

飞机地面强度试验关键技术与方法研究

李黎明 于国庆

哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150060

摘要：飞机地面强度试验是确保飞机结构安全性和可靠性的重要环节。本文深入研究了飞机地面强度试验的关键技术与方法，包括“积木式”设计验证方法的应用、先进的加载与测量技术、以及试验质量控制与适航管理策略。通过对比传统试验方法的不足，本文提出了一系列创新性的解决方案，旨在提高试验效率、降低成本，并确保试验结果的真实性和准确性。研究成果对于飞机结构的优化设计、制造质量的提升以及适航审定具有重要意义。

关键词：飞机地面强度试验；关键技术；方法研究

引言：飞机地面强度试验是航空工业中确保飞机结构安全性的关键环节。随着航空技术的不断进步和适航标准的日益严格，对飞机地面强度试验的要求也越来越高。本文旨在深入研究飞机地面强度试验的关键技术与方法，探讨如何通过先进的试验技术和方法来提高试验的准确性和可靠性，从而确保飞机结构在各种极端条件下的安全性和稳定性。这对于推动航空工业的发展、提高飞机的性能和安全水平具有重要意义。

1 飞机地面强度试验基础理论

1.1 飞机结构强度概述

飞机结构强度是指飞机在载荷、振动、温度等工作环境下抵抗破坏和保持安全工作的能力。这种强度与飞机的载荷形式、工作环境以及飞机的几何尺寸、所用材料的性能、工艺质量和破坏形式密切相关。飞机结构的强度通常分为几种：（1）静强度。主要关注飞机结构在静态载荷下的应力、稳定性和刚度分析；（2）疲劳和断裂强度。涉及飞机结构的疲劳寿命和断裂分析，这是评估飞机长期安全运行的重要指标；（3）动强度。研究飞机在振动和动力响应下的强度，包括起落架的落振、摆振以及全机地面振动等；（4）热强度。考察飞机结构在高温环境下的热应力、热稳定性、热振动、热疲劳和蠕变分析，这对于高速飞行器和跨声速飞行器尤为重要。

1.2 地面强度试验原理与方法

地面强度试验是飞机结构强度验证的关键环节，其实质是在一定的环境下（如室温、湿热、振动等），对飞机结构（整机、部件、零件等）施加载荷（力、振动、热载等），模拟其设计时考虑的各种使用状态，通过测量其响应（如应力、变形、转角、位移、频率、振幅等），验证是否达到设计要求。地面强度试验的主要方法包括：静强度试验；在静载荷作用下观测研究飞机结构的强度、刚度和应力应变分布，以验证飞机结构强

度和分析的正确性。这种试验的目的是为了检测飞机的制造工艺质量，确保飞机在静态载荷下能够安全工作^[1]。疲劳试验；模拟飞机在实际飞行中可能遇到的反复载荷，评估飞机结构的疲劳寿命和耐久性。这种试验对于发现结构中的潜在缺陷和验证疲劳设计至关重要。动强度试验；研究飞机在振动和动力响应下的强度，包括起落架的落振、摆振以及全机地面振动等。这种试验有助于评估飞机在起飞、降落和飞行过程中的动态性能。热强度试验；模拟飞行中的气动加热和气动载荷，考察飞机结构的传热特性和承载能力。这种试验对于高速飞行器和跨声速飞行器尤为重要，因为它涉及到结构在高温环境下的强度和稳定性。

2 飞机地面强度试验关键技术

2.1 试验件设计与制备

试验件的设计与制备是飞机地面强度试验的基础，直接关系到试验结果的准确性和可靠性。试验件应尽可能真实地模拟飞机实际结构，包括材料、尺寸、形状、连接方式和边界条件等。这样可以确保试验数据能够真实地反映飞机结构的强度特性。为了实现这一目标，设计师需要深入了解飞机结构的实际使用情况，并结合试验目的和要求，合理设计试验件的形状和尺寸。还需要考虑试验件的制造工艺和成本，以确保试验件的可行性和经济性。试验件应具有代表性，能够反映飞机结构的关键部位和薄弱环节。通过合理的试验设计和制备，可以确保试验件在受到加载时能够模拟飞机结构在真实环境中的受力情况。这有助于发现飞机结构的潜在问题，并为后续的结构优化和改进提供依据。试验件的设计应考虑其可制造性，确保能够采用现有的制造工艺和设备进行制造。还需要考虑试验件的装配和拆卸方便性，以便于进行试验安装和调试。试验件的设计应满足安全性要求，确保在试验过程中不会对试验人员和设备造成危

