

拱坝变形自动监测悬丝式高精度光电倾角传感器研究

刘弹 姚孟迪 李向前 师义成 屈凯 李川 卫栋梁 杨青 李

Research on suspension wire type high-precision photoelectric inclination sensor for automatic monitoring of arch dam deformation

LIU Dan, YAO Mengdi, LI Xiangqian, SHI Yicheng, QU Kai, LI Chuan, WEI Dongliang, YANG Qing, LI Yi

引用本文:

刘弹, 姚孟迪, 李向前, 等. 拱坝变形自动监测悬丝式高精度光电倾角传感器研究[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 895–902. DOI: 10.5768/JAO202546.0405001

LIU Dan, YAO Mengdi, LI Xiangqian, et al. Research on suspension wire type high-precision photoelectric inclination sensor for automatic monitoring of arch dam deformation[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 895–902. DOI: 10.5768/JAO202546.0405001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0405001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数字散斑干涉三维变形测量技术研究进展

Three-dimensional deformation measurement based on digital speckle pattern interferometry

应用光学. 2020, 41(4): 681–689 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409005>

直升机旋翼三维动态变形测量与可视化分析

3D dynamic deformation measurement and visual analysis of helicopter rotor

应用光学. 2023, 44(1): 159–167 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103007>

三维人脸测量与分割系统研究

Research on three-dimensional face measurement and segmentation system

应用光学. 2021, 42(4): 664–670 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402005>

基于参考传感器的OPGW线路低噪声覆冰舞动监测

Low-noise ice galloping monitoring of OPGW lines based on reference sensors

应用光学. 2024, 45(4): 812–818 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403007>

遮挡区域空间位姿的多传感组合测量方法研究

Research on multi-sensor combination method for estimating relative pose

应用光学. 2020, 41(3): 565–570 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303004>

光栅干涉位移传感器信息解算方法研究

Research on information solution method of grating interference displacement sensor

应用光学. 2024, 45(2): 446–452 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0895-08

引用格式: 刘弹, 姚孟迪, 李向前, 等. 拱坝变形自动监测悬丝式高精度光电倾角传感器研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 895-902.

LIU Dan, YAO Mengdi, LI Xiangqian, et al. Research on suspension wire type high-precision photoelectric inclination sensor for automatic monitoring of arch dam deformation[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 895-902.



在线阅读

拱坝变形自动监测悬丝式高精度光电 倾角传感器研究

刘 弹¹, 姚孟迪², 李向前³, 师义成², 屈 凯⁴, 李 川⁴, 卫栋梁¹, 杨 青¹, 李 焱¹

(1. 西安交通大学 仪器科学与技术学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610000;

3. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 4. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 针对大型拱坝链式三维变形测量系统的需求, 确定了倾角传感器的技术指标, 研究了基于悬丝的高精度光电倾角传感器方案。利用非相干准直光束形成测量光场, 将悬丝的阴影光斑经过光学系统放大, 形成清晰的影像, 投影到线阵 CCD (charge coupled device); 根据光斑位置测量原理, 得到阴影光斑的位移值, 反求出测点的倾角值; 同时, 针对长周期的现场运行需求, 设计了二维高精度光电倾角传感器结构。测试结果表明: 传感器的分辨率和量程指标满足设计要求, 可实现量程 3 093"、精度 0.432" 的高精度倾角测量。

关键词: 拱坝; 三维变形; 链式测量; 线阵 CCD; 倾角传感

中图分类号: TN202; TH712

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0405001

Research on suspension wire type high-precision photoelectric inclination sensor for automatic monitoring of arch dam deformation

LIU Dan¹, YAO Mengdi², LI Xiangqian³, SHI Yicheng², QU Kai⁴, LI Chuan⁴,
WEI Dongliang¹, YANG Qing¹, LI Yi¹

(1. College of Instrument Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Three

Gorges Construction (Group) Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 3. Changjiang Three Gorges Group Co., Ltd.,

Wuhan 430010, China; 4. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In response to the measurement requirements of a large-scale arch dam chain 3D deformation measurement system, the technical specifications for inclination angle sensors were determined. A high-precision photoelectric inclination sensor scheme based on suspension wire was studied, which used incoherent collimated beams to form a measurement light field. The shadow spot of the suspension wire was amplified by an optical system to form a clear image and projected onto a linear charge coupled device (CCD). Based on the principle of spot position measurement, the displacement value of the shadow spot was obtained, and the tilt angle value of the measurement point was calculated in reverse. At the same time, in response to the long-term on-site operation requirements, a two-dimensional high-precision photoelectric inclination sensor structure was designed. Test results show that the resolution and range indicators meet the design requirements, achieving

收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-07-02

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目资助 (202103470; 中国三峡建工(集团)有限公司科研项目资助 (JGAJ030222002))

作者简介: 刘弹 (1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事智能传感检测技术、机械设备状态监测与智能诊断、装备智能运维技术研究。E-mail: liudan1978@mail.xjtu.edu.cn

high-precision inclination measurement with a range of 3 093 seconds and an accuracy of 0.432 seconds.

