

TMD 在精密设备上振动控制的应用研究

刘仕国

上海淳信机电科技股份有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21001

[摘要] 调谐质量阻尼器(TMD)是一种典型被动振动控制装置,在精密设备微振动治理中应用价值突出。随着高端制造向纳米级精度发展,光刻机、电子显微镜、精密测量仪器等对振动环境要求极为严苛,传统隔振措施已难以满足超高精度作业需求。本文简述TMD的工作原理、动力学特性及最优参数设计方法,重点分析其在光刻机、电子显微镜、精密测量与加工设备中的应用特点,探讨多TMD、颗粒阻尼TMD、惯容增强 TMD等新型结构的技术优势。研究表明,合理设计的TMD系统可使精密设备关键频率振动响应降低60%以上,显著提升设备稳定性、加工精度与测量可靠性。文章同时指出当前应用存在的不足,并对未来智能化、集成化发展方向进行展望,为精密设备微振动控制提供工程参考。

[关键词] 调谐质量阻尼器; 精密设备; 振动控制; 微振动; 被动控制

中图分类号: P142.8+1 **文献标识码:** A

Application Research of Tuned Mass Damper on Precision Equipment

Shiguo Liu

Shanghai Trutrust Electromechanical Technology Co., Ltd.

[Abstract] As a typical passive vibration control device, the tuned mass damper (TMD) has outstanding application value in micro-vibration control of precision equipment. With advanced manufacturing developing toward nanometer accuracy, lithography machines, electron microscopes and precision instruments impose extremely strict requirements on vibration environment, while traditional isolation methods can hardly meet ultra-high precision demands. This paper briefly describes the working principle, dynamic characteristics and optimal parameter design of TMD, focuses on its applications in lithography machines, electron microscopes, precision measuring and machining equipment, and discusses the advantages of new structures such as multiple TMD, particle damping TMD and inerter-enhanced TMD. The results show that a properly designed TMD can reduce vibration response at key frequencies by more than 60%, significantly improving equipment stability, machining accuracy and measurement reliability. The paper also points out the shortcomings in current applications and prospects the future intelligent and integrated development, providing engineering reference for micro-vibration control of precision equipment.

[Key words] Tuned Mass Damper; Precision Equipment; Vibration Control; Micro-vibration; Passive Control

1 引言

现代高端制造正快速向纳米级精度迈进,光刻机、电子显微镜、精密测量仪器等核心装备对环境微振动高度敏感,微小振动即可显著劣化加工、成像与测量精度。振动控制分为被动、主动和半主动三类,被动控制因结构简单、可靠性高、无需外部能源等优势,在工程中应用最为广泛。调谐质量阻尼器(TMD)作为典型被动减振装置,通过附加质量-弹簧-阻尼系统与主系统调谐,产生反向惯性力抵消振动能量,在精密设备微振动控制中效果显著。上海淳信机电科技股份有限公司作为国家高新技术企业与专精特新中小企业,在TMD及电涡流阻尼器领域具备核心技术优势,长期为精密装备领域提供减振技术方案。本文围绕TMD基本理论、精密设备振动特性、典型应用、新型技术及工程案例开展研究,为精密设备微振动治理提供技术参考。

2 TMD基本理论

2.1 TMD工作原理

TMD由质量块、弹簧和阻尼器组成,将其固有频率调谐至主系统控制频率附近。当主系统受外界激励产生振动时,质量块发生反向运动,通过惯性力抵消主系统振动能量,从而实现减振。

2.2动力学方程

单自由度主系统附加TMD的运动微分方程为:

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_1 - x_2) = f(t)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0$$

式中, x_1 、 x_2 分别为主系统和TMD质量块位移。引入质量比、频率比、阻尼比等无量纲参数, 便于参数优化设计。

2.3 最优参数设计

基于固定点理论, 无阻尼主系统对应的TMD最优频率比与阻尼比为:

$$\omega_{opt} = 1/(1+\mu)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{[3\mu/8(1+\mu)]}$$

式中, μ 为质量比。合理匹配参数是保证减振效果的关键。

2.4 TMD局限性

经典TMD存在有效频带窄、参数敏感性高、质量块占用空间较大等局限, 限制了其在空间受限精密设备中的应用。

3 精密设备振动特性分析

3.1 振动源

精密设备振动来源复杂, 主要包括: 环境微振动, 由交通、施工、建筑及人员活动引起; 设备内部振动, 由主轴、电机、风扇等旋转部件不平衡及流体脉动导致; 外部干扰, 如空气声波与交变电磁场引发的结构振动。

3.2 振动传递路径

振动主要通过三条路径传递至设备核心部件: 结构刚性传递, 经地面、底座、框架至工作部件; 空气声传递, 声波诱发外罩及轻量化部件振动; 多场耦合传递, 结构振动与声学振动相互叠加, 共同影响设备性能。

4 TMD在精密设备上的应用

4.1 半导体光刻机

EUV光刻机投影物镜面形精度要求达0.1nm级别, 微小振动会造成成像畸变。多级TMD系统安装于主框架与物镜之间, 质量比2%-3%, 调谐频率1-50Hz, 减振效果可达65%-80%, 有效保障成像质量与套刻精度。

