

# 紧固件防松性能检测方法及标准研究

丁玲 赵准 万蕾

北京卫星制造厂有限公司 北京 100090

**摘要:** 随着工业发展对安全要求提升,引言:紧固件作为机械连接关键部件,其防松性能直接关乎设备运行稳定性与安全性。本文系统梳理了紧固件防松性能检测方法,涵盖横向振动试验、加速冲击振动试验、扭矩测量、划线与松转角度测量、超声波轴向预紧力仪及压力传感器测量等技术,并深入分析了国内外检测标准,包括国标(GB)、国际标准(ISO)、汽车行业及航空航天领域专用标准。研究旨在为紧固件防松性能评估提供科学依据,推动防松技术标准化发展,提升工业装备的安全性与经济性。

**关键词:** 紧固件防松性能;检测方法;标准研究

引言:紧固件通过螺纹连接实现机械部件的可靠固定,但在振动、冲击及温度变化等工况下易发生松动,导致设备故障甚至灾难性事故。据统计,一台中型飞机需使用300万个紧固件,而汽车发动机紧固件数量超过200个,其防松性能直接关乎航空航天安全与汽车行驶稳定性。现有防松技术包括摩擦防松、机械防松及破坏螺纹副关系防松,但不同方法的防松效果差异显著。因此,建立科学、统一的防松性能检测方法与标准体系,对保障设备安全运行、提高可靠性及降低全生命周期维护成本具有重要现实意义。

## 1 紧固件防松性能的重要性

### 1.1 保障设备安全运行

紧固件作为机械结构的核心连接元件,其防松性能直接决定设备在复杂工况下的安全稳定运行。在振动、冲击或交变载荷作用下,若紧固件发生松动,可能导致连接界面应力分布失衡,引发局部过载或结构失稳。例如,在高压容器或核电设备中,螺栓松动可能破坏密封性,造成介质泄漏甚至爆炸风险;在桥梁或建筑钢结构中,连接节点松动会削弱整体承载能力,威胁结构安全。

### 1.2 提高设备可靠性

紧固件防松性能的优化是提升设备可靠性的关键环节。松动会导致接触面摩擦系数降低,加剧微动磨损和疲劳裂纹扩展,缩短部件使用寿命。例如,在高速旋转机械中,螺栓松动可能引发转子不平衡,导致振动超标和轴承早期失效;在精密仪器中,连接松动会破坏光学或电子元件的定位精度,影响设备功能稳定性。

### 1.3 降低维护成本

紧固件松动是设备维护中的高频问题,其引发的故障占工业维修总量的显著比例。松动会导致频繁的停机检修、备件更换和人工投入,增加全生命周期成本。例

如,在风电领域,塔筒连接螺栓松动需定期登机检查,耗费大量时间和资源;在轨道交通中,转向架紧固件失效可能触发整车召回,造成巨大经济损失。通过强化防松性能检测与质量控制,可延长维护周期,减少非计划停机,降低备件消耗和维修人力成本<sup>[1]</sup>。

## 2 紧固件防松性能检测方法

### 2.1 横向振动试验法

横向振动试验法是评估紧固件防松性能的核心动态检测方法,通过模拟实际工况中的横向交变载荷,量化分析连接副的松动趋势。试验中,紧固件连接试样被固定在振动台面上,施加特定频率(通常为10-12Hz)和振幅( $\pm 1.5\text{mm}$ 左右)的横向振动,同时监测其预紧力的衰减过程。该方法的核心原理在于:振动导致螺纹接触面产生微动磨损,破坏摩擦防松机制,进而引发预紧力逐步丧失。检测过程中,通过高精度传感器实时记录预紧力变化曲线,结合松动次数或预紧力衰减率(如降至初始值的50%时所需振动次数)作为防松性能评价指标。横向振动试验法的优势在于能真实反映紧固件在动态载荷下的抗松能力,且试验条件可控、重复性强。其局限性在于设备成本较高,试验周期较长,且主要针对中小尺寸紧固件。该方法广泛应用于汽车、航空航天及轨道交通等领域,成为国际标准(如ISO16130、DIN65151)及企业规范中推荐的防松性能验证手段,为紧固件选型和工艺优化提供关键数据支撑。

### 2.2 加速冲击振动试验法

加速冲击振动试验法是一种通过高频、短时冲击载荷模拟极端工况下紧固件防松性能的动力学检测方法。该方法利用冲击试验台对紧固件连接试样施加瞬态高能量振动,模拟设备在启动、制动、碰撞或突发冲击时的受力状态。试验中,试样在固定频率(通常为50-200Hz)

