

**毕业设计（论文）**

题 目 基于迈克尔逊干涉仪

的位移测量系统

专 业 测控技术与仪器

学　　 号 180220214

学 生 1802202

指 导 教 师 任秀云

答 辩 日 期 2022 年6月2日

# 摘 要

迈克尔逊干涉法测位移可以实现几十纳米甚至更高的分辨率，。

关键词：关键词1；关键词2；……；

关键词6

# Abstract

Externally pressurized gas bearing has been widely used in the field of aviation, semiconductor, weave, and measurement apparatus because of its advantage of high accuracy, little friction, low heat distortion, long life-span, and no pollution. In this thesis, based on the domestic and overseas researching……

**Keywords:** keyword 1, keyword 2, keyword 3, ……, ……,

keyword 6

# 目 录

**摘要** Ⅰ

**Abstract** Ⅱ

**第1章 绪论**

1.1 课题背景及研究的目的和意义 1

1.2 国内外在位移测量方向的研究现状 1

1.2.1 国内研究现状 1

1.2.2 国外研究现状 1

1.3 本文的主要研究内容 3

**第2章 迈克尔逊干涉位移测量系统设计**

2.1 引言 1

2.2 波动光学原理 1

2.3 迈克尔逊干涉仪测量原理 1

2.3.1 干涉仪测位移原理 1

2.3.2 细分辩向计数原理 1

2.4 测量系统设计方案 1

2.5 本章小结 1

**第3章 系统设计**

3.1 引言 1

3.2 光路部分设计 4

3.3 硬件电路设计 4

3.3.1 硬件电路整体设计 1

3.3.2 传感器选型 1

3.3.3 放大和整形电路设计 1

3.3.3 计数模块设计 1

3.3.4 显示模块设计 1

3.3.5 位移发生部分设计 1

3.4 程序设计 4

4.3.1 主函数 1

4.3.2 显示与控制部分 1

3.5 本章小结 4

**第4章 实验结果分析**

4.1 引言 5

4.2 数据采集 5

4.3 实验数据分析 5

4.4 系统误差分析 4

4.4.1 光路因素 4

4.4.2 电路因素 4

4.4.3 环境因素 4

4.5 本章小结 6

**结论** 7

**原创性声明** 8

**参考文献** 9

**致谢** 10

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景、目的和意义

精密机械加工的基础是较高精度的位移测量技术。众多领域的精度已经步入纳米级，位移的精密测量越来越受到重视。在许多领域中，对微位移的测量方法与测量精度都有了要求。现在位移测量技术已经被应用于各行各业，不论是高铁、船只、汽车等方面的生产制造，还是在光学仪器、医疗仪器等的制造加工方面，位移测量技术都不可缺少，而且对它的精度要求也越来越高，因为测量精度的高低将直接影响到产品的质量。

对于位移测量，按照是否接触可以分为接触式测量和非接触式测量。按照测量转换方式又可以分为机械测量法、光学测量法与电学测量法。接触式测量由于存在应力，且可能会对被测物体表面带来不可修复的损伤，而且接触式测量存在速度慢，精度低，由于存在磨损，还会有额外的保养维修成本。因此目前先进的测量方法均不是接触式测量。而非接触式测量不存在接触应力，因此逐渐成为主要发展方向。

目前在很多前沿学科技术中都设计位移测量技术，并且它在许多科技中起到决定性的作用。例如材料和物理学领域测量金属的膨胀系数，需要通过测量膨胀产生的位移大小来测出体积变化量，而这取决于位移测量的精度[9]。随着精密加工技术的飞速发展，具有低成本、小体积、抗冲击强等特点的 MEMS 技术将会广泛应用于各个方面[1]。在芯片制造领域。由于芯片制造的线宽越小，其单位面积内可以放置的晶体管数量会变多，而同时相同数量的晶体管的功耗也会相应降低。因此芯片制造的线宽可以说是越小越好。在加工过程中明显芯片需要定位对准这一步骤，而对准的前提就是高精度的位移测量技术。芯片制造中使用的光刻机中的镜片位置也需要纳米级的测微技术来校订。在微观表征器件方法中，由于光学显微镜受到其物理衍射极限的限制，因此光学显微镜已经逐渐被更高分辨率的仪器取代，如图1-1所示。位移传感器是控制纳米位移台运动的一个关键组件。为了使位移台能实现高精度位移，必须引入位移测量系统来配合进行反馈控制[10]。



