文章编号:1001-5078(2020)09-1048-09

·激光应用技术 ·

三维激光扫描定位光机系统优化设计

何秉高1,孙向阳1,孟繁磊1,赵希禄2

(1. 长春大学电子信息工程学院,吉林长春 130022;2. 埼玉工业大学工学部,日本 埼玉 3690293.)

摘 要:提出了一种三维激光扫描定位系统优化设计方案,主要对激光发射/接收光机系统进行了消热化设计,并构建了合理化选择弹性隔圈设计参数的数学模型;同时对U形运动框架进行了尺寸参数优化设计。分析结果表明,该光机结构在 -10 ℃、50 ℃的两个极限温度下,镜组的最大轴向变形量均小于0.1 mm 的装配误差;透镜的最大应力分布值为14.365 MPa,小于材料的屈服强度;优化后的运动框架一阶固有频率提高至2236.2 Hz,能够承受10 g 加速度的冲击。测试结果表明,系统的最大测距误差为32.6 mm,小于0.1 mm 的误差要求;重复性误差为±27 mm,满足技术指标要求。

关键词:激光扫描;消热化;弹性隔圈;优化设计;误差 中图分类号:TN247 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.09.004

Optimization design of the 3D laser scanning and locating opto-mechanical system

HE Bing-gao¹, SUN Xiang-yang¹, MENG Fan-lei¹, ZHAO Xi-lu²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China;2. Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology, Saitama 3690293, Japan)

Abstract: An optimization design scheme of 3D laser scanning and locating system was proposed in this paper. Athermalization design was conducted for the laser launching and receiving opto-mechanical system. Moreover, a mathematical model with elastic space ring design parameters was rationally chosen. The dimensional parameter optimization design was implemented for the U sports framework. The findings indicated that this opto-mechanical structure was kept at two limit temperatures ($-10 \ C$ and 50 $\ C$). The maximum axial deformation of the mirror group was less than 0. 1 mm of the assembly error. The maximum stress distribution value of the lens was 14.365 MPa, which was less than the yield strength of materials. The first-order inherent frequency of the optimized sports framework was increased to 2236.2 Hz and it could undertake the impact of 10 g accelerated velocity. The test results showed that the maximum range error of the system was 32.6 μ m, which was less than 0.1 mm of the error requirement. The repeatability error was $\pm 27 \ \mu$ m, meeting the requirements of technical indexes.

Keywords: laser scanning; athermalization; elastic ring; optimization design; error

1 引 言

随着智能制造技术的不断提高,使得工业机器

人代替半自动、人工操作成为新的发展趋势。为了 提高工业机器人的环境感知程度,非接触式检测技

基金项目: 吉林省教育厅科学技术项目(No. JJKH20191194KJ); 吉林省科技厅优秀青年人才基金项目(No. 20180520225JH); 教育部"春晖计划"项目(轨道交通障碍物的快速检测关键技术研究)资助。

作者简介:何秉高(1983 -),男,讲师,博士,研究方向为光电检测技术。E-mail:asdf12383@163.com 通讯作者:孙向阳(1978 -),男,副教授,博士,研究方向为智能检测技术。E-mail:38004380@qq.com 收稿日期:2019-12-18;修订日期:2020-02-26 术业已成为其必不可少的辅助手段。目前多采用机 器视觉来完成工作目标或障碍物的检测、识别、定 位。但是单目视觉技术获取的图像缺乏深度信息, 极易导致执行过程中的空间误判^[1-3];双目立体视 觉技术虽然可以获取深度信息,但是其主要部件 CCD 相机对环境光照影响敏感,导致获取的图像信 息计算处理难度加大,使得识别效率和准确度大幅 度下降;而且其测量范围受相机基线长度的限制,也 不满足大尺寸目标的检测要求。

三维激光扫描技术能够快速获取被测目标的空间三维坐标信息,并能实施构建点云模型^[4-5],对多样化场景的表述准确,已在航空航天、工业检测、无人驾驶、逆向工程等领域得到广泛的应用。但是该 类扫描技术装置的光机结构尺寸较大,且在复杂环 境下对多样化目标进行检测时,难以获取连续、可 靠、高精度的检测定位结果。

