

# 绿色制造背景下的机械设计理念与实践探索

高 洁

陕西省一三九煤田地质水文地质有限公司 陕西 渭南 714000

**摘 要：**在环境危机与资源约束的双重压力下，绿色制造已成为全球制造业转型的核心方向。机械设计作为产品全生命周期的源头环节，其绿色化程度直接影响制造系统的环境绩效。本文系统梳理了绿色制造背景下机械设计的理论演进，提出以“生态效率”为核心的设计理念框架，构建了涵盖材料选择、结构优化、工艺创新、生命周期评价的实践路径，并通过工程机械再制造、3D打印砂模减废、数控机床能量回收等典型案例验证了理论模型的可行性。研究表明，绿色机械设计需突破传统功能导向思维，建立环境属性与工程性能的协同优化机制，为制造业可持续发展提供技术支撑。

**关键词：**绿色制造；机械设计；生命周期评价；生态效率；再制造技术

## 引言

全球制造业正经历着前所未有的环境挑战。国际能源署数据显示，工业部门贡献了全球28%的二氧化碳排放量，其中机械制造作为基础性产业，其能源消耗占工业总能耗的35%以上。与此同时，联合国环境规划署警告，到2050年全球将产生120亿吨电子废弃物，机械产品报废后的资源化处理已成为紧迫课题。在此背景下，绿色制造不再是企业社会责任的附加选项，而是关乎产业存续的必然选择。机械设计作为产品诞生的起点，决定了80%以上的环境影响。传统设计模式以功能实现为唯一目标，导致材料浪费、能耗过高、回收困难等问题。德国弗劳恩霍夫研究所的研究表明，通过绿色设计优化，机械产品全生命周期环境负荷可降低40%-60%。因此，探索绿色制造背景下的机械设计理念与实践路径，对推动制造业生态转型具有战略意义。

## 1 绿色制造背景下机械设计的理论演进

### 1.1 绿色设计理念的内涵扩展

绿色设计（GreenDesign）起源于20世纪60年代的生态设计运动，经历“末端治理”“过程控制”“全生命周期优化”三个阶段，逐步形成以“生态效率”（Eco-efficiency）为核心的现代设计范式。其核心内涵包括：

（1）环境属性优先：在功能、成本、性能等传统指标基础上，引入材料毒性、能源消耗、碳排放、可回收性等环境参数作为设计约束。例如，在液压系统设计中，传统设计仅关注压力、流量等性能指标，而绿色设计需额外考虑液压油泄漏对土壤和水体的污染风险，选择生物降解性更好的液压油或优化密封结构<sup>[1]</sup>。（2）全生命周期视角：覆盖原材料获取、制造、使用、报废、再生等全阶段，建立“摇篮到摇篮”的闭环系统。以风电设备

为例，绿色设计需考虑叶片材料的可回收性、塔筒基础的生态修复、退役后设备的拆解与再利用等环节。（3）多学科协同创新：融合材料科学、系统工程、环境科学、信息技术等跨学科知识，形成集成化设计方法论。例如，在新能源汽车电池包设计中，需结合电化学、热管理、结构力学等多学科知识，实现能量密度、安全性与可回收性的平衡。

### 1.2 关键理论框架

#### 1.2.1 生命周期评价（LCA）理论

ISO14040标准将LCA定义为“对产品系统全生命周期内输入、输出及其潜在环境影响的量化评估”。在机械设计中，LCA可识别设计决策对资源消耗、能源使用、污染物排放的关键影响点。其评估流程包括目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释四个阶段。

#### 1.2.2 可拆卸性设计（DfD）理论

DfD强调通过模块化、标准化接口设计，实现产品快速解体与部件再利用。美国斯坦福大学提出的“拆卸力矩系数”模型，可量化评估连接结构的可拆性。该模型考虑螺栓直径、螺距、材料摩擦系数等因素，通过计算拆卸所需力矩评估设计合理性。

#### 1.2.3 物质流分析（MFA）理论

MFA通过追踪材料在产品系统中的流动路径，识别资源浪费环节。德国亚琛工业大学开发的“材料效率指数”（MEI），可量化评估设计方案的资源利用水平。MEI计算公式为： $MEI = (\text{产品功能输出}) / (\text{材料输入} \times \text{环境影响系数})$ ，其中环境影响系数综合考虑材料开采、加工、运输等环节的碳排放与能耗。

