国内外旋转导向系统研究现状与发展挑战

王宇飞[1] 陈 歆[1] 舒崇福[1] 罗建成[2] 曾德智[2]

1. 中石化经纬有限公司地质测控技术研究院， 山东 青岛 266000；
2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室， 四川 成都 610500

摘 要：旋转导向系统是定向钻井技术的核心装备，对实现油气资源高效开发起关键作用。基于旋转导向系统的基本结构和工作原理，系统梳理了国内外主要旋转导向系统的性能参数与应用现状，分析了旋转导向系统的发展趋势与面临的挑战。研究表明，中国旋转导向技术虽已突破国际垄断，实现从无到有的跨越，但在导向原理多样性、极端环境适应性以及造斜能力等方面存在明显不足。国外旋转导向系统呈现出硬件与软件智能化协同发展的趋势，其导向硬件集成化程度高、机械性能强、应用范围广；而软件智能算法则从旋转导向的控制延伸到钻井、测井和井评估等多个环节。相比之下，中国旋转导向系统的智能化研究仍处于起步阶段。当前旋转导向系统的发展面临极端环境恶劣和智能程度不足的双重挑战，未来突破需聚焦于材料器件革新和智能架构重建。研究结果有助于推进中国未来旋转导向系统智能化的快速发展。

关键词：定向钻井；旋转导向系统；智能化；信息化

DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 04. 007

Research status and development challenges of rotary steerable systems at home and abroad

Wang Yufei[1], Chen Xin[1], Shu Chongfu[1], Luo Jiancheng[2], Zeng Dezhi[2]

1. Geosteering & Logging Research Institute, Sinopec Matrix Corporation, Qingdao, Shangdong, 266000, China;
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

Abstract: Rotary steerable systems are core equipment for directional drilling technology and play a critical role in efficient oil and gas resource development. Based on the basic structure and operating principles of rotary steerable systems, this paper systematically reviews the performance parameters and application status of major rotary steerable systems worldwide and analyzes their development trends and challenges. Research indicates that although China's rotary steerable technology has broken the international monopoly and achieved development from scratch, significant shortcomings remain in steering principle diversity, extreme environment adaptability, and build-up rate capability. International rotary steerable systems exhibit a trend of synergistic development in hardware and software intelligence, with highly integrated steering hardware, strong mechanical performance, and wide application range. Meanwhile, intelligent software algorithms have extended from rotary steerable control to multiple operations including drilling, logging, and well evaluation. In contrast, intelligent research on domestic rotary

收稿日期：2025-11-05

基金项目：国家自然科学基金项目“水平井加砂压裂射孔孔眼系统非均匀冲蚀动态演化规律研究”（52574013）

作者简介：王宇飞（1985-），男，高级工程师，硕士，主要从事旋转导向系统研发与管理工作。E-mail：wangyf579. osjw@sinopec. com

通信作者：曾德智（1980-），男，教授，博士，主要从事钻井提速优化与井筒完整性工作。E-mail：zengdezhiswpu@163. com

steerable systems is still in its early stage. Currently, the development of rotary steerable systems faces dual challenges of harsh extreme environments and insufficient intelligence. Future breakthroughs need to focus on material and component innovation as well as intelligent architecture reconstruction. The research results are expected to advance the rapid development of intelligent rotary steerable systems in China.

Keywords: Directional drilling; Rotary steerable system; Intelligence; Informatization

0　前言

定向钻井技术的发展可分成初级、中级和高级三个阶段[1]，其中高级阶段指利用旋转导向系统（Rotary Steerable System，RSS）和随钻测井技术进行导向钻井。RSS 是一种通过从表面连续旋转进行定向钻孔的工具，无需滑动可转向电机。与传统的泥浆马达系统相比，RSS 具有稳定性高、不易卡钻、容易清洗井眼和钻速高的优点[2]。自 1997 年投入商用起，RSS 历经多年迭代升级，如今约 20 家油田服务企业已掌握该设备并提供作业支持[1]。其中，以斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿为代表的油田服务企业各自持有高端 RSS，并广泛部署于石油作业领域。当前，RSS 已发展为定向钻探与水平钻探的核心装备，在定向钻井领域的市场份额超过 70%[3]。

RSS 不仅是开发非常规油气的关键技术，也是当前石油钻井技术发展的核心方向。随着人工智能（Artificial Intelligence，AI）与大数据技术的突破，世界钻井技术已迈入智能旋转导向系统（Intelligent Rotary Steerable System，IRSS）的发展阶段。IRSS 可在钻井导向过程中集成应用大数据、AI 等先进技术，通过自动化设备实现精准导向控制，从而显著提升钻井效率并降低成本。其本质在于利用 AI 算法、实时轨迹监测与分析、随钻地震、近钻头测量等新技术，实现钻井作业的预测与自动控制[4]。大力发展 IRSS 有望降低作业成本与风险，并提升复杂储层勘探开发的效率与质量。2018 年，哈里伯顿率先发布了首款造斜率达 18°/30 m 的 iCruise 智能旋转导向系统，并随后推出“LOGIX 自动化钻井平台”[5]；2021 年，斯伦贝谢提出了发展自主定向钻井技术，包括可自主导向通过井筒任意部分的服务，并引入了井下自动化控制系统以实现实时数据解读和即时响应，从而提升钻井轨迹精度和效率；2023 年贝克休斯推出了“i-Trak 钻井自动化服务”，这是油气行业的首个自动化油藏导航服务。本文在总结和对比主流 RSS 产品与技术的基础上，分析了国内外 RSS 技术的差异，探讨了 IRSS 发展所面临的挑战，旨在促进中国 RSS 的发展。

1　RSS 技术对比及应用现状

在定向钻井系统中，狗腿严重程度（Dogleg Severity，DLS）是关键考量因素，DLS 表示钻井系统角度在钻井距离为 30.48 m 时的变化程度[6]。DLS 对定向钻井的影响见图 1，随着 DLS 的增加，造斜点变得更深，定向钻井时间越短，暴露的储层距离越长[7]。因此，DLS 成为评价 RSS 技术性能的关键指标，也是各大油服公司 RSS 技术研发工作的重点。

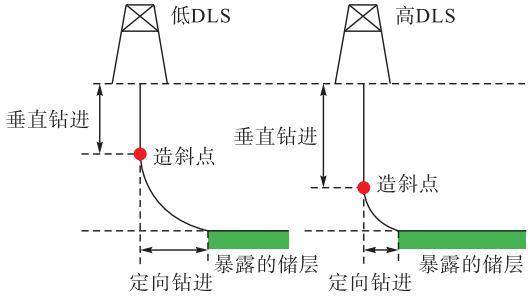


图 1　DLS 对定向钻井的影响图

Fig. 1　The effect of DLS on directional drilling

1.1　基本结构和工作原理

RSS 的基本结构见图 2，主要包括稳定平台和偏置单元两部分[8]。

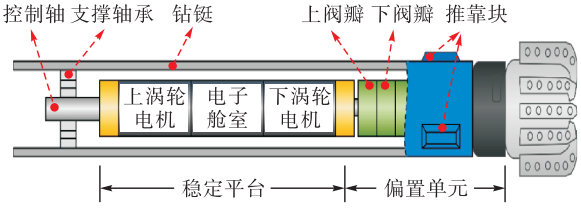


图 2　旋转导向系统结构图

Fig. 2　Structure of the rotary steerable system

RSS 稳定平台通过支撑轴承安装在钻铤内部，包括上涡轮电机、下涡轮电机、电子舱室和控制轴[9]。2 个涡轮电机在泥浆流体带动下将势能转换为电能，为电子舱室提供电力来源。偏置单元主要由上阀瓣、下阀瓣和 3 个推靠块组成。上阀瓣具有弯曲的高压孔，由稳定平台的控制轴旋转。下盘阀配有 3 个圆形低压孔，与钻铤同步旋转。当高压和低压井眼对齐时，泥浆流挤压了推靠块，推垫压在井壁上，产生作用力，从而改变钻头的钻进方向。这种通过直接为钻头施加侧向力实现导向目的的 RSS 属于推靠式。推靠式 RSS 造斜能力强，运行稳定，但是井眼轨迹不平稳，导致钻头和轴承磨损严重，维护成本高[10]。通过偏心环直接或间接导致主轴偏转脱离井眼轴线，从而实现导向目标的 RSS 属于指向式。指向式 RSS 导向能力强，井眼轨迹平滑，但是造斜能力较

