

铁路轨道测量设备可调支撑结构技术综述与展望

池树孝

西安铁路职业技术学院, 陕西 西安 710600

摘要: 轨道测量设备的支撑结构是保障轨道几何参数测量精度的关键基础部件。随着我国铁路网规模持续扩大和列车运行速度不断提高, 测量作业对支撑结构在调平精度、承载稳定性和环境适应性等方面提出了更高要求。本文系统梳理了铁路轨道测量设备可调支撑结构的技术发展脉络, 从螺旋传动式、液压驱动式和机电混合式三种技术路线出发, 分析各类结构的调平原理、力学特性与适用条件, 对比其精度、效率与可靠性特征, 并结合国内外工程应用案例探讨技术演进趋势, 最后对可调支撑结构的智能化与高精度化发展方向进行展望。

关键词: 铁路轨道测量; 可调支撑结构; 螺旋调平; 液压调平; 机电混合驱动

DOI: 10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202609037

0 引言

轨道几何状态能否做到较为精确的测量, 属于铁路建设和日常运维中的关键环节, 轨距、水平、高低、轨向等参数会直接影响列车运行的平稳程度与安全状况。近年来, 我国铁路运营里程不断增加, 截至2025年, 全国铁路营业里程为16.5万公里, 其中高速铁路约5万公里, 这类铁路网络的持续扩展使轨道检测与精调工作量明显加重, 也使测量设备在性能方面的要求变得更加严格。

在轨道测量设备里, 可调支撑结构主要负责支撑测量传感器、调整测量基准平面, 并对外部振动干扰起到一定的隔离作用, 这些都是比较关键的功能, 其调平精度会直接关系到轨道几何参数的测量误差, 而结构刚度则在很大程度上影响设备在复杂工况条件下的测量稳定性。依据EN 13848-4:2025标准, 轨道几何测量系统需要满足位移测量示值误差、数据重复性等重要性能指标要求。围绕可调支撑结构的相关技术进展, 本文将从结构原理、性能对比、工程应用以及发展趋势等方面进行较为系统的综述。

1 可调支撑结构的技术分类与原理

1.1 螺旋传动式支撑结构

螺旋传动式支撑结构是借助螺纹副, 把旋转运动转换成直线位移, 从而实现支撑高度较为精细的调节, 它的关键优势主要在于螺纹副的自锁特性, 也就是梯形螺纹或蜗轮蜗杆传动本身具备自锁能力, 在调平到位之后, 即便继续承受一定压力也不容易出现松动或回弹。某专利技术采用蜗杆—蜗轮—丝杠的复合传动链, 由蜗杆带动蜗轮再带动丝杠旋转, 使螺母副产生直线位移, 进一步推动调节架沿支撑架方向滑动, 从而实现轨距适配范围内的无级调节。该方案还在调节架四边的中心位置开设导向槽, 使其与支撑架形成水平滑动配合, 用以保证调节过程中的运动精度。

螺旋传动式结构在调平时的分辨率一般可以做到0.5mm/转, 其精度主要受到螺纹加工精度以及回程间隙这两方面的影响, 它的不足在于调节速度偏慢, 进行单点调平时往往要多次来回微调, 对人工操作的依赖程度也相对较高。

1.2 液压驱动式支撑结构

液压驱动式支撑结构依据帕斯卡原理工作, 通过液压缸的伸出与回缩来完成支撑高度的较快调整, 液压系统的优点主要是承载能力较强、调节反应较快, 因此更适用于大型测量平台在需要快速粗调时使用, 不过液压系统也有一些先天不足, 由于液体存在一定压缩性, 其定位精度往往不如螺旋结构, 同时在长时间承载之后, 还可能出现较为缓慢的沉降现象。

