

用于宽温度范围摆镜控制的电容角位移传感器^{*}

查 伟 杨明庆 陈青山 王艳林

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

摘 要: 为了实现摆镜系统在宽温度范围内的稳定控制,研究电容角位移传感器的温度漂移抑制方法。采用高频复合陶瓷材料作为传感器介质,并通过对称式差分测量电路及自动增益控制电路的温漂抑制措施,降低温度变化对传感器输出信号的干扰。对传感器在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内输出电压和偏转角度进行测试,实验结果表明,改进后的电容角位移传感器在宽温度范围内输出电压的最大温漂为 0.87 V ,最大角度漂移为 $0.63'$,温度漂移为 $11.67\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$,其性能显著优于传统电容式传感器,所采用的温漂抑制措施可有效降低温度变化对摆镜控制精度的影响,适用于宽温度范围内的高精度摆镜系统。

关键词: 电容式传感器;摆镜控制;宽温度范围;角度测量

中图分类号: TP212;TN721 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Capacitive angular displacement transducer for wide temperature range swing mirror control

Zha Wei Yang Mingqing Chen Qingshan Wang Yanlin

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to achieve stable control of the swing mirror system over a wide temperature range, a design and optimization method based on capacitive angular displacement transducer is proposed. By analyzing the transfer function of the swing mirror system and the temperature characteristics of the capacitive angular displacement transducer, high-frequency composite ceramic materials are used as the sensor medium, and temperature drift suppression measures are taken through symmetrical differential measurement circuits and automatic gain control circuits to reduce the impact of temperature changes on the sensor output signal. Build an experimental platform to test the output voltage and deflection angle of the sensor within the temperature range of -40°C to $+60^{\circ}\text{C}$. The results show that the improved capacitive angular displacement sensor has a maximum temperature drift of 0.87 V , a maximum angle drift of $0.63'$, and a temperature drift of $11.67\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ in a wide temperature range, which is significantly better than the performance of traditional capacitive sensors. The temperature drift suppression measures adopted can effectively reduce the impact of temperature changes on the control accuracy of the swing mirror, and are suitable for high-precision swing mirror systems in a wide temperature range.

Keywords: capacitive transducer; swing mirror control; wide temperature range; angle measurement

0 引 言

摆镜(swing mirror)自 20 世纪 80 年代研制成功以来,凭借其高定位精度和快速响应等优良特性,被广泛应用于激光通信跟瞄、自适应光学精跟踪及图像稳定等领域^[1]。在传统的工业环境中,摆镜系统的工作温度通常在 $-20^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ 。然而,随着应用领域的拓展,特别是在武器装备等

领域,对摆镜系统的稳定性有更高的要求,需要保持高度的可靠性和精确度,要求在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 的更宽温度范围内稳定工作。

在摆镜系统中,角度传感器对其扫描精度至关重要,按工作原理可分为光电式、光栅式、电磁式、电阻式和电容式等多种类型^[2]。光电式传感器具有高精度、高分辨率等优点,但测量范围较小,对环境要求较高,在低温环境中易受

到信号噪声的影响,在高温条件下,内部电子元件会出现漂移现象^[8]。光栅式传感器测量范围较大,但其加工及装调过程复杂,易受灰尘、油污等环境因素影响^[4-5]。电磁式传感器敏感性与环境磁场的变化密切相关,容易在强磁环境下受到干扰^[6]。电阻式传感器在温度变化时电阻值随之改变,易导致非线性响应,进而影响测量精度^[7-8]。相较而言,电容式传感器(capacitive transducer)是一种通过测量物理量引起的电容变化来反映被测量变化的传感器,具有结构简单、惯量小,且能在高温、辐射和强烈振动等恶劣条件下工作的优点。

针对电容式传感器测量精度的提升,国内外学者已提出多种解决方案:Hou 等^[9]通过优化单电压激励及花瓣状电极设计,消除了多点激励的匹配误差,电容式传感器精度为 0.0036° ,但测试环境仅限于常温条件;刘昕彤等^[10]利用高频激励信号降低了温度对传感器输出电压的影响,在 $20^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 温度范围内角度分辨率可达 $0.33\text{ V}/^\circ$;龚中良等^[11]建立两段分段函数温度漂移补偿模型,在 $-30^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ 范围内倾角传感器测量误差精度达到 0.001° ;秦玉伟等^[12]基于集成电路 CAV444 进行信号处理提升输出信号线性度为 99.37% ,但未针对温漂进行补偿;杨振清等^[13]提出了一种变极板面积差动设计,测量角度相对误差 $< 0.10\%$,但传感器介质层仍采用常规设计;余定峰^[14]通过多电容级联的绝对式角位移测量方法,提高了传感器的抗干扰能力,测量精度可达 $\pm 3''$ 。此外,MTI(美国)公司研发的 AS-5000 电容式传感器虽具有较高的精度和分辨率,线性度可达 $\pm 0.1\%$,但仅在 $16^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ 温度下温漂低于 $\pm 0.1\%$ ^[15]。综上,目前研究的电容角位移传感器在提高测量精度和抗干扰能力方面取得了显著进展,但大部分研究仍集中于常温范围内,对于宽温度范围内传感器的稳定性、精度及低温漂特性的研究仍显不足。

