

# 传感器技术如何赋能工程机械？

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

全球大型工程机械保有量已超2000万台，作为“基建狂魔”的中国，凭借庞大的基建需求与制造业优势，占据全球超50%的份额，仅2024年新装机量更是突破150万台，连续12年位居世界第一。当前，工程机械行业正加速向智能化、无人化、绿色化转型，传感器的功能已从传统的“基础监测”升级为“精准控制+预测性维护”的双重赋能，其安装传感器种类与数量已成为衡量工程机械高端智能化水平的关键指标。没有高性能传感器的支撑，工程机械的智能化、无人化转型便无从谈起，重载作业的安全性与效率也将失去关键保障。

2024年全球大型工程机械传感器市场规模达85亿美元，预计2030年将突破180亿美元，年复合增长率达13%。中国作为全球最大工程机械市场之一，2024年对应传感器市场规模已达34亿美元，占全球同期市场份额的40%。更重要的是，传感器国产化直接关系工程机械产业链自主可控——目前我国高端工程机械传感器仍大量依赖进口，核心技术“卡脖子”问题突出，其国产化突破不仅是我国从“工程机械大国”向“强国”跨越的核心支撑，更是保障国家重大工程建设安全、提升制造业全球竞争力的战略举措。

## 七大类工程机械的传感器适配方案

大型工程机械涵盖挖掘、掘进、装载、吊装、路面、矿山、港口等七大机械核心品类，均为工程建设、矿山开采、港口物流等领域的“工业巨擎”。其结构形态、功能特征、作业场景差异显著，对传感器的性能要求呈现个性化、差异化、定制化等特征。

### 挖掘机械：

#### 精准作业的“重载感知”

挖掘机械是工程机械中用量最大、场景最广的品类，2024年我国新装机量达80万台，占大型工程机械总装机量的53.3%，其核心需求是实现挖掘轨迹精准控制、液压系统负载监测与设备故障预警，适配矿山开采、基建施工等重载场景。代表设备有30~100吨级液压挖掘机（主流民用机型）、200~400吨级矿用大型挖掘机（重载特种机型）。矿用挖掘机压力传感器需耐受100°C高温、20g持续振动，防护等级达IP67。

### 掘进机械：

#### 地下工程的“精准导航”

掘进机械（也称“盾构机”）是隧道、地下管廊等地下工程的核心装备，其作业环境封闭、地质复杂，对传感器的定位精度、抗干扰能力要求极高，而且所用传感器都是多参数复合组成的感知群组或微系统。隧道掘进方向偏

差需控制在3cm/100米以内，否则可能导致工程返工，甚至塌方事故。直径3~15米盾构机（软土地层专用）、隧道掘进机（TBM，硬岩地层专用）。我国自主研发的“京华号”盾构机直径达16.07米，是全球最大直径盾构机，搭载各类传感器达120余只，其中姿态定位传感器系统价值超千万元。姿态定位传感器系统，在穿越花岗岩地层时实现连续掘进12公里无故障，方向偏差累计仅28cm。

### 装载机械：

#### 高效转运的“负载感知”

装载机械主要用于物料装载与短途转运，核心需求是实现负载精准计量、动力输出优化与转向控制，适配矿山、港口、工地等高强度作业场景，日均作业时间可达16小时以上。经典设备为5~15吨级轮式装载机（主流机型）、铲运机（远距离转运专用）。搭载的智能负载传感系统，单台日均装载量达800吨，较传统机型提升15%，装载量计量准确率达97%；转速传感器与变速箱的协同控制，满负荷作业时油耗从28L/h降至26.2L/h，年均故障率低于0.5%。

### 吊装机械：

#### 安全重载的“限位防护”

吊装机械的核心诉求是“安全重

载”，需通过传感器实现重量监测、幅度控制、高度限位与环境预警，防止超载、超高、超幅等危险工况，保障人员与设备安全。超大型起重机单次吊装价值可达千万元，一旦发生事故损失惨重。其代表设备为50~1200吨级汽车起重机、塔吊、港口岸桥。超大型起重机最大起重量1200吨，其安全传感系统包含16只核心传感器，形成三重安全防护。称重传感器，成功完成了单重280吨的钢结构吊装，重量监测误差仅0.3%。风速传感器在台风季节可提前30分钟预警，使设备停机避险时间更充裕，近五年国内港口吊装事故率下降68%。

