

文章编号 1004-924X(2018)07-1612-09

## 大口径自适应镜面微位移测量系统设计

左 恒<sup>1,2\*</sup>, 刘志民<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对大口径自适应副镜镜面变形量小、变化频率高、微变形难以精确测量的难题,设计一种基于电容检测芯片 Pcap01-AD 和 STM32F103 的镜面变形检测系统。首先,根据音圈电机驱动的变形镜的特点提出基于电容位移传感器的变形镜微变形测量方案。然后,进行该测量系统的硬件和软件设计,其中硬件部分由电容检测芯片 Pcap01 接口电路、单片机 STM32F103 最小系统和供电部分构成,软件部分包括实现电容数字信号采集的 C 程序设计、Pcap01-AD 与单片机的通讯程序 and 数据处理程序。最后,设计实验平台进行多次试验。试验测试结果表明,在变形镜 $\pm 50 \mu\text{m}$ 的位移区间内,测量灵敏度为  $200 \text{ pF}/3 \mu\text{m}$ ,  $10 \text{ nm}$  的位移量对应的电容变化为  $0.067 \text{ pF}$ 。该系统测量精度高、误差小、检测效率高,能够用于自适应镜面的变形检测,同时也适用于其他微小位移的检测。

**关键词:**自适应副镜;微位移测量;Pcap01 电容数字转换芯片;STM32F103 单片机

**中图分类号:**TH743;TP212 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182607.1612

## Design of micro-displacement measurement system for large aperture adaptive mirror

ZUO Heng<sup>1,2\*</sup>, LIU Zhi-min<sup>1,2,3</sup>

(1. *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*

2. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: hengz@niaot.ac.cn*

**Abstract:** A mirror deformation detection system based on STM32 and using the capacitance detection chip Pcap01-AD was designed to solve the problems of small deformation, high change frequency, and difficulty of accurately measuring the microdeformation that were associated with a large aperture adaptive sub-mirror. First, according to the characteristics of the deformable mirror, which was driven by the voice coil motor, a system scheme for measuring the microdeformation of the mirror using the capacitance displacement sensor was proposed. Then, the hardware and software are designed for the measurement system. The hardware was constructed with the microcapacitance

收稿日期:2017-12-15;修订日期:2018-02-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11303066)

detection chip Pcap01, STM32F103 microcontroller (MCU) system, and power supply circuit. The software part included programming the lower computer in C language to realize digital signal acquisition of the capacitance, communication between the Pcap01-AD and MCU, data conversion of the upper computer and data processing, real-time display, and data storage. According to the structural characteristics of the large aperture telescope sub-mirror system, the experimental platform was designed to enable the conduction of several tests. The test results show that in the range of 50  $\mu\text{m}$ , the measurement sensitivity is 200 pF/3  $\mu\text{m}$ , and the system has high accuracy, small error, and high detection efficiency. Thus, this system can be used in adaptive mirror surface deformation detection and other small-displacement measurements.

**Key words:** adaptive secondary mirror; micro-displacement detection; Pcap01 conversion chip; STM32f103

## 1 引 言

自适应光学技术是大口径地基望远镜克服大气扰动必不可少的手段<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着望远镜口径的增大,适合大视场的近地层自适应光学(GLAO)越来越受到重视,而随着望远镜口径的不断增大以及自适应光学系统与望远镜系统集成度的不断提高,基于系统光学元件的自适应光学变形镜被提出。这种方式采用望远镜本身的光学元件作为自适应变形镜,不增加额外的光学元件,大大提高了系统的光学效率;同时也意味着更低的红外辐射,有利于望远镜在红外波段的观测。另外,大的自适应变形镜也能允许更大的望远镜视场,这对近地层自适应光学也是极为重要的;快速反应的变形镜在激光通信、精密跟踪与控制等领域也有重要用途<sup>[3-4]</sup>。

目前,应用最广的自适应变形镜基于铁电材料的压电特性,该技术从 20 世纪 70 年代开始应用于自适应光学系统,现在的堆叠式压电驱动变形镜和双压电晶片驱动变形镜都基于这种原理<sup>[5-6]</sup>。20 世纪 90 年代,使用音圈电机作为自适应镜面的支撑和驱动部件自适应变形镜概念发展起来,与压电驱动的变形镜相比,音圈电机驱动的变形镜具有行程大、驱动电压低等优点<sup>[7]</sup>,促动器之间的距离一般较大,促动器行程能较容易的达到 50  $\mu\text{m}$  以上,如此大的行程可以直接在自适应镜上进行 tip-tilt 校正;而且相比使用铁磁效应的自适应镜面系统,这种自适应镜面没有磁滞效应,单个促动器频率能达到 80 kHz 以上。另外由于镜面不与促动器接触,当某一个促动器发生故障时,可以通过调整周围的促动器来弥补,不会影响整个自适应光学系统的效果,而且促动结构便于

