

轻量化飞机结构拓扑优化方法研究

刘 娜

浙江华瑞航空制造有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 本文聚焦轻量化飞机结构拓扑优化方法。阐述了飞机结构轻量化影响因素、挑战及拓扑优化基础理论,介绍了变密度法、均匀化方法等多种拓扑优化方法。通过飞机机翼和起落架结构拓扑优化案例,分析其应用效果。最后展望发展趋势,包括智能化优化、与增材制造融合及绿色可持续发展,为飞机结构轻量化设计提供全面参考。

关键词: 轻量化飞机结构; 拓扑优化方法; 变密度法; 均匀化方法

引言: 飞机结构轻量化对提升飞行性能意义重大,但受材料、载荷等多因素制约,传统设计面临诸多挑战。结构拓扑优化作为先进设计技术,能在给定条件下寻求材料最优分布,实现结构性能与重量优化。它突破传统设计局限,为飞机结构轻量化提供科学构型依据。本文将深入探讨轻量化飞机结构拓扑优化方法,结合案例分析并展望发展趋势。

1 飞机结构轻量化与拓扑优化基础理论

1.1 飞机结构轻量化的影响因素与挑战

飞机结构轻量化是提升航程、载重、燃油效率与飞行性能的核心手段,其实现受材料特性、载荷工况、结构形式、制造工艺及适航规范等多重因素共同影响。先进复合材料、高性能合金的应用为轻量化提供物质基础,而复杂气动载荷、交变载荷与极端温度环境则对结构刚度、强度、疲劳与稳定性提出严苛约束。传统设计依赖经验迭代,易出现材料冗余、传力路径不合理等问题,难以兼顾轻量化与安全性。当前面临的核心挑战包括:多物理场耦合下的性能平衡、复杂结构的高效优化算法、制造可行性与成本控制,以及满足适航认证的可靠性验证。另外,民用飞机强调经济性与环保性,军用飞机突出机动性与生存力,不同机型的轻量化目标差异显著^[1]。随着飞机向大型化、高速化、智能化发展,结构轻量化需突破单一减重思维,转向性能、重量、成本与寿命的多目标协同,这也对设计理论与优化方法提出更高要求,推动拓扑优化等先进技术成为解决上述挑战的关键支撑。

1.2 结构拓扑优化基本概念与原理

结构拓扑优化是在给定设计空间、载荷与约束条件下,通过数学规划方法寻找材料最优分布形式,实现结构性能最大化或重量最小化的先进设计技术,属于结构优化中最高层级的设计方法。其核心原理是将连续体离散为有限单元,以单元密度或材料存在状态为设计变量,以

刚度最大、重量最轻、应变能最小等为目标函数,结合应力、位移、频率等约束构建优化模型。区别于尺寸优化与形状优化,拓扑优化不依赖初始构型,可在概念设计阶段自主生成创新传力路径,突破传统经验设计局限。典型流程包括定义设计域与非设计域、施加边界条件与载荷、建立数学模型、通过迭代算法更新材料分布,最终得到清晰高效的拓扑构型。该方法本质是求解带约束的非线性规划问题,常借助有限元分析进行性能评估,结合灵敏度分析驱动迭代。拓扑优化结果常呈现仿生特征,与骨骼、植物脉络等天然高效结构高度相似,能够最大限度提升材料利用率,为飞机结构轻量化提供科学的构型生成依据。

2 轻量化飞机结构拓扑优化方法

2.1 变密度法

变密度法是目前飞机结构拓扑优化中应用最广泛的方法,核心思想是将连续设计域离散为有限单元,为每个单元赋予0到1之间的伪密度变量,0代表无材料、1代表实体材料,通过伪密度描述材料分布状态。该方法基于固体各向同性材料惩罚模型(SIMP),建立伪密度与弹性模量的非线性关联,引入惩罚因子迫使中间密度单元向0或1收敛,从而获得清晰的拓扑构型。变密度法将离散拓扑问题转化为连续变量优化问题,建模简便、计算效率高、易于与商业有限元软件集成,适合机翼、机身框等大型复杂结构优化。其优势在于可灵活集成应力、位移、频率等多种约束,满足飞机结构多性能要求;但存在灰度单元、边界模糊等问题,需后处理平滑边界。在飞机结构设计中,变密度法常用于翼肋、加强筋、接头等部件的概念构型生成,能够快速剔除冗余材料,明确主传力路径,为后续形状与尺寸优化提供可靠基础,是工程化程度最高的拓扑优化方法。

