

# 飞机机身装配过程中的力学分析与优化

杜江铎

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

**摘要:** 飞机机身装配作为飞机制造中的核心环节,对于确保飞机在全寿命周期内的安全服役至关重要。在这一过程中,力学分析与优化扮演着举足轻重的角色。本文深入探讨了飞机机身装配中的力学问题,分析了力学分析与优化的应用,并提出了多元化的优化策略,以此为飞机制造装配提供有力的理论支撑和实践指导。

**关键词:** 飞机机身装配; 力学分析; 优化策略

## 引言

在航空工业的持续发展中,飞机机身装配的精确性和高质量成为了制造业关注的重点。力学分析与优化技术在此领域的应用,不仅能够提升装配质量,还能有效降低成本和提高生产效率。本文将系统阐述飞机机身装配中的力学分析与优化方法。

### 1 飞机机身装配的力学特点

飞机机身装配涉及复杂的结构组合和精密的连接技术,其力学特性表现在多个层面:机身结构的复杂性导致力学行为难以预测;不同材料间的力学性能差异显著;装配过程中的微小变形和应力集中可能对飞机的整体性能产生深远影响。

### 2 力学分析在飞机机身装配中的深入应用

#### 2.1 有限元分析法

有限元分析法是飞机机身装配过程中进行力学分析的一种重要方法。这种方法的核心思想是将连续的结构离散成有限个小的单元,通过对这些单元的分析来近似模拟整体结构的力学行为。在飞机机身装配中,有限元分析法的应用显得尤为关键,因为它能够精确地模拟和分析装配过程中的各种力学问题。具体来说,在飞机机身装配的力学分析中,有限元分析法首先需要对机身结构进行建模。这一步骤涉及到将机身划分为大量的有限元,每个元素都具有自己的力学属性和行为。这些元素的划分需要考虑到机身的几何形状、材料属性以及预期的载荷条件等多个因素。建模完成后,接下来是通过施加边界条件和载荷来进行求解。边界条件通常包括机身结构的约束和支撑情况,而载荷则包括重力、气动力、温度载荷等。有限元软件会根据这些条件和载荷,对每个元素的力学响应进行计算,从而得出整个机身结构的应力分布、变形情况以及其他相关力学参数<sup>[1]</sup>。有限元分析的结果不仅可以用于预测装配过程中可能出现的力学问题,如应力集中、变形过大等,还可以为机身结构的

优化设计提供重要依据。例如,如果发现某个区域的应力水平过高,设计时可以通过调整该区域的材料属性、几何形状或者加强结构支撑等方式来降低应力水平,从而提高机身的安全性和可靠性。此外,有限元分析法还可以与其他力学分析方法相结合,如断裂力学分析、疲劳分析等,以更全面地评估机身结构的力学性能。这种综合性的分析方法有助于发现潜在的安全隐患,并为后续的维护和检修工作提供指导。

#### 2.2 弹性力学与塑性力学的综合分析

在飞机机身装配的力学分析中,弹性力学与塑性力学的综合分析是一个不可或缺的部分。这两种力学分析方法各自针对不同的变形阶段,共同为评估机身结构的整体性能提供了全面的视角。弹性力学分析主要关注机身结构在受到外力作用后,能够恢复到原始状态的能力。在飞机机身装配过程中,弹性力学分析尤为重要,因为它涉及到高精度装配区域在小变形范围内的行为预测。这些区域包括但不限于机翼与机身的连接处、发动机悬挂交点等关键部位。通过弹性力学分析,工程师可以精确地计算出在给定载荷下结构的变形情况,从而确保装配的精确性。此外,弹性力学还可以帮助预测装配过程中可能出现的应力集中现象,这对于避免潜在的疲劳裂纹和结构失效具有重要意义。与弹性力学不同,塑性力学分析则更多地关注结构在超过弹性极限后的行为。在飞机机身装配中,塑性力学分析主要用于评估结构在极端条件下的性能,如撞击或过载情况。在这些情况下,材料可能会进入塑性变形阶段,此时弹性力学分析将不再适用。塑性力学分析可以帮助工程师了解结构在受到极端载荷时的响应,包括材料的屈服、塑性流动以及最终的破坏模式。这些信息对于评估飞机的安全性和耐久性至关重要。例如,在飞机发生意外撞击时,塑性力学分析可以预测机身结构的变形程度和吸收能量的能力,从而为改进设计提供依据。