因此,本文提出了一种三维激光扫描定位系统 优化设计方案,主要对其涉及的激光发射、接收光机 子系统与运动扫描子系统进行了设计与优化;以提 高扫描定位系统在受到外界温度变化、冲击、振动 时,连续工作的可靠性、准确性及稳定性。

2 激光扫描发射/接收光机系统设计

2.1 激光发射/接收系统光学设计

激光发射与接收光学系统是该扫描定位系统的 主光学系统。

大多数激光扫描设备的结构较为复杂且体积较 大,主要原因是由于其主光学系统的发射子系统与 接收子系统为分立式平行光路设计。

为了解决这一问题,简化系统的光机结构,在设 计主光学系统时,本系统采用了共光路式垂直设计形 式;以达到减小光机系统安装误差、提高调校精度及 效率、降低加工成本的目的,共光路设计如图1所示。

为了满足大尺寸目标的检测要求,发射光学系 统采用了准直扩束光机结构,以减小出射激光发散 角;同时为了避免接收系统能量过度饱和并满足2~ 16 m的探测距离要求,设计时采用同心光学系统中 的伽利略望远系统并结合变波束透镜系统。为了进 一步获得能量集中的光斑,需要达到八倍扩束比,故 在光学设计时,采用了三次准直扩束。

接收光学系统采用了透射式会聚系统,以满足 接收系统能量比较集中、体积小的要求。



图 1 发射、接收共光路系统布局 Fig. 1 Common optical path arrangement of the launching and receiving system

图1中,1为激光光源,以分束棱镜4为界限, 透镜2~3、8~11是发射光路,透镜5~7、8~11是 接收光路;8~11为激光发射、接收光路共用部分。 其工作过程为,发射的激光束经透镜1、分束镜4、透 镜8~11投射到检测目标上;所产生的激光回波光 束由透镜8~11经分束镜4,再由透镜5~7汇聚到 接收像敏面上,形成激光光斑。为了达到2~16 m 的检测距离,需调整接收像面上的光斑大小,故将透 镜2设计为调焦镜。

发射、接收光学评价效果采用光学系统点列图, 如图 2、3 所示。





由分析结果可知,在16m检测距离时,发射系统的 艾里 斑 为442 mm,接收系统艾里 斑 为4441.4 mm,发射、接收视场的均方根半径(RMS)远小于艾里斑半径,表明在理论光学设计时,达到能量集中、亮度高且分布均匀的目的。







2.2 发射/接收系统光机结构设计

由光学系统设计结果可知,发射光学系统各组态 Z 轴方向的总体尺寸均小于 320 mm,系统在 Y 轴方向上的总体尺寸小于 130 mm,能够实现系统小型化。

一般来说,多透镜组支撑安装结构形式有:圆筒式、桁架式与箱壳式。为了保证发射与接收光路的透镜 8~11 的共光路结构的稳定性,达到光轴一致性;在满足检测指标的前提下,同时兼顾设计、制造、装配与调校的要求,所以选择了总体圆筒式的设计,在结构上既可以达到提高整体强度与固有频率的目的,又可以使整体结构布局紧凑,以减少常规的振动、冲击对系统的影响,光机结构设计见图 4 所示。



3 前置多透镜组消热结构优化设计

相比较而言,前置多透镜组由扩束透镜9、10、 11 组成,它们口径较大,极易受环境温度变化的影 响,且属于激光扫描定位发射/接收光学系统的共用 部分,对系统光学性能影响权重最高,因此消热结构 设计主要集中在此部分进行。

3.1 前置多透镜组安装结构初始设计与分析

由于前置系统整体尺寸不大,光学元件的轴向 距离较小,为了达到保持整体的轴向一致性及简化 系统结构的要求,各镜组的结构不采用模块化设计, 对整个通道进行整体设计,胶合透镜9~11 均安装 在主镜筒中。透镜9、10 与10、11 分别采用隔圈1、2 来固定透镜组的间距,之后压圈进行整体定位,如图 5 所示。



