

一种用于激光雷达的微振镜设计

陆 英

(徐州工业职业技术学院机电工程学院,江苏 徐州 221140)

摘 要:为了满足激光雷达系统高线数和远距离探测的技术要求,提出了一种用于车载激光雷达系统的电磁式激光微振镜扫描机构,反射镜直径为 12 mm,微振镜采用 TC4 钛合金材料,提出了“工形”的机械结构方案,利用 Nastran 软件力学仿真分析,并搭建试验平台测试了微振镜的偏转角度和谐振频率等性能。实验结果表明:激光微振镜的一阶谐振频率为 298 Hz,最大偏转角度为 8.12°,满足技术要求,相比于传统 MEMS 振镜,在保证高扫描频率的同时,提高了通光口径,对激光雷达的进一步产业化发展有重要意义。

关键词:激光雷达;微振镜;扫描机构;谐振频率

中图分类号:TB872;TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.017

A design of micro scanning mirror based on laser radar system

LU Ying

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)

Abstract: In order to meet the technical requirements of high line count and long-distance detection of lidar systems, an electromagnetic laser micro scanning mirror mechanism for hybrid lidar systems is proposed. The mirror diameter is 12 mm, and the micro scanning mirror is made of TC4 titanium alloy material, and the "I-shaped" mechanical structure scheme is proposed. Nastran software is used for mechanical simulation analysis, and a test platform is built to test the performance such as deflection angle and resonance frequency of the micro scanning mirror. The experimental results show that the first-order resonance frequency of the laser micro scanning mirror is 298 Hz, and the maximum deflection angle is 8.12°, which satisfying the technical requirements. Compared with traditional MEMS scanning mirrors, it ensures high resonance frequency and improves the optical aperture, which is of great significance to the further industrialization development of lidar.

Keywords: lidar; micro scanning mirror; scanning mechanism; resonant frequency

1 引 言

随着 5G 技术的不断发展,自动驾驶技术的迎来了新一轮的发展热潮,已成为当今世界的科学技术焦点之一,无线雷达、毫米波雷达和激光雷达是自动驾驶中提供反馈的重要传感器装置^[1-3]。其中激光雷达由于其高的探测分辨率

和快速的响应成为自动驾驶汽车在 100 km/h 车速运动下的必备^[4-5]。在 ICVCTO 峰会上华为全球首发了 96 线符合车规级具备量产能力的激光雷达产品,北汽极狐 HBT 成为首个搭载华为量产激光雷达的车型。

激光雷达主要分为机械型和固态型。机械型由

作者简介:陆 英(1967 -),女,硕士,副教授,主要从事机械设计及理论,CAD/CAM 方向的研究。E-mail: xzdsly@126.com。

收稿日期:2021-08-12;**修订日期:**2021-10-25

于体积大价格昂贵已逐渐被固态型取代^[6-8],固态型激光雷达又分为 MEMS 型和相控阵型,相控阵型被认为是最理想的激光雷达产品,具有无机械部件和精度高的优点,但当前由于技术成熟度和价格等原因还不能量产,所以当前研究的热点集中在 MEMS 型激光雷达上。MEMS 型激光雷达的扫描机构为可旋转的 MEMS 振镜,体积小集成度高^[9]。文献[10]设计了 MEMS 和阵列 APD 组成的激光雷达,探测距离 20 m,测距精度 40 cm。但当前 MEMS 的制造工艺使其 MEMS 镜面的有效通光口径有限,最大的仅为 7 mm,这制约了激光雷达的探测距离^[11-13]。

为了进一步提升激光雷达探测距离,扩大扫描振镜通光口径,本文设计了基于电磁式的 12 mm 直径的激光振镜,提出了“工形”的机械结构方案,并利用 Nastran 软件进行了力学仿真分析,一阶模态为 304 Hz,并搭建试验平台测试了微振镜的偏转角度和谐振频率等性能。实验结果表明:激光微振镜的一阶谐振频率为 298 Hz,与仿真结果相比误差为 2%,最大偏转角度为 8.12°。

