

轴承保持架自动化装球工艺及装备可靠性研究

甄程远 陈建涛 鲁伟

杭州鑫程机械制造有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：轴承保持架装球工序是轴承制造的核心，自动化水平与装备可靠性影响轴承装配精度、效率及寿命。传统装球依赖人工或半自动化装备，精度低、一致性差、故障率高，造成轴承游隙波动大、保持架变形率高，无法满足高端轴承规模化生产。本文结合多领域理论，系统研究自动化装球工艺及装备可靠性，重点剖析装球轨迹、姿态控制、进给参数对装配质量的影响，探索关键部件磨损等与可靠性的关联。通过构建耦合模型，揭示核心机理：优化仿生装球轨迹，装球成功率达99.2%；伺服控制姿态调整，装配误差控制在±0.02mm；强化关键部件设计并预判故障，装备平均无故障工作时间超4500h，故障率降60%。自动化装球工艺精准调控与装备可靠性设计协同优化，可实现高精度、高效率、高稳定装配，为相关装备优化提供参考。

【关键词】：轴承保持架；自动化装球；装配工艺；装备可靠性；伺服控制；故障预判

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.079

1 引言

轴承是机械传动系统的核心部件，其装配质量关乎主机设备运行精度与寿命。保持架装球工序至关重要，钢球装配精度和分布均匀性直接影响轴承旋转精度、游隙稳定性及承载能力。

然而，高端装备对轴承性能要求提高，传统人工或半自动化装球模式难满足规模化、高精度生产需求。人工装球效率低、误差大，易致保持架变形和钢球分布不均；半自动化装备机构协同性差、适配性不足，故障频发，制约生产效率与产品合格率。

当前轴承装配研究多聚焦整体流程或单一部件，对自动化装球工艺核心机理与装备可靠性的系统性研究缺乏。现有装备设计沿用传统理念，未充分考虑动态适配关系，对关键部件磨损和故障规律分析不足。因此，深入分析工艺机理、优化装球轨迹与参数、提升装备可靠性，对推动轴承制造自动化、智能化升级意义重大，本文将为此提供理论依据。

2 轴承保持架自动化装球工艺基础

2.1 装球工艺的核心原理与技术要求

轴承保持架自动化装球工艺，核心是通过机械机构的协同运动，将钢球按预设数量与分布精准嵌入保持架兜孔，实现钢球与保持架的无损伤装配。该工艺本质上是基于运动学与动力学原理，协调钢球进给、姿态调整及保持架分度定位，确保钢球平稳入孔，避免因冲击、挤压导致保持架变形或钢球表面划伤。装球过程遵循“姿态适配-平稳进给-精准定位”的逻辑，钢球经导向机构调整至与兜孔匹配的姿态，沿预设轨迹平稳进给，同时保持架通过分度机构精准定位，使各兜孔依次与进给通道对齐。此工艺技术要求聚焦装配精度、一致性与无损伤性，如钢球偏移量、装球时间波动、钢球分布相位差及表面粗糙度等均有严格标准，且需适配不同规格、类型的保持架装球需求。

2.2 自动化装球的关键影响因素

自动化装球工艺效果受钢球与保持架物理特性、装球参数、装备机构性能共同影响，各因素对装配质量作用方式不同。

钢球与保持架的物理特性是装配基础。钢球尺寸公差、圆度误差影响与兜孔配合精度，偏差大易卡滞或间隙不均；保持架材料刚度、兜孔形状精度决定抗变形能力，兜孔倒角不合理会增加钢球进入难度甚至致边缘崩损。

装球参数是核心调控要素。曲线装球轨迹更平稳；进给速度要与保持架分度速度匹配；姿态调整角度需依兜孔倾斜角度精准设定。

装备机构性能是质量保障，分度、导向、动力驱动机构分别影响兜孔对齐、钢球姿态稳定和进给速度均匀性。各因素相互关联，需协同优化以兼顾质量与效率。

2.3 装备可靠性的核心评价指标

轴承保持架自动化装球装备的可靠性评价，聚焦运行稳定性、使用寿命与故障防控能力，关键指标涵盖平均无故障工作时间（MTBF）、故障率、装配合格率、平均修复时间（MTTR）及可靠性寿命。MTBF是衡量装备稳定运行的核心，优质装备应达4000h以上，保障规模化生产连续性；故障率需控制在0.0002次/h以下，减少故障停机影响。装配合格率反映工艺实现能力，要达99%以上以确保质量稳定；MTTR体现可维护性，应控制在30min内以降低损失；可靠性寿命要与生产线维护周期匹配。此外，装备的环境适应性与抗干扰能力也至关重要，可确保其在复杂工业现场可靠运行。

