

光学学报

基于最优调谐液柱阻尼器的气浮光学平台稳定性研究

崔文辉^{1,2*}, 朱健强^{1**}, 何媛琦^{1,2}, 刘志刚¹, 樊全堂¹, 林炜恒^{1,2}, 董子铭¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了解决气浮光学平台在水平方向超低频减振的问题以提高超精密实验的产出质量, 提出基于调谐液柱阻尼器(TLCD)的气浮光学平台流固耦合理论, 用来实现最优调谐控制和实验精度的提升。首先对 TLCD 进行原理分析并推导出固有频率的设计范围; 其次对 TLCD 气浮光学平台流固耦合系统进行建模及推导; 接着对流固耦合系统进行响应特性分析及参数优化; 最后对时域响应和光学实验进行验证分析。结果表明, 当固有频率比一定时, 存在一个最优阻尼比可以使减振效率取得最大值, 共振峰处的减振效率达到 66.76%; 同时通过调控小孔板可以使 TLCD 减振系统适合宽频激励的工况, 气浮光学平台动力响应的有效控制有利于提高实验精度, 为超精密实验品质的提升提供了一种有效控制手段。

关键词 光学设计; 气浮光学平台; 调谐液柱阻尼器; 流固耦合; 稳定性; 参数优化

中图分类号 TP29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2122001

Stability of Air Floating Optical Platform Based on Optimal Tuned Liquid Column Damper

Cui Wenhui^{1,2*}, Zhu Jianqiang^{1**}, He Yuanqi^{1,2}, Liu Zhigang¹, Fan Quantang¹,
Lin Weiheng^{1,2}, Dong Ziming¹

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to solve the problem of ultra-low frequency vibration reduction of air-floating optical platform in horizontal direction and improve the output quality of ultra-precision experiments, the fluid-structure coupling theory of air-floating optical platform based on tuned liquid column damper (TLCD) is proposed to achieve optimal tuning control and improve experimental accuracy. First, the principle of TLCD is analyzed and the design range of natural frequency is deduced. Second, the fluid-structure coupling system of TLCD air floating optical platform is modeled and deduced. Then, the response characteristics and parameter optimization of the convection-solid coupling system are analyzed. Finally, the time-domain response and optical experiments are verified and analyzed. The results show that when the natural frequency ratio is constant, there is an optimal damping ratio which can make the maximum vibration reduction efficiency, and the vibration reduction efficiency at the resonance peak reaches 66.76%. At the same time, the TLCD damping system can be suitable for broadband excitation by adjusting the keyhole plate, and the effective control of the dynamic response of the air floating optical platform is beneficial to improve the experimental accuracy, which provides an effective control means for the improvement of the quality of ultra-precision experiment.

Key words optical design; air floating optical platform; tuned liquid column damper; fluid-structure coupling; stability; parameter optimization

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-05-29

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(181231KYSB20170022)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA25020304)

通信作者: *whcui@siom.ac.cn; **jqzhu@siom.ac.cn

1 引言

大科学工程是彰显各国科技实力的重要标志,为此在工程设计中涉及的稳定性问题需要重点考虑^[1]。目前稳定性分析的普遍方法是利用有限元法来提取所需数据^[2],而数值分析过程中的理论估算是非常有必要的^[1]。大科学工程涉及气浮光学平台的使用,很多难以实现的超精密光学、生物、成像及检测等实验均可以在气浮光学平台上得以实现,但气浮光学平台的水平方向会受到大楼水平晃动的影响,使实验系统的指向稳定性、光束质量及成像质量等变差,最终影响实验的预期效果和实验进度^[1,3-4]。为了提高实验平台的产出质量,本文提出基于调谐液柱阻尼器(TLCD)的气浮光学平台流固耦合方法,用来衰减气浮平台在水平方向的振动,为各类受水平方向振动影响的超精密实验提供更稳定可靠的技术支持。

调谐液体阻尼器(TLD)是通过容器中的液体随结构振动而产生的晃动侧动力来耗散主系统振动能量的一种减振装置^[5],TLCD的设计思想源于TLD。TLCD系统主要通过U型通管内的水柱长度(有效长度)来调整其固有频率,并利用闸门、小孔板或变化断面来产生落水头损失,从而起到动力消能的作用。Reiterer等^[6]推导出了水柱消能系统的运动方程式,Ruiz等^[7]利用一系列试验对其进行了验证,结果表明TLCD系统的阻尼为非线性阻尼,阻尼大小与落水头损失及液体激荡速度的平方成正比。之后,Gao等^[8]推导出了TLCD系统的非线性二阶微分方程,求解分析结果表明,当结构物受到定频简谐外力的作用时,系统具有最佳的参数值,此时动力放大系数具有最小极值。Balendra等^[9]对安装有TLCD的塔型建筑物受风力作用的动力影响进行了完整研究,发现塔的高度越低,TLCD液体孔洞的开口比应越小,通常应限制在0.5~1.0之间。蓝文武^[10]在U型水箱背部的凹位空间中设置了多层分隔的浅水水箱,用来增加调谐液体阻尼器中水体的总质量,并据此提出了混合水箱减振技术的设想,同时提出了将混合水箱的浅水部分进行分组,每组液体具有不同的固有频率,从而组成多频率减振被动控制装置。

近期,Chen等^[11]提出了一种考虑柔性结构背景柔度贡献的闭环最优标定方法,该方法获得了平

衡的频率响应曲线,提高了TLCD系统的性能。Wang等^[12]设计了一种将调谐液体多柱阻尼器(TLMCDs)嵌入钢筋混凝土剪力墙体系中的新型阻尼系统,即调谐液体墙阻尼器(TLWD),该器件可以增强传统结构构件的耗能能力。仿真结果表明,采用垂直分布的TLWD结构可以有效减少结构的振动,在20%的设计风速下,其性能优于传统TLCD系统,数值模拟的结果也证实了建立简化模型的设计考虑。Wang等^[13]研究了一种新型调谐液柱阻尼器惯性器(TLCDI)对单自由度结构的地震控制效果,通过与TLCD的比较,使用最优参数来评价TLCDI的减振效果,在白噪声和地震的激励下,等效线性化方法所得的结果与数值方法所得的结果一致。气浮光学平台是固有频率低至1 Hz左右的柔性结构,受扰动的敏感性较高,与高耸结构和建筑等类似。因此,可用小型化的调谐液柱阻尼器来衰减气浮平台在水平方向的振动以提高气浮光学平台的减振性能。