Key words: arch dam; three-dimensional deformation; chain measurement; linear CCD; inclination sensor

引言

自1930年代以来,随着世界坝工建设的大规模开展,各种大坝观测技术得到不断发展。国内外侧重验证设计并研制了各种内部观测仪器,如应变计、应力计、测缝计等^[1-6]。1950、1960年代,由于一些大坝陆续出现事故,引起人们对大坝安全高度关注,并加强了对大坝的变形、渗流、渗压等安全项目更为直观、有效的观测^[7-10],使垂线、引张线、扬压力等监测仪器得到较大发展和改进^[11]。20世纪80年代以来,随着现代科技的突飞猛进,特别是微电子和通信技术的快速发展,世界各国均大力发展了针对大坝检测的遥测仪器,并逐步推广监测自动化^[12-17]。目前,大坝安全监测自动化已成为加强大坝安全,改善水库和水电站运行管理的重要措施。但对于拱坝而言,各坝段三维变形在线测量一直是大坝安全监测的一个难点。因此,本文基于拱坝三维变形测量需求,设计了满足其测量精度要求的倾角传感器。

倾角传感器作为大坝变形监测的常用传感器之一,主要用来实现大地倾角测量,广泛应用于大型桥梁、隧道、水坝、大楼等安全监测领域,且其在大型设备、军事装备等国防安全领域也有重要运用。在倾角传感器发展历史上,出现过固体摆式、液体摆式、气体摆式等不同的结构类型,基本原理是将不同类型的质量体在重力作用下的运动转化为电信号,通过解算得到倾角值^[18-19]。倾角传感器有一维和二维之分,前者测量一个方向的参考面与重力线的夹角,后者可测量2个方向的参考面与重力线的夹角。目前,倾角传感器正在与MEMS(micro electro mechanical systems)技术深度融合,向着高集成、高性能、低成本方向快速发展。国内外众多高科技企业相继推出了基于硅电容式测量原理的MEMS倾角传感器,以体积小、成本低、高性能等优势快速占领航空航天、灾害预警、建筑监测、车辆运输和消费电子等领域,并且市场占有率逐年增加,已成为工业倾角测量的首选方案^[16-17,20-21]。从具体测量原理上看,MEMS倾角传感器主要可以分为电容式和谐振式,也有少量的热对流式和光学式等。

以德国First Sensor公司典型的电容式双轴测量产品SI-11.S1.C-30为例,其测量范围为 $\pm 30^\circ$,分

辨率为 $0.0015^\circ @ 10\text{ Hz}$,零位重复性为 0.003° ,带宽为150 Hz,抗冲击2500 g,工作温度为 $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$,输出接口为SPI,封装尺寸为 $11.4\text{ mm} \times 11.4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。在谐振式方面,北京遥测技术研究所于2020年IEEE DGN ISS会议上报道了一款小量程石英谐振式加速度计,主要定位于高精度倾角及微振动应用,据报道,根据实验测试结果,利用该传感器样机可以实现倾角测量范围为 $\pm 90^\circ$,分辨率为 0.0001° ,线性度为 $0.01\%\text{FS}$,样机采用金属双列直插封装,封装尺寸为 $24.5\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$ ^[22]。在其他倾角传感技术研究中,已报道的有:基于干涉的光纤倾角传感技术研究^[23]、新型磁性液体倾角传感技术研究等。

大型拱坝链式三维变形测量的基本原理是,在拱坝各坝段布署测台,各测台之间互相发射激光束,通过观测光束的移动情况及测台的倾角变化,建立各坝段相对基岩坝段的变形计算公式,从而获得各坝段的实时变形情况。目前,拱坝三维变形测量精度并未有相应国家标准规定,在2003年颁布的《混凝土大坝安全监测技术规范》DL/T5178-2003中规定,坝顶水平位移精度为 $\pm 1\text{ mm}$ 。因此,按20个坝段,坝间距离为20 m计算,可以推导出大型拱坝链式三维变形测量系统中,对倾角测量分辨率要求为 0.00025° ,量程为 $\pm 0.4^\circ$ 。显然,传统倾角传感器测量精度不能满足拱坝链式三维变形测量要求,需要设计一款高精度倾角测量装置。此外,考虑到水坝监测数据的周期以年为单位,倾角传感器永久安装于测点箱内,测点电路要求长时间连续可靠运行^[11]。为满足上述测量要求,本文设计开发了基于悬丝的高精度二维光电倾角传感器。根据上述思路,本文在基于CCD技术的光斑位置测量方案基础上,通过研究CCD间的驱动和控制电路,实现倾角测量,并针对长周期稳定运行需求,设计了二维倾角传感器结构,最后通过实验验证倾角测量精度。