弱且在软地层中导向效率降低[11]。

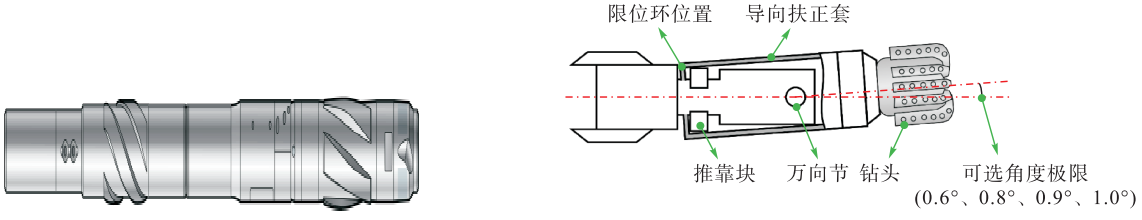
伴随导向技术的不断发展，创新性地融合推靠式与指向式机制，开发出混合式 RSS。相较推靠式及指向式，混合型 RSS 具备更强的综合调控性能、钻探高效性以及地层适应能力[12]。混合式 RSS 代表了旋转导向技术的未来趋势，尤其适用于高难度钻井作业，但其结构复杂、研制难度高，目前能够提供混合式 RSS 的油服公司较少。2011 年斯伦贝谢推出了首个混合式 RSS 产品 PowerDrive Archer，该产品巧妙融合了推靠式和指向式的技术优势和性能特点，最大造斜率达到 18° /30 m[13]。2017 年，Kim J 等人[6]在传统推靠与指向装置基础上，创新设计了一种混合式 RSS，其复合驱动机构借助液压缸与球面关节构造的复合执行单元实现，经小型样机及混凝土模块钻探测试，证实其性能优势显著。

1.2 国外典型 RSS

20 世纪 80 年代后期，国际上便开启了 RSS 的理论研究。历经多年发展，国外 RSS 技术逐步走向成熟。自 1990 年起，以贝克休斯的 Auto Trak、斯伦贝谢的 PowerDrive、哈里伯顿的 Geo-Pilot 为代表的导向钻探技术，从轨迹测量至实时调控引发全面革新，同时在技术领域与市场层面展开激烈角逐[1]。斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿三大国际油服公司占据了全球定向钻井市场超 50% 的份额[3]。

1.2.1 PowerDrive Archer

PowerDrive Archer 由斯伦贝谢于 2011 年推出，属高造斜 RSS，结构及工作原理见图 3[14]。



a) PowerDrive Archer 结构
a) Structure of PowerDrive Archer

b) PowerDrive Archer 工作原理
b) Working principle of PowerDrive Archer

图 3 PowerDrive Archer 结构及工作原理示意图

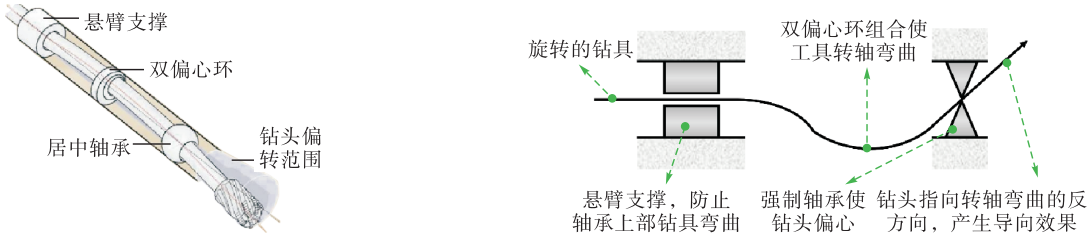
Fig. 3 Structure of and working principle of PowerDrive Archer

作为各油服企业竞逐研发的混合式 RSS，当前仅斯伦贝谢实现突破，并形成 475 /675 双系列产品[1]。PowerDrive Archer 融合了推靠式和指向式混合式 RSS 的优点，借助内置可调弯角协同内部偏心环结构，由 4 组推靠模块对扶正套内表面施压，驱动钻头以万向关节为枢轴形成轴向偏转，具备全角度自由定向及推靠功能，同时保持工具全旋转特性。其核心优势在于与特殊螺杆钻具组合时可实现高达 18° /30 m 的造斜率，是目前造斜率最高的 RSS。该系统基于 PowerDrive X6 系统的精密控制单元和 PowerDrive Xceed 系统的导向扶正套偏转机制，综合了两者的特点，具备造斜能力强、调控精度高、全周向旋转及系统稳定性好等特性[11]。此外，PowerDrive Archer 耐温上限达 150 ℃，钻井作业中可拓展排量选择空间，并支持通过调节排量与顶驱转速双路径传输控制指令。

除了混合式 RSS PowerDrive Archer 以外，斯伦贝谢还具有其他推靠式 RSS。斯伦贝谢的推靠式 RSS 由最初的 PowerDrive Xtra 逐步升级，2014 年发布 PowerDrive Orbit，最大造斜率为 10° /30 m。2022 年推出了迭代款 PowerDrive Orbit G2，由于创新的结构设计，PowerDrive Orbit G2 耐磨性和造斜率增强了，服役时间延长。PowerDrive Xcel 由指向式 PowerDrive Xceed 升级改造而来，最大造斜率达 15° /30 m。

1.2.2 Geo-Pilot

1999 年，哈里伯顿开发了 Geo-Pilot 系列 RSS，其结构和工作原理见图 4[14]。



a) Geo-Pilot 结构
a) Structure of Geo-Pilot

b) Geo-Pilot 工作原理
b) Working principle of Geo-Pilot

图 4 Geo-Pilot 结构及工作原理示意图

Fig. 4 Structure and working principle of Geo-Pilot

该系统属于静态指向式工具，其核心特点在于利用不旋转套与万向轴之间的一套可控制的内外偏心环机构进行导向。系统包含主轴、静止外套筒、双偏心环、离合机构、减速装置及联轴器等构件。执行导向时，离合器接合，主轴驱动双偏心环旋转并依预设偏移量调整组合形态。当组合形态锁定后，促使万向关节相对于静止外套筒形成特定方向偏移，进而为钻头赋予恒定且偏离井筒轴线的倾角。这种设计使得 Geo-Pilot 系统成为真正的点对点 RSS，不依赖地层进行地质转向，使其在软地层中具有显著优势。Geo-Pilot 系列 RSS 旨在提高深水和大位移油藏等恶劣钻井环境中的耐用性和性能，是适用于此类条件的强大解决方案，其设计目标是在最佳钻孔效率、行程时间和泥浆流失控制至关重要的场景中表现出色。除了持续迭代的 Geo-Pilot 系列 RSS，哈里伯顿还包括以智能著称的 iCruise 系列 RSS。

1.2.3　AutoTrak

贝克休斯的 AutoTrak 系列是其标志性静态推靠式 RSS，典型型号包括 AutoTrak G3 及专为陆上高造斜率工况设计的 AutoTrak Curve[15-16]，见图 5。