4.2 电子显微镜

振动易导致电子束漂移和样品台微动, 降低成像分辨率与对比度。TMD安装于样品台、镜筒与底座之间, 全部构件采用非磁性材料, 避免干扰电子束路径, 满足强磁场环境使用要求。

4.3 精密测量仪器

激光干涉仪、原子力显微镜等对光路与结构微振动极为敏感。通过布置TMD抑制关键部位振动, 可有效降低相位噪声与测量误差。大型精密探测项目中, 多单元TMD可将低频振动噪声降低两个数量级。

4.4 精密加工设备

超精密车床、磨床的主轴振动与床身共振是影响加工质量的主要因素。在主轴、进给系统及床身关键模态位置安装TMD, 可有效抑制共振, 加工表面粗糙度可控制在 $Ra < 2nm$ 范围内。

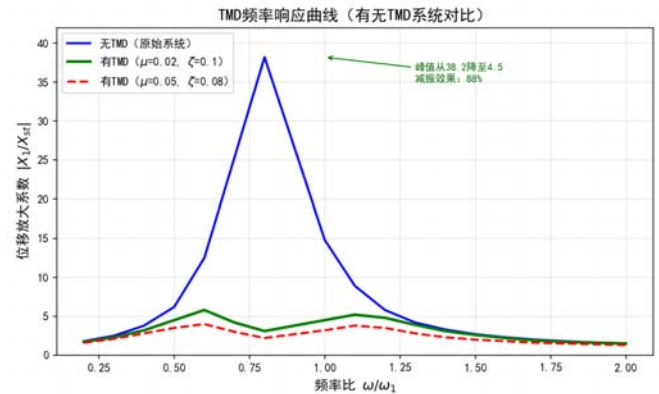


图1 TMD频率响应曲线

5 新型TMD技术

5.1 多TMD系统 (MTMD)

由多个调谐频率略有差异的TMD单元并联组成, 可拓宽有效控振频带2-3倍, 解决单TMD频带窄的问题, 适用于宽频振动控制场景。

5.2 颗粒阻尼TMD

利用颗粒在空腔内碰撞、摩擦耗能, 具有宽温域适应性、抗老化、非线性耗能等优势, 特别适用于真空、极端温度等特殊环境下的精密设备。

5.3 惯容阻尼器增强型TMD

引入惯容元件, 可在不增加物理质量的前提下提升等效惯性, 增强减振效果、减小安装空间需求, 更适合结构紧凑的精密设备。

6 TMD系统工程设计方法

TMD系统工程设计遵循以下流程: 开展设备振动模式测试, 识别主要模态频率、阻尼比与振型; 基于理论公式初选TMD参数; 建立整体有限元模型进行频响仿真优化; 制作原型并开展振动台试验验证; 完成最终设计、制造与现场安装调试。定制化设计是保证减振效果的关键。

7 工程案例

7.1 光刻机物镜TMD减振系统

某半导体装备企业光刻机物镜在92Hz处共振峰值超标, 套刻精度不足。上海淳信机电科技股份有限公司基于TMD领域的核心技术, 设计由3个TMD单元组成的MTMD系统, 调谐频率90Hz、92Hz、94Hz, 配置电涡流阻尼。实施后, 90-95Hz频带振动响应降低75%, 套刻精度达1.6nm, 系统稳定运行超过8000小时。

7.2 超精密金刚石车床主轴TMD系统

某超精密车床主轴在315Hz处振动显著, 加工表面粗糙度仅 $Ra=6.2nm$ 。淳信机电为其定制环形TMD, 质量比3.2%, 调谐频率315Hz。实施后, 主轴振动幅值降至 $0.35\mu m$, 加工粗糙度提升至 $Ra=1.9nm$, 满足高精度加工要求。

8 结论与展望

本文系统研究了TMD在精密设备振动控制中的应用, 结果表

明：TMD是精密设备微振动控制的有效手段，合理设计可使关键频率振动响应降低60%–80%；MTMD、颗粒阻尼TMD、惯容增强TMD等新型技术可有效拓宽控振频带、适应特殊环境、减小安装空间；减振效果高度依赖参数匹配与安装位置，需结合设备振动特性开展定制化设计。上海淳信机电科技股份有限公司在TMD与电涡流阻尼技术上的工程实践，已为半导体装备与超精密加工设备提供了国产化减振解决方案。当前仍存在参数时变、多物理场耦合影响、成本控制等问题。未来，TMD技术将向智能化自适应、结构功能集成化、新型阻尼材料应用、数字孪生全生命周期监测方向发展，持续提升精密设备振动控制水平，为我国高端精密装备自主可控提供有力支撑。

[参考文献]

[1]DenHartogJP.Mechanical Vibrations[M].4th Edition.New York:McGraw-Hill,1956.

[2]Igusa T,Xu K.Vibration control using multiple tuned mass dampers[J].Journal of Sound and Vibration,1994,175(4):491–503.

[3]刘强,张文明.精密设备微振动控制技术研究进展[J].振动与冲击,2024,43(8):1–12.

[作者简介]

刘仕国(1971–),男,汉族,上海徐汇人,硕士研究生,高级工程师,阻尼减振。