图1-1 AFM、SEM与SPM显微镜

通过测量位移可以实现许多其他量的测量。例如温度改变时，材料会对应的膨胀，若用已知膨胀系数的材料制作通道或将其当作位移输入，测量出其在温度改变时改变的长度，理论上即可算出此时环境对应的温度。例如2019年，西安工业大学的王欢等人就设计出了基于法布里-珀罗干涉仪的高分辨率光线温度传感器，且温度分辨率达到了0.0002摄氏度[11]。使用类似的原理可以完成气压强度的测量，压力大小的测量等物理量的测量。

由此可见，众多科技领域的发展都依赖于微位移测量技术。基于迈克尔逊干涉仪的位移测量装置可以实现纳米甚至更高的分辨率，并且具备能直接溯源至激光波长、有一定的抗干扰性能，例如激光对其的测量结果影响很小，因此其有实际的工程价值。

## 1.2 国内外在位移测量方向的研究现状

### 1.2.1 国内研究现状

利用激光测位移的研究可以追溯到

### 1.2.2 国外研究现状

## 1.3 本文的主要研究内容

本文的主要研究内容就是在深入了解迈克尔逊干涉仪的原理后，推导随着干涉仪中的M2镜移动，干涉条纹会发生怎样的变化。随后根据干涉条纹的变化情况决定了测量系统的设计方案以实现对位移的高精度测量。由于光电传感器信号很小，本文为了提高测量精度，减少干扰，采用了集成式的方法提高了系统测量精度。利用上述技术设计了基于STM32F103单片机的迈克尔逊干涉仪位移测量系统和相应的上位机，实现了该仪器的可视化与智能化测量。

首先根据研究背景及意义，在分析国内外研究现状的基础上，提出课题设计的目的。通过查阅大量国内外关于激光的位移测量技术和其他位移测量方法文献的基础上，阐述了本课题的可行性与必要性。

然后建立了基于迈克尔逊干涉仪进行位移测量的数学模型，随后在此基础上给出了测量系统的整体设计方案，具体设计方案可以见图2-7。随后对测量系统的各个部分分别进行器件的选型与电路设计。最后根据测量结果标定了产生位移的压电陶瓷，分析了测量结果的误差大小与影响系统测量精度的主要因素。

# 第2章 迈克尔逊干涉位移测量系统设计

## 2.1 引言

本章主要介绍迈克尔逊干涉仪的原理，如果通过对干涉条纹进行计数来得到测量结果和计数中使用的细分辩向技术的基本原理。并依据这些原理确定了迈克尔逊位移测量系统的整体设计方案。系统通过迈克尔逊干涉仪将位移变化转化为干涉条纹的变化，并通过两路光电二极管进行信号采集，并在运算后输出结果。

## 2.2 迈克尔逊干涉原理

干涉指两列或两列以上的波在空间中叠加时，在叠加区域内出现的各点强度稳定的强弱分布现象[5]。为了产生稳定的光程差通常有两种方法：分振幅和分波面。分波面要求光源足够小，而分振幅可以使用扩展光源，能够获得强度较大的干涉效应。迈克尔逊干涉仪就是一种分波面干涉仪。

迈克尔逊干涉仪是为了研究“以太”漂移[4]，在1881年被美国物理学家迈克尔逊设计出来的光学干涉仪器[3]。其基本结构如图2-1所示。

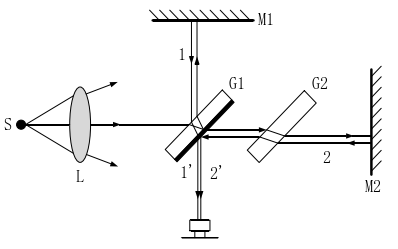


图 2-1 迈克尔逊干涉仪的基本结构和光路

其中M1与M2是两块平面反射镜，相互垂直放置。G1与G2是两块厚度几乎相同，材质相同的玻璃板，其中G1的一面涂有半透半反射薄膜，其作用是让入射光一半投射，另一半发生反射，形成两束强度大致相等的相干光。G2称为补偿板，用于补偿光线2的光程差[6]。

激光器S射出的光经过透镜或扩束镜L，折射进入G1后，一部分在半透半反膜上反射。这部分光线射向M1镜，沿途中光线1的路径，光线1被M1反射后，再通过G1向观察屏上发射，为光线1’。另一部分光线透过半透半反射膜，通过补偿板G2经M2泛着后再次通过补偿板G2，最后经G1上的半透半反膜向观察屏处发射。图中为光线2’。光线1’与光线2’有稳定的光程差，所以会在观察屏上形成稳定的干涉条纹。G2镜可以让两条光线穿过厚度和折射率一致的玻璃板的次数相同，方便计算光程差，此时的光程差即为光线12再空气中的几何路程差。