1 基于CCD器件的倾角测量原理与实现

1.1 基于CCD器件的光斑位置测量原理

CCD是一种完成光电转换的图像传感器件^[11,24],其感光单元排成一条直线。以TCD1705为例,感光单元总数为7 450个,每个感光单元的面积为

0.004 7 mm x 0.004 7 mm, 驱动信号有 5 个, 分别是 $\Phi 1$ 、 $\Phi 2$ 、RS、CP 和 SH, 其中 $\Phi 1$ 和 $\Phi 2$ 分别驱动多个管脚。其输出为两路, 分别是 OS1 和 OS2, 其中 OS1 是奇数下标感光单元输出, OS2 是偶数下标感光单元输出。

基于 CCD 器件的光斑测量原理是: SH 信号为转移脉冲信号, 其输出信号中 2 个相临脉冲分别代表第一个感光单元及最后一个感光单元; OS 信号为将 OS1 和 OS2 叠加后反相放大后得到的信号; 当一个细小光束照到 CCD 感光阵列时, 对应的 OS 信号会有输出。比较 OS 在 SH 信号输出的位置, 通过统计 SH 信号到信号脉冲之间的时钟脉冲个数, 可以得到光斑在器件上的位置信息, 从而实现一维位移测量, 如图 1 所示。由于 OS 输出是模拟信号脉冲, 需将模拟信号脉冲二值化, 得到数字信号脉冲。为更准确地测量光斑位置, 本文取 OS 二值化中心位置为光斑位置。

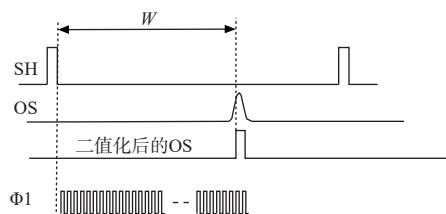


图 1 光斑位置测量原理

Fig. 1 Spot position measurement principle

1.2 CCD 器件驱动信号的实现

为完成光斑位置测量, 线阵 CCD 器件的驱动时序信号很关键。早期是用小规模数字电路器件来设计并实现的, 如使用 74HC161、74HC00、74HC04 等器件来搭建生成线阵 CCD 的几个驱动脉冲序列, 需要小规模数字电路器件 6~8 个, 缺点是元件数量多, 电路板面积大, 功能不灵活。MCU(microcontroller unit)可以用来产生线阵 CCD 驱动信号^[16-17, 25], FPGA(现场可编程门阵列, field-programmable gate array)也可以用来实现线阵 CCD 驱动信号的生成^[20-21], 但是其电路比 CPLD(复杂可编程逻辑器件, complex programmable logic device)复杂, 功能过剩, 成本高。CPLD 器件也可以用来生成线阵 CCD 的驱动信号^[22], 但也存在电路相对复杂, 成本高, 功能过剩问题。本文选用工业级 SOP(standard operation procedure)封装的 MCU 器件 STC15W-408AS, 具有体积小、成本低的特点, 且时钟最高可达 35 MHz, 完全满足时序信号要求, 其线阵 CCD 器件驱动信号产生电路如图 2 所示。该电路的特点是, 在硬件上仅有 1 个 20 管脚的 MCU(U2)、1 个电源滤波电容(C7)、1 个软件下载端子(P1), 且无需使用外部晶体振荡器。此外, 电路中 F1、F2 要驱动多个输入端, 采用并联输出, 以增强驱动可靠性。

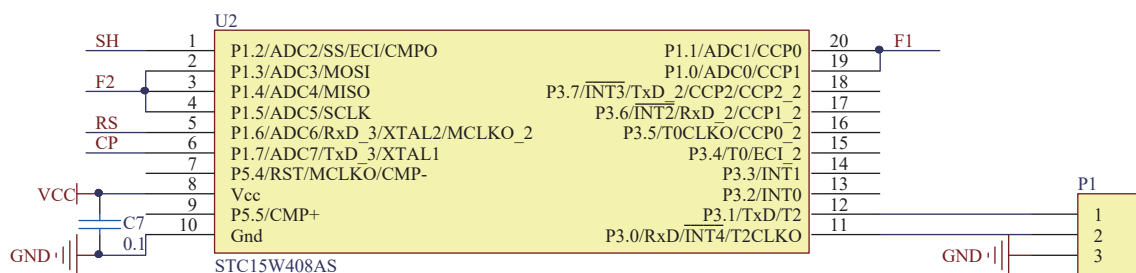


图 2 线阵 CCD 器件驱动信号发生电路

Fig. 2 Drive signal generation circuit of linear CCD device

典型的双路输出线阵 CCD 器件的驱动信号要求如图 3 所示。图 3 中前两行表示 SH 与 $\Phi 1$ 的关系, $\Phi 1$ 与 $\Phi 2$ 信号相位差为 180°。

