

文章编号: 1001-3806(2012)02-265-03

圆柱体腔振动稳定性研究

曹云玖 刘 烨 陈光龙 徐红霞

(上海工程技术大学 基础教学学院, 上海 201620)

摘要: 为了降低环境振动对光学谐振腔稳定性的影响, 设计了对振动不敏感的超稳腔, 采用有限元数值模拟的方法, 通过改变相关参量, 对两 U 型片支撑和双横梁支撑两种圆柱体腔的支撑方式进行了数值模拟, 得到了腔体的形变图。结果表明, 通过改进腔的支撑方式和调整支撑位置, 可以降低腔长对振动的敏感度, 找到腔长变化最小且两腔镜平行的关键支撑位置。该结果可用于激光稳频和高精密激光光谱实验中。

关键词: 激光光学; 光学腔; 数值分析; 关键支撑位置

中图分类号: TN243 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.031

Study on vibrational stabilization of cylindrical cavities

CAO Yun-jiu, LIU Ye, CHEN Guang-long, XU Hong-xia

(College of Fundamental Studies, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to decrease vibrational susceptibility of the optical cavities produced by environmental vibration and design ultra stable optical cavities, based on the finite element numerical analysis, the cylindrical cavities supported with double U-shaped plates and double beams were analyzed by varying the relevant parameters and the strain distribution were got. The results show that vibrational susceptibility of the optical cavities is decreased by optimizing mounting method and supporting position and the critical supporting position with minimum optical length and parallel mirrors is found. These results can be applied to laser frequency stabilization and high precision laser spectroscopy.

Key words: laser optics; optical cavity; numerical analysis; critical supporting position

引 言

光学谐振腔是激光器的重要组成部分, 为系统提供光学反馈。谐振腔特别是超稳谐振腔, 还是窄线宽激光器中的重要组成部分, 在高分辨激光光谱、基本物理常数测定等领域有着广泛的应用^[1-6]。在激光稳频中, 利用光学谐振腔作为频率参考标准, 把激光频率锁定在谐振腔上, 激光的频率稳定度由谐振腔的稳定度决定^[7-8]。根据腔长变化与频率变化的关系, 以波长 1064nm 的激光为例, 如果要使得中心频率漂移小于 1MHz, 腔长变化率 ($\Delta L/L$) 要小于 10^{-8} 。最简单的光学谐振腔是由两个反射镜相对放置实现的, 通常腔体是用低热膨胀的材料制成, 腔镜粘在腔体的两端。外界的振动、温度以及压力等因素会引起腔体的形变^[9-11], 使得腔镜之间的光学长度和平行度发生改变。

通过有限元数值分析的方法来改造腔的形状和支撑方式, 使其光程长度对振动不敏感, 这样不仅可以弥补振动隔离系统在技术上的困难, 而且降低了成本。参考文献 [12] 中主要研究了振动对长方体腔的影响。圆柱体腔在激光稳频和高精密光谱技术中有着广泛的应用, 作者通过有限元数值分析的方法对圆柱体腔由振动引起的弹性形变进行分析, 得到腔体形变图, 并通过改进腔的支撑方式和调整支撑位置, 补偿振动引起的形变, 从而降低谐振腔光程长度对振动的敏感, 优化圆柱体腔的结构和支撑。

1 有限元理论方法

A 点和 B 点表示的是一个弹性物体上的两点, 发生形变后, 点位置发生改变, 用 A' 和 B' 表示, 如图 1 所示。形变后 A 点在某个轴向上的形变位移可以用形变前后的坐标相减得到。例如 x 轴方向上位移大小 $\Delta x = x' - x$, x 与 x' 分别表示物体上 A 点形变前后 x 轴的坐标。

为了探测腔镜在形变下的位移, 在两腔镜上分别取两组探测点, 每组 9 个, 这两组探测点均匀的分布在通光孔的直径上, 这样, 两腔镜之间的光程长度变化量就可以用两组探测点之间的位移差来表示。在振动敏

