进参数选择应当与目前的地层岩性等客观条件相适应，如何将钻进参数与地层岩性这些不可控参数进行优选组合，是本体对钻具组合设计知识的重要内容。

3.1.3 井眼轨迹控制因素

井眼轨迹控制也是在钻具组合设计中需要考虑的重要因素^[33]。一般来说，实际钻井轨迹总会偏离设计轨迹，所以实际钻取的直井总会造成井斜，一方面是地质因素，主要是由于地层的各向异性，即地层的倾斜或者地层在各个方向上的可钻性不同，也是由于地层可钻性的垂直和水平变化所致，另一方面，是由于钻头受到侧向压力以及钻具组合会产生弯曲和倾斜。因此，在钻井过程中，需要使用底部钻具组合来影响钻头的方向前进方向达到轨迹控制的目标。

井眼轨迹指钻进过程所产生的井眼轴线，比较直观看来是一条的空间曲线。为了进行轨迹控制，需要了解空间曲线的形状，在钻进过程中每隔一定长度的井段测一个点，这些点简称测点，每个测点有三个主要参数，即井身三要素，也叫井轨迹基本参数，这三个参数包括方位角、井斜角和井深。

(1) 井深：也叫斜深，指钻孔到测点的井眼长度，是测点的基本参数，是井口到测点间的实际井眼轨迹长度，以字母 D_m 表示。

(2) 井斜方位角：指从正北方位线为始边，顺时针方向旋转至井眼方位线所经过的角度。

(3) 井斜角：指重力线与测点处的井眼轴线的切线之间的夹角。

(4) 垂深：指当前井眼轨迹的某个测点的水平面到井口的距离，即垂直井深。

(5) 井眼曲率：指井眼轨迹曲线的平均曲率。

井眼轨迹一般以整体坐标系来进行空间描述，如图 3-1 所示。可以由 N 坐标、E 坐标和 H 坐标来表示井眼轨迹上每个测点在空间中的位置，各方向上的坐标增量分别用 ΔN 、 ΔE 和 ΔH 来表示。图 3-1 表示的是一个 O-NEH 坐标系下的井眼轨迹。

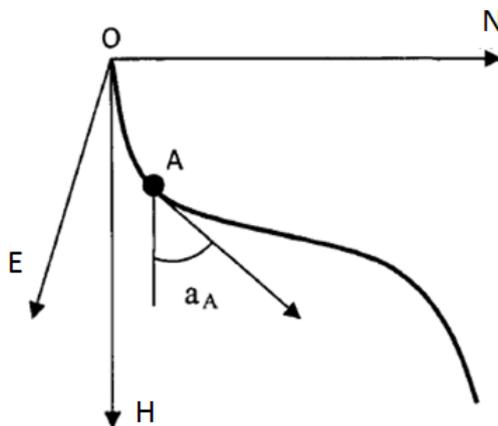


图 3-1 井眼轨迹示意图

Fig3-1 Well Trajectory

随着钻井工艺的发展，定向井与水平井工艺发展迅速，综合实际钻井设计，轨道类型主要有三段式、双增式、五段式等。在钻具组合设计过程中主要参考的轨道设计参数主要有以下参数如表 3-1 所示。

表 3-1 定向井轨道设计类型及参数

Table3-1 the Type and Parameters of Directional Well Track Design

轨道类型	给定的条件	关键参数
三段式	$D_t, S_t, D_{kop}, K_z, \theta_o$	$\alpha_b, \Delta D_{mw}$
多靶三段式	$D_t, D_{kop}, K_z, \theta_o, \alpha_t, \Delta D_{mm}$	$S_t, \Delta D_{mw}$
五段式	$D_t, S_t, D_{kop}, K_z, \theta_o, \alpha_t, \Delta D_{mm}, K_n$	$\alpha_b, \Delta D_{mw}$
双增式	$D_t, S_t, D_{kop}, K_z, \theta_o, \alpha_t, \Delta D_{mm}, K_{zz}$	$\alpha_b, \Delta D_{mw}$