本文以 P1 口输出驱动脉冲, 该口各位可编程为推挽输出, 可满足 TCD1705 的驱动电平需求。根据图 3 驱动信号要求, 设计了如图 4 所示的端口功能分配图和如图 5 所示的状态转换关系。根据图 4 和图 5, 即可以编写 MCU 代码, 以实现驱动输出。

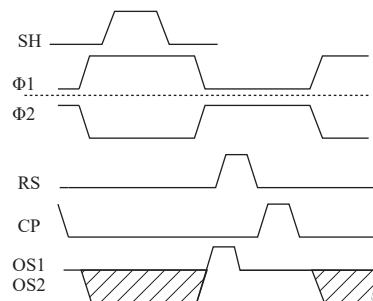


图 3 TCD1705 的驱动信号

Fig. 3 Drive signal of TCD1705

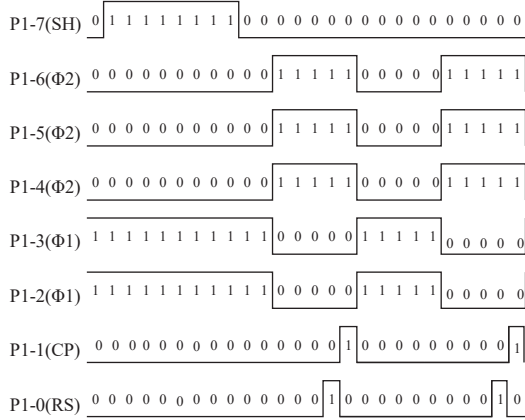


图 4 端口功能分配与波形

Fig. 4 Port function assignment and waveform

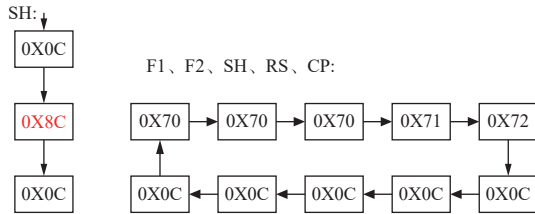


图 5 状态图

Fig. 5 State diagram

1.3 光斑位置测量的实现^[26]

从图 3 可以看出, TCD1705 的 7 450 个像元将输出 3 725 次, 每次同时输出 2 个信号, OS1 是奇数下标, OS2 是偶数下标, 因此, 为得到完全信号, 需要重新排成一个队列。此外, 输出信号电压不连续, 会出现明显的梳状结构, 即在图 3 的 OS1、

OS2 波形中, 阴影代表输出电压信号, 可见 2 个相邻单元的输出信号电压之间有回到 0 电平的过程。

针对奇偶下标双输出问题, 本文通过分别采集 OS1 和 OS2 信号, 分别得到奇数、偶数像元的光脉冲位置计数。设信号脉冲前沿奇、偶像元测量计数分别为 D_o 和 D_e , 做如表 1 所示判断处理, 可以得到准确脉冲位置 W , 从而获得像素尺度的位置信息。

表 1 脉冲位置计算伪代码

Table 1 Pulse position calculation pseudo code

脉冲位置 W
1. If ($D_e > D_o$) then
2. $W = 2 * D_o - 1$;
3. Else
4. $W = 2 * D_o$;

针对输出信号电压不连续问题, 从图 3 可知, TCD1705 是在 $\Phi 2$ 的低电平期间同时输出 OS1、OS2 两路数据, 在 $\Phi 2$ 的高电平期间 OS1、OS2 回到暗电平状态。本文采用采样保持电路, 以解决信号梳状波形, 光斑位置测量电路原理图如图 6 所示。图 6 中, Tr4 为采样保持开关, 在 $\Phi 2$ 低电平期间导通, C11 上的电压跟随信号幅度变化; 在 $\Phi 2$ 高电平期间 Tr4 关闭, C11 维持信号电平; U3 是光斑位置测量与 SPI 通信 MCU, 软件在 SH 到来时启动 T0 对 F2 计数, VOS 到来则停止计数, 从而得到光斑位置数据。此外, JP1 是 SPI 接线端子, 连接到测点控制电路的对应接口。

