关于井下牵引机器人的物理仿真与力学分析

王鸿锴[1],陈冬[1],王暾[1],张洪宝[2],叶智慧[1]
1. 中国石油大学（北京）
2. 中国石化科学技术研究中心

摘要

井下牵引机器人是一种安装在测井、射孔或修井工具串前端的自驱动装置，其核心作用是解决传统电缆或钻杆输送方式的局限性。其工作环境极端，给设计与可靠性评估带来了巨大挑战。传统的经验设计和单场分析方法难以准确预测其在实际井筒中的结构特性与牵引性能。本研究基于 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真平台，对一款电动轮式牵引机器人进行了全流程的建模仿真与性能预测，建立了牵引机器人的几何模型，并系统性地研究了其核心物理过程。牵引机器人在运动过程中，伸缩臂可根据井筒尺寸自适应调节角度。将模型简化为二维结构，可以更直观地观察伸缩臂角度自适应调节的过程。在水平井、大斜度井和复杂结构井中，牵引机器人依靠自身动力牵引工具串在井筒中前进、后退和定位，克服重力与摩擦阻力。使用 APP 开发器进行模拟器设计，将各项力简化拆分并设置为入口参数，可实现不同地层条件下牵引器的性能预测。本研究充分展示了 COMSOL Multiphysics 在解决复杂机电系统耦合问题方面的卓越能力，所建立的模型为井下牵引器的结构优化、控制策略制定及可靠性前瞻性设计提供了强有力的理论工具和设计依据。

关键词：牵引机器人；多物理场仿真；性能预测；结构优化。

简介

随着油气勘探开发目标转向更复杂、更难开采的储层，传统的直井和定向井已无法满足需求，大位移水平井、多分支井成为主流。在这种复杂的井眼轨迹中，传统输送方式效率低下、风险高，甚至根本无法将工具送达指定位置，严重制约了油气田的勘探开发效益[1]。井下牵引器的发展，是市场需求牵引和技术进步推动共同作用的结果。它源于开发复杂油气藏对长水平井、大位移井的迫切需求，旨在解决传统作业方式在工具输送和钻压传递方面的根本性难题。从最初的简单构想，到如今成为智能井下作业的核心装备，井下牵引器的演进深刻地改变了石油工业的面貌，并将继续向着更智能、更高效、更可靠的方向发展。

井下牵引器即井下爬行器,也叫井下爬行机构、井下拖拉机、井下牵引机器人、井下水力加压器、井下钻头推进器等,是一种能在井底提供牵引力的井下工具。根据驱动原理和结构形式，井下牵引器主要可分为：轮式牵引器、伸缩式牵引器、履带式牵引器[2]。轮式牵引器是目前应用最广泛的类型。其核心原理是通过电机驱动液压泵，使多个呈周向均匀分布的支撑臂伸出，驱动轮压紧井壁。电机动力通过传动系统传递给驱动轮，依靠齿轮与井壁之间的摩擦力实现牵引器本体的移动。

以斯伦贝谢（Schlumberger）、贝克休斯（Baker Hughes）、哈里伯顿（Halliburton）等为代表的国际油服公司，在牵引器技术领域处于绝对领先地位，其产品已实现系列化、商业化，并广泛应用于全球各大油田[3]。斯伦贝谢的 TuffTech 系列牵引器是轮式牵引器的典范，它采用了坚固的传动系统和高效的液压单元，提供了极高的推靠力和牵引力，能够在不规则井眼和恶劣工况下稳定工作。其自适应控制系统能够实时监测电机负载和推靠臂压力，自动调整输出，以防止打滑和卡阻。

	MaxTRAC Family		TuffTRAC Family		
	MaxTRAC	POH5	TuffTRAC-Xtra	TuffTRAC- Mono	TuffTRAC- Ultra
OD, in	2-1/8	2-1/2	3-1/8	3-1/8	3-3/8
Typ. Length, ft (#drives)	32	40	17.4 (3)	21 (3)	19 (4)
Min. Length, ft (2 drives)	32	40	10.5	15.2	11
Max Configuration	3	3	8	6	8
Surface Power	DC	DC	AC	DC	AC
Cable Type	Any	Any	Heptacable	Any	Heptacable
Max. Force (lbs)	1000	1000	2400	1800	2800
Max Speed (ft/hr)	2500	1800	3200	2400	3200
Temp. Rating	150 C	150 C	175 C	150 C	175 C
Max Borehole ID	9	9	10.6	10.6	14.5
OH Applications	Yes (OH Kit)	Yes	No	No	Yes
Perforating Applications	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
Logging while Tractoring	Yes	Yes	No	Yes	No