为处理前面提到的问题, 工程实践里常见的做法是采用液压与螺旋相结合的方案, 一种用于铁路轨道几何不平顺动态特性测试的试验台, 也使用了液压油缸和调整螺旋杆配合工作的形式: 液压油缸主要负责快速顶升以及横向位移的调整, 调整螺杆用于实现更精确的锁定与小范围微调。该试验台通过分别调节各个底座位置上的调整螺旋杆与液压油缸, 可以设置高低不平顺、水平不平顺、轨距不平顺等不同类型的几何偏差。调平结束后, 依靠螺杆的自锁特性, 可以在较长时间的试验过程中保持几何参数不发生变化, 同时液压系统也能够完全关闭, 从而在一定程度上降低能耗。

1.3 机电混合驱动式支撑结构

机电混合驱动式支撑结构把电机驱动、精密传动以及传感反馈等技术结合在一起, 被认为体现了可调支撑结构走向智能化的发展方向, 其常见的构型是由伺服电机带动滚珠丝杠或行星滚柱丝杠, 同时配置倾角传感器、激光测距仪和闭环控制器, 从而实现多个支撑点之间的自动协同调平。

在轨道交通的智能巡检方面, 相关技术已经在国产化上取得突破, 通过把高清成像、结

构光测量、激光惯导等多种高精度传感技术集成在一起，再配合跨模态深度学习算法，使轨道状态监测能够达到毫米级精度。2025 年，铁五院研发的轨排智能精调机在渝万高铁施工现场开始投入使用，该设备主要是接收测量小车实时采集到的轨排数据，并据此自动完成高程和轨向的调节，误差被控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内，完成一次精调所需时间为 4 至 5 分钟，相比传

统人工方式效率提高 2 倍以上。

2 关键技术性能对比

不同技术路线下的可调支撑结构，在调平精度、调节效率、承载能力以及环境适应性等方面表现出较为明显的差别，表 1 则从六个维度对三类结构作了较系统的对照分析。

表1 三类可调支撑结构关键技术性能对比

性能指标	螺旋传动式	液压驱动式	机电混合驱动式
调平分辨率	0.1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 2.0 mm	0.01 ~ 0.1 mm
单点调平时间	30 ~ 120 s	5 ~ 15 s	10 ~ 30 s
静态承载能力	中等 ($\leq 5\text{ kN}$)	大 ($\leq 50\text{ kN}$)	中等 ($\leq 10\text{ kN}$)
自锁与保持能力	螺纹自锁，无需外部动力	需液压锁或机械锁定	丝杠自锁 + 电磁制动
环境适应性	温度敏感度低，耐粉尘	温度敏感，液压油易泄漏	需电气防护，适应性较强
自动化水平	低，依赖人工操作	中等，可半自动控制	高，支持闭环自动调平