表 3-1 中符号解释如下： D_{kop} —造斜点垂深，m； D_t —目标点或目标段入口点的垂深，m； K_z —造斜段的造斜率，($^\circ$)/30m； S_t —目标点或目标段入口点的水平位移，m； K_n —降斜段的造斜率，($^\circ$)/30m； θ_o —轨道设计方位角； α_t —目标段井斜角，($^\circ$)； ΔD_{mm} —目标段长度，m； K_{zz} —双增轨道的第二增斜段的造斜率，($^\circ$)/30m； α_b —稳斜段井斜角，($^\circ$)； ΔD_{mw} —稳斜段长度，m。

3.1.4 钻进工具因素

在钻井工程中，钻具和钻头的选择是一个非常重要的问题。钻具组合与钻头的选型是否适应于岩性和其他钻井条件，将直接影响钻井速度，钻井质量和钻井成本^[35-36]。随着钻井技术的发展，材料和机械制造业的发展，钻具组合的设计，制造和使用方面取得了很大的进展。随着钻井工具种类和使用范围不断扩大，钻具组合设计方案也不断增多，钻具组合结构优选在钻井过程中更为重要。

3.1.5 钻具组合设计知识特点

通过以上对钻具组合设计知识的收集与整理分析，可以看出钻具组合设计知识具有以下特点：

(1) 知识具有价值，比数据或信息更接近行动。钻具组合设计是钻井工程设计中技术上困难和非常重要的环节，特别是井眼深度的增加，以及钻井工艺的发展，更使钻具组合设计成为钻井工程关键问题之一，因此钻具组合设计相关知识更具有价值。

(2) 知识具有复杂性。通过对钻具组合设计知识分析可以看出，钻具组合设计与钻井地质因素以及井场设计参数之间的关系相互交叉重叠。另外，钻井工程是一项隐蔽

的地下工程，由于地下环境比较复杂，提供的信息和数据往往是不确定、模糊的，这也会导致钻具组合设计过程中出现大量的模糊性，随机性和不确定性问题。

(3) 多源异构性。钻井设计知识来源于钻井工程设计、钻井专家经验、现场钻井工作人员的操作流程等，知识来源比较广泛、多源化。这些知识存储形式繁杂多样，工程设计图纸、钻井工程设计书、现场人员操作手册等，造成钻具组合设计知识利用率低。

以上是钻具组合设计知识特点，为实现钻具组合智能设计，需要对钻具组合设计知识合理表示与运用，利用合适的知识表示方法对设计知识结构化、标准化进行描述。因此，需要考虑如下问题：一是采用哪种知识表示方法能有效的表示钻井设计知识；二是针对设计知识多源异构问题，采用哪种标准形式化描述钻具组合设计知识，实现设计知识库的扩展。解决上述问题主要关键在于领域知识的规范化表示，结合上章描述的本体的特点，本文尝试将本体表示技术应用到钻机组设计领域，明确设计知识概念及概念间的关系，对语义逻辑关系抽象化表示，解决钻井设计知识多源异构性问题。

3.2 钻具组合设计知识表示模型

3.2.1 CommonKADS 知识模型

目前，知识系统框架构建方法比较流行的是知识获取与设计构造（Knowledge Acquisition and Design Structuring, 简称 KADS），并进一步发展形成 CommonKADS^[37-39]。目前，许多领域中比较成熟的知识系统应用都采用的是 CommonKADS 的模型架构，例如李云峰在钻井故障分析领域采用 CommonKADS 模型建构钻井故障知识、故障原因及修复方法的知识库，提供钻井复杂情况诊断系统，另外还应用于机械设计、企业知识建模、过程控制、飞机夹具设计等方面，有些已进行实用。

CommonKADS 的主要特点包括：

(1) 提供多模型划分任务

CommonKADS 知识工程方法学的核心主要是 KADS 提供的各种支持知识分析和开发的中间模型，根据任务发分为组织模型、任务模型、主体模型、知识模型、通信模型、设计模型六种模型，各模型之间的关系如图 3-2 所示。每一个模块都是专家知识系统中必不可少的，各个模型除解决自己特定的任务外，还应相互协调，组织模型任务模型、主体模型分析知识的语境，知识模型与通信模型提取知识中的概念语义，设计模型是知识系统的说明。