图 1 斯伦贝谢牵引器性能对比

国内牵引器技术起步较晚，但近年来在国家重大科技专项和市场需求的双重驱动下，发展迅速，已从原理样机研制走向现场试验和应用阶段。目前已在西南、长庆等油气田进行多次应用，在应用水平井射孔上有着广阔的应用前景[4]。

COMSOL 仿真流程

1. 几何模型

以常用的斯伦贝谢 TuffTrac 井下牵引机器人为例，其核心工作原理是通过电机驱动支撑臂伸出，使齿轮与井壁接触并产生足够的正压力，从而利用摩擦力实现牵引器本体的移动，属于轮式牵引器。使用 COMSOL 零件库外齿轮 spur_gear 零件作为齿轮，几何结构设计如图 1 所示。

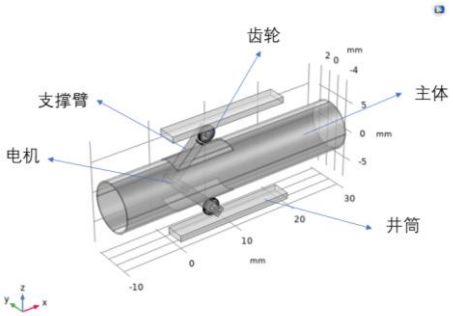

图 2 牵引机器人几何结构

2. 材料设置

将井下牵引机器人各零部件与井壁材料均设置为高强合金（High-strength alloy steel），后续可根据需求更改材料类型或相关属性。

材料属性明细

属性	变量	值	单位	属性组
密度	rho	7850[kg...	kg/m³	基本
相对磁导率	mur_is...	1	1	基本
恒压热容	Cp	475[J/(k...	J/(kg·K)	基本
导热系数	k_iso ;...	44.5[W/(...	W/(m·K)	基本
电导率	sigma...	4.032e6...	S/m	基本
相对介电常数	epsilo...	1	1	基本
热膨胀系数	alpha_...	12.3e-6[...	1/K	基本
杨氏模量	E	200[GPa]	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	0.30	1	杨氏模量和泊松比
Murnaghan 三阶弹性模量	l	-300[GPa]	N/m²	Murnaghan
Murnaghan 三阶弹性模量	m	-620[GPa]	N/m²	Murnaghan
Murnaghan 三阶弹性模量	n	-720[GPa]	N/m²	Murnaghan

图 3 材料属性

3. 物理场设置

此仿真过程本质上是一个强耦合的多物理场问题，主要涉及多体动力学，并可能扩展到流体动力学、热力学以及电磁学。通过固定约束限制井筒的位移；将牵引机器人主体外壳隐藏，以便于通过铰链关节连接电机与支撑臂、支撑臂与齿轮；将电机简化为支撑臂外部的零件，并通过棱柱关节相连接。

4. 网格构建

在划分网格前，使用 “形成联合体”或“形成装配体”功能。对于复杂部件，可将其分割为更简单的几何域，以便分别控制网格。这允许我们对支撑臂、井壁等不同部分应用不同的网格设置。对于支撑臂表面、齿轮表面、以及与它们接触的井筒内表面优先进行网格细化。

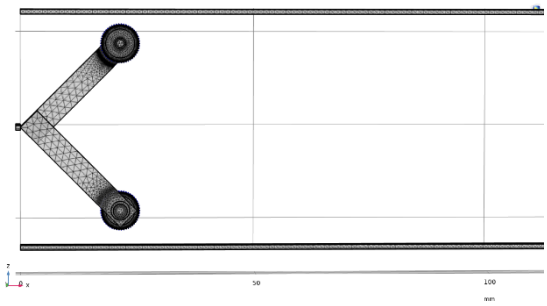

图 4 网格构建

控制方程的使用

对于像牵引机器人这样由多个关节连接的部件组成的系统，多体动力学提供了比单纯的结构力学更高效、更专业的仿真方法。它的核心思想是描述整个系统的整体运动，而不是专注于每个部件的细微变形。

1. 刚体动力学的控制方程

对于系统中的刚体部件，我们假设它们在任何载荷下都不会变形。其运动完全由质心的平动和绕质心的转动来描述。假设齿轮运动过程不发生磨损，将其设定为刚性材料，其运动过程符合下述方程描述。