针对上述问题,本文旨在研究电容角位移传感器的工作原理及温度响应特性,分析其在宽温度范围内的温度漂移机制,并基于材料特性和硬件电路提出温度漂移的抑制措施。通过优化传感器结构和信号转换过程,在保证高精度角度测量的同时,降低温度对传感器输出的影响,实现其在极端温度条件下的稳定工作,为摆镜系统的稳定控制提供一种新的解决方案。

1 结构及原理

1.1 摆镜工作原理

摆镜又称快速反射镜,由反射镜片、支撑结构、角度传感器、驱动电机和摆镜基座组成,如图 1 所示。作为一种精密随动装置,其主要功能在于实现光束的高精度定向,具备单轴角度定位能力以及匀速扫描的特性。在摆镜工作过程中,控制系统接收外部设备发出的指令,并生成驱动信号以激活电机,推动反射镜绕转轴快速、高精度地偏转,从而调整光束传播方向。基于电容角位移传感器结构简单、分辨

率高、动态特性好、能在高温和强烈振动条件下工作的优良特性,将其应用于摆镜系统,通过将电容信号转换为电压信号,实现对摆镜偏转角度的测量。摆镜系统及工作流程如图 1、2 所示。

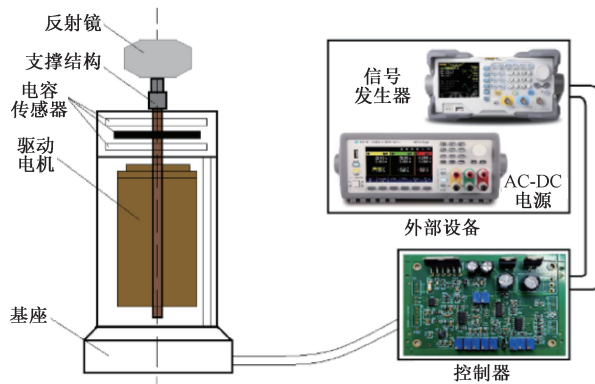


图 1 摆镜系统示意图

Fig. 1 Structure of swing mirror

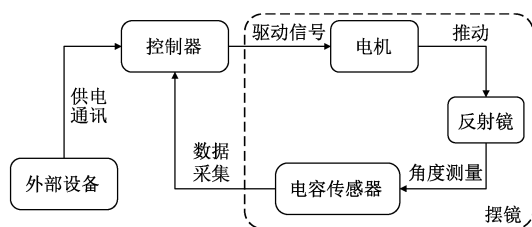


图 2 摆镜系统工作框图

Fig. 2 Working diagram of swing mirror

摆镜系统中所采用的是直流电机,根据文献[16]描述电机运动的数学模型如图 3 所示。

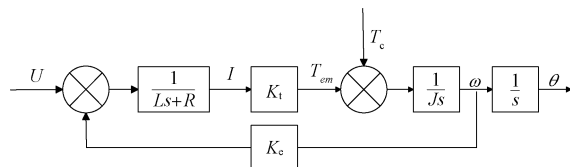


图 3 摆镜电机数学模型

Fig. 3 Mathematical model of swing mirror motor

摆镜电机的传递函数如下:

$$\frac{\theta}{U} = \frac{\frac{K_t}{R}}{Js^2 + fs + K_t K_e \frac{s}{R}} \quad (1)$$

式中: θ 表示电机转角; U 表示控制电压; R 表示线圈电阻; K_t 为电机的转矩系数; K_e 表示线圈反电动势常数; J 表示转动惯量; f 是电机内部与负载的摩擦系数。

在上述传递函数中,各参数对温度变化的敏感性存在差异。线圈电阻 R 通常随着温度的升高而增大,影响电机电流和功率消耗。转矩系数 K_t 与电机电流和产生的转矩之间相关,也会受到温度变化的影响。反电动势常数 K_e 与