基金项目: 上海工程技术大学校基金资助项目 (2009xy21)

作者简介: 曹云玖 (1978-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为激光精密控制。

E-mail: caoyunjiu@sues.edu.cn

收稿日期: 2011-05-18; 收到修改稿日期: 2011-06-09

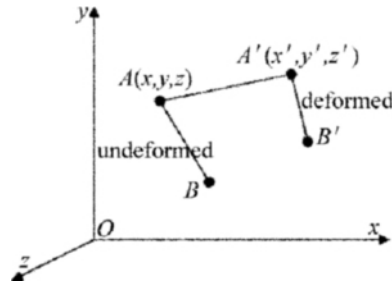


Fig. 1 Displacement and strain in an elastic solid

感度分析中,高频振动可通过常见的隔振装置来消除,只要分析较低频率的影响,外加频率远低于腔的共振频率,可以看成是一个静力施加在腔体上,把动态分析简化成静态分析,振动引起的加速度可以用作用在腔体上的重力加速度代替。

作者设计了两种方便有效的圆柱体腔支撑方式:两U型片支撑和双横梁支撑。腔体采用超低膨胀ULE材料,密度 $\rho = 2.21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量 $E = 6.67 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.17$ 。圆柱体腔长为100mm,直径为50mm,通光孔直径为10mm,镜片直径为20mm,厚度为6mm。

2 两U型片支撑的圆柱体腔

在圆柱体底部用两U型片支撑,两支撑片位置关

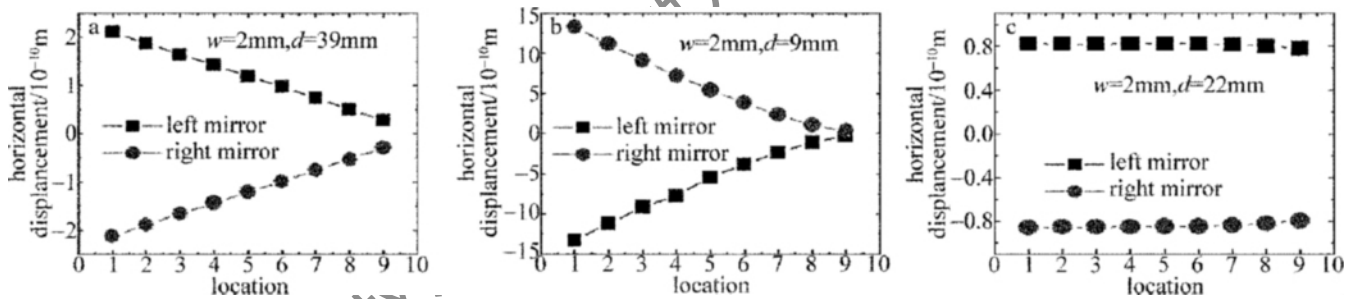


Fig. 3 Two mirrors' displacement of the cylindrical cavity with various position d when the thickness $w = 2\text{mm}$

如图3c所示。腔长变化还与支撑片厚度有关,改变支撑厚度,使得腔镜接近平行,不同的厚度下,两腔镜在通光方向位移量变化如图4所示。通过计算,得到厚度为2mm、距端点22mm时,腔长变化量最小,腔长对外界振动不敏感,这个特殊位置就是关键支撑位置,得到单位加速度下腔长变化 $\Delta L = 1.6 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

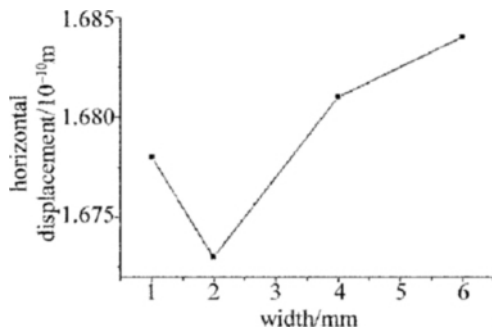


Fig. 4 The optical length of the cylindrical cavity with various w

于腔中心对称,如图2a所示。图2b是腔体在竖直向下的方向加大小为 9.8m/s^2 的加速度下的形变图。调节支撑片的厚度 w 和距离腔端点的位置 d 补偿腔体形变。

