

实验 4.16 多普勒效应的研究与应用

当波源和接收器之间有相对运动时，接收器接收到的波的频率与波源发出的频率不同的现象称为多普勒效应。多普勒效应是为纪念奥地利物理学家及数学家克里斯琴·约翰·多普勒（Christian Johann Doppler）而命名的，他于 1842 年首先提出了这一理论。

多普勒效应在科学研究，工程技术，交通管理，医疗诊断等各方面都有十分广泛的应用。例如：交通警察在公路上使用的雷达测速仪；军事上使用的脉冲多普勒雷达；安装在轮船底部的用于测速和测航程的多普勒声纳；医院用的“彩超”和超声频移诊断（即 D 超）等。

多普勒效应是波动过程共有的特征，不仅机械波、声波，电磁波和光波也会发生多普勒效应。在光现象里同样存在多普勒效应，当光源向你快速运动时，光的频率也会增加，表现为光的颜色向蓝光方向偏移（因为在可见光里，蓝光的频率高），即光谱出现蓝移；而当光源快速离你而去时，光的频率会减小，表现为光的颜色会向红光方向偏移（因为在可见光里，红光的频率低），即光谱出现红移。通过测量遥远星系发出的光波是被压缩还是拉伸，就能确定它们是在移向我们还是远离我们。

【实验目的】

1. 测量运动小车的速度和与接收频率之间的关系，计算声速，验证多普勒效应。
2. 利用多普勒效应测量小车移动速度。

【实验仪器】

COC-DPL-F 反射式多普勒超声综合实验仪

【实验原理】

1. 多普勒效应测速原理

根据声波的多普勒效应公式，当声源与接收器之间有相对运动时，接收器接收到的频率 f 为：

$$f = \frac{u + v_1 \cos \alpha_1}{u - v_2 \cos \alpha_2} f_0 \quad (4-111)$$

式中， f_0 为声源发射频率， u 为声速， v_1 为接收器运动速率， α_1 为声源和接收器连线与接收器运动方向之间的夹角， v_2 为声源运动速率， α_2 为声源和接收器连线与声源运动方向之间的夹角。为简单起见，设波源或观察者的运动都沿两者的连线，此时式（4-111）简化为

$$f = \frac{u + v_1}{u - v_2} f_0 \quad (4-112)$$

式中， v_1 、 v_2 的符号规则为：声源和观察者相向运动时为正，背离运动时为负。

本实验装置如图所示，电机与超声头固定于导轨上面，小车可以由电机牵引沿导轨左右运动，超声发射头与接收头固定于导轨右端，超声波通过小车上的铝板反射回来被接收器接收，小车运动速度为 v （向右为正），因此声源速度也为 v 。



图 4-64 实验装置图

依据多普勒频移公式, 不难推导出回波频率、多普勒频移和小车运动的速度分别为:

$$f = \frac{u+v}{u-v} f_0, \quad \Delta f = \frac{f+f_0}{u} v, \quad v = \frac{f-f_0}{f+f_0} u \quad (4-113)$$

由于电路中不能表征负频移 (即不论靠近还是远离超声头, Δf 恒为正), 所以在该系统中采用了标量表示 (Δf 不区分正负, v 以靠近或远离超声头进行标识)。

小车靠近超声头时, 速度公式为:

$$v = \frac{\Delta f}{2f_0 + \Delta f} u \quad (4-114)$$

小车远离超声头时, 速度公式为:

$$v = \frac{\Delta f}{2f_0 - \Delta f} u \quad (4-115)$$

上面两个公式是进行声速测量的依据。令 $k = \frac{\Delta f}{2f_0 + \Delta f}$, $k' = \frac{\Delta f}{2f_0 - \Delta f}$, 则式 (4-114)

和式 (4-115) 分别可改写成:

小车靠近超声头时, 速度公式为:

$$v = ku$$

小车远离超声头时, 速度公式为:

$$v = k'u$$

通过光电门测得小车的运行速度, 并由仪器对接收到的频率自动计数得到频差, 从而可得 n 组 (v, k) 值, 作 $k-v$ 关系图可直观验证多普勒效应, 且由图求出拟合直线的斜率的倒数即为声速 u

声速理论值可由下式计算:

$$u = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (\text{m/s}) \quad (4-116)$$

其中 t 为当前环境温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$, 331.45 为 0°C 时的声速值, 单位为 m/s 。

可将实验测得的声速与通过环境温度得出的理论声速进行对比, 得出实验误差。

2. 光电门测速原理

作为多普勒效应测速的参考, 在本实验中还采用了光电门测速方式以利于比较。光

光电门测速是一种比较通用的测速方法，图是光电门的典型应用电路。发光二极管经过 R_1 与 V_{CC} 相连，导通并发出红外光。光电三极管在光照条件下可以导通。如果在发光二极管与光电三极管之间没有障碍物，则发光二极管所发出的光能够使光电三极管导通，output 输出端被拉至 0 电平，输出为低；如果中间有障碍物，则光电三极管截止，output 端被拉至 1 电平，输出为高。因此可以通过电平的高低变化，来判断是否被挡光。在本仪器中挡光片如图 4-65 所示。

本实验中将挡光片安置在小车上，当作为运动物体的小车通过光电门时，将产生二次挡光。根据光电门输出端产生的两个脉冲上升沿之间的时差和挡光片的相应长度 (5cm)，可以计算出小车的运动速度。

