

基于轻量化的电子产品结构设计优化策略

丁晓阳

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050000

DOI: 10.61369/TACS.2025050007

摘要 随着电子产品向高性能与便携化方向发展, 结构设计面临着减重与强化的双重挑战。为实现结构轻量化与可靠性之间的平衡, 需在材料选择、结构布局与制造工艺等方面进行协同优化。通过引入拓扑优化、仿真分析与多学科设计优化方法, 可有效识别冗余结构并提升整体性能。同时, 结合新型轻质材料和先进成形技术, 有助于实现结构强度与重量控制的统一。系统性的优化策略将为电子产品的设计创新与产业升级提供关键支持。

关键词 轻量化设计; 电子产品结构; 拓扑优化; 多学科设计优化; 仿真分析

Strategies for Optimising the Structural Design of Lightweight Electronic Products

Ding Xiaoyang

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract : As electronic products evolve towards high performance and portability, structural design faces the dual challenges of weight reduction and reinforcement. Achieving a balance between structural lightweighting and reliability necessitates synergistic optimisation across material selection, structural layout, and manufacturing processes. By incorporating topology optimisation, simulation analysis, and multidisciplinary design optimisation methodologies, redundant structures can be effectively identified while enhancing overall performance. Concurrently, integrating novel lightweight materials and advanced forming techniques facilitates unified control over structural strength and weight. Systematic optimisation strategies will provide critical support for design innovation and industrial upgrading in electronic products.

Keywords : **lightweight design; electronic product structures; topology optimisation; multidisciplinary design optimisation; simulation analysis**

引言

在智能化与便携化趋势推动下, 电子产品正朝着更小、更轻、更高效的方向迅速演进。如何在有限空间内实现功能集成, 同时保证结构的轻巧与强度, 成为结构设计面临的核心难题。轻量化不仅关乎用户体验, 更直接影响产品性能、能耗与制造成本。为此, 亟需探索科学高效的结构优化策略, 以兼顾材料利用率、空间布局与力学性能, 为电子产品创新设计提供坚实基础与技术支撑。

一、轻量化对电子产品结构设计的重要性分析

随着科技的不断进步和消费需求的日益多样化, 电子产品正快速向高性能、智能化和便携化方向发展。在这种背景下, 轻量化已成为电子产品结构设计中的关键目标之一。轻量化不仅意味着减轻整体重量, 更涉及结构强度、散热效率、能耗控制与成本优化等多方面的综合性能提升。便携设备如智能手机、笔记本电脑、可穿戴设备等对体积和重量的要求尤为苛刻, 轻盈的产品能够显著提升用户体验, 增强产品的市场竞争力。而在工业电子、军用电子和航空航天等领域, 轻量化更是提高运输效率、减少能源消耗乃至提升作战效能的核心要素。因此, 轻量化设计不仅是一种趋势, 更是产品性能、可靠性与可持续制造理念融合的体现。

在电子产品结构设计中, 轻量化的实现面临诸多技术挑战。

结构减重往往伴随着强度和刚度的降低, 若处理不当, 可能会引发变形、损坏甚至安全隐患。因此, 在保证轻量的同时, 如何维持甚至提升结构的力学性能成为设计优化的关键。此时, 先进的工程手段如拓扑优化、参数优化以及仿真分析等应运而生, 为结构减重提供了科学依据。通过有限元分析、应力测试及热管理建模, 可以有效评估设计方案的可行性和稳定性。与此同时, 新材料的广泛应用也为轻量化提供了更多可能。例如, 碳纤维复合材料、镁铝合金、高分子泡沫等兼具轻质与高强特性, 可在满足功能需求的基础上有效降低重量。此外, 随着3D打印、微注塑成形等先进制造工艺的成熟, 结构设计的自由度和精度进一步提高, 轻量化设计方案的实现路径也更加灵活多样^[1]。

从系统角度看, 轻量化不仅局限于单一部件的设计优化, 更应纳入整机结构、内部模块布局和工艺整合的协同考虑。通过多

学科设计优化（MDO）方法，可以在材料学、结构力学、热管理、电子集成等多个维度之间实现全局平衡。轻量化带来的不只是产品质量的减轻，更可能显著改善散热效率、电池续航、信号传输路径以及装配效率等关键性能指标。此外，减重还意味着材料消耗与碳足迹的减少，符合绿色制造和环境友好型产品的发展要求。在市场竞争日益激烈、用户期望不断提高的今天，轻量化设计将不再是附加价值，而是产品工程的基础要求。