2 微振镜激光雷达系统

微振镜激光雷达系统主要分为激光发射端,激光接收端,光束扫描端和 MCU 控制端四个部分,如图 1 所示。

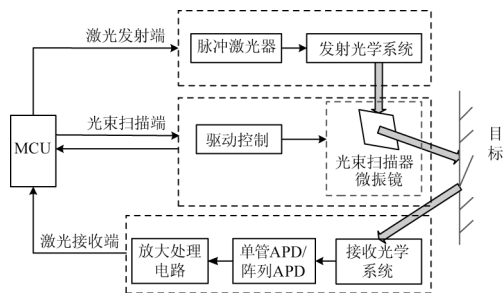


图1 微振镜激光雷达原理框图

Fig.1 Schematic diagram of the micro scanning lidar

在激光发射端,主要包括脉冲激光器和发射光学系统,脉冲激光器负责发射 Barker 脉冲序列,发射光学系统一般选用激光二极管配合激光准直光学系统来完成,实现 mrad 量级的发散角要求。在激光接收端,主要包括接收光学系统,单管 APD/APD 阵列和放大处理电路。接收光学系统一般采用鱼眼透镜以增大接收光学视场,光信号经过 APD 接收通过一系列电流放大和电压放大处理,提供给 MCU,以进行每个点的测距处理。光束扫描端主要包括光束

扫描微振镜和驱动控制,MCU 通过电机驱动控制激光微振镜进行扫描,从而扩大激光雷达视场,达到多线束的目的。MCU 控制微振镜扫描和 APD 采集进行协同工作,最终形成 3D 点云文件,实时确定目标形状及位置^[14-15],如图 2 所示。



图2 典型激光雷达 3D 点云图像

Fig.2 The typical 3D point cloud image of lidar

3 电磁式微振镜设计

3.1 机械机构设计及理论分析

电磁式微振镜是利用法拉第电磁感应定律设计而成的,主要分为四个部分,包括发射镜、金属弹片、线圈和磁钢,如图 3 所示。通过给线圈供电,产生电磁力的激励,使镜子发生偏转,MCU 产生特定频率的正弦信号使金属振片带着反射镜负载工作在谐振状态,从而实现光束扫描的功能。

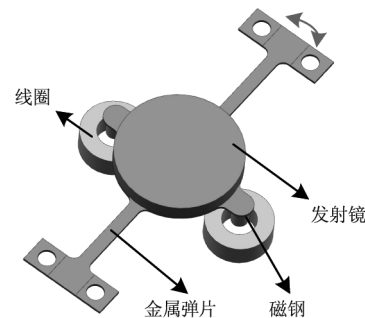


图3 电磁式微振镜机械设计

Fig.3 Mechanical design of the electromagnetic micro-scanning

当微振镜系统发生角度 θ 偏转时,反射镜以金属弹片中心轴为转动轴开始转动,系统的力矩平衡方程如下:

$$I\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K\theta = M \quad (1)$$

其中, I 为振镜的转动惯量; D 为阻尼系数; K 为扭转刚度; M 为线圈与磁铁产生的扭转力矩。

振镜主要包括 K9 玻璃反射镜、金属弹片和磁钢,它们共同作用产生的转动惯量可以写做:

$$I = \frac{1}{4}\rho_s \pi R_s^4 t_s + \frac{1}{4}\rho_m \pi R_m^4 t_m + \frac{1}{4}\rho_c \pi R_c^4 t_c \quad (2)$$

其中, ρ_s, R_s 和 t_s 为玻璃反射镜的密度、半径和厚度; ρ_m, R_m 和 t_m 为金属振片的密度、宽度和厚度; ρ_c, R_c 和 t_c 为磁钢的密度、半径和厚度。扭转刚度 K 可以表示为:

$$K = \frac{G_{yx}\omega h^3}{3l} \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{h}{\mu\omega} \tanh \frac{\pi\omega}{2h} \right) \quad (3)$$