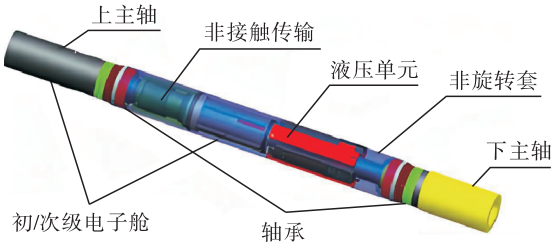


图 5　AutoTrak 系统图

Fig. 5　AutoTrak system

AutoTrak 系列 RSS 核心是导向头，在非旋转套筒上配置 3 组呈 120°分布的液压驱动肋板[17]。定向过程中，液压缸驱动肋板接触井筒壁面，合力作用促使钻具偏转以调控轨迹。达到预设倾角与方位后，肋板维持伸出状态保持井筒曲率。导向头还提供近钻头井斜测量。系统动力由钻柱经驱动轴传递。导向控制依赖精确测量导向头的重力工具面。因直接获取数据困难，系统采用导向头内置正交磁力仪测量地磁场分量，结合井斜、方位及地磁倾角推演出磁性工具面，最终通过坐标转换生成目标重力工具面。当近钻头井斜偏离目标，系统即根据动态重力工具面数据自动调整翼肋，实现闭环控制。系统还包括提供动力的模块马达、测量短节及脉冲器发电机。AutoTrak G3 可提供多种测量服务，典型造斜率约 6° /30 m[18]；而 AutoTrak Curve 则聚焦高造斜钻井，典型造斜率可达 15° /30 m[19]。除了 AutoTrak 系列以外，贝克休斯还包括 Lucida advanced 系列高端 RSS。

1.3　中国典型 RSS

中国自 20 世纪 90 年代中期开始旋转导向技术研究，中国石油天然气集团有限公司（以下简称中石油）、中国石油化工集团有限公司（以下简称中石化）、中国海洋石油集团有限公司（以下简称中海油）及高等院校均投入相关技术攻关。经十余年突破，现已实现部分核心技术自主化，逐步构建可工程化应用的国产旋转导向装置，如中石油开发的 CG STEER，中海油研发的 Welleader 和中石化研制的“经纬领航”RSS。

1.3.1　CG STEER

CG STEER 由中石油川庆钻探工程公司主导开发设计，属静态推靠式 RSS，其架构涵盖地面系统、导向及近钻头测量模块、挠性短节、中枢控制模块、发电机及双向通讯模块、静态测量模块，见图 6。该系统创新了“柔性”管柱结构提高造斜率的方法将理论造斜率从（4° ~6°）/30 m 提升到了 10° /30 m 以上。2021 年，在航天科工惯性技术有限公司与中国石油大学（华东）支持下，川庆钻探公司完成对 CG STEER 系统技术升级。通过开发双柱塞液压单元和全面应用螺杆高速钻探工艺，成功化解系统复杂性与软弱岩层造斜能力波动难题，确保现场作业高效实施。

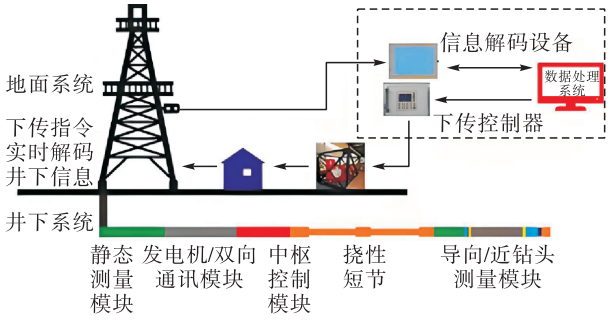


图 6　CG STEER 系统图

Fig. 6　CG STEER system

2019 年，CG STEER 首次开展页岩气水平井全井段试验，随后在川渝页岩气、长庆致密气及长庆页岩油等多个区块累计开展试验，各项功能日趋完善。2021 年，针对庆城油田 H100 平台井位密集、防碰绕障挑战严峻的钻探难点，采用 CG STEER 导向装置累计完成该区块 8 口井作业，实现平均偏移距 875.29 m，单趟钻进尺均值 1 143 m，机械钻探速率达 16.9 m /h，单井缩短完井工期约 3 d[20]。2021—2022 年，CG STEER 在苏里格气田致密气水平井累计应用 7 井次，完成进尺 7 356 m，平均机械钻速 7.14 m /h。自 2019 年以来，CG STEER 已累计完成全井作业 300 余口，作业进尺达到 4×10^5 m[1]。实践证明，CG STEER 在应对托压难题、优化轨迹调控、实现减摩降阻及提升水平段钻进速率与作业效率等维度成效显著。

1.3.2　Welleader

Welleader 由中海油主持开发，属于静态推靠式 RSS。该系统关键元器件与核心技术国产化程度高，具备井斜自动闭环控制功能，最高工作转速 180 r /min，耐

温 150 ℃,实钻造斜率约 6.5° /30 m[14]。该系统核心组件包括负责指令上传 /下载、井下通信控制及数据存储的中控短节,利用泥浆循环发电的涡轮发电机,以及随钻测量(Measurement While Drilling,MWD)、柔性短节、扶正器、旋转 /非旋转部分等关键单元,见图 7。该系统在渤海某平台高效完成协同作业,单趟钻定向段进尺 813 m,精确命中 3 处预设靶点。经陆上及海上平台多轮试验验证,Welleader 性能运行稳定可靠,但当前仍处于工程应用初期阶段。

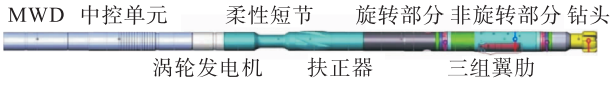


图 7 Welleader 系统图

Fig. 7 Welleader system

1.3.3 “经纬领航”

2021 年,中石化经纬有限公司自主研发了“经纬领航”RSS,通过专家组评定,认为系统整体达到国际先进水平。静态推靠式“经纬领航”旋转导向钻具的结构由导向头、柔性短节和中控平台组成,其中导向头包括钻头、肋板和稳定器,见图 8。

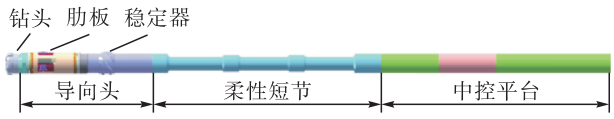


图 8 “经纬领航”旋转导向钻具结构图

Fig. 8 Structure of MatriNavi rotary steerable drilling tool

该系统最大耐温 165 ℃,可承受的最大压力达 140 MPa,同时能保持 96% 的储层钻遇率。2024 年,迭代升级的高可靠性“经纬领航”IB Plus RSS 在西北油田和胜利油田完成现场验证。与初代相比,“经纬领航”IB Plus RSS 结构强度提升 22% ,关键结构寿命提升至 2 000 h,表明其可靠性显著增强。2025 年,“经纬领航”高温旋转地质导向钻井系统在胜利油田通过实钻验证。在实钻试验中,该系统平均造斜率达到 15.5° /30 m,局部最高造斜率达到 16.84° /30 m。同时该系统耐温、耐压能力分别提升至 175 ℃和 172 MPa,成为目前国产耐温、耐压最高和实钻造斜能力最强的 RSS。

自“经纬领航”首次在涪陵页岩气地区应用成功后,逐步推广至西北油田、胜利油田、威荣页岩气田等多个区块。其应用场景包括川渝页岩气、胜利页岩油、西北碎屑岩、老区挖潜和渤海湾近海海油陆采等,成为中国首个全场景覆盖的 RSS。同时,在顺北“深地一号”钻井过程中,“经纬领航”作业垂深达 7 521.15 m,造斜点最深为 7 350 m,创造了中国自主旋导作业的纪录。在胜利页岩油牛页一区区块的钻进过程中,“经纬领航”与 Geo-Pilot 7600 相比具有更强的岩屑返出能力,平均单趟钻进尺多 337.74 m,平均机械钻速提高 8.5% ,表明“经纬领航”在特定区块达到国际领先水平[21]。截至 2025 年 7 月,“经纬领航”累计应用 387 口井,进尺 5.117 × 10^5 m,工作时间超 9.19 × 10^5 h。

