第37卷 第11期 中国机械工程 Vol.37 No.11
2026年11月 CHINA MECHANICAL ENGINEERING pp.2685-2697

井下牵引器技术研究现状与展望

高 胜 夏俊博* 郑雪滢 陈 永 王素玲
东北石油大学机械科学与工程学院,大庆,163318

摘要:为进一步梳理国内外井下牵引器商业化应用及样机研制现状,从行进分式、生产应用、动力源形式三个角度对井下牵引器进行分类,从行进方式的角度对井下牵引器技术的发展历程进行回顾,对井下牵引器支撑机构的结构形式进行梳理。归纳总结了不同形式井下牵引器的参数,对比分析了不同结构形式、控制方式、可靠性等方面的性能指标。探讨了目前井下牵引器技术面临的关键挑战,并对井下牵引器的未来发展趋势进行了展望。

关键词:井下牵引器;井下作业工具;研究现状;发展前景
中图分类号:TE9
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research Status and Prospects of Downhole Tractor Technology

GAO Sheng XIA Junbo* ZHENG Xueying CHEN Yong WANG Suling
School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318

Abstract: To further clarify the commercial applications and prototype development status of downhole tractors worldwide, the downhole tractors were classified according to mode of movement, production application, and power source type. From the perspective of locomotion modes, the development history of downhole tractor technologies was reviewed, and the structural configurations of supporting mechanisms were systematically summarized. The parameters of different types of downhole tractors were compiled and analyzed, and the performance characteristics of various tractor designs were compared in terms of structural configuration, control methods, and reliability. Meanwhile, the key challenges currently faced by downhole tractor technology were discussed, and the future development trends of downhole tractors were outlined.

Key words: downhole tractor; well intervention tool; research status; development prospect

0 引言

近年来随着油气资源开采难度的不断上升,钻完井技术正逐步向大斜度井与水平井发展,井下作业工具的输送方式也随之不断发生变化。早期高斜度井及水平井作业中,主要依靠重力下入连续油管,连续油管在下入过程中易出现的螺旋屈曲和锁死问题,限制了井下作业的下入距离[1]。为此,井下牵引器作为一种能够提供轴向牵引力、扩大作业范围的井下机械装置,被引入井下作业体系[2]。经过三十多年的发展,井下牵引器目前已经能够实现在长距离、大斜度等复杂井段中的极限牵引[3],可作为关键输送单元在测井、射孔、压裂及井下检修等作业中输送井下作业工具[4-7],并在钻井、井下铣削等作业中施加轴向钻压[8-9],在井下作业中发挥越来越重要的作用。

现有井下牵引器文献研究集中于井下牵引器的工作原理,对近十年来国外商业化产品演进、我国产品商业化进展及科研层面关键技术发展的梳理相对缺乏。基于此,本文对井下牵引器技术的发展研究现状进行了全面综述,首次系统性梳理了现有牵引器支撑机构的结构形式,对不同牵引器的性能参数进行了对比,并基于现有技术研究对目前井下牵引器技术所面临的挑战和未来发展方向进行了总结。

1 井下牵引器研究现状

1.1 井下牵引器的分类

井下牵引器存在多种分类方式,如图1所示,可以从行进方式、生产应用、动力源形式三个角度进行分类。

从行进方式的角度分类,井下牵引器可分为连续驱动式牵引器和伸缩式牵引器[10]。连续驱动式牵引器通过与井壁持续接触产生连续轴向移

收稿日期:2026-03-17
基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1406506)

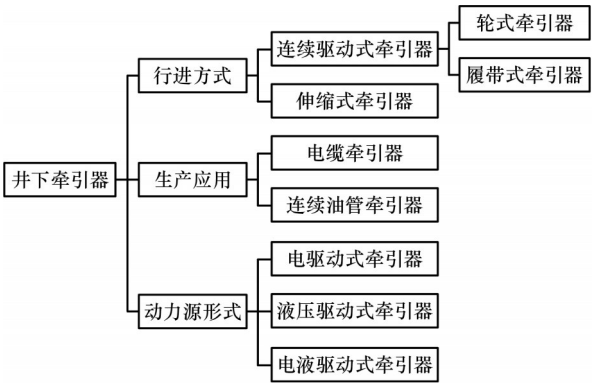


图1 井下牵引器分类

Fig.1 Classification of downhole tractors

动，以轮式牵引器居多。轮式牵引器通常配备一对或多对可旋转的驱动臂将驱动轮压紧井壁，通过驱动轮与井壁之间的摩擦力来实现牵引动作。伸缩式牵引器通常配备两组及以上的支撑机构，依靠前后支撑机构交替锚定、释放来实现步进式移动，并通过伸缩机构交替伸出、缩回来实现牵引动作。

从生产应用的角度分类，井下牵引器可分为电缆牵引器和连续油管牵引器。电缆牵引器起源于满足高效、低成本的工具运输需求，在早期水平井及大斜度井作业中，可替代连续油管牵引器应用于部分连续油管作业[11]。电缆牵引器通过电缆进行供电与控制，主要针对牵引力需求较低的作业，其设计侧重于运行速度、可靠性及经济性，通常应用于测井、电缆完井及井下干预作业。同时，随着连续油管作业向超长水平段及高摩阻井段拓展，为克服连续油管下入过程中出现的螺旋屈曲问题，连续油管牵引器被研发并投入使用。连续油管牵引器依托连续油管液压通道驱动，在连续油管末端提供轴向作用力，其设计目标在于提供大牵引力以扩大连续油管作业范围，因此较电缆牵引器运行速度低，侧重于高负载状态下维持稳定性及可靠性[12]。

此外，从动力源形式的角度分类，井下牵引器可分为电驱动、液压驱动、电液驱动三种[13]。

上述三种分类方式并非完全独立，连续驱动式牵引器的行进过程连续、速度稳定，通常以电缆牵引器为主；而伸缩式牵引器因其运动特性能够产生较大牵引力，工程中多与连续油管作业相结合。电缆牵引器通常采用电驱动形式，该方式响应速度快；而连续油管牵引器针对大牵引力的需求往往采用液压驱动或电液驱动的形式。

1.2 国内外研究现状

国外井下牵引器技术较早开始发展，Jørgen Hallundbæk等于1987年率先提出井下牵引器技术[14]，发展至今国外井下牵引器技术的商业化已较为成熟，Welltec、Schlumberger(SLB)、Western Well Tool(WWT)公司的产品是主流产品。我国在井下牵引器技术方面起步较晚，但具备较大的发展潜力。早期在引进国外技术的基础上开展科研攻关，现阶段部分轮式牵引器已进入商业化应用阶段，如西安威盛、武汉海王公司的产品。伸缩式牵引器研究主要依托高校及科研院所进行样机研发，2025年西南石油大学联合川庆钻探公司开展了我国首次连续油管爬行器现场试验[8]。

1.2.1 国外研究现状

1.2.1.1 连续驱动式牵引器

Welltec公司基于Jørgen Hallundbæk等提出的井下牵引器技术创立，1994年起对井下牵引器进行研发试验，目前商业化的井下牵引器为Well Tractor系列与PipeSnake系列[14]。Well Tractor系列牵引器以电缆牵引器为主(图2a)，搭载两组交叉布置的驱动臂，通过推杆控制驱动臂开合，驱动臂末端装有驱动轮，当驱动轮压紧井壁时可以产生牵引所需的支撑力[15]。PipeSnake连续油管牵引器于2020年推出，并于2025年对牵引器整体结构进行优化设计[16]，该系列牵引器通过驱动轴旋转带动驱动轮滚动，沿井壁形成螺旋轨迹从而实现连续移动。

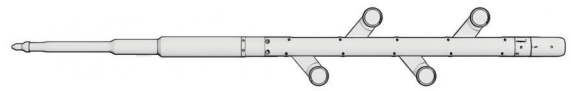
SLB公司自1996年起推出多款井下牵引器，在其轮式电缆牵引器产品中，TuffTRAC系列于2007年推出(图2b)；UltraTRAC系列于2010年推出，目前已不作为主力产品[17]。TuffTRAC系列牵引器分为TuffTRAC、TuffTRAC OH、TuffTRAC iX三种型号，该系列牵引器驱动臂采用对称布置方式，通过推杆推靠实现驱动臂旋转，驱动轮与井壁接触后实现牵引动作[18]。