2.2 均匀化方法

均匀化方法是早期连续体拓扑优化的经典理论,通

过引入周期性微结构孔洞，将宏观结构性能与微观材料参数关联，实现拓扑构型优化。该方法基于均匀化理论，将设计域视为含微结构的多孔材料，以微结构几何参数为设计变量，通过均匀化计算获取宏观等效弹性模量，进而构建优化模型。均匀化方法数学理论严谨，能够清晰描述材料从实体到孔洞的连续变化，优化结果边界光滑，适合理论研究与高精度构型生成^[2]。但由于涉及多尺度建模与复杂积分运算，计算量大、收敛速度慢，且建模流程繁琐，难以快速适配飞机大型结构优化需求。随着工程化需求提升，均匀化方法逐渐被计算效率更高的变密度法取代，但其理论价值显著，为后续变密度法、水平集方法提供了重要基础。在飞机结构轻量化研究中，均匀化方法常用于复合材料结构、蜂窝夹芯结构的多尺度拓扑优化，可同步实现宏观布局与微观细观结构优化，为多功能一体化结构设计提供理论支撑，适用于对精度要求高、计算资源充足的科研场景。

2.3 水平集方法

水平集方法是基于隐式边界描述的先进拓扑优化技术，通过高维水平集函数的零等值面表征结构边界，将拓扑演化转化为函数演化过程，有效解决传统方法边界模糊、拓扑变化不灵活等问题。该方法以Hamilton-Jacobi方程驱动边界移动，结合形状灵敏度分析确定演化速度，可自然实现孔洞生成、合并、分裂等复杂拓扑变化，优化结果边界光滑、无灰度单元，便于后续CAD建模与制造。水平集方法能够直接集成几何约束与工艺约束，适合对表面质量与加工性要求高的飞机结构优化。其优势在于拓扑描述精确、可处理多材料优化与多物理场耦合，在发动机零件、起落架接头等高精度部件优化中优势突出；但计算复杂度高、对初始值敏感、收敛稳定性有待提升。近年来，结合自适应网格、快速求解算法的改进水平集方法逐渐应用于飞机结构设计，可在保证优化精度的同时提升计算效率，为复杂承力结构提供高质量拓扑构型，成为增材制造适配性最优的拓扑优化方法之一。

2.4 其他拓扑优化方法

除主流方法外，多种新型拓扑优化方法为飞机结构轻量化提供了补充方案。渐进结构优化法（ESO）基于单元灵敏度信息逐步删除低效材料，原理直观、编程简单，适合薄壁结构与简单构件优化，但易陷入局部最优，边界存在锯齿现象。移动可变形组件法（MMC）采用基础组件拼接描述拓扑，设计变量少、优化效率高，便于集成制造约束，在飞机加强筋、点阵结构优化中表现良好。独立连续映射法（ICM）引入独立映射函数处理离散变量，能够统一处理拓扑、形状、尺寸优化，适合多级别

协同设计。仿生拓扑优化借鉴生物生长规律，模拟骨骼重构、叶脉分布等天然机制，生成轻量化与韧性兼备的创新构型，适合高承载、抗冲击结构。

3 轻量化飞机结构拓扑优化案例分析

3.1 案例一：飞机机翼结构拓扑优化

机翼作为飞机关键承力部件，其轻量化水平直接影响整机性能，拓扑优化已成为机翼结构设计的核心技术。以民用客机机翼前缘肋为例，采用变密度法开展拓扑优化，以刚度最大化为目标，施加气动载荷、应力与位移约束，保留安装接口与气动外形非设计区域。优化过程通过有限元分析迭代更新材料分布，剔除低应力冗余区域，形成仿生桁架式传力路径，最终实现减重44%，同时提升结构刚度与疲劳寿命^[3]。在无人机机翼设计中，结合复合材料铺层与拓扑优化，对翼梁、翼肋一体化优化，生成连续变厚度构型，在满足抗弯、抗扭性能前提下重量降低25%以上。优化过程充分考虑多工况载荷、模态约束与制造工艺，避免出现过小特征与应力集中。拓扑优化使机翼从传统经验设计转向科学构型生成，缩短设计周期，提升材料利用率。工程应用表明，经拓扑优化的机翼结构重量更轻、受力更合理，配合增材制造可实现复杂构型一体化成型，为大型客机、无人机等机型的轻量化升级提供可靠技术路径。

3.2 案例二：飞机起落架结构拓扑优化

飞机起落架承受着陆冲击与地面滑行载荷，是典型的高承载、高安全关键部件，轻量化设计需在强度、刚度、疲劳与重量间严格平衡。以某型飞机主起落架扭力臂与撑杆为对象，采用水平集法与变密度法联合优化，以应变能最小化与体积缩减为目标，施加冲击载荷、应力约束与几何约束，保证装配关系与运动行程。优化前传统结构材料冗余、应力分布不均，优化后生成仿生树状传力路径，关键受力区域材料集中，非关键区域镂空减重，扭力臂重量降低49.25%，撑杆减重超30%，同时满足静强度与疲劳寿命要求。针对起落架复杂多构件系统，采用多部件协同拓扑优化，兼顾接口匹配与整体性能，避免局部优化导致系统性能下降。优化过程集成锻造、铣削等工艺约束，确保构型可加工性。通过试验验证，优化后的起落架部件在载荷工况下应力分布均匀，无明显应力集中，重量显著降低。拓扑优化有效解决了起落架轻量化与高承载的矛盾，提升起落架效率与可靠性，已在军用战机、民用客机与水陆两栖飞机中成功应用。