电机的电流和磁场密切相关,随温度的升高而减小。材料的热膨胀可能导致转动惯量 J 的微小变化,相较于其他参数,温度敏感性较低。摩擦系数 f 取决于电机轴承和负载间的接触特性,温度变化可能会影响润滑油的粘度或摩擦表面的特性。综合分析可知,温度变化对电机驱动电流产生的影响较为显著,从而降低摆镜控制的稳定性和精度。通过改善电容角位移传感器的温漂特性,同时调节其输出电压信号,有效提高电机输入信号的稳定性,进而降低温度变化带来的不利影响。

1.2 电容角位移传感器温度特性

电容传感器是一种将被测量(如角度、位移、压力等)的变化转换成电容量变化的仪器,具有结构简单、分辨率高、动态响应快的优点,能够在高温和强烈振动等恶劣环境下保持稳定^[17]。摆镜系统中采用的电容角位移传感器采用变介质型原理,通过极板间的介质运动改变上下极板的相对面积,从而根据电容变化获取角度变化。传感器结构如图 4 所示,图 4(a)为定极板 1,其 4 个铜箔区间对称并联,图 4(b)为定极板 2,两极板采用差分形式组合。

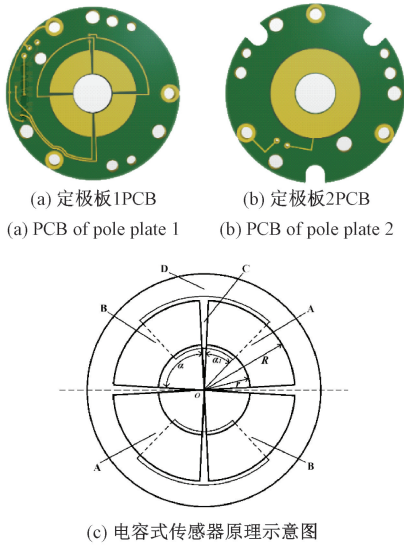


图 4 电容角位移传感器结构

Fig. 4 Structure of capacitive angular transducer

图 4(c)中,A、B 为定极板 1,C 为中介质板,D 为定极板 2,AD 和 BD 分别构成了角位移传感器中的两个检测电容 C_{AD} 、 C_{BD} 。电机转动时,介质板 C 随转轴绕 O 点在平面内摆动,导致两极板的相对覆盖面积发生变化,进而使两个检测电容同步变化。设介质板 C 位于定极板 1 的 A、B 中间位置时,极板 A 与极板 B 之间的夹角为 α ,介质板 C 与极板 A、B 重叠部分的角度为 α_1 ,此时 C_{AD} 和 C_{BD} 的电容值相等。当介质板 C 顺时针偏转 $\Delta\alpha$ 角度时, C_{AD} 和 C_{BD} 电容值计算公式如下:

$$C_{AD} = \frac{\epsilon_0}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) (\alpha - \alpha_1 - \Delta\alpha) +$$

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) (\alpha_1 + \Delta\alpha) =$$

$$\frac{\epsilon_0}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) [\alpha + (\epsilon_r - 1) (\alpha_1 + \Delta\alpha)] =$$

$$m_1 + n_1 (\alpha_1 + \Delta\alpha) \quad (2)$$

$$C_{BD} = \frac{\epsilon_0}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) (\alpha - \alpha_1 + \Delta\alpha) +$$

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) (\alpha_1 - \Delta\alpha) =$$

$$\frac{\epsilon_0}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) [\alpha + (\epsilon_r - 1) (\alpha_1 - \Delta\alpha)] =$$

$$m_1 + n_1 (\alpha_1 - \Delta\alpha) \quad (3)$$

式中: $m_1 = \frac{\epsilon_0}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) \alpha$; $n_1 = \frac{\epsilon_0}{\delta} \frac{1}{2} (R^2 - r^2) (\epsilon_r - 1)$; ϵ_0 为真空的介电常数; ϵ_r 为介质的相对介电常数; R 为定极板 1 外圆弧半径; r 为定极板 1 内圆弧半径; δ 为两极板间的距离。

常规电容传感器采用交流桥式电容检测方法^[18],阻容电桥电路如图 5 所示,输出电压 V_{P0} 计算公式如下^[19]:

$$V_{P0} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V_0 \quad (4)$$

式中: C_1 为电容传感器, C_2 为一固定电容, R_0 为两个标准电阻, V_0 为电路输入电压。输出电压 V_{P0} 与电容传感器 C_1 和已知电容 C_2 之间的差异成正比。