平动方程（牛顿第二定律）：

$$\boldsymbol{m}\ddot{\mathrm{r}}_c = \mathrm{F}_{ext}$$

$\boldsymbol{m}$：刚体质量

$\ddot{\mathrm{r}}_c$：刚体质心的加速度矢量

F_{ext}：作用在刚体上的所有外力的合力

转动方程（欧拉方程）：

$$\mathrm{I}_c\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathrm{I}_c\boldsymbol{\omega}) = \mathrm{M}_{ext}$$

I_c：刚体在质心坐标系下的惯性张量

$\dot{\boldsymbol{\omega}}$：刚体的角加速度矢量

$\boldsymbol{\omega}$：刚体的角速度矢量

M_{ext}：作用在刚体上的所有外力对质心的合力矩

2. 关节方程

关节的作用是限制部件之间的相对运动。它们通过代数约束方程来实现。电机与支撑臂之间，支撑臂与齿轮之间都需要设定关节约束完成仿真。

通用约束方程形式：

$$\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}$$

$\mathbf{q}$：系统的广义坐标。

$\boldsymbol{\Phi}$：一组描述约束的代数方程。

将上述所有方程组合起来，就得到了描述整个多体系统的微分-代数方程组（DAE）：

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) \\ \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0} \end{cases}$$

$\mathbf{q}$：是整个系统的广义坐标向量。

$\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}$：是约束方程关于广义坐标的雅可比矩阵（$\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial \mathbf{q}}$）。

λ：是拉格朗日乘子，其物理意义代表了关节为了维持约束而产生的作用力和力矩。这对于分析支撑臂驱动机构的受力至关重要。

使用时间积分算法来求解这个强耦合系统。

仿真结果与讨论

1. 牵引机器人自适应调节

牵引机器人的“自适应”指的是它能够自动感知并适应变化的井筒环境和井壁条件，实时调整其支撑臂的输出力或位移，以维持所需的牵引力，同时避免对井壁造成过度损伤或自身卡死[5]。在长水平段，工具串因重力效应摩擦井壁，无法靠自重有效下放工具，此时牵引机器人电机工作，调节支撑臂伸展以齿轮接触井壁并达到足够法向应力。

选取牵引机器人法向工作平面，将其简化为二维模型。通过铰链关节，连接支撑臂与电机并设置铰链关节的作用力，在支撑臂上施加 Z 轴方向作用力，使得支撑臂绕 Y 轴产生旋转，直至齿轮接触井筒。由图 2 所示，在齿轮与井壁接触前，支撑臂向贴近井壁方向移动，齿轮不产生相对运动；在齿轮与井壁接触后，齿轮轴向运动，牵引整体向前，支撑臂运动方向跟随齿轮转动向前。

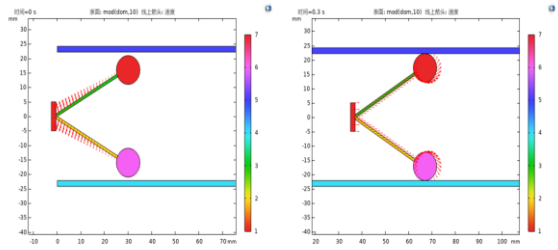

图 5 牵引机器人二维运动方向

2. 牵引机器人力学参数分析

井下牵引器的力学参数分析，是其设计、优化、安全可靠运行及作业成功的基石。这项工作贯穿于产品研发、仿真模拟、现场作业方案制定和事故分析的整个生命周期。

牵引器的根本任务是产生足够的牵引力，以克服工具串在井筒中前进时遇到的各种阻力。通过分析最大可用牵引力与预估总阻力的平衡关系，可以判断牵引器是否能够完成预定作业。

牵引力源于支撑臂与井壁间的摩擦力。力学分析可以建立推靠力、摩擦系数和牵引力之间的定量关系。通过分析，可以确定在不同井况下，需要施加的最小推靠力，以确保牵引力有效传递，防止驱动轮空转打滑，导致作业停滞。当施加过大推靠力时，可能导致齿轮磨损加快。将推靠力设置为关于时间的函数值，随时间增大而增大。由于物理模型材料类型为理想刚性材料，在不考虑磨损的情况下，当速度增长至稳定后，推靠力达到需施加的最小值。