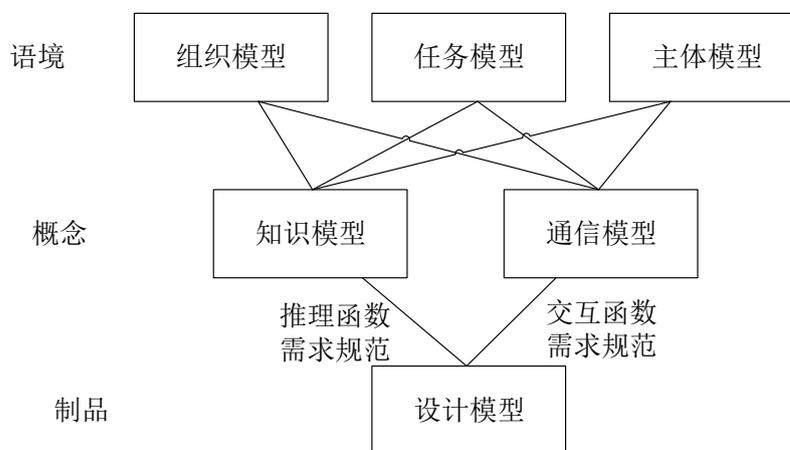


图 3-2 CommonKADS 模型关系图

Fig3-2 CommonKADS Model

(2) 层次化的专家模型

KADS 方法提出了构建层次化的专家模型，能更好的对源知识中领域知识、推理知识、任务知识进行划分^[38]。层次化的专家模型主要分为三层：领域层主要对领域知识中的概念、概念属性、概念之间的关系、概念事实以及规则知识类型的结构化、抽象化描述；推理层描述了利用领域层的知识，根据知识角色通过一定的逻辑推理关系进行推理的过程，推理知识主要包括推理，知识角色和传递函数；任务层描述根据任务知识中的目标，通过多次控制知识分解将任务分解，进而被推理层所调用。任务通常分层次描述，直到最底层的推理和功能。

专家模型的三层结构通过知识映射相互关联，其中领域层里的知识与推理层的知识角色相对应，而任务层的任务对应推理层的推理，如图 3-3 所示。例如，可以将相同的领域知识映射为不同层次的任务和推理。当然，反过来也一样。因此，层次化的专家模型可以最大化知识的重用^[38]。

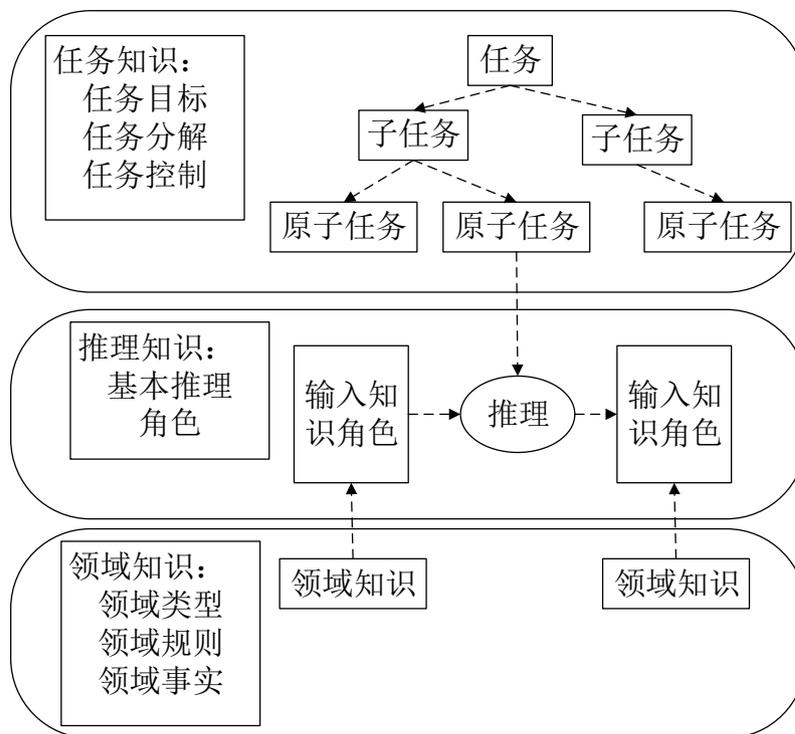


图 3-3 专家模型结构

Fig3-3 the Structure of Expert Model

(3) 标准化设计方法

由于应用领域源知识来源不同，容易导致知识概念混淆或设计知识冗余。因此，设计模型需要统一的标准化设计方法，即尽可能规范描述术语，设计模型尽可能真实反应领域知识概念结构。