将上述光路图中的部分简化，光线2’可以等效为从M2经过半透半反射膜形成的虚像M2’射出的。简化后即为如图2-2的模型。d

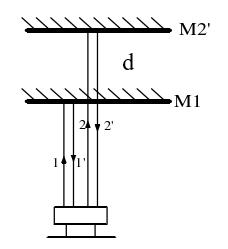


图 2-2 迈克尔逊干涉仪的基本结构和光路

薄膜干涉中的光程差公式为

 (2-1)

式中  ——光线入射角（°）

n1与n2 ——两种介质的折射率

——光的波仓（m）

d ——薄膜厚度（m）

——反射带来的半波损失

应用在迈克尔逊干涉仪上时，两种介质都是空气，n1与n2均取1。由于表示反射带来的半波损失，在迈克尔逊干涉仪中可消去。带入式（4-1）可得迈克尔逊干涉仪的光程差为：

 (2-2)

式中 *d* ——M1与M2’距离（m）

*i*——光线入射角（°）

在M1与M2平行且不移动时，*d*为一个常量，光程差只由入射角决定。相同倾角的光程差相等，构成了一个垂直于观察屏的光锥。所以干涉条纹应为一圈圈同心圆环。如图2-3所示。



图 2-3 等倾干涉条纹图

## 2.3 迈克尔逊干涉仪测量原理

### 2.3.1 干涉仪测位移原理

干涉条纹中的明圆环均满足式（2-3），暗圆环均满足式（2-4）

 (2-3)

 (2-4)

式中 n——取任意自然数

在固定M1镜，平移M2镜时，式（4-2）中的*d*会改变，干涉条纹也会收缩或向外扩张。当移动位移满足式（4-3）时，干涉条纹中心会完成一个周期的明暗变化。即如果两相干光的光程差是入射光半波长的偶数倍，最后会

在接收屏上形成干涉亮条纹；相反，如果两相干光的光程差是入射光半波长的奇

数倍，最后会在接收屏上形成干涉暗条纹。

 (2-5)

此时如果在干涉条纹中心放置一个光电传感器，该光电传感器接收到的信号也会随着干涉条纹中心光强改变而改变。在M2镜匀速产生的位移时，光电传感器的信号理论上会按照正弦规律变化，且每变化一个周期时均满足。只要经过波形变换将其变化为方波，再对方波计数，理论上就可以获得光电传感器按正弦规律变化的次数，且满足式（2-6），即可据此计算出位移量。

 (2-6)

式中 T为经过的周期数。

### 2.3.2 细分辩向计数原理

由于位移量存在正负，且根据上文，单个光电传感器不仅无法获得M2镜的运动方向，且在M2镜往复运动时会禅城重复计数，最终只能获得M2镜运动的路程，而无法获得位移。为了正确获取位移，我选择使用细分辩向技术。

细分辩向电路主要包括完成细分和辩向的功能，细分是基于两路方波在一个周期内具有两个上升沿和下降沿，通过对边沿的处理实现四细分，即在一个变化周期内实现四次计数。辩向是根据两路方波的相位前导和滞后相对关系作为判别依据来完成的。由于难以根据根据单一信号进行辩向，因此选择使用两个光电传感器，来产生两路具有90°相位差的信号，进行细分辩向。

通过调整两个光电传感器的位置，可以获得相位差近似为90°的两路信号，M2镜匀速正向移动与匀速反向移动时的波形图。两路信号分别用A与B代替，则正向与反向运动时的信号分别如图2-5与图2-4所示，图中包括了经过比较器整形后的方波信号。