对国内外 RSS 产品性能进行对比,见表 1。

表 1 国内外 RSS 产品性能综合对比表

Tab. 1 Synthesis and comparison of product performance of rotary steerable systems at home and abroad

公司	产品	导向方式	特点	适用环境	DLS /(° /30 m)	耐温 / ℃	耐压 / MPa	钻速 /(r·min^{-1})
斯伦贝谢	PowerDrive Orbit	推靠式	—	高性能钻井复杂流体系统大位移钻井	10.00	150	207	350
	PowerDrive Orbit G2	推靠式	高性能	高性能钻井	10.00	150	207	350
	PowerDrive Xcel	指向式	—	侧钻大位移钻井	15.00	150	138	350
	PowerDrive Archer	混合式	高造斜率	高曲率三维井高造斜率井	18.00	150	138	350
	PowerDrive ICE	推靠式	耐高温	超高温高压钻井	8.00	200	207	350
	PowerV	推靠式	垂直钻井	垂直钻井	—	150	138	220
哈里伯顿	Geo-Pilot Dirigo	指向式	高造斜率	深水 /超深水区域	15.00	150	175	245
	Geo-Pilot Duro	指向式	点位导向	复杂地质条件钻井	—	—	—	300
	Geo-Pilot XL	指向式	耐温抗压	高振动冲击钻井	—	175	207	—
	iCruise	推靠式	智能	自动化钻井非常规、深水钻井	18.00	150	—	400
	iCruise X	推靠式	智能	自动化钻井复杂地质条件钻井	30.00	180	172	400
	iCruise Force	推靠式	智能高性能	自动化钻井高性能钻井	30.00	150	138	400
贝克休斯	AutoTrak Curve Pro	推靠式	高造斜率	高造斜率井大位移钻井	—	—	—	—
	AutoTrak Curve	推靠式	—	高造斜率井非常规油气井	15.00	150	140	250
	AutoTrak eXact Pro	推靠式	高性能	高温环境大位移钻井	—	165	—	—

续表

公司	产品	导向方式	特点	适用环境	DLS /（°/30 m）	耐温 / ℃	耐压 / MPa	钻速 /（r·min^{-1}）
贝克休斯	AutoTrak eXact	推靠式	—	高造斜率井陆地与海上	12.00	—	—	—
	AutoTrak G3	推靠式	—	深水硬岩钻井	6.50	150	140	400
	Lucida	推靠式	自动化	高造斜率井大位移钻井	15.00	175	—	400
中石化	经纬领航	推靠式	—	页岩油气钻井碎屑岩钻井	16.84	165	140	—
中石油	CG STEER	推靠式	—	页岩油气钻井	10.00	150	—	—
中海油	Welleader	推靠式	—	陆地与海上	6.50	150	—	180

从发展历程来看，国际三大油服巨头（斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿）自 20 世纪 90 年代便引领了旋转导向技术的革命，形成了成熟的商业化产品体系。其技术优势主要体现在三个方面：导向方式多元化，涵盖推靠式、指向式和混合式，如斯伦贝谢的 PowerDrive Archer 作为全球唯一混合式 RSS 可以实现 18°/30 m 的行业最高造斜率；功能特点突出，不仅有适用于常规地层的 RSS，也有针对特殊服役环境和需求的 RSS，例如耐 200 ℃高温的 PowerDrive ICE，具备高钻井性能的 PowerDrive Orbit G2 和 AutoTrak eXact Pro；智能化程度高，如 iCruise 系列具备智能巡航等功能，AutoTrak 系列通过磁力计动态计算工具面，实现闭环控制。

与国际先进水平相比，国产 RSS 虽已实现从无到有的突破，但整体仍处于追赶阶段。核心差距表现在：导向原理单一，均采用推靠式，指向式 RSS 的研究报道和应用案例较少，仍处于现场试验阶段，缺乏商业化产品；目前，国产 RSS 的性能指标与国际先进水平仍存在代差。在实际钻井中，其平均造斜率最高仅为 15.5°/30 m，尚未达到国际领先标准。此外，在耐温极限和转速等关键指标上也均落后于国际先进水平。

2　IRSS

近年来，AI 和大数据技术成为多个行业领域的聚焦重点。作为资本技术双密集型产业，油气勘探开发领域对智能技术需求尤为迫切，已吸引全球能源巨头高度关注[22]。国际三大油服巨头加速向智能钻探时代转型，先后推出不同的 IRSS。哈里伯顿基于 AI 和旋转导向技术推出 iCruise 系列 IRSS[5]；斯伦贝谢推出基于 NeoSteer 和 Neuro 的自主定向钻井系统；贝克休斯发布了 i-Trak 自动化钻井服务。

2.1　哈里伯顿 iCruise 系列

2.1.1　iCruise

iCruise 作为哈里伯顿发布的初代 IRSS，装备了 6 个高速处理器，每秒可测量工具面 1 000 次，同时可以承受高转速、高扭矩和高钻压。在非旋转状态下造斜能力达到 18°/30 m，而旋转状态下为 10°/30 m，能够满足大多数直井、定向井及水平井的造斜要求。

目前该系统外径仅有 171.45 mm 规格，长度可在 7.92～10.67 m 范围内配置柔性短节进行调节，并兼容水基、油基、合成基及硅酸盐钻井液体系。底部可直接连接 GeoTech 钻头，构成集导向与高效破岩功能于一体的底部钻具组合。iCruise 系统基于智能自动巡航、自动测控和定向控制等技术可以在钻进过程中全程自动跟踪和修正轨迹。不仅能保持轨迹平滑度，同时与常规的马达和旋转导向相比，每米的钻进成本分别可以降低 57.89% 和 42.86%。iCruise 凭借高硬件规格和经济性的特点，有效填补了传统马达导向技术与全自动智能化 RSS 之间的技术空白。该系统不仅能在非常规油气藏的长水平段作业中实现高机械钻速，而且可以在成熟油田侧钻井中一趟钻完成“直井段—增斜段—稳斜段”的复杂轨迹钻进。

2023 年中海油面对某海上油田平台水平段地层软、增斜难和右漂严重的问题，在国内首次引进 iCruise 系统。钻进作业中，iCruise 造斜能力达 4°/30 m～7°/30 m，满足定向需求[23]。最大右漂趋势控制在 8°/30 m 以内，证明装置可有效抑制方位右偏。采用其智能巡航模式，井斜角波动区间 91.90°～91.99°，方位角稳定于 111.87° 且持续 20 m 无偏。哈里伯顿在哥伦比亚首次将外径 171.45 mm 的 iCruise 系统用于氮气注入的欠平衡控压钻井环境，单趟钻完成 744.32 m、85° 斜度的井段，且氮气注入率比例高达 7%[24]。全程保持信号与导向控制，并在石灰岩中实现低狗腿地质导向，验证了 iCruise 系统在复杂条件下精准钻井的可行性。

2.1.2　iCruise X

为了应对长水平井工况和提高系统可靠性，2021 年哈里伯顿在第一代 iCruise 基础上推出升级款 iCruise X，强化机械结构配合高强度材料应用，显著提升复杂地层与严苛工况中的适应性。和 iCruise 一样，iCruise X 在系统内置 6 个高速处理器和 3 套独立工具面测量单元，在 400 r/min 的高转速下工具面精度达到 ±0.1°。iCruise

X 包括 120.65 mm 和 171.45 mm 2 个规格，提供“无柔性”与“超柔性”2 种长度配置，以适应不同弯曲刚度需求。DLS 在非旋转模式下高达 30° /30 m，旋转模式下的柔性版为 15° /30 m。系统采用新型的转向头和接箍设计，可以承受高频扭转振荡以增强弯曲强度，同时延长接箍在高 DLS 井段的服役寿命。另外，采用先进的金属对金属密封技术以提高 iCruise X 的密封性，使其在高温高压环境中仍能长期运行，并通过高扭矩和高钻压，实现一趟钻完成“直—增—稳—降”复杂轨迹。与 iCruise 相比，iCruise X 通过 CruiseControl 技术与 LOGIX 平台，将物理模型、底部钻具组合数字孪生、实时数据分析三者耦合，自动输出“转向指令”与“振动指令”，优化井眼轨迹，降低井下振动[25]，见图 9。

