

参赛题目：酒精浓度的非接触测量

一. 研究目标

研制基于光栅分光的分光光度计，实现对酒精的非接触测量，并尝试测量酒精的近红外光谱（900nm-1500nm）。

二. 研究方案

我们队三个同学分别擅长光路设计与搭建、电控、信号探测电路与数据处理。

首先通过查阅资料了解非接触测量酒精浓度的方法，以及酒精的光学特性。确定制作光栅分光光度计后，我们先用 Matlab 设计光路，并按照需求选购相关元器件（包括光源、反射镜、光栅、光电探测器等）。确定光路后，用 Solidworks 设计固定各个光学元件的零件，并用 3D 打印机打印出来，以此验证光路。

搭好光路后，根据探测器对光的电压响应，设计放大电路，然后用单片机 ADC 采集。接着给光栅底部装电机，并用单片机控制电机让光栅转起来。

验证完毕后，开始制备不同浓度的酒精，测量比色皿放在不同位置时，酒精的透射光谱，寻找一个较好的样品池位置。至此，仪器结构基本确定，找厂商加工金属底板与金属外壳。然后，不断测量不同浓度酒精的透射光谱，找到酒精吸收最明显的波长。尝试减小误差，使得测量数据稳定。接着多测数据，用神经网络寻找不同波长处的吸收与浓度的关系，得到酒精浓度的预测模型。最后多练习操作，做到快速测量。

三. 技术路线及可行性分析

3.1 光路设计与搭建

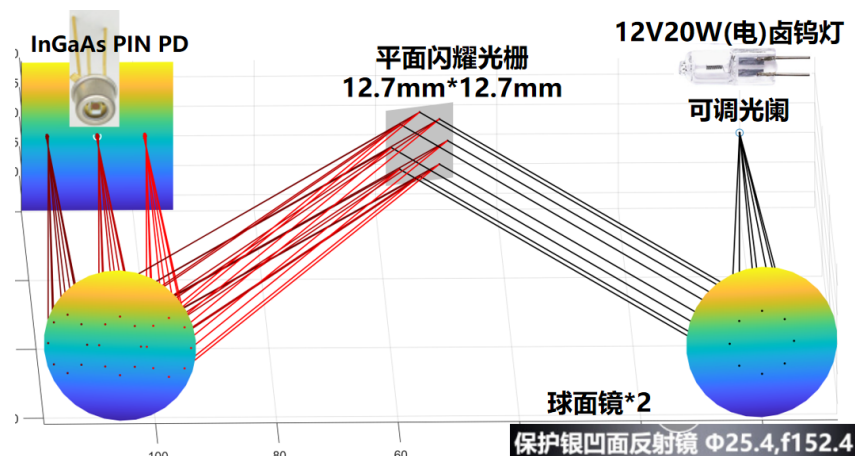


图 1 光路

团队采用对称式的 C-T 光学系统，光路如上图所示：卤钨灯发出的复色光通过光阑后，经球面镜准直为平行光，再照到光栅上，光栅则将复色光中各种波长

的光分开，即不同波长的光反射方向不同。接着，通过第二个球面镜可以将不同方向的反射光聚焦在探测平面上的不同位置，在探测面上形成彩带，从而将光强的波长分布转化为空间位置分布。在采用单点探测的情况下，为了测量不同波长处的吸收光谱，只需要让光栅转起来，将不同波长的光对准探测器，建立电机旋转角度与对准波长的对应关系，扫描各个波长的光。

搭建光路需要固定各光学元件的水平位置、调节各光学元件的高度与姿态。为此，团队设计打好孔的底板，并使用压板、调高支座与支杆、二维光学调节架等工具调节。其中，光栅用柱面镜架夹持，其中心的正下方通过自制 3D 打印零件与电机转轴紧固。这里涉及转轴旋转，故不能简单地仅用二维调节架调节上方光栅的姿态。为此，团队拆解三维调节架，改装为调水平装置。