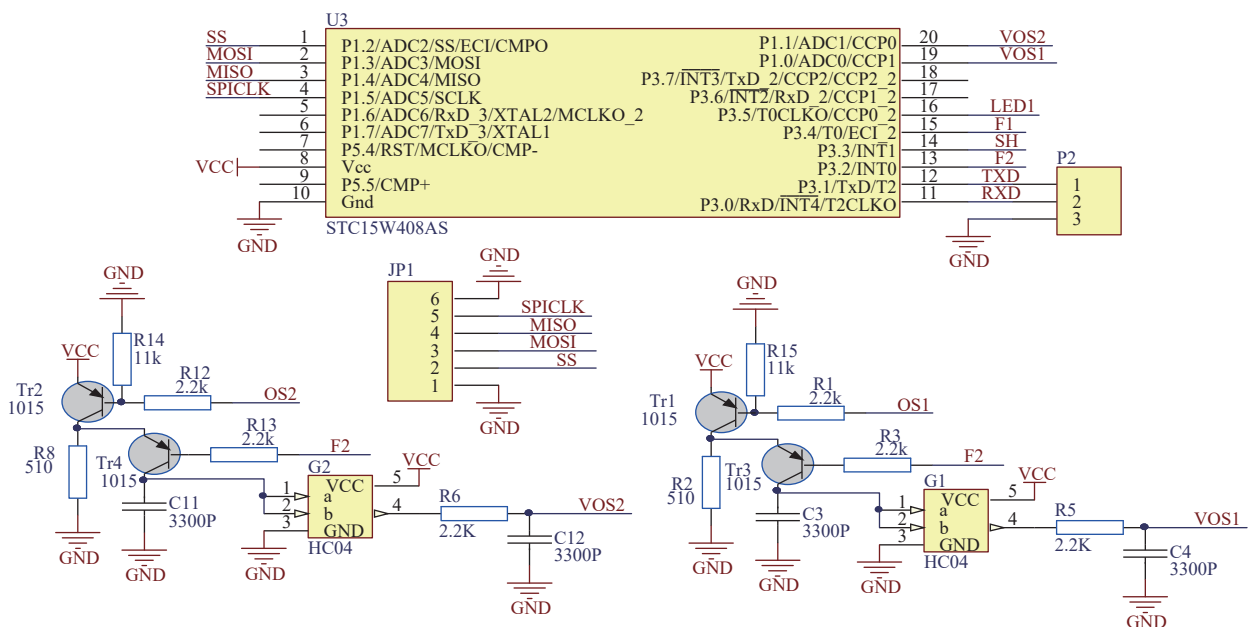


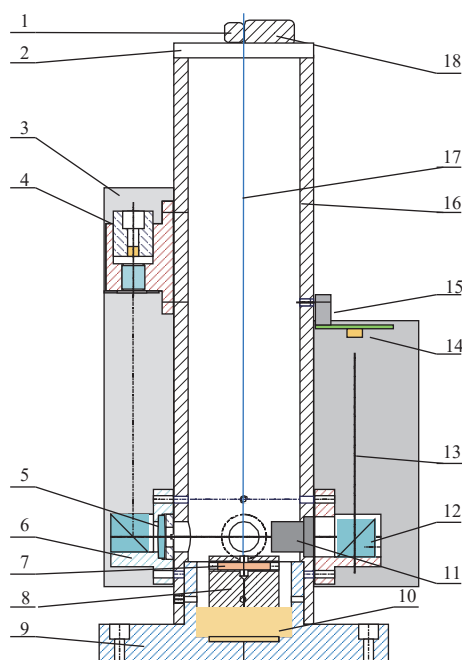
图 6 光斑位置测量电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of spot position estimation circuit

2 二维倾角传感器结构设计

2.1 二维倾角传感器结构

二维光电倾角传感器总体结构如图7所示。图7中, 16号零件是外方内圆的金属立筒, 细丝与上端盖中央锚定, 下端有金属重锤, 重锤浸在阻尼油中, 立筒左侧外部附属安装LED准直光源部件(光源焦距为108 mm), 右侧外部附属安装了CCD电路部件(CCD器件型号为TCD1705, 驱动和光斑位置测量电路板见上文)。倾角传感器在垂直于纸面方向也有对应的光源和CCD部件, 因此可以实现二维倾角测量。传感器中2个45°反射镜用于改变光路方向, 减少传感器占据机箱地面的投影面积。



1. 压块 2. 上端盖 3. 遮光罩 4. 光源部件 5. LED准直镜 7. 垂线夹紧顶丝
8. 物镜棱镜部件 9. 油池底座 10. 阻尼油 11. CCD物镜 12. 棱镜组件
13. CCD遮光罩 14. 线阵CCD元件 15. CCD电路板固定板 16. 方筒
17. 细丝 18. 锚定块

图7 二维光电倾角传感器总体结构

Fig. 7 Summary structure of two-dimensional photoelectric inclination sensor

倾角传感器的工作原理是: LED准直光源在紧贴重锤上方形成水平测量光场, 悬丝形成阴影, 经过CCD物镜后, 在CCD上形成放大的阴影光斑, 电路测量阴影光斑的位置, 得到悬丝位移值, 用该值可反推出安装基准面的倾斜^[27]。悬丝采用直径0.15 mm的高强度合金丝, 有效长度200 mm, CCD器件感光单元总数为7450, 像元宽度为0.0047 mm。CCD物镜选用焦距8 mm的摄像镜头, 将悬丝影像放大10倍, 根据以上参数, 可得出CCD的

像元分辨率为0.5"。需要指出的是, 悬丝越长, 测角分辨率越高, 但量程会相应缩小, 本文悬丝长度为200 mm, 是根据测点箱的尺寸、LED准直光源性能、悬丝的直径、CCD物镜性能等因素综合优化的结果。