其中, ω, h 和 l 分别为金属弹片的宽度、厚度和长度; $\mu = \sqrt{G_{yx}/G_{yz}}$ 为不同材料各向异性扭转方向不同。

当微振镜绕轴做机械谐振时, 谐振频率为:

$$f = \frac{\sqrt{K/I}}{2\pi} \quad (4)$$

反射镜能够偏转的最大角度可以估计为:

$$\theta(\omega_n) = \frac{M}{2\xi I} \quad (5)$$

其中, ξ 为阻尼系数, 在这里我们按照空气阻尼模型计算, 阻尼系数为 0.0011。因此所需的力矩 M 为:

$$M = \theta(\omega_n) \cdot 2\xi I \quad (6)$$

其中, $M = F \cdot L, F$ 为安培力; L 为力的作用距离。

$$F = kNBIL \quad (7)$$

其中, N 为线圈匝数; B 为磁感应强度; L 为每匝线圈在磁场中的有效长度; k 为常数, 通过更换线圈和磁铁来实现。

3.2 激光振镜机械仿真

利用 Nastran 进行有限元仿真, 微振镜系统各元件尺寸和材料参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 微振镜系统尺寸参数表

Tab. 1 The size parameter table of micro scanning system

参数	符号	数值
反射镜直径/mm	R_s	12
反射镜厚度/mm	t_s	1
金属振片宽度/mm	R_m	1.55
金属振片厚度/mm	t_m	0.4
金属振片长度/mm	L	35
磁刚半径/mm	R_c	3
磁钢厚度/mm	t_c	2
线圈匝数	N	750
铜线直径/mm	r	0.35

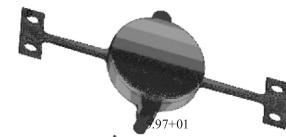
表 2 微振镜系统材料参数表

Tab. 2 Material parameters table of micro scanning system

项目名称	材料名称
反射镜	K9 玻璃
金属振片	钛合金 TC4
磁钢	N50
线圈	铜

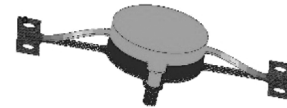
将上述尺寸参数和材料参数代入到 Nastran 进行网格绘制并有限元计算, 得到的模态振型及频率如图 4 所示。

Patran 2018 01-Feb-21 23:23:32
Fringe:Default,A1:Mode 1:Freq.=304.93,Eigenvectors.Translational,Magnitude,(NON-LAYERED)
Deform:Default,A1:Mode 1:Freq.=304.93,Eigenvector,Translational.



(a)

Patran 2018 01-Feb-21 23:26:38
Fringe:Default,A1:Mode 2:Freq.=400.47,Eigenvectors.Translational,Magnitude,(NON-LAYERED)
Deform:Default,A1:Mode 2:Freq.=400.47,Eigenvector,Translational.



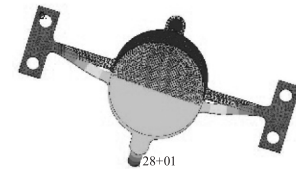
(b)

Patran 2018 01-Feb-21 23:27:40
Fringe:Default,A1:Mode 3:Freq.=1371.8,Eigenvectors.Translational,Magnitude,(NON-LAYERED)
Deform:Default,A1:Mode 3:Freq.=1371.8,Eigenvector,Translational.



(c)

Patran 2018 01-Feb-21 23:28:20
Fringe:Default,A1:Mode 4:Freq.=2062.9,Eigenvectors.Translational,Magnitude,(NON-LAYERED)
Deform:Default,A1:Mode 4:Freq.=2062.9,Eigenvector,Translational.



(d)

图 4 微振镜系统一阶到四阶的模态分析图

Fig. 4 The first-order to fourth-order modal analysis diagrams of the micro scanning system respectively

从上面的仿真结果可以看出一阶模态为 304.93 Hz, 二阶模态为 400.47 Hz, 三阶模态为 1371.8 Hz, 四阶模态为 2062.9 Hz。一阶模态和二阶模态有约 96 Hz 的频率裕量, 因此振镜在 1 阶模态频率上稳定工作。

4 测试试验及结果分析

根据表 1 和表 2 的参数机械加工激光微振镜实物如图 5 所示。

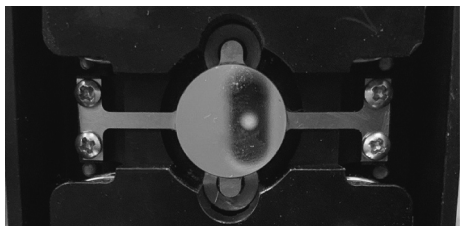


图 5 激光微振镜实物图

Fig. 5 Physical drawing of the micro scanning system

4.1 谐振频率测试

利用扫频法可以得到微振镜的一阶模态频率,即通过给线圈施加从 1 ~ 500 Hz 的正弦信号,测量振镜的转角大小变化。如图 6 所示即为不同频率下振镜的摆动幅度变化,在 298 Hz 出达到峰值,与仿真结果 304 Hz 基本符合,误差为 2.0 %,验证了仿真的正确性和可行性。