更换,不影响望远镜观测。

基于上述优点,音圈电机驱动的变形镜特别适合超大口径的自适应镜面系统,这也使得大口径自适应镜面系统成为可能。但是这种形式的自适应变形镜的关键点和难点之一是如何测量镜面在促动器作用下的微小变形,并将其反馈给执行部件音圈电机。

若采用通过波前传感器测量镜面面型从而控制镜面后促动器的方法,可以达到很好的精度,但随着自适应系统规模的增大和实时性要求的提高,资源和计算时间均会增大<sup>[8]</sup>。

目前,常用的位移测量方式很多,比如光学测量、电感测量和电容测量等<sup>[9-10]</sup>。这些方法能达到很高的测量精度,但是针对自适应变副镜系统,光学测量方案需要较大的安装空间,难以在小口径内布置大量的测量探头;而采用电感测量,目前的测量精度可以到 nm 级别,但是电感测量头之间的互相干扰影响了电感传感器在镜面上的应用。相比于光学测量技术和电感测量技术,电容式位移测试技术<sup>[9,11]</sup>结构简单、非接触测量、适应性强;该技术在镜面背面与测量基板之间有一定距离,从而形成电容,随着镜面与基板之间的距离变化,电容量随之变化,测量电容量的变化量从而得到镜面与基板之间的距离。

高精度微位移测量的关键在于电容微弱变化的检测。目前,测量微弱电容的检测电路主要有两种:基于分离元件的模拟电路电容检测方式和基于专用集成芯片的电容检测电路。传统的测量电路一般是采用电阻、电容等元件搭建的,由于模拟电路抗干扰能力差,在高频率、多通道、干扰因素多的应用条件下,传统模拟电路的设计比较复杂,并且电路设计一旦定型,其测量范围也随之固定,量程有限,而自适应变形镜的镜面变形量较

大,所以采用传统模拟电路进行微小位移测量有其局限性<sup>[12-13]</sup>。随着数字处理电路的成熟及 MEMS 技术的发展,专用芯片集成电路的测试与处理技术应运而生,对微弱电容的检测开始朝数字化、高精度、集成化方向发展<sup>[14-15]</sup>。

本文设计的自适应副镜微位移测量系统,采用专用数字电容转化芯片,通过检测变形镜和支撑板间的电容变化量来获得镜面的变形量。利用芯片内部的高性能 DSP,能实现数据处理、温度补偿、寄生电容补偿以及 24 bit 有效位的高精度测量,最大测量频率能达到 50 MHz。该检测系统以变形镜和支撑板为电容的两极,结构简单;相比于传统模拟电路的电容检测方式,电路集成度更高、噪声更小、抗干扰性也远远强于模拟电路方式,而且易于实现大量测量单元的集成扩展,非常适合大量单元的系统集成,特别适用于下一代大口径望远镜的自适应变形镜面系统。

## 2 测量参数要求

对于一个自适应光学系统,其科学目标决定了它允许的最大残余校正误差,而系统允许的最大残余校正误差通常由拟合误差、时间误差以及非共光路误差、读出噪声误差等部分组成,即有:

$$\sigma_{\text{res}}^2 = \sigma_{\text{fitting}}^2 + \sigma_{\text{temp}}^2 + \sigma_{\text{noise}}^2 + \sigma_{\text{tomo}}^2 + \sigma_{\text{mis}}^2. \quad (1)$$

其中,拟合误差由瞳孔直径  $D$ 、促动器数目  $N$  以及望远镜台址的大气相干常数  $r_0$  决定:

$$\sigma_{\text{fitting}}^2 = k \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} N^{\frac{5}{6}}. \quad (2)$$

而时间误差则由系统允许的最大时间延迟和当地大气的相干时间决定:

$$\sigma_{\text{temp}}^2 = \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{\frac{5}{3}}. \quad (3)$$

对于每个促动器要求的最小校正行程,通常可由以下公式求得:

$$\delta = \frac{3\lambda}{2\pi} \sqrt{l} \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{6}}. \quad (4)$$

当自适应变形镜用来校正望远镜的全部误差时,  $l$  取 1.03; 而不校正 tip-tilt 时,  $l$  取 0.134。  $\lambda$  为与  $r_0$  对应的波长。