本文以调谐液柱阻尼器所控制的气浮光学平台为研究对象,基于TLCD原理和方法、流固耦合建模、推导及参数优化分析和验证分析等对TLCD所控制的气浮光学平台动力响应的抑制机理和减振性能进行深入研究。

2 原理与方法

2.1 调谐液柱阻尼器的工作原理

图1为ZDT系列的气浮光学平台,其主要技术指标有垂直固有频率为1.0~2.0 Hz,水平固有频率为1.0~1.5 Hz,隔振方式为空气弹簧、摆杆隔振。为了实现水平固有频率处的超低频减振,安装

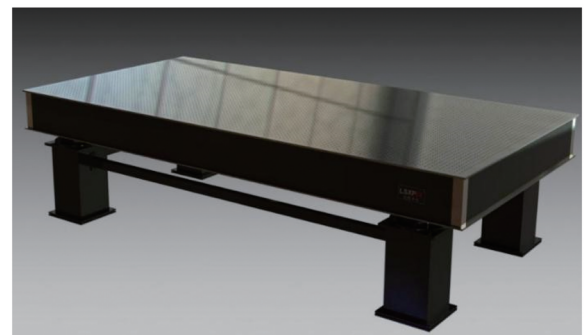


图1 ZDT系列的气浮摆杆隔振光学平台
Fig. 1 ZDT series air floating pendulum isolation optical platform

图 2 由调谐液柱阻尼器减振的气浮光学平台流固耦合系统,使用 TLCD 来衰减超低频共振峰的能量可以实现更高精度的实验输出能力。图 2(a)为可产

品化的内嵌式 TLCD 气浮光学平台,图 2(b)为试验所用的气浮光学平台,开展性能研究的过程中使用此类型平台。

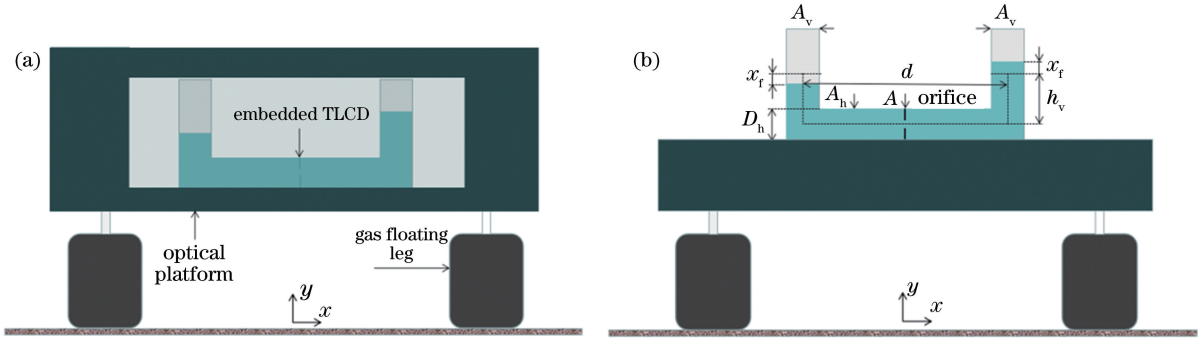


图 2 由调谐液柱阻尼器减振的气浮光学平台流固耦合系统。(a)内嵌式 TLCD 气浮光学平台;(b)试验 TLCD 气浮光学平台

Fig. 2 Fluid-structure coupling system of air floating optical platform with tuned liquid column damper.

(a) Embedded TLCD air floating optical platform; (b) trial TLCD air floating optical platform

通过调谐液柱阻尼器中 U 型通管内的有效长度来调整其固有频率,并利用小孔板来产生动力耗能的作用。TLCD 的简单结构如图 3 所示,功能参数包括水平段截面积 A_h 、垂直段截面积 A_v 、受扰动水柱产生的动位移 x_f 、水平段高度 D_h 、垂直段静高度 h_v 、液柱水平方向相对主系统的位移 x_h 和水平段长度 d 。随着晃动模态阶次的增加, d 衰减很快,第一阶晃动模态在侧动力控制中占主要作用,故在分析过程中仅考虑液体的第一阶晃动模态。影响 TLCD 减振效果的因素有很多,如水箱尺寸、TLCD 与气浮光学平台水平一阶模态的频率比、TLCD 与气浮光学平台水平一阶模态的频率比和 TLCD 与气浮光学平台水平一阶模态的阻尼比等。

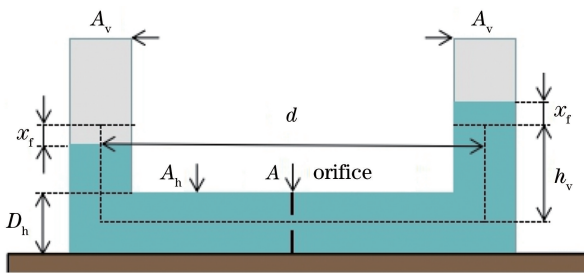


图 3 调谐液柱阻尼器的结构

Fig. 3 Structure of tuned liquid column damper

根据能量守恒可知,拉格朗日方程为

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_f} + \frac{\partial U}{\partial x_f} = Q, \quad (1)$$

式中: T 为系统的总动能; \dot{x}_f 为受扰动水柱产生的动速度; U 为总动力位能; Q 为系统的非保守力; t 为时间。由于总动能只是关于速度的函数,所以 $\partial T/\partial x_f=0$,则(1)式可改写为