LED准直光源的性能直接影响倾角传感器的最终性能^[1]。高性能LED准直光源的标准是, 准直光束发散角小, 亮度高, 悬丝越细, 光亮度越高, 等效发光窗口越小, 准直镜焦距越长, 准直镜像差越小, 传感器的性能越好。这些标准基本是互相矛盾的, 以发光窗口的尺寸为例, 等效发光窗口由机械小孔光阑形成, 窗口越小, 光束准直性越好, 得到的悬丝阴影边缘越清晰, CCD光斑位置测量越精确。但是, 在给定的LED发光功率下, 光阑小孔越小, 光通量越小, 这会造成CCD信噪比降低, 光积分时间加长。对于悬丝, 直径越粗, 阴影形态越好, 但是刚性增加, 自由度下降, 在CCD上的阴影变宽, 使总有效量程减小。因此, 通常采用多性能权衡原则, 求得当前技术条件下的最佳组合。虽然在相同的亮度下, 激光准直光束的准直性高于LED准直光束, 但是激光是相干光, 悬丝会产生衍射, 还有散斑效应, 使阴影图像质量下降。更重要的是, 激光二极管容易损坏, 而激光准直光束的方向基准起点为激光二极管的发光窗口, 一旦损坏, 即使更换激光二极管也无法恢复之前的状态, 这在长期的连续测量中是严重的问题。

为提高成像清晰度, 采用单色光, 同时通过反复实验, 选择了波长520 nm~525 nm, 工作电流为200 mA的绿色发光LED。用宽0.3 mm的机械狭缝限制发光面积, 狭缝方向与悬丝平行, 在保证水平方向有较好准直效果, 同时提高了图像亮度, LED光源组件如图8所示。由于准直光束的起点基准是狭缝, LED仅起照明作用, 因此, 即使LED损坏, 更换也不影响测量基准, 可极大提高装置的可靠性和可维护性。

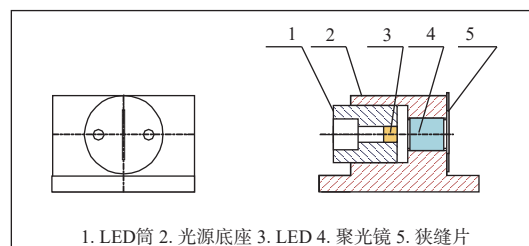


图8 LED光源组件

Fig. 8 LED light source components

根据 LED 发光波长设计了专用准直物镜,并确认其参数为:有效口径 8 mm,焦距 100 mm,相对孔径 0.08。因此,采用双胶合结构形式,即可获得极小像差,且子午球差在整个通光口径内小于 2 μm。

2.2 倾角计算

将倾角传感器放置在水平面上,记 CCD 的光斑位置为 P_1 ,放置在待测量倾角上,记 CCD 的光斑位置为 P_2 ,则倾角计算公式为

$$\theta = \arctan((P_2 - P_1) \times 0.0047 / 2\,000) \tag{1}$$

式中:0.0047(μm/pixel)为感光单元的尺寸,2 000(mm)为光学放大后的悬丝影像长度。

3 实验及分析

为验证二维光电倾角传感器的测量精度,本文制作了如图 9 所示的测试装置。倾角传感器被固定在活动杠杆左端,通过调节右端微分螺/杆的高

度,可设置倾角传感器所在平面的倾斜角度,与传感器读数进行对比,进而分析倾角传感器是否满足规定的精度要求。

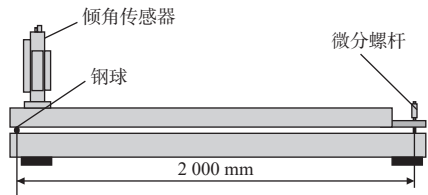


图 9 二维光电倾角传感器测试装置

Fig. 9 Test structure of two-dimensional photoelectric inclination sensor

从 10 mm 开始,以 1 mm 为增量调节微分螺杆高度,并记录相应的 CCD 读数,实验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,CCD 读数增量值在两侧端点处增大,CCD 读值在 7450(CCD 感光单元个数)中间时,增量变化小,这显然与 CCD 物镜的几何畸变有关。

表 2 测试结果
Table 2 Test results

螺杆值/mm	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
CCD 读数	1 389	1 633	1 870	2 103	2 330	2 551	2 774	2 988	3 203	3 418
增量		244	237	233	227	221	223	214	215	215
螺杆值/mm	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
CCD 读数	3 633	3 845	4 057	4 272	4 491	4 709	4 932	5 163	5 391	5 631
增量	215	212	212	215	219	218	223	231	228	240