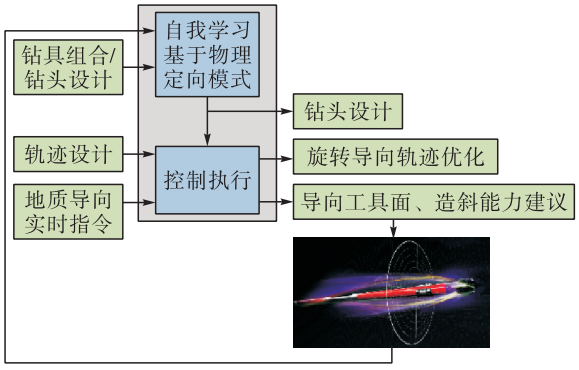


图 9 iCruise X 系统和 LOGIX 平台逻辑图

Fig. 9 Logic of iCruise X system and the LOGIX

在加拿大 Montney 页岩区，哈里伯顿以外径 120.65 mm 的 iCruise X 系统完成 4 口井的钻进，每口井的水平段均超过 3 500 m。其中 1 口井的单趟钻水平段达到 4 734 m，创该区最长井段与最快机械转速纪录，提前 2.5 d 完成钻井计划[26]。iCruise X 结合 CruiseControl 技术可以在剧烈振动的情况下实现最小的横向弯曲，节省了下套管时间。

2.1.3 iCruise Force

2024 年，为了增强钻井能力，哈里伯顿推出了 iCruise Force 高性能 IRSS。iCruise Force 提供多个尺寸规格，可以满足多种钻井工况，同时 DLS 在 4°/30 m ~ 30°/30 m 之间分级可调。iCruise Force 通过将大功率泥浆马达直接串接在 RSS 上方，显著增强了旋转导向的钻进能力。与初代 iCruise 相比分别，尽管最大转速没有提升，但是最大扭矩增大了 3.33 倍，最大钻压增大了 53.85% ，从而能够在超深井、大位移井或高研磨性地层中维持高钻压与高转速。iCruise Force 引入电信号，在泥浆脉冲信号被钻井液削弱时，仍能保持高速下行指令与实时上行数据流[27]。iCruis Force 配合 CruiseControl 闭环轨迹控制算法，可在滑动与旋转钻进间无缝切换，减少起下钻次数，降低井眼狗腿度，为后续套管、完井创造低摩阻通道。

表 2 为哈里伯顿 iCruise 系列的发展与技术对比，初代 iCruise 通过高可靠性模块化设计填补传统导向与全自动 RSS 的市场空白；升级版 iCruise X 融合专家经验与实时机器学习；高性能迭代产品 iCruise Force 则突破极端工况限制，扭矩与钻压能力达 iCruise 3 倍以上，配合电磁信号增强通讯可靠性，为超深井与高研磨地层提供解决方案。

表 2 iCruise、iCruise X 和 iCruise Force 性能指标对比表

Tab. 2 Performance comparison of iCruise, iCruise X, and iCruise Force

产品	外径尺寸规格 /mm	最大扭矩 /(N·m)	最大钻压 /N
iCruise	171.45	2.508×10^4	2.891×10^5
iCruise X	120.65、171.45	2.508×10^4	2.891×10^5
iCruise Force	120.65、171.45、203.2、241.3	1.085×10^5	4.448×10^5

2.2 斯伦贝谢 NeoSteer 和 Neuro

2019 年，斯伦贝谢将导向执行机构靠近或安置在钻头上从而推出 NeoSteer CL /CLx 钻头导向系统。NeoSteer CL /CLx 均属于推靠式 RSS。与普通 RSS 相比，NeoSteer 优点显著：推靠位置靠近钻头，造斜能力强，在滑动和旋转模式下的 DLS 分别为 16° /30 m 和 15° /30 m；钻井效率高，只需要同一套底部钻具组合即可完成从垂直段到长水平段的钻进，避免了中途起下钻换钻具；轨迹控制能力强，近钻头测量包括井斜角、方位角、平均和方位自然伽马。2022 年，斯伦贝谢推出了 Neuro 自主解决方案，将专业知识与互联的智能系统相结合，在地面和井下之间创建连续的反馈回路，显著提高了勘探和生产运营的效率、一致性和可靠性，同时减少了人为干预。基于 NeoSteer 形成的自主定向钻井属于 Neuro 自主解决方案的功能之一。Neuro 自主解决方案通过预测转向机器学习模型和数据驱动的趋势分析来对钻井轨迹进行自动化设计和分析。通常使用 RSS 进行钻进时需要重复的命令序列来控制曲线轨迹，同时需要地面司钻多次干预和下传指令。从地面向井下钻具组合下发指令，再到工具将数据反馈至地面以修正指令，这一时差可长达 20 min。而 Neuro 自主解决方案通过实时引导地下 RSS 和其他工具，可在所需时间、所需位置直接评估数据并做出响应，从而彻底消除控制回路延迟。另外，Neuro 自主解决方案可以通过 Performance Live 数字化互联服务

远程接入专家,提高作业效率。

基于 Neuro 的智能旋转导向系统已经在北美、南美、中东等区块超过 131 口井得到部署,累计钻进距离超过 186 537.6 m。在中东某区块钻进过程中,与采用传统模式的 RSS 钻进相比,Neuro 使得传至 RSS 的指令减少了 49%,在使用自动造斜功能钻进造斜段时,机械钻速提高 37%。

2.3　贝克休斯 i-Trak 自动化钻井服务

2019 年,贝克休斯推出了 i-Trak 自动化钻井服务,通过集成化和自动化的钻井系统将作业人员从井场转移到远程指挥中心,从而提高钻井作业的安全性和效率。另外,i-Trak 通过整合地面与井下的实时数据来显著提升钻井效率、井眼质量及轨迹控制。同时结合基于物理与数据驱动的混合模型,执行自动化的标准作业程序与核查流程,进一步降低风险并提高效率。i-Trak 具有“建议”和“自动控制”两种模式。在建议模式下,i-Trak 将最新的导向方案发送给地面钻井团队审阅,方案获批后,司钻再向井下 RSS 下发指令。在自动控制模式下,i-Trak 直接向 RSS 发送指令,实现快速轨迹修正,同时钻井团队也可以随时主动介入指令执行。另外,i-Trak 结合 AI 技术,可以在钻井过程中“学习”地层特性,持续优化并改进钻井工艺。因此,i-Trak 有助于提高 RSS 在各种复杂钻井环境中的钻井性能。

2023 年,i-Trak 自动化钻井服务首次在海上钻井中得到应用。通过分布式井下和地面控制器,在没有人工干预的情况下成功中靶,同时保持井段光滑。与常规钻井工具相比,应用 i-Trak 自动化钻井服务之后,平均机械钻速提高了 29%,其中某井提前 23 h 完钻。截至目前,应用 i-Trak 自动化钻井服务进行钻进的距离超过 8×10^6 m。