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right) = \left(2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{h_v} d\right) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{u}_g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f, \quad (3)$$

$$Q = -\frac{1}{2} \rho A_h \delta |\dot{x}_h| \dot{x}_h, \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; g 为重力加速度; u_g 为主系统水平位移; \dot{x}_h 为液柱水平方向相对主系统的速度; $\dot{x}_h = A_v/A_h \dot{x}_f$; \ddot{x}_f 为受扰动水柱产生的运动加速度; \ddot{u}_g 为主系统的水平加速度; δ 为水头损失系数^[14],其决定阻尼的大小。

将(2)~(4)式代入(1)式,建立 TLCD 的运动方程,表达式为

$$\rho A_v \left[\frac{L_e - d}{\lambda} + d \right] \ddot{x}_h + \frac{1}{2} \rho A_h \delta |\dot{x}_h| \dot{x}_h + \frac{2\rho A_v g}{\lambda} x_h = -\rho A_v d \ddot{u}_g, \quad (5)$$

式中: L_e 为 TLCD 的有效长度, $L_e = 2h_v + \lambda d$; \ddot{x}_h 为液柱水平方向相对主系统的加速度; λ 为 TLCD 的垂直截面积与水平截面积之比。

由(5)式可求得 TLCD 的角频率和固有频率,表达式分别为

$$\omega_d = \sqrt{\frac{2\rho A_v g}{2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d}} = \sqrt{\frac{2g}{2h_v + \frac{A_v}{A_h} d}} = \sqrt{\frac{2g}{L_e}}, \quad (6)$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{2L_e}}. \quad (7)$$

由(7)式可以看出,TLCD 的固有频率与有效长

度 L_c 和 λ 有关,故 TLCD 具有更宽的减振频带。

当垂直截面积和水平截面积之比 $\lambda = A_v/A_h$ 为 1 时,根据实验气浮光学平台的尺寸和安装便利性等因素来考虑 TLCD 液柱水平长度的取值范围为 $[0.2, 1]$,垂直高度的取值范围为 $\{0.1, 0.15, 0.2\}$,TLCD 的固有频率与液柱水平长度和垂直高度的关系如图 4 所示。

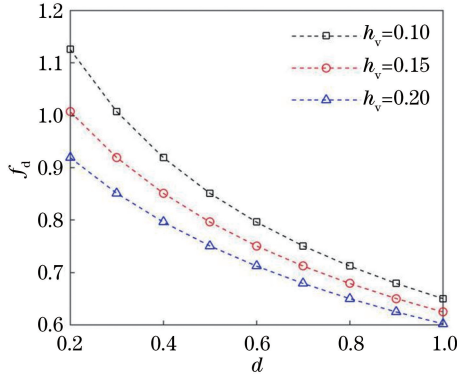


图 4 TLCD 的固有频率与不同参数的关系

Fig. 4 Relationship between natural frequency of TLCD and different parameters

由图 4 可知,在液柱垂直高度一定的情况下,调谐液体阻尼器的固有频率随液柱水平长度的增加而降低;在液柱水平长度一定的情况下,调谐液体阻尼器的固有频率随液柱垂直高度的增加而降低;同时,液柱水平长度越长,垂直高度的变化对调谐液体阻尼器固有频率的影响越小。

2.2 TLCD 气浮光学平台流固耦合系统的建模与推导

TLCD 气浮光学平台流固耦合系统的减振控制模型如图 5 所示,其中 c_s 为光学平台水平支撑阻尼, m_s 为质量, k_s 为水平支撑刚度系数。当系统受到地脉水平扰动 u_g 和水平扰动 $f(t)$ 时,气浮光学平台会产生水平位移响应 x_s ,TLCD 的运动描述见 2.1 节。

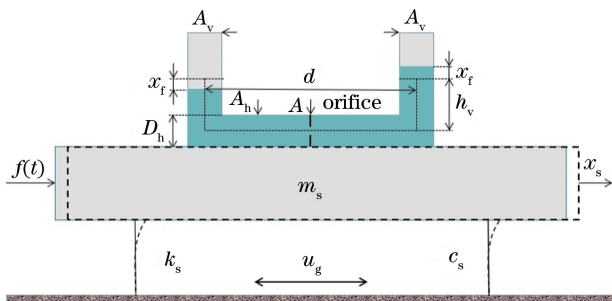


图 5 TLCD 气浮光学平台流固耦合系统的减振控制模型

Fig. 5 Vibration reduction control model of fluid-structure coupling system of TLCD air floating optical platform

安装 TLCD 装置的气浮光学平台的动力学方程为

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{u}_g) + k_s (x_s - u_g) = f(t) - f_{TLCD}, \quad (8)$$

式中: f_{TLCD} 为 TLCD 中液体晃动所产生的控制力; \ddot{x}_s 为气浮光学平台产生的水平加速度; \dot{x}_s 为气浮光学平台产生的水平速度响应; \dot{u}_g 为地脉水平速度。

通过合理调节阻尼器中液体的晃动频率可以调整 f_{TLCD} 的作用周期和幅值,从而获得 f_{TLCD} 的最佳振动控制效果。

根据(1)式的拉格朗日方程,TLCD 气浮光学平台流固耦合系统的运动微分方程为

$$\begin{bmatrix} 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d & \rho A_v d \\ \rho A_v d & 2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} |\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ x_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho A_v d \\ 2\rho A_v h_v + \rho A_v d + m_s \end{bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t). \quad (9)$$