对与一台 8 m 级的望远镜,在一般的台址条件下,假设视宁度在 0.7" 左右(0.5  $\mu\text{m}$  波长),望远镜的拟合误差取 0.15,对近地层自适应光学系统,通过式(2)可以得到需要的促动器单元大约

190 个左右。

假设台址平均风速为 15 m/s,可以得到台址的相干时间约为 3 ms 左右,若望远镜的最大时间误差为 0.15,通过式(3),可以得到自适应光学系统允许的最大时间延迟约为 6 ms,而系统要求的闭环频率在 340 Hz 左右,所以单个单元的测量频率至少在 1 kHz 以上。

对 8 m 级的望远镜,通过式(4)可以得到不校正 tip-tilt 时促动器要求的最小行程为 9  $\mu\text{m}$ 。

针对一台 8 m 级望远镜,通过计算可以确定传感器的数量需要 190 个以上,测量行程范围至少 10  $\mu\text{m}$ ,测量频率要求在 1 kHz 以上。

## 3 测量原理与方法

图 1 是望远镜上使用的一整套自适应副镜系统的原理图,自适应副镜厚度为 2 mm,直径一般在 500 mm 以上。为实时校正大气对光路的影响,镜面需要以很高的频率(一般在 1 kHz 以上)快速地改变面型,镜面使用很多个音圈电机促动器支撑。

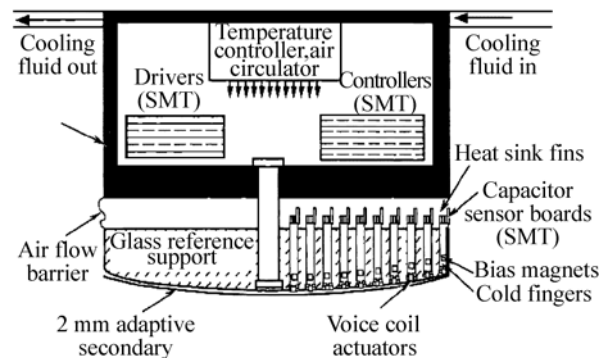


图 1 自适应副镜系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of adaptive auxiliary mirror system

在该自适应副镜系统中,在薄镜面背面镀一层金属膜,作为电容的一极,在镜面后面的微晶玻璃参考基板上也镀一层膜作为电容的另一极,两个极板之间的距离在 0.1 mm 左右。在镜面面型变化时,也就是极板之间的距离变化,相应的电容会变化,通过测量电容值的变化得到镜面的面型变化量。

该方案基板一侧环形极板,当内径为 12 mm,外径为 18 mm,镜面与基板间距离变化为 10 mm

时,计算得到电容变化量约为 0.001 pF,对如此微弱电容的检测电路的精度和分辨率要求极高。通过几种芯片在性能、价格和实用性的对比,选用德国 Acam 公司设计的电容数字转换芯片 Pcap01,该芯片的测量范围可以从几 fF 到几百 nF,通过内部寄存器的配置,可以提供最低至几微安的超低功耗测量、精度达到 21 有效位的高性能测量和每秒钟最高达 50 万次的快速测量,并且兼顾高精度、低功耗和快速测量,使用 Pcap01 电容数字转换芯片能达到 0.001 pF 的精度要求,能满足测量自适应副镜变形引起的电容变化需求。芯片内部原理如图 2 所示。

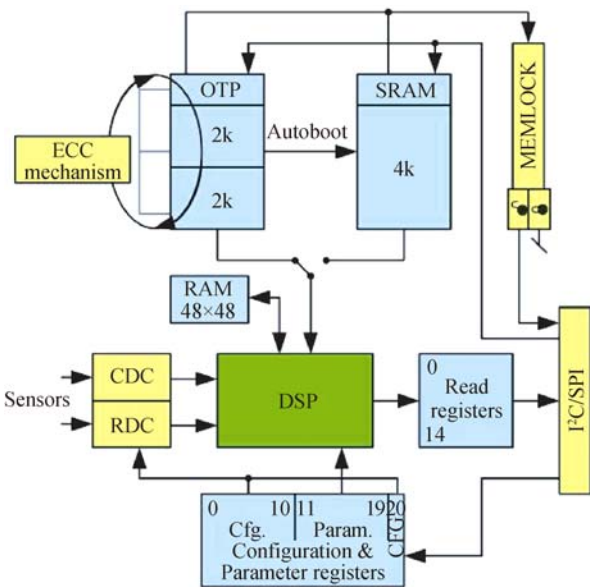


图 2 Pcap01 内部原理图

Fig. 2 Internal schematic diagram of pcap01

Pcap01 数字电容转换芯片通过内部的高精度时间数字转换器 TDC 记录电容的充放电时间,电容充放电时序如图 3 所示。电容首先被充电到电源电压,然后通过电阻进行放电,当放电到一个可控阈值电压水平会被芯片记录下来。这种充放电的测量周期在  $\mu\text{s}$  级,最小可以达到  $2 \mu\text{s}$ ,放电时间与传感器的电容值和参考电容值成比率关系:

$$\frac{\tau_N}{\tau_{\text{ref}}} = \frac{C_N}{C_{\text{ref}}}, \quad (5)$$

式中:  $\tau_N$  为传感器电容的放电时间,  $\tau_{\text{ref}}$  为参考电容的放电时间,  $C_N$  为传感器电容,  $C_{\text{ref}}$  为参考电容。

Pcap01 通过记录的待测电容和参考电容的放电时间,得到待测电容和参考电容的比率,并将

检测到的电容信号转换成 24 bit 的数字信号,然后通过 IIC 接口将数据传递给 STM32 单片机,最后由 STM32 经 USB 接口传递给上位机。

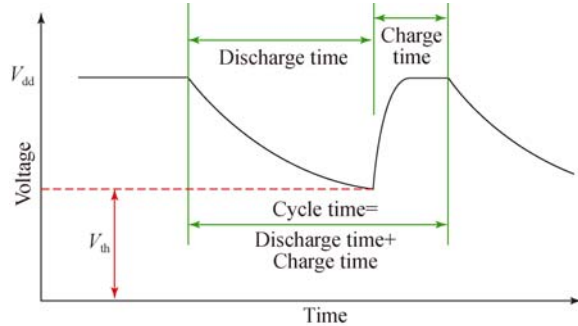


图 3 电容充放电时序图

Fig. 3 Charge and discharge time sequences

## 4 检测系统总体设计

自适应副镜微位移检测系统主要由主控制器和电容测量模块组成。Pcap01 电容测量模块负责检测自适应变形镜与参考极板直接的电容变化,STM32f103ZET6 作为主控制器实现与电容测量模块和 PC 的通讯。系统总体如图 4 所示。

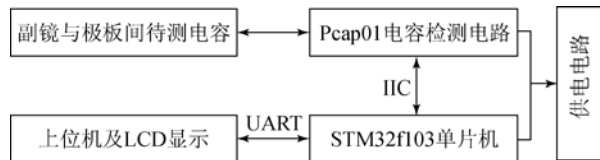


图 4 副镜位移检测系统总体框图

Fig. 4 Block diagram of adaptive mirror displacement detection system

### 4.1 硬件设计

检测系统硬件由电容检测部分和 STM32F102 控制器组成,微电容检测电路的设计直接关系到系统的测量精度和抗干扰性,是整个系统的关键。

#### 4.1.1 微电容测量电路设计

本部分主要由 Pcap01 芯片及其外围电路组成。电容数字转换芯片 Pcap01 采用  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , QFN32 封装,体积小,高度集成。Pcap01 的电容接口有漂移和接地两种方式。为更好地发挥芯片内部的补偿性能,本设计采用漂移连接方式,完全补偿,内部放电电阻为  $90 \text{ k}\Omega$ ,持续触发,

电容测量的循环时间为  $20 \mu\text{s}$ 。芯片内部有 48 bit 的 DSP, 无需再进行外部 A/D 转换, 可直接输出数字信号, 外围只需要少量的接口电路就能把数据传输给后续的单片处理。外围电路如图 5 所示, PC0-PC1 接参考电容, PC2-PC7 为待测电容的接口, 芯片通过 IIC 协议与单片机通信, 实现对芯片的控制和微电容数据的有效传输。