由表 1 可以看出，螺旋传动式结构在精度保持性、环境适应性这两方面相对更有优势，但在自动化程度上偏低；液压驱动式结构的承载能力较强、调节速度也较快，不过在精度以

及长期稳定性方面存在不足；机电混合驱动式结构把高精度和高自动化的优点结合在一起，因此成为当前技术发展中较为主流的方向。

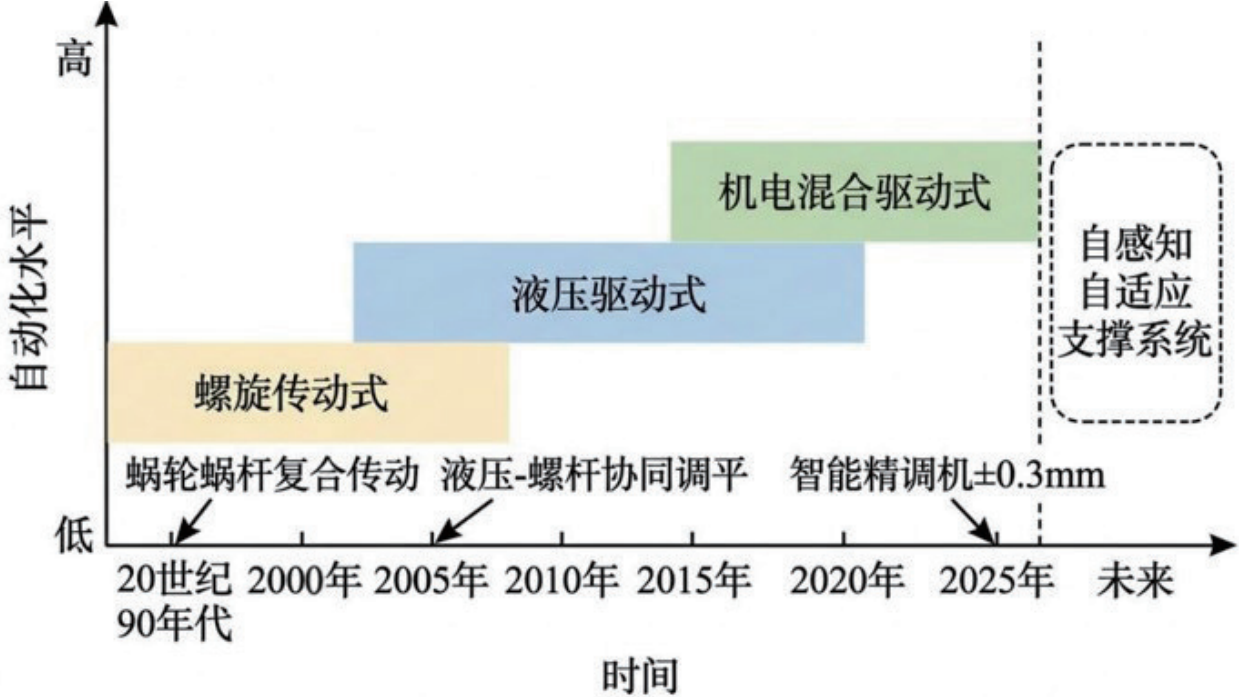


图1 可调支撑结构技术演进路线示意

从工程选型的角度来看，这三类可调支撑结构并不是简单的替换关系，而是针对不同精度、效率以及工况需要而形成的互补方案。首先，螺旋传动式结构更适用于低频次、高精度并且自锁要求较强的静态调平场景，比如便携式轨道检查仪、棱镜基座以及试验台的精细调整。其次，液压驱动式结构更适合大承载、节拍较快的粗调与半精调环节，例如大型测量平台的快速就位、轨排初调等工序。第三，机电混合驱动式结构主要面向自动化检测、智能精调与无人巡检等场景，它依靠闭环控制来实现多支撑点之间的协同调平。选型时一般需把测量精度、作业效率、承载吨位、环境粉尘与温湿度条件、维护是否方便以及全寿命成本等因素

一并考虑，避免只盯住某一个指标而忽略其他要求。对于施工精调，可以采用液压粗调与螺旋精调的组合方式；对于运维检测，则更适合优先选择轻量化的螺旋结构或机电混合结构；而对于试验台架，还需要同时兼顾多自由度调节能力与长期的几何稳定性，这样就能形成一种分层适配、优势互补的技术选型逻辑。

3 工程应用分析

3.1 施工期轨道精调

在高铁无砟轨道施工过程中，可调支撑结构主要是为了让轨排能够更准确地就位，并对标高进行控制。传统做法多是用方木叠放来支

撑,再配合人工撬棍进行调整,精度往往依赖操作人员的经验水平,因此调平的效率也偏低。液压-螺杆组合支撑腿的使用在一定程度上缓解了上述问题,液压缸主要负责快速顶升与粗略调整,螺杆用于后续的精细调节和锁定,同时借助电子陀螺仪对轨道水平度进行实时检测,系统再根据检测结果自动控制油缸的伸缩量,从而完成调平工作。

智能精调装备的投入使用,使施工精度与作业效率都有了进一步提高。2026年,在成渝中线铁路建设现场,智能精调机器人通过激光雷达和视觉相机的协同感知来获取信息,机械臂进行更准确的啮合对位,同时全站仪把数据实时回传,从而把轨道板精调做成了自动化作业,相关精度可以达到 ± 0.3 毫米。