Baker Hughes公司目前商业化的轮式牵引器有PowerTrac系列、PowerTrac PRIME系列及SondeTrax系列[19]。PowerTrac PRIME系列牵引器于2019年推出，围绕电缆牵引器建立智能化平台，搭载安全模块及扩展模块，提高了井下作业的可靠性。SondeTrax电缆牵引器[20](图2c)于1998年在澳大利亚投入使用，该型号牵引器采用两组对称布置的驱动臂[21]，通过连杆驱动使驱动轮与井壁接触从而实现牵引动作[22]。

履带式牵引器的研制主要停留在技术验证阶段，该类型牵引器目前均没有商业化产品的相关报道。ChainTrain公司与Maritime Well Service(MWS)公司于2004年研制了一种链传动履带式牵

引工具(图2d),该牵引器采用三组履带机构,通过连杆机构使链条履带与井壁接触实现牵引动作[23]。SLB公司于2005年提出了另一种链传动履带式牵引器[17],该牵引器通过螺杆带动履带转动,连杆机构通过控制履带与井壁接触来实现牵引动作。

科罗拉多矿业大学William Fleckenstein团队研制的井下牵引器如图2e所示。该团队于2019年研制了一种伸缩轮式井下牵引器[24],该牵引器装配有多组可伸缩的轮式驱动机构,通过驱动轮带动牵引器主体旋转,沿井筒轴线方向移动。后续该团队进一步开发了搭载温压传感器的耐高温式电缆牵引器,采用模块化结构设计,支撑机构采用连杆机构与驱动轮相结合的方式,有效地提升了井壁适应性。



(a)Well Tractor轮式牵引器



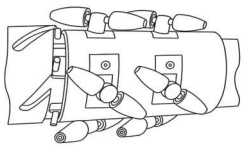
(b)TuffTRAC轮式牵引器

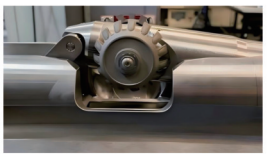


(c)SondeTrax轮式牵引器



(d)MWS公司履带式牵引器





(e)科罗拉多矿业大学牵引器:伸缩轮式、耐高温式

图2　国外连续驱动式牵引器

Fig.2　Overseas continuous-drive tractors

1.2.1.2　伸缩式牵引器

WWT公司于1998年推出了首款液压驱动式连续油管牵引器,目前商业化的伸缩式连续油管牵引器有ELG系列(图3a)、EEG系列(图3b)、ERG系列(图3c)及Milling牵引器[25]。ELG系列牵引器的支撑机构采用偏心连杆式设计,每组仅有一个支撑机构,牵引器工作轴线不位于井眼中心,从而可减小牵引器外径以适应不同井眼[26]。EEG系列牵引器主要应用于裸眼井,支撑机构采用高膨胀抓爪型连杆机构设计[27]。ERG系列牵引器支撑机构采用连杆机构结合弹簧片的方式,该牵引器在弹簧片内侧安装了滚轮组件,滚轮在推杆作用下沿连杆曲面滚动,使弹簧片产生弯曲从而支撑井壁[28]。

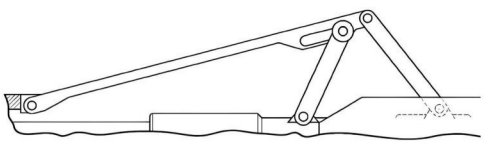
Omega公司及SmarTract公司曾推出伸缩式电缆牵引器。前者于1999年推出,采用纯机械设计,通过弹簧驱动具有锥面的斜块,驱动轮在斜块上移动并带动杆件张开以实现支撑动作[29]。后者于2000年在加拿大投入使用,其支撑机构由三连杆机构组成,通过液压驱动杆件使卡瓦与井壁锚定以实现支撑动作[30]。

SLB公司于2002年推出MaxTRAC伸缩式牵引器(图3d),并于2010年推出TerraTRAC OH伸缩式牵引器(图3e),两者均为电缆牵引器[17]。MaxTRAC牵引器的支撑机构采用五连杆机构设计,由中央杆件、水平杆件、斜杆件构成,五连杆机构通过水平杆件动态调整与井壁的角度,同时将水平杆件与凸轮自锁机构相结合,从而保持支撑机构与井壁稳定接触[31]。TerraTRAC OH牵引器适用于裸眼井,该牵引器的支撑机构采用五连杆机构设计,整体结构轻薄紧凑,通过模拟尺蠖来实现牵引动作,在低强度地层中可以保持高效推进[32]。



(a)ELG伸缩式牵引器

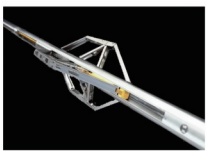




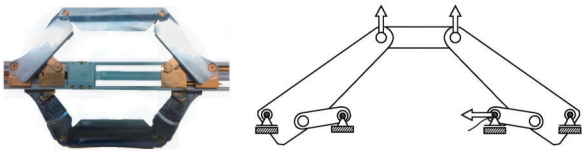
(b)EEG伸缩式牵引器



(c)ERG伸缩式牵引器



(d)MaxTRAC伸缩式牵引器



(e)TerraTRAC OH伸缩式牵引器

图3　国外伸缩式牵引器

Fig. 3　Overseas telescopic tractors

1.2.2 我国研究现状

1.2.2.1 连续驱动式牵引器

2005年起，我国高校及科研院所逐步开启井下牵引器的相关研究。中国石油大学(华东)高进伟团队于2005年研制了一种轮式自适应管道爬行器(图4a)，该牵引器具有四组驱动臂，采用平行四边形驱动臂设计[33]。

哈尔滨工业大学唐德威团队于2005年研制了一种轮式油井检测仪器拖动器，该牵引器采用双路并联同步驱动机构，将推靠电机与驱动电机相对布置[34]。后续同校的刘文剑团队于2008年研制了一种水平井牵引机器人(图4b)，该牵引器交叉布置两组驱动臂，动作电机与驱动电机于同侧布置[35]。

西安威盛公司于2010年申请了一项电机驱动轮式井下爬行器专利[36]，目前商业化的轮式牵引器为Well-sun牵引器(图4c)[37]。该牵引器的行进方式与SondeTrax电缆牵引器行进方式相似，同时Hunting公司所使用的井下牵引器由该公司生产与供应。

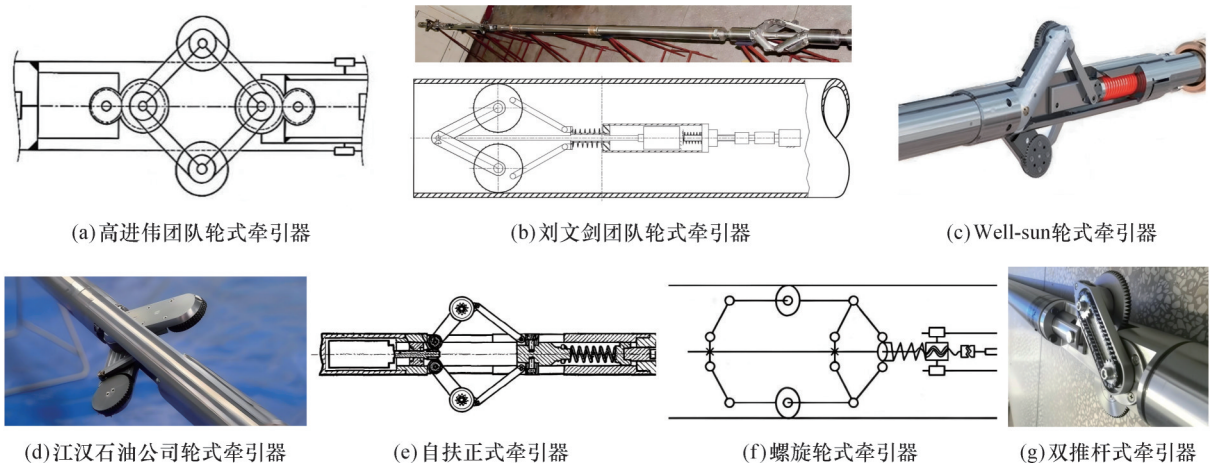
江汉石油公司与中船武汉海王公司于2013年合作研制了QYQ1型牵引器及MHPT-1型模块化大功率牵引器[38]，相关产品已投入商业化应用[39]。QYQ1型与MHPT-1型均为电缆牵引器，前者通过支撑弹簧控制驱动臂开合，采用链条控制链轮的设计；后者通过齿轮组将电机动力传递至驱动轮，采用连杆机构式支撑机构。后续江汉石油公司持续研制了JHQY系列牵引器及“经纬刚毅”系列大功率牵引器[40]，其中JHQY-B型牵引器的整体设计与MHPT-1型牵引器的整体设计相似(图4d)[41]。

