



“2025滨州科创成果首评·创新解码”系列报道

# 给大国重器穿上智能“防护衣”

## 滨州造机器人破解超大型构件表面处理世界难题

□晚报记者 李淑霞

通讯员 王 梦 刘坤芳

在山东开泰抛丸机械股份有限公司的测试场内,一台八轴机械臂正展示着它的“绝技”:高达每秒275米的弹丸流从喷枪射出,精准、稳定地扫过复杂的测试工件表面。这并非普通机器人,而是一套能为高铁车体、风电巨塔、万吨轮船等“大国重器”进行“洗澡穿衣”的智能表面处理装备。

日前,由山东开泰抛丸机械股份有限公司(以下简称山东开泰)联合山东建筑大学、山东开泰智能抛丸技术研究院有限公司等共同完成的“大型复杂构件喷砂表面清理装备集成应用”项目,获评2025年度滨州市科技创新成果一等奖。这套集成装备系统成功解决了长期困扰我国高端装备制造制造业的瓶颈难题,标志着中国在超大型构件智能表面处理领域实现了从追赶到领跑的关键跨越。



### >>>当制造走向“极限”,传统工艺遭遇“巨人”瓶颈

在高铁飞驰、风电矗立、巨轮远航的背后,其核心构件——车体、塔筒、船体的制造尺度正不断刷新纪录,长度超25米、重量逾百吨已成常态。这些“钢铁巨人”在焊接成型后,表面会残留氧化皮、锈迹

和油污,必须进行彻底清理,后续的高性能涂层才能牢固附着,否则将严重影响装备的寿命与安全。

“如何给大型复杂构件融合一道安全可靠的防护层,一直是船舶、新能源装备和航空

制造企业试图解决的世界性技术难题。”山东开泰正高级工程师张朝阳说。然而,传统表面处理方式已触及“天花板”。人工喷砂劳动强度极大、质量波动且危害健康,而市面上的普通喷砂机器人则

显得“力不从心”。

“传统串联机器人就像一根很长的筷子,末端极易抖动,导致喷砂不均匀;面对工件内部的深腔、复杂交界面,它的‘手臂’刚性不足、覆盖范围有限,存在大量清理盲区。”

张朝阳介绍。

设备可达性差,依赖耗时的人工编程示教、喷枪作业时剧烈抖动影响最终质量,这些痛点严重制约着我国高端装备的制造品质与生产效率。

### >>>“智能眼+规划脑+防抖心”,三大核心赋予机器人“灵魂”

面对行业困局,项目团队决定为机器人装上一套高度协同的“感官系统”和“神经系统”。

首先,是赋予机器人一双能洞悉复杂曲面的“智能眼”。团队开发了基于多目立体视觉和三维点云融合的图像识别技术。即使面对体量巨大、结构复杂的构件,系统也能在短时间内完成全域高速扫描,

并通过智能算法与原始设计模型(CAD)进行精准比对与融合,自动识别出每一个待处理的曲面、棱角与凹槽,生成高精度的三维数字孪生体,彻底告别了耗时数天、精度难以保障的人工测量与路径示教。

有了全域精准的“三维地图”,更需要一套能规划最优路线的“超级大脑”。这是团队的第二个核心突破——智

能喷砂路径规划与平滑轨迹优化。他们创新算法,像绘制等高线一样对构件表面进行智能分层切片,规划出既能实现100%覆盖又能最大限度减少重复或遗漏的“弓”形轨迹。同时,独创的轨迹过渡算法,让喷枪在复杂拐角处也能实现平滑转向,杜绝了因急停急启造成的喷砂不均、材料堆积。

“喷砂产生的持续反冲击力极易引发机械臂多自由度耦合振动,导致喷砂效果差、设备关键部件寿命骤减。”山东开泰研发工程师董凯介绍,最大的挑战,在于如何让承载巨大后坐力的机械臂在高速度作业下“稳如泰山”。

团队深研机械臂内部动力学本质,建立了精细的柔性动力学模型,并设计了先进的

自适应径向神经网络复合控制算法。这套系统能实时感知并预测振动趋势,如同一位经验丰富的老师傅,瞬间微调各关节的出力,主动“抵消”抖动,将喷枪的轨迹跟踪误差降低了62%,确保了极端工况下的超高作业稳定性。

### >>>从实验室到全球车间,“国际领先”赢得市场认可

技术的集成创新,催生了性能卓越的工业成品。项目研发的智能喷砂成套装备,其核心的8轴混联机器人具备超50立方米的操作空间和极高的刚性,喷嘴压力、清理效率等关键指标全面超越国内外同类产品。经山东省机械工业科学技术协会鉴定,该技术及成套装备在复杂铸件表面处理和多机联动协同控制方面达到“国际领先水平”。

“项目实现了制造装备的智能化改造,推动了表面处理产业升级,打破了国外公司在

高端表面处理技术方面的长期垄断,为国家重大工程及国之重器提供了关键装备保障,实现了该领域核心技术的自主安全可控。”山东开泰副总经理吴成民表示。

市场的选择是最硬的认可。这套“滨州智造”已广泛应用于轨道交通、清洁能源、海洋工程等领域,成功实现了对国外同类高端设备的替代。它为“复兴号”高铁车体提供表面清理,保障了国家名片的光洁如新;也为远洋钻井平台、巨型风电塔筒披

上可靠的防护涂层,抵御极端环境的侵蚀……

这些高端装备制造企业普遍反映,运用该技术清理的表面“色差小、均匀度好、洁净度高”,装备自动化程度高、运行可靠。数据显示,应用该企业单台设备生产效率平均提升35%,人工投入平均减少21%,设备能耗降低13%;清理质量达标率从87%跃升至98%,后续涂装附着着力提升19%;装备服役寿命平均延长4.8年,全生命周期维护成本降低30%。

项目成果不仅限于产品本身,更带动了创新平台的建设和人才队伍的培养。围绕核心技术,团队已建成山东省抛丸与材料工程技术研究中心、山东省金属表面抛丸处理装备工业设计中心等多个省级研发平台。依托该项目,山东开泰已成长为国家制造业单项冠军企业、国家重点“专精特新”小巨人企业等,形成了强大的技术策源能力。在攻坚过程中,项目也为行业培养了一支高水平的技术创新团队,依托平台已累计培养

表面处理领域研发人才289名,技能人才300余人,为行业可持续发展储备了核心人才。

从依赖人工与进口设备,到凭借自主知识产权的高端智能装备破解世界性难题,山东开泰的这项创新,不仅为中国高端装备制造穿上了一层由核心技术织就的“坚韧防护衣”,更推动了我国表面处理行业向智能化、绿色化的深刻变革,牢牢稳固了中国制造在全球产业链中的重要地位。