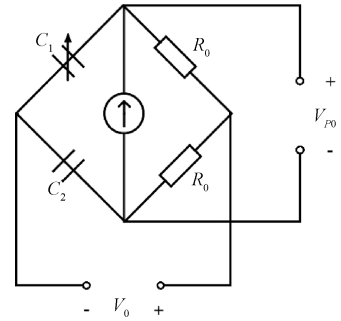


图 5 交流电桥测量电路

Fig. 5 AC bridge measurement circuit

传感器的电容量 C 在理论上有可能产生温度漂移,电容 C 与温度 t 的函数关系为^[20]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\delta^2} \left[\delta \left(\epsilon \frac{ds}{dt} + s \frac{d\epsilon}{dt} \right) - \epsilon s \frac{d\delta}{dt} \right] \quad (5)$$

式中: ϵ 是传感器介质的介电常数, s 为介质覆盖面积, δ 为传感器极板间隙。由于材料热胀冷缩,传感器间隙温度系数 $\frac{d\delta}{dt} < 0$,而传感器面积温度系数 $\frac{ds}{dt} > 0$,陶瓷介质温度系数在宽低温 ($-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$) 范围内 $\frac{d\epsilon}{dt} > 0$,所以电容传感器温度系数 $\frac{dC}{dt} \neq 0$ 。为降低电容受温度的影响,需确保

$\frac{d\delta}{dt}$ 、 $\frac{ds}{dt}$ 、 $\frac{d\epsilon}{dt}$ 尽可能小。

2 温度漂移抑制

2.1 传感器介质

由 1.2 节分析可知,电容角位移传感器中间介质的温度系数 $d\epsilon/dt$ 越小,则带来的温漂即越小。由于材料的热胀冷缩特性,电容式传感器的结构在理论上存在导致温度漂移发生的可能。采用高频复合陶瓷材料作为传感器的介质板,其介电常数对温度变化较小,可以有效地减小其膨胀系数。

2.2 差分共模放大

在低高温环境下,电容传感器测量电路中的元器件会出现明显的温漂现象。为了减小元器件对温度变化的敏感性,降低温度漂移对测量精度的影响,电路中采用了低温漂电容、低温漂电阻等温度稳定性较好的元器件。

电容角位移传感器的信号转换包括 4 个部分:1)激励电路;2)解调电路;3)滤波与差分放大电路;4)增益控制电路。激励电路由振荡电路产生高频激励信号。解调电路采用二极管整流电路结构,滤波电路则由低通滤波器组成。差分放大电路对传感器的电容信号进行处理,输出的电压信号即为角度信号^[21]。增益控制电路中通过晶体管放大电路输出激励信号。图 6 为电容角位移传感器信号转换框图。

由 1.2 节可知,极板间隙的温度系数越小带来温漂也越小。图 7 为电容信号的转换电路,其主要由自激振荡器、峰值检波电路、低通滤波器和减法放大器构成,将两路电容 C_{AD} 、 C_{BD} 的容值变化转化为输出电压 V_A 和 V_B 的变化。输出电压 V_A 、 V_B 、 V_{P1} 与电容 C_{AD} 、 C_{BD} 和输入电压 V_{AGC} 关系式为:

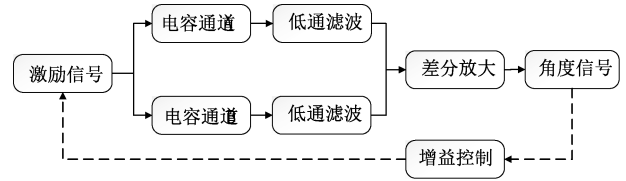


图 6 信号转换电路框图

Fig. 6 Diagram of signal conversion circuit

$$V_A = K_A V_{A0} = \frac{C_{BD} - C_{AD}}{C_{AD} + C_{BD}} K_A K V_{AGC} = \frac{-\Delta\alpha}{m_1 + n_1\alpha_1} K_A K V_{AGC} \quad (6)$$

$$V_B = K_B V_{B0} = \frac{C_{AD} - C_{BD}}{C_{AD} + C_{BD}} K_B K V_{AGC} = \frac{\Delta\alpha}{m_1 + n_1\alpha_1} K_A K V_{AGC} \quad (7)$$

$$V_{P1} = K_P (V_A - V_B) = \frac{2(C_{BD} - C_{AD})}{C_{AD} + C_{BD}} K_A K K_P V_{AGC} = \frac{-2\Delta\alpha}{m_1 + n_1\alpha_1} K_A K K_P V_{AGC} \quad (8)$$