简化方程,可得

$$m_d = \rho A_v [d + \lambda(L_c - d)], \quad (10)$$

$$\bar{m}_d = \rho A_v \left(\frac{L_c - d}{\lambda} + d \right), \quad (11)$$

$$m_d \gamma = \rho A_v d, \quad (12)$$

$$\delta = \frac{1}{\lambda^2} \left[\left(1 - \frac{A_v}{A_h} \right)^2 + 0.5 \left| 1 - \frac{A_v}{A_h} \right| \right] +$$

$$\left[\left(1 - \frac{A}{A_h} \right) + 0.707 \left(1 - \frac{A}{A_h} \right)^{0.375} \right]^2 \left(\frac{A_h}{A} \right)^2, \quad (13)$$

$$k_d = \frac{\rho A_v g}{\lambda}, \quad (14)$$

$$c_{eq} = \frac{1}{2} \rho A_h \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f, \quad (15)$$

式中: m_d 为 TLCD 的质量; \bar{m}_d 为 TLCD 的有效质量; γ 为液柱水平段质量与总质量之比; A 为节流孔的面积; k_d 为 TLCD 的刚度; c_{eq} 为 TLCD 的等效阻尼。

将(10)~(15)式代入(9)式,流固耦合系统的运动微分方程可改写为

$$\bar{m}_d \ddot{x}_h + c_{eq} \dot{x}_h + k_d x_h = -\gamma m_d \ddot{x}_s, \quad (16)$$

$$(m_s + m_d) \ddot{x}_s + c_{eq} \dot{x}_s + k_d x_s = -\gamma m_d \ddot{x}_h. \quad (17)$$

由能量守恒可知,等效阻尼力在一个周期内所做的功等于实际阻尼力在一个周期内所做的功,等效阻尼比为

$$\xi_d = \frac{c_{eq}}{2\omega_d m_d} = \frac{2\lambda \delta \omega \bar{X}_0}{3\pi \omega_d (L_c - d + \lambda d)}, \quad (18)$$

式中： ω 为激励频率； \bar{X}_0 为 TLCD 水平振幅。

令 $f(t) = F_0 \exp(i\omega t)$ 、 $x_s = X_s \exp(i\omega t)$ 和 $u_g = X_0 \exp(i\omega t)$ (其中 F_0 为水平扰动力幅值, X_s 为气浮光学平台产生水平位移响应幅值, X_0 为地脉水平扰动幅值), 简化并求解方程组, 可得

$$X_s = \frac{1}{dr} (\phi^2 - \beta^2 + i2\phi\beta\xi_d) \left(\frac{F_0}{k_s} \right), \quad (19)$$

式中： $dr = E + iF$, 其中 $E = [1 - (1 + \mu)\beta^2](\phi^2 - \beta^2) - 4\phi\beta^2\xi_s\xi_d - \gamma^2\mu\theta\beta^4$, F 为系统的非保守力, $F = 2\phi\beta\xi_d [1 - (1 + \mu)\beta^2] + 2\beta\xi_s(\phi^2 - \beta^2)$; ξ_s 为气浮光学平台阻尼比; $k_s = \omega_s^2 m_s$, 其中 ω_s 为气浮光学平台的固有频率; $\phi = \omega_d / \omega_s$; $\beta = \omega / \omega_s$; $\mu = m_d / m_s$; θ 为 TLCD 液柱实际质量与液柱有效质量比, $\theta = \frac{m_d}{\bar{m}_d} = \frac{d + \lambda(L_c - d)}{d + (L_c - d)/\lambda}$ 。

对(19)式取模, 可得

$$M_{X_s} = \sqrt{\frac{(\phi^2 - \beta^2)^2 + 4\phi^2\beta^2\xi_d^2}{E^2 + F^2}} \left(\frac{F_0}{k_s} \right). \quad (20)$$

令静位移 $X_{st} = F_0 / k_s$, 则气浮光学平台的位移

放大系数为

$$T_{\text{main}} = \frac{M_{X_s}}{X_{st}} = \sqrt{\frac{(\phi^2 - \beta^2)^2 + 4\phi^2\beta^2\xi_d^2}{E^2 + F^2}}. \quad (21)$$

无 TLCD 气浮光学平台的位移放大系数为

$$T_{\text{main}0} = \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + 4\beta^2\xi_s^2}}. \quad (22)$$

由上述各式可以看出, 气浮光学平台位移的动力放大系数主要与 TLCD 的固有频率和气浮光学平台的固有频率之比 ϕ 、外激励频率与气浮光学平台的频率之比 β 、TLCD 阻尼比 ξ_d 和气浮光学平台阻尼比 ξ_s 、TLCD 的液柱水平段质量与总质量之比 γ 以及 TLCD 液柱总质量与气浮光学平台质量之比 μ 有关。

3 分析与讨论

3.1 动力响应特性分析及参数优化

当 $\gamma = 0.6$ 、 $\theta = 0.8$ 、 $\xi_s = 0.01$ 和 $\mu = 0.02$ 时, 在 ϕ 分别取不同数值的情况下, T_{main} 与各影响因素的关系如图 6 所示, 其中 NC 为无控制工况。

