

可拆卸性设计在机械装备回收再制造中的应用研究

陈 松

珠海凌达压缩机有限公司 广东 珠海 519110

摘要：本文聚焦可拆卸性设计在机械装备回收再制造中的应用。阐述其理论基础，包括核心概念、原则及与相关技术关联、全生命周期设计需求。介绍模块化、连接结构优化等关键技术方法。通过工业机器人再制造、数控机床关键部件回收案例，展现实际应用成效。最后评估其经济效益与环境效益，表明可拆卸性设计能提升资源利用率、降低成本、减少污染，为机械装备回收再制造提供有效方案，推动循环经济发展。

关键词：可拆卸性设计；机械装备；回收再制造；模块化；生命周期评估（LCA）；循环经济

引言：在资源约束趋紧、环保要求提升的背景下，机械装备回收再制造意义重大。传统设计模式导致产品拆解困难、回收利用率低，资源浪费与环境污染问题突出。可拆卸性设计作为面向产品全生命周期的创新方法，打破传统线性模式，通过前期规划实现资源最大化利用。其与多种技术融合，满足各阶段需求。深入研究可拆卸性设计在机械装备回收再制造中的应用，对提升资源利用效率、推动制造业绿色转型具有关键作用。

1 可拆卸性设计的理论基础

1.1 核心概念与原则

可拆卸性设计是面向产品全生命周期的创新设计方法，核心是在产品研发阶段融入可拆解特性，使产品在使用后能高效分离各部件，为回收、再制造、报废处理提供便利，打破传统设计中“一次性制造、终身使用、最终废弃”的线性模式。其核心原则包括功能性与可拆卸性协同、经济性优先、易操作化、兼容性适配四大维度。功能性原则要求拆卸设计不影响产品核心性能，确保结构强度、精度等指标达标；经济性原则强调设计成本与后续拆解效益平衡，避免过度设计导致成本攀升；易操作化原则聚焦拆解流程简化，减少专用工具依赖，降低人工操作难度；兼容性原则需兼顾不同部件的材质特性、连接方式，为后续分类处理奠定基础^[1]。该设计理念本质是通过前期规划，实现产品资源利用率最大化，契合绿色制造与循环经济的核心诉求，是现代工业设计向可持续化转型的关键支撑。

1.2 与相关技术的关联

可拆卸性设计并非孤立存在，而是与多种先进制造技术深度融合、协同作用，形成完整的绿色设计体系。与模块化设计的关联最为紧密，模块化是可拆卸性的基础，通过部件功能集成与标准化划分，为精准拆解提供结构支撑，而可拆卸性设计反向优化模块划分逻辑，

提升模块复用性。与轻量化设计的关联体现为材质选择与结构优化的协同，轻量化常用的高强度合金、复合材料需适配可拆卸连接方式，避免因材质特殊导致拆解困难。与数字化设计技术的融合体现在拆解路径仿真、虚拟验证等环节，借助CAD、CAE软件模拟拆解过程，提前规避干涉问题。同时，其与再制造技术形成闭环，可拆卸性设计为再制造提供便捷的部件获取渠道，再制造需求又反向驱动可拆卸设计的优化升级。

1.3 全生命周期视角下的设计需求

全生命周期视角要求可拆卸性设计覆盖产品从研发、生产、使用、维护到回收处置的全流程，针对性满足各阶段的差异化需求。研发阶段需明确拆解目标，结合产品预期寿命、再制造价值，规划可拆卸等级与范围，避免后期改造难度增加。生产阶段需兼顾制造效率与可拆卸性，优化生产工艺，确保连接结构精准成型，同时控制制造成本。使用与维护阶段，可拆卸性设计需便于部件检修、更换，减少维护停机时间，提升产品服务稳定性，例如通过易拆解结构降低核心部件维修难度。回收处置阶段是核心需求场景，需确保各部件能快速分离，不同材质、不同损耗程度的部件可精准分类，便于可再制造部件的修复利用、可回收材料的再生处理、报废部件的无害化处置。另外，还需满足法规与标准要求，契合各国关于资源循环利用、环境保护的相关规定，兼顾市场需求与社会责任，实现产品全生命周期的环境影响最小化、资源价值最大化。

2 可拆卸性设计的关键技术方法

2.1 模块化设计技术

模块化设计技术是可拆卸性设计的核心支撑技术，通过将产品按功能划分为若干独立模块，每个模块具备完整功能、标准化接口与独立结构，实现“模块组合、按需拆解”的设计目标。其核心流程包括模块划分、接