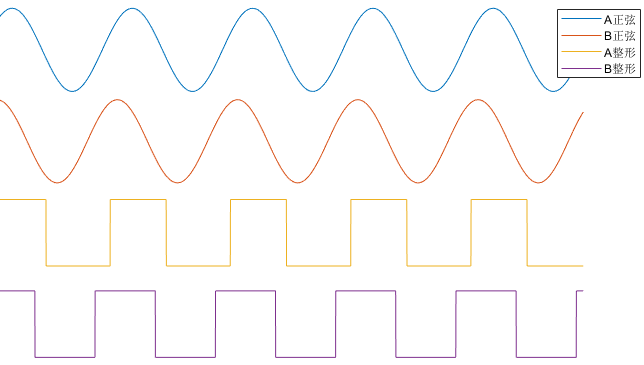


图 2-4 反向运动波形图

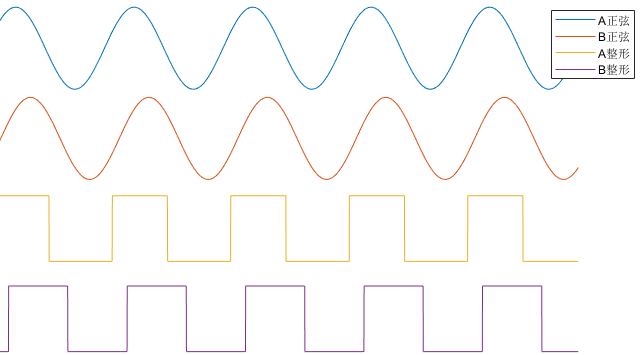


图 2-5 正向运动波形图

图中明显可以看总结出AB信号出现上升沿与下降沿时，另一路信号的电平状态与运动方向的关系如表2-1所示。因此计数时只要按照表2-2所示规律进行正交解码，即可获得如图2-6所示的计数效果，明显可以看出该方法可以实现辩向功能，且拥有在每个周期可以实现四次计数的细分功能。

表2-1信号电平与运动方向的关系

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 运动方向 | 信号A | | 信号B | |
| 上升沿 | 下降沿 | 上升沿 | 下降沿 |
| 正向 | B低电平 | B高电平 | A高电平 | A低电平 |
| 反向 | B高电平 | B低电平 | A低电平 | A高电平 |

表2-2信号电平与运动方向的关系

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 相对信号电平 | 信号A | | 信号B | |
| 上升沿 | 下降沿 | 上升沿 | 下降沿 |
| 高 | 向下计数 | 向上计数 | 向下计数 | 向上计数 |
| 低 | 向上计数 | 向下计数 | 向上计数 | 向下计数 |

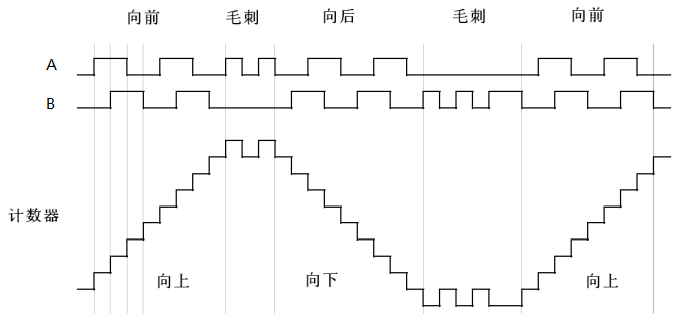


图2-6正交解码计数效果

## 2.4 测量系统设计方案

依据以上分析和原理，设计的系统原理图如图2-7所示。系统可以分为信号发生部分，信号采集部分，放大整形部分，信号处理部分与显示部分。信号发生部分主要由加入压电陶瓷的迈克尔逊干涉仪组成。信号采集部分由两个光电二极管组成，放大整形部分由运放组成的放大电路和滞回比较器组成，信号处理部分与显示部分均在单片机中实现，显示部分在上位机上也有体现。



图2-7系统整体设计

具体原理和过程如下，在压电陶瓷上加电压的大小改变时，压电陶瓷长度因此改变，M2镜也随之移动。照在两个光电二极管上的光强发生变化，在经过放大电路，整形电路后由单片机进行计数和处理，最后将结果显示在屏幕上并发送给上位机进行显示和处理。从而实现干涉仪测位移系统位移-光强-电信号的转换。

## 2.5 本章小结

本章主要介绍了迈克尔逊干涉仪的基本原理，迈克尔逊干涉仪测位移的原理和四细分辩向计数的原理。此外，还简要阐述了系统的主要构成部分和信号处理的大致流程，并给出了系统的整体设计方案。

# 第3章 系统设计

## 3.1 引言

本章主要介绍光路部分设计与电路部分的设计。包括激光光源的选择，光电传感器与电路中其他元器件的选型。设计了放大倍数合适的放大电路，阈值合适的滞回比较电路即整形电路，选择了合适该系统的单片机与显示器。并阐述系统的硬件电路设计思路，对电路的各个模块进行详细介绍分析。

## 3.2 光路部分设计

常用的激光光源包括固体激光器[8]，半导体激光器，气体激光器。在主要考虑了价格因素后选择了教学使用的He-Ne激光器，其发出激光波长为632.8nm。此激光器在输出稳定性，光相干性，输出功率上都符合迈克尔逊干涉仪的具体要求。