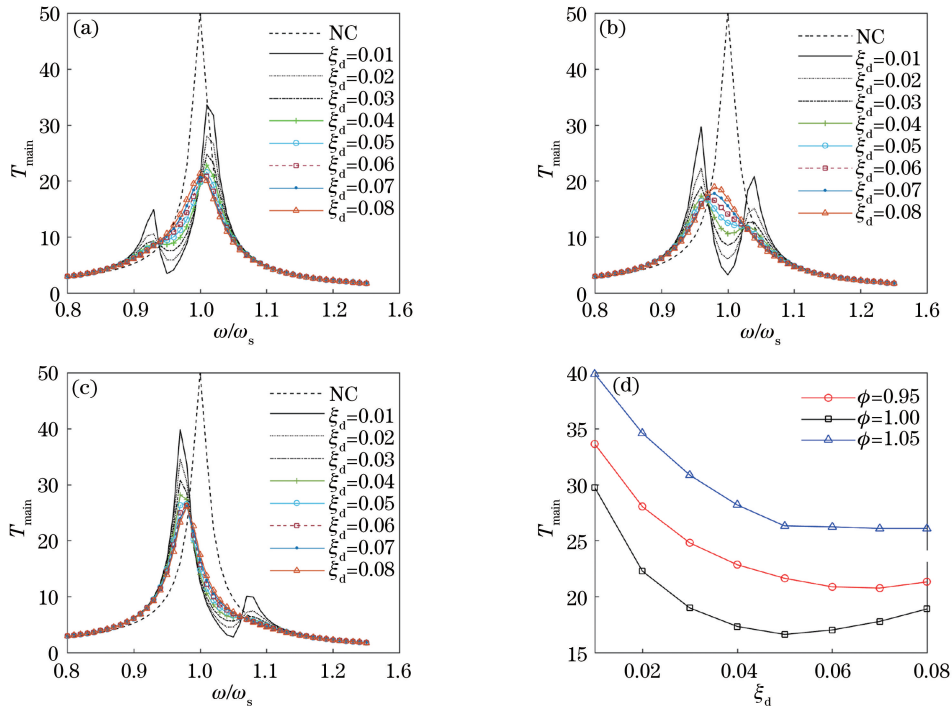


图 6 气浮光学平台的位移放大系数 T_{main} 与各因素的关系。(a) 当 $\phi = 0.95$ 时, 随频率比 ω / ω_s 和 TLCD 阻尼比 ξ_d 的变化曲线; (b) 当 $\phi = 1.00$ 时, 随频率比 ω / ω_s 和 TLCD 阻尼比 ξ_d 的变化曲线; (c) 当 $\phi = 1.05$ 时, 随频率比 ω / ω_s 和 TLCD 阻尼比 ξ_d 的变化曲线; (d) 当 ϕ 取不同值时, TLCD 阻尼比 ξ_d 的参数优化曲线

Fig. 6 Relationship between displacement amplification coefficient of air floating optical platform and various factors. (a) When $\phi = 0.95$, variation curves with frequency ratio ω / ω_s and TLCD damping ratio ξ_d ; (b) when $\phi = 1.00$, variation curves with frequency ratio ω / ω_s and TLCD damping ratio ξ_d ; (c) when $\phi = 1.05$, variation curves with frequency ratio ω / ω_s and TLCD damping ratio ξ_d ; (d) parameter optimization curves of TLCD damping ratio ξ_d when with different ϕ values

由图 6(a)~6(c)可知,当 ϕ 值固定时,气浮光学平台的位移放大系数随频率比 β 和 TLCD 阻尼比 ξ_d 的变化从两个共振峰变为一个共振峰,两个峰值变化则呈相反趋势,说明当外激励频率偏离 TLCD 的晃动频率时,在 TLCD 小阻尼比的情况下其减振效果大幅度降低。当小孔板的开孔率较大和 TLCD 的阻尼比较小时,TLCD 的频带敏感性增强,仅适合较窄频带激励的工况。通过减小小孔板的开孔率(即增大 TLCD 的阻尼比),可以实现 TLCD 减振系统适合较宽频激励的工况。当影响因素 ϕ 和 ξ_d 调谐合理时,带有 TLCD 的气浮光学平台的动力响应的位移振幅明显低于无 TLCD 控制的气浮光学平台,说明 TLCD 装置对气浮光学平台的动力响应起到很好的调谐控制作用,选取最优调谐参数 ϕ 和 ξ_d 可以得到明显的动力减振效果。

为了获取最优的调谐参数 ϕ 和 ξ_d ,需要通过数值分析对系统进行参数优化,优化结果如图 6(d)所示。不同固有频率比下,TLCD 的阻尼比参数优化后的减振效率如表 1 所示。

由图 6(d)和表 1 可知,当固有频率比一定时,阻尼比的变化会使气浮光学平台的位移放大系数先变小再变大,此时存在一个最优的阻尼比,使得减振效率取得最大值。当固有频率比 ϕ 为 0.95 时,最优阻尼比参数为 0.07,最大减振效率为 58.48%;当固有频率比 ϕ 为 1.00 时,最优阻尼比参数为 0.05,最大减振效率为 66.76%;当固有频率比 ϕ 为 1.05 时,最优阻尼比参数为 0.07,最大减振效率为 47.84%。由控制效果可以看出,在最优的阻尼比参数下,共振峰处的动力减振效果最好,共振峰左侧的动力减振效果次之,共振峰右侧的动力减振效果较共振峰及其左侧差一些。

表 1 不同固有频率比下 TLCD 的阻尼比参数优化后的减振效率

Table 1 Vibration reduction efficiency after optimization of damping ratio parameters in TLCD under different natural frequency ratios

ξ_d	$T_{\text{main}} \phi=0.95$		$T_{\text{main}} \phi=1.00$		$T_{\text{main}} \phi=1.05$	
	$\eta_{0.95} / \%$	$\eta_{1.00} / \%$	$\eta_{1.00} / \%$	$\eta_{1.05} / \%$	$\eta_{1.05} / \%$	$\eta_{1.05} / \%$
0.01	33.62	32.76	29.73	40.54	39.88	20.24
0.02	28.04	43.92	22.27	55.46	34.60	30.80
0.03	24.79	50.42	18.98	62.04	30.85	38.30
0.04	22.84	54.32	17.33	65.34	28.19	43.62
0.05	21.63	56.74	16.62	66.76	26.31	47.38
0.06	20.87	58.26	17.02	65.96	26.23	47.54
0.07	20.76	58.48	17.78	64.44	26.08	47.84
0.08	21.31	57.38	18.90	62.20	26.08	47.84
Without TLCD	$T_{\text{main}} = 50$					

3.2 验证分析

3.2.1 时域响应特性分析

为了更好地说明调谐液柱阻尼器的控制效果,在气浮光学平台的水平方向上施加一个斜坡激励和简谐激励,在 TLCD 阻尼比参数最优和无控的工况下对气浮光学平台的时域响应进行对比分析,结果如图 7 所示,其中 c_{TLCD} 为带有 TLCD 的气浮光学平台的时域响应。