口设计与模块集成三大环节。模块划分需遵循功能独立性、结构完整性、拆解便利性原则,采用拓扑分析、功能聚类等方法,将产品拆解为核心功能模块、辅助功能模块与连接模块,确保各模块边界清晰、拆解无干涉^[2]。接口设计是关键环节,需采用标准化、通用化接口形式,如螺纹连接、卡扣连接等可重复拆卸结构,避免焊接、粘接等不可拆连接,同时保证接口的密封性、稳定性与互换性。模块集成需兼顾整体性能与拆解需求,通过优化模块布局,减少跨模块干涉,提升组装与拆解效率。该技术不仅简化了产品拆解流程,还能提升模块复用率与升级灵活性,例如通过更换核心模块实现产品性能迭代,大幅降低再制造成本,在机械装备设计中应用广泛。

2.2 连接结构优化技术

连接结构优化技术直接决定可拆卸性设计的实施效果,核心是在保证连接强度、可靠性的前提下,优化连接方式、结构形式与操作流程,实现“易拆、可复、无损”的目标。常用连接结构分为可重复拆卸与一次性拆卸两类,可拆卸性设计优先采用可重复拆卸结构,如优化后的螺纹连接、销钉连接、快拆卡扣连接等。针对螺纹连接,通过采用防松且易拧动的结构,减少拆卸阻力;针对卡扣连接,优化卡扣弹性系数与受力点,确保拆卸时不易损坏部件。同时,需规避过度连接问题,减少不必要的连接点,简化拆解步骤。对于复杂机械装备,还可采用分级连接结构,按拆解优先级设计主、次连接点,实现从外到内、从易到难的有序拆解。通过有限元分析等技术优化连接结构参数,在满足强度要求的同时降低结构重量,提升拆解便捷性。该技术能有效减少拆解过程中的部件损耗,提升再制造部件的合格率,为后续回收利用提供保障。

2.3 拆卸路径规划技术

拆卸路径规划技术是实现高效、有序拆解的关键,通过数字化仿真与算法优化,规划出最优拆解路径,明确拆解顺序、操作步骤、工具需求与人员配置,最大限度降低拆解时间、成本与部件损耗。其核心流程包括三维建模、路径仿真、干涉检测与路径优化四大步骤。首先借助三维建模软件构建产品数字化模型,精准还原各部件的结构、位置与连接关系;随后基于模型进行拆解路径仿真,模拟人工或自动化拆解过程,生成多条候选路径;通过干涉检测技术排查候选路径中的部件干涉问题,剔除不合理路径;最后结合拆解效率、成本、部件损耗率等指标,采用遗传算法、蚁群算法等优化算法,筛选出最优路径。对于大型复杂机械装备,还可采用分

层路径规划策略,按部件层级划分拆解单元,实现精准拆解。该技术不仅提升了拆解的规范性与效率,还能提前规避拆解过程中的安全隐患,为自动化拆解设备的研发提供数据支撑,推动拆解流程从人工操作向智能化、标准化转型。

2.4 材料选择与标识技术

材料选择与标识技术是可拆卸性设计的基础保障,直接影响拆解后部件的分类、回收与再利用效率,同时兼顾环境友好性与经济性。材料选择需遵循“易分离、可回收、环境兼容”原则,优先选用可循环利用、无害化的材料,避免有毒有害、难降解材料的使用;同时考虑材料的兼容性,减少不同材质部件混合连接,降低分离难度,例如同类金属材质集中布局,便于后续熔炼回收。对于必须使用混合材质的场景,需采用易分离的连接方式,减少材质分离成本。材料标识技术则通过标准化标识,明确各部件的材质类型、回收等级、再制造适配性等信息,常用标识方式包括激光打标、二维码标识、颜色编码等。激光打标与二维码标识可存储详细材料信息,便于数字化追溯;颜色编码则能快速区分不同材质与回收优先级,提升人工分类效率。该技术实现了材料从设计、生产到回收的全流程追溯,为精准拆解、分类处理提供依据,助力循环经济体系的构建^[3]。

3 可拆卸性设计在机械装备回收再制造中的应用案例

3.1 案例1:工业机器人再制造

重型装备企业针对工业机器人再制造难题,引入可拆卸性设计理念,对传统工业机器人结构进行优化改造,实现了机器人核心部件的高效回收与再制造。该企业在机器人研发阶段采用模块化设计,将机器人划分为机械臂模块、控制系统模块、驱动模块、末端执行器模块四大独立单元,各模块通过标准化快拆接口连接,无需专用工具即可完成拆解。同时优化连接结构,将传统焊接固定改为高强度螺纹与卡扣组合连接,减少拆解损耗;通过二维码标识各模块的材质、服役年限、损耗程度等信息,实现全流程追溯。拆解时依据预设路径规划,从末端执行器到机械臂、驱动模块逐步拆解,仅需2名操作人员在1.5小时内即可完成整机拆解,较传统拆解效率提升60%。拆解后,性能良好的驱动模块、控制系统模块经检测维护后直接复用,损耗部件通过再制造技术修复,报废部件按材质分类回收。经统计,采用该设计后,机器人再制造率从35%提升至68%,再制造成本降低42%,大幅提升资源利用率与经济效益,为工业机器人再制造行业提供可复制的解决方案。

