

的基质干扰，现有计量检定技术难以精准校准仪器，导致检测数据偏差较大^[3]。

3.3 协同机制不完善，数据共享与联动不足

计量检定技术在食品安全风险防控中的应用需要计量技术机构、食品安全监管部门、食品生产企业等多方主体的协同配合，但目前各方之间的协同机制不完善，存在数据共享与联动不足的问题。

一是计量检定数据与食品安全检测数据割裂，计量技术机构的检定结果未及时同步至食品安全监管平台，监管部门无法根据仪器计量状态判断检测数据的可靠性，影响风险研判的科学性；二是企业与计量技术机构的联动不足，部分食品生产企业对计量检定的重要性认识不足，未建立定期检定制度，计量技术机构也缺乏对企业的精准技术指导，导致企业检测仪器的计量性能无法得到持续保障。

3.4 法规标准不健全，监管与检定衔接不畅

计量检定技术的应用需要完善的法规标准体系作为支撑，但目前我国食品安全领域的计量法规标准仍存在不健全的问题，导致监管与检定衔接不畅。

一是部分食品检测仪器的检定规程更新不及时，现有规程无法覆盖新型仪器的计量特性，例如针对 ICP-MS 的检定规程未充分考虑其多元素同时检测的性能指标，导致检定结果无法全面反映仪器状态；二是计量标准与食品安全标准衔接不足，部分食品安全标准中规定的检测指标缺乏对应的计量标准物质，导致检测结果无法溯源至国家基准，影响数据的权威性。

4 计量检定技术在食品安全风险防控中的优化路径

4.1 强化基层能力建设，扩大检定覆盖范围

针对基层计量检定能力薄弱的问题，需从设备投入、人才培养和服务延伸三个方面进行优化。一是加大基层计量检定设备投入，通过财政专项补贴、设备共享等方式，为县级检测机构配备必要的标准器具和检定设备，支持基层机构开展常规检测仪器的自主检定，缩短检定周期；二是加强计量检定专业人才培养，建立“校企合作”“师徒传承”的人才培养模式，定期组织基层人员参加计量专业培训和技能竞赛，提升其对精密仪器的检定能力，同时引进高素质计量专业人才，优化人才队伍结构。

4.2 推动技术融合创新，适应新型风险需求

为应对新型食品安全风险的检测需求，需推动计量检定技术与新兴技术的融合创新，提升技术支撑能力。一是加强新型检测仪器的检定技术研发，针对生物传感器、量子点检测仪器等新型设备，制定统一的检定规程，研发配套的标

准物质，建立完善的计量溯源体系；二是突破复杂基质食品的检定技术瓶颈，结合色谱-质谱联用、核磁共振等先进技术，开发基质干扰校准方法，提高复杂食品检测中仪器的计量精度^[4]。

4.3 构建多元协同体系，促进数据共享联动

建立计量技术机构、监管部门、企业等多方协同的工作体系，实现数据共享与联动。一是搭建统一的计量检定与食品安全监管数据平台，将计量检定结果、仪器使用状态、食品安全检测数据等信息整合至平台，实现数据实时共享，监管部门可通过平台精准掌握检测仪器的计量状态，提升风险研判的科学性；二是建立企业与计量技术机构的常态化联动机制，计量技术机构为企业提供定制化的检定服务和技术指导，帮助企业建立完善的仪器定期检定制度，同时企业及时反馈仪器使用中的问题，为计量检定技术创新提供需求导向。

4.4 健全法规标准体系，强化监管与检定衔接

完善计量法规标准体系，加强监管与检定的衔接，为计量检定技术的应用提供制度保障。一是加快计量检定规程的更新完善，针对新型检测仪器和检测需求，及时修订和制定检定规程，确保规程的科学性和适用性，例如修订 ICP-MS、LC-MS/MS 等仪器的检定规程，增加多元素检测、高灵敏度等性能指标；二是加强计量标准与食品安全标准的衔接，围绕食品安全标准中的检测指标，研发配套的标准物质，建立从国家基准到检测仪器的完整量值溯源链条，保障检测数据的权威性。