图 5 前置扩束系统光机结构图

Fig. 5 Opto-mechanical structure of the front beam system

镜组装配体在 20 ℃最大轴向变形量为 2.46 × 10⁻⁶mm,各透镜的最大应力分布值均远小于 BK7 及 SF8 玻璃的屈服强度,此时系统装配设计合理。

镜组装配体在 - 10 ℃及 50 ℃时最大轴向变 形量分别为 0.041 mm 及 0.046 mm,符合装配要 求精度 0.1 mm;但是,各透镜的最大应力值均大 于 BK7 及 SF8 玻璃的屈服强度,其中透镜 3 的两 个镜片在两个极限温度下,最大应力值已达 80 MPa 以上,此时透镜元件已失效,光学系统已不能 工作。

3.2 前置多透镜组安装结构消热设计与分析

因为该激光扫描定位光学系统为非成像的形 式,在满足技术指标的同时,并通过分析对比光学被 动式、机械被动式与电子主动式三种消热技术的基 础上^[6-7],选择了机械被动式的消热设计方法。主 要通过改进及优化隔圈设计,并辅以挠性压圈安装 来进行消热化设计。

3.2.1 弹性隔圈设计

原隔圈1的主要功能为保持光学元件的准确空间位置,虽然考虑了超环接触面类型,但是忽略了温差变化的因素,所以采用改进的弹性隔圈来替代传统隔圈,如图6所示。



图 6 弹性隔圈 1 结构设计 Fig. 6 Structure design of No. 1 elastic ring



图 7 弹性隔圈 1 结构优化设计参数选择

Fig. 7 Parameters selected for the optimal structural design of No. 1 elastic ring

通过有限元分析可知,隔圈结构在改进设计中, 长条孔平面投影的长度及半径对结构的最大应力分 布值影响最大;如图7所示,故选择长度(Length)与 半径(Radius)作为优化设计变量,并将最大应力分 布值作为目标函数,通过优化设计分析,得出三者之 间的函数关系,如图8所示。

图 8 的结果表明,长度与半径的数值变化对最 大应力分布值影响明显,近似成线性关系。





and equivalent stress maximum

为了进一步合理地选择设计参数,采用多元线 性回归法来建立三者的数学模型。其初始模型表达 式为:

$$y_a = b_0 + b_1 L_1 + b_2 R_1 \tag{1}$$

式中, b_0 、 b_1 、 b_2 为待拟合参数; $L_1 \in R^{10\times 1}$ 为长度变量, $R_1 \in R^{10\times 1}$ 为半径变量; y_a 为估计值;y 为最大应力值,且 $y \in R^{10\times 1}$ 。

选择基于线性回归的最小二乘法作为目标函数,见公式(2):

$$I = \frac{1}{2n} \min \sum_{i=1}^{n} (y_a^{(i)} - y^{(i)})^2$$
 (2)

之后,采用最优化算法中的梯度下降法,拟合出 b₀、b₁、b₂的参数值,迭代次数与拟合误差的关系如 图9所示,最终获得的数学模型见公式(3):

 $y_1 = 0.1022L_1 + 0.0144R_1 + 0.0046$ (3) 式中, y_1 为最大应力值; L_1 为长度值; R_1 为半径值。

利用公式(3),可以根据实际情况,来解算出弹 性隔圈合理的结构设计参数。





较之隔圈1多引入了一个参数设计变量,即两个长 条孔平面投影的间距(D₂),见图11。设计参数优化 结果见表1,拟合公式见式(4)。



图 10 弹性隔圈 2 结构设计





图 11 弹性隔圈 2 结构优化设计参数 Fig. 11 Parameters selected for the optimal structural design of No. 2 elastic ring

表1 设计参数优化结果

Tab. 1 Optimized results of main design parameters

Name	Length (L_2)	Radius(R_2) /mm	Distance(D_2) /mm	Equivalent Stress Maximum(y_2) /MPa
1	30	3.5	28	9.400
2	30	3.5	26	24.924
3	30	3.5	30.5	5.757
4	27	3.5	28	7.916
5	33	3.5	28	11. 292
6	30	3	28	6.820
7	30	4.5	28	12.085
8	27.5	3	26.5	11.695
9	28	3	30	4. 672
10	32.5	3	26	15.867
11	32.5	3	30	6. 493
12	27.5	4.5	26.5	25.255
13	28	4.5	30	6.060
14	32.5	4.5	26.5	34.089
15	32.5	4.5	30	7.985

$$y_2 = 0.222L_2 + 0.0294R_2 + 0.205D_2 + 0.0085$$
(4)