钻具组合设计具有基本的静态组成结构和动态组成结构，静态组成结构主要针对钻具模型、井场参数等设计元素，包含了设计知识概念间的结构，是任务层控制知识分解的基础。钻具组合设计知识的复杂性取决于每个设计知识概念的结构，设计知识特征的多源异构性以及特征之间连接的灵活性，这些都是钻具组合设计知识模型的研究内容。

3.2.2 钻具组合设计的知识模型

通过分析钻井工程设计相关知识，构建了钻具组合设计的知识模型，如图 3-4 所示，表明钻具组合设计过程中的概念本体（领域层）、方法本体（推理层）和任务本体（任务层），通过规则推理以及抽象化匹配方法求解问题。

任务层对应任务本体，定义了钻具组合设计任务，也就是在已知井场参数、地质条件下，输出设计方案。任务层主要是通过领域层和推理层来实现。领域层对应 CommonKADS 中的概念本体，钻具组合设计的概念本体中主要包括钻具组合结构、钻

井参数、地质参数，这些都是钻具组合设计的基础知识。推理层对应的则是方法本体，主要通过该层对钻井参数、井场参数以及地质参数进行抽象化，然后通过规则推理或案例匹配得到可能的设计方案，也可以通过对钻具组合特有的结构进行分析，也就是通过物理学与力学知识对其进行纵横弯曲梁法进行有限元分析得到设计方案，这样便与任务层有效结合起来。

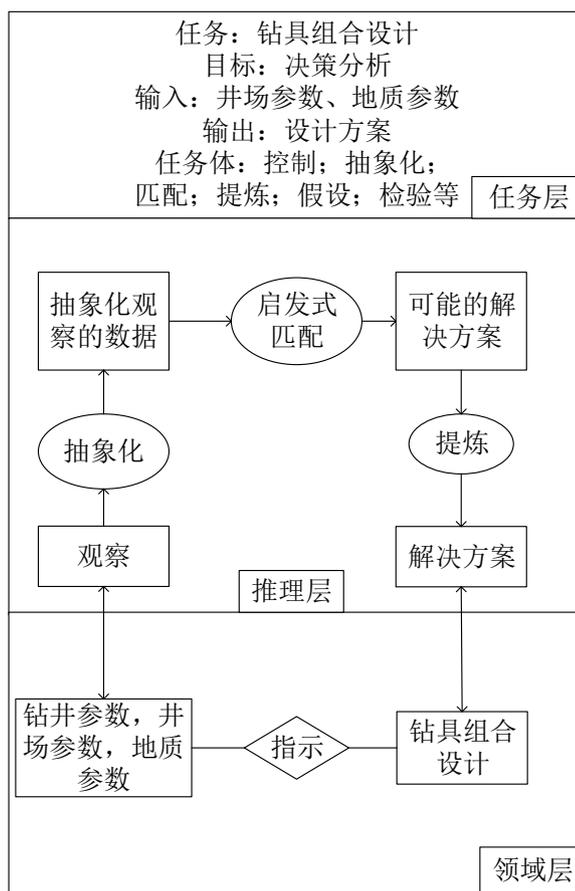


图 3-4 钻具组合模型层次结构

Fig3-4 the Structure of Drill Assembly Model Hierarchy

3.3 钻具组合设计知识表示方法

3.3.1 本体构建方法

本文主要针对钻井工程领域知识的特点，提出了构建钻具组合设计情况的知识本体的具体新思路，主要是通过结合七步法与迭代法，通过设计文本自动构建出钻具组合设计知识相关本体，并通过增加循环改进操作，构建较为完善的知识本体。本体的特点在于知识的集成、共享和重用，本体的构建需要有标准化的表示方法和规范化的工作步骤。

本文所采用的本体构建方法主要是通过收集已经开采的油田的钻井工程设计参数，

对其中的钻具组合设计方案进行规范化、评估，并收集钻具组合设计知识中专家设计经验，从而达成一系列开发目标，并逐步增量地建立并完善钻具组合设计知识本体。主要是通过核心开发活动的重复应用，包括对已有条件参数、设计方案定义及其实现的连续细化，在实现过程中是一个迭代完善的过程。因此，论文通过迭代完善的方法，可以及时发现本体知识构建的缺陷，通过多次迭代过程，弥补存在的不足和错误，从而构建出较为完善的钻井领域知识。