## 2 绿色制造背景下机械设计的实践路径

### 2.1 绿色材料选择体系

材料选择是绿色设计的首要环节。需建立“环境-经济-性能”三维评估模型：（1）环境维度：优先选用可再生材料（如生物基塑料）、可回收材料（如铝合金）、低能耗材料（如高强度钢）。例如，某挖掘机企业采用镍磷镀替代电镀铬，使六价铬排放减少99%，同时耐腐蚀性提升3倍。传统电镀铬工艺需使用剧毒的六价铬化合物，而镍磷镀采用化学镀方式，仅需使用无毒的镍盐与磷化合物，显著降低了环境污染风险<sup>[2]</sup>。（2）经济维度：通过材料数据库（如CambridgeEngineeringSelector）比选成本-环境性能平衡方案。某减速机制造商用粉末冶金齿轮替代机加工齿轮，材料利用率从35%提升至95%，单件成本降低22%。粉末冶金技术通过压制与烧结工艺直接成型齿轮，避免了机加工中的材料切除，同时可实现近净成形，减少了后续加工工序。（3）性能维度：采用拓扑优化、仿生设计等方法，实现材料减量与性能提升的统一。波音787客机通过碳纤维复合材料应用，使机体重量减轻20%，燃油效率提升15%。碳纤维复合材料具有高强度、低密度的特点，其比强度是铝合金的5倍，比模量是钢的3倍，通过优化铺层设计，可实现结构轻量化与承载能力的平衡。

## 2.2 结构优化设计方法

### 2.2.1 轻量化设计

运用有限元分析（FEA）与多目标优化算法，实现结构强度与材料用量的平衡。某风电设备企业通过参数化设计，使塔筒重量减轻18%，同时抗疲劳寿命延长25%。该企业采用ANSYS软件建立塔筒有限元模型，通过遗传算法优化塔筒壁厚分布，在满足风载与重力载荷要求的前提下，实现材料用量最小化。

### 2.2.2 模块化设计

将产品分解为独立功能模块，便于升级、维修与再制造<sup>[3]</sup>。卡特彼勒公司开发的“模块化发动机平台”，使核心部件更换时间从8小时缩短至2小时，再制造周期缩短60%。该平台将发动机分为气缸体、曲轴箱、燃油系统等模块，各模块采用标准化接口设计，可快速拆解与更换，降低了维修成本与停机时间。

### 2.2.3 可制造性设计（DFM）

集成制造工艺约束，减少加工废料与能源消耗。某精密齿轮企业采用近净成形技术，使材料利用率从45%提升至85%，机加工能耗降低60%。近净成形技术通过精密铸造或锻造工艺直接成型齿轮毛坯，仅需少量机加工即可达到尺寸精度要求，避免了传统锻造+机加工工艺中的材料切除与能源浪费。

## 2.3 绿色工艺创新技术

### 2.3.1 增材制造技术

3D打印通过“逐层堆积”实现近净成形，显著减少材料浪费。某航空零部件企业应用激光选区熔化（SLM）技术，使钛合金支架材料利用率从15%提升至95%，制造周期缩短70%。SLM技术采用高能激光束选择性熔化金属粉末，直接成型复杂结构零件，避免了传统减材制造中的材料切除，同时可实现个性化定制与轻量化设计。

### 2.3.2 干式切削技术

以微量润滑（MQL）替代传统切削液，消除废液处理成本。某汽车零部件厂采用MQL技术后，刀具寿命延长3倍，切削液消耗降低98%，切削能耗减少25%。MQL技术通过高压空气将微量润滑油雾化后喷射至切削区域，形成润滑膜，减少摩擦与热量产生，同时避免了切削液对环境的污染。

### 2.3.3 能量回收技术

捕获制造过程中的余热、余压等废弃能源。某数控机床企业开发能量反馈系统，将主轴制动能量回收用于机床照明与控制系统，年节电量达12万kWh。该系统通过逆变器将主轴电机制动时产生的电能转换为交流电，回馈至电网或直接供机床辅助设备使用，实现了能源的高效利用。

## 2.4 生命周期数字化管理平台

构建基于数字孪生（DigitalTwin）的LCA管理系统，实现设计-制造-使用-回收全流程数据贯通。西门子开发的“MindSphere”平台，可实时监测设备能耗、排放数据，并通过AI算法优化运行参数<sup>[4]</sup>。某钢铁企业应用该平台后，吨钢能耗降低8%，二氧化碳排放减少12%。该平台通过传感器采集设备运行数据，建立数字孪生模型，模拟不同运行参数下的能耗与排放情况，并通过优化算法推荐最佳运行策略，实现了生产过程的绿色化与智能化。

## 3 典型案例分析

### 3.1 工程机械再制造实践

三一重工建立“回收-拆解-清洗-检测-再制造-销售”闭环体系，开发激光熔覆、电刷镀等再制造技术，使报废发动机、液压泵等核心部件性能恢复至新品水平。以发动机再制造为例，该企业采用激光熔覆技术修复缸体磨损表面，熔覆层厚度可达2mm，硬度比基体材料提高30%，耐磨性提升5倍。2024年，该公司再制造产品销量突破2万台，节约钢材15万吨，减少碳排放80万吨。具体而言，每再制造1台发动机可节约钢材1.2吨，减少二氧化碳排放6.8吨，相当于种植380棵树的环境效益。