分光元件可以使用分光片或分光棱镜，虽然分光棱镜价格较贵，但是因为实测分光片产生的干涉条纹效果不好，因此分光元件选择分光棱镜。

由于M1与M2镜均需要调整角度来产生干涉条纹和调整干涉条纹中心位置，因此M1与M2镜均放在二维调整架上。由于还需要粗调光程差来调整干涉条纹光斑大小，因此将M2镜的二维调整架放在二轴移动平台上，方便调整镜片位置与光程差。最终的光路实物图如图3-1所示。分光棱镜同样放置在水平的二位调整架上方便调整角度。

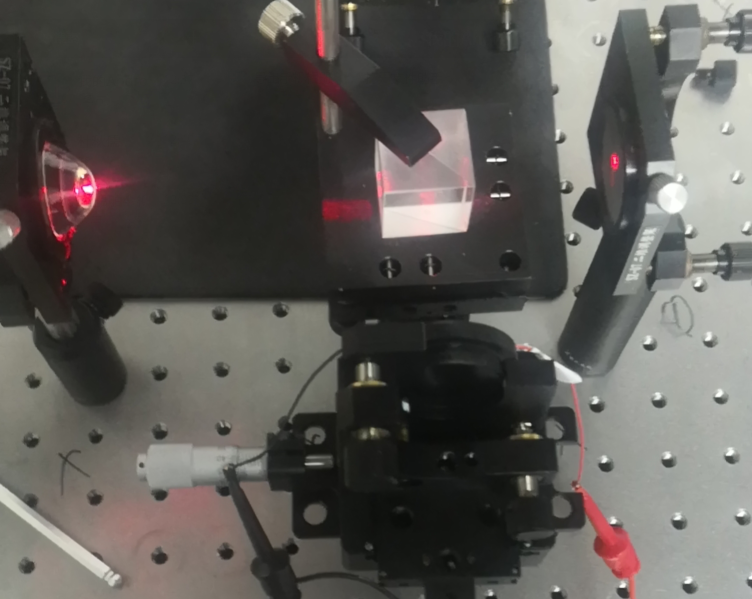


图3-1迈克尔逊干涉仪实物图

## 3.3 元件选型

### 3.3.1 光电传感器选型

光电传感器是一种感光器件，是利用光敏元件将光信号转化为电信号的传感器。可以分为光电倍增管，光电二级滚，光导探测器，电耦合眼见等。在查阅了常用且价格较低的光电传感器后，初步确定了硅光电池2DU6与光电二极管SFH203P。表3-1是2DU6与SFH203P与光有关的参数表。这两种元件在光谱范围等其他参数均合适，但测量干涉条纹时若感光面积过大可能会无法分辨暗条纹与明条纹，因此最终选择了SFH203P作为光电传感器。

表3-1光电传感器参数表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 参数 | 符号 | SFH203P | 2DU6 |
| 光谱范围 |  | 400nm-1100nm | 300nm-1000nm |
| 最大感光波长 |  | 700nm | 850nm |
| 光敏面积 |  | 6mm\*6mm | 1mm\*1mm |

该光电二极管在串联10k欧姆大小的的电阻并加5v电压后，通过光电二极管的电流大小在一定范围内与照在光电二极管上的光强关系如图3-2所示，图中VO为开路电压，IP为上述条件下的光电流。

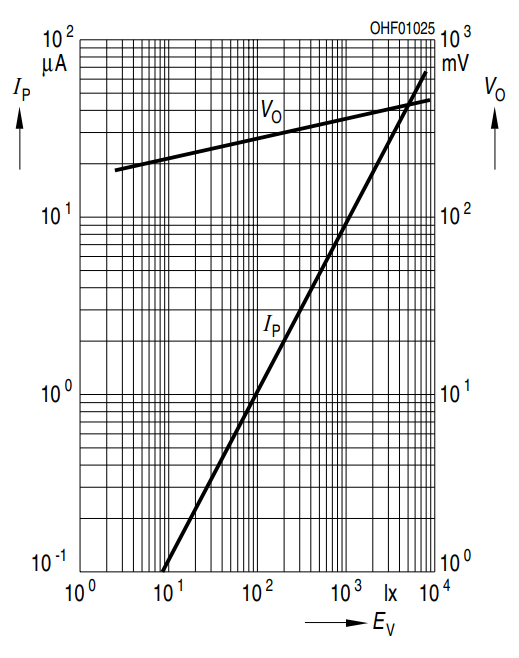


图3-2光电二极管光电流与开路电压

### 3.3.2屏幕选型

首先选择显示屏，屏幕在此设计中的作用是显示系统当前状态，显示调试结果，因此选择便宜好用的黑白OLED显示屏即可，最终选择了12864OLED显示屏，该显示屏价格便宜，有128x64个像素点，能显示足够的信息。该显示屏使用SSD1306驱动芯片。该驱动芯片尺寸小，低压就可以工作，而且支持多种通信协议。四线的SPI，两线的IIC或者并行的8080均可。