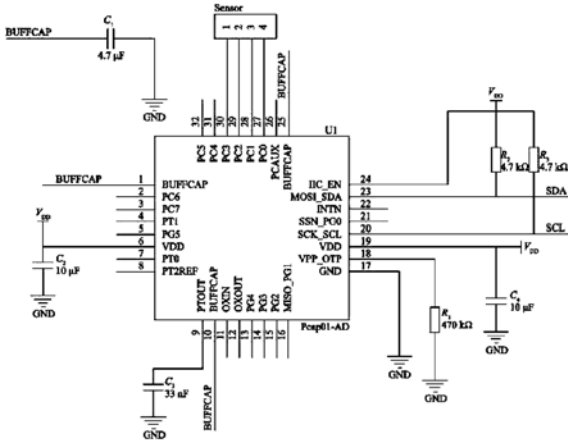


图 5 电容检测电路

Fig. 5 Capacitance measurement circuit

为使寄生电容尽量小, 要求电容输入端口走线尽可能的短, 通过屏蔽线直接连接到 Pcap01, 电容接法如图 6 所示。

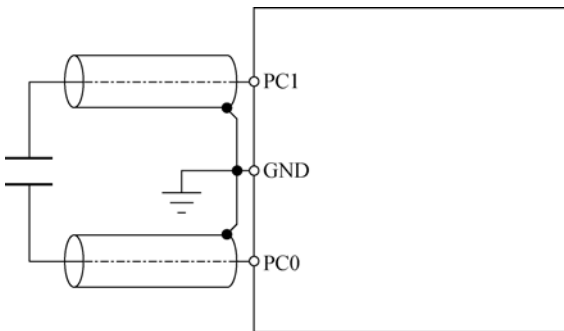


图 6 电容接口连接方式

Fig. 6 Capacitor interface connection

#### 4.1.2 单片机处理模块设计

该部分电路主要由单片机 STM32F103ZET6 的最小系统组成, 外围电路有供电电路、时钟电路、复位电路、IIC 接口电路及 LCD 电路。

#### 4.2 软件设计

检测系统的软件部分主要包括 Pcap01 部分

和 STM32F103ZET6 部分的程序设计。软件流程图如图 7 所示。Pcap01 部分程序主要实现电容数据的采集。开始上电后发送  $0 \times 88$ , 该命令将复位所有状态。首先发送 8 位数据至 000 到 FFF 的任意 SRAM 地址并从此地址再读回数据, 进行通讯测试后再次发送操作码  $0 \times 88$  状态全复位。

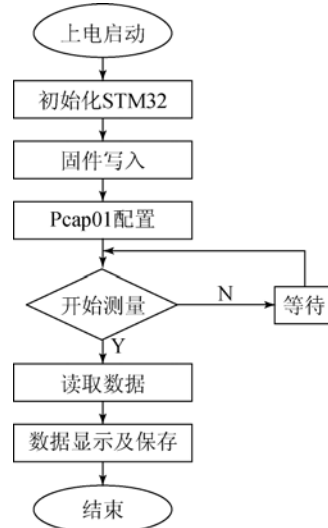


图 7 软件流程图

Fig. 7 Flow chart of software

接下来配置相关寄存器及参数, 寄存器设置完后发送部分复位操作码  $0 \times 8a$  和开始电容测量指令  $0 \times 8c$ , 等待 100 ms 后就可从 Res1 寄存器中读取  $\frac{C_N}{C_{ref}}$  参考的比率。

STM32F103ZET6 部分采用软件模拟 IIC 总线时序与 Pcap01 电容检测电路数据传输。读时序时, 在发送一个开始信号后的第 1 个 Byte 就要发送一个 7 bit 的设备地址, Pcap01 的设备地址是 1010000。STM32F103ZET6 读取到 Pcap01 的数据后进行数据转换, 然后发送至上位机。

## 5 试验分析

试验装置如图 8 所示, 该实验装置主要有固定板、下支撑板、上部可移动板、微调装置和变形镜组成。微调装置的最小精调刻度为 0.01 mm, 在 0.01~0.40 mm 内每 0.01 mm 测量一次, 在 0.04~0.60 mm 内每 0.05 mm 测量一次, 每次数据测量时记录下稳定状态时的 500 个采样值, 在

采集的数据中,超出三倍标准偏差范围的数据作为异常数据进行剔除。

电容计算公式为:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{D}, \tag{6}$$

其中: $\epsilon_0$  为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817\ 620 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ;空气中相对介电常数  $\epsilon_r = 1.000\ 589\ 86$ ;极板正对面积为  $667.588\ 428 \text{ mm}^2$ ,由此可以计算得到不同极板间距时的标准电容量。