3.3.2 领域知识表示方法

钻具组合本体是对钻井设计领域知识、专家设计经验知识结构化、抽象化描述。其表示的是设计领域内共同认可的知识、公理，对概念知识结构化表示，有效的表示设计理论知识与专家经验知识。本体通常由概念、关系、函数、公理和案例五种基本元素构成^[38-39]。钻具组合设计领域知识本体的设计主要在于设计知识概念集合、概念间关系、设计知识公理集合，设计案例集合，其中将钻具组合设计函数作为特殊的关系进行表示。因此，钻具组合设计知识本体模型可描述为一个四元组 $\{C, R, A, I\}$ ，其中：

(1) C 表示钻具组合设计知识的概念集合，包括地质参数、井眼参数、钻具模型、钻具组合案例等。

(2) R 表示设计知识概念间的关系集合。主要包括关联关系，如钻具组合设计影响因素有地质因素；继承关系，如增斜井段是井身结构的子类；组成关系，如钻具组合由钻头、钻杆和扶正器等组成；同义关系，如扶正器又叫稳定器等。关系集合中仍存在其他复杂关系，如案例关系、逻辑推理关系等。

(3) A 表示钻具组合设计中公理的集合，主要指在钻井设计知识中永远成立的声明，如涡轮钻具与螺杆钻具同属于动力造斜钻具。

(4) I 表示钻具组合设计知识领域内概念和关系的案例集合，如某油田中一口井的钻具组合设计记录。

3.4 钻具组合设计知识概念本体

本体之间可以相互映射，而且本体设计应当遵循高内聚、低耦合的原则^[40-41]，由于钻井的工程地质条件属于客观存在的因素，不依赖于钻具组合结构而独立存在，所以将钻井的工程地质条件单独建立相应的本体，即钻井地质因素本体。

井眼轨迹控制也是钻具组合设计过程中需要考虑的重要因素，钻具组合设计的主要

目的便是控制钻井达到目的层，主要描述了井眼轨迹设计的几种类型，并分析出某井段的参数，隶属于哪种定向井的井段，显然，不同的井段将使用不同的工具，将有不同的轨迹控制方法，利用钻具组合对定向井以及水平井的跟踪控制好靶点，完成轨迹控制。同时，井眼轨迹设计参数不依赖于钻具组合设计结构的变化而变化，具有普遍性，因此需要对井眼轨迹设计参数进行建立本体，称为井眼参数本体。

钻具组合结构主要是由单个钻具通过接头或丁卯组合起来的，单个钻具都有各自的特点，同时单个钻具也有不同的类型，对于多种钻具组合起来，便可以组成功能特性不一的钻具组合结构，钻具组合结构主要是由钻头以及底部钻具组合（也就是位于钻头之上的钻具组合）组成，因此，本文需要建立钻进工具模型，以便计算机在此基础上结合前述的井眼参数本体，地质参数本体进行钻具组合结构设计。

因此，本文将钻具组合设计涉及关键因素本体分为以下几个部分，钻井地质因素本体、井眼参数本体、钻进工具模型本体。

3.4.1 钻井地质因素本体

钻井地质因素在钻具组合设计中起重要作用，主要考虑地层可钻性的各向异性对井斜产生的影响，需要对地质参数的属性进行建模表示。影响钻具组合设计的地质参数中主要包括地质特征、油气层信息、地层岩性特征信息等。地质特征包括地层的各向异性与纵向变化，是产生井斜的重要因素，同时地层岩性的可钻性与物性会产生地层方位漂移，此时设计钻具组合需要考虑钻具组合的增方位效应与地层方位漂移效应，否则会使所钻轨迹偏离目标点。