### 3.2 3D打印砂模减废应用

中联重科在铸造环节采用3D打印砂模技术,替代传统木模与树脂砂模。该技术使砂型制备周期从7天缩短至2天,废砂量减少70%,铸件尺寸精度达到CT5级,综合成本降低35%。传统砂模制作需先制作木模,再通过翻砂工艺成型砂型,过程繁琐且废砂产生量大。而3D打印砂模技术通过逐层打印砂粒与粘结剂,直接成型砂型,无需木模,显著减少了材料浪费与生产周期。

### 3.3 数控机床能量回收系统

沈阳机床集团在i5智能机床中集成能量回收模块,将主轴、进给轴制动能量转化为电能,供机床控制系统使用。经实测,该系统使机床能耗降低18%,年节约电费超2万元/台。以一台年运行3000小时的数控机床为例,能量回收系统可回收电能约5400kWh,相当于减少二氧化碳排放3.2吨。该系统通过逆变器将制动能量转换为直流电,存储于超级电容器中,再通过DC/DC转换器为机床控制系统供电,实现了能源的高效利用。

## 4 挑战与对策

### 4.1 技术挑战

一是多学科耦合难度大:绿色设计需统筹机械、材料、环境、信息等多学科知识,现有设计软件难以支持复杂系统建模。例如,在新能源汽车电池包设计中,需同时考虑电化学性能、热管理、结构强度与环境适应性,现有CAD/CAE软件缺乏多学科耦合仿真功能。二是数据获取成本高:LCA分析依赖大量基础数据,但我国材料环境属性数据库尚不完善,企业数据采集成本较高。例如,评估某新型复合材料的环境影响时,需获取其原材料开采、加工、运输等环节的能耗与排放数据,但国内缺乏相关数据库支持,企业需自行开展数据采集与测试,增加了研发成本。

对策:开发集成化设计平台,如达索系统“3DEXPERIENCE”平台,实现多学科协同仿真。该平台集成机械设计、流体仿真、热分析、环境评价等多模块,支持多学科数据交互与联合仿真,可显著提高绿色设计效率。构建行业共享数据库,政府引导建立材料环境性能公共数据平台,降低企业数据获取门槛。例如,欧盟建立的Ecoinvent数据库,收录了超过18000种材料与工艺的环境影响数据,为企业LCA分析提供了数据支持。

### 4.2 管理挑战

一是绿色设计标准缺失:我国尚未建立完整的机械产品绿色设计评价标准体系,企业缺乏明确指导。例如,在评估产品可回收性时,缺乏统一的量化指标与测试方法,导致不同企业评价结果差异较大。二是供应链协同不足:绿色设计需上下游企业共同参与,但当前供应链环境管理意识薄弱。例如,某汽车制造商要求供应商提供环保材料,但部分供应商因成本压力拒绝配合,导致绿色设计目标难以实现。

对策:加快标准制定,参考ISO14062《环境管理——融入产品设计和开发中的环境因素》等国际标准,建立符合国情的绿色设计标准体系。例如,中国电器工业协会发布的《绿色设计产品评价技术规范电动机》,明确了电动机产品的绿色设计评价指标与测试方法,为企业提供了指导。推行绿色供应链管理,通过“绿色采购”“供应商环境评估”等机制,驱动全链条生态转型。例如,华为公司建立供应商环境管理体系,要求供应商签署环保承诺书,并定期开展环境审计,确保供应链绿色化。

## 5 结语

绿色制造背景下,机械设计已由“末端治理”转向“源头预防”,构建起“理念-方法-技术-管理”的创新体系。未来研究,要重点关注人工智能赋能绿色设计,借助机器学习优化设计;探索循环经济模式创新,延长产品生命周期;参与全球标准协同,提升我国制造业话语权。绿色机械设计是技术革新,更是制造业文明形态升级。相信通过持续创新与实践,中国机械工业定能走出高质量、可持续发展之路,为全球生态安全与人类福祉贡献力量。

### 参考文献

- [1]刘爽爽,吴锋炜,王涵.绿色化设计理念在机械设计制造中的应用分析[J].内燃机与配件,2025,(12):102-104.
- [2]王月琴.绿色化设计理念在机械设计制造中的应用[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.杭州铛铛信息咨询有限公司,2025:94-95.
- [3]郭立民.绿色理念在机械设计制造中的应用探究[J].中国设备工程,2025,(07):235-237.
- [4]盛艺婷.机械设计与制造中的绿色技术创新应用研究[J].科技资讯,2025,23(01):170-172.