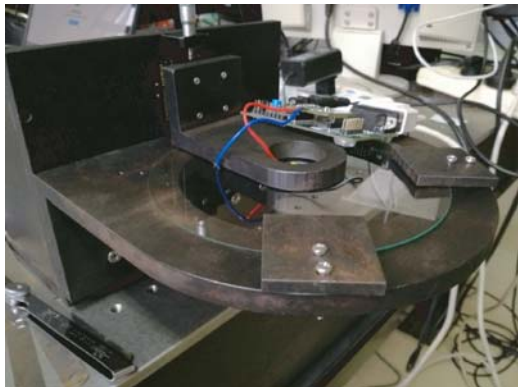
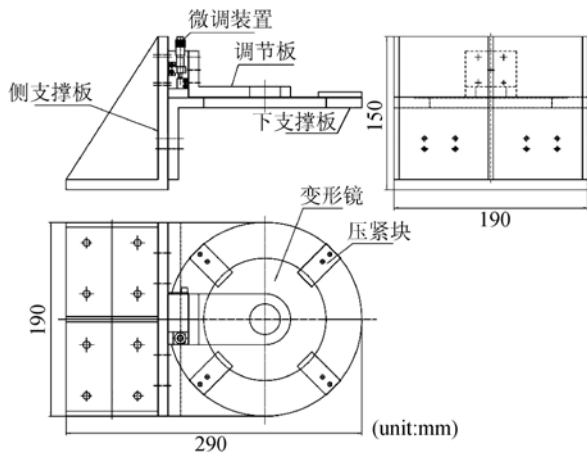


图 8 自适应微位移测量试验装置

Fig. 8 Experiment platform of micro-displacement measurement system

理论值曲线和测量值如图 9 所示。可以看出电容实测值的变化趋势与理论值比较符合,但仍存在一些干扰寄生电容,理论值和测量值的误差如图 10 所示。由式(6)可知,电容的倒数与极板间距成正比,电容倒数与极板距离的关系如图 11 所示(彩图见期刊电子版)。其中红色的数据点是实际测量得到的。因为自适应变形镜和支撑板间的初始距离为 0.1 mm,自适应变形镜的变形量一般在  $50 \mu\text{m}$

以内,所以极板间距从 0.05 mm 变化到 0.15 mm,这一区间是自适应副镜中比较关心的工作区间,针对自适应副镜系统,极板间距  $d$  在 0.01~0.25 mm 之间变化时,实验数据如表 1 所示。

