

# 石油钻井机械钻速扭矩自动控制方法的应用及经济性分析

段崇卫 (中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 近年来, 随着经济快速增长, 国内石油需求显著上升, 石油行业亟需提高产能和生产效率。钻井作业中, 钻速和扭矩的控制至关重要。传统钻井依赖司钻人员经验手动控制, 存在精度低、波动大、人为因素影响大等问题。随着科技发展, 自动控制方法应运而生, 旨在提升钻井效率、降低成本、增强安全性。本文分析了现有技术的局限性, 研究了核心技术及控制因素, 并通过模拟验证了自动控制在提高效率、降低成本、增强安全性方面的显著效果, 从而提升企业经济效益。

**关键词:** 钻井机械; 钻速; 扭矩; 自动控制; 经济性

中图分类号: TE92 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 012-0073-03

## Application and Economic Analysis of Automatic Control Method for Drilling Speed and Torque of Petroleum Drilling Machinery

Duan Chongwei (Changqing Drilling Company of China Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710018, China)

**Abstract:** In recent years, with rapid economic growth, domestic oil demand has significantly increased, and the oil industry urgently needs to improve production capacity and efficiency. The control of drilling speed and torque is crucial in drilling operations. Traditional drilling relies on manual control by drillers, which has problems such as low accuracy, large fluctuations, and significant human factors. With the development of technology, automatic control methods have emerged, aiming to improve drilling efficiency, reduce costs, and enhance safety. This article analyzes the limitations of existing technologies, studies core technologies and control factors, and verifies the significant effects of automatic control in improving efficiency, reducing costs, and enhancing safety through simulation, thereby improving the economic benefits of enterprises.

**Keywords:** drilling machinery; Drilling speed; Torque; Auto-Control; economic

据统计, 2023 年中国石油需求占全球石油需求总量的 16%, 成为全球石油需求量增长最快的国家之一, 国内石油需求增长量约占全国 50% 左右。同年, 石油原油和成品油的消费量也快速增长, 前者较 2022 年增长 2.1%, 后者较 2022 年增长 15.5, 全年石油整体消费较 2022 年增长 11.5%。国内石油需求增长量也在 2024 年达到了顶峰状态, 较上年再次增长 0.3%。国内石油需求量的快速增长迫切需要石油行业规模的扩大和技术的转型升级, 特别是对钻进机械钻速的提升及自动化控制水平的提升提出了极高的要求。研究该课题对于了解钻进机械钻速改进原理及自动控制方法技术水平的提升和企业的经济发展有着重要的意义。

### 1 技术重难点

#### 1.1 重点

钻进机械钻速扭矩自动控制改进的重点在于, 提速的同时要保持机械本体的平稳运行。这涉及到钻机机械系统设计的稳定性、可靠性。在设计自动控制器及参数调整上, 一定要控制好工作输入量和输出量的误差及变化率。设计自动控制器时可根据输入输出量大小建立规则控制表, 通过参数的自动调整来对钻进线路进行预判。

#### 1.2 难点

钻井机械钻速扭矩自动控制改进的技术难点在于对精度的控制上。石油钻井时, 需要对钻速和扭矩通过自动控制器的自动调整, 使参数始终保持在精确控制的误差范围内, 从而减少钻井过程中的波动, 从而确保钻速、钻井效率的提升和钻进线路的准确性。

### 2 核心技术

#### 2.1 自动控制技术

自动控制技术是石油钻井机械钻速扭矩自动控制及提升钻进效率的核心技术。它能辅助实现自动驾驶、自动化控制与虚拟技术应用等。在钻速扭矩自动化控制设计中, 融合软测量、多传感器信息融合、信号测量与处理等技术。传感器采集信息传输给系统, 系统根据钻速优化模块约束和优化钻进参数以控制钻速扭矩。作业时, 闭环优化策略为钻速优化提供约束, 以最小化的 CSS 和 HMSE 为优化目标调整参数。实际案例里, 自动控制技术融合智能控制算法、自学习与优化等技术, 提供决策支持、参数测量、自锁装置与控制系统等。在其他技术辅助下, 实现钻速扭矩自动化、智能化控制, 提高石油钻井效率和精准度, 有力支持石油产量提升与稳定。

## 2.2 虚拟存储技术

虚拟存储技术随云计算、云存储发展，二者融合为石油钻机机械自动化控制的数据库和平台构建提供支撑。虚拟存储技术可辅助数据动态扩展、分层管理钻井数据。基于其设计的数据库有自动保护模式，遇病毒等异常能确保系统安全和数据完整。该技术下数据容错性提升，能为钻速扭矩自动化管理提供精准数据、规避风险，保证参数调整精准与机械平稳运行。在石油钻井机械管理领域，常基于虚拟存储、大数据、物联网搭建云计算平台进行自动化分析。虚拟存储技术整合分层数据，设定不同标准作为管理参考参数，进行结构化处理和参数自动化调整。钻井时，通过随钻测量数据的机器学习算法分析，识别预测问题并提供决策意见指导设备自动优化操作以降事故。