对于地质信息本体的构建主要分为地下压力和岩石的工程力学性质两个方面。因此将地质信息本体表示为{地下压力，岩石工程力学}，如图 3-5 所示。

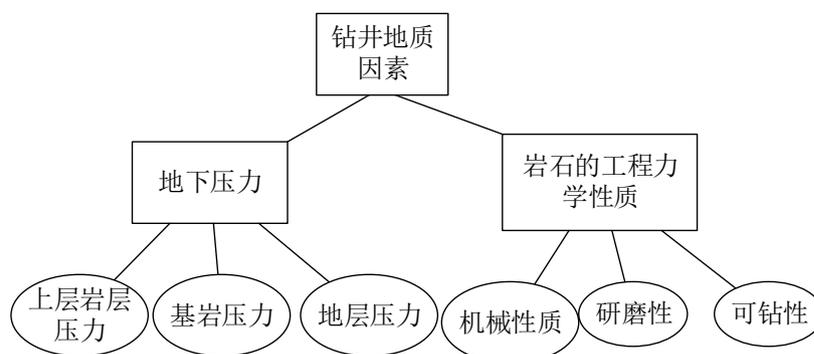


图 3-5 钻井地质因素本体概念图

Fig3-5 Drilling Geological Factors Ontology Concept

地质信息主要包括地下压力特性以及岩石的工程力学性质，地下主要有以下压力：上层岩层压力、地层压力、基岩压力三种，钻井工程设计和现场钻井施工都是以地层压力和地层破裂压力为基本依据，因而必须对它们进行科学有效的知识表示及评价，所以地下压力特性定义为{上层岩层压力，地层压力，基岩压力}。地下压力压力使用孔隙度，伽马属性，地层压力梯度、深度等属性表示。岩石的工程力学性质主要定义为{可钻性，机械性质，研磨性}，机械性质可用强度、脆性和塑性等属性表示。

3.4.2 钻井参数本体

钻井参数本体可以表示为{钻井状态，井身结构数据，钻井液}，主要的概念模型如图 3-6。

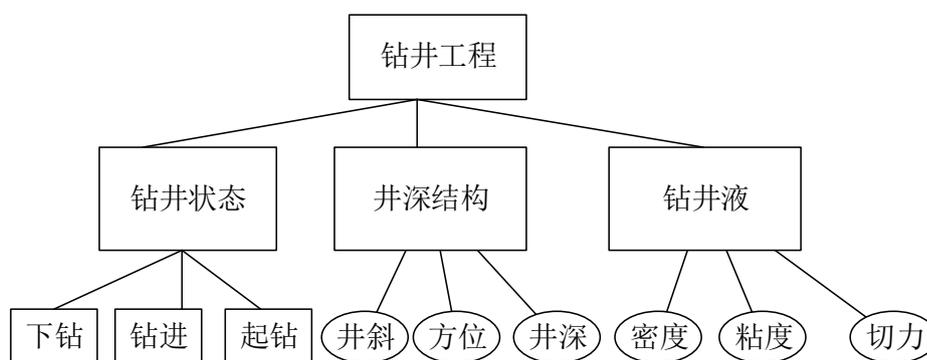


图 3-6 钻井工程设计因素本体概念图

Fig3-6 Drilling Engineering Design Elements Ontology Concept

3.4.3 钻进工具模型本体。

钻进工具是组成钻具组合的基本单位，钻进工具知识本体应能对工具模型的属性和使用情景进行建模表示。因此，工具模型知识本体表示为{三维模型，基本信息，功能参数，特征参数}，如图 3-7。工具模型的三维模型主要包括三维建模软件建立的钻具三维实体模型、钻具三维模型创建的特征参数集合以及钻具尺寸与特征参数之间的关系。工具模型的基本信息主要包括钻具名称、钻具尺寸（钻具内外参数）、钻具成本。功能参数包括几何类型和功能类型，功能类型主要分为防斜、造斜、动力等。特征参数包括强度、钻速，强度主要包括抗拉屈服程度、抗扭屈服程度、抗弯程度等。