式中,*y*₂ 为最大应力值;*L*₂ 为长度值;*R*₂ 为半径值; *D*₂ 为间距变量。

经优化设计并考虑到加工的实际情况,弹性隔 圈1、2确定的设计参数分别为:

$$\begin{cases} L_1 = 24 \text{ mm} \\ R_2 = 1.5 \text{ mm} \end{cases}$$
(5)

$$\begin{cases} L_2 = 28 \text{ mm} \\ R_2 = 3 \text{ mm} \end{cases}$$
(6)

 $l_{D_2} = 30 \text{ mm}$

3.2.2 设计结果分析

之后,采用挠性压圈,并设计为随温度变化可实 时调整轴向变形量的结构,以实现轴向一致性可控, 再选择可研磨材料,以实现压圈厚度可控。

为了进一步验证消热结构设计效果,在有限元 分析软件中,导入改进设计的前置多透镜组的结构 模型,在添加重力、温度及预紧力的相关载荷的基础 上,进行镜组的最大轴向变形量与透镜9、10、11 的 最大应力分布值(见表2)的分析。



图 12 改进的前置扩束系统光机结构图

Fig. 12 Opto-mechanical structure of the redesign

front beam system

表2 优化设计最大应力分布(MPa)

Tab. 2 The maximum stress of redesign(MPa)

N	Temperature			
Ivame	– 10 °C	20 °C	50 °C	
Lens9	9.866	0.0043	9.902	
Lens10a	13.306	0.0066	11.827	
Lens 10b	14. 365	0.0047	12. 864	
Lens11a	9. 673	0.0086	9. 786	
Lens 11b	10. 217	0.0068	9. 906	

由分析结果可知,该光机结构在-10 ℃、50 ℃ 的两个极限温度下,镜组的最大轴向变形量分别为

0.031 mm、0.036 mm,小于 0.1 mm 的装配误差;透镜的最大应力分布值为 14.365 MPa,小于透镜材料的屈服强度。可见,改进的消热式光机结构设计合理,能够稳定工作在 ±30 ℃的温变范围内。

4 扫描系统光机结构设计与分析

4.1 光机结构总体设计

扫描机构是激光扫描定位系统关键的组成部 分,一般在二维转台安装扫描反射镜,通过扫描镜的 摆扫运动以实现获取目标的信息。

可见,二维精密转台是扫描机构的主要组成部分,它的工作精度对系统的测量误差有着极其重要的影响。

在进行水平轴系的设计时,为了降低装配误差, 同时便于扫描镜框的安装,故使用了分体设计形式, 以孔轴配合并以螺钉固定的方式,将左、右半轴与扫 描镜框进行合理连接,使轴系强度与固有频率得到 了提高,其结构如图 13 所示。



1 – Driving motor 2 – Flange 3 – U frame 4 – Gland 5 – Scanning mirror 6 – Outer gland 7 – Bearings 8 – Encoder 图 13 水平轴系结构图

Fig. 13 Structural design of horizontal shafting

在进行垂直轴系的设计时,采用圆柱空心轴系 结构形式,以便于发射/接收激光束的有效通过。为 了减少轴系在转动时的晃动量,采用轴一轴套的结 构形式,二者材料均使用 GCr15 轴承钢,配合间隙 不超过3 mm,这样既提高了轴系的回转精度,又降 低了温度变化对轴系变形量的影响,其结构如图 14 所示。

4.2 U形框架的优化设计研究

作为二维转台的主要部件,运动框架的结构性 能对扫描光机系统的误差、工作带宽与稳定性影响 的权重非常高^[8-9],所以需要进一步对设计的 U 形 框架进行优化分析(如图 15 所示)。优化工作流程 如图 16 所示。优化设计参数选择图如图 17 所示。