4 轻量化飞机结构拓扑优化的发展趋势与展望

4.1 智能化优化方法与人工智能技术的应用

人工智能技术与拓扑优化深度融合，推动轻量化设

计从被动求解向主动智能演进。机器学习、深度学习与强化学习大幅提升优化效率与全局寻优能力,通过神经网络构建代理模型替代耗时有限元分析,将优化周期缩短60%以上,适合大型飞机结构快速迭代。基于生成对抗网络(GAN)与Transformer的生成式设计,可直接学习载荷-构型-性能映射关系,自主创新满足多约束的拓扑方案,突破人类经验局限。强化学习算法能够动态调整优化策略,避免局部最优,适配多目标、多工况复杂场景。AI技术还可实现优化结果智能后处理、工艺性自动评估与缺陷预测,构建设计-分析-修正闭环。在复合材料结构优化中,人工智能可预测材料性能、优化铺层顺序,实现材料与结构一体化智能设计。随着算力提升与数据积累,智能化拓扑优化将向自主决策、自适应优化方向发展,降低对人工经验的依赖,缩短研发周期,提升设计质量,为飞机结构轻量化提供高效、智能、创新的技术路径。

4.2 增材制造技术与拓扑优化的深度融合

增材制造与拓扑优化深度融合,打破“设计服从制造”的传统模式,实现高性能复杂结构的自由成型,成为飞机轻量化的核心驱动力。拓扑优化生成的仿生桁架、点阵、镂空等复杂构型难以通过传统工艺制造,而增材制造可逐层成型任意复杂结构,充分释放优化设计潜力。二者协同实现“最优设计+高效制造”,在飞机接头、吊架、翼肋等部件中实现减重20%-70%,零件数量减少90%以上,提升结构整体性与可靠性。金属增材制造与复合材料3D打印技术不断成熟,可适配钛合金、高强度铝、复合材料等航空专用材料,满足力学性能与适航要求。融合过程中,将增材工艺约束如最小壁厚、悬垂角、成型方向等嵌入优化迭代,实现设计-制造一体化建模,避免成型缺陷与变形。未来将构建增材-拓扑全流程数字链条,结合工艺仿真与在线监测,实现设计、制造、检测闭环控制。这种融合模式推动航空结构向轻量化、一体化、高性能方向发展,为新一代飞机研制提供颠覆性技术支撑。

4.3 绿色可持续发展理念下的拓扑优化

绿色可持续理念推动拓扑优化从单一轻量化转向全生命周期低碳、节能、环保的多目标设计,成为航空绿色制造的重要抓手。绿色拓扑优化以降低全生命周期碳排放、减少材料消耗、提升可回收性与延长服役寿命为目标,在减重同时兼顾环境效益。通过优化材料分布与构型,提升材料利用率,减少原材料消耗与加工废料,配合可回收合金、生物基复合材料,实现结构环保升级^[4]。在电动飞机与混动飞机设计中,绿色拓扑优化协同电池布局、电机散热与结构承载,提升能源效率,降低飞行能耗。优化过程考虑维修性、可拆卸性与循环利用,延长结构服役周期,减少全生命周期成本与环境影响。随着航空业碳中和目标推进,绿色拓扑优化将整合能耗、排放、回收等指标,构建生态-性能-成本协同优化模型,推动飞机结构从传统高效设计向绿色低碳、可持续发展转型,助力航空工业高质量发展。

结束语

轻量化飞机结构拓扑优化意义深远,多种优化方法各具优势,为不同飞机部件设计提供了多样选择。通过实际案例可见,其在减重、提升性能等方面成效显著。展望未来,智能化、与增材制造融合及绿色可持续发展是主要方向。持续研究与应用这些方法,将推动飞机结构轻量化设计不断进步,助力航空工业实现高质量发展。

参考文献

- [1]林朋右,汤荣传,王佳豪,等.基于拓扑优化的飞机襟翼支架轻量化设计[J].机械管理开发,2023,38(12):123-126,129.
- [2]陈小龙,赵知辛,张瑞阳,等.飞机起落架结构拓扑优化设计及动态特性分析[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2024,40(2):1-8.
- [3]蒋睿哲,周煜青,王义,等.基于激光增材制造的飞机系统管路共生机体侧壁结构轻量化设计研究[J].中国激光,2025,52(12):267-278.
- [4]芦维强,邓薪利.基于AltairInspire的飞机襟翼支架轻量化优化设计[J].机械工程师,2024(9):50-54.