面对钻井智能化发趋势,以三大油服巨头为代表的国际公司采取了不同的发展方式。其中哈里伯顿与斯伦贝谢兼顾软件和硬件的发展,一方面分别推出新型的 RSS,例如 iCruise 系列和 NeoSteer 系列;另一方面基于 AI 和大数据形成智能控制模型,例如 CruiseControl 和 Neuro。而贝克休斯则推出了包含多个环节的 i-Trak 自动化钻井服务来提高作业的精度、效率和可靠性。三大油服巨头不同的发展方式也代表了当前 IRSS 的研究现状,不仅优化设计旋转导向系统的结构,同时基于 AI 开发旋转导向系统智能控制算法与模型。通过硬件性能与软件智能的协同进化实现从基础自动化向“自决策”高阶智能化的转变。其中旋转导向系统的结构优化以 iCruise 系列和 NeoSteer 系列为代表,呈现集成化程度高、机械性能强、应用范围广的特征。而 CruiseControl、i-Trak 和 Neuro 则逐步从 RSS 的智能控制发展到多个环节的智能化。例如 CruiseControl 专注于井下 RSS 的控制,优化轨迹,减小震动;i-Trak 则包括了整个钻井环节,例如自动定向钻井和油藏导航、自动流体监测、自动脱扣优化和自动转速优化等方面;而 Neuro 不仅包括自动定向钻井和地质转向,还包括自动井干预和自动井完整性测井。

2.4　中油测井 CNPC-IDS IRSS

CNPC-IDS 智能导向系统由中油测井主导开发,包括地面采集系统、下传系统、通信供电短节、主控测量短节、伽马压力短节及导向短节构成。该系统可实现现场数据的实时交互共享和测导数据的实时远程传输,实现远程钻、录、测一体化施工作业。CNPC-IDS 外径为 171.45 mm,设计造斜率为 15°/30 m,耐温能力达到 165 ℃,是国内首个高温高造斜率 RSS。此外,中油测井持续攻克狭小空间下结构强度、电路集成、执行机构设计等难题,成功研制出 120.65 mm 小直径智能导向系统,已完成首井现场试验。目前,CNPC-IDS IRSS 已在国内长庆、塔里木、新疆、西南、大港等油气田 100 口井得到应用,总进尺 11×10^4 m。2023 年 11 月,CNPC-IDS 在大安区块作业的单躺最高进尺为 2 524 m,最高作业温度 151 ℃。

国内外 IRSS 产品性能综合对比见表 3。目前,国内外 IRSS 的发展处于起步阶段。国外的 IRSS 包括哈里伯顿的 iCruise 系列和斯伦贝谢的 NeoSteer 近钻头导向系列。国内的 IRSS 只有中油测井研发的 CNPC-IDS,在造斜能力、耐压能力和转速等方面与国际先进水平存在一定差距。

表 3　国内外 IRSS 产品性能综合对比表

Tab. 3　Synthesis and comparison of product performance of intelligent rotary steerable systems at home and abroad

公司	产品	导向方式	适用环境	DLS / [(°)·(30 m)$^{-1}$]	耐温 / ℃	耐压 / MPa	钻速 /(r·min^{-1})
斯伦贝谢	NeoSteer CL	推靠式	高造斜率井侧向剖面水平井	16	150	138	350
	NeoSteer CLx	推靠式	高造斜率井侧向剖面水平井	16	150	138	350
哈里伯顿	iCruise	推靠式	自动化钻井非常规、深水钻井	18	—	—	400
	iCruise X	推靠式	自动化钻井复杂地质条件钻井	15	150	172	400
中石油	CNPC-IDS	推靠式	大位移钻井小直径井眼	15	165	140	300

3 RSS 的发展挑战

3.1 极端环境适应性

进军地球深部、开拓深层油气资源，对巩固我国能源安全根基具有重大实践价值与重要意义，更是强化油气勘探开发投入的关键着力领域[28]。中国典型深层、超深层油气藏的最高温度达到 220 ℃，位于塔里木盆地的顺托果勒隆起区块；最高压力约 150 MPa，位于川东北的川深 1 井，见图 10。电子舱室是整个 RSS 的“大脑”，安装有大量电子元器件，负责导向工具与地面系统之间指令信号的传输[11,29]。IRSS 的智能自动巡航、远程协议和自动测控等技术基于各类传感器、信息传输系统与供电单元实现。

目前斯伦贝谢针对高温高压问题推出了耐温 200 ℃、耐压 207 MPa 的 PowerDrive ICE，在井下工作 2 000 h 依然能保持电子器件的完好，前后对比图见图 11。

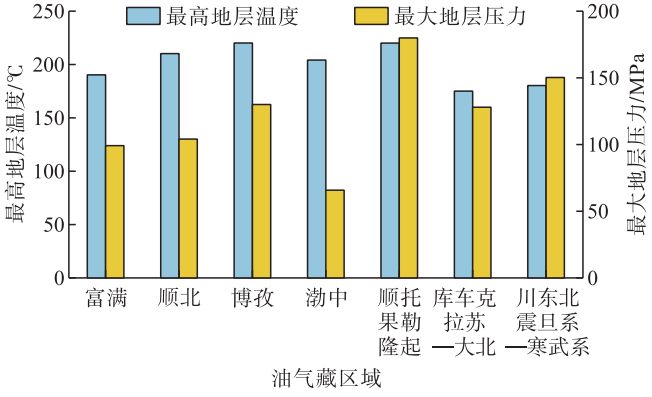
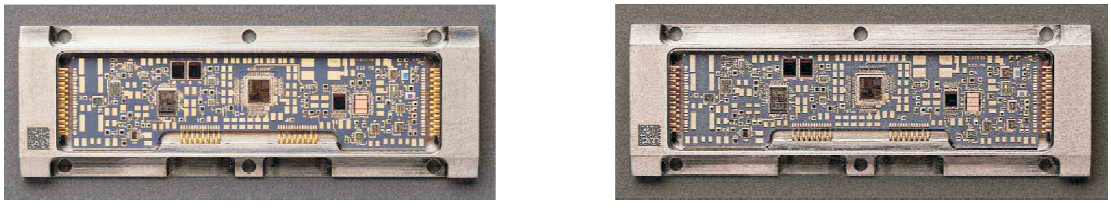


图 10 中国典型深层、超深层油气藏的最大温压图

Fig. 10 Maximum temperature and pressure of typical deep and ultra-deep oil and gas reservoirs in China



a) 服役前

a) Before deployment

b) 在 215 ℃ 下服役 2 000 h 后

b) After deployment at 215 ℃ for 2 000 h

图 11 PowerDrive ICE 系统在高温下服役前后对比图

Fig. 11 Comparison of the PowerDrive ICE system before and after high-temperature service

相较于常规 RSS，IRSS 的结构更加复杂、内部电子元器件数量更多，目前还没有耐温超过 200 ℃ 的 IRSS，仅有 iCruise X 的最大耐温达到 180 ℃。此外，IRSS 在极端环境中的腐蚀与振动也是值得考虑的重要因素。我国油气资源中广泛分布硫化氢、二氧化碳等酸性气体和矿物盐离子，在部分油气田中含硫甚至高达 450 g/m^3[30]，导致钻具在钻井液中发生严重的腐蚀，从而诱发开裂[31-32]。对于指向式 IRSS 来说，偏心结构本身会引入周期性变化的非线性偏心力矩，尤其在工具面角度变化时，这种力矩会呈正弦函数关系波动，导致系统产生振荡旋转，进而引发横向或扭转振动[33]。

服役环境中高温、高压、腐蚀和振动所诱发的电路工作和器件失效是影响旋转导向系统使用寿命和周期的重要因素，制约了旋转系统的全面推广和应用，因此极端环境中的适应性成为 IRSS 的发展瓶颈之一。未来需要重点从材料与器件革新方面提升 IRSS 在极端环境中适用性和稳定性，例如采用绝缘体上硅工艺制造的高温芯片以及陶瓷、金属玻璃等高温封装材料使 IRSS 的工作温度上限超过 250 ℃[34]；选用碳化硅或氮化镓等宽禁带半导体，有望支持 IRSS 在 300 ℃ 工况下稳定工作，性能显著突破硅基器件极限[35]，同时通过金属有机框架提升高压下的密封极限[36]。