式中: K 为自激振荡器增益系数,低通滤波器增益 $K_A = K_B$, K_P 为减法放大器增益系数。

差分共模放大电路的工作原理是通过将两个电容信号的差值进行放大,温度变化时,两个电容信号的绝对值可能发生变化,但其差值相对稳定,从而消除共模噪声和温度漂移的影响。可以有效抑制温度变化对输出信号的影响,提高测量精度。同时,采用两路电容构成的对称差配置,能够有效降低

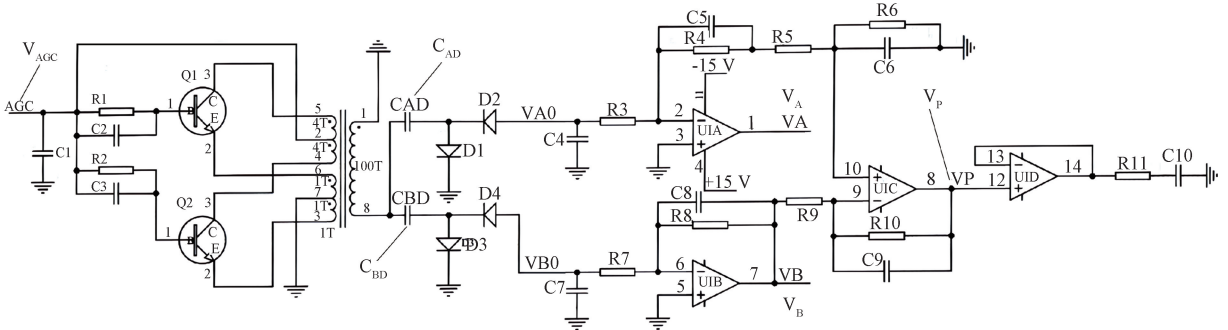


图 7 电容信号转换电路图

Fig. 7 Capacitive signal conversion circuit

温度变化对极板间隙的影响,减小传感器极板间隙的温度系数 $d\delta/dt$, 从而提高输出信号的可靠性和线性度。

2.3 自动增益控制

自动增益控制电路(automatic gain control, AGC)的工作原理是通过反馈机制调节激励信号的幅值,以保持输出信号的稳定性。当温度变化导致输出信号幅值变化时,该电路会自动调整激励信号的幅值,使输出信号保持在设定的范围内,从而有效抑制温度变化对输出信号的影响。在反馈通路中,该自动增益控制电路,通过调节传感器的

激励信号 V_{AGC} 来改善温度变化对输出信号的影响,如图 8 所示。 $V_A + V_B$ 与 V_{AGC} 的函数关系如下:

$$V_A + V_B = \frac{2C_{BD}}{C_{AD} + C_{BD}} K_A K V_{AGC} \quad (9)$$

$$V_{AGC} = \frac{A_Q}{RC} \int (V_5 - V_A - V_B) dt = A_0 A_Q \int (V_5 - V_A - V_B) dt \quad (10)$$

式中: A_Q 为晶体管放大电路增益系数, A_0 为放大电路的增益基准值, V_5 为电路基准电压。由电容角位移传感器的

差分原理可知, $V_A + V_B$ 的值保持不变, 且 $V_A + V_B > 0$, 经过求和再积分后, 通过后续晶体管放大电路输出激励电路直流电源信号 (AGC)。当温度发生变化时, 若 $V_A + V_B$ 增大, 则 $V_A + V_B$ 与基准电压 (V_5) 间的差值减小, 经运算放大器后输出 V_{AGC} 也减小, 即传感器的激励信号幅值降低, $V_A + V_B$ 也随之减小; 反之亦然。通过调控输出电压 $V_A + V_B$ 的变化范围, 使传感器的灵敏度保持在一个较小的区间, 从而有效抑制温度变化对传感器输出电压的干扰。

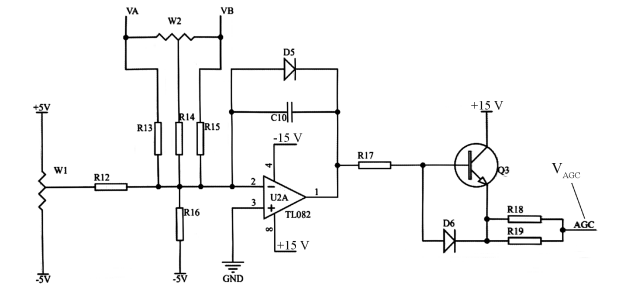


图 8 自动增益控制电路图
Fig. 8 Automatic gain control

3 实验测试

实验构建的摆镜角度测试系统如图 9 所示。在验证温漂抑制措施的有效性时, 实验过程中, 摆镜主体和控制器均固定在高低温试验箱内的光学平台上, 以确保与传感器处于相同的温度环境中。信号发生器、电源及自准直仪则放置在试验箱外, 通过导线与摆镜主体和控制器连接。信号发生器用于调节输入信号, 从而控制摆镜的偏转角度, 自准直仪用于测量反射镜的偏转角度。