中国石油大学(北京)高德利团队于2014年研制了一种自扶正式电缆牵引器(图4e)，该牵引器将两组支撑机构串联，并将支撑电机与驱动电机相对布置，通过支撑电机转动丝杠来控制驱动臂转动，传动机构带动驱动轮旋转以实现牵引动作[42]；该团队于2018年还提出了一种跨越式水平井越障牵引器，通过探测式扶正器对井下信息进行感知进而辅助越障[43]。

武汉理工大学联合中海油公司于2016年研制了一种螺旋轮式牵引机器人(图4f)[44]，该牵引器采用两组爬行臂，在爬行臂水平杆件上安装驱动轮，通过电机控制驱动轴支撑驱动杆系，驱动轴带动爬行臂旋转以实现牵引动作。

西南石油大学刘清友团队于2020年研制了一种双推杆式牵引器(图4g)，该牵引器将支撑调节机构设计为内外推杆、内外弹簧式，能够独立调节每个支撑轮，提高了轮式牵引器的运行稳定性和越障能力[45]。后续该团队于2023年研制了一种模块化轮式牵引器，该牵引器将三组驱动臂串联，在模块间安装了旋转滑环，对各模块实现了独立控制[46]。

思坦仪器公司目前提供商业化的SITAN系列轮式牵引器，该牵引器驱动臂的作用机理与SLB公司的TuffTRAC系列牵引器相似，并采用模块化结构设计[47]。



(a)高进伟团队轮式牵引器　(b)刘文剑团队轮式牵引器　(c)Well-sun轮式牵引器

(d)江汉石油公司轮式牵引器　(e)自扶正式牵引器　(f)螺旋轮式牵引器　(g)双推杆式牵引器

图4 国内连续驱动式牵引器

Fig.4 Domestic continuous-drive tractors

1.2.2.2 伸缩式牵引器

东北石油大学研究的伸缩式牵引器如图5a所示。常玉连团队于2007年提出了一种石油井故障探测机器人，该牵引器支撑机构采用三连杆机构设计[48]；该团队于2016年还研制了一种弹性连杆式管内机器人并完成了样机试制，该牵引器设计关节机构扩展了牵引器末端工作空间，支撑机构采用弹性连杆式设计[49]。高胜团队于2025

年提出了不同形式的连续油管牵引器，一种牵引器支撑机构为刚柔耦合连杆弹簧式，采用弹簧片内嵌于三连杆机构的设计[50]；另一种支撑机构采用四连杆机构设计，在支撑机构顶部加装摩擦块以提高机构稳定性[51]。

国防科技大学研制的伸缩式牵引器如图5b所示。尚建忠团队于2012年对自主锁止式管内机器人开展了试验研究，提出了斜面楔块式和平行四边形连杆机构式支撑机构[52]。其中，平行四边形连杆机构式支撑机构由凸轮机构与四连杆机构组成，后续该团队基于此提出双凸轮支撑机构，实现了牵引器双向运动及自锁功能[53]。该团队于2018年还研制出了一种全液压驱动管道机器人，该牵引器的支撑机构采用连杆机构与弹簧片相结合的设计方案[54]。

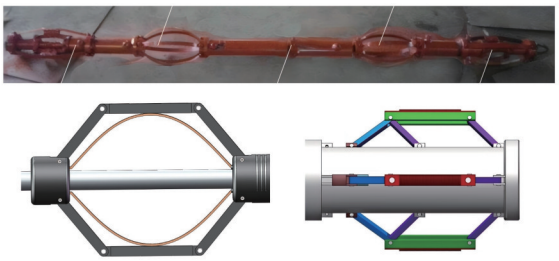
中国石油大学（北京）高德利团队于2013年提出了一种微小井眼连续油管钻井牵引器，该牵引器支撑机构采用斜面与卡瓦结合的方式，通过活塞带动斜面轴向运动，斜面推动卡瓦径向伸出以实现井壁支撑[55]。重庆科技大学侯学军团队于2025年提出了一种液控液压驱动连续油管牵引器，其支撑机构采用四连杆机构设计[56]。

西安石油大学窦益华团队联合川庆钻探公司于2020年研制了一种液压伸缩式连续油管牵引器（图5c）[57]，依托斜面推动楔形燕尾滑块径向伸出以支撑井壁，该牵引器径向尺寸小，具有较强的井下适应性。后续同校的郑杰团队于2023年提出了一种内外双锚定液压伸缩式牵引器，该牵引器支撑机构采用对称布置的三连杆机构[58]。

2015年以来，刘清友团队围绕伸缩式连续油管牵引器开展研究，目前已研制多代伸缩式牵引器样机，牵引器支撑机构主要为斜面式、弹性复合式、连杆机构式，如图5d所示。该团队早期研究依托西南石油大学开展样机研制及基础理论分析，于2016年研制的井下牵引器采用斜面滑块式支撑机构，通过支撑缸轴向推动斜面使滑块径向伸出从而支撑井壁[59]。2018年前后，该团队研制了多种支撑机构，一种通过推块与斜块作用使支撑块与井壁接触，包括同向双斜块结构与反向双斜块结构[60]；另一种为连杆机构与弹簧片复合式支撑机构[61]。2019年该团队研制了柔性液压伸缩式牵引器，在斜面推块基础上引入弹簧片设计[62]。2020年该团队研制的钻井机器人采用三连杆支撑机构，通过液压缸驱动活塞来实现轴向往复运动[63]。2022年该团队联合川庆钻探公司研制出了一种小井眼连续油管牵引器，该牵引器通过斜块推动支撑臂，当支撑臂与井壁接触时产生径向支撑力[64]。近年来该团队依托成都理工大学开展进一步研究，该团队于2025年研制了全液压牵引器，该牵引器支撑机构采用铰接连杆机构设计，仿照蝼蛄爬行机制[65]。成都理工大学朱海燕团队同样在该方向开展研究，2022年该团队研制了一种复杂井筒自适应牵引机器人，该牵引器支撑机构采用四连杆机构设计[66]；同年该团队提出了一种井下燃爆机器人，该牵引器支撑机构采用五连杆机构设计[67]。

1.3　支撑机构结构梳理

井下牵引器主要通过支撑机构与井壁接触产生径向力，将摩擦或支撑作用转化为轴向动力，实现牵引器的轴向推进。支撑机构的结构形式及运



(a) 东北石油大学伸缩式牵引器[49-51]：弹性连杆式、刚柔耦合连杆弹簧式、四连杆机构式



(b) 国防科技大学伸缩式牵引器[52, 54]：自主锁止式、全液压驱动式



(c) 西安石油大学伸缩式牵引器[57]：楔形燕尾块式牵引器



(d) 西南石油大学、成都理工大学伸缩式牵引器[59, 60, 61, 63]：斜面滑块式、同向双斜块式、连杆-弹簧片式、三连杆机构式

图5　我国伸缩式牵引器

Fig.5　Domestic telescopic tractors

动机理决定了井下牵引器性能，因此国内外井下牵引器研究主要集中于支撑机构的方案设计与选择。综合上述国内外研究现状，选取部分牵引器支撑机构的结构形式，将支撑结构分类绘制于图6。