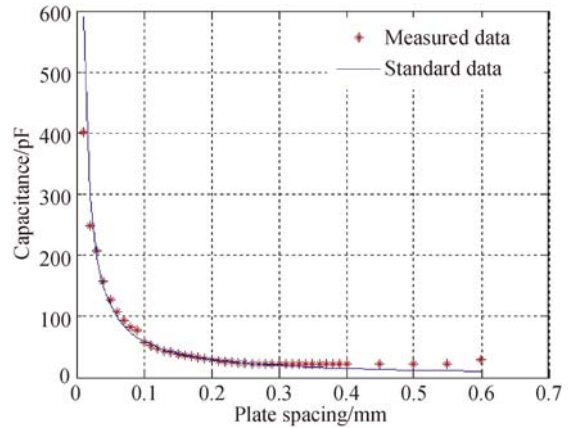


图 9 实测电容值和标准电容值

Fig. 9 Measured and standard capacitances

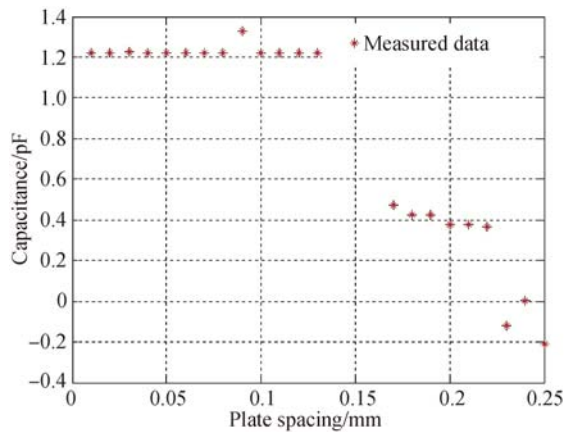


图 10 电容值误差

Fig. 10 Capacitance error

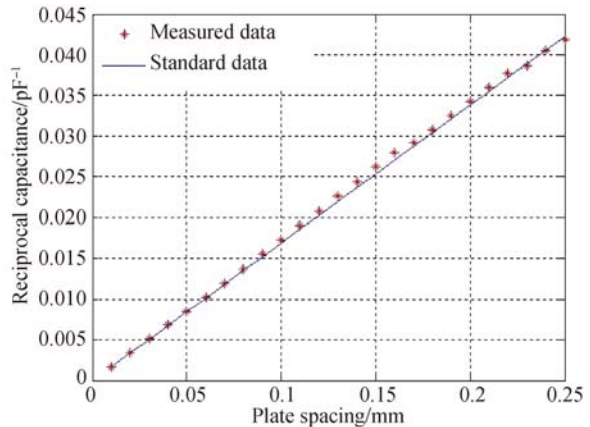


图 11 电容值的倒数与极板距离的关系

Fig. 11 Relation of reciprocal capacitance and plate spacing

表 1 实验数据  
Tab.1 Result of test

极板距 $d/\text{mm}$	电容倒数的真值 $/(10^{-3} \cdot \text{pF}^{-1})$	电容倒数的测量值 $/(10^{-3} \cdot \text{pF}^{-1})$	理论与测量值误差 $/(10^{-3} \cdot \text{pF}^{-1})$
0.01	1.690 778	1.694 280	-0.003 502
0.02	3.395 563	3.381 554	0.014 009
0.03	5.104 018	5.072 331	0.031 687
0.04	6.819 422	6.763 109	0.056 313
0.04	8.542 073	8.453 886	0.088 187
0.06	10.272 098	10.144 663	0.127 435
0.07	12.009 141	11.835 440	0.173 701
0.08	13.753 456	13.526 217	0.227 239
0.09	15.530 362	15.216 994	0.313 368
0.10	17.264 359	16.907 772	0.356 587
0.11	19.030 944	18.598 549	0.432 395
0.12	20.804 337	20.289 326	0.515 011
0.13	22.586 620	21.980 103	0.606 517
0.14	24.374 608	23.670 880	0.703 728
0.15	26.173 694	25.361 657	0.812 037

实测和理论电容值的倒数之差如图 12 所示。由图 12 可得极板距小于 0.15 mm 时电容的倒数误差变化规律,而自适应副镜间距工作在 0.05~0.15 mm 之间,多次测量得到该区间的数。该区间的误差能够通过曲线拟合来消除,实际测量值减去误差得到真实数据。

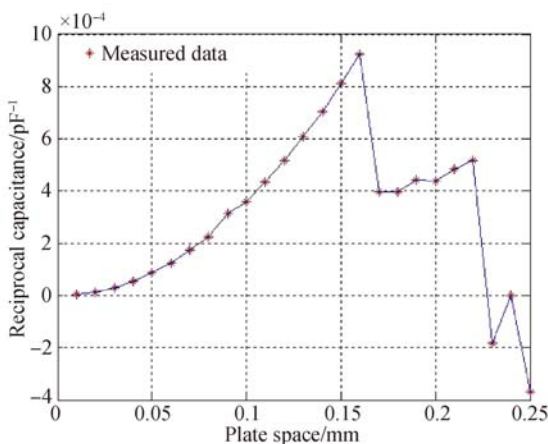


图 12 电容值的倒数误差  
Fig.12 Reciprocal error of capacitance

校正后的电容倒数随极板间距的变化关系如图 13 所示,其最大偏差为 0.000 117 6,可以算出电容倒数的变化除以极板间距的变化,即图 13 中直线斜率为  $\frac{0.005(1/\text{pF})}{0.03 \text{ mm}}$ ,测量的灵敏度是  $\frac{200 \text{ pF}}{3 \mu\text{m}}$ ,而望远镜自适应副镜的镜面变形量一般在 50  $\mu\text{m}$  以内,分辨率在 10 nm 左右。在该实验中,10 nm 的距离变化对应的电容的变化量为 0.067 pF,而 pcap01 测量的数据具有 21 位有效位,精度达到 aF 级。这里主要是测出镜面与基板间的相对距离变化量,而不是绝对距离,通过检测变形镜和支撑基板间的电容变化量反应镜面的变形量,将此相对变形量反馈给音圈电机的控制系统,从而达到自适应镜面变形量的精确控制。

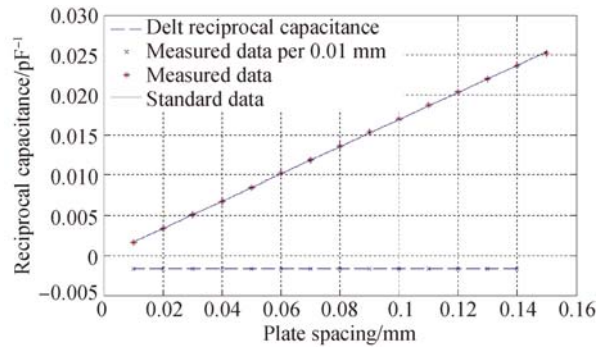


图 13 校正后电容倒数与极板间距的关系  
Fig.13 Relation between corrected capacitance and plate spacing