## 2.3 智能勘探技术

智能勘探技术在钻井机械钻速扭矩自动控制方法中体现在多方面。如精准定位等，精准定位结合 GPS 技术，实际生产中技术融合应用。钻速智能优化基于井下目标参数整合分析与大数据计算，以多种模型为基础、元启发式算法优化参数。井眼轨道智能优化依靠三维模型与实时监测数据。智能决策与闭环控制集成多种模块功能进行随钻参数处理。数字孪生与自动化控制系统融合技术，设计井筒环境感知法来调整优化参数。与传统相比，智能勘探技术整合钻井信息，实现智能化勘探数据相关操作与钻井机械无人值守管理。这提升了钻井效率和安全性、石油产能，降低人工成本，推动石油钻井向数字化、智能化转型。

## 3 影响钻速的因素

### 3.1 钻具及组合方式

不同的钻具的钻进特点和优势不同，因此不同钻具组合后的钻进优势也各有差异，就会影响到石油钻井机械的钻速。此外，各类钻具在不同的地质环境下钻进的表现方式也各有不同，会影响到钻进的轨迹，而钻头的轨迹变化也会间接的影响到钻进速度。因此不同钻具的组合对于石油钻井机械钻速扭矩也有影响。在进行设计时，可以根据各个石油钻井口的地质条件来设计钻具的组合方式，选择井口钻进轨迹准确度高、给进速度较快的钻具组合方式钻孔，来优化钻速扭矩自动控制的水平，提升钻进效率和质量。

### 3.2 钻头

各类型钻头的设计是为了克服不同的地质条件下钻井需要，同时以提高钻井速度和掘进轨迹的准确性。在参数自动调整控制器的设计时，可以结合施工区域的地质条件和钻井的深度科学的选择钻头，提升钻进速度。一般，在给进到较深的区域时，可以为钻头增

加螺旋杆的设计，以此来强化对于钻头的控制。

### 3.3 钻井液

钻井液是影响石油机械钻井速度的另外一项重要因素。钻井液对于钻速扭矩的影响主要取决于钻井液中固相含量和密度的高低。当钻井液固相低时，钻速就高；当钻井液固相高时，钻速就低；当钻井液密度低时，钻速就高；当钻井液密度高时，钻速就低。事实上，钻井液的固相高低与其密度的高低紧密相关。钻井液固相的高低会直接影响钻进口的状态，进而影响到钻井液的密度，而密度就间接的影响到钻头的磨损程度。一般高固相的钻井液会致使井口呈现封闭状态，是钻井液密度变浓。高浓度的钻井液循环状态较差，致使钻头形成较大的摩擦力。在巨大摩擦力条件下，不仅会加剧钻头的磨损速度，缩短其使用寿命，还会对钻头形成钻进阻力，降低钻速。

## 4 改进方法

### 4.1 准确描述环境

钻速扭矩的自动控制需要建立在准确的地质工况及岩土信息描述基础上而实施。由于不同工况条件下钻进机械面临的钻进压力、压强存在差异性，且这种差异体现了分层化的特点。石油气层也具有分层化特点。这些都需要在准确描述岩土环境的基础上建立数据模型，并进行全面的整理分析和分层分析，才能设定进一步的钻头参数。这里就需要应用到智能勘探技术。智能勘探技术通过智能检测、智能导向、闭环控制、智能决策在钻井作业过程中发挥准确描述环境的功能，利用前端实时采集的数据整合分析后，通过智能优化算法分析和计算下一步准确的钻井参数，为更新和建立数据模型提供精准可靠的参数。

### 4.2 应用组合式钻进技术

在进行钻井机械操作管理平台及系统设计时，一定要充分考虑实际的工况环境下不同钻头的优势，选择最适合实际钻井作业条件的钻头形式进行组合。同时，要重点考虑钻头及其他设备的材料对环境的适应性，选择耐腐蚀性强、耐磨性强，各项综合性能整体更为优越的材料为设备的材料。此外，对于钻井设备各关键参数点设置智能传感器，应用互联网、物联网、大数据、云计算、虚拟存储等技术设计管理平台，关联 PLC 操作处理平台，来实现对于组合式钻井技术及其技术参数的自动化、智能化管理。

### 4.3 优化设备与钻井液技术

设备与钻井液的优化也是实现钻井机械提速和精准控制的必要条件。在钻井机械钻速扭矩自动控制方法的设计中，需要根据钻井液、钻头的实际表现分析对于钻速的影响，并在进一步分析实时地质环境的基

础上自动调整钻井液，使其固相和密度达到最适合钻头高速且平稳前进的参数状态，达到钻井液、设备及其实时钻井作业环境的高度匹配。

## 5 钻速扭矩自动控制方法的设计

### 5.1 模型的建立

钻井机械钻速扭矩自动控制模型是通过钻速传感器电流矢量的传递来确定电流量，调动变频调速装置，间接传递电流矢量来实现对扭矩与钻速工作的自动化控制。在实际的钻进作业中，钻速受多因素影响，因此设定时需要结合实际工况设定不同参数。这就需要辅助杨格模式设定钻速、扭矩，进行参数修正。参数修正公式参考公式 1：

$$\text{公式 1: } V = C_o Q_i R_n (P - P_o) n^\lambda \left( \frac{1}{1 + R_o m} \right)$$