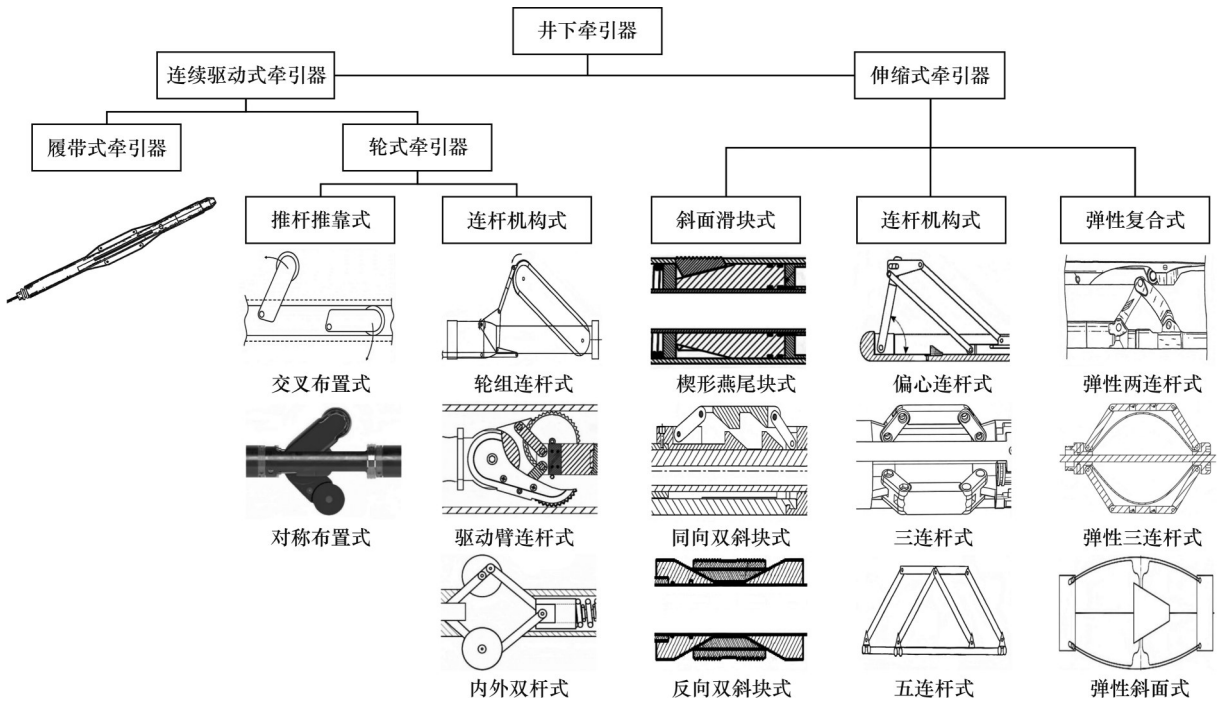


图6 井下牵引器支撑机构分类图

Fig.6 Classification diagram of downhole tractor support mechanisms

1.3.1 连续驱动式牵引器支撑机构

连续驱动式牵引器商业化应用及样机研制主要围绕轮式牵引器开展，其支撑机构的结构形式主要分为推杆推靠式和连杆机构式。

推杆推靠式通过推杆控制驱动臂实现其旋转开合，驱动臂末端装有驱动轮，驱动轮与井壁接触后实现牵引动作。驱动臂可采用交叉布置式和对称布置式，其中交叉布置式能够使不同驱动臂以不同角度动作，以Well Tractor牵引器为代表[15]；对称布置式以TuffTRAC牵引器为代表[18]。推杆推靠式支撑机构将推杆的轴向位移转化为驱动臂的径向转动，确保了牵引动作的稳定性，但受其结构限制，在井径变化较大的井段适应性较差。

连杆机构式通过驱动臂外部加装的连杆机构实现驱动臂旋转开合，驱动臂采用对称布置形式，可分为轮组连杆式、驱动臂连杆式、内外双连杆式。其中轮组连杆式以驱动轮中心为连杆受力点，以SondeTrax牵引器为代表[22]；驱动臂连杆式将受力点移动至驱动臂，以江汉石油公司研制的JHQY牵引器为代表[38]；内外双连杆式使每个驱动臂独立调节，可提高牵引器稳定性及越障能力，以西南石油大学研制的双推杆-双弹簧支撑式牵引器为代表[45]。连杆机构式较推杆推靠式能够实现更大的张合行程，具有更强的适应性，但机构复杂度增加，同时随着牵引器的持续运转，连杆机构不断产生损耗，需要较高的加工精度。

1.3.2 伸缩式牵引器支撑机构

伸缩式牵引器支撑机构的结构形式主要分为斜面滑块式、连杆机构式和弹性复合式。

斜面滑块式通过轴向推动斜面使滑块径向伸出以支撑井壁，可分为单斜面滑块式、双斜面滑块式。其中单斜面滑块式以西安石油大学楔形燕尾块式牵引器为代表[57]，双斜面滑块式以西南石油大学同向、反向双斜块式牵引器为代表[60]。斜面滑块式支撑机构的结构紧凑、力传递效率高，通过较小的动作行程可实现较大的牵引力，但该结构在井下作业过程中对润滑效果有较高要求，可能产生运动阻滞情况，长期运行后斜面易产生磨损。

连杆机构式多采用刚性机构，在水平杆件处可加装摩擦块、凸轮以增大与井壁的摩擦力，可分为偏心连杆式和多连杆式。其中偏心连杆式采用非对称结构设计，可缩小牵引器外径，以ELG牵引器为代表[26]；西南石油大学研制的三连杆式牵引器将杆件宽度增大，进而增大支撑机构与管壁的接触面积[63]；五连杆式支撑机构通过水平杆件调整与井壁的角度，以MaxTRAC牵引器为代表[31]。连杆机构式支撑机构稳定性强，可实现较大张合行程，但多连杆机构存在较多零部件，增加

了机构复杂度，持续运转后导致装配精度降低。

弹性复合式在斜面滑块式、连杆机构式的基础上进行发展，将弹簧片与刚性机构相结合，可分为弹性连杆式、弹性斜面式。其中弹性两连杆式将连杆机构安装在弹簧片内侧，通过弹簧片与井壁接触，具有更好的井下适应性，以ERG牵引器为代表[28]；弹性三连杆式将连杆机构安装在弹簧片外侧，避免了支撑机构张合过程中产生死点，以东北石油大学研究的刚柔耦合连杆弹簧式牵引器为代表[50]；弹性斜面式通过斜面支撑弹簧片张合，以西南石油大学研制的柔性牵引器为代表[62]。弹性复合式支撑机构可结合弹簧片的柔性及刚性机构的稳定性，满足了井下适应性和大牵引力的要求，但弹性元件易产生金属疲劳，且弹簧片尺寸参数设计不当可能导致支撑力不足。

1.4　性能指标对比

1.4.1　国内外商业化井下牵引器性能参数对比

现阶段的国外轮式牵引器以Welltec、Baker Hughes、SLB三家公司产品为主，其中Welltec公司产品针对不同井下作业情况推出不同型号。我国轮式牵引器以西安威盛、武汉海王、思坦仪器三家公司为主，国内厂商基础型号轮式牵引器均具备一定竞争力，但与国外厂商相比，国内厂商在不同工况适应性方面仍有待提升。商业化伸缩式牵引器以国外公司产品为主，如WWT、SLB公司的产品，WWT公司产品围绕连续油管牵引器针对不同井下作业情况推出不同型号产品。选取部分商业化井下牵引器性能参数，其中轮式牵引器性能参数如表1所示，伸缩式牵引器性能参数如表2所示。

表1　商业化轮式牵引器性能参数

Tab.1　Performance parameters of commercial wheeled tractors

名称/型号	驱动段	牵引力/N	运行速度/(m·min^{-1})	外径/mm	长度/m	适用井筒内径/mm	支撑机构
Welltec公司 Well Tractor NG HT[14]	2	12 010(牵引模式) 3114(速度模式)	10.7(牵引模式) 30.5(速度模式)	80.0	5.5(牵引模式) 5.8(速度模式)	86～264	推杆推靠式
SLB公司 TuffTRAC iX[17]	2～8	8006(8段)	25.4	54.0～63.5	6.7(2段)	56～267	推杆推靠式
SLB公司 UltraTRAC[17]	2～8	10 680(2段) 14 240(8段)	12.2(2段) 16.3(8段)	85.7	4.7(2段) 11.9(8段)	91～381	推杆推靠式
Baker Hughes公司 PowerTrac PRIME[19]	5	6120	36.0	63.5	6.8	70～234	推杆推靠式
Baker Hughes公司 SondeTrax[20]	2	4448	11.9	64.0	7.7	70～234	连杆机构式
西安威盛公司 WELL-SUN[37]		3920	10.0	73.0	4.1(执行节) 1.6(控制节)	178～244	连杆机构式
武汉海王公司[39]	4	8000	10.0	70.0		140～250	连杆机构式
思坦仪器公司 SITAN[47]	3	8820	16.7	80.0	7.8	114～244	推杆推靠式