1 - Adapter cylinder 2 - Torque motor 3 - Shaft sleeve

4 - Vertical shaft 5 - Bearings

图 14 垂直轴系结构图



图 15 U形框架结构 Fig. 15 Structure of U frame



图 16 优化设计流程 Fig. 16 The optimization procedure for lens barrel

Tab. Order



图 17 优化设计参数选择

Fig. 17 Parameters selected for the optimal structural

若直接增加U形框架的宽度(W),就可以提高U 形框架的固有频率。但是扫描反射镜组件的结构尺 寸是由光学系统决定的,若一味地增加框架宽度,会 压缩反射镜的安装空间;倘若减小反射镜尺寸,会对 检测结果产生严重的影响。所以,需要重新选择优化 参数。进一步分析可知,夹角 a 对于运动框架固有频 率的影响权重较高,故选择其作为设计变量,框架的 固有频率为目标函数,分析结果如图18 所示。



图 18 夹角与固有频率的函数关系

Fig. 18 Functional relationship between natural frequency and angle

由图 18 中函数关系可知,当 a 等于 50°时,框 架的固有频率已小于 2100 Hz;当 a 等于 40°时,固 有频率已升至 2147.8 Hz。说明变量 a 选择合理,但 是只将框架固有频率提高了 50 Hz 左右。

为了进一步提高 U 形框架的固有频率,继续引 入设计参数变量宽度(W)与宽度(T)。经优化计 算,U 形框架的固有频率已至 2274.8 Hz 的最高值, 使得固有频率至少又提高 130 Hz,优化结果见表 3。

根据分析结果,同时兼顾加工、制造与装配的实际情形,选取表中第8组解,U形框架的固有频率为2236.2 Hz。

将改进的框架结构模型导入 ANSYS 软件中进 行抗弯效果分析,将底座固定,在三维空间方向上分 别添加10g加速度;经计算结果分析可知,Y方向的 变形量及应力分布值最大,结果如图19所示。

3	3 Optimized results of the design parameters			
	a	W/mm	<i>T</i> /mm	Frequency/Hz
	45°	15	20	2108.0
	45°	13.5	20	1971.8

多设计变量优化结果

表 3

2	45°	13.5	20	1971. 8
3	45°	15.5	18	2159. 3
4	40°	15	20	2146. 4
5	50°	15	20	2083. 9
6	45°	15	22	2085. 7
7	40°	14.5	18	2126. 7
8	40°	16	18	2236. 2
9	45°	16.5	20	2274. 8
10	50°	14	18	1997. 8
11	50°	16	18	2040. 1
12	40°	14	22	2071. 2
13	40°	16	22	2221.9
14	50°	14	22	1965. 1
15	50°	16	22	2214. 6



(a)变形量分布



(b)应力分布
 图 19 Y方向 10g加速度的抗弯性能分析
 Fig. 19 The flexural performance analysis in Y direction and 10g – acceleration

由图 19 可知,最大变形量也只有 0.8 mm,最大 应力值为 0.597 MPa,可见经优化的 U 形框架的综 合抗弯性能达到预期效果。

5 实验重复性精度测试

5.1 测距范围及误差分析

测试时,采用双频激光干涉仪与三维激光扫描 定位系统同时测量空间同一坐标点,以验证检测系 统的测量范围与误差。测量时,将测量目标分别放 置在距离两台系统2m、6m、10m、12m与16m处, 两台系统同时采点,其测量数据如表4所示。

表4 距离测量范围与误差结果

Tab. 4 The range of distance measurement and errors

Double frequency laser interferometer L_i /mm	Laser scanning and locating system L_i/mm	Error /mm
2000. 0312	2000. 036	0.0048
6000. 1533	6000. 163	0.0097
10000. 2486	10000. 267	0.0184
12000. 3693	12000. 395	0. 0257
16000. 4574	16000. 490	0.0326

由表4数据可知,系统距离测量范围满足 2~16 m的技术指标要求,16 m处的误差约为 32.6 mm,小于16 m处测量误差0.1 mm的技术 要求。

5.2 重复性误差测试

一般来说,检测类仪器设备需要有良好的复现性,因此重复性误差测试是一项非常重要的指标,它能够直观地反映出激光扫描定位系统的精密度^[10]。在测试时,首先选取一个坐标固定的标准测试点,之后再将校正完毕的系统置于规定位置处,反复测量该点坐标,测试点分布状态如图 20 所示。