5 结论

为提升食品安全风险防控的科学性和精准性，需通过强化基层能力建设、推动技术融合创新、构建多元协同体系、健全法规标准体系等优化路径，全面提升计量检定技术的应用水平。未来，随着计量检定技术与新兴技术的深度融合，以及多方协同机制的不断完善，计量检定技术将在食品安全风险防控中发挥更加重要的作用，为保障公众饮食安全、促进食品产业高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 黄汀汀. 计量检定在食品质量控制中的应用与挑战[J]. 食品安全导刊, 2024, (32): 41-43.
- [2] 杨涛. 计量检定在食品检验中的应用研究[J]. 中外食品工业, 2024, (21): 99-101.
- [3] 唐小花. 食品检验中计量检定存在的问题及对策[J]. 食品安全导刊, 2024, (31): 176-178.
- [4] 李可皓. 浅析提高食品检测实验室计量器具检定校准工作质量的有效措施[J]. 中外食品工业, 2024, (10): 90-92.

Research on High Acceleration Shock Technology Based on Sine Wave Method with Damping Ratio

Jun Wu Jia Wu

Shanghai Hanhai Testing Technology Co., Ltd., Shanghai, 200433, China

Abstract

High acceleration shock technology holds a core position in reliability testing in fields such as aerospace and weapons equipment, where the accurate reproduction of shock loads directly determines the validity of test results. To address the shortcomings of traditional shock test methods in terms of controllability of load waveforms and matching degree of damping characteristics, this paper proposes applying the damped sine wave method to the research of high acceleration shock technology. Firstly, the mechanical characteristics of the damped sine wave and its adaptability to high acceleration shock loads are analyzed, and an impact load mathematical model incorporating damping parameters is constructed. Secondly, an impact load generation strategy based on this method is designed, and through dynamic simulation analysis, the influence rules of key parameters such as damping ratio and frequency on shock response are studied. Finally, an experimental system is built to verify the feasibility of the method. The research shows that the damped sine wave method can effectively regulate the peak value, pulse width, and attenuation characteristics of shock loads, improve the accuracy of high acceleration shock testing, and provide a new path for shock reliability testing under complex conditions.

Keywords

Damped Sine Wave; High Acceleration Shock; Load Regulation; Reliability Testing; Dynamic Simulation

基于带阻尼比正弦波法的高加速冲击技术研究

吴军 吴佳

上海瀚海检测技术股份有限公司，中国·上海 200433

摘要

高加速冲击技术在航空航天、兵器装备等领域的可靠性测试中占据核心地位，其冲击载荷的精准复现直接决定测试结果的有效性。针对传统冲击试验方法在载荷波形可控性、阻尼特性匹配度等方面不足，本文提出将带阻尼比正弦波法应用于高加速冲击技术研究。首先剖析带阻尼比正弦波的力学特性及与高加速冲击载荷的适配性，构建包含阻尼参数的冲击载荷数学模型；其次设计基于该方法的冲击载荷生成策略，通过动力学仿真分析阻尼比、频率等关键参数对冲击响应的影响规律；最后搭建试验系统验证方法的可行性。研究表明，带阻尼比正弦波法可有效调控冲击载荷的峰值、脉宽及衰减特性，提升高加速冲击测试的精准度，为复杂工况下的冲击可靠性测试提供新路径。

关键词

带阻尼比正弦波；高加速冲击；载荷调控；可靠性测试；动力学仿真

1 引言

高加速冲击作为产品在运输、作战及应急工况下常见的力学激励形式，其对产品结构强度、元器件稳定性的影响直接关系到装备整体可靠性。当前高加速冲击测试主要采用半正弦、梯形等标准波形，但实际工况中的冲击载荷往往伴随明显阻尼衰减特性，标准波形与实际载荷的适配偏差导致测试结果存在失真风险。