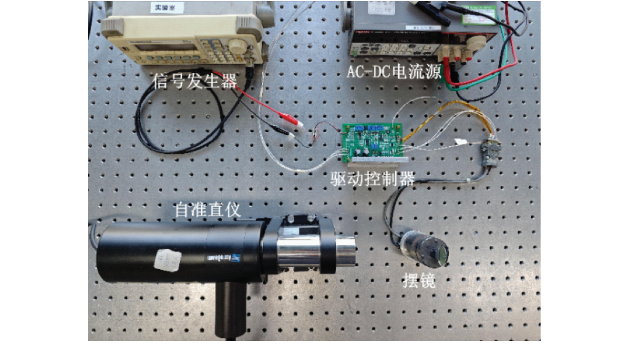


图 9 摆镜偏转角度测量框图

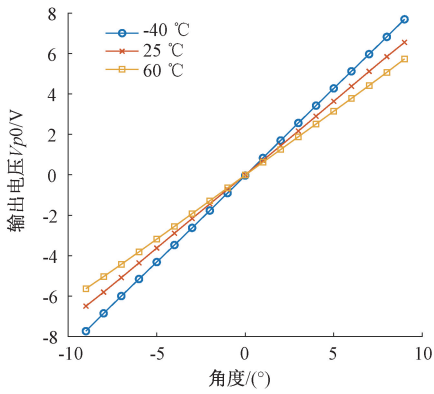
Fig. 9 Measurement diagram of deflection angle

实验过程中, 高低温试验箱以 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速率升降温, 达到目标温度 (-40°C 、 25°C 、 60°C) 后恒温 1 h, 以确保摆镜主体和电容式传感器的环境温度达到稳定状态。之后, 对摆镜进行偏转角度及传感器输出电压的测试。在 $\pm 9^{\circ}$ 的角度范围内, 每隔 1° 记录一次电容传感器的输出电压 V_{P0} (温漂抑制前) 和 V_{P1} (温漂抑制后)。测量数据如表 1 所示, 常规电容传感器在宽温度范围内输出电压如图 10(a) 所示, 采取温漂抑制后的输出电压如图 10(b) 所示。结果

表 1 输出电压与角度值关系

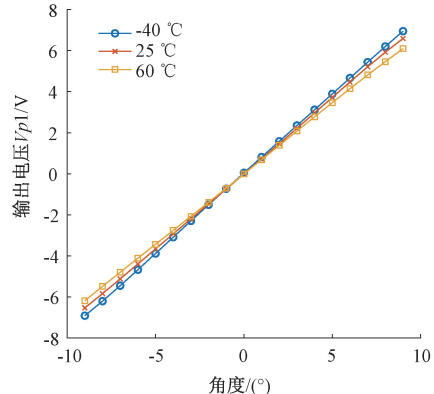
Table 1 Output voltage VS angle value

角度 /(°)	抑制温漂前 V_{P0}/V			标准 差	抑制温漂后 V_{P1}/V			标准 差
	-40℃	25℃	60℃		-40℃	25℃	60℃	
-9	-7.743	-6.492	-5.653	1.052	-6.893	-6.537	-6.192	0.351
-8	-6.857	-5.833	-5.027	0.917	-6.244	-5.821	-5.473	0.386
-7	-5.993	-5.074	-4.382	0.808	-5.437	-5.133	-4.791	0.323
-6	-5.156	-4.347	-3.827	0.670	-4.709	-4.401	-4.135	0.287
-5	-4.282	-3.622	-3.236	0.529	-3.855	-3.658	-3.416	0.220
-4	-3.514	-2.898	-2.554	0.486	-3.059	-2.924	-2.764	0.148
-3	-2.663	-2.173	-1.911	0.382	-2.264	-2.204	-2.087	0.090
-2	-1.783	-1.448	-1.278	0.257	-1.546	-1.446	-1.392	0.078
-1	-0.874	-0.723	-0.643	0.117	-0.758	-0.741	-0.703	0.028
0	0.001	0.001	-0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
1	0.848	0.726	0.626	0.111	0.823	0.722	0.723	0.058
2	1.696	1.451	1.258	0.220	1.634	1.406	1.352	0.150
3	2.548	2.175	1.865	0.342	2.351	2.231	2.081	0.135
4	3.398	2.900	2.507	0.447	3.121	3.012	2.775	0.177
5	4.275	3.625	3.139	0.570	3.876	3.684	3.466	0.205
6	5.131	4.350	3.765	0.685	4.684	4.508	4.132	0.282
7	5.983	5.133	4.441	0.772	5.416	5.217	4.813	0.307
8	6.842	5.88	5.093	0.876	6.196	5.878	5.486	0.356
9	7.686	6.542	5.721	0.987	6.953	6.609	6.083	0.438