表2　商业化伸缩式牵引器性能参数

Tab.2　Performance parameters of commercial telescopic tractors

名称/型号	类型	牵引力/N	运行速度/(m·min^{-1})	外径/mm	长度/m	适用井筒内径/mm	支撑机构
WWT公司 212L ELG[25]	连续油管	14 234	5.1	54.0	6.1	156(裸眼井)	连杆机构式
WWT公司 Milling[25]	连续油管	27 800	3.8	79.4	3.8	114～178(套管井)	连杆机构式
WWT公司 350 EEG[25]	连续油管	40 922	4.6	88.9	7.3	114(套管井) 216(裸眼井)	连杆机构式
WWT公司 350 ERG[25]	连续油管	40 922	4.6	88.9	7.3	114～178(套管井) 156(裸眼井)	弹性复合式
SLB公司 MaxTRAC[17]	电缆	4448	12.2	54.0	9.8	61～244	连杆机构式
SLB公司 TerraTRAC[17]	电缆	2669	12.2	54.0	14.2	57～267	连杆机构式
Omega公司[29]	电缆	222 400		84.3	2.9	84～127	连杆机构式

通过总结商业化井下牵引器的研究现状可以得出如下结论：

1)在支撑机构的结构形式方面。轮式牵引器以Well Tractor、SondeTrax、TuffTRAC三种牵引器为代表，其中Well Tractor牵引器支撑机构为推杆推靠式，驱动臂采用交叉布置方式；SondeTrax牵引器支撑机构为连杆机构式，驱动臂采用对称布置方式，通过齿轮控制驱动轮旋转；TuffTRAC牵引器支撑机构为推杆推靠式，驱动臂采用对称布置方式，通过蜗轮蜗杆及齿轮控制驱动轮旋转。伸缩式牵引器以ELG、EEG、ERG、MaxTRAC及TerraTRAC OH牵引器为代表，其中ELG牵引器支撑机构为非对称的偏心连杆式；EEG牵引器为抓爪型连杆机构式；ERG牵引器为弹簧片与连杆机构复合式；MaxTRAC牵引器采用五连杆机构式；TerraTRAC OH牵引器在五连杆机构的基础上采用轻薄的片状结构设计，以增强裸眼井作业中的通过性。

2)在控制及智能化方面。电缆牵引器以地面实时控制为主，具备一定的自适应调节能力。部分产品能够对牵引力、速度及扭矩等参数实时优化，感知牵引器姿态并自动调节径向支撑力，对牵引过程可实现自适应控制，具备牵引力、速度模式切换功能，在不同井况下可实现牵引效率、输出能力的最大化。连续油管牵引器的智能化程度较低，多采用液压驱动方式，通过压差控制牵引[68-69]。

3)在可靠性及性能参数方面。轮式牵引器的牵引力多分布在4～10 kN范围内，部分大直径型号牵引器的牵引力可提高至10 kN以上，运行速度主要集中在10～25 m/min范围内。Welltec公司部分型号的轮式牵引器可通过牵引力模式、速度模式转换显著提高相应数值。同时，轮式牵引器外径以54、80、114 mm为主，适用井筒内径的范围达到56～381 mm，温度方面普遍具备150 ℃的标准，压力等级达到100 MPa，覆盖了常规套管井和裸眼井的大部分情况。相比之下，伸缩式牵引器由于步进式的行进方式，其牵引力集中在10～30 kN范围内，运行速度集中在4～10 m/min范围内，具有较高的牵引力输出以及较低的运行速度，外径以54、89 mm为主，适用井筒内径的范围达到57～267 mm，耐温压特性与轮式牵引器相近。

1.4.2 我国井下牵引器样机性能参数对比

梳理了我国井下牵引器样机研究现状，轮式牵引器样机研究早年集中在哈尔滨工业大学、中国石油大学(北京)等高校，近年来西南石油大学的相关研究在我国具备较高的行业代表性。伸缩式牵引器样机研究早年集中在国防科技大学、东北石油大学等高校，近年来西南石油大学、西安石油大学的相关研究成果较多。选取部分井下牵引器样机性能参数，其中轮式牵引器性能参数如表3所示，伸缩式牵引器性能参数如表4所示。

表3 轮式牵引器样机性能参数

Tab.3 Performance parameters of the wheeled tractor prototype

研究单位	外径/mm	牵引力范围/N	运行速度/(m·min^{-1})	适用井筒内径/mm	动力源	传动方式	支撑机构
中国石油大学(华东)[33]	50	60～180	0.3～0.9	85～110	电机	锥齿轮-带轮	平行四边形支撑式
哈尔滨工业大学[34]	105	1000	6.7	124	电机	蜗轮蜗杆-齿轮	连杆机构式
哈尔滨工业大学[35]	54	2500	9.0	140	电机	传动轴	连杆机构式
中国石油大学(北京)[42]	70		1.6～2.5	178～245	电机	斜齿轮组	连杆机构式
武汉理工大学[44]		5400	4.2	125	电机	驱动轴-丝杠螺母及驱动轴-轮架	连杆机构式
西南石油大学[45]	80	3600	10.0	100～180	电液	锥齿轮-齿形链	连杆机构式
西南石油大学[46]	80	2240	7.5～12.5	140	电液	齿轮传动套筒及旋转滑环连接器	连杆机构式

通过总结我国井下牵引器样机的研究现状可以得出如下结论：

1)在支撑机构的结构形式方面。轮式牵引器样机采用平行四边形支撑式、连杆机构式对驱动臂进行控制。学者们对伸缩式牵引器样机支撑机构的结构进行了重点研究，围绕支撑机构提出了多种方案，主要有斜面滑块式、连杆机构式和弹性复合式三类，目的在于提高牵引器的可靠性与牵引效率。

2)在驱动与控制方案选择方面。我国对轮

表4　伸缩式牵引器样机性能参数

Tab.4　Performance parameters of the telescopic tractor prototype

研究单位	外径/mm	牵引力范围/N	单次循环步距/mm	动力源	控制	驱动方式	支撑机构
东北石油大学[49]	70	4000	800	液压		液压缸驱动活塞杆	弹性连杆式
国防科技大学[52]	54	2000	200	电机		电机驱动丝杠	连杆机构式
国防科技大学[54]	135	15 000	150	液压	纯液压控制	液压缸驱动活塞	弹性连杆式
西安石油大学[57]	100	10 000	600	液压	自激液压控制	液压缸驱动活塞	斜面滑块式
西南石油大学[59]	95	9800	200	液压	液压阀控制	液压缸驱动	斜面滑块式
西南石油大学[60]	120	70 000	240	液压	逻辑控制	液压缸驱动活塞	斜面滑块式
西南石油大学[61]	120	10 000	240	液压	单片机控制	液压缸驱动活塞	弹性连杆式
西南石油大学[62]	120	14 260	240	电液	单片机控制	液压缸驱动	弹性斜面式
西南石油大学[63]	172			液压	电控液压	液压缸驱动活塞	连杆机构式
西南石油大学[65]	94	9240～81 360		液压	集成阀控制	液压缸驱动活塞	连杆机构式
成都理工大学[66]	85	22 270	160	电液	电磁阀控制	液压缸驱动活塞杆	连杆机构式

式牵引器的研究主要以电液或电机为动力源，在传动系统方面不断创新，以提高牵引器在复杂井段的适应性及越障性能。伸缩式牵引器样机主要采用液压缸为核心执行元件，在动力源及控制方式选择上存在差异，动力源采用液压、电机或电液混合的方式，确保了牵引动作的稳定性与牵引能力的有效发挥。

3)在牵引器技术参数方面。轮式牵引器样机的外径主要集中在50～80 mm范围内，略小于商用主流型号，牵引力达到1.0～5.4 kN。伸缩式牵引器方面，我国高校及科研院所主要围绕连续油管牵引器进行研究，外径集中在85～135 mm，适用井筒内径的范围达到140～178 mm，牵引力集中在10～70 kN范围内，单次循环步距集中在150～250 mm范围内。连续油管牵引器样机性能参数与WWT公司产品相近，普遍具备较大牵引力。

综合上述井下牵引器性能参数可以看出，商业化市场以轮式牵引器、电缆牵引器为主导，其模块化及智能化产品在现阶段已较为成熟，而关于伸缩式牵引器及连续油管牵引器的学术研究仍存在提升空间。

2　关键技术挑战

2.1　牵引能力不足

现阶段，油气井开采作业正逐渐向超长水平井、超深井、高倾角井等复杂工况扩展，井下作业工具的下入距离及作业过程中所需的牵引力持续增大，现有井下牵引器的牵引能力仍存在不足。已有多项研究表明，随着井段长度和井斜角度的增大，井下作业工具运输过程中所需要的拉力呈现非线性增长的特征，现场作业过程中的拉力需求超出常规牵引器的牵引能力，导致作业目标难以实现[40]。从生产应用的角度来看，不同类型的牵引器存在着不同的短板。电缆牵引器受牵引结构限制，在牵引过程中主要依靠驱动臂控制驱动轮与井壁接触，其有效接触面积有限，难以在超长、超深井作业中持续提供大牵引力。而连续油管牵引器虽然通过液压系统可产生较大牵引力，但需要在运行过程中供给较高的系统压力，使支撑机构承受更大的结构载荷，导致存在井壁损伤及牵引器自身机构失效的风险。