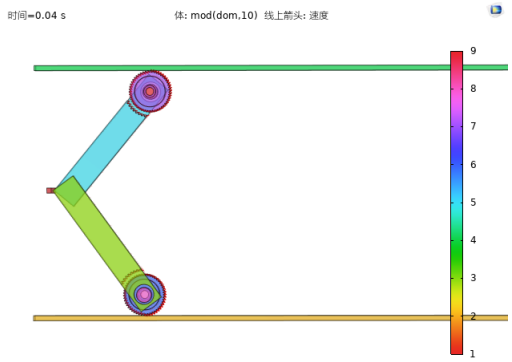

图 6 牵引机器人瞬时速度

当所需推靠力达到最小值后，可以调节齿轮转动角速度 Omega，实现在不同角速度下，单组牵引机器人在无阻力条件下可达到的最大牵引速度。

3. 牵引机器人模拟器 APP 开发

将包含牵引器复杂几何、物理场设置、材料属性、求解器和后处理的仿真模型，封装成一个具有直观界面的应用程序。避免了重复建模和设置错误，确保了仿真结果的一致性和可靠性。

将井筒直径设为 D，牵引机器人自身动力分解为对推靠力 Fz 与齿轮转动的角速度 Omega，将工具串摩擦力简化为施加在牵引器上与运动方向相反的作用力 Ff，齿轮与井筒的摩擦力通过摩擦系数 mu 的设定实现模拟。

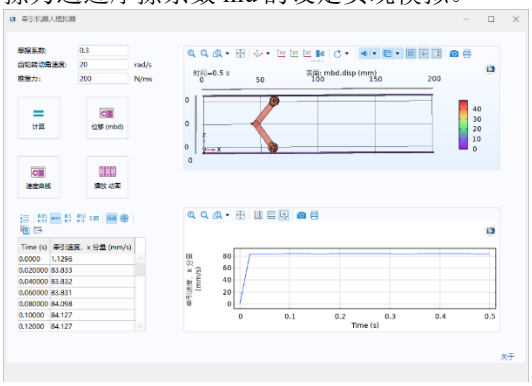

图 7 牵引机器人模拟器界面

结论与展望

通过 COMSOL Multiphysics 对井下牵引机器人进行多物理场耦合仿真，建立了牵引机器人的物理模型，描述了牵引机器人整个系统的整体运动。通过对牵引机器人自适应调节过程的模拟，可以实现所需最小推靠力的预测。在理想条件下，井下牵引机器人推靠力达到需要施加的最小值后，齿轮以 50rad/s 的角速度转动，牵引速度可以达到 210mm/s，实现初步仿真目标。本研究所建立的模型，可以满足对井下牵引机器人工作整体运动的仿真，可以实现

牵引性能的初步预测，为后续的结构优化、控制策略制定及可靠性前瞻性设计提供了强有力的理论工具和设计依据。

未来研究可在磨损、电磁与热力学三大领域耦合创新，推动井下牵引器技术迈向新一代智能化与高可靠性。具体将聚焦于：1) 建立钻井液环境下考虑力学-化学耦合的磨损模型与寿命预测方法，突破寿命瓶颈；2) 开发基于电机电磁信号的无传感器状态感知技术，实现推靠力与故障的实时自诊断，减少对物理传感器的依赖；3) 构建系统级热模型揭示极端工况下的生热与传热机理，并提出主动热管理策略，解决热失效风险。 最终有望开发出具备“数字孪生”能力的下一代牵引机器人，它能实时感知自身状态、预测剩余寿命、智能调整工作模式，从而大幅提升作业成功率与经济效益，为开发更深、更复杂的油气资源提供关键装备支撑。

参考文献

[1]. 李湘涛,秦羽乔,陈四平,等.水平井测井仪器输送技术及其应用[J].石油机械,2014,42(08):98-102.
[2]. 白杨杰.智能一体化井下牵引器设计与研究[D].西安石油大学,2024. 000554.
[3]. 侯学军,高德利,沈忠厚.微小井眼连续油管钻井牵引器系统结构设计[J].石油钻采工艺,2013,35(02):1-5.
[4]. 庞鹏飞,张鸿杰,严梓桐,等.水平井射孔技术中井下牵引器改进与应用[J].石化技术,2025,32(05):270-272.
[5]. 高胜,孙文,倪晗,等.石油井下牵引器设计现状及几点认识[J].机械设计,2014,31(02):1-8.

致谢

感谢中国石油大学（北京）学科前沿交叉探索专项资助（2462024XKQY010），“Supported by Frontier Interdisciplinary Exploration Research Program of China University of Petroleum, Beijing (Grant No.2462024XKQY010)”。
感谢 COMSOL 提供的此次交流活动。