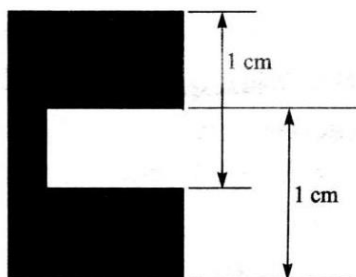


图 4-65 光电门结构

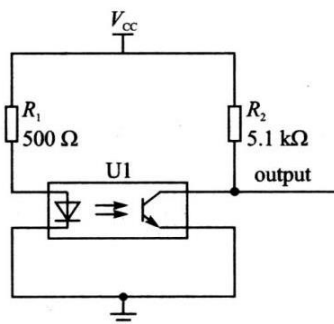


图 4-66 光电门的典型应用电路

【实验内容】

1. 利用多普勒超声综合实验仪测量运动小车的速度和频差，计算声速，验证多普勒效应

(1) 打开多普勒超声综合实验仪的电源，系统启动并初始化，小车自动或手动（按下“复位”按钮）复位至起始位置(导轨左侧限位处)。

(2) 从主菜单选择“多普勒效应验证（声速测定）”，在操作面板上按下“OK”按钮进入参数设置页面。

(3) 通过上下方向按钮选择“电机转速设置”，按下“OK”按钮，再通过方向按钮移动光标，对电机转速进行设置（设置范围为 20%~80%，如果超出该范围，可能导致电机无法启动或发生异常），设置成指定转速为 20%后，再按下“OK”按钮进行确定，使用上下方向键移动至“开始测量”。

(4) 按下“OK”按钮，确认轨道和小车状态正常后，选择“是”进行测量。小车朝靠近探头方向移动，到达右侧限位后，记录下通过光电门得出的小车速度和频差。

(5) 重复第 4 步操作，测量并记录小车朝远离探头方向移动时的速度和频差。

(6) 保持此电机转速不变，重复第 (4)、(5) 步操作，测量 6 次，求出小车在靠近和远离探头时速度的平均值，发射频率 40kHz。

(7) 每隔 10%更改电机转速直至 80%，重复以上步骤，通过不同转速和小车运动状态下（靠近或远离）取得的小车速度和频差。

(8) 由数据作 $k-v$ 及 $k'-v$ 关系图，验证多普勒效应，并根据斜率计算声速 u 。

(9) 通过温度计读取环境温度，使用公式 (4-116) 计算当前温度下的理论声速，并

与实验值对比，计算相对误差。

2. 利用求得的声速测量和多普勒原理测量小车速度

(1) 回到主界面，按下“复位”按钮使小车复位，通过上下方向键，移动至“超声测速”选项，按下“OK”，进入速度选择界面。

(2) 选择“速度 1”，按下“OK”，确认小车和轨道状态后选择“是”进行测量。

(3) 使小车来回多次，并分别记录小车每次靠近和远离探头时测得的频差，重复测量 6 次，使用实验一中求得的声速和发射频率，代入公式 (4-114) 和 (4-115) 计算出小车在“速度 1”条件下的运动速度。

(4) 回到上一界面，选择重复以上过程，分别求得“速度 2”和“速度 3”的小车速度。

3. 观察速度曲线（选作）

返回主界面，选择“绘制速度曲线”，按“OK”按钮进入绘图，可以选择匀速运动或者匀加速运动进行运动曲线绘制(在使用匀加速运动模式时，初速度设置要求在 20%~50% 之间，加速度最好不要超过 5%，超出范围可能导致电机无法启动或发生意外)，该部分只要求通过显示界面观察小车的匀速/加速运动过程，不需要记录处理数据。

【思考题】

1、该实验中发射与接收换能器位于导轨一端，小车运动反射的回波与发出的 40kHz 值号产生差频(即频移)，在实验原理部分已给出相应 Δf 、 v 公式，请推导发送换能器在导轨上固定，接收换能器在小车上运动的 Δf 、 v 的表达式。

2、分析该实验中误差的主要来源。

【仪器介绍】

实验系统原理框图如图 4-67 所示。单片机(MCU)通过计时器(T/C)产生 40kHz 方波，该方波通过低通滤波器后获得 40kHz 正弦信号并耦合至发送换能器；发送换能器发出的超声波经小车反射后由接收换能器接收，此接收信号频率与发送换能器发出的超声波频率符合多普勒频移关系。将发射波信号与接收波信号经模拟乘法器相乘，其输出产生差频和倍频相关频谱，经过低通滤波器滤除高频信号以后，取出所期望得到的差频信号。该差频信号经过整形送至 MCU 处理，MCU 根据多普勒频率公式计算出运动物体的运动速度。

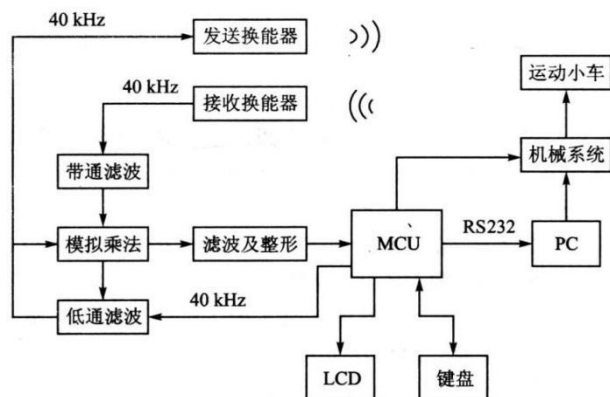


图 4-67 电路原理框图