为进一步提升测量精度,对传感器进行标定。将公式(1)修改为公式(2),即:

$$\theta = \arctan((P_2 - P_1) \times k + b) \tag{2}$$

式中: k 和 b 与 P_2 位置有关,以 P_1 的位置为中心,以 100 个感光单位划分整个 CCD 的感光范围,对应其中一个感光区间($P, P + 100$],用 P 和 $P + 100$ 实际倾角反求 k 和 b 。标定后,倾角测量装置通过陕西计量科学研究院专业测试,测试结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,测量最大误差为 0.432"。

表 3 计量检测结果

Table 3 Metrology testing results

序号	标准角度/(°)	测试角度/(°)	角度偏差/(°)
1	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.02003	0.02013	0.00010
3	0.04005	0.04015	0.00010
4	0.06007	0.06013	0.00006

表 3 (续)

序号	标准角度/(°)	测试角度/(°)	角度偏差/(°)
5	0.08001	0.08012	0.00011
6	0.10434	0.10441	0.00007
7	0.12004	0.12014	0.00010
8	0.14002	0.14013	0.00011
9	0.16006	0.16011	0.00005
10	0.18002	0.18013	0.00011
11	0.20008	0.20016	0.00008
12	0.22004	0.22016	0.00012
13	0.24005	0.24014	0.00009

4 结论

针对大型拱坝链式三维变形测量系统的需求,推导了倾角传感器的技术指标,提出了基于悬丝的高精度光电倾角传感器方案。利用非相干准直光束形成测量光场,将悬丝的阴影光斑经过光学系统放大,形成清晰的影像,投影到线阵 CCD,再

根据光斑位置测量原理, 得到阴影光斑的位移值, 从而反求出倾角值。同时, 针对长周期的现场运行需求, 设计了二维高精度光电倾角传感器结构。测试结果表明: 光电倾角传感器的分辨率和量程指标满足设计要求, 可实现量程 3 093", 精度 0.432" 的高精度倾角测量, 证明了设计的二维倾角传感器具有精度高、长期稳定性好、易于实现等优点。

参考文献:

- [1] 徐波, 韩道林, 楼加丁. 声波穿透在大坝混凝土裂缝检测中的应用[J]. 四川水利, 2010, 30(4): 35-39.
XU Bo, HAN Daolin, LOU Jiading. Application of acoustic wave transmission method on dam concrete crack detection[J]. Sichuan Water Conservancy, 2010, 30(4): 35-39.
- [2] 徐辉, 贺俊吉, 方亮. 基于图像显著性的大坝裂缝检测[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(9): 19-20.
XU Hui, HE Junji, FANG Liang. Dam crack detection based on image saliency[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(9): 19-20.
- [3] 蒋小燕, 张松, 何松原. 基于格子波尔兹曼模型大坝裂缝检测[J]. 科技视界, 2018(11): 96-97.
JIANG Xiaoyan, ZHANG Song, HE Songyuan. Dam crack detection based on lattice Boltzmann model [J]. Science & Technology Vision, 2018 (11): 96-97.
- [4] 徐威, 唐振民, 吕建勇. 基于图像显著性的路面裂缝检测[J]. 中国图像图形学报, 2013, 18(1): 69-77.
XU Wei, TANG Zhenmin, LYU Jianyong. Road crack detection based on image saliency[J]. Chinese Journal of Image Graphics, 2013, 18(1): 69-77.
- [5] ZOU Q, CAO Y, LI Q, et al. CrackTree: automatic crack detection from pavement images[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(3): 227-238.
- [6] 张铮, 钱勤建, 周嘉政, 等. 基于改进 Fast-SCNN 的裂缝图像实时分割算法[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 539-547.
ZHANG Zheng, QIAN Qinjian, ZHOU Jiazheng, et al. Real-time segmentation algorithm of crack images based on improved Fast-SCNN[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 539-547.
- [7] 崔弘毅, 周克发. 大坝渗漏检测最新进展[J]. 大坝与安全, 2014(1): 67-70.
CUI Hongyi, ZHOU Kefa. Advances in leak detection for dams[J]. Dam & Safety, 2014(1): 67-70.
- [8] 刘晓燕. 光纤传感技术在大坝渗漏检测中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(9): 145-147.
LIU Xiaoyan. The application of fiber optic sensing technology in dam leakage detection [J]. Heilongjiang Water Conservancy Technology, 2020, 48 (9): 145-147.
- [9] 余红玲, 王晓玲, 程正飞, 等. 大坝渗流安全监测数据异常检测的改进 DSAE 模型[J]. 水力发电学报, 2023, 42(10): 128-138.
YU Hongling, WANG Xiaoling, CHENG Zhengfei, et al. Improved DSAE model for abnormal detection of dam seepage safety monitoring data[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2023, 42(10): 128-138.
- [10] 赵国亭, 贾金生, 赵春, 等. 微流场渗流检测技术在水库渗漏处理中的应用研究[J]. 水力发电, 2023, 49(5): 76-80.
ZHAO Guoting, JIA Jinsheng, ZHAO Chun, et al. Application research of microfluidic seepage detection technology in reservoir leakage treatment [J]. Hydroelectric Power, 2023, 49 (5): 76-80.
- [11] 赵彪. 基于线阵 CCD 的坝体变形监测仪的研究及设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
ZHAO Biao. Research and design of monitor for dam body deformation based on linear CCD[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [12] 徐陈勇, 李云帆, 王喜春. 基于低空无人机的坝体渗漏安全检测技术研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(9): 84-86.
XU Chenyong, LI Yunfan, WANG Xichun. Research on the safety detection technology of dam leakage based on UAV[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(9): 84-86.
- [13] 渠慎超, 徐阳, 常绍飞, 等. GPS 在水库大坝安全检测的应用[J]. 电子制作, 2017(3): 26-27.
QU Shenchao, XU Yang, CHANG Shaofei, et al. The application of GPS in safety inspection of reservoir dams[J]. Electronic Production, 2017(3): 26-27.
- [14] 肖钢. 基于物联网与极限学习机的大坝安全在线监测与预测分析研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
XIAO Gang. Research on online monitoring and prediction analysis of dam safety based on internet of things and extreme learning machine[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020.
- [15] 李扬涛, 包腾飞, 李田雨. 深水大坝缺陷鲁棒实时检测方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024: 1-18[2024-04-09]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis2022>