2.2　适应性不足

井下牵引器目前适用于多种井筒环境，主要应用于套管井和裸眼井，这些井筒环境中均存在井筒变形、内部坍塌等情况，套管井中还存在井径扩大处、井段连接处等不规则井段，复杂多变的井下作业环境对牵引器的适应性提出了较高的要求。当牵引器通过井径变化段时，牵引器支撑机构与井壁间的接触状态会发生改变，若支撑机构受力分布不均，则牵引器易发生打滑、卡滞或无法通过障碍物的情况。而牵引器整体结构长度较大、刚度较高，在高曲率井段作业中，通过弯曲井段时易产生局部受力过大或姿态失稳的情况。此外，牵引器支撑机构普遍使用斜面滑块机构、连杆机构等刚性结构，在与不规则井段接触的过程中难以实现自适应调节。

2.3　可靠性挑战

井下作业环境中普遍存在颗粒物、极端温压等恶劣工况，而井下牵引器需要长时间在封闭井筒环境中作业，牵引器运行的可靠性面临巨大挑战。通常情况下井筒中存在砂粒、油泥或碎屑等固体颗粒，这些细小颗粒会减小牵引器支撑机构与井壁间的摩擦力[70]。而牵引器需要与井壁持续接触来实现牵引动作，过多杂质颗粒易抑制牵引器与井壁之间的有效接触，造成牵引器无法稳定

运行，尤其在轮式牵引器作业中，通常需要对井筒进行刮壁处理，以减少颗粒杂质对牵引器运行的影响。此外，井下作业环境中存在高温、高压、腐蚀性介质等极端工况，会造成牵引器的密封系统、机械结构及控制系统性能衰减，如高温环境会造成密封加速老化、电子元器件失灵；高压环境使得机械结构疲劳载荷增大；腐蚀性气体导致金属零部件性能下降，增加了牵引器发生故障的风险。

2.4 设计中的矛盾权衡

井下牵引器设计过程中往往面临着一系列的决策与权衡，系统可靠性、牵引能力等方面存在的矛盾限制了牵引器性能的提升。首先是系统复杂度与可靠性之间需要作权衡，井下牵引器作业环境复杂，需要对系统运行情况及工作环境进行实时感知、监控，这促进了牵引器的智能化程度提高，但由此导致了更为复杂的液压、电气系统设计，增加了设备的故障隐患，降低了系统可靠性。同时存在牵引能力与结构尺寸之间的矛盾，为追求大牵引力往往会增大支撑机构的张合行程及牵引器的整体体积，但狭窄的井筒作业空间限制了牵引器外形尺寸的大小。此外，牵引器需要通过支撑机构与井壁的接触获得牵引力，过大的牵引力可能造成配套设施损坏，而液压驱动式牵引器往往需要较高的系统压力来满足牵引力需求，过高的压力会对密封系统的稳定性造成影响。

3 未来发展趋势

3.1 复杂环境下的可靠性提升

随着井下作业范围持续扩展，如何提升井下牵引器在复杂、极端作业条件下的可靠性，已成为牵引器工程应用发展的关键方向。一方面，针对超长水平井等复杂井况，井下牵引器需要向高承载、高适应性方向发展，持续优化支撑机构结构形式，在与井壁的有限接触面积内提高牵引能力。同时提高材料性能，研究高强度、耐腐蚀材料的承载能力，延长设备使用寿命。另一方面，针对高温、高压及腐蚀性环境，可以研制耐高温电子元件与密封材料，探索主动温控方法，提高设备自身散热与隔热系统的工作能力，解决外部环境高温及内部元件发热叠加的问题。同时，将耐高温、高压传感器集成至牵引器系统中，以实现井下运行状态的实时监测，从而降低故障发生概率。

3.2 智能化水平提升

井下牵引器作业过程中，提升牵引器的智能化水平、获取更为完善的井下作业数据、引入实时信息交互、结合模型算法应用已逐渐成为未来发展趋势。一方面，未来牵引器需要配备更为有效的井下传感器，对井下运行参数进行实时采集，具备在复杂井下环境中全面感知的能力，使作业人员实时了解井下真实的作业情况。另一方面，牵引器控制系统将向闭环控制方向发展，在传感器实时获取井下作业数据后，通过闭环控制策略或动态调节机制来实现对牵引力、速度及作业模式的自适应调控。此外，可以在牵引器作业中结合人工智能技术与机器人技术，通过融合预编程控制、地面远程控制等方式来提升牵引器控制系统智能化水平。

3.3 平台化与跨领域应用拓展

井下牵引器同样正逐渐由单一输送工具，向完整作业体系中的关键单元转变，不断向平台化与多系统协同方向发展，开展跨领域的应用拓展。一方面，若牵引器集成于复杂的井下作业系统或平台之中，则需要提高接口兼容能力，以支持牵引器与通信、驱动、工具等不同模块协同作业。另一方面，随着连续油管作业体系的不断发展，连续油管与牵引器的协同应用越发广泛，牵引器在超长水平井和复杂井况中的作用不断强化，持续扩大了连续油管作业范围。此外，牵引器已逐渐在地热井作业等非常规能源领域中得到拓展应用，在增强型地热系统的相关研究中已进行初步探索。

4 结论

本文通过梳理国内外现有井下牵引器技术研究现状，对比不同结构形式牵引器性能参数，总结井下牵引器关键技术挑战与未来发展趋势，得出如下结论：

1）现有商业化井下牵引器以轮式电缆牵引器为主，其整体技术已较为完善，目前部分产品实现了模块化、智能化。井下牵引器样机研究主要围绕伸缩式牵引器进行，目的在于提高牵引器性能，使其能够提供更大的牵引力并更好地适应井下作业环境。

2）目前井下牵引器的应用已较为成熟，但随着牵引器适用的作业范围扩大，对其牵引能力、适应性及可靠性也提出了更高的要求。同时在牵引器设计过程中，还面临着系统复杂度、结构尺寸限制、智能化等方面的权衡。

3）未来，井下牵引器需要以应对更为复杂的作业环境为目标，结合智能算法推动井下牵引器技术变革，从单一输送工具向平台化多系统协同方向演进。同时，未来研究需进一步加快我国工

程化转化进程与关键部件自主保障能力建设，构建适应性广、可靠性高的井下牵引作业体系。

参考文献：

[1] SOLA K I，LUND B. New Downhole Tool for Coiled Tubing Extended Reach[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable. Houston，2000：SPE 60701-MS.

[2] 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(2)：1-8.
GAO Sheng，SUN Wen，NI Han，et al. Status and Understandings of Downhole Tractor Design[J]. Journal of Machine Design，2014，31(2)：1-8.

[3] SHBEB Y，CORREIA G，AMBROSI G，et al. Continuous Improvement and Innovative Downhole Tool Combinations Used in the United Arab Emirates to Break Boundaries with Mega-reach Coiled Tubing Interventions[C]//SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands，2025：SPE 224087-MS.

[4] 张志华，廖勇，饶海涛，等. 页岩气上翘型水平井牵引器射孔难点分析及解决措施[J]. 测井技术，2021，45(1)：102-106.
ZHANG Zhihua，LIAO Yong，RAO Haitao，et al. Difficulty Analysis and Measures of Tractor Perforation in Upturned Horizontal Well in Shale Gas Field[J]. Well Logging Technology，2021，45(1)：102-106.

[5] TAPIA W R，DELAUNE J，VILLAGRANA L C，et al. Conveying Extended Reach Solutions：First Coiled Tubing Perforation in Horizontal Live Gas Wells with Downhole Tractors[C]//SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands，2024：SPE 218365-MS.

[6] 刘清友，董润，耿凯，等. 井下机器人研究进展与应用展望[J]. 石油钻探技术，2019，47(3)：50-55.
LIU Qingyou，DONG Run，GENG Kai，et al. The Status of Current Research on Downhole Robots and Their Multiple Applications[J]. Petroleum Drilling Techniques，2019，47(3)：50-55.