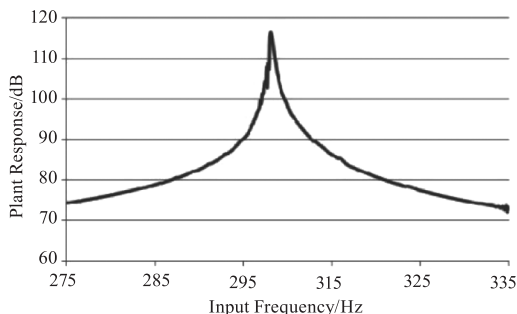


图 6 激光微振镜谐振频率测试图

Fig. 6 The test diagram of laser micro scanning vibration resonance frequency

4.2 偏转角度测试

利用加工好的激光微振镜搭建如图 7 所示的实验平台。激光器发出一束准直光束,通过激光微振镜进行扫描,在一定距离下放置坐标纸,通过读取坐标纸的长度计算振镜的最大偏转角度。

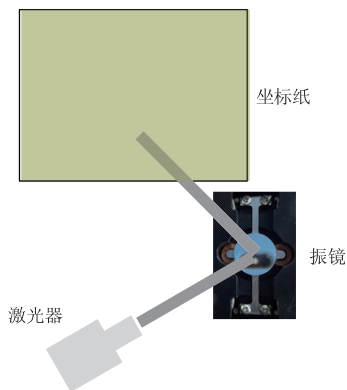


图 7 实验平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental platform

镜子偏转的角度可用如下公式进行计算:

$$\theta = \arctan\left(\frac{l}{2m}\right) \tag{8}$$

其中, m 为激光微振镜到坐标纸的距离; l 为光束在坐标纸上的距离,示意图如图 8 所示。

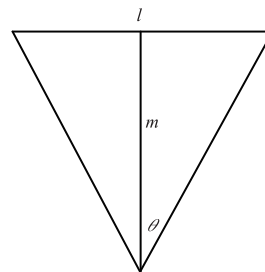


图 8 角度计算示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the angle calculation

实际测量中测得激光微振镜到坐标纸的距离为 900 mm,光束在坐标纸上的距离为 256.8 mm。因此计算得到镜子偏转角度为 8.12°,如图 9 所示。

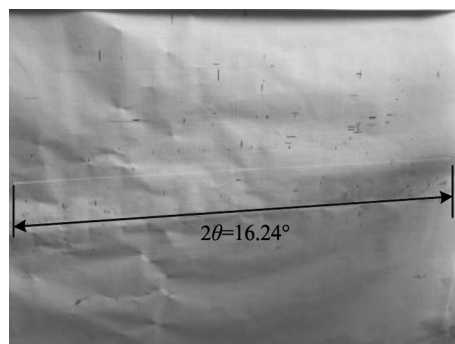


图 9 角度范围测试图

Fig. 9 Test diagram of the angle range

在测试角度范围的同时,也测试的微振镜的角度精度,因为微振镜一直处于谐振状态,本文测试了最大角度的角度精度,角度精度优于 0.005°。

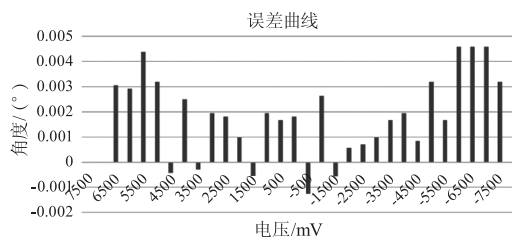


图 10 角度精度测试图

Fig. 10 Test diagram of the angle accuracy

本文设计的微振镜的反射镜尺寸达 12 mm,比传统的 MEMS 振镜负载反射镜约大 2 倍,所能接收到的能量是 MEMS 式激光雷达的 4 倍,因此在不改变激光光源和探测器的条件下,本文所设计的电磁式微振镜的激光雷达系统的探测距离约为 MEMS 式激光雷达的 4 倍。

