



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2025

航空发动机薄壁结构振动检测规范

Aero-engine thin-walled structure vibration testing specification

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 检测原理 1

 4.1 基本原理 1

 4.2 激励与响应 2

 4.3 数据采集与分析 2

 4.4 典型方法 2

5 检测要求 2

 5.1 总体要求 2

 5.2 技术要求 2

 5.3 数据完整性要求 2

 5.4 安全要求 2

6 检测设备 2

 6.1 一般要求 3

 6.2 传感器 3

 6.3 激振装置 3

 6.4 数据采集与分析系统 3

 6.5 校准与检定 4

7 检测环境 4

8 检测人员 4

 8.1 资格条件 4

 8.2 岗位职责 4

 8.3 培训要求 5

9 检测步骤 5

 9.1 准备 5

 9.2 传感器布置 5

 9.3 激励与采集 5

 9.4 数据处理 5

 9.5 结果判定 5

 9.6 复位 5

10 检测报告 5

 10.1 报告内容 5

10.2 报告格式	6
10.3 报告审核	6
10.4 报告归档	6

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

航空发动机薄壁结构振动检测规范

1 范围

本文件规定了航空发动机薄壁结构振动检测的检测原理、检测要求、检测步骤、检测人员、检测设备、检测环境及检测报告等内容。

本文件适用于航空发动机叶片、机匣、薄壁隔框、支撑环、导管及其他典型薄壁件在研发、制造、试验与在役维护过程中的振动检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3101 有关量、单位和符号的一般原则

GB/T 4208 外壳防护等级 (IP代码)

GB/T 17626.36 电磁兼容 试验和测量技术 第36部分：设备和系统的有意电磁干扰抗扰度试验方法

JJG 233 压电加速度计检定规程

HB 6106 航空发动机台架试车用振动传出器技术条件

ISO 7626-5 机械振动与冲击—机械导纳实验测定—第5部分：采用未与结构相连的激励器进行冲击激励的测量 (Mechanical vibration and shock—Experimental determination of mechanical mobility—Part 5:Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure)

3 术语和定义

HB 6106界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

薄壁结构 thin-walled structure

相对厚度较小，具有轻量化特征，易发生较强振动响应的结构。

3.2

模态频率 modal frequency

薄壁结构在自由振动时的固有频率。

3.3

激振器 exciter

向结构施加周期性或随机振动输入的装置。

4 检测原理

4.1 基本原理

薄壁结构在运行中易受流固耦合、气动激励及机械耦合等作用，产生复杂振动特性。通过在结构上布置传感器并施加激励，可获取其动力学响应特性，识别固有频率、振型和阻尼，判定振动水平是否满足设计和运行要求。

4.2 激励与响应

4.2.1 激励方式包括冲击激励、正弦扫频激励、随机激励及实际运行工况激励。

4.2.2 响应量可通过加速度、速度、位移及应变传感器获得。

4.3 数据采集与分析

采集的时域信号需经抗混叠滤波与频谱分析处理，得到功率谱密度、模态参数及频率响应函数。

4.4 典型方法

4.4.1 冲击法

利用力锤敲击结构，适用于实验室模态测试。

4.4.2 扫频法

通过电磁或液压激振器施加正弦信号，适用于精确识别模态频率。

4.4.3 运行监测

利用机载传感器实时测量运行工况下的振动响应。

5 检测要求

5.1 总体要求

薄壁结构振动检测的总体要求如下：

- a) 检测应在具备资质的实验室或符合条件的现场环境下进行；
- b) 检测对象应处于设计状态或规定工况下；
- c) 检测过程应全程记录，数据应可追溯；
- d) 检测应避免对结构造成二次损伤。

5.2 技术要求

薄壁结构振动检测的技术要求如下：

- a) 频率测量范围：1Hz~10kHz；
- b) 振动幅值测量精度： $\leq \pm 5\%$ ；
- c) 加速度传感器灵敏度误差： $\leq \pm 3\%$ ；
- d) 数据采集频率：不低于最高测量频率的2.5倍。

5.3 数据完整性要求

数据完整性要求如下：

- a) 检测数据应包括原始时域信号、频域谱图、模态参数及分析结果；
- b) 检测数据应经过多次重复试验验证一致性；
- c) 数据文件应按统一命名规则存储，保留不少于10年；
- d) 数据应经过有效性验证和不确定度评估。

5.4 安全要求

安全要求如下：

- a) 检测过程中应采取隔振、防护和限幅措施，避免结构过载；
- b) 操作人员应严格遵守安全规范，防止设备误操作；
- c) 检测现场应具备紧急断电和防火措施；
- d) 高温、高速运行工况下的检测应采取远程监控方式。