[7] FARHAN M，ELQOUSY A，SULAIMAN A，et al. Precision Milling Solutions：Enhancing Well Accessibility with Robotic E-line Milling Technology[C]//SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Abu Dhabi，2025：SPE 225760-MS.

[8] 刘清友，赵建国，管彬，等. 连续油管井下机器人发展概况与展望[J]. 钻采工艺，2026，49(1)：66-73.
LIU Qingyou，ZHAO Jianguo，GUAN Bin，et al. Development Overview and Prospects of Coiled Tubing Downhole Robot[J]. Drilling & Production Technology，2026，49(1)：66-73.

[9] 刘清友，赵建国，方世纪. 全液压连续油管牵引器工作机理研究[J]. 钻采工艺，2025，48(1)：216-227.
LIU Qingyou，ZHAO Jianguo，FANG Shiji. Research on the Working Mechanism of Full Hydraulic Coiled Tubing Tractor[J]. Drilling & Production Technology，2025，48(1)：216-227.

[10] 孙可平，杨东超，常旭，等. 水平井电缆牵引器滚轮与管壁压力的测量[J]. 石油学报，2018，39(6)：712-718.
SUN Keping，YANG Dongchao，CHANG Xu，et al. Measurement of the Normal Contact Force between the Cable Tractor's Wheels and the Pipe Wall of Horizontal Well[J]. Acta Petrolei Sinica，2018，39(6)：712-718.

[11] HALLUNDBAEK J. Reducing Costs with Well Tractors for Horizontal Wells[C]//Offshore Technology Conference. Houston，1995：OTC-7875-MS.

[12] LIU Qingyou，ZHAO Jianguo，ZHU Haiyan，et al. Review，Classification and Structural Analysis of Downhole Robots：Core Technology and Prospects for Application[J]. Robotics and Autonomous Systems，2019，115：104-120.

[13] BADEGHAISH W，NOUI-MEHIDI M N，AL-MULHEM A A. Comprehensive Review of Well Tractor Technology in Highly Extended Reach Wells[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands，2018：SPE 189906-MS.

[14] WELLTEC. Our Story[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.welltec.com/discover/who-we-are/our-story.

[15] HALLUNDBAEK J. Downhole Driving Unit Having a Hydraulic Motor in a Wheel：US9435167B2[P]. 2016-09-06.

[16] SOLVIG T，LANGETEIG B. A Tractor for Propelling an Apparatus Inside a Cylindrical Body and a Drive Arrangement for a Tool：WO2025238044A1[P]. 2025-05-14.

[17] SLB. Wireline Tractors[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-intervention/wireline-well-intervention/wireline-tractors.

[18] FOUCHER P A，BILLINGHAM M，SHEIRETOV T K. Fiber Optic Slickline and Tractor System：US20160237812A1[P]. 2016-08-18.

[19] BAKER HUGHES. E-line Deployed Tractor Conveyance[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.bakerhughes.com/well-intervention/eline-deployed-tractor-conveyance.

[20] BAKER HUGHES. Conveyance Equipment[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.bakerhughes.com/sondex/sondex-conveyance-equipment.

[21] 常旭，杨东超，孙可平，等. 水平井爬行器中电永磁吸盘的设计与优化[J]. 中国机械工程，2019，30(4)：399-405.
CHANG Xu，YANG Dongchao，SUN Keping，et al. Design and Optimization of Electropermanent Magnet Suckers in Horizontal Well Tractors[J]. China Mechanical Engineering，2019，30(4)：399-405.

[22] RATCLIFFE J D，GILL T M. Arm Deployment System and Method：US10883325B2[P]. 2021-01-05.

[23] UELAND G，MELLEMSTRAND J. Device for a Pulling Tool for Use in Pipes and Boreholes for the Production of Oil and Gas：US7363989B2[P]. 2008-04-29.

[24] FLECKENSTEIN W W，CAMPBELL C N，BELL S H，et al. Downhole Tractor for Use in a Wellbore：US10927625B2[P]. 2021-02-23.

[25] WWT. WWT Coiled Tubing Tractors：High Pulling Power[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.wwtco.com/products/wwt-coiled-tubing-tractors.

[26] KRUEGER R E V. Eccentric Linkage Gripper：US12331605B2[P]. 2025-06-17.

[27] MITCHELL S B. High Expansion or Dual Link Gripper：US9447648B2[P]. 2016-09-20.

[28] MOCK P W. Expandable Ramp Gripper：US7954562B2[P]. 2011-06-07.

[29] BUYERS M，FRASER S B. Reciprocating Running Tool：EP1029147B1[P]. 2003-07-30.

[30] NEWMAN K R，HAVER N A，SPELLER D J. Wellbore Tractor：EP0951611B2[P]. 2003-01-29.

[31] GUERRERO J C. Mechanism That Assists Tractoring on

Uniform and Non-uniform Surfaces：US6910533B2[P]. 2005-06-28.

[32] SHARMA H，SULAIMAN M M，ALKADEM M，et al. Paradigm Shift in Well Intervention Using Advanced Wireline Tractor for Challenging Horizontal Completions[C]//Middle East Oil，Gas and Geosciences Show (MEOS GEO). Manama，2025：SPE 226982-MS.

[33] 高进伟，刘猛，李海凤. 水平井井下自适应爬行器的研制[J]. 石油机械，2005，33(增刊1)：100-104.
GAO Jingwei，LIU Meng，LI Haifeng. Development of an Adaptive Crawler in Horizontal Wells[J]. China Petroleum Machinery，2005，33(S1)：100-104.

[34] 唐德威，王新杰，邓宗全，等. 水平油井检测仪器拖动器[J]. 哈尔滨工业大学学报，2007，39(9)：1395-1397.
TANG Dewei，WANG Xinjie，DENG Zongquan，et al. Driver of Horizontal Oil Well Detecting Instruments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2007，39(9)：1395-1397.

[35] 白相林. 水平井牵引机器人关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.
BAI Xianglin. Key Technologies for Horizontal Well Traction Robot[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2009.

[36] 詹保平，任晓宁. 电机驱动轮式井下爬行器：CN201747356U[P]. 2011-02-16.
ZHAN Baoping，REN Xiaoning. Motor-driven Wheeled Downhole Tractor：CN201747356U[P]. 2011-02-16.

[37] 西安威盛电子科技股份有限公司. 爬行器执行短节/控制短节[EB/OL]. [2026-03-16]. https://cn.well sunlogging.com/mechanical-workover-and-stimulation-cn/tractor-tools-cn/downhole-tractor-too.html.
Xi'an Weisheng Electronic Instrument Co.，Ltd. Tractor Execution Subsection/Control Subsection [EB/OL]. [2026-03-16]. https://cn.wellsunl ogging.com/mechanical-workover-and-stimulation-cn/tractor-tools-cn/downhole-tractor-too.html.

[38] 李伟，付永前，张志华，等. 套管井牵引器爬行装置：CN106285629A[P]. 2017-01-04.
LI Wei，FU Yongqian，ZHANG Zhihua，et al. Casing Well Tractor Crawling Device：CN106285629A[P]. 2017-01-04.

[39] 武汉海王机电工程技术有限公司. 小直径牵引器[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.hikn.cn/ Productd2/126.html.
Wuhan Haiwang Mechatronic Engineering Company. Small-diameter Tractor[EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.hikn.cn/ Productd2/126.html.

[40] SHI Wenrui，ZHANG Zhihua，GUO Meiyu，et al. Study of Well Tractor Conveyance Technology for Ultra-long Horizontal Well in Shale Gas Reservoir[J]. Gas Science and Engineering，2026，145：205799.

[41] 张志华，李伟，饶海涛，等. JHQY-B型大功率牵引器技术特性及其应用[J]. 江汉石油职工大学学报，2016，29(6)：11-13.
ZHANG Zhihua，LI Wei，RAO Haitao，et al. Property and Application of JHQY-B High-power Tractor Technology[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers，2016，29(6)：11-13.

[42] 周劲辉，张勇，李翠. 水平井自扶正式电缆牵引器的设计[J]. 石油机械，2015，43(2)：79-82.
ZHOU Jinhui，ZHANG Yong，LI Cui. Design of Self-righting Cable Tractor in Horizontal Well[J]. China Petroleum Machinery，2015，43(2)：79-82.

[43] 陈亮帆，高德利. 一种跨越式水平井越障牵引器设计[J]. 石油机械，2018，46(8)：75-79.
CHEN Liangfan，GAO Deli. Design of a Leap-type Horizontal Well Tractor[J]. China Petroleum Machinery，2018，46(8)：75-79.