由图 7(a)可知,谐波激励响应在 TLCD 的阻尼比取最优的情况下,响应曲线的斜率较无控响应小,说明控制效果较为明显,且当 TLCD 的阻尼比最优时,曲线的收敛精度最高,两条曲线所围的响应区间面积为调谐的最大范围,无论如何调谐,响应都不会

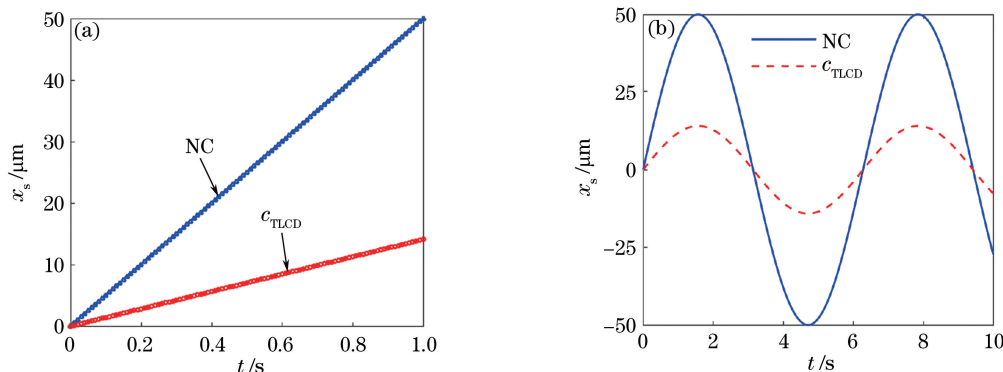


图 7 气浮光学平台的时域响应特性分析。(a)斜坡激励响应;(b)简谐激励响应

Fig. 7 Analysis of time-domain response characteristics of air floatation optical platform. (a) Slope excitation response; (b) harmonic excitation response

超出所围的控制区域。由图 7(b)可知,简谐激励响应的有效控制区是两条正弦曲线所围的面积,响应峰值呈周期性变化,当 TLCD 的阻尼比取最优值时,动力响应最优控制。

因此,通过优化参数可以获取使气浮光学平台振幅最小参数,实际工况中可快速调谐以实现最优控制,为气浮光学平台的超低频减振提供了理论和应用指导。

3.2.2 光学实验分析

光学实验是基于 ZEMAX 的示例性模型进行分析的,图 8 为一个布局在气浮光学平台上的透镜聚焦实验光路系统,实验光路由平行光管、1.22 m 焦距的透镜和观测 CCD(Charge-Coupled Device)组成。ZEMAX 示例模型分析中假设平行光管和观测 CCD 不动,对比分析气浮光学平台的水平位移响

应 x_s 在无控和 TLCD 最优阻尼比参数控制下透镜焦点的偏移情况。未施加 TLCD 的气浮光学平台初始位移响应为 $10 \mu\text{m}$,利用 ZEMAX 来搭建透镜聚焦系统,当 ϕ 分别为 0.95、1.00 和 1.05 时,无控和 TLCD 最优阻尼比参数控制下透镜焦点的偏移情况如图 9 所示,其中最下方的点为理想聚焦落点,最上方的点为无控情况下的聚焦落点,中间点为取不同固有频率比在最优阻尼比参数控制下的落点。

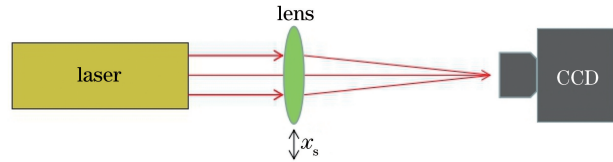


图 8 透镜聚焦实验的光路系统

Fig. 8 Optical path system of lens focusing experiment

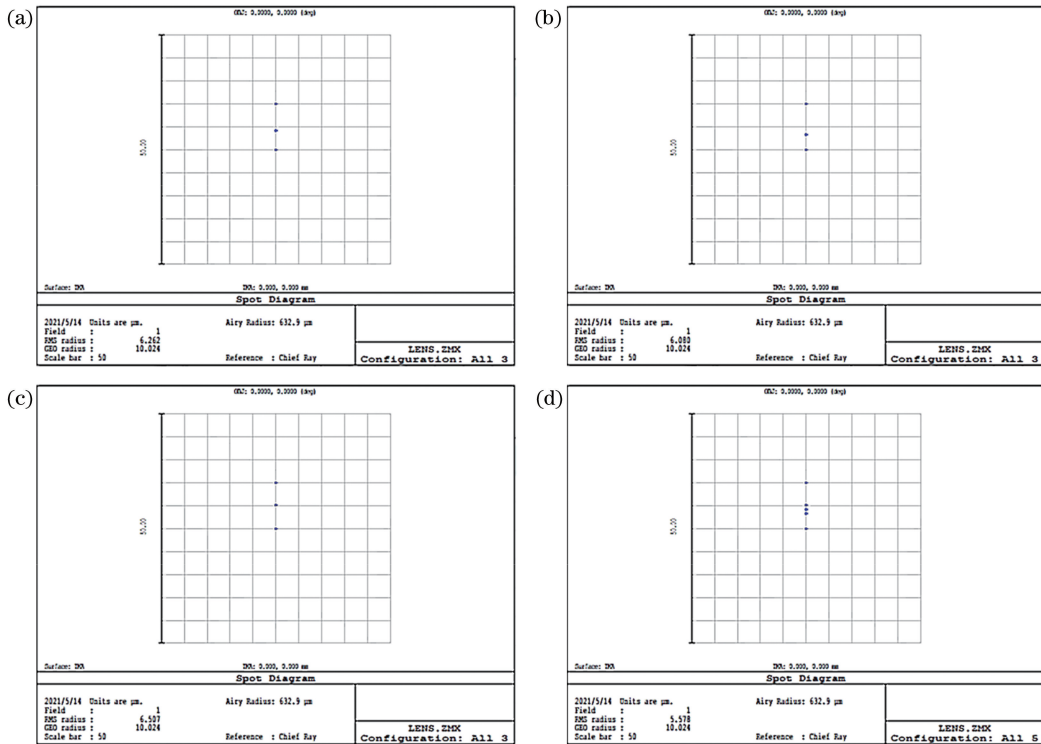


图 9 ZEMAX 软件中透镜在不同 ϕ 值下的聚焦实验分析结果及其三种情况的效果对比。(a) $\phi=0.95$; (b) $\phi=1.00$; (c) $\phi=1.05$; (d) 图(a)~(c)的效果对比