### 3.3.3 单片机选型

随后选择单片机，单片机需要正交解码计数功能和至少实现一种能控制OLED的通信协议，且最好拥有串行口外设用于向上位机发送信息。若选择单独的通信芯片来分别实现计数与通信功能，主板和程序都会比较复杂。因此挑选了芯片自带多种外设的STM32F103。该系列芯片包含两个12位的ADC，两个I2C接口，两个SPI接口3个UART接口，三个通用十六定时器，一个USB接口和一个CAN接口。且芯片的供电电压低，范围宽，2.0V-3.6V之间均可。而且该芯片可在宽温度范围内工作。最重要的是芯片的价格便宜。在该系列芯片中选择了容量足够而且足够便宜的STM32F103C6T6芯片。

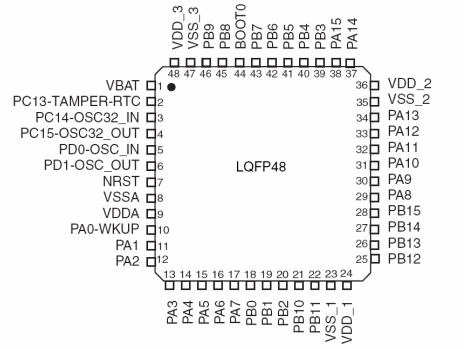


图3-6单片机引脚封装图

## 3.4 电路设计与仿真

### 3.3.2 放大电路设计

上文光电传感器选择了SFH203P型号的光电二极管，需要对光电二极管信号进行放大整形处理。由于没有比较特殊的要求，因此运放选择常见的LM324N。

LM324N是常用的四运算放大器，内部有四个独立的高增益运算放大器，适合于电源电压范围较宽的单电源使用，也适合双电源工作模式。在推荐的工作条件状态下，电源电流与电源电压无关。它无需外接补偿电路，且输入电压范围可接近地电平。它的使用范围包括传感放大器、直流增益模块和其他所有可用单电源供电的使用运算放大器的场合。该运放可以工作在0~70摄氏度。LM324的引脚图如图3-3所示。

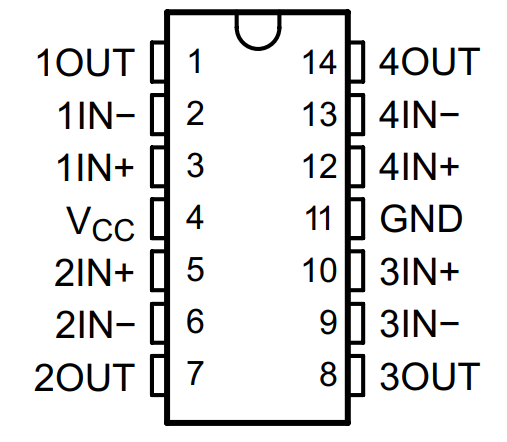


图3-3 LM324运算放大器引脚图

设计好的I-U放大电路如图3-3所示。电路相当于对R4上的电压进行放大。电阻R5是为了进行运放的阻抗匹配。

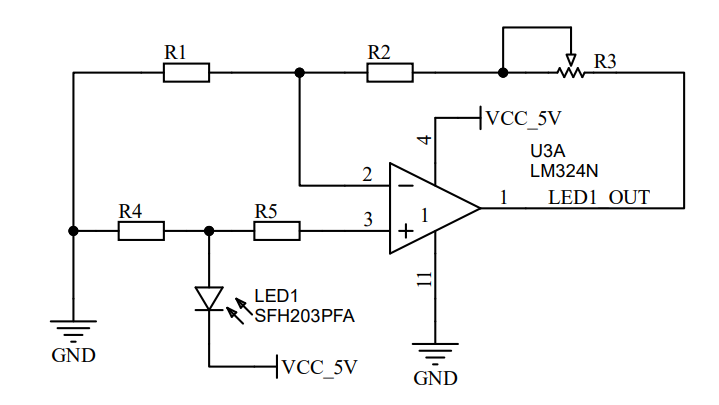


图3-4放大电路

经过计算，该电路输出电压与经过光电二极管的光电流的关系为：

 (3-1)