3.2 智能化程度不足

图 12 为 RSS 典型的双闭环控制系统，内环主要由 MWD、井下控制器、偏心稳定器、钻头和近钻头倾角、方位角传感器组成，而外环主要由内环和地面监测中心组成[11,37]。通常内环按照预先设定的程序自动调节井下闭环控制作业，外环则由人工操作实时调节井眼轨迹[38-39]。而 IRSS 则是在双闭环控制系统中嵌入例如神经网络[40]、模糊—强化学习[41]、在线辨识[42]等人工智能算法来提高井眼轨迹的控制。

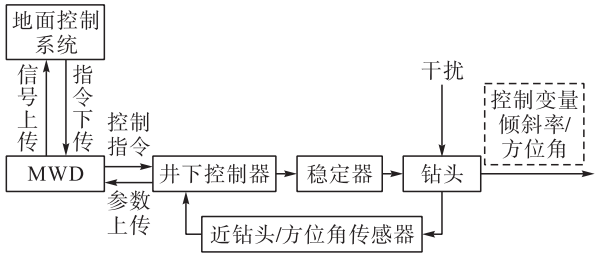


图 12 典型的 RSS 控制体系图

Fig. 12 Typical RSS control system

井眼轨迹智能优化依赖信息传递的实时性，精准及时的井下数据为现场分析决策提供核心支撑。与常规

RSS 相同,IRSS 的通讯架构涵盖井下与地面传输体系。地面传输架构主要由井场近距通讯及远程链路构成,当前有线 /光纤 /卫星及 3G /4G 无线等多模式技术体系完备成熟[43]。而井下传输系统主要依靠泥浆脉冲通讯,即以钻柱内循环的钻井液为媒介,通过编码压力脉冲波形传输数据[44]。但随着井深递增,脉冲信号强度持续递减,致使下行指令与上行实测信息特征维度显著缩减,难以满足高阶算法对全特征集的需求[45]。因此,算法只能基于稀疏、延迟、低分辨率的数据做决策,限制了 RSS 的智能化。

另外,面对钻柱—钻头—地层耦合呈现的强非线性、时变、空间分布特征[46-47],AI 算法往往需要在 10 ~ 100 ms 级别运算。然而,井下算力资源有限,难以在 1 ~ 2 ms 控制周期内完成 1 次“观测—推理—执行”闭环。同时,由于粘滑振动、涡动、钻头磨损等机理尚未完全量化,导致训练数据标签不精确,影响结果收敛性与可解释性[11]。

4　结论

RSS 是实现定向钻井技术智能化发展的核心。本文基于系统结构和工作原理对比了国内外典型的 RSS,同时梳理了国际上 IRSS 产品的性能参数及应用现状。国外 RSS 历经几十年的研究,已经形成了成熟的商业化产品体系,不仅导向方式多元化,而且功能特点突出,在保持智能化的同时能满足多种服役环境和需求。国外以哈里伯顿、斯伦贝谢和贝克休斯为代表的 IRSS 的发展呈现硬件性能与软件智能的协同进化的特征。其中旋转导向硬件集成化程度高、机械性能强、应用范围广,而软件智能算法则从旋转导向的控制延伸到钻井、测井和井评估等多个领域。尽管中国 RSS 的发展已经取得了显著的进展,实现了国产 RSS 的突破,但仍然存在产品类型单一和性能薄弱的缺点,针对 IRSS 的研究布局尚处于起步阶段。

当前 RSS 的发展面临极端环境恶劣和智能程度不足两个方面的挑战。未来需要从材料与器件革新方面避免控制电路的高温失效,同时提高密封承压极限;从智能架构构建上缩短指令控制的延迟,避免井下实时调参滞后现象发生。增强材料科学与结构力学、信息技术与工程技术的跨学科融合,促进 RSS 的智能化发展,最终实现零干预智能钻井。

参考文献:

[1] 苏义脑,窦修荣,高文凯,等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势[J]. 钻采工艺,2024,47(3):1-8.
Su Yinao, Dou Xiurong, Gao Wenkai, et al. Research status and development trends of rotary steerable system [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47 (3): 1-8.

[2] 黄　熠,罗　鸣,马传华,等. 超深水油气钻完井关键装备现状及技术展望[J]. 天然气工业,2025,45(6):150-160.
Huang Yi, Luo Ming, Ma Chuanhua, et al. Status and technological prospect of key equipment for ultra-deepwater oil and gas well drilling and completion [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45 (6): 150-160.

[3] Li Fei, Ma Xueying, Tan Yuqi. Review of the development of rotary steerable systems [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1617 (1): 012085.

[4] Kuang Lichun, Liu He, Ren Yili, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48 (1): 1-14.

[5] Offshore. Halliburton unveils intelligent rotary steerable system [EB /OL]. (2018-09-25) [2025-07-23]. https://www.offshore-mag.com/business-briefs/equipment-engineering/article/16803066/halliburton-unveils-intelligent-rotary-steerable-system.

[6] Kim J, Myung H. Development of a novel hybrid-type rotary steerable system for directional drilling [J]. IEEE Access, 2017, 5: 24678-24687.

[7] Park B, Kim J, Park J, et al. Hybrid 4-pad rotary steerable system for directional drilling of unconventional resources [C]//2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), October 30-November 02, 2013, Jeju, Korea (South). New York: IEEE, 2013: 659-660.

[8] 韩来聚,王瑞和,刘新华,等. 调制式旋转导向钻井系统稳定平台控制原理及性能分析[J]. 石油大学学报(自然科学版),2004,28(5):49-51.
Han Laiju, Wang Ruihe, Liu Xinhua, et al. Control principle and servo platform performance analysis of modulated rotary steerable drilling system [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28 (5): 49-51.

[9] Huo Aiqing, Zhang Kun, Jiang Xue. Enhanced toolface angle control of stabilized platform using I_DDPG in rotary steerable system [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2025, 16 (9): 5493-5507.

[10] Li Yuanzhi, Niu Wentie, Li Hongtao, et al. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 923178.

[11] 黎　伟,牟　磊,周贤成,等. 旋转导向系统及其控制方法研究进展[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(10):167-179.

Li Wei, Mu Lei, Zhou Xiancheng, et al. Research progress of rotary steerable system and its control methods [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51 (10): 167-179.

[12] 王植锐,王俊良. 国外旋转导向技术的发展及国内现状[J]. 钻采工艺,2018,41(2):37-41.
Wang Zhirui, Wang Junliang. Development of rotary steering technology in foreign countries and its status quo in China [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41 (2): 37-41.

[13] 冯 定,王 鹏,张 红,等. 旋转导向工具研究现状及发展趋势[J]. 石油机械,2021,49(7):8-15.
Feng Ding, Wang Peng, Zhang Hong, et al. Research status and development trend of rotary steerable system tool [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (7): 8-15.

[14] 宋红喜,曾义金,张 卫,等. 旋转导向系统现状及关键技术分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(6):2123-2131.
Song Hongxi, Zeng Yijin, Zhang Wei, et al. Current situation and key technology analysis of rotary steering system [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (6): 2123-2131.

[15] 光新军,王敏生. 新型旋转导向工具在页岩气开发中的应用[J]. 石油机械,2014,42(1):27-31.
Guang Xinjun, Wang Minsheng. Application of new type of rotary steering tools in shale gas development [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42 (1): 27-31.

[16] 毕研涛,柳贡慧,杨宁宁,等. 柔性短节对静态推靠式旋导工具造斜力的影响[J]. 石油机械,2022,50(5):9-15.
Bi Yantao, Liu Gonghui, Yang Ningning, et al. Influence of flexible sub on deviating force of static push-the-bit rotary steering BHA [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50 (5): 9-15.

[17] 马鸿彦,王大宁,张 杰,等. 旋转导向系统在深层页岩油水平井的应用[J]. 钻采工艺,2019,42(4):16-19.
Ma Hongyan, Wang Daning, Zhang Jie, et al. Application of rotary steering systemin deep horizontal shale oil well [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42 (4): 16-19.