Fig. 9 Experimental analysis results of focusing lens with different ϕ values in ZEMAX software and comparison of its effects in three cases. (a) $\phi=0.95$; (b) $\phi=1.00$; (c) $\phi=1.05$; (d) comparison of effects of Fig. (a)~(c)

由图 9 可知,透镜的聚焦精度在不同的固有频率比下均实现了大幅度提升,当固有频率比为 1.00 时,在阻尼比参数最优的情况下位移响应为 $3.324 \mu\text{m}$,偏离理想位置较无控情况提升了约 67%;当固有频率比为 0.95 时,在阻尼比参数最优的情况下透镜的位移响应为 $4.152 \mu\text{m}$,偏离理想位

置较无控情况提升了约 58%;当固有频率比为 1.05 时,在阻尼比参数最优的情况下透镜的位移响应为 $5.216 \mu\text{m}$,偏离理想位置较无控情况提升了约 49%。ZEMAX 分析结果与气浮光学平台最优控制效果相一致,说明气浮光学平台动力响应的有效控制有利于提高透镜的聚焦精度,为超精密实验品质

的提升提供了一种有效控制手段。

3.2.3 TLCD 动力减振实验分析

为了更直观表征 TLCD 对具体气浮光学平台的动力减振效果,配置图 10 的 TLCD 控制实验系统,系统由气浮光学平台(1)、TLCD(2)、PCB 加速度传感器(3)、测振仪 DASP(4)及安装 DASP 分析软件的计算机组成。实验按照无控和安装 TLCD 两种控制工况对气浮光学平台的随机响应进行对比分析。具体响应信号的采集流程:加速度传感器将气浮光学平台的随机响应信号传递给测振仪 DASP,再传递到计算机的 DASP 分析软件中进行采样、分析和后处理,具体对比分析结果如图 11 所示。当激

励频率为 0.25 Hz 时,气浮光学平台的随机响应控制对比实验结果如表 2 所示。

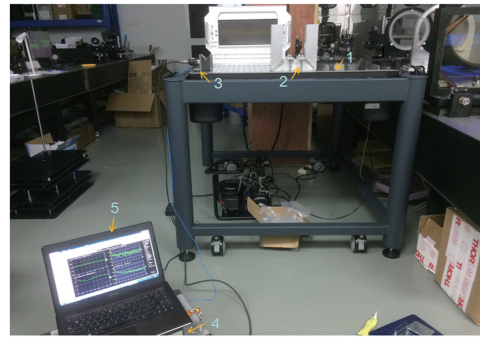


图 10 TLCD 控制实验系统

Fig. 10 TLCD control experimental system

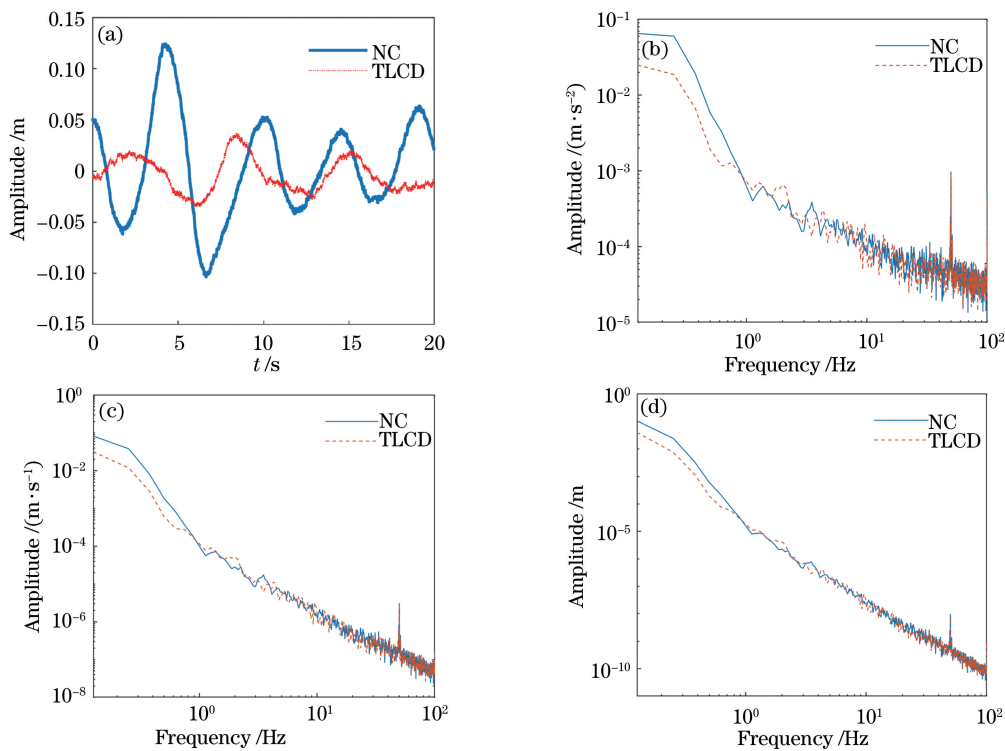


图 11 气浮光学平台的随机响应对比实验分析。(a)无控制与 TLCD 控制下时域响应的对比曲线 (b)无控制和 TLCD 控制下加速度频域响应的对比曲线;(c)无控制和 TLCD 控制下速度频域响应的对比曲线;(d)无控制和 TLCD 控制下位移频域响应的对比曲线