[44] 吴超群，刘晨阳，刘明尧，等. 螺旋轮式水平井牵引机器人设计与分析[J]. 石油机械，2016，44(11)：63-67.
WU Chaoqun，LIU Chenyang，LIU Mingyao，et al. Design of Spiral Wheel Horizontal Well Traction Robot[J]. China Petroleum Machinery，2016，44(11)：63-67.

[45] 赵建国，何同，彭汉修，等. 轮式牵引器支撑调节机构结构优化设计及越障性能[J]. 科学技术与工程，2021，21(12)：4929-4937.
ZHAO Jianguo，HE Tong，PENG Hanxiu，et al. Structure Optimization Design and Obstacle Surmounting Performance of Supporting and Adjusting Mechanism of Wheel Tractor[J]. Science Technology and Engineering，2021，21(12)：4929-4937.

[46] ZHAO Jianguo，YANG Jifan，DONG Xuecheng. Study on the Dynamic Characteristics of a Novel Modular Wheeled Tractor[J/OL]. Petroleum Science and Technology，2026. [2026-03-16]. https://doi.org/10.1080/10916466.2025.2609676.

[47] SITAN. China Cased Hole Well Tractor [EB/OL]. [2026-03-16]. https://www.sitanpetro.com/cased-hole-well-tractor/.

[48] 常玉连，邵守君，高胜，等. 基于虚拟样机的井下机器人行走仿真试验[J]. 系统仿真学报，2008，20(13)：3610-3613.
CHANG Yulian，SHAO Shoujun，GAO Sheng，et al. Experiments on Down Hole Robot Walking for Detecting Oil-well Fault Based on Virtual Prototype[J]. Journal of System Simulation，2008，20(13)：3610-3613.

[49] 倪晗. 油水井牵引器优化设计与仿真实验研究[D]. 大庆：东北石油大学，2016.
NI Han. The Optimize Design and the Simulation Experiment Research of the Oil-water Wells' Tractors[D]. Daqing：Northeast Petroleum University，2016.

[50] 张聪聪. 分体对称式连续油管牵引器行走机构设计及力学特性分析[D]. 大庆：东北石油大学，2025.
ZHANG Congcong. Design and Mechanical Characteristics Analysis of the Walking Mechanism of the Split Symmetrical Continuous Oil Pipe Tractor[D]. Daqing：Northeast Petroleum University，2025.

[51] 杨鹏杰. 水平井牵引器主要部件结构设计及液压系统仿真研究[D]. 大庆：东北石油大学，2025.
YANG Pengjie. Research on Structural Design of Key Components and Hydraulic System Simulation for Horizontal Well Tractors[D]. Daqing：Northeast Petroleum University，2025.

[52] 乔晋崴. 基于自主锁止机理的管内机器人机构设计与特性研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2012.
QIAO Jinwei. Mechanism Design and Property Study of In-pipe Robot Based on Self-locking Principle[D]. Changsha：National University of Defense Technology，2012.

[53] FANG Delei，SHANG Jianzhong，LUO Zirong，et al. Mechanical Design of Downhole Tractor Based on Two-way Self-locking Mechanism[J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2018，324(1)：012030.

[54] SHANG Jianzhong，FANG Delei，LUO Zirong，et al. Design and Analysis of a Hydraulic Drive Downhole Traction

In-pipe Robot Based on Flexible Support Structure[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(1): 18-27.

[55] 侯学军，高德利，沈忠厚. 微小井眼电机驱动连续管牵引器系统结构设计[J]. 科学技术与工程，2013，13(14)：3851-3855.
HOU Xuejun, GAO Deli, SHEN Zhonghou. Micro-hole Motor Drive Coiled Tubing Tractor System Structure Design[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(14): 3851-3855.

[56] 侯学军，姚史灿，侯伟煌，等. 一种液控液压驱动连续油管牵引器:CN120100349A[P]. 2025-04-03.
HOU Xuejun, YAO Shican, HOU Weihuang, et al. A Hydraulically Controlled Hydraulically Driven Coiled Tubing Tractor: CN120100349A[P]. 2025-04-03.

[57] 郑杰，窦益华，任丰伟，等. 大牵引力连续油管牵引器设计及仿真[J]. 科学技术与工程，2021，21(26)：11144-11150.
ZHENG Jie, DOU Yihua, REN Fengwei, et al. Design and Simulation of Big Tractive Force Coiled Tubing Tractor[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11144-11150.

[58] 白杨杰. 智能一体化井下牵引器设计与研究[D]. 西安：西安石油大学，2024.
BAI Yangjie. Design and Research of Intelligent Integrated Downhole Tractor[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.

[59] 张书扬. 伸缩式井下液压牵引器设计[D]. 成都：西南石油大学，2016.
ZHANG Shuyang. Design of Telescopic Downhole Hydraulic Tractor[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

[60] ZHAO Jianguo, XIE Huifeng, CHEN Bo, et al. Research on Friction Characteristics of the Support Mechanism of the Drilling Robot under Axial-torsional Load[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 233: 212593.

[61] 肖晓华，王昆鹏，赵建国，等. 弹簧片式牵引器牵引锁止力学及结构优化研究[J]. 机械科学与技术，2019，38(9)：1335-1342.
XIAO Xiaohua, WANG Kunpeng, ZHAO Jianguo, et al. Mechanical Analysis and Structural Optimization of Traction Locking for Spring Sheet Tractor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9): 1335-1342.

[62] 王昆鹏，肖晓华，朱海燕，等. 柔性牵引器刚柔耦合动力学特征及结构优化[J]. 中国机械工程，2020，31(8)：915-923.
WANG Kunpeng, XIAO Xiaohua, ZHU Haiyan, et al. Rigid-flexible Coupling Dynamics and Structure Optimization of Flexible Tractors[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(8): 915-923.

[63] ZHAO Jianguo, LIANG Penghui, HE Chao, et al. A Super Vibration Drag Reduction System Based on Drilling Robot[J]. SPE Journal, 2024, 29(11): 6050-6062.

[64] 文丹丹. 钻井爬行器工作机理及控制系统研究[D]. 成都：西南石油大学，2022.
WEN Dandan. Research on Working Mechanism and Control System of Drilling Crawler[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.

[65] ZHAO Jianguo, LIANG Penghui, LIU Qingyou, et al. A Novel Full Hydraulic Tractor with Large Traction Force[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 252: 213909.

[66] 王樵渚. 多分支水平井靶向爆炸机器人支撑机构性能分析及优化设计[D]. 成都：成都理工大学，2023.
WANG Qiaozhu. Performance Analysis and Optimization Design of Target Explosion Robot Support Mechanism for Multi-branch Horizontal Wells[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.

[67] 王樵渚，朱海燕，董学莲，等. 一种基于行星滚柱丝杠伸缩的井下燃爆机器人及牵引方法：CN114961608B[P]. 2022-10-28.
WANG Qiaozhu, ZHU Haiyan, DONG Xuelian, et al. A Downhole Explosive Robot Based on Planetary Roller Screw Telescoping and Traction Method: CN114961608B[P]. 2022-10-28.

[68] SAIOOD H, DUTHIE L, ANIZI A, et al. Pioneering Technology Solutions for Extended Reach Wells—High Expansion Coiled Tubing Tractor[C]//SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands, 2022: SPE 209042-MS.

[69] GUIZA M, BAUTISTA O D, FRENCH A, et al. Innovative Hydraulic Tractor Allows for Stimulation of Large Diameter Open Hole Multi-lateral ERD Wells[C]//International Petroleum Technology Conference. Dhahran: IPTC, 2020: D023S036R001.

[70] LIVESCU S, CRAIG S. A Critical Review of the Coiled Tubing Friction-reducing Technologies in Extended-reach Wells. Part 2: Vibratory Tools and Tractors[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 44-54.

（编辑　胡佳慧）

作者简介：高　胜，男，1970年生，教授、博士研究生导师。研究方向为石油装备与特种机器人技术。E-mail:GaoSheng_China@126.com。**夏俊博***（通信作者），男，1997年生，博士研究生。研究方向为连续油管井下牵引器。E-mail:490056387@qq.com。

本文引用格式：

高胜，夏俊博，郑雪滢，等. 井下牵引器技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2685-2697.

GAO Sheng, XIA Junbo, ZHENG Xueying, et al. Research Status and Prospects of Downhole Tractor Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2685-2697.