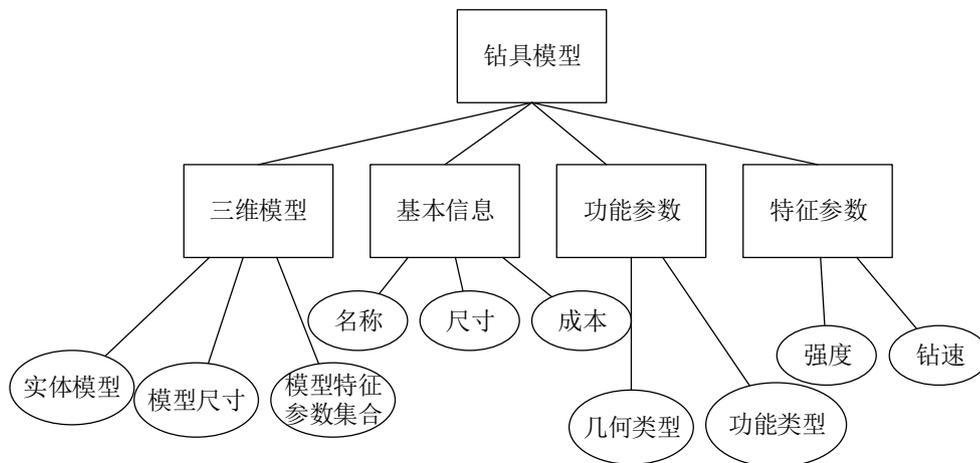


图 3-7 钻具模型本体概念图

Fig3-7 Drill Model Ontology Concept

上述所列的概念模块是钻具组合设计应用领域中起主要作用，除此之外，需要一些其他的概念模块如井下复杂情况分析钻具组合可能出现的故障。各个概念模块不是独立存在的，每个模块与其他模块相互协调，从而实现钻具组合设计。

3.4.4 本体关系与属性分析

本体概念间的关系分析，通过对钻具组合设计知识涉及的概念进行分析，发现概念间的关系主要有以下几种：

(1) Part-of 关系即部分与整体的关系，例如钻进工具稳定器便是增斜钻具组合结构中一部分。

(2) Kind-of 关系即类别上的从属关系，如三维模型便是钻具模型中的一个概念。

(3) Instance-of 关系即案例关系，例如钻井状态分为下钻、起钻、钻进三个状态。

(4) Attribute-of 关系即属性关系，如岩石特性有机械特性、研磨性、可钻性等。

(5) Infer(x, y) 关系表示两个概念间的逻辑推理关系，通过这个关系可以挖掘领域内产生式规则，如增斜井段需要用增斜钻具组合。

在构建本体时，仅定义一个类是不够的，还需要在本体中定义概念，属性和概念间的关系。对于本体中概念属性的定义，需要确定该属性是属于哪个类的属性插件。下面论文将描述几个常见的属性类型，属性的类型描述的是对属性插件赋值的类型，概念属性的赋值数量通过属性基数表示。

(1) 字符型指概念属性中术语赋值类型，如地层的一些特性用字符表示。

(2) 数值型指概念属性中可以通过数字表示的赋值类型，描述的是某概念属性的

数值，如井眼轨迹参数井深、方位角、井斜角的数值。

(3) 布尔型指是或者否，如地层的可钻性参数。

(4) 枚举型是列举某个属性有几种类型。例如，描述某深度井段属性类型：造斜，降斜、稳斜、水平段。

(5) 案例型定义了属性间的关系类型。

以增斜钻具组合为例说明本体间关系，某一种增斜钻具组合为塔式钻具组合，结构为：钻头+近钻头稳定器+无磁钻铤+MWD/LWD+钻铤+稳定器+钻铤+稳定器+钻铤+随钻震击器+加重钻杆+钻杆。塔式钻具组合相关概念、概念属性（约束）及概念之间的类属关系，其表达形式如表 3-2。

表 3-2 增斜钻具组合表达形式

Table3-2 Incremental Drilling Rig Combination of Expression

名称	描述
ID	http://www.semanticweb.org/ontologies/Ontology1490315915110 owl#增斜钻具组合
Father	增斜钻具组合
Child	钻具集合信息（钻头、稳定器、钻铤...）、基本信息（名称，尺寸...）、功能参数（微增斜井段...）
Relations	Relation-to（增斜钻具组合，地层参数）、Part-of（增斜钻具组合，稳定器）、Infer（增斜钻具组合，井眼增斜井段）...
Attribute	（对象属性，地层压力，unite），（对象属性，增斜，unite）...

其中 ID 为领域本体中增斜钻具组合概念本体的唯一标识符，利用概念本体和关系集描述领域概念，定义自上而下纵向的一个层次分类关系。

利用 Protégé 本体构建工具所构建的钻具组合设计概念本体以及属性关系图如图 3-8:

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/10611313121011011>