Fig. 11 Comparative experimental analysis of random response of air floatation optical platform. (a) Comparison curves of time domain response without control and TLCD control; (b) comparison curves of acceleration frequency domain response without control and TLCD control; (c) comparison curves of velocity frequency domain response without control and under TLCD control; (d) comparison curves of displacement response in frequency domain without control and under TLCD control

由图 11 可知,相比于无控制的气浮光学平台,对于 TLCD 所控制的气浮光学平台,时域响应的振幅变化幅度明显更小且收敛性也更好些,频域加速度、速度及位移响应在超低频带宽内的控制效果更好,但对其他频段的控制效果不佳。由表 2 可知,加

速度响应的减振效率达到 72.24%,速度响应的减振效率达到 68.91%,位移响应的减振效率也达到 68.91%,位移响应的减振效果较理论推导的最优控制最大减振效率 66.76%还好些,这是由于实验过程中考虑了 TLCD 外壳的质量,质量比更大一些,

表 2 0.25 Hz 的激励频率下气浮光学平台的随机响应控制对比实验结果

Table 2 Experimental results of random response control of air floatation optical platform at 0.25 Hz excitation frequency

Parameter	Uncontrolled (NC)	TLCD control	Damping efficiency /%
Acceleration / (m·s ⁻²)	0.06009	0.01668	72.24
Velocity / (m·s ⁻¹)	0.03825	0.01189	68.91
Displacement/m	0.02435	0.00757	68.91

因此控制效率也更高一些。由此可见, TLCD 动力减振实验、理论推导和 ZEMAX 示例性实验均说明了 TLCD 更适合解决超低频减振的问题, 能够为更多精密实验提供更稳定、更可靠的基础平台。

4 结 论

本文提出基于调谐液柱阻尼器的气浮光学平台流固耦合理论, 实现了最优调谐控制和实验精度的提升, 推导出了 TLCD 的固有频率设计范围并建立了 TLCD 气浮光学平台流固耦合系统, 优化了 TLCD 的阻尼比控制参数。当固有频率比一定时, 存在一个最优阻尼比, 使得气浮光学平台的减振效率取得最大值; 当固有频率比 ϕ 为 0.95 时, 最优阻尼比参数为 0.07, 最大减振效率为 58.48%; 当固有频率比 ϕ 为 1.00 时, 最优阻尼比参数为 0.05, 最大减振效率为 66.76%; 当固有频率比 ϕ 为 1.05 时, 最优阻尼比参数为 0.07, 最大减振效率为 47.84%。调控小孔板实现了 TLCD 减振系统适合宽频激励的工况, 气浮光学平台动力响应的有效控制提高了实验精度。通过具体的 TLCD 动力减振实验可以进一步解决气浮光学平台在水平方向超低频减振的问题, 为超精密实验品质的提升提供了一种有效控制手段。

参 考 文 献

- [1] Zhu J Q, Zeng T Y, Pang X Y, et al. Primary discussion on engineering stability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(8): 16-23.
朱健强, 曾台英, 庞向阳, 等. 工程稳定性中的几个基本问题[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(8): 16-23.
- [2] Zhang W, Cui D, Cui Y J, et al. Modal testing and analysis of optical platform [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(S1): 71-76.
张伟, 崔鼎, 崔云俊, 等. 气浮隔振平台模态实验分析[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(S1): 71-76.
- [3] Zhou Y, Li C W, Xu X B, et al. Parameter optimization design of air-floating platform system for optical testing

instrument of liquid crystal glass panel [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(6): 994-999.

周扬, 李程伟, 徐筱波, 等. 液晶玻璃面板光学检测仪器气浮平台系统参数优化设计[J]. *计量学报*, 2019, 40(6): 994-999.

- [4] Feng S Y, Liu C S, Gu J J, et al. Evaluation of stability of holographic platform by digital phase-shifting interferometer[J]. *Physics Experimentation*, 2013, 33(9): 23-26.
冯淑艳, 刘成森, 顾佳佳, 等. 用数字相移干涉技术评价全息台的稳定性[J]. *物理实验*, 2013, 33(9): 23-26.
- [5] Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation and active control [EB/OL]. [2021-05-16]. <http://freit.free.fr/Structure%20Engineering%20HandBook/27.pdf>.
- [6] Reiterer M, Hochrainer M. Damping of pedestrian-induced bridge vibrations by tuned liquid column dampers[J]. *Pamm*, 2004, 4(1): 109-110.
- [7] Ruiz R O, Lopez-Garcia D, Taflanidis A A. Modeling and experimental validation of a new type of tuned liquid damper[J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227: 3275-3294.
- [8] Gao H, Kwok K S C, Samali B. Characteristics of multiple tuned liquid column dampers in suppressing structural vibration [J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(4): 316-331.
- [9] Balendra T, Wang C M, Rakesh G. Effectiveness of TLCD on various structural systems[J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(4): 291-305.
- [10] Lan W W. Study on the effectiveness of MTLCDs in suppressing the earthquakes-induced motions in highrise building [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2001, 17(2): 59-64.
蓝文武. 混合水箱装置对高层建筑结构地震反应控制效果的研究[J]. *世界地震工程*, 2001, 17(2): 59-64.
- [11] Chen B, Zhang Z L, Hua X G. Closed-form optimal calibration of a tuned liquid column damper (TLCD) for flexible structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 198: 106364.
- [12] Wang Z, Cao L, Ubertaini F, et al. Numerical investigation and design of reinforced concrete shear wall equipped with tuned liquid multiple columns dampers [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 6610811.
- [13] Wang Q H, Tiwari N D, Qiao H S, et al. Inerter-based tuned liquid column damper for seismic vibration control of a single-degree-of-freedom structure[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 184: 105840.
- [14] Yalla S K, Kareem A. Optimum absorber parameters for tuned liquid column dampers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(8): 906-915.