5 结 论

为适应当前车载激光雷达领域对探测距离的要求,本文设计了一种基于电磁式的激光振镜,振镜采用“工形”的机械结构方案,利用 Nastran 软件进行了力学仿真分析,一阶模态为 304 Hz,并搭建试验平台测试了微振镜的偏转角度和谐振频率性能。实验结果表明:激光微振镜的一阶谐振频率为 298 Hz,误差约为 2%,最大偏转角度为 8.12°。对车载激光雷达扩大探测距离提供一种可行性方案。

参考文献:

- [1] Zeng H M, Li S, Zhang Z Y, et al. Optics and Precision Engineering[J]. 2019, (7): 1444 - 1450. (in Chinese)
曾昊旻, 李松, 张智宇, 等. 车载激光雷达 Risley 棱镜光束扫描系统[J]. 光学精密工程, 2019, (7): 1444 - 1450.
- [2] Chen X D, Zhang J C, Pang W S, et al. Key Technology and application algorithm of lidar for intelligent driving [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46 (7): 34 - 46. (in Chinese)
陈晓冬, 张佳琛, 庞伟淞, 等. 智能驾驶车载激光雷达关键技术与应用算法[J]. 光电工程, 2019, 46 (7): 34 - 46.
- [3] Raj T, Hashim F H, Huddin A B, et al. A survey on LiDAR scanning mechanisms[J]. Electronics, 2020, 9 (5): 741.
- [4] Tian X R, Xu L J, Xu T, et al. Calibration of installation angles for mobile LiDAR scanner system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43 (10): 3292 - 3292. (in Chinese)
田祥瑞, 徐立军, 徐腾, 等. 车载 LiDAR 扫描系统安置误差角检校[J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (10): 3292 - 3292.
- [5] Cao K F, Hu S X. Aml-2 vehicle lidar measurement of boundary layer pollutant profile[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6 (2): 146 - 153. (in Chinese)
曹开法, 胡顺星. AML-2 车载激光雷达测量边界层污染物分布廓线[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6 (2): 146 - 153.
- [6] Chen G B, Gao Z H, He L, et al. Step-by-step automatic calibration algorithm for exterior parameters of 3D lidar mounted on vehicle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (10): 249 - 255. (in Chinese)
陈贵宾, 高振海, 何磊, 等. 车载三维激光雷达外参数的分步自动标定算法[J]. 中国激光, 2017, 44 (10): 249 - 255.
- [7] Jiang H J, Lai J C, Wang C Y, et al. Research on ranging characteristics and ranging accuracy of lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38 (5): 229 - 235. (in Chinese)
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38 (5): 229 - 235.
- [8] Giese T, Janes J. 2D MEMS scanning for LIDAR with sub-Nyquist sampling, electronics, and measurement procedure [C] // Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2015. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [9] Kim G, Eom J, Park Y. A hybrid 3D LIDAR imager based on pixel-by-pixel scanning and DS-OCDMA [C] // Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVIII. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [10] Wen S C. Research on lidar based on MEMS scanning galvanometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics, University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
温少聪. 基于 MEMS 扫描振镜的激光雷达的研究[D]. 上海: 中国科学院大学中国科学院上海硅酸盐研究所, 2018.
- [11] Milanovi? V, Kasturi A, Yang J, et al. Closed-loop control of gimbal-less MEMS mirrors for increased bandwidth in LiDAR applications [C] // Laser Radar Technology and Applications XXII. International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [12] Chen H B. Research on linear array lidar based on 45° scanning mirror [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
陈怀波. 基于 45° 扫描转镜的线阵激光雷达研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [13] Wang D, Watkins C, Xie H. MEMS mirrors for LiDAR: a review[J]. Micromachines, 2020, 11 (5): 456.
- [14] Woong Y H, Norbert D, David B, et al. MEMS-based lidar for autonomous driving[J]. E & I Elektrotechnik und Informationstechnik, 2018, 135: 408 - 415.
- [15] Luo D. Design of 3d lidar prototype system based on MEMS micromirror scanning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
罗栋. 基于 MEMS 微镜扫描的三维激光雷达样机系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.