害。这需要在设计过程中充分考虑试验件的强度和刚度,以及加载系统的稳定性和可靠性。在试验件的制备过程中,需要严格控制制造工艺和质量控制标准。这包括选择合适的材料、制定合理的加工工艺、进行必要的检测和试验等。

2.2 加载系统与控制技术

加载系统与控制技术是飞机地面强度试验的核心部分,直接关系到试验的准确性和可靠性。加载系统的主要功能是为试验件提供所需的加载力,以模拟飞机在实际飞行中的受力情况。加载系统通常由加载装置、控制系统和数据采集系统组成,加载装置用于产生所需的加载力,控制系统用于控制加载力的大小和方向,数据采集系统用于实时采集和记录试验数据。在加载过程中,控制系统根据预设的加载谱或加载程序,控制加载装置产生相应的加载力。数据采集系统实时采集试验件的应变、位移等响应数据,并进行处理和存储。加载系统的关键技术:为了实现精确的加载控制,加载系统需要采用高精度控制技术。这包括高精度的传感器、控制器和执行器等设备,以及先进的控制算法和策略。加载系统需要具备良好的动态响应性能,能够实时跟踪和响应试验件的动态变化。这要求加载系统具有较高的响应速度和稳定性。对于复杂的飞机结构,需要采用多轴加载技术来模拟其在真实环境中的受力情况。这要求加载系统具备多轴协调加载的能力,并能够根据试验需求进行灵活调整。为了提高加载系统的性能和可靠性,需要进行以下优化措施:优化加载装置的结构设计;通过合理的结构设计,可以提高加载装置的刚度和强度,降低其质量和体积,从而提高加载系统的整体性能。改进控制系统;采用先进的控制算法和策略,提高控制系统的精度和稳定性,还可以引入智能化控制技术,实现加载系统的自适应控制和优化控制。加强数据采集和处理能力;提高数据采集系统的采样率和精度,优化数据处理算法和流程,以实现对试验数据的快速、准确处理和分析^[2]。

2.3 数据采集与处理技术

数据采集与处理技术是飞机地面强度试验的重要环节,直接关系到试验结果的准确性和可靠性。数据采集系统的主要功能是实时采集和记录试验数据,包括应变、位移、加速度等响应数据。数据采集系统通常由传感器、数据采集仪和计算机组成。传感器用于将试验件的响应转换为电信号,数据采集仪用于实时采集和记录这些电信号,并将其转换为数字信号进行存储和处理。计算机则用于对采集到的数据进行后续处理和分析。数据采集系统的关键技术:为了实现精确的数据采集,需

要采用高精度的传感器。这些传感器应具有良好的线性度、稳定性和重复性等特点。为了实时采集试验数据,需要采用高速数据采集技术。这要求数据采集仪具有较高的采样率和精度,并能够实时处理和存储大量的数据。在多通道数据采集过程中,需要确保各个通道的数据能够同步采集和记录。这要求数据采集系统具备数据同步功能,以确保试验数据的准确性和一致性。数据处理技术包括数据预处理、数据分析和数据可视化等方面。数据预处理主要是对采集到的原始数据进行清理、滤波和校准等操作,以提高数据的准确性和可靠性。数据分析则是对处理后的数据进行统计分析、频谱分析和模态分析等,以揭示试验件的强度特性和失效机理。数据可视化则是将分析结果以图表、曲线等形式呈现出来,便于试验人员直观地了解试验情况。

2.4 失效判据与评估方法

失效判据与评估方法是飞机地面强度试验的关键环节之一,直接关系到试验结果的准确性和可靠性。失效判据是指用于判断试验件是否发生失效的准则或标准,而评估方法则是对试验件的强度特性和失效机理进行评估和分析的方法。失效判据的确定需要根据试验目的和要求进行。常见的失效判据包括塑性变形、断裂、疲劳破坏等。对于不同的试验件和加载条件,需要选择合适的失效判据来评估试验件的强度特性和失效机理。评估方法主要包括应变分析、位移分析、断裂力学分析和有限元分析等。应变分析是通过测量试验件的应变来评估其强度特性和失效机理。位移分析则是通过测量试验件的位移来评估其变形和稳定性。断裂力学分析则是通过分析试验件的裂纹扩展和断裂过程来评估其强度特性和失效机理。有限元分析则是通过建立数学模型和数值仿真来评估试验件的强度特性和失效机理。评估结果的验证与应用是失效判据与评估方法的重要环节之一。通过对评估结果的验证和应用,可以进一步验证试验数据的准确性和可靠性,并为后续的结构优化和改进提供依据。还可以将评估结果应用于飞机的设计和制造过程中,以提高飞机的安全性和可靠性。