和峰值加速度（可达50g以上）的冲击作用下，螺纹副接触面因快速交变应力产生微动磨损与塑性变形，导致预紧力迅速衰减。通过高精度传感器实时监测预紧力变化，并记录松动次数、预紧力衰减率或连接失效时间等关键指标，量化评估防松性能。该方法的优势在于能高效模拟实际工况中的极端冲击环境，缩短试验周期，同时揭示紧固件在瞬态载荷下的失效机制。其局限性在于设备成本较高，且对试样尺寸和冲击能量范围有一定限制。加速冲击振动试验法广泛应用于航空航天、轨道交通及重型机械领域，尤其适用于验证高可靠性要求场景下紧固件的抗冲击防松能力，为产品设计和质量管控提供重要依据。

### 2.3 扭矩测量法

扭矩测量法是通过量化紧固件在装配或服役过程中的扭矩变化，间接评估其防松性能的一种静态与动态结合的检测方法。该方法基于螺纹连接中扭矩与预紧力的线性关系，利用高精度扭矩扳手或传感器，在紧固件拧紧阶段记录初始扭矩值，并在后续使用或模拟工况中定期复测扭矩衰减情况。其核心原理在于：当螺纹副发生松动时，接触面摩擦系数降低或螺纹几何变形，导致维持相同预紧力所需的扭矩减小，通过扭矩衰减率（如扭矩损失超过初始值的20%）可判断防松性能是否达标。扭矩测量法的优势在于操作简便、成本低廉，且适用于现场快速检测，广泛应用于汽车、机械制造等行业的装配线质量抽检。然而，其局限性在于无法直接反映预紧力实际变化，且受螺纹表面状态、润滑条件等因素干扰较大。为提升精度，常结合扭矩-转角法或超声波预紧力测量进行校准。

### 2.4 划线与松转角度测量法

划线与松转角度测量法是一种通过直观标记和角度量化来评估紧固件防松性能的简易检测方法。该方法在紧固件装配完成后，于螺母或螺栓头部与被连接件表面划定基准线，形成初始位置标记。服役或试验过程中，定期观察标记线的相对偏移情况，并使用量角器或电子角度仪测量螺母/螺栓的松动旋转角度。其原理基于螺纹副松动时，螺母或螺栓因预紧力丧失而发生微小旋转，导致标记线错位，旋转角度的大小直接反映连接松动的程度。该方法操作简单、成本低廉，无需复杂设备，适用于现场快速检测和长期服役监测。其优势在于能直观显示松动趋势，尤其适用于空间受限或无法安装传感器的场景。然而，该方法依赖人工观察，精度受标记清晰度、测量工具分辨率限制，且无法量化预紧力实际变化。通常结合扭矩复测或振动试验进行综合验证，广泛

应用于汽车、建筑及普通机械领域，作为防松性能的辅助评估手段，为维护决策提供可视化依据<sup>[2]</sup>。

### 2.5 超声波轴向预紧力仪测量

超声波轴向预紧力仪测量是一种基于声弹性效应的高精度无损检测方法，通过分析超声波在紧固件中的传播特性来间接测定轴向预紧力。其原理在于：当螺栓受到轴向拉力时，材料内部晶格发生弹性变形，导致超声波传播速度（纵波或横波）与应力状态呈线性相关。测量时，将压电换能器耦合至螺栓头部或末端，发射特定频率的超声波并接收反射信号，通过计算声速变化量，结合预先标定的应力-声速曲线，即可精确推算当前预紧力值。该方法具有非破坏性、实时监测和高灵敏度的优势，可检测微小预紧力变化（误差通常小于±3%），适用于服役状态下的在线监测。其局限性在于设备成本较高，且需针对不同材料和规格的螺栓进行单独标定。超声波测量法广泛应用于航空航天、核电及高铁等对安全要求极高的领域，尤其适用于隐蔽部位或高温环境下的紧固件预紧力长期跟踪，为结构健康管理提供关键数据支撑。

### 2.6 压力传感器测量

压力传感器测量法是一种通过直接监测紧固件轴向压力变化来评估防松性能的动力检测技术。该方法在螺栓或螺母与被连接件之间嵌入高精度压力传感器（如应变片式或压电式传感器），实时采集连接界面承受的轴向力。当紧固件因振动、冲击或疲劳发生松动时，传感器检测到的压力值会随之衰减，通过分析压力变化曲线（如衰减率、波动范围）或设定阈值报警，可量化判断防松性能。其优势在于数据精准、响应速度快，能够直接反映预紧力的实际损失，且适用于长期在线监测。传感器可集成于智能螺栓中，实现无线数据传输与远程监控。然而，该方法需对连接结构进行改造以嵌入传感器，成本较高，且对安装环境（如温度、电磁干扰）敏感。压力传感器测量法广泛应用于航空航天、能源装备及高端制造领域，尤其适用于对安全性和可靠性要求严苛的关键连接部位，为预防性维护和结构健康管理提供实时数据支持。

## 3 紧固件防松性能检测标准研究

### 3.1 国标（GB）

中国国家标准（GB）在紧固件防松性能检测领域建立了完善的规范体系，其中核心标准为GB/T10431《紧固件横向振动试验方法》。该标准通过模拟横向振动工况，评估紧固件在动态载荷下的防松性能，适用于螺纹公称直径3-24mm的螺栓、螺母及防松元件。试验中，紧固件在振动试验机上承受正弦波横向位移（频率10-