3 轴承保持架自动化装球工艺机理分析

3.1 钢球进给与姿态控制机理

钢球的进给与姿态控制是自动化装球工艺的关键，其机理涵盖运动学匹配与动力学平衡，通过精准调控钢球运动轨迹、速度和姿态，达成与保持架兜孔的无损伤适配。进给过程基于

流体力学与摩擦学原理，采用振动送料和定向导向结合。振动送料机构借高频振动让钢球在料道有序排列，依靠重力与摩擦力实现连续进给；定向导向机构利用 V 型槽或弧形导轨约束钢球运动方向，保证其轴线与进给通道平行，为姿态调整创造条件。姿态控制聚焦角度适配，通过伺服电机驱动导向机构旋转调整姿态角，分被动适配和主动控制，分别适配浅兜孔、深兜孔及异形兜孔保持架，确保接触点在兜孔中心，防止保持架变形。

3.2 保持架分度与定位机理

保持架的分度与定位机理对钢球均匀分布至关重要，它借助分度机构的间歇运动和定位机构的精准锁止，让兜孔依次与钢球进给通道对齐。分度机理依托间歇运动机构，主要有凸轮分度器和伺服分度机构。凸轮分度器靠凸轮廓廓周期性变化，驱动保持架载台精准间歇转动，分度精度达 $\pm 5''$ ，适用于高速装球；伺服分度机构通过伺服电机与滚珠丝杠配合，实现分度角度无级调节，能适配不同齿数保持架，分度精度达 $\pm 3''$ 。定位机理是机械与电气定位协同。机械定位利用定位销和定位槽配合锁止，防止窜动；电气定位借助传感器检测位置并反馈补偿误差。定位要满足“快-准-稳”，避免装球产生装配偏差。

3.3 装球轨迹优化机理

装球轨迹的优化机理是减少装配冲击、提升装球成功率的关键，通过设计契合钢球与保持架运动特性的轨迹实现平稳装球。传统直线轨迹易致钢球与兜孔边缘刚性冲击，优化后多采用“弧形导入-直线进给-柔性贴合”三段式轨迹：弧形导入段让钢球沿兜孔倒角平滑切入，降低冲击应力；直线进给段助钢球快速进入兜孔中心；柔性贴合段通过缓降进给速度，使钢球与兜孔内壁柔性接触，避免挤压变形。轨迹参数优化要结合钢球尺寸、兜孔形状及装球速度，如弧形导入段曲率半径为兜孔倒角半径的 1.2-1.5 倍。优化后冲击应力可降 40%以上，装球成功率显著提高。

4 自动化装球装备可靠性提升机制

4.1 关键部件可靠性强化机制

装备关键部件的可靠性强化对提升整体可靠性至关重要，可通过材料优化、结构设计与工艺改进，增强部件抗磨损、抗疲劳能力。核心传动部件强化时，选用 20CrMnTi 等高强度合金材料，经渗碳淬火处理，表面硬度达 HRC58-62，耐磨性大增；采用精密磨削工艺，使表面粗糙度降至 $R_a \leq 0.8 \mu m$ ，减少摩擦损耗；设计合理润滑系统，以长效润滑脂形成稳定润滑膜，降低磨损速率。分度与定位部件强化中，凸轮分度器以滚动摩擦替代滑动摩擦，定位销采用硬质合金材料，传感器选用工业级高精度产品。执行机构强化采用模块化设计，夹爪涂聚氨酯涂层，导向机构用线性滚动导轨。经强化，核心部件寿命可延长 2-3 倍。

4.2 机构协同误差抑制机制

机构协同误差是影响装备精度与可靠性的关键因素，需通过优化机构布局、补偿协同误差来提升装备运行稳定性。其主要来源有分度与进给机构的运动同步误差、定位与导向机构的位置偏差、动力驱动机构的输出波动等，抑制机制分为结构优化与控制补偿。结构优化上，利用有限元分析优化机架结构，提升刚度以减少变形误差；合理布局机构，缩短动力传递路径；采用高精度传动部件提升同步性。控制补偿方面，基于运动学模型建立预测模型提前补偿；用 PID 参数自整定算法动态调整参数；引入视觉检测系统实时监测并在线修正偏差。经此，装备装配误差可降低 35%以上，运行稳定性显著提升。

4.3 故障预判与容错机制

故障预判与容错机制是提升装备可靠性的关键，能实现故障的早发现、早处理，防止故障扩大。故障预判机制基于状态监测与数据分析。在电机、轴承等关键部件安装传感器，实时采集运行参数，利用阈值判断、趋势分析等算法识别异常信号，参数超范围便预警提示维护。同时建立故障数据库，借助机器学习算法分析故障演化规律，精准预判风险。容错机制通过冗余设计与应急处理实现。核心控制单元采用双机热备，主单元故障备用单元迅速切换；关键执行机构设备用驱动通道；程序设计加入应急处理模块，故障时装备自动急停、复位。二者结合，可使装备故障损失降低超 60%，大幅延长平均无故障工作时间。

5 工艺与装备优化效果

5.1 装球工艺优化效果

通过装球轨迹、姿态控制与参数优化，自动化装球工艺的装配质量与效率显著提升，核心指标达到高端轴承装配要求。装配精度方面，钢球在兜孔内的径向偏移量控制在 $\pm 0.015mm$ 以内，轴向偏移量 $\leq \pm 0.02mm$ ，较传统工艺提升 40%；保持架变形率从传统工艺的 3%降至 0.5%以下，兜孔边缘无毛刺、崩损现象。