式中：——运算放大器输出电压（V）

——通过光电二极管SFH203P的电流大小（A）

——D电阻RX的阻值（Ω）

在环境暗光的情况下，干涉条中心照射在光电二极管SFH203P上时光电流范围大约为0 - 2uA。由于后续需要对放大后的电压进行整形处理，而且可能会将对其进行ADC采集，因此放大到较为合适。因此该电路的放大倍数取左右即可，且需要在一定范围内可调，即满足

 (3-2)

R4与后续放大倍数均不宜过大，同时考虑到电阻阻值均需要为常见阻值且放大倍数需要较宽范围内可调，因此最终取，，，，此时理论上放大倍数在之间可调。

### 3.3.3 整形电路设计

整形电路需要将正弦波转为方波电路，因此理论上使用比较器即可，但放大后的信号可能噪声较大，因此需要使用滞回比较器，而且滞回比较器的两个阈值电压均应可以控制。且比较器输出的方波需要送到单片机计数器内进行计数处理，因此输出电压不能超过3.3V烧坏单片机。最终采用的整形电路如图3-4所示。图中R1-R3用来调节滞回比较器阈值电压，R4与R5用来降低输出电压到3.3v以下。

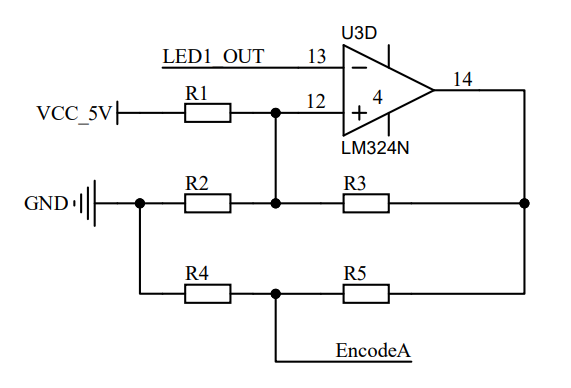


图3-5整形电路原理图

经过简单推导，该电路阈值电压满足式（3-3）

 (3-3)

式中：——阈值电压（V）

——运算放大器输出电压（V），值为3.7V或0V

——电源电压，值为5V

经过计算，较高阈值与较低阈值分别为式（3-4）与式（3-5）

 (3-4)

 (3-5)

式中：——电阻R2并联R3的阻值（Ω）

——低阈值（V）

——高阈值（V）

根据需要，与分别取1.8V与2.4V。经过计算，选取了合适的电阻阻值R1取61K，R2取51K，R3取150K。由于LM324运放在5V供电下的最大输出为3.7V左右，为了防止烧坏单片机，有多种保护电路可以选择，最典型的就是双二极管式的保护电路。将输入单片机的电压通过两个二极管分别连接到地电平与3.3V电平，此时两个二极管均工作在反偏状态。在二极管烧坏前可以保证输入电压一直保持在0V~3.3V的范围内，从而保护单片机输入引脚。但此方法需要使用两个二极管，且二极管存在压降，因此电压变化范围比0V~3.3V的范围更小，可能会导致后续计数出现问题。因此未选择此种保护电路。

考虑到运放在正常工作状态下输出一定在0V~3.7V范围内，使用两个电阻分压可以保证输出在0V~3.3V范围内。而且单片机在将输入模式调整到浮空输入模式时的输入阻抗有兆欧级别，因此可以认为分压后的电压即为输入单片机的有效电压。为了成功保护，两个电阻大小应满足式（3-6）

 (3-6)

式中：为运放输出电压，取值范围0V~3.7V

在满足式（3-6）的条件下，R4与R5如果取的过小，会导致运放输出电流过大，输出结果错误。综合考虑后最终选择R4取68K，R5取10K，能保证在输出不超过3.8V时单片机的安全。且3.7V时经过此支路的电流仅有五十微安左右，不会影响运放输出结果。

### 3.3.4 放大整形电路仿真

### 3.3.

## 3.5 程序设计

### 3.5.1 显示部分程序设计

### 3.5.2 主函数

主函数需要完成

## 3.6 本章小结

测试

# 第4章 实验结果分析

## 4.1 引言

## 4.3 实验数据分析

## 4.4 系统误差分析

### 4.4.1 光路因素

### 4.4.2 电路因素

### 4.4.3 环境因素

## 4.2 本章小结

测试

# 结 论

本文在深入研究迈克尔逊干涉仪原理的基础上，结合光电传感器与细分辩向技术，设计了一种以He-Ne激光器位光源的迈克尔逊干涉仪位移测量系统。设计了光电二极管对应的放大电路与整形电路，并设计了基于STM32F103单片机的下位机程序。目前，已经完成整个系统的设计测试与误差分析工作。