3.2 电机控制部分

电机控制着光栅旋转，光栅转到不同角度可将不同波长的光打到光电二极管上。电机采用的是 42 步进电机，驱动器采用的是 DM542C。其中，驱动器采用的是 32 细分，即 25600 个脉冲可以使电机转完一圈，每个脉冲电机旋转角度为 0.0140625° ，理论上可以达到 1nm 的扫描精度。不同频率的脉冲可以使电机旋转速度不同，其中，当电机需要快速达到目标位置时，单片机提高频率，使得电机旋转更快，减少到达目标位置的时间，团队采用一个红外传感器，当电机到达指定位置后，即认为电机到达零点位置，此时电机慢速旋转，并且在不同角度停止，等待 ADC 采集完成。其中，PA0 控制电机使能，PA1 控制电机方向，PA2 控制电机脉冲数量以及频率。

3.3 探测电路与单片机采集部分

红外探测二极管在红外谱段产生的电压信号在示波器显示，范围在 4-178mv 左右，且携带大量的高频噪声信号，无法满足单片机内置 ADC 的测量范围与分辨率，兼顾到成本和测量精度的因素，团队自行设计了一个低通仪器运算放大器，原理图如下图所示：

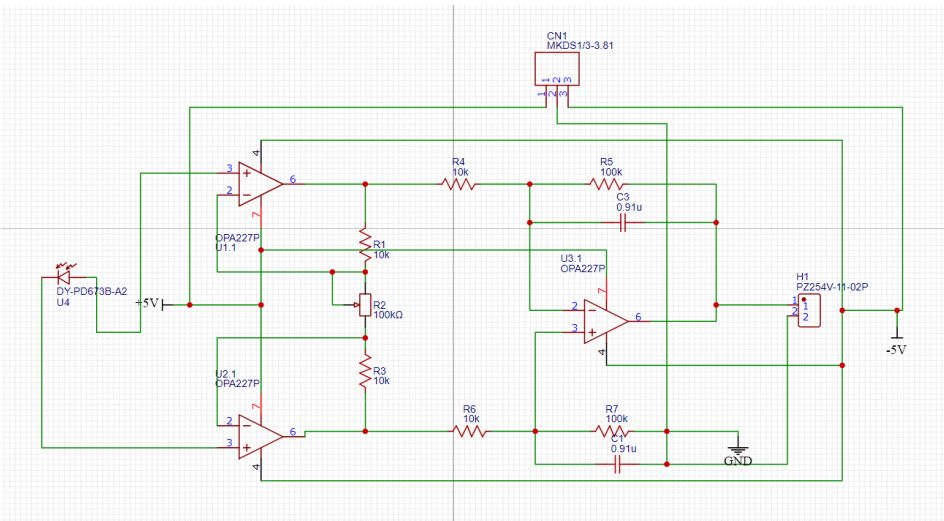


图 2 放大滤波电路

该模块放大倍数 A_v 设计为 30 倍，经实际测量为 25.7 倍，能将探测信号最大放大到 2.41 伏左右，基本能满足实验要求；在此基础上，团队还对输入信号先进行 RC 滤波，经差分运放放大 3 倍后，再通过二阶巴特沃斯低通运算放大器放大 10 倍，经 mutisim 仿真，整个模块截止频率稳定在 10Hz 左右，能有效去除探测信号中的高频噪声信号。

经放大去噪之后的电压信号被单片机内置的 ADC 采集转化，ADC 能将模拟信号转换为数字信号，单片机最终将数据交给 DMA 运输后通过串口显示在电脑端，得到当前的数字信号值，待数据稳定后，该值即为光电二极管电压信号经放大转化后的关联值。

四. 解决的关键问题

4.1 彩带随光栅的旋转上下移动

当光栅转起来时，可明显观察到彩带的上下移动，而由于我们的探测器感光面积小，这样的上下移动将直接导致我们的光谱测量范围有限。开始时，上下移动很明显，而且不单调，这是光栅没和转轴连接紧。仿照调节支架采用螺丝固定的设计后，上下移动显著减小，但仍然存在，通过 Matlab 仿真发现与转轴不垂直于水平面相关，关键是要将光路调平。

4.2 电机稳定旋转

开始团队使用的是舵机，但由于舵机死区过大，导致测得数据有很大偏差。后面采用步进电机控制，由于步进电机相较于舵机控制更加精确，所测的数据误差大大减小，并且团队使用 32 细分的步进电机，大大改善了步进电机高频振动的问题。

4.3 不同浓度的酒精制备与比色皿内壁上的“油滴”