6 检测设备

6.1 一般要求

一般要求如下：

- a) 所有检测设备应符合国家或行业计量检定规程的要求，并在有效检定周期内使用；
- b) 检测设备的精度、量程和动态响应应满足本文件对检测频率范围、幅值测量精度和信噪比的要求；
- c) 检测设备应具备抗干扰能力，能够在发动机试验台或现场运行环境下稳定工作；
- d) 检测设备应建立唯一编号，并形成设备档案，包括出厂证明、检定记录、维护记录和使用记录。

6.2 传感器

6.2.1 加速度传感器

加速度传感器应符合以下要求：

- a) 应优先选用符合JJG 233要求的压电式加速度传感器，量程 $\geq \pm 500g$ ，频率响应范围1Hz~10kHz；
- b) 灵敏度误差 $\leq \pm 3\%$ ，横向灵敏度小于主灵敏度的5%；
- c) 传感器应具备良好的抗电磁干扰性能和高温适应能力，必要时应选用高温型传感器（可耐温 $\geq 200^\circ\text{C}$ ）。

6.2.2 速度与位移传感器

速度与位移传感器应符合以下要求：

- a) 频率范围：0.5Hz~1kHz；
- b) 非接触式位移传感器适用于高精度测量薄壁件的动态位移；
- c) 位移测量分辨率应 $\leq 1\mu\text{m}$ 。

6.2.3 应变传感器

应变传感器应符合以下要求：

- a) 测量局部应力振动时，应使用应变片或光纤光栅传感器；
- b) 应变片粘贴位置应经过有限元分析或经验选点，确保覆盖高应变区域；
- c) 应变测试精度应 $\leq \pm 5\mu\varepsilon$ 。

6.2.4 传感器安装附件

传感器安装附件应符合以下要求：

- a) 传感器应配备合适的安装基座、粘接剂或螺纹固定件；
- b) 对于临时检测，可使用高强度胶或磁吸固定，但应确保共振频率不低于检测频率上限的2倍。

6.3 激振装置

6.3.1 冲击力锤

冲击力锤应符合以下要求：

- a) 冲击力锤应内置力传感器，用于同步测量激励输入；
- b) 力锤应配备多种硬度的冲击头，以适应不同频率范围；
- c) 冲击力测量精度应 $\leq \pm 5\%$ 。

6.3.2 电磁激振器

电磁激振器应符合以下要求：

- a) 应具备0Hz~2kHz的频率范围，激振力可调范围不低于0~500N；
- b) 激振器应配备刚性推杆或拉杆，并带有力传感器监测输出；
- c) 应配置冷却装置，保证长时间稳定运行。

6.3.4 液压或伺服激振器

液压或伺服激振器应符合以下要求：

- a) 推力输出 $\geq 10\text{kN}$ ，频率范围0.5Hz~200Hz；
- b) 应具备闭环控制功能，可实现恒力或恒位移控制。

6.4 数据采集与分析系统

6.4.1 硬件要求

硬件要求如下：

- a) 通道数：不少于16通道，并支持同步采集；
- b) 动态范围：≥90dB；
- c) 分辨率：≥24bit；
- d) 采样率：≥25.6kHz/通道；
- e) 应具备抗混叠滤波功能和信号放大功能。

6.4.2 软件要求

软件要求如下：

- a) 应具备实时显示时域波形、频谱、功率谱密度的功能；
- b) 应支持模态分析，包括频率响应函数、相干函数、阻尼比计算和振型显示；
- c) 应支持数据后处理与导出，兼容常见数据格式（CSV、MAT、HDF5）；
- d) 应提供数据完整性保护和电子签名功能，确保检测结果可追溯。

6.5 校准与检定

检测设备应按国家计量检定规程校准，保证量值溯源性。

7 检测环境

检测环境应符合表1的要求。

表1 检测环境要求

序号	环境要素	实验室检测要求	现场检测要求
1	温度	20±5℃，短时波动不超过±2℃	- 40℃～+55℃，保证设备稳定运行
2	相对湿度	40%～70%，无凝露或静电	0%～95%，无凝露
3	背景振动	≤0.001g RMS	≤0.01g RMS
4	声学噪声	≤65dB(A)	≤110dB(A)，作业人员应佩戴防护耳罩
5	电磁干扰	符合GB/T 17626.36的要求	避免高强射频源
6	气流	无强气流影响	对传感器布设使用防护罩或导流罩
7	清洁度	无油雾、粉尘	设备防护等级不低于GB/T 4208中IP65的要求
8	安全防护	设置安全隔离和防护设施	设置安全隔离区，作业人员佩戴防护服、防护耳罩、防护眼镜和耐热手套