带阻尼比正弦波因能精准描述阻尼作用下的振动衰减

过程，在振动控制领域已得到广泛应用，但其在高加速冲击载荷复现中的应用研究仍处于起步阶段。传统冲击试验技术存在载荷峰值调控精度低、阻尼特性难以匹配等问题，无法满足航空航天等高端装备对冲击测试的精细化需求。基于此，本文聚焦带阻尼比正弦波法与高加速冲击技术的融合，深入研究载荷模型构建、参数调控及试验实现等关键问题，旨在提升高加速冲击测试的真实性与精准度，为装备可靠性设计提供理论与技术支撑。

2 带阻尼比正弦波的力学特性及适配性分析

2.1 带阻尼比正弦波的数学表征与力学本质

带阻尼比正弦波是阻尼振动系统的典型响应形式，其数学模型可通过二阶线性微分方程推导得出。在无外力作

【作者简介】吴军（1988—），男，中国安徽黄山人，本科，从事基于带阻尼比正弦波法的高加速冲击技术研究。

用的自由阻尼振动系统中，其运动方程为 $m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=0$ ，其中 m 为质量， c 为阻尼系数， k 为刚度系数。通过求解该方程可得系统响应为带阻尼比正弦函数，其表达式为： $x(t)=A_0e^{(-\zeta\omega_n t)}\sin(\omega_d t+\phi)$ ，其中 $\zeta=c/(2\sqrt{(mk)})$ 为阻尼比， $\omega_n=\sqrt{(k/m)}$ 为固有角频率， $\omega_d=\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}$ 为阻尼振动角频率， A_0 为初始振幅， ϕ 为初相位。从力学本质来看，带阻尼比正弦波体现了振动能量的衰减过程，阻尼比 ζ 作为核心参数，直接决定能量衰减速率：当 $\zeta \in (0, 1)$ 时，系统处于欠阻尼状态，振动呈现周期性衰减，这与高加速冲击过程中载荷的衰减特性高度契合；当 $\zeta=1$ 时为临界阻尼， $\zeta>1$ 时为过阻尼，二者均无明显周期性，不适用于冲击载荷复现。高加速冲击的核心特征是短时间内出现载荷峰值并伴随快速衰减，欠阻尼状态下的带阻尼比正弦波可通过调控 ζ 和 ω_n ，精准匹配冲击载荷的峰值出现时间与衰减速率，这是其区别于标准正弦波的关键优势。

2.2 与高加速冲击载荷的适配性分析

实际高加速冲击工况（如炮弹发射、航天器着陆）中，载荷波形受介质阻尼、结构变形等因素影响，呈现“峰值骤升—快速衰减”的典型特征，其本质是一种非稳态阻尼振动过程。通过对典型实际冲击载荷的波形分解发现，其主振动成分可近似为带阻尼比正弦波，且阻尼比通常处于 0.05-0.3 的欠阻尼区间，这为带阻尼比正弦波法的应用提供了理论依据。对比传统半正弦波与带阻尼比正弦波的适配性可知：半正弦波无阻尼特性，载荷衰减阶段为线性下降，与实际冲击载荷的指数衰减规律偏差较大，尤其在冲击后期的载荷幅值误差可达 20% 以上；而带阻尼比正弦波可通过调整阻尼比匹配实际载荷的衰减特性，通过调整固有角频率匹配载荷的峰值出现时间。以航天器着陆冲击为例，实际载荷峰值出现时间约 5ms，衰减阶段持续约 20ms，采用阻尼比 0.15、固有角频率 1200rad/s 的带阻尼比正弦波，其波形与实际载荷的相似度可达 92%，远高于半正弦波的 75%。这种高适配性使得带阻尼比正弦波法在高加速冲击测试中具备显著应用潜力。

3 基于带阻尼比正弦波的高加速冲击载荷建模与调控

3.1 冲击载荷数学模型构建

高加速冲击测试的核心需求是通过试验台生成与实际工况一致的冲击载荷，因此需要构建带阻尼比正弦波冲击载荷的数学模型。考虑到试验台为受迫振动系统，需引入激励函数修正自由振动模型，构建受迫阻尼振动载荷模型。试验台通过液压伺服系统提供正弦激励，其载荷模型为： $F(t)=F_0e^{(-\zeta\omega_n t)}\sin(\omega_d t+\phi)+F_1\sin(\omega_1 t)$ ，其中 F_0 为冲击载荷峰值， $F_1\sin(\omega_1 t)$ 为伺服系统激励项， ω_1 为激励角频率。模型参数确定需结合实际测试需求：载荷峰值 F_0 根据测试标准确定，如航空装备通常要求 1000-5000g；阻尼