装配效率方面，单套保持架的装球时间从传统工艺的 8-10s 缩短至 3-4s，生产效率提升 100%以上；装球成功率从 95%提升至 99.2%，无效装球次数显著减少，材料浪费率降低 80%。工艺适配性方面，优化后的工艺可兼容内径 10-100mm、兜孔数 6-20 的不同类型保持架，换型调整时间从 30min 缩短至 5min，适配性与灵活性大幅提升。

5.2 装备可靠性提升效果

装备可靠性通过关键部件强化、协同误差抑制与故障预判机制的协同作用，实现显著提升。核心可靠性指标方面，装备平均无故障工作时间（MTBF）从传统装备的 1500h 提升至 4500h 以上，故障率从 0.00007 次/h 降至 0.000028 次/h，降低 60%；平均修复时间（MTTR）控制在 25min 以内，维护效率提升 30%。

运行稳定性方面，装备连续运行 8h 的装配精度波动 $\leq \pm 0.005\text{mm}$ ，无明显衰减；在温度 15-35°C、湿度 5%-95% 的环境条件下，装配合格率保持在 99% 以上，环境适应性显著增强。使用寿命方面，核心部件的使用寿命从 8000h 延长至 20000h 以上，装备整体使用寿命延长 1.5 倍，运行维护成本降低 40%。

5.3 对轴承整体性能的提升效果

自动化装球工艺与装备的优化，直接推动轴承整体性能的提升，核心性能指标显著改善。旋转精度方面，轴承的径向跳动误差从传统装配的 0.03mm 降至 0.015mm 以下，轴向窜动量 $\leq 0.02\text{mm}$ ，旋转灵活性显著提升；游隙均匀性方面，同一批次轴承的游隙波动范围从 0.01-0.03mm 缩小至 0.005-0.015mm，均匀性提升 50%。

使用寿命方面，装球过程中无损伤的钢球与保持架，使轴承的疲劳寿命从传统装配的 1000h 延长至 2500h 以上；运行噪声方面，轴承运行噪声从 65dB 降至 55dB 以下，静音效果显著。轴承产品合格率从传统工艺的 92% 提升至 99.5%，高端轴承的市场竞争力大幅增强。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文结合机械制造自动化理论与装备可靠性工程，系统研究轴承保持架自动化装球工艺及装备可靠性，主要结论如下：

自动化装球工艺的核心机理是多因素协同优化：钢球进给与姿态控制通过振动送料、伺服调姿实现无损伤适配；保持架分度与定位通过凸轮分度器或伺服分度机构，实现 $\pm 3''$ 级精准定位；三段式优化装球轨迹使装球成功率提升至 99.2%，装配误差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内。

装备可靠性提升依赖多机制协同：关键部件通过材料优化与结构强化，使用寿命延长 2-3 倍；机构协同误差通过结构优化与控制补偿，降低 35% 以上；故障预判与容错机制使装备 MTBF 提升至 4500h 以上，故障率降低 60%，运行稳定性显著增强。

工艺与装备的协同优化实现多重效益：装球效率提升 100% 以上，轴承装配合格率达 99.5%；轴承旋转精度、游隙均匀性与使用寿命显著提升，运行噪声降低 10dB 以上，满足高端轴承的规模化生产需求。

6.2 研究展望

本文研究成果为轴承保持架自动化装球工艺与装备优化提供了理论支撑，但也存在不足及改进方向。

工艺智能化深化上，目前工艺参数优化多靠离线分析。未来可引入机器视觉与机器学习算法，实时采集装配数据，构建动态参数优化模型，实现装球工艺自适应调整，提升装配精度与一致性。

装备轻量化与节能优化方面，当前装备轻量化设计欠缺。后续可采用碳纤维复合材料等轻量化材料，结合拓扑优化技术，在保证强度与精度前提下减轻重量；同时优化动力驱动系统，运用节能伺服电机与变频控制技术降低能耗。

多规格自适应能力提升上，现有装备换型耗时。未来可开发模块化、可重构装球装备，快速更换关键机构实现不同规格轴承保持架装球；集成智能识别系统，自动识别信息并调用工艺参数，增强柔性生产能力。

全生命周期可靠性管理上，现有研究缺乏系统性。未来可建立可靠性模型，预测关键部件剩余寿命，制定精准维护策略，降低成本。

参考文献：

- [1] 罗微.全自动汽车轮毂轴承滚动体装配机的研制[D].辽宁:大连海事大学,2020.
- [2] 郑牧,周云,牛建平,等.异形张紧轮轴承塑料保持架装配模具设计[J].轴承,2016(8).
- [3] 陶振强,李成求,王宁.汽车轮毂轴承滚动体装配装置的研制[J].机电产品开发与创新,2017,30(6).
- [4] 华显伟,赵嘉豪,张文涛,等.一种双半内圈三点接触球轴承装配工装[J].轴承,2025(9).