8 检测人员

8.1 资格条件

8.1.1 检测工程师

本科及以上学历，航空、机械、振动或相关专业，具有至少3年以上航空发动机振动检测或模态分析经验，能熟练使用振动信号采集与分析软件。

8.1.2 检测操作员

中专及以上学历，机械或自动化相关专业优先，熟悉检测设备及传感器安装方法，能按照工程师指导独立完成设备布设与数据采集。

8.1.3 数据分析员

本科及以上学历，航空、机械、测控或信号处理相关专业，熟悉模态分析原理及振动信号处理算法，能独立完成振动数据处理、分析及异常数据复核。

8.1.4 安全监督员

熟悉实验室和现场安全管理规程，能识别高温、高噪声、高速旋转部件等风险，能熟练执行应急处理流程和人员疏散计划。

8.2 岗位职责

不同岗位职责见表2。

表2 岗位职责

岗位	主要职责
检测工程师	制定检测方案、选择检测方法和设备；指导检测实施；分析数据并审核检测报告；对检测结果的科学性和准确性负责
检测操作员	负责设备安装、传感器布设及数据采集操作；协助工程师执行检测任务；保证检测过程按操作规程进行
数据分析员	对采集的振动信号进行处理、分析模态参数、生成频谱及振型图；对异常数据进行复核与标注
安全监督员	负责检测现场安全管理，包括人员防护、隔离区管理、应急处理和安全巡检；确保检测操作符合安全规范

8.3 培训要求

- 8.3.1 所有检测人员应接受本标准规定的培训，包括：振动检测原理、检测方法、设备使用、数据处理及安全防护。
- 8.3.2 培训应包括理论培训与实操培训，并通过考核后方可上岗。
- 8.3.3 检测单位应建立培训档案，记录培训内容、考核结果和人员资格状态。
- 8.3.4 检测人员应每年至少进行一次复训和考核，以保证技术水平和安全意识持续符合标准要求。

9 检测步骤

9.1 准备

- 检测前应进行以下准备：
- a) 明确检测对象与目的；
 - b) 检查设备状态与校准记录；
 - c) 制定传感器布置方案。

9.2 传感器布置

传感器应固定牢靠，避免松动；布置位置应覆盖主要振动模态区域。

9.3 激励与采集

根据试验目的选择冲击或扫频激励，采集信号应覆盖目标频率范围。

9.4 数据处理

按照ISO 7626-5规定的方法进行。

9.5 结果判定

将检测结果与设计值或允许范围对比，若超限应判为异常；对异常结果进行复测或采用备用传感器确认；生成检测结论并归档，为后续结构优化或安全评估提供依据。

9.6 复位

检测完成后，应拆除传感器并恢复结构原貌。

10 检测报告

10.1 报告内容

- 10.1.1 检测目的与范围
明确检测的目标、任务及适用范围。
- 10.1.2 检测对象及工况
包括被测航空发动机薄壁结构型号、部件编号、安装状态及工况条件。
- 10.1.3 检测方法与设备

描述所采用的检测方法、激励方式、传感器类型及布设方案、数据采集系统及校准情况。

10.1.4 传感器布置图

提供关键测点布设示意图或结构图，标注编号和坐标。

10.1.5 数据与分析结果

包含时域信号、频域信号、功率谱密度、频率响应函数及振型图；说明数据处理方法及模态参数识别结果。

10.1.6 结论与建议

对薄壁结构振动特性是否满足设计和安全要求提出结论；对异常振动点提供分析及处理建议；提出对后续装配、运行或结构优化的参考意见。

10.2 报告格式

10.2.1 模板要求

报告应采用统一模板，包含封面、目录、正文、图表、附录及签字页。

10.2.2 图表要求

图表应清晰标注测点编号、单位、坐标及时间。

10.2.3 数据单位

所有数据单位应符合GB/T 3101的要求。

10.2.4 版本与日期

报告应标明检测版本号和编制日期。

10.3 报告审核

10.3.1 编制与审核

检测报告应由检测工程师编制，并由单位负责人审核。

10.3.2 安全确认

安全监督员需确认现场检测过程符合安全要求。

10.3.3 数据复核

对关键数据和分析结果，应由第二人复核，以保证准确性和可靠性。

10.4 报告归档

10.4.1 存档要求

检测报告及原始数据应完整存档，保存期限不少于规定年限。

10.4.2 存储方式

电子数据和纸质报告应双重存储，保证数据完整性和可追溯性。

10.4.3 报告用途

检测报告可作为后续维护、改进或事故分析的重要依据。