(a) 温漂抑制前输出电压

(a) Output voltage curve before inhibition



(b) 温漂抑制后输出电压

(b) Output voltage curve after inhibition

图 10 传感器温漂抑制前后输出电压

Fig. 10 Transducer temperature drift suppression before and after output voltage

显示,摆镜偏转角度越大,输出电压的温度漂移越大,采取温漂抑制措施后电压标准差明显减小,传感器输出电压更加稳定,最大温漂也由 2.09 V 减小为 0.87 V。

电容角位移传感器的温度漂移(temperature drift)用 ppm/℃(parts per million per degree Celsius)来表示,表示的是摆镜偏转角度值随温度变化的相对变化率,描述了在温度每变化 1℃时,角度会变化多少个百万分之一。

$$T_D = \frac{\theta}{\theta_0 T} \times 10^6$$

(11)

式中:θ 为温度变化引起的角度漂移,θ₀ 为初始角度值,T 温度变化范围。

为进一步验证所提出的温漂抑制措施的有效性,在宽温度范围内对电容角位移传感器进行了温度-角度漂移特性测试。实验条件保持一致,选取了±9°的角度范围内 6 个理论转角,并利用自准直仪测量摆镜在(−40℃~+60℃)范围内的角度漂移值。测试数据及计算结果如表 2 所示。未应用温漂抑制措施前,角度为−9°时,传感器最大角度漂移为 30′,其温度漂移为 555.56 ppm/℃。抑制温漂后,最大角度漂移降低为 0.63′,同时温度漂移降至 11.67 ppm/℃。结果表明,上述温漂抑制措施可有效降低温度变化对传感器测量精度的影响,验证了所提温漂抑制措施在宽温度范围内的有效性。

表 2 温漂实验数据

Table 2 Data in temperature drift experiment

理论转角 /(°)	抑制温漂前		抑制温漂后	
	角度漂移 /(′)	温度漂移 /(ppm/℃)	角度漂移 /(′)	温度漂移 /(ppm/℃)
9	29	537.04	0.50	9.26
6	19	527.78	0.41	11.39
3	9	500.00	0.24	13.33
−3	−10	555.56	−0.15	8.33
−6	−19	527.78	−0.39	10.83
−9	−30	555.56	−0.63	11.67

4 结 论

以电容角位移传感器对摆镜偏转角度进行测量,分析了摆镜电机的数学模型和传感器的温漂特性,在传感器介质材料和硬件电路方面采取了相应的温漂抑制措施。采用介电常数随温度变化较小的复合陶瓷材料作为传感器中间介质,并通过对称式差分放大电路和自动增益控制电路来降低温度变化对传感器输出信号和偏转角度的影响。搭建摆镜偏转角度—输出电压测试系统,研究电容式传感器在宽温度范围(−40℃~+60℃)内的输出电压和温度漂移,并对摆镜进行精度测试。

实验结果表明,采取以上温漂抑制措施后,电容角位

移传感器在宽温度范围内的温度漂移显著降低,其输出电压最大温漂由 2.09 V 减小为 0.87 V,最大角度漂移由 30′降低至 0.63′,温度漂移由 555.56 ppm/℃降低至 11.67 ppm/℃。在不同温度条件下均能保持良好的稳定性和测量精度,可满足宽温度范围的摆镜控制应用。

参考文献

[1] 李鹏飞,翟东升,李祝莲,等. 基于摆镜技术提高测距成功概率的方法研究[J]. 红外与激光工程,2022,51(8): 216-223.

LING P F, ZHAI D SH, LI ZH L, et al. Study on improving laser ranging success probability based on tip/tilt mirror technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(8): 216-223.

[2] 罗东辉. 扫描电机用电容式角度传感器的研究[J]. 微特电机,2015,43(5):47-49.

LUO D H. Study on the capacitive angular sensor for scanning motors [J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(5): 47-49.

[3] 杨帆. 一种基于光电位移传感器位移实时监测系统[J]. 中国科技信息,2019(7):81-82.