3.2 运维期轨道检测

在运营维护阶段,可调支撑结构主要用在轨道检查仪、惯导轨检小车等便携式检测设备上,这类设备在支撑结构方面需要同时考虑轻量化要求与精度的保持性。棱镜固定可调平台采用轨头下颚与轨头外侧的双向磁铁吸附来实现固定,并将对中定位误差控制在0.1mm以内,从而可以满足曲线超高200mm、纵坡45‰线路的测量需求。

激光与惯导的融合技术被用在运维检测中,为相关工作提供了一种新的处理办法。全要素轨道精测系统把激光雷达和惯导轨检仪做了集成,在精度方面,绝对测量精度优于2cm,相对测量精度优于1mm,同时测量效率也能达到每日5公里以上。就这个系统而言,可调支撑结构在设备运行期间需要持续维持测量基准的稳定性,因此对支撑的刚度以及抗振性能提出了更高的要求。

3.3 试验台架应用

在轨道动力学试验研究中,可调支撑结构主要用来模拟不同的轨道几何不平顺情况,试验台一般通过液压系统来调节轨距,同时借助调节螺杆来控制钢轨高度,从而可以分别设置高低、水平、轨距、方向这四类不平顺及其组合,

并对不平顺的波深和波长进行较为精确的控制。这类应用首先对支撑结构的调节范围提出较高要求,其次也强调多自由度的调节能力,通常需要液压传动与螺旋传动之间形成更紧密的配合与协同。

4 发展趋势与展望

未来可调支撑结构将向高精度、高刚度、智能化与标准化方向持续演进。一是高精度与高刚度一体化设计,引入碳纤维复合材料支撑杆与陶瓷涂层传动副,在减轻自重的同时提升刚度重量比,兼顾调节分辨率与结构稳定性。二是多传感器融合的智能调平,融合激光跟踪仪、惯性测量单元与视觉测量系统,构建多源感知控制体系,实现支撑平台六自由度姿态的实时监测与自动校正。三是自适应支撑与主动减振,基于磁流变阻尼器或压电传动器,依据振动特征实时调整支撑刚度与阻尼参数,为测量传感器提供稳定基准。四是标准化与模块化设计,统一接口规范,提升设备互换性与维护效率。随着新材料、新传感技术与智能控制方法的深度融合,可调支撑结构将为铁路轨道测量提供更可靠的基础保障。

5 结论

铁路轨道测量设备的可调支撑结构,大体经历了从纯机械的螺旋传动,到液压驱动,再到机电混合的智能驱动这样一条技术演进路线。螺旋传动式结构因为具备自锁特性,同时对使用环境的适应性也较强,所以在精密调平这类场景中仍然保有不可替代的地位;液压驱动式结构在大承载能力和快速调节方面的优势更为明显;机电混合驱动式结构则依靠传感反馈与闭环控制,使调平精度与自动化水平实现较大幅度的提升。未来随着新材料、新传感技术以及智能控制方法进一步走向深度融合,可调支撑结构将持续向高精度、高刚度、自适应与标准化方向发展,从而为铁路轨道测量提供更可靠的基础保障。

参考文献:

- [1] 陈春雷,韩志,贺雨,等.基于多维校准平台的铁路轨道测量模拟研究[J].计量科学与技术,2025,69(3):42-52.
- [2] 尹峰,田新宇,杨飞,等.轨道检查仪检定台设计与研制[J].铁道建筑,2017,57(11):126-129.
- [3] 章浙,张晓东,安政军,等.基于BIM的无砟轨道轨排智能精调技术研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(2):67-74.
- [4] 李秋义,李路遥.基于无线移动终端的轨道板智能精调系统[J].铁道工程学报,2022,39(12):49-53+78.
- [5] 王玉昆,徐凌雁,徐鹏,等.时速600 km高速磁浮新型轨道精调系统研究[J].铁道工程学报,2022,39(10):37-41+64.

作者简介:池树孝(2004.03—),男,汉族,江西人,大专,研究方向:高速铁路施工与维护。