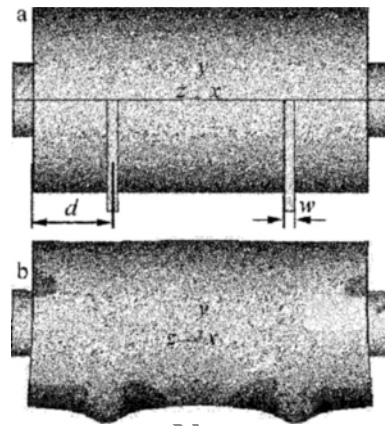


Fig. 2 a-3-D view of the cavity supported by double U-shaped plates b-the deformation of the cavity with gravity applied downward

经过有限元数值计算,腔体水平方向上的位移,与支撑片的厚度和位置有关。先让支撑片厚度不变,改变支撑位置,如图3a和图3b所示,在离端点为9mm和39mm支撑时,两镜不平行,且左右腔镜的位移正好相反,所以在这两个值中间某个值,可以使得两镜平行,当调整支撑位置距离端点为22mm时,两镜平行,

3 双横梁支撑的圆柱体腔

在圆柱体底部开两凹槽,凹槽方向与腔截面方向

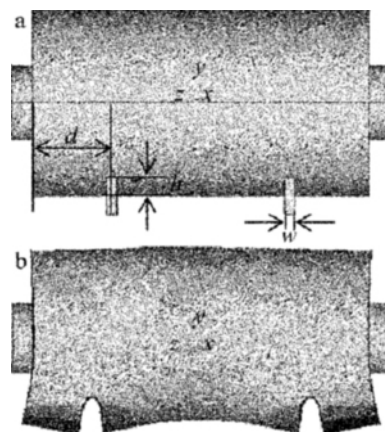


Fig. 5 a-3-D view of the cavity supported by double beams b-deformation of the cavity with gravity applied downward

平行,通过两个横梁支撑腔体,位置关于腔中心对称,如图5a所示。图5b是腔体在竖直向下的方向加大小为 9.8m/s^2 的加速度下的形变图。通过调节所开凹槽的宽度 w 、凹槽深度 h 以及凹槽中心到腔端点的距离 d ,补偿腔体形变。

通过有限元数值模拟,凹槽宽度对腔长影响不大,把槽宽度 w 固定为 2mm 。通过改变槽的深度 h ,调整槽的位置 d ,来补偿腔体形变。在凹槽深度分别为

5mm 和 15mm 、凹槽中心位置距端面分别为 22mm 和 15mm 时,两镜平行,如图6a和图6b所示。图6a和图6b中左右腔镜位移变化的符号相反,所以在两深度之间一定有一个腔长改变量最小值。反复调整凹槽深度和位置,如图6c所示,当调整槽的深度为 12mm ,距端面为 18mm ,得到关键支撑位置。在这个位置两腔镜平行,腔体在水平方向位移量最小,得到单位加速度下腔长变化为 $\Delta L = 1.4 \times 10^{-11}\text{m}$ 。