## 6 结 论

本文针对音圈电机驱动的自适应变形镜,设计了基于电容位移传感原理实现的自适应副镜微位移测量系统,以电容数字转换芯片 Pcap01 和 STM32F103ZET6 为基础进行检测系统的硬件和软件设计,并设计实验平台进行测试验证和精度分析。结果表明,镜面与参考基板的初始距离为 0.1 mm 时,在镜面变形量为  $\pm 50 \mu\text{m}$  的行程内,电容倒数随极板间距呈线性变化,能以测量的电容变化量表征变形镜与其参考基板间的距离,镜面变形量为 10 nm 时,对应的电容变化量为 0.067 pF。该测量系统接口简单、抗干扰、精度高,并且可以同时测量多路电容,检测效率高。该测量方法可以实现高频(1 kHz 以上)、高精度(aF 级)的电容测量,能够用于音圈电机驱动的自

适应镜面的变形检测,作为音圈电机的闭环控制反馈量,从而实现自适应镜面变形量的精密控制,

对下一代大口径望远镜中自适应副镜微变形检测及其他微小位移的检测具有重要的参考意义。

### 参考文献:

- [1] TYSON R K. *Introduction to Adaptive Optics* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2000.
- [2] 王玉坤,胡立发,王冲冲,等. 液晶自适应光学系统中倾斜镜的建模与控制 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 771-779.  
WANG Y K, HU L F, WANG CH CH, *et al.*. Modeling and control of tip/tilt mirror in liquid crystal adaptive optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 771-779. (in Chinese)
- [3] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 1991-1998.  
DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [4] 马佳光,唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 218-227.  
MA J, TANG T. Review of compound axis servomechanism tracking control technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 218-227. (in Chinese)
- [5] 徐新行,刘廷霞,时勉,等. 提高万向轴系式快速反射镜指向精度的装置 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1688-1694.  
XU X H, LI T X, SHI K, *et al.*. Device for improving pointing precision of fast steering mirror with spherical gemel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1688-1694. (in Chinese)
- [6] 李贤涛,张晓沛,毛大鹏,等. 高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2428-2436.  
LI X T, ZHANG X P, MAO D P, *et al.*. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2428-2436. (in Chinese)
- [7] 王帅,曹玉岩. 音圈电机型快速反射镜的驱动控制系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1115-1121.  
WANG SH, CAO Y Y. Design of control system for fast steering mirror driven by voice coil actuator [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(7): 1115-1121. (in Chinese)
- [8] 贾建禄,赵金宇,王建立,等. 基于FPGA的自适应光学波前处理算法 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2580-2583.  
JIA J L, ZHAO J Y, WANG J L, *et al.*. Adaptive optical wave-front processing algorithm based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2580-2583. (in Chinese)
- [9] 李晓辉. 基于电容法的微位移测量技术研究 [D]. 大连:大连海事大学, 2015.  
LI X H. *Research of Micro Displacement Measurement Technology Based on Capacitance Method* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)
- [10] 郑银涛. 基于平板式电容的微位移测量系统设计 [D]. 大连:大连理工大学, 2010.  
ZHENG Y T. *Design of Parallel-Plate Capacitor Based Micro-Displacement Detecting System* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] 冯佳. 极微小电容的检测技术 [D]. 北京:中国科学院大学, 2014.  
FENG J. *Research on the Detecting Technology of Tiny Capacitance* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [12] 张宇鹏,徐钰蕾,王显棠. 高精度电容式角位移传感器测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 147-150.  
ZHANG Y P, XU Y L, WANG Y T. Measurement method of high-precision capacitive angular displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(S1): 147-150. (in Chinese)
- [13] 朱宵波,苑伟政,任森. 一种电容式传感器数字化通用检测接口设计 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 62-65.  
ZHU X B, YUAN W ZH, REN S. Universal digital detection interface for capacitive sensors [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2013, 32(1): 62-65. (in Chinese)
- [14] AMARASINGHE R, DAO D V, TORIYAM T. Development of miniaturized 6-axis accelerometer utilizing piezoresistive sensing elements [J]. *Sensors and Actuators*, 2007(134): 310-320.
- [15] ZHANG D F, DRISSEN W, BREGUET J M, *et*

al.. A high-sensitivity and quasi-linear capacitive sensor for nano-mechanical testing applications

[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(7): 075003.

作者简介:



左 恒(1982—),男,湖北天门人,副研究员,2004年于中国科学技术大学获得学士学位,2010年于中国科学院南京天文光学技术研究所获得博士学位,主要从事大口径自适应变形镜的研究。E-mail: hengz@niaot. ac. cn



刘志民(1992—),男,河南周口人,硕士研究生,2014年于南京林业大学获得学士学位,主要从事精密仪器、望远镜精密控制的研究。E-mail: zmliu@niaot. ac. cn