[18] 吴鹏程,汪 瑶,付 利,等. 深层页岩气水平井“一趟钻”技术探索与实践[J]. 石油机械,2023,51(8):26-33.
Wu Pengcheng, Wang Yao, Fu Li, et al. Exploration and practice of “one trip” technology for deep shale gas horizontal wells [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51 (8): 26-33.

[19] 罗廷才,赵锦栋. AutoTrak 旋转闭环钻井系统在西江油田的应用[J]. 石油钻探技术,2002,30(5):48-50.
Luo Tingcai, Zhao Jindong. Applications of autotrak rotary closed-loop drilling system in Xijiang Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30 (5): 48-50.

[20] 赵文庄,韦海防,杨 赟. CG STEER 旋转导向在长庆页岩油 H100 平台的应用[J]. 钻采工艺,2021,44(5):1-6.
Zhao Wenzhuang, Wei Haifang, Yang Yun. Application of CG STEER rotary steerable tool in Changqing Shale oil H100 platform [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44 (5): 1-6.

[21] 蒲文学,李 伟,王宇飞,等. 胜利页岩油牛页一区试验井组旋转导向钻井技术[J]. 石油钻探技术,2025,53(1):24-30.
Pu Wenxue, Li Wei, Wang Yufei, et al. Rotary steerable drilling technology for test wells in Niuye Block I in Shengli Shale oil field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53 (1): 24-30.

[22] Li Gensheng, Song Xianzhi, Tian Shouceng, et al. Intelligent drilling and completion: A review [J]. Engineering, 2022, 18: 33-48.

[23] 陈国宏,吴占民,陈立强. 智能旋转导向工具 iCruise 在海上油田中的应用[J]. 北京石油化工学院学报,2023,31(1):14-21.
Chen Guohong, Wu Zhanmin, Chen Liqiang. Application of icruise intelligent rotary steering system tool in offshore oil fields [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2023, 31 (1): 14-21.

[24] Halliburton. Successful underbalanced drilling operation in Colombia [EB/OL]. (2023-05-20) [2025-07-23]. https://www.halliburton.com/en/resources/successful-underbalanced-drilling-operation-in-lam.

[25] Halliburton. iCruise X intelligent rotary steerable system [EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.halliburton.com/en/products/icruise-x-intelligent-rotary-steerable-system.

[26] Halliburton. Breaking records in the Montney play with iCruise X [EB/OL]. (2023-05-20) [2025-07-23]. https://www.halliburton.com/en/resources/breaking-records-in-the-montney-play-with-icruisex.

[27] Halliburton. iCruise Force intelligent high-performance rotary steerable system [EB/OL]. [2025-07-23]. https://www.halliburton.com/en/products/icruise-force-intelligent-rotary-steerable-system.

[28] 李 阳,薛兆杰,程 喆,等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探,2020,25(1):45-57.
Li Yang, Xue Zhaojie, Cheng Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (1): 45-57.

[29] 谢棋军,底青云,杨永友,等. 旋转导向系统中非接触电能与信号一体化传输技术[J]. 地球物理学报,2023,66(1):101-110.
Xie Qijun, Di Qingyun, Yang Yongyou, et al. Integrated

transmission technology of non-contact power and signal in rotary steering system [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66 (1): 101-110.

[30] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等.深井超深井油气钻井技术进展与展望[J].天然气工业,2021,41(8):163-177.
Wang Haige, Huang Hongchun, Bi Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (8): 163-177.

[31] Chen Zihan, Sun Shixuan, Huang Hao, et al. Corrosion behavior and failure mechanism of V150 drill pipe in HPHT and ultra-deep drilling process [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 158: 107974.

[32] Yu Zhiming, Zeng Dezhi, Hu Shurui, et al. The failure patterns and analysis process of drill pipes in oil and gas well: A case study of fracture S135 drill pipe [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106171.

[33] 汪跃龙,王海皎,康思民,等.导向钻井稳定控制平台的反馈线性化控制[J].石油学报,2014,35(5):952-957.
Wang Yuelong, Wang Haijiao, Kang Simin, et al. Output feedback linearization of servo platform for rotary steering drilling system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35 (5): 952-957.

[34] 李　闯,赵立波,王尊敬,等.基于 SOI 的 E 型膜结构耐高温压力芯片的设计与制造[J].仪表技术与传感器,2021 (1):20-24.
Li Chuang, Zhao Libo, Wang Zunjing, et al. Design and fabrication of E-type membrane structural high temperature pressure chip based on SOI [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021 (1): 20-24.

[35] Hassan A, Savaria Y, Sawan M. Electronics and packaging intended for emerging harsh environment applications: A review [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2018, 26 (10): 2085-2098.

[36] Widmer R N, Lampronti G I, Anzellini S, et al. Pressure promoted low-temperature melting of metal-organic frameworks [J]. Nature Materials, 2019, 18 (4): 370-376.

[37] Zhang Chi, Zou Wei, Cheng Ningbo. Overview of rotary steerable system and its control methods [C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. August 7-10, 2016, Harbin, China. New York: IEEE, 2016: 1559-1565.

[38] 李根生,宋先知,祝兆鹏,等.智能钻完井技术研究进展与前景展望[J].石油钻探技术,2023,51(4):35-47.
Li Gensheng, Song Xianzhi, Zhu Zhaopeng, et al. Research progress and the prospect of intelligent drilling and completion technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51 (4): 35-47.

[39] 秦永和.滑动导向与旋转导向钻井技术进展及发展对策[J].石油钻探技术,2024,52(6):1-9.
Qin Yonghe. Progress and development strategies of sliding and rotary steerable drilling technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (6): 1-9.

[40] Ke Chong, Song Xingyong. Control design for directional down-hole drilling using dual-heuristic programming with a high-order dynamic model [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30 (3): 1009-1020.

[41] Zhang Chi, Zou Wei, Cheng Ningbo, et al. Trajectory tracking control for rotary steerable systems using interval type-2 fuzzy logic and reinforcement learning [J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355 (2): 803-826.

[42] 胡金艳,周　静,尚海燕,等.智能旋转导向工具核心控制器的仿真研究[J].石油钻探技术,2002,30(6):39-41.
Hu Jinyan, Zhou Jing, Shang Haiyan, et al. Simulation study on the core controller of the intelligent rotary steering tool [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30 (6): 39-41.

[43] 王敏生,光新军.智能钻井技术现状与发展方向[J].石油学报,2020,41(4):505-512.
Wang Minsheng, Guang Xinjun. Status and development trends of intelligent drilling technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (4): 505-512.

[44] 汤　楠,霍爱清,汪跃龙,等.旋转导向钻井系统下行通讯接收功能的开发[J].石油学报,2010,31(1):157-160.
Tang Nan, Huo Aiqing, Wang Yuelong, et al. Development of downward communication receiving function in rotary steerable drilling system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (1): 157-160.

[45] 吴思源,李守定,陈　冬,等.大闭环伺服控制随钻智能导向钻井方法[J].地球物理学报,2021,64(11):4215-4226.
Wu Siyuan, Li Shouding, Chen Dong, et al. An intelligent-while-drilling steering method of global closed-loop servo control [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64 (11): 4215-4226.

[46] 狄勤丰,尤明铭,李田心,等.特深井钻柱动力学特性模拟与分析[J].石油钻探技术,2024,52(2):108-117.
Di Qinfeng, You Mingming, Li Tianxin, et al. Simulation and analysis of dynamic characteristics of drilling string in extra-deep wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52 (2): 108-117.

[47] 李欣业,高赫远,郭晓强,等.钻柱振动的主被动控制研究进展与展望[J].天然气工业,2024,44(6):98-110.
Li Xinye, Gao Heyuan, Guo Xiaoqiang, et al. Research progress and prospect in active and passive control of drill string vibration [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44 (6): 98-110.