0734.
LI Yangtao, BAO Tengfei, LI Tianyu. Robust real-time detection method for deep water dam defects [J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2024: 1-18 [2024-04-09] <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220734>.
- [16] 高旗, 陈青松, 杨贵玉, 等. MEMS 倾角传感器研究现状及发展趋势[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(12): 1054-1063.
GAO Qi, CHEN Qingsong, YANG Guiyu, et al. Research status and development trends of MEMS inclinometers[J]. Micronano Electronic Technology, 2021, 58(12): 1054-1063.
- [17] KEVIN H L C, ROBERT E S. Technology for the high-volume manufacturing of integrated surface-micromachined accelerometer products[J]. *Microelectronics Journal*, 1998, 29(9): 579-586.
- [18] 王洪远. 液体表面反射式二维光电水平倾角测量系统[D]. 天津: 天津大学, 2017.
WANG Hongyuan. 2-D photoelectric level inclination measuring system based on liquid surface reflection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [19] 王清和, 赵国柱, 马国鹭, 等. 基于物理水平基准的组合式高程测量方法[J]. *应用光学*, 2024, 45(1): 150-157.
WANG Qinghe, ZHAO Guozhu, MA Guolu, et al. Combined elevation measurement method based on physical horizontal reference[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 150-157.
- [20] FEDDER K G, HOWE T R, LIU K T, et al. Technologies for cofabricating MEMS and electronics [J]. IEEE, 2008, 96(2): 306-322.
- [21] LOHMANN C, BERTZ A, KUECHLER M, et al. Mechanical reliability of MEMS fabricated by a special technology using standard silicon wafers[C]//Micromachining and microfabrication. USA: [s.n], 2003: 200.
- [22] YANG T, YANG G, LU W, et al. A miniature quartz vibrating beam accelerometer[C]//2020 DGON inertial sensors and systems (ISS). State of New Jersey: IEEE, 2020: 1-13.
- [23] 王帅, 吴越, 宋言明, 等. 基于法布里-珀罗干涉的光纤倾角传感技术研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(11): 1492-1497.
WANG Shuai, WU Yue, SONG Yanming, et al. Research on fiber optic inclination sensing technology based on Fabry-Perot interference[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(11): 1492-1497.
- [24] 王瑾, 李克绵, 吴少华. CCD 光电智能垂线仪[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(2): 197-200.
WANG Jin, LI Kemian, WU Shaohua. An intelligent CCD-based optoelectronic instrument for dam displacement measurement[J]. Journal of Changchun University of Technology(Natural Science Edition). 2009, 30(2): 197-200.
- [25] 唐亚军, 郭喜庆, 杨敬嫻, 等. 基于 51 单片机的线阵 CCD 驱动设计[J]. 微型机与应用, 2013, 32(12): 73-76.
TANG Yajun, GUO Xiqing, YANG Jingxian, et al. Design of linear CCD driver based on 51 single-chip processor[J]. Microcomputer & Its Applications, 2013, 32(12): 73-76.
- [26] 田又源, 程瑶, 贾宁, 等. 高速线阵 CCD 驱动与数据采集系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2022(3): 84-87.
Tian Youyuan, CHENG Yao, JIA Ning, et al. Design of high speed linear CCD driving and data acquisition system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(3): 84-87.
- [27] 刘建林, 戴瑜兴, 沈雁. 边缘检测方法在线阵 CCD 大坝位移计中的应用[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2012, 24(4): 49-52.
LIU Jianlin, DAI Yuxing, SHEN Yan The application of edge detection method in linear CCD dam displacement meter [J]. Journal of Hunan University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2012, 24 (4): 49-52