### 2.3 断裂力学与疲劳分析

在飞机机身装配的力学评估体系中，断裂力学与疲劳分析占据着举足轻重的地位。这两种分析方法对于确保飞机结构的安全性和耐久性具有至关重要的作用。断裂力学分析是一种专注于裂纹萌生和扩展规律的研究方法。在飞机机身装配过程中，由于材料、工艺或设计等方面的原因，结构内部或表面可能存在微小的缺陷或裂纹。这些初始缺陷在飞行过程中可能逐渐扩展，最终导致结构的失效。因此，断裂力学分析的主要目标是预测裂纹的扩展速率和方向，以及评估结构在裂纹存在下的剩余强度和寿命。通过断裂力学分析，工程师可以精确地计算出裂纹尖端的应力强度因子，这是评估裂纹扩展速率的关键因素。此外，断裂力学还可以帮助确定裂纹扩展的临界条件，从而为维修和更换策略的制定提供重要依据。在飞机机身装配中，断裂力学分析的应用不仅限于金属材料，还可扩展到复合材料等新型材料领域。与断裂力学分析相辅相成的是疲劳分析。疲劳是指结构在循环载荷作用下逐渐累积损伤并最终导致失效的过程。在飞机飞行过程中，机身结构会不断受到气动力、重力、惯性力等循环载荷的作用，因此疲劳分析显得尤为重要<sup>[2]</sup>。疲劳分析的主要任务是预测结构在给定循环载荷下的寿命，并确定疲劳裂纹的萌生位置和扩展速率。这通常涉及到对材料的疲劳性能进行测试和评估，以及利用相关理论模型进行寿命预测。通过疲劳分析，工程师可以及时发现潜在的疲劳问题，并采取相应的措施来延长结构的寿命和提高飞行的安全性。

### 2.4 动态与稳定性分析

在飞机设计和装配过程中，动态与稳定性分析是至关重要的一环。这种分析不仅关注飞机在静态条件下的结构强度，更着眼于飞机在飞行过程中的动态响应和稳定性表现。动态分析主要考察飞机在不同飞行状态下的振动特性。飞机在飞行时，会受到各种外部激励，如气流扰动、发动机振动等。这些激励可能引发飞机的结构振动，进而影响乘客的舒适度、机载设备的正常工作，甚至飞机的结构安全。动态分析通过建立飞机的动力学模型，模拟其在不同飞行条件下的振动响应，从而评估飞机的动态性能。这有助于设计师优化飞机结构，减少不利振动，提高飞行的平稳性。稳定性分析则侧重于评估飞机在受到扰动后的恢复能力。飞机的稳定性直接关系到其飞行安全。一个稳定的飞机能够在受到外部扰动后，迅速恢复到原有的飞行状态，而不会出现失控或坠毁等严重事故。稳定性分析通过考察飞机的气动布局、重心位置、控制系统设计等因素，来预测飞机在飞行中

的稳定性表现。设计师可以根据分析结果调整飞机的设计参数，以提高其稳定性。在进行动态与稳定性分析时，通常会借助先进的计算机仿真技术和风洞试验等手段。这些技术能够模拟真实的飞行环境，为分析提供准确的数据支持。同时，随着计算技术的发展，现在的分析软件能够更加精确地模拟飞机的动态行为和稳定性特性，为设计师提供更加可靠的决策依据。

## 3 飞机机身装配的优化策略

### 3.1 结构优化设计

在飞机机身装配过程中，结构优化设计是一个核心策略，旨在提升机身的整体性能和安全性。这种优化不仅涉及材料的选取和工艺的改进，更包括机身结构的精细化设计。利用拓扑优化技术，可以对机身结构进行全面的分析和改进。拓扑优化的核心在于寻找材料在特定条件下的最佳分布方式，从而改善结构的应力分布并减少应力集中现象。在飞机机身设计中，这意味着在关键区域增加或减少材料，以确保在承受载荷时能够更加均匀地分布应力。通过这种方式，不仅可以提高结构的强度，还能有效延长机身的使用寿命。形状优化则是另一种重要的结构优化方法。通过对部件的几何形态进行微调，可以显著提高结构的整体性能。例如，在机翼的设计中，通过调整翼型、弦长等参数，可以优化升力和阻力之间的平衡，从而提升飞行效率。同样，在机身的设计中，对截面形状、长度等参数的优化也有助于提高结构的稳定性和承载能力。除了上述两种优化方法外，还可以考虑采用新型材料和先进的制造工艺来进一步提升机身的性能。例如，使用复合材料可以显著减轻机身重量，同时保持良好的强度和刚度；而采用先进的焊接或粘接技术则可以提高连接部位的强度和耐久性。