50Hz, 振幅 $\pm 0.1-2\text{mm}$ ), 连续记录预紧力衰减曲线, 以预紧力衰减率作为防松性能分级依据。例如, 某航空紧固件企业依据GB/T10431对变牙型防松螺母进行测试, 结果显示其残余预紧力保持率达85%以上, 验证了该标准在高端装备领域的适用性。此外, GB/T3098系列标准从机械性能角度规范了紧固件抗拉强度、屈服强度等指标, 与防松性能检测形成互补, 共同构建起覆盖材料、设计、试验全流程的国标体系<sup>[3]</sup>。

### 3.2 国际标准 (ISO)

国际标准化组织 (ISO) 制定的紧固件防松性能检测标准以ISO16130:2015为核心, 该标准针对航空航天、汽车等高可靠性领域, 规范了横向振动工况下螺栓连接的动态测试方法。标准明确要求试验频率为5-200Hz、振幅 $\pm 0.1-2\text{mm}$ , 通过模拟实际工况中的横向剪切力, 量化评估紧固件在动态载荷下的预紧力保持能力。其核心评价指标为预紧力衰减率, 例如将预紧力衰减不小于85%的连接定义为“良好”, 小于40%则判定为“差”, 为产品性能分级提供了明确依据。试验流程涵盖样品安装、初始预紧力施加、振动测试及数据采集等环节, 强调试验条件的可控性与结果的可重复性。ISO16130不仅为全球紧固件行业提供了统一的测试基准, 还支持跨企业、跨国家的质量比对, 尤其适用于飞行器结构连接等对安全性要求严苛的场景。

### 3.3 汽车行业标准

汽车行业对紧固件防松性能的检测标准极为严苛, 核心驱动力是保障车辆整体结构安全与可靠性。其标准体系以国际标准为基础, 结合汽车行业特殊工况制定, 典型标准包括QC/T326-2025《汽车标准件产品编号规则》、QC/T266-2025《汽车零件公差技术规范》等, 覆盖从设计到检测的全流程。检测项目涵盖力学性能 (如10.9级螺栓抗拉强度 $\geq 1000\text{MPa}$ )、振动试验 (模拟路况振动, 测试抗松动能力)、表面处理 (镀锌层厚度8-12 $\mu\text{m}$ , 盐雾试验500小时无红锈) 及缺陷检测 (几何尺寸微米级管控, 螺纹精度达6g/6H公差带)。此外, 标准

还规定了全生命周期数据管理, 检测报告需包含扭矩系数、抗滑移系数等参数, 支持质量溯源。

### 3.4 航空航天标准

航空航天领域对紧固件防松性能的要求极为严苛, 其标准体系以NAS (美国国家航空航天标准) 和EN (欧洲航空标准) 为核心, 典型如NAS1312《航空用螺栓、螺母防松性能试验方法》及EN2485《航空航天紧固件振动试验规范》。这些标准聚焦于极端工况模拟, 要求试验频率覆盖5-200Hz、振幅 $\pm 0.1-2\text{mm}$ , 以复现飞行器在起飞、巡航及着陆阶段承受的动态载荷。检测重点包括预紧力衰减率、松动旋转角度及疲劳寿命, 例如NAS1312规定, 经10<sup>6</sup>次振动循环后, 预紧力衰减不得超过初始值的15%。同时, 标准对材料性能提出更高要求, 如钛合金螺栓需在-55 $^{\circ}\text{C}$ 至150 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内保持性能稳定<sup>[4]</sup>。

### 结束语

紧固件防松性能检测方法及标准的研究, 是保障机械结构安全与可靠性的重要基石。从扭矩测量、划线法到超声波预紧力仪等检测技术, 再到GB、ISO、汽车及航空航天等领域的标准化规范, 形成了覆盖全生命周期的质量控制体系。未来, 随着智能传感、大数据分析等技术的发展, 检测方法将向高精度、实时化、智能化方向演进, 而标准体系也需持续完善以适应新材料、新工况的挑战。唯有通过技术创新与标准升级的协同推进, 才能为高端装备制造提供更坚实的防松性能保障, 推动行业迈向更高安全水平。

### 参考文献

- [1] 戚欣, 张宏武. 紧固力矩与夹紧力对不锈钢紧固件横向振动试验的影响[J]. 电气化铁道, 2022, 29(3): 42-43
- [2] 杨智清, 唐俊, 程海峰, 陈湖. 汽车用接地紧固件的研究与应用[J]. 汽车电器, 2024(7): 54-56.
- [3] 张挺, 姜招喜, 冯梅, 陈琦峰, 孙国峰. 紧固件抗振防松性能比较[J]. 金属制品, 2022, 38(1): 78-80.
- [4] 景秀并, 潘凤章, 沈兆光. 紧固件横向振动试验台的研制[J]. 机械设计, 2025, 22(6): 59-61.