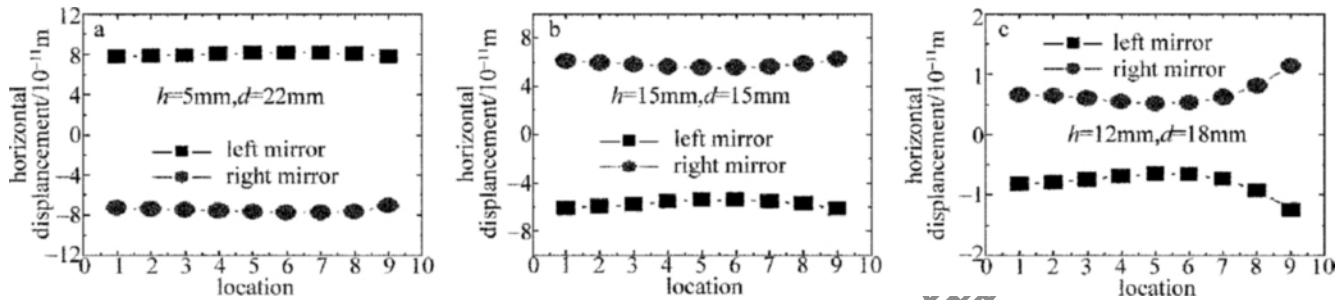


Fig. 6 Two mirrors' displacement of the cylindrical cavity with various depth h and position d when the thickness $w = 2\text{mm}$

4 结论

通过有限元数值计算模拟,对圆柱体腔振动形变进行分析,得到腔镜在通光方向上的位移形变图。在U型片支撑方式中,给出不同厚度以及不同位置下的位移图,得到两镜平行及位移变化最小时的关键支撑位置,单位加速度下腔长变化为 $1.6 \times 10^{-10}\text{m}$ 。在双横梁支撑中,腔长变化大小主要与槽的深度和位置有关,给出了不同位置和深度的位移图,最后得到关键支撑位置,单位加速度下腔长变化为 $1.4 \times 10^{-11}\text{m}$ 。在关键支撑位置,两腔镜相互平行,谐振腔的长度对外界振动不敏感。从模拟计算结果可以看到,双横梁支撑方式要优于两U型片支撑方式,通过有限元数值分析方法优化了腔的结构和支撑。所得结果可用于稳频实验和高精密激光光谱实验中。

参考文献

- [1] TAKAMOTO M, HONG F L, HIGASHI R, *et al.* An optical lattice clock [J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321-324.
- [2] TAN Zh Q, LONG X W. Influence of cavity length change on measurement of CW cavity ring-down [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 438-441 (in Chinese).
- [3] HU Ch X, ZHENG M, DENG T *et al.* Influence of air gap on the lasing wavelength of the fiber grating external cavity semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 177-179 (in Chinese).
- [4] LIN X. Alternative scheme for generation of atomic Schrödinger cat states and entangled coherent states in an optical cavity [J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2010(5): 927-930.
- [5] TAN Zh Q, LONG X W. Design of driving circuits of semiconductor lasers for measurement of continuous-wave cavity ring-down technology [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 27-29 (in Chinese).
- [6] ZHOU H Q, XIA G Q, DENG T, *et al.* Influence of external cavity length variation on the lasing wavelength of the fiber grating external cavity semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 476-477 (in Chinese).
- [7] YOUNG B C, CRUZ F C, ITANO W M, *et al.* Visible lasers with subhertz linewidths [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(19): 3799-3802.
- [8] SUN X T, LIU J Q, ZHOU J, *et al.* Confocal Fabry-Perot interferometer for frequency stabilization of laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1005-1008 (in Chinese).
- [9] MIAO J. Study of vibration sensitivity of optical cavities used for stable and narrow line width laser system [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008: 16-28 (in Chinese).
- [10] YANG T. Researching the stabilization of ultra stable Fabry-Perot cavities [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007: 15-28 (in Chinese).
- [11] CHEN L S, HALL J L, YE J. Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Perot cavities [J]. *Physical Review*, 2006, A74(5): 053801/1-053801/13.
- [12] YANG T, LI W B, ZANG E J, *et al.* Decreased vibrational susceptibility of Fabry-Perot cavities via designs of geometry and structural support [J]. *Chinese Physics* 2007, 16(5): 1374-1385.