

面向可持续发展的机械设计与制造一体化方法研究

朱会亭 410223198811204065

摘要

随着全球环境问题日益突出，可持续发展已经成为制造业转型的核心方向。传统机械设计与制造环节相互分离，资源利用率低、废弃物排放量大，难以满足绿色低碳发展要求。本文针对面向可持续发展的机械设计与制造一体化展开研究，分析了一体化方法实现可持续发展目标的核心逻辑，提出了全生命周期评价导向的一体化框架，探讨了模块化设计、清洁制造、废弃物闭环回收等关键技术路径，指出一体化方法能够显著降低机械产品的环境影响，提升资源利用效率，为制造业绿色转型提供可行方案。研究表明，设计与制造环节的深度融合能够从源头减少资源消耗，实现经济效益与环境效益的协同提升，是机械工业落实双碳目标的重要方向。

关键词：可持续发展；机械设计制造；一体化；全生命周期

一、引言

进入二十一世纪以来，全球工业化进程带来的资源短缺、环境污染与气候变化问题不断加剧，推动制造业向可持续方向转型已经成为各国的共识。机械工业是国民经济的支柱产业，同时也是资源消耗与碳排放的重点领域，传统发展模式下，机械设计与制造环节分属不同流程，设计阶段仅关注产品功能与成本，未充分考虑制造环节的资源利用与末端废弃物处理，导致大量资源浪费，也增加了环境治理负担。可持续发展要求机械产品在全生命周期内最大限度降低环境影响，提升资源循环利用率，这就需要对传统的设计与制造模式进行重构，将环境目标、资源目标与传统的功能目标、成本目标进行整合，通过设计与制造的一体化实现可持续发展要求。

近年来，国内外学者围绕绿色设计与清洁制造开展了大量研究，但多数研究分别针对设计环节或制造环节进行优化，未关注两者之间的协同关系。设计参数的调整直接影响制造工艺的资源消耗，而制造工艺的特性反过来也会约束设计方案的环境表现，只有实现设计与制造的深度融合，才能从系统层面降低产品的全生命周期环境影响。因此，本文围绕面向可持续发展的机械设计与制造一体化方法展开研究，构建一体化方法体系，分析其实施路径与应用价值，为机械工业绿色转型提供理论参考。

二、可持续发展对机械设计制造的核心要求

可持续发展视角下的机械产品开发，不再仅仅追求产品的功能可靠性与生产成本最低，而是需要满足三个层面的核心要求：第一是资源高效利用要求，即最大限度减少不可再生资源的投入，提升可再生资源与循环材料的使用比例，通过优化设计减少产品生产过程中的材料切除量，降低资源浪费。第二是环境影响最小化要求，减少制造过程中的废水、废气、固体废弃物排放，降低产品全生命周期的碳排放量，避免使用有毒有害原材料，降低产品使用过程中的能源消耗。第三是产品全生命周期的可循环要求，设计阶段需要考虑产品报废后的拆解、回收与再利用，方便零部件翻新再制造，实现材料的闭环循环，减少最终废弃物填埋量。

传统模式中，设计部门完成图纸设计后交付制造部门组织生产，制造部门仅按照设计要求完成加工，若设计方案未考虑制造环节的环境属性，往往会造成加工难度大、材料浪费多、排放量大等问题，即使制造环节采用清洁生产技术，也难以从根本上降低产品的环境影响。据相关统计，机械产品全生命周期中超过80%的资源消耗与环境影响由设计阶段决定，因此只有将可持续要求融入设计与制造的全流程，通过两者的一体化协同优化，才能真正落实可持续发展目标。

三、面向可持续发展的设计制造一体化框架构建

面向可持续发展的机械设计制造一体化，以产品全生命周期评价（LCA）为核心工具，将可持续目标嵌入从需求分析到产品报废回收的全流程，构建“设计—制造—回收”协同优化的一体化框架，具体分为三个层次：

第一是目标层，以产品全生命周期环境影响最小化、资源效率最大化为核心目标，同时兼顾产品的功能要求与经济效益，实现环境、资源与经济三个目标的平衡，避免片面追求环境效益而牺牲产品性能与企业竞争力。第二是方法层，集成全生命周期评价方法、模块化设计方法、数字化仿真技术与闭环制造技术，通过数字化建模模拟不同设计方案对应的制造过程资源消耗与环境排放，在设计阶段即可完成方案的环境绩效评估，筛选出综合效益最优的方案。第三是实施层，围绕产品开发流程建立跨部门协同机制，设计人员与制造工艺人员、回收处理人员共同参与产品开发全过程，从设计初期就充分考虑制造工艺的绿色特性与末端回收的可行性，避免设计方案成型后再进行修改带来的成本浪费。

该一体化框架打破了设计与制造之间的流程壁垒，将可持续要求作为产品开发的约束条件融入各个环节，能够从源头减少资源消耗与环境排放，避免了末端治理带来的额外成本，符合可持续发展的核心逻辑。

四、一体化方法的关键技术路径

第一，模块化可回收设计技术。模块化设计是实现可持续目标的核心设计方法，通过将产品划分为不同功能模块，统一模块接口标准，既方便产品制造过程中的规模化生产，降低制造成本，也方便产品报废后的拆解，对功能完好的模块进行直接再利用，对失效模块进行材料回收，能够大幅提升回收利用率，减少废弃物排放。一体化方法中，模块化设计需要与制造工艺协同，设计模块结构时充分考虑模块加工的工艺性，减少加工过程中的材料浪费，同时采用标准化的连接方式，避免拆解过程对模块造成损坏。

第二，清洁制造工艺与设计的协同优化。设计方案确定后，制造工艺直接决定了生产过程的环境影响，一体化方法中，设计参数与工艺参数同步优化，例如对于零件结构设计，在满足强度要求的前提下，优化毛坯形状，减少加工余量，从而降低材料消耗与切削能耗；对于加工方法，设计阶段优先选择干切削、高速切削等低能耗低排放工艺，调整零件结构参数适应清洁工艺要求，实现设计与制造的协同降碳。

第三，闭环回收的一体化管理。面向可持续发展的一体化方法将回收环节纳入产品开发流程，设计阶段明确不同零部件的材料种类，方便回收过程中的分类分拣，对可再制造的零部件设计预留加工余量，方便报废后进行修复再利用，制造阶段优先采用再生材料，减少原生材料使用，从而形成“资源—制造—使用—回收—再制造”的闭环循环，提升资源循环利用效率。

五、结论

面向可持续发展的机械设计与制造一体化方法，通过将可持续目标融入设计与制造的全流程，实现了两个环节的深度协同，能够从源头降低机械产品全生命周期的资源消耗与环境影响，兼顾环境效益与经济效益，是机械工业实现绿色转型的有效路径。相比于传统分阶段开发模式，一体化方法能够充分发挥设计阶段对产品环境绩效的决定性作用，通过设计与制造的协同优化，避免了单一环节优化带来的局限性，能够更好地落实双碳目标与循环经济发展要求。未来随着数字化技术与绿色制造技术的不断发展，一体化方法将在更多机械产品开发领域得到应用，推动机械工业向可持续方向不断升级。

参考文献

- [1] 刘志峰, 刘光复. 绿色设计与绿色制造[M]. 机械工业出版社, 2001.

[2] 张坤民. 可持续发展论[M]. 中国环境科学出版社, 1999.

[3] 李培根, 高亮. 现代机械制造技术的发展趋势——绿色化与智能化[J]. 中国机械工程, 2011, 22(21): 2507-2513.

[4] 王晓野, 向东, 段广洪. 面向全生命周期的机械产品可持续设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 1-9.