二、电子产品结构中常见的轻量化设计技术

电子产品在不断追求功能集成与性能提升的同时，对结构的轻量化设计提出了更高要求。为满足这一趋势，工程师们在结构设计中广泛采用多种轻量化技术手段，以实现减重与性能的协同优化。其中，最基础也是最常见的方法之一是结构简化。通过优化零部件的几何形状和连接方式，剔除冗余材料与不必要的结构区域，在不影响功能前提下实现结构最小化。例如在支架、外壳或固定模块中，可通过挖空、镂空、开槽等方式减轻重量，进而降低整体负载。此外，模块化设计也在轻量化中发挥着重要作用^[2]。通过将复杂结构拆解为若干轻质模块，并通过标准化接口实现快速连接与替换，不仅提升了制造与维护效率，也有助于在局部设计中集中减重，同时便于后期优化与迭代。

在实现结构轻量化的过程中，拓扑优化技术成为一种高效的设计方法。该技术通过数学算法模拟物理载荷下材料的最优分布，自动生成满足力学性能要求且材料最少的结构形态。在电子产品的内部支撑结构、框架设计以及散热构件中，拓扑优化能够有效挖掘冗余区域，使设计在强度、刚度和重量之间取得更优平衡。同时，与拓扑优化相辅相成的是有限元仿真分析。通过对结构受力、热传导、振动响应等性能进行全面模拟，可以在设计阶段提前发现潜在问题，避免不必要的材料浪费与返工。此外，蜂窝结构、肋骨强化设计等仿生结构也被广泛应用于电子产品中，这些设计在维持强度的同时极大减少了实体材料的使用。例如，在高端笔记本电脑底壳中，使用细密分布的加强筋代替大面积实心铝板，不仅减轻了重量，也增强了抗压性能^[3]。

材料与制造技术的革新也深刻推动了轻量化设计的发展。当前，越来越多的电子产品采用高性能轻质材料如碳纤维复合材料、工程塑料、镁合金和陶瓷复合体等替代传统金属。碳纤维具有优异的比强度和比刚度，适用于对机械性能要求较高的高端设备外壳；而镁合金则因其优良的铸造性能和轻质特性，广泛应用于便携式电子设备结构件中。同时，随着增材制造（3D打印）技术的不断成熟，设计者获得了更高的自由度，可在传统加工方式无法实现的复杂结构中探索全新的减重方式。例如，通过中空结构、渐变厚度设计以及功能集成构件的打印制造，可以在不牺牲性能的情况下显著降低整体重量。

三、拓扑优化与仿真在结构优化中的应用

在电子产品结构设计不断追求轻量化与高性能的背景下，拓

扑优化作为一种先进的结构设计工具，正被广泛应用于结构优化过程中。拓扑优化的核心在于通过数学建模和数值计算，在设定载荷、边界条件与设计约束后，自动求解出材料在结构中的最优分布方案。与传统的经验设计方法不同，拓扑优化能够从“无”到“有”生成全新的结构形态，避免人为干预所带来的局限性。在电子产品中，拓扑优化常用于内部骨架、散热结构、支撑件和壳体等部位的初步设计阶段，能够有效识别冗余材料区域，从而达到减重、提高刚度和改善载荷路径的多重目的。尤其在形状复杂或载荷分布非均匀的构件中，拓扑优化展现出极大的设计潜力，为产品在性能、成本和空间利用率方面带来了突破性提升^[4]。

为了确保拓扑优化结构在实际工况中具备可制造性和可靠性，仿真分析技术在结构优化过程中同样发挥着不可替代的作用。通过有限元分析（FEA）等仿真手段，可以对拓扑优化后的结构进行应力、位移、热传导及振动等多维度性能模拟，验证其在极端使用环境下的稳定性和安全性。例如，便携式电子设备通常面临跌落冲击、温升负荷和频繁操作等复杂载荷条件，设计者可利用仿真工具对结构进行多场耦合分析，判断是否存在局部应力集中、热变形过大或共振风险，从而指导结构调整与强化。仿真分析也能够辅助优化设计参数如厚度分布、连接节点、支撑布局等，使结构更符合制造工艺要求。在这一过程中，仿真不再仅仅是验证工具，更成为结构优化迭代中的有机组成部分，显著提高了设计效率与精准度^[5]。