YANG F. A real-time displacement monitoring system based on photoelectric displacement sensors [J]. China Science and Technology Information, 2019(7):81-82.

[4] 刘永坤,丁红昌,向阳,等. 利用反射式圆光栅的振镜转角测量[J]. 中国光学,2021,14(3):643-651.

LIU Y K, DING H CH, XIANG Y, et al. Rotational angle measurement of galvanometer using reflective circular grating [J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 643-651.

[5] 宋宇飞,毛庆洲,周昊,等. 圆光栅角度传感器偏心误差的分析与补偿[J]. 仪器仪表学报,2022,43(12):76-86.

SONG Y F, MAO Q ZH, ZHOU H, et al. Analysis and compensation of the eccentricity error of circular grating angle sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 76-86.

[6] 袁野. 绝对式磁编码器设计及其在伺服系统的应用[J]. 传感技术学报,2019,32(4):625-630.

YUAN Y. Design of an absolute magnetic encoder and its applications in servo systems[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4): 625-630.

[7] 李航. 基于巨磁电阻的非接触式角度传感器研制[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2022.

LI H. Development of non-contact angle sensor based on giant magnetoresistance[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2022.

[8] 赵晓华,胡文辉,姚玉明,等. 一种滚子电阻应变式传感器:CN118111597A[P]. 2024-05-31.

ZHAO X H, HU W H, YAO Y M, et al. A roller

- resistance strain sensor: CN118111597A [P]. 2024-05-31.
- [9] HOU B, ZHOU B, SONG M, et al. A novel single-excitation capacitive angular position sensor design[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1196.
- [10] 刘昕彤, 高兰恩, 孙超, 等. 新型低温漂电容角位移传感器的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2017(6): 165-167.
LIU X T, GAO L EN, SUN CH, et al. Research on novel capacitive angle sensor with low temperature drift[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(6): 165-167.
- [11] 龚中良, 刘寒霜. 硅电容式高精度双轴倾角传感器温度漂移补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(7): 43-45.
GONG ZH L, LIU H SH. Research on temperature drift compensation of silicon capacitive high biax tilt angle sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(7): 43-45.
- [12] 秦玉伟, 胡涛成. 基于 CAV444 的无接触式电容角度传感器[J]. 河南科学, 2021, 39(1): 37-41.
QIN Y W, HU T CH. Contactless capacitive angle sensor based on CAV444[J]. Henan Science, 2021, 39(1): 37-41.
- [13] 杨振清, 丁凯洋, 林春丹, 等. 一种新型的电容式角度位移测量仪[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 152-154.
YANG ZH Q, DING K Y, LIN CH D, et al. A new capacitive displacement and angle measuring instrument[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 152-154.
- [14] 余定峰. 基于多电容传感器级联的绝对式角位移测量方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
YU D F. Research on absolute angular displacement measurement method based on cascade of multiple capacitance sensors [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [15] 崔小强. 电容式绝对编码角位移传感器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
CUI X Q. Research on capacitive absolute coded angular displacement sensor [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [16] 才小士. 扫描振镜控制系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
CAI X SH. Scanning galvanometer control system design and implementation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] 李胤演, 行鸿彦, 李浩琪, 等. 地表相对介电常数实时监测系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2023, 46(15): 45-51.
LI Y Y, XING H Y, LI H Q, et al. Design of real-time monitoring system for surface relative permittivity[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(15): 45-51.
- [18] 刁媛, 贾远东, 金新人, 等. 微弱电容检测电路研究进展综述[J]. 电子测量技术, 2024, 47(23): 1-14.
DIAO Y, JIA Y D, JIN X R, et al. Review of research progress in weak capacitance detection circuit [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(23): 1-14.
- [19] 张洪朋, 郑文博, 李伟, 等. 交叉电容式传感器研究进展综述[J]. 电子测量技术, 2022, 45(7): 117-124.
ZHANG H P, ZHENG W B, LI W, et al. Review of progress in research cross capacitive sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(7): 117-124.
- [20] 黄金侠. 电工电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
HUANG J X, Electrical and electronic technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2023.
- [21] 高忠华, 胡帅, 汪强, 等. 单相激励电容式时栅角位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 130-137.
GAO ZH H, HU SH, WANG Q, et al. Study on capacitive type time-grating angular position sensor with single-phase excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 130-137.

作者简介

查伟, 硕士研究生, 主要研究方向为光电检测技术。

E-mail: 15555632251@163.com

杨明庆(通信作者), 博士, 副研究员, 主要研究方向为光电材料与器件、功能纳米材料和气体传感器等。

E-mail: yangmingqing@bistu.edu.cn