### 路面机械：

#### 平整作业的“精度控制”

路面机械用于公路、机场跑道等基础设施的路面施工，核心需求是实现摊铺厚度、压实效果、物料温度的精准控制，直接影响路面平整度与使用寿命。其代表设备沥青摊铺机（沥青路面施工专用）、振动式压路机（路面压实专用）、铣刨机（旧路面翻新专用）。摊铺机搭载的激光摊铺厚度传感器，实现了20公里长路段的连续摊铺，平整度合格率达99.8%，较传统人工控制提升30个百分点。压路机振动频率传感器的应用，使路面压实度检测返工率从8%降至2%，其摊铺平整度误差可控制在±1mm，优于行业3mm/3米的标准。

### 矿山机械：

#### 极端工况的“耐磨防护”

矿山机械是七大品类中作业环境最恶劣的。高粉尘、强冲击（采掘机截割头冲击力达100kN）、高磨损（物料对设备的磨损速度是普通工况的5倍），对传感器的耐磨、抗冲击、密封性能要求极高。矿用采掘机、转载机、破碎机是煤矿井下常用机型，其传感器外壳采用硬质合金材料，可耐受煤岩颗粒的持续磨损。料位传感器溢料事故发生率从15%降至1%，年减少物料损失超百万元。

### 港口机械：

#### 高效物流的“智能调度”

港口机械是全球供应链的关键节点装备，核心需求是实现集装箱精准抓取、智能调度与高效转运，对传感器的识别准确率、定位精度与稳定性要求严苛。其代表设备为集装箱桥吊、堆取料机、岸桥起重机，其智能传感系统可实现集装箱装卸全自动化。其集装箱识别传感器可在雾天、夜间等复杂环境下识别准确率99.8%，单桥日均装卸量达350个自然箱，较人工操作提升50%。防摇传感器使集装箱装卸作业时间每箱3分钟缩短至2分钟，港口吞吐效率显著提升。

### 智能与导航传感器：

#### 无人化的“关键支撑”

智能与导航传感器是工程机械无人化、智能化的核心增量，主要用于环境感知、自主定位与路径规划，是近年来增速最快的传感器品类。此类传感器用量占比10%，但年复合增长率达25%，是智能化升级的核心增量。该领域技术门槛最高，国际激光雷达占据高端市场。在应用中，无人工程机械已形成“GNSS+IMU+激光雷达+视觉”的多传感器融合方案，例如无人矿卡搭载的融合系统，可实现矿山环境下的自主行驶、避障与装卸作业，定位精度±10cm，避障响应时间<200ms。

## 功能与工况的分类解析

大型工程机械传感器按功能与工况可分为四大类，各类在技术参数、应用场景、用量占比上存在显著差异。

### 力学量传感器：

#### 重载作业的“核心感知”

力学量传感器是工程机械中用量最大、最核心的品类，直接感知力、压力、扭矩、振动等关键物理量，是实现重载作业精准控制与安全防护的基础。其中，重量传感器量程0~2000kN，精度±0.3%~±0.5%FS，采用桥式应变片结构，具备抗过载、抗冲击能力，适用于吊装机械、装载机械的重量监测。力学量传感器在工程机械总占比达45%，是最大细分品类，其中压力传

感器单台设备平均搭载4~8只。国际巨头在高端领域占据主导，平均无故障时间超2万小时，而国内产品约1.2万小时。

### 位置/位移/角度传感器：

#### 精准控制的“基础保障”

位置/位移/角度传感器用于监测工程机械执行机构的位置、位移与姿态，是实现精准作业的核心，其精度水平直接影响工程质量。此类传感器用量占比30%，是第二大细分品类。盾构机姿态定位传感器精度需达±0.01°，而普通挖掘机角度传感器精度±0.5°。国际激光位移传感器精度可达±0.01mm，国内产品精度约±0.1mm，主