将拓扑优化与仿真分析技术进行融合，不仅提升了结构优化的科学性和可操作性，也使得设计流程更加智能化与数据驱动。在现代电子产品开发中，越来越多企业采用集成化设计平台，将拓扑生成、仿真评估、参数调优与可制造性分析整合为闭环系统，从而实现从概念设计到量产验证的高效转化。值得一提的是，随着人工智能与机器学习技术的引入，拓扑优化的求解效率和结构预测能力也在不断增强。设计者可基于历史仿真数据训练模型，在新项目中快速获取高质量设计方案，减少仿真次数与计算成本。同时，结合3D打印等增材制造手段，可以直接将优化结构制造出来，大大缩短研发周期并拓展结构形态的自由度。如图1所示。

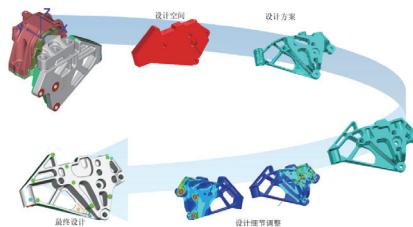


图1 拓扑优化图

四、新型材料与先进工艺在轻量化设计中的作用

在电子产品结构设计中，新型材料在实现轻量化方面发挥着决定性作用。相较传统密度较高的金属，镁合金（密度约1.8 g/cm³）、碳纤维复合材料（密度约1.6 g/cm³，拉伸强度超过3000 MPa）等因其低密度、高比强度，广泛应用于外壳、散热件和支撑结构，兼顾减重与机械性能。碳纤维还具备优异的抗疲劳和电磁屏

蔽特性，适用于高端设备；高性能塑料如 PEEK、PC 则因良好的耐热性和绝缘性，被用于连接器和壳体等部件。这些材料显著降低了产品整体质量，助力结构轻量化与多功能集成的协同发展。

制造工艺的创新也极大拓展了轻量化设计方案的实现空间。传统加工工艺如压铸、冲压、CNC 加工虽仍占据主流地位，但在复杂结构、微小尺寸和多功能集成方面逐渐显现出局限性。随着技术的发展，3D 打印（增材制造）为结构设计提供了前所未有的自由度。通过层层堆积成形的方式，3D 打印可制造出传统工艺难以加工的复杂中空结构、拓扑优化形态以及多孔强化单元，实现极致的结构减重。例如某款高端笔记本中壳采用金属 3D 打印技术后，重量降低了 25%，同时保持结构刚性不变。此外，该技术还支持多材料打印与局部性能调控，为功能一体化设计提供了可能。除了增材制造，微注塑成形、超精密冲压、超声波焊接等先进制造工艺也逐步渗透至电子产品结构件制造环节。这些工艺不仅提升了加工精度与产品一致性，还在尺寸微型化与结构复杂化趋势下展现出优越的适应性。特别是在大批量生产中，微成形技术能够实现轻质材料的高效稳定加工，为轻量化设计从原型向产业化转化提供了有力支撑^[6]。如表 1 所示。

表 1 常见轻量化材料性能比较

材料	密度 (g/cm ³)	拉伸强度 (MPa)	耐热性 (°C)	特点说明
镁合金	1.8	200 - 300	~150	轻质，导热性好，适合压铸
碳纤维复合材料	1.6	3000+	>200	强度高，电磁屏蔽性优
PEEK (塑料)	1.3	90 - 100	260	高绝缘性，耐高温
铝合金	2.7	200 - 400	~200	成本适中，应用广泛
不锈钢	7.8	500 - 800	~800	强度高但重量大，非轻量化优选

材料与工艺的协同创新是轻量化设计从概念走向现实的关键。实际设计中，材料选择受限于加工方式、成形能力、连接技术与成本，需在设计初期将其与制造工艺同步考虑。例如，碳纤维需结合其各向异性与热压工艺控制精度，镁合金压铸则要兼顾收缩变形与模具适配。随着绿色制造兴起，可回收材料与低能耗工艺被广泛应用，既减轻结构重量，又降低环境负担。