重复性精度计算通常使用3s原则进行评定, 计算方法见公式(5)。

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (l_i - \bar{l})^2}{n - 1}} \\ \sigma_s = \pm 3\sigma \end{cases}$$
(7)

式中,*l*_i是测量值;*l* 是平均值;*s* 是标准偏差;*σ*_s是重 复性评价指标;*n* 为测量次数。经分析计算可知,激 光扫描定位系统重复性误差为 ±27 mm,优于技术 指标要求。

6 结 论

本文提出了一种三维激光扫描定位系统优化 设计方案。为了保证在变温条件下,激光发射/接 收光学系统的工作稳定性,对其前置共用多透镜 光机结构进行了消热化设计,并构建了可合理化 选择结构参数的弹性隔圈数学模型,解决了由于 热应力作用透镜失效的问题。在保证安装精度的 基础上,对扫描系统 U 形框架进行了结构尺寸优 化设计,使其结构固有频率提高到 2236.2 Hz,并 可以承受 10 g 加速度的冲击振动。通过测试,系 统的测量范围、精度与重复性误差均达到技术指 标要求。

参考文献:

- [1] Hwang Jae Joon, Jung Yun-Hoa, Cho Bong-Hae. The need for DICOM encapsulation of 3D scanning STL data [J]. Imaging Science in Dentistry, 2018, 48(4):301 - 302.
- [2] Joanna A. Pawłowicz. Impact of physical properties of different materials on the quality of data obtained by means of 3d laser scanning [J]. Materials Today: Proceedings, 2018,5(1):.1997-2001.
- [3] Liu Zhanwei, Jiao Dacheng, Shi Wenxiong, et al. Linear laser fast scanning thermography NDT for artificial disbond defects in thermal barrier coatings [J]. Optics Express, 2017, 25(25):31789 - 31800.
- [4] Lu Yang, Park Jiyong, Yu Liandong, et al. 3D profiling of rough silicon carbide surfaces by coherence scanning interferometry using a femtosecond laser [J]. Applied Optics, 2018, 57(10):2584 - 2589.
- [5] Guo Wei. The application of 3D laser virtual reality technology in the reconstruction of ancient buildings[J]. Laser Journal, 2018, 39(12):102 - 105. (in Chinese)

郭玮. 三维激光虚拟现实技术在古建筑破损重建中的应用[J]. 激光杂志,2018,39(12):102-105.

- [6] Zhu Feng, Zhang Yu, Chen Ji, et al. Analysis of thermal optical properties for athermal infrared lens[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(10):1299-1304. (in Chinese)
 朱峰,张宇,陈骥,等. 消热差红外镜头热光学特性分析[J]. 激光与红外,2017,47(10):1299-1304.
- [7] Xu Yao, Huang Yifan, Chang Jun. Investigation of flexible element in passive athermalisation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1):342-349. (in Chinese)
 许尧,黄一帆,常军. 挠性压圈在被动式热分析中的应用研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1):342-349.
- [8] Liang Biao, Liu Wei, Chen Cheng. Multi-objective optimization design of lens barrel for the carbon dioxide detector
 [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (7): 1858-1866. (in Chinese)

梁彪,刘伟,陈程. 二氧化碳探测仪镜简结构的多目标 优化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (7): 1858-1866.

- [9] Long Bo. Study on structural characteristics of the small lightcatadioptric optical system[D]. Chengdu: Chinese Academy of Science(the Institute of Optics and Electronics), 2013. (in Chinese) 龙波. 轻小型折反式光学系统结构特性研究[D]. 成 都:中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2013.
- [10] Cai Jun, Zhao Yuan, Li Yuhao, et al. 3D laser scanning system design and parameter calibration [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(10):2208-2216. (in Chinese) 蔡军,赵原,李宇豪,等. 一种三维激光扫描系统的设 计及参数标定[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44 (10):2208-2216.