3 飞机地面强度试验方法研究

3.1 “积木式”设计验证试验方法

“积木式”设计验证试验方法是一种基于模块化思想的飞机地面强度试验方法。该方法将飞机结构分解为若干个相对独立的模块或组件,通过对这些模块或组件进行单独的强度试验,来验证整个飞机结构的强度性能。“积木式”方法的核心在于模块化设计思想^[3]。通过将飞机结构划分为不同的模块或组件,可以更加灵活地安

排试验计划,降低试验成本,提高试验效率。同时,模块化设计还有助于对飞机结构进行更加深入的分析 and 理解,为后续的优化设计提供有力支持。在“积木式”方法中,通常采用逐级验证策略。即先对较小的模块或组件进行强度试验,验证其强度性能满足设计要求后,再将其组合成更大的模块或组件进行进一步的强度试验。这种逐级验证策略可以确保每个模块或组件的强度性能都达到设计要求,从而提高整个飞机结构的可靠性。

“积木式”方法不仅用于验证飞机结构的强度性能,还可以为优化设计提供有力支持。通过对试验数据的分析和处理,可以发现飞机结构中的薄弱环节和潜在问题,为后续的优化设计提供方向。同时,通过不断迭代和优化设计,可以进一步提高飞机结构的强度性能和可靠性。

3.2 试验加载与测量方法

试验加载与测量方法是飞机地面强度试验中的关键环节。正确的加载方式和准确的测量方法对于确保试验结果的准确性和可靠性至关重要。加载方式的选择应根据飞机结构的实际受力情况和试验目的进行。常见的加载方式包括静力加载、动力加载和疲劳加载等。静力加载主要用于验证飞机结构在静态载荷下的强度性能;动力加载则用于模拟飞机在飞行过程中的动态载荷;疲劳加载则用于评估飞机结构在反复载荷作用下的疲劳寿命。测量方法的优化对于提高试验结果的准确性至关重要。在测量过程中,应选择合适的传感器和测量设备,确保测量数据的准确性和可靠性。还需要对测量数据进行合理的处理和分析,以消除误差和干扰因素,提高测量结果的准确性。加载与测量在飞机地面强度试验中发挥着协同作用,正确的加载方式可以确保试验件在模拟真实受力情况下的变形和应力分布;而准确的测量方法则可以实时监测和记录试验过程中的变形和应力数据,为后续的分析 and 评估提供有力支持。

3.3 试验质量控制与适航管理

试验质量控制与适航管理是确保飞机地面强度试验结果准确性和可靠性的重要保障。通过加强试验质量控

制和适航管理,可以进一步提高试验结果的准确性和可靠性,为飞机的设计和制造提供有力支持^[4]。试验质量控制是确保试验结果准确性的关键环节。在试验过程中,应严格控制试验条件、加载方式和测量方法等因素,确保试验数据的准确性和可靠性。还需要对试验数据进行合理的处理和分析,以消除误差和干扰因素,提高试验结果的准确性。适航管理要求是确保飞机地面强度试验结果符合适航标准的重要保障。在试验过程中,应严格遵守适航管理要求,确保试验数据的准确性和可靠性。还需要对试验结果进行严格的评估和审查,确保其符合适航标准和要求。试验质量控制与适航管理在飞机地面强度试验中发挥着协同作用。通过加强试验质量控制和适航管理,可以进一步提高试验结果的准确性和可靠性,为飞机的设计和制造提供有力支持。还可以为后续的适航审定和飞行安全提供有力保障。

结束语

综上所述,飞机地面强度试验的关键技术与方法研究对于推动飞机设计与制造技术的发展具有重要意义。本文在总结前人研究成果的基础上,提出了一系列创新性的试验技术和方法,旨在提高试验的准确性和可靠性。未来,随着科技的不断进步和适航标准的日益严格,飞机地面强度试验的技术与方法将继续得到完善和发展,为飞机的安全飞行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]孔繁霖,乔兴华,王富强,刘本刚,张峰,张云鹏.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.
- [2]张辛瑞.飞机强度地面试验拉压垫连接强度因素分析[J].科技创新与应用,2020(16):114-115.
- [3]任鹏,杜星.飞机强度试验大曲率弧形曲面结构加载技术及其应用[J].科学技术与工程.2021,(10).DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2021.10.057.
- [4]樊西文,杨凡.飞机强度地面试试验拉压垫连接强度因素分析[J].科学与信息化,2020(13):77.