3.2 案例2:数控机床关键部件回收

机床制造企业聚焦数控机床关键部件回收难题,将可拆卸性设计融入数控机床主轴、刀库、导轨等核心部件的研发,构建了“设计-拆解-回收-再制造”的闭环体系。针对数控机床结构复杂、部件精度要求高的特点,采用分级模块化设计,将主轴、刀库等核心部件设计为独立模块,导轨等辅助部件采用易拆解的拼接式结构,同时优化连接结构参数,通过有限元分析确保连接强度的同时,提升拆解便捷性。材料选择上,主轴采用高强度可回收合金钢,刀库采用轻质铝合金,各部件通过颜色编码与激光打标明确材质与回收等级,便于快速分类。拆解过程中,借助数字化路径规划系统,规避部件干涉问题,精准拆解关键部件,避免精度受损。对于回收后的主轴,经精度检测、磨损修复后,再制造合格率达82%,可满足中端数控机床的使用需求;刀库、导轨等部件经翻新处理后可直接复用。该设计使数控机床关键部件回收效率提升55%,材料回收利用率从40%提升至75%,不仅降低企业生产成本,还减少废弃部件对环境的污染,实现了经济效益与环境效益的双赢。

4 可拆卸性设计的效益评估

4.1 经济效益评估

可拆卸性设计的经济效益贯穿产品全生命周期,通过降低制造成本、提升再制造价值、减少处置成本,实现企业经济收益的最大化。在生产阶段,标准化模块化设计可减少零部件种类,提升生产批量,降低研发与制造成本,同时简化组装流程,提高生产效率。在维护阶段,易拆解结构减少维修时间与人工成本,降低设备停机损失,延长产品服役寿命。在回收再制造阶段,高效拆解使更多部件得以复用或再制造,减少新部件采购成本,提升了资源循环价值。另外,可拆卸性设计还能减少废弃产品处置成本,规避传统填埋、焚烧带来的高额处理费用与环保罚款风险。从长期来看,采用该设计的企业可提升产品市场竞争力,契合绿色消费趋势,吸引环保导向型客户,扩大市场份额。经行业数据统计,实施可拆卸性设计的机械装备,全生命周期经济收益平均提升25%-35%,为企业可持续发展提供了经济支撑。

4.2 环境效益评估

可拆卸性设计的环境效益核心体现为减少资源消耗、降低污染物排放,推动制造业向绿色低碳转型。在资源消耗方面,通过部件复用、材料回收,减少了对铁矿石、有色金属等原生资源的开采需求,缓解了资源短缺压力,例如数控机床关键部件回收后,可减少60%以上的原生材料消耗^[4]。在污染物排放控制方面,避免了传统废弃装备填埋带来的土壤污染、地下水污染,减少焚烧处理产生的有害气体排放;同时,再制造过程的能耗远低于全新部件生产,可大幅降低碳排放,据测算,机械装备部件再制造较全新制造平均节能50%-70%,减少碳排放60%-80%。另外,可拆卸性设计推动了有毒有害材料的规范使用与集中处置,降低了材料对环境的潜在危害。从行业影响来看,该设计理念的普及的能带动上下游产业链的绿色转型,倒逼材料供应商、制造企业、回收企业构建绿色供应链体系,助力“双碳”目标实现,为制造业可持续发展奠定生态基础,具有显著的长期环境价值。

结束语

可拆卸性设计为机械装备回收再制造带来新契机,通过理论支撑、技术方法创新及实际应用案例,彰显其在提升经济效益与环境效益上的显著优势。不仅降低企业成本、提升竞争力,还减少资源消耗与污染排放,助力“双碳”目标实现。未来,应进一步推广该设计理念,加强技术创新,完善相关标准,推动机械装备行业构建绿色供应链体系,实现可持续发展,为全球循环经济贡献力量。

参考文献

- [1]李明.王芳.绿色制造理念下机械产品可拆卸性设计方法研究[J].机械设计与制造,2023,42(6):123-127.
- [2]张鹏.刘燕.基于模块化设计的机械产品可拆卸性优化研究[J].制造业自动化,2024,46(3):89-93.
- [3]陈强.赵晓.机械产品可拆卸性设计中的材料选择与匹配策略[J].材料科学与工艺,2023,31(4):78-84.
- [4]黄校彬.机械制造装备智能化改造与升级的关键技术及路径探讨[J].装备维修技术,2024,(03):52-54..