比 ζ 通过实际载荷波形反演得到，采用最小二乘法拟合实际载荷与带阻尼比正弦波的偏差，当偏差最小时确定 ζ 值；固有角频率 ω_n 由试验台刚度和试件质量决定，根据 $\omega_n=\sqrt{(k/m)}$ 计算，其中 k 为试验台刚度，可通过静态加载试验测量；激励角频率 ω_1 需与 ω_n 匹配，通常取 $\omega_1 \approx \omega_n$ 以实现共振放大，降低伺服系统功率需求。该模型既保留了带阻尼比正弦波的衰减特性，又考虑了试验台的激励特性，为载荷生成提供精准的理论依据。

3.2 关键参数对冲击响应的影响规律

为实现冲击载荷的精准调控，需明确阻尼比、固有角频率等关键参数对冲击响应的影响规律。采用动力学仿真软件建立试验台—试件系统模型，试件选取典型航空铝合金构件，质量 5kg，刚度 $2 \times 10^6 \text{ N/m}$ ，试验台采用液压伺服冲击试验台，刚度 $5 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。参数取值，分析试件加速度响应特性。阻尼比 ζ 对响应的影响：当 ζ 由 0.05 升到 0.3 时，试件峰值加速度由 5200g 降至 4800g，下降幅度约 7.7%，但是响应衰减速度明显加快，峰值后 10ms 的加速度幅值由 2000g 降至 800g，下降幅度 60%。这说明阻尼比对冲击响应的衰减特性起主要作用，对峰值影响不大，所以可以通过调整 ζ 来对实际载荷的衰减过程进行精确的匹配。2 固有角频率 ω_n 的影响当 ω_n 从 1000rad/s 增大到 1400rad/s 时，峰值加速度出现时间从 6.2ms 提前到 4.5ms，峰值加速度从 4700g 增大到 5300g，增幅 12.8%。这是因为 ω_n 增大，使系统固有频率增大，振动周期变短，峰值出现时间提前，同时共振效应增大，峰值变大。因此可按 ω_n 调整实际载荷的峰值出现时间和峰值幅值。激励角频率 ω_1 对响应的影响存在一个最优区间：当 ω_1 在 $0.9\omega_n-1.1\omega_n$ 的区间时，系统产生共振，在较低的激励功率下可以达到目标载荷峰值；当 ω_1 偏离这个区间时，就需要增大激励功率才能达到目标峰值，而且响应波形畸变率增大。因此实际应用中需将 ω_1 控制在最优区间内，以达到节能与波形准确的平衡。

3.3 载荷调控策略设计

基于参数影响规律，设计“峰值—衰减—时序”三段式调控策略，实现冲击载荷的精准生成。第一段为峰值调控：根据测试目标确定载荷峰值 F_0 ，通过调整激励幅值 F_1 和固有角频率 ω_n ，使系统响应达到目标峰值，若峰值不足则增大 F_1 ，若峰值超标则降低 ω_n ；第二段为衰减调控：通过反演实际载荷的衰减曲线确定目标阻尼比 ζ ，采用 PID 控制算法调整试验台的阻尼器参数，实时监测响应波形的衰减速率，通过修正 ζ 使衰减过程与目标一致；第三段为时序调控：根据实际载荷的峰值出现时间调整激励角频率 ω_1 ，使响应峰值出现时间与目标时间的偏差控制在 $\pm 0.2\text{ms}$ 内。调控策略的实施需结合闭环控制逻辑：通过加速度传感器实时采集试件的响应信号，与目标带阻尼比正弦波信号进行对比，计算幅值偏差、衰减偏差和时序偏差，采用模糊控制算法对试验台的伺服阀开度和阻尼器参数进行实时修正，确保响应