具体研究内容如下：

（1）首先阐述了迈克尔逊干涉仪测位移的基本原理，并推导了位移大小与干涉条纹变化之间的关系，还有干涉条纹变化与计数结果之间的关系，最终得出计数值与位移大小的函数关系。

（2）选择了合适的光电传感器与运算放大器，设计了合适的电流电压转换放大电路，并用Proteus对其进行了仿真测试。

（3）设计并制作了测量使用的电路板，搭建了测试系统使用的光路实物。决定使用制作完成的实物对压电陶瓷产生的位移进行测试和数据记录，最终分析得出使用的层叠式压电陶瓷的压电常数。

（4）对测量结果进行了误差分析，得出系统的测量精度为±101nm，测量分辨率达到了。

本毕业设计虽然已经完成且实现了既定功能，但它还存在一些问题。其一是在开机后，将干涉条纹调整到合适位置，随着放置的时间变长，干涉圆环中心会逐渐移动，若时间足够长，条纹的移动最终会导致两个光电传感器的相位差过大，导致细分辩向后的结果错误，从而导致计数结果错误。其二是由于He-Ne激光器使用的电源存在一百赫兹的波动，导致激光器发出的激光强度也存在一个一百赫兹的波动，这可能会导致测量结果出现误差。其三是该装置的抗干扰性并不完美，其在多数情况下

# 本科毕业论文（设计）诚信声明书

本人呈交给哈尔滨工业大学的学位论文，除所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人毕业设计期间在导师指导下的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

作者签名：

导师签名：

年 月 日

# 参考文献

1. Frank Schneider,Jayanti Das,Benjamin Kirsch,Barbara Linke,Jan C. Aurich. Sustainability in Ultra Precision and Micro Machining: A Review[J]. Korean Society for Precision Engineering,2019,6(3):601-610.
2. Shaolin Xu,Tsunemoto Kuriyagawa,Keita Shimada,Masayoshi Mizutani. Recent advances in ultrasonic-assisted machining for the fabrication of micro/nano-textured surfaces[J]. Higher Education Press,2017,12(1):33-45.
3. 唐嘉鹏. 基于迈克尔逊干涉原理的微压力传感器设计[D]. 南京：南京信息工程大学，2020：8-20.
4. V. Haan. First-order ether drift experiment with a Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. Physics of Wave Phenomena, 2010, 18(03):164-166.
5. 乔亮. 迈克尔逊干涉实验的仿真研究[J]. 重庆三峡学院学报. 2015，31(03):50-52.
6. 黄珍献，刘跃，贾光一. 基于迈克耳孙干涉光程差放大法的微小位移测量[J]. 大学物理，2017，36(06):41-43.
7. 金锋，卢杨，王文松，张玉平. 光栅四倍频细分电路模块的分析与设计[J]. 北京理工大学学报. 2006(12):1073-1076.
8. 郑权，赵岭，钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. 光学精密工程. 2001(9):7-9
9. 张莉，杨伊凡，荣振宇，曲祥文，蒋伊麦. 激光散斑法测量横向微位移及其应用[J]. 物理实验，2019，39(12):11-14
10. 赵宏波. 光栅干涉型微位移测量系统关键技术研究[J]. 太原：中北大学，2020：45-60.
11. 王欢. 光纤调频连续波干涉温度传感器光学系统的研制[D]. 西安工业大学，2019：57-73

# 致 谢

时光如白驹过隙，转瞬即逝。不知不觉中，转大学四年的日子已经接近尾声。

在着四年中我有过快乐，有过迷茫，也有过遗憾与不舍。临近毕业之际，我想对四年来，始终关心爱护支持我的老师、家人和朋友表示由衷的感谢。

首先，我要感谢我的导师任秀云副教授和大学四年中教过我的各位老师。任老师对待学术严谨规范，鼓励学生的创新型思维，关心学生的科研进展情况。在我遇到问题的时候给予相应的指导与帮助。其次我还要感谢光组的所有老师，特别是张延超老师。老师们在我的毕业设计遇到困难时给出了许多宝贵的建议，让我能够顺利完成实物设计与论文的编写。再次对任老师和光组其他老师表示衷心的感谢。

其次，我要感谢我的室友伍浩诚，马启昊，他们给我创造了良好的宿舍氛围。感谢实验室的研究生学长赵子达，他也给予了我许多帮助，例如告诉了我实验室元器件的摆放位置和实验室器件的使用注意事项。

最后我要感谢我的家人，正是他们多年来给我的关爱和支持，才让我有了奋战到底的勇气和动力，让我不断学习，不断提升自我。