要应用于中低端机型。

### 环境与状态传感器：

#### 极端工况的“安全防护”

环境与状态传感器用于监测工程机械作业环境（温度、湿度、风速、粉尘）与设备自身状态（燃油液位、液压油温度），为设备安全运行提供保障。此类传感器用量占比15%，其中温度传感器用量最大。矿山机械、港口机械对环境适应性要求最严苛，矿山机械的粉尘传感器需具备IP67防护等级，港口机械的风速传感器需耐受盐雾腐蚀。国内企业在该领域国产化率较高，但在高温150°C以上、高腐蚀等极端环境下的产品仍依赖进口。

## 重载场景下的“全球竞争”

大型工程机械传感器市场呈现“国际巨头垄断高端、国内企业突围中低端”的竞争格局，本地化发展已进入攻坚阶段。

### 市场规模与需求预测

2024年全球大型工程机械传感器市场规模达85亿美元，其中挖掘机械传感器占比35%（29.75亿美元），掘进机械占比18%（15.3亿美元），吊装机械占比15%（12.75亿美元），路面机械占比12%（10.2亿美元），矿山机械占比10%（8.5亿美元），港口机械占比8%（6.8亿美元），装载机械占比2%（1.7亿美元）；

2024年我国市场规模34亿美元，占全球40%，其中挖掘机械传感器需求最大（11.9亿美元），其次是掘进机

械（6.12亿美元）与吊装机械（5.1亿美元）；

预计2030年全球市场规模将突破180亿美元，2024—2030年复合增长率13%；我国市场规模将超80亿美元，年复合增长率15%，增速高于全球平均水平；智能与导航传感器增速最快增长率达25%，市场规模将达36亿美元；力学量传感器仍占主导，市场规模将达81亿美元。随着智能化、无人化机型提升，带动单台传感器用量将进一步提升，2030年单台平均用量将达20~50只，其中无人工程机械单台用量超50只；全球总用量将超3亿只，我国用量超1.8亿只；

### 核心瓶颈与突破方向

共性瓶颈：材料与工艺；重载工况

下的耐磨、抗冲击、密封技术落后，例如矿山机械传感器外壳耐磨材料依赖进口，密封结构难以达到IP69K防护等级；核心芯片：高精度ADC（模数转换器）、FPGA（现场可编程门阵列）等核心芯片依赖进口，国内芯片在精度、稳定性上存在差距；算法技术：多传感器融合算法落后，难以适配复杂作业场景，例如无人工程机械的路径规划、避障算法精度与响应速度不足；测试验证：缺乏极端工况测试平台，产品可靠性验证周期长，难以满足整机企业快速迭代需求。

突破重点：材料工艺方面，研发陶瓷、硬质合金等耐磨外壳材料，提升表面硬度至HRC60以上；改进密封结构，采用双密封+灌封工艺，适配IP69K防护等级，满足高压冲洗、高温蒸汽环境

需求；优化传感器封装工艺，提升高温150°C以上、高振动50g以上环境适应性。核心产品方面，盾构机高精度姿态传感器：攻坚定位精度±1cm，无卫星信号环境下持续工作误差<1cm/小时；超大型起重机重量传感器：量程0~2000kN，精度±0.3%FS，MTBF超2万小时；无人工程机械激光雷达：探测距离0~100m，抗粉尘干扰，点云密度≥20万点/秒；矿山耐磨振动传感器：量程±100g，频响0~000Hz，耐磨寿命超1万小时。智能化技术方面，开发“传感器+边缘计算”模块，内置AI芯片，实现实时数据处理与故障预测性维护；突破多传感器融合算法，提升无人工程机械的自主定位、路径规划与避障精度；建立传感器数据标准，实现与工程机械云平台的无缝对接。

## 打造协同创新生态 是培育产业的关键

大型工程机械传感器正朝着“高精度、高可靠性、集成化、智能化”方向发展，同时本地化发展与场景化适配加速推进，形成三大核心趋势。

### 技术发展趋势

在高精度与高可靠性升级方面，力学量传感器精度从当前的±0.5%FS提升至±0.1%FS，位置传感器精度从±1mm提升至±0.1mm，智能与导航传感器定位精度从±5cm提升至±1cm，满足无人化作业需求；极端工况适应性持续提升，MTBF从当前的1~2万小时提升至3万小时以上，防护等级全面升级至IP69K，适配高压冲洗、高温蒸汽、盐雾腐蚀等更严苛场景；通过材料改进与工艺升级，降低传感器温漂、时漂，在零下40°C到150°C温度范围内，精度波动≤±0.1%FS。