五、多学科协同优化策略与未来发展趋势

在实现电子产品结构轻量化的过程中，仅依靠单一技术手段往往难以满足综合性能与功能集成的需求。因此，多学科协同优化策略应运而生，成为当前结构设计的重要发展方向。多学科优化 (MDO) 是一种综合考虑结构力学、热管理、电磁兼容、材料性能、制造工艺和成本等多个维度的系统性设计方法。其核心目标是在多个设计子系统之间寻求全局最优解，而非各自为政的局部优化。以笔记本电脑为例，外壳的设计不仅要满足轻质与刚度，还需兼顾散热通道布局、电池模块空间、电磁屏蔽效果以及美学外观，这就要求不同学科领域之间的深度协作与参数共享^[7]。多学科协同优化通过建立统一的仿真平台与数据接口，实现设计模型、分析模型与仿真结果的集成与迭代，从而在更短周期内实现结构、功能与制造的多目标平衡。

在具体应用层面，多学科协同优化正逐渐从理论模型走向工程实践。结构拓扑优化与热-流-电联合作用的整合，使设计者能够在考虑材料分布的同时评估其对散热路径和电气干扰的影响；结合仿真驱动的参数优化技术，还可进一步细化局部结构厚度、筋条走向、螺丝孔位等关键细节，提高产品整体性能与制造可行性。此外，人工智能技术的引入也为多学科协同优化注入了新的动力。基于大数据的机器学习模型可以快速识别设计变量之间的非线性关系，在多个目标函数之间寻找优选方案，并根据历史设计经验推荐初始结构形态，缩短开发周期。云计算与并行运算平台的融合也为复杂多维模型的实时计算提供了强大支撑，使高维度、多工况、多约束条件下的协同优化成为可能。

展望未来，电子产品结构轻量化将在更高层次上融合先进材料技术、智能制造系统与智能优化算法，推动多学科协同走向更深层的自动化与智能化阶段。随着产品复杂度不断提升与定制化需求的增长，传统线性开发流程将不再适用，取而代之的是跨部门、跨平台的并行工程模式。数字孪生、模型驱动开发 (MBD)、生成式设计等新兴理念将成为构建协同优化体系的重要支撑，助力产品从概念设计到生产制造的全生命周期管理。同时，轻量化设计将不再局限于“减重”本身，而是更多地向“性能密度最大化”演化，即在单位体积或重量内实现功能与性能的最大集成。在绿色制造和可持续发展的推动下，未来的协同优化策略还将更多关注资源循环利用、碳排放控制与环境影响评估^[8]。可以预见，多学科协同优化将成为电子产品结构设计的核心范式，其不断演进将深刻影响下一代产品的设计逻辑、制造体系与市场形态，推动整个行业向高效、智能、绿色的方向迈进。

六、结束语

电子产品结构的轻量化设计不仅是技术创新的体现，更是提升性能、优化用户体验和推动绿色制造的关键路径。通过拓扑优化、仿真分析、新型材料及先进工艺的协同应用，结合多学科一体化的设计思路，可实现结构功能与质量的最佳平衡。未来，随着智能化与数字化技术的深入融合，轻量化设计将在系统集成与可持续发展中发挥更大作用，引领电子产品结构设计迈向更高水平。

参考文献

- [1] 吴春炳. 基于 SLM 的树状结构单元轻量化设计方法研究 [D]. 国防科学技术大学, 2016.
- [2] 付文. 铝合金减震塔结构设计及真空压铸工艺研究 [D]. 武汉理工大学, 2018.
- [3] 余学军. 基于 MBD 的电力电子产品 TOP-DOWN 协同设计平台 [J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 9(06): 63-66. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2019.06.28.
- [4] 王婷萍, 任成鹏. 汽车电器的轻量化研究 [J]. 汽车电器, 2019, (09): 42-43+46. DOI: 10.13273/j.cnki.qcdq.2019.09.011.
- [5] 刘仁志. 轻量化和微型化时代的电镀技术 [C]// 中国表面工程协会转化膜专业委员会, 哈尔滨工程大学. 2019' 全国转化膜及表面精饰技术论坛论文集. 武汉风帆表面工程股份有限公司, 2019: 66-70.
- [6] 宋德庄. XZH246Z 型高速直驱高精机床关键件高刚度轻量化设计 [D]. 燕山大学, 2022. DOI: 10.27440/d.cnki.gysdu.2022.000820.
- [7] 吴小燕. 基于无意识设计的消费类电子产品包装设计研究 [J]. 艺术研究, 2023, (02): 146-148. DOI: 10.13944/j.cnki.ysyj.2023.00085.
- [8] 邢继飞. 轻型抗冲击光电承载平台的结构优化设计及性能分析 [D]. 山东建筑大学, 2023. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2023.000503.