### 3.2 装配顺序与路径优化

在飞机机身装配过程中，装配顺序与路径的选择是至关重要的环节。这两者不仅影响装配效率，更直接关系到装配过程中的力学性能和最终的产品质量。装配顺序的优化能显著减少装配过程中的应力和变形。不同的装配顺序会导致结构内部产生不同的应力分布和变形模式。例如，若先装配刚度较大的部件，可能会对其他待装配部件的位置和姿态造成影响，进而引入不必要的应力和变形。因此，通过智能算法对装配顺序进行优化，可以预测并控制这些不利影响，确保装配过程的顺利进行。路径优化则关注的是装配过程中工具或设备的移动轨迹。不合理的装配路径不仅会增加装配时间，还可能因多次移动和定位而引入额外的误差和应力。优化装配路径旨在减少这些不必要的移动，提高装配的准确性和

效率。例如,通过规划出最短、最平滑的移动路径,可以减少装配过程中的振动和冲击,从而降低对结构的不利影响<sup>[3]</sup>。为实现装配顺序与路径的优化,可以借助先进的智能算法,如遗传算法、模拟退火算法或粒子群优化算法等。这些算法能够综合考虑多种因素,如装配时间、成本、质量和力学性能等,从而找到最佳的装配方案。同时,结合数字化仿真技术,可以在虚拟环境中模拟装配过程,进一步验证优化结果的可行性。

### 3.3 新型连接技术的引入

随着科技的飞速发展,飞机机身装配领域也迎来了技术革新。其中,新型连接技术的引入成为了提升机身性能的关键一环。这些技术不仅提高了连接的强度和密封性,还为飞机制造带来了前所未有的效率和可靠性。激光焊接技术便是其中的佼佼者。它利用高能激光束作为热源,将材料加热至熔化状态,随后冷却凝固形成牢固的连接。激光焊接在飞机机身装配中的应用,显著提升了连接部位的强度和密封性能。与传统的焊接方法相比,激光焊接具有热影响区小、变形少、焊接速度快等优势。更重要的是,激光焊接能够实现高精度、高质量的连接,确保飞机在各种极端环境下的安全性和稳定性。搅拌摩擦焊则是另一种备受瞩目的新型连接技术。它通过搅拌针的高速旋转和移动,使得待连接的材料产生塑性流动和混合,从而实现固态连接。这种技术无需添加焊丝或保护气体,且焊接过程中无飞溅、无烟尘,对环境友好。在飞机机身装配中,搅拌摩擦焊能够提供与母材等强度的连接,同时具备优异的抗疲劳和抗腐蚀性。除了上述两种技术外,还有其他新型连接技术如超声波焊接、电子束焊接等也在飞机制造中得到了应用。这些技术的共同特点是能够提供高质量的连接,同时减少对传统连接方法如铆接、螺栓连接的依赖,从而简化了装配流程,提高了生产效率。

### 3.4 智能监控与实时调整策略

在飞机机身装配过程中,智能监控与实时调整策略的应用正变得日益重要。这一策略的核心在于引入先进的智能传感器和监控系统,从而实现对装配过程中力学

行为的实时监测。智能传感器被精心布置在机身的各个关键部位,这些传感器能够高精度地捕捉装配过程中的力学变化,如应力、应变、位移等关键参数。它们以极高的频率进行数据采样,确保任何细微的变化都能被及时发现。与此同时,一个高效的监控系统负责接收并处理这些传感器数据。系统不仅能够对数据进行实时分析,还能根据预设的算法识别出异常情况。例如,如果某个部位的应力值突然升高,系统就会立即发出警报,提示操作人员注意。实时调整策略则是基于这些实时监控数据进行的。一旦发现数据异常,系统会自动或辅助操作人员对装配过程进行微调。这可能涉及装配顺序的改变、紧固力矩的调整,或是其他相关工艺参数的优化<sup>[4]</sup>。这种实时反馈和调整机制确保了装配过程的精确性和一致性,显著降低了人为错误的风险。此外,智能监控与实时调整策略还能成为后续的飞机维护和检修提供宝贵的数据支持。通过长期监控和数据分析,可以更准确地预测机身结构的使用寿命和潜在故障点,从而实现预防性维护,提高飞机的整体运营效率和安全性。

### 结语

飞机机身装配过程中的力学分析与优化是确保飞机性能和安全性关键环节。通过综合运用多种力学分析方法和优化策略,可以显著提升飞机机身的装配质量和效率。随着技术的不断进步和创新,未来飞机制造业将迎来更为广阔的发展前景。

### 参考文献

- [1]姜昕彤.飞机装配过程中工装应变监测及预测技术研究[D].大连理工大学,2020.
- [2]邓砚宇.飞机装配铆接中的力学性能分析及仿真研究[D].南昌航空大学,2018.
- [3]罗翔天,刘文,陈松林,等.由点及面提升飞机部件装配质量[J].中国质量,2023,(08):104-109.
- [4]孔繁霖,乔兴华,王富强,等.飞机先进数字化装配关键技术及发展趋势[J].机械工程与自动化,2023,(02):222-224.