在集成化与智能化融合方面，开发“压力+温度+位移”“振动+温度+湿度”等三合一、四合一集成传感器，减少部件数量40%，体积缩小30%，降低安装空间与成本；传感器内置AI芯片与边缘计算模块，实现实时数据处理（如负载峰值识别、故障特征提取），延迟<10ms，支撑工程机械自主决策；新增传感器自校准、自诊断功能，当出现精度漂移或故障时，自动报警并提示维护，提升设备可用性。

在无人化与网联化赋能方面，未来5年，无人工程机械将全面标配“GNSS+IMU+激光雷达+视觉”多传感器融合方案，实现自主路径规划、避障、作业，无须人工干预；传感器数据接入“工程机械云平台”，通过5G/6G技术实现实时传输，支持远程监控、预测性维护与fleet管理，降低运维成本30%；多台工程机械之间通过传感器数据共享，实现协同作业，例如挖掘机与装载机的负载数据互通，优化转运效率。

### 产业发展目标

短期目标：2027年中低端传感器国产化率超80%，高端传感器国产化率突破40%；核心产品（压力、位移、视觉传感器）技术性能接近国际一流水平，精度差距缩小至0.3个数量级，MTBF提升至1.8万小时；形成5~8家国内领先企业，其中2~3家进入全球市场前十；场景渗透能力有效提升，适配极地挖掘机、深海作业机械等特种工程机械，单台平均用量提升至25只，智能传感器占比超30%。

长期目标：2030年整体国产化率超70%，高端传感器国产化率超60%；核心产品技术性能达到国际一流水平，极端工况适应性、精度、使用寿命与国际产品持平；形成3~5家具有国际竞争力的企业，全球市场份额占比超25%；支撑国内大型工程机械高端化率提升至60%，无人化机型占比达20%；场景渗透能力大幅提升，单台平均用量提升至40只，智能传感器占比超50%，适配更多极端场景与特种装备。

### 政策与产业支撑

在“十五五”规划《建议》指导下，加大场景牵引下的技术创新，出台精准化的工业传感器产业发展政策，大力支持国产化与技术创新。发挥产业基金推动作用，支持核心技术研发、工况测试平台建设与企业并购重组；对传感器核心芯片、材料进口实施税收减免，对国内企业研发投入实行加计扣除和相应政策补贴。

建立新型工程机械传感器产业集群，联动整机企业实现协同发展，依托徐工机械、三一重工等整机应用企业，联合相关传感器企业，共建联合实验室，聚焦挖掘机、吊装机械传感器研发；聚焦视觉传感器、激光雷达等智能传感器研发；聚焦装载机械、路面机械等传感器微系统研发及产业化。加快制定工程机械传感器国家标准，统一技术要求、接口与数据格式。

### 为中国制造注入底气

大型工程机械传感器，看似微小的组件，却是重载工业的“感知硬核”。它既要扛住矿山的粉尘冲击、盾构机的高温高压，也要支撑工程机械从“人工操作”向“智能自主”跨越；既要保障千万吨级重载作业的安全精准，也要推动工程机械产业向高端化、绿色化转型。

当前，我国正处于从“工程机械大国”向“强国”跨越的关键阶段，传感器国产化突破已成为产业链自主可控的核心任务。尽管在高端领域仍存在差距，但随着政策扶持、技术创新与产业协同的持续推进，国内企业正加速突围。

未来，随着高精度、高可靠性、智能化传感器的全面普及，大型工程机械将彻底摆脱“傻大黑粗”的标签，成为“精准作业、安全高效、绿色智能”的工业巨擎。而传感器，这一隐藏在钢铁身躯中的“智慧神经”，终将成为推动我国工程建设、矿山开采、港口物流等领域高质量发展的关键力量，为重大装备体系画上“重载感知”的圆满句号，为中国制造的全球竞争力注入核心底气。