公式 1 中的  $V$  表示钻速，单位为  $\text{r/s}$ ； $C_o$  表示电流矢量； $Q$  表示电力参数影响系数； $P$  表示钻压，单位为  $\text{kN}$ ； $P_o$  表示门限钻压力，单位为  $\text{kN}$ ； $n^\lambda$  表示转盘转速，单位为  $\text{r/min}$ ； $R_n$  表示钻头齿轮磨损系数； $m$  表示钻头齿轮磨损质量。

钻速扭矩参数参考公式 2：

$$\text{公式 2: } V_s = C W_s - C P_{o(s)}$$

公式 2 中的  $V_s$  表示钻进速度； $W$  表示扭矩。

### 5.2 参数自动调整及控制的设计

参数自调整自动控制是基于 PID 控制器而设计出的具有自动处理送钻模型参数的功能。PID 处理器本搭载数据模型优化处理设计，能够根据工况及设定的条件、标准参数，辅助 PAD 控制器进行数据推理，准确的描述送钻模型，自动调整出新的参数，作为钻头的送转路线。这种设计的优点在于智能推理、智能决策，对于数据分析处理的容错率低，因此有利于提高送钻的精准度和送钻速度。

## 6 石油钻井机械钻速扭矩自动控制方法的经济性分析

### 6.1 成本节约

①减少人工成本。自动控制系统能够长时间稳定运行，无需人工持续干预，从而减少了对司钻人员的需求，降低了人工成本。此外，自动控制系统还能够避免因人为失误而导致的钻井事故，进一步节约成本。②提高钻井效率。通过精确控制钻速和扭矩，自动控制系统能够优化钻井过程，提高机械钻速，减少非生产时间。这意味着在相同时间内能够钻更多的井，或者减少单井的钻井周期，从而提高整体生产效率，降低单位成本。例如，如果原本每天钻井进尺为  $100\text{m}$ ，钻速提升后每天能达到  $120\text{m}$ ，那么在一个钻井周期内就可以减少作业天数，节省了诸如钻机租赁、人员作业等每天的固定成本。③

降低维护成本。自动控制系统能够实时监测设备的运行状态，预测潜在故障并及时进行维护，从而减少因设备故障而导致的维修成本和停机时间。此外，精确的控制还能够减少钻头和其他井下工具的磨损，延长其使用寿命，进一步降低维护成本。

### 6.2 投资回报

①初期投资。大数据平台需要强大的服务器来支撑数据的存储和运算，数据库管理系统的开发和维护也需要专业人员和软件工具，这些都会产生硬件购置、软件授权、人员工资等费用。随着技术的发展，自动控制系统的成本逐渐降低，同时其带来的经济效益却显著增加。②运营成本。自动控制系统确保钻头轨迹的准确性和钻机机械本体的平稳可靠运行也会带来经济效益。准确的钻头轨迹可以减少因轨迹偏差而进行的修正操作，避免了额外的时间、材料（如钻头磨损、钻井液浪费等）成本。钻机机械本体的平稳可靠运行减少了设备故障维修成本和因故障导致的停工损失。③收益增加。在短期内，可能由于技术融合和平台系统建设需要投入大量资金，成本会显著增加。但是如果能够快速实现钻速的提升和减少设备故障等效益，那么成本的回收速度会加快。例如，在钻井的前期几个月，如果能够通过提高钻速提前完成部分进尺任务，就可以开始逐步回收前期投入的成本。从长期来看，随着技术的成熟和应用的推广，单位钻井成本会逐渐降低。因为钻速的持续提升、准确性和可靠性的保障会使得每米钻井成本在整个钻井作业的生命周期内不断下降。而且，这种自动控制方法的成功应用可以为企业在石油钻井市场中赢得更多的竞争优势，带来更多的业务机会，进一步提高企业的经济效益。

综上所述，石油钻井机械钻速扭矩自动控制方法通过建立自动送钻模型、智能控制系统和执行系统，实现了对钻速和扭矩的精确控制。这种自动控制方法带来了显著的经济效益，包括成本节约和投资回报。通过分析可以看到，自动控制系统在实际应用中大幅提高了钻井效率，降低了成本，并增加了石油开采的收益。随着技术的不断发展，石油钻井将更加智能化、自动化和环保，进一步推动石油行业的发展。

### 参考文献：

- [1] 王永夏. 石油旋挖钻井机械钻速自动控制方法 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(02): 103-105.
- [2] 夏斌, 蔡冰, 贾荣荣. 石油钻井机械钻速扭矩自动控制方法分析 [J]. 中国设备工程, 2022(15): 212-214.

### 作者简介：

段崇卫 (1982-)，男，汉族，陕西三原人，大学本科，中级工程师，研究方向：石油工程，钻井专业。