加好样品后，比色皿内壁总会有明显的“油滴”，对透射光谱干扰严重。原因可能是配溶液时没混匀，但尽管我们反复摇匀，该问题仍不能解决。最后发现原因是更换比色皿样品时，内壁上总会残留之前的溶液，不易润洗干净，润洗时和加好样品后都须盖上盖子反复摇匀。

4.4 数据处理

通过串口显示，可得到不同酒精浓度下探测信号的变化数据，将数据导入 MATLAB，绘制出多组不同酒精浓度的光谱曲线，通过相互性分析和计算均方差，选取随着酒精浓度变化，红外光谱曲线上的稳定变化的特征数据点，结合 BP 神经网络和多元线性回归，建立酒精浓度与多个特征数据之间的函数关系，并通过

调整各个参数，使误差进一步缩小。

五. 特色与创新点

5.1 用 Matlab 对光路仿真

基于几何光学原理，用 **Matlab** 对光路进行仿真。写程序过程中，除了用到简单的光学知识，还会用到计算机图形学中常用的几何知识。我们实现的基础功能包括光线的反射、求光线与曲面的交点、绘制任意位置与姿态的光学元件、计算衍射角、渲染不同波长的光等。得益于 **Matlab** 便捷的矩阵计算与精美的三维绘图，我们可以直观地了解光斑的变形与彩带的上下移动。程序还可用于计算电机旋转角度与扫描波长的对应关系。

5.2 通过红外距离传感器寻找零点位置

步进电机由于没有编码器，误差会随时间累计，长时间使用会导致偏差增大。团队将红外距离传感器固定，当光栅转到某一位置时，其夹具的突出部分会遮挡传感器发射端，使接收端收到信号。紧接着，传感器会将低电平信号传回到单片机，单片机接收到之后，即认为此时步进电机所到达的位置为零点位置

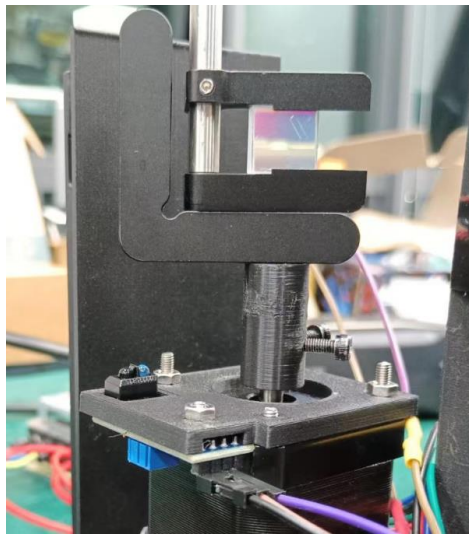


图 3 确定零点

六. 其他说明

6.1 没有滤除可见光

卤钨灯发出的复色光中存在可见光，由光栅方程 $d(\sin \theta \pm \sin \varphi) = m\lambda$ 易知，衍射光中一级的红外光会与二级的可见光重合，例如 1 级的 1200nm 会与 2 级的

600nm 重合，但考虑到调光路的方便以及探测器对于可见光的低响应，我们没有滤除可见光。

6.2 成本

- 3 个二维可调反射镜架，720 元；矩形调整架，300 元。共 1020 元。
- 外壳加工 860 元
- 光栅 1200 线，闪耀角 $36^{\circ} 52'$ ，大小为 12.7mm*12.7mm。550 元
- 两个球面反射镜，共 470 元
- 光电探测器用的是 InGaAs PIN 光电二极管，感光面直径 0.3mm，光谱响应范围为 800-1700nm。300 元。
- 4 个调节支座，280 元
- 野火 F4 单片机，200 元。
- 3 个压板，120 元
- 步进电机与细分驱动，共 100 元
- 红外比色皿，一支 90 元
- 12V50W 开关电源，60 元。
- 12.6V 5400mAh 锂电池，60 元
- 电子元器件，30 元
- 卤钨灯，一支 2 元

共计 4142 元左右。

注：有很多是实验室本来有，但我们也考虑进来了

6.3 可继续改进的部分

基准稳压芯片、i2c 通信、行星减速箱。

七. 结论

经过测试精度可以达到 3%。