

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		30		25		80	

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉	学号：	2344016
日期：	2024/4/9	教师签名：	

实验 CC3 双光栅测量微弱振动位移量实验

【实验报告注意事项】

- (1) 实验报告由三部分组成：
- (1) 预习报告：（提前一周）认真研读**实验讲义**，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用（强烈建议到实验室预习），完成课前预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（第一循环实验已由教师提供模板，可以打印）。预习成绩低于 10 分（共 20 分）者不能做实验。

(2) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（**用铅笔记录的被认为无效**）。**保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。**（不得输入电脑打印，但可扫描手记后打印扫描件）；离开前请实验教师检查记录并签名。

(3) 分析讨论：处理实验原始数据（学习仪器使用类型的实验除外），对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果（图、表），包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象（含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据）；最后得出结论。

实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。

- (2) 每次完成实验后的一周内交**实验报告**（特殊情况不能超过两周）。
- (3) 除实验记录外，实验报告其他部分建议双面打印。

目录

实验 CC3

双光栅测量微弱振动位移量实验

预习报告

1.1 实验目的

- (1) 了解利用光的多普勒频移形成光拍的原理并用于测量光拍拍频。
- (2) 学会使用精确测量微弱振动位移的一种方法。
- (3) 应用双光栅微弱振动测量仪测量音叉振动的微振幅。

1.2 仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	双光栅微弱振动测量仪	1	DHGS-1 型，半导体激光器： $\lambda = 650nm$ ，功率 2-5mW； 音叉谐振频率：500Hz 左右。
2	数字示波器	1	DS1000E(D)
3	信号发生器	1	MFG-2000

1.3 原理概述

1.3.1 位移光栅的多普勒频移

多普勒频移是一个物理现象，它描述了由于波源和观察者之间的相对运动导致接收到的波频率与发射频率不同的情况。在位相光栅的多普勒频移中当光栅移动时，由于光栅上每个缝隙的衍射作用和缝隙之间的干涉，通过光栅后的光强度会出现周期性变化。这种变化可以用光栅衍射方程来描述。当光栅以速度 v 在 y 方向移动时，从光栅出射的光的波阵面也会以速度 v 在 y 方向移动。这导致了位移量 vt 和相应的位相变化量 $\Delta\phi(t)$ 。位相变化量可以表示为：

$$\Delta\phi(t) = 2\pi\lambda vt \sin\theta$$

将光栅衍射方程 ($d\sin\theta = \pm k\lambda$) 代入上述方程，我们得到：

$$\Delta\phi(t) = k2\pi dvt$$

因此，从移动光栅出射的光波的电矢量方程可以表示为：

$$E = E_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\phi(t)) = E_0 \cos(\omega_0 + k\omega_d)t$$

其中 $\omega_d = \frac{2\pi v}{\lambda}$ 。这表明，从移动的位相光栅出射的 k 级衍射光波相对于静止的位相光栅有一个多普勒频移 $\omega_a = \omega_0 + k\omega_d$ 。这个多普勒频移是由于光栅的移动导致的位相变化，这种变化反映在衍射光波的频率上。这就是位移光栅的多普勒频移现象。

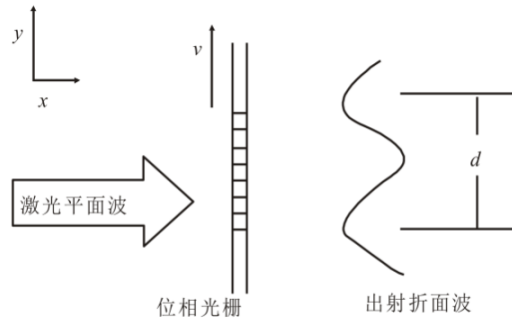


图 1: 出射的折曲波阵面

1.3.2 光拍的获得与检测

由于光波的频率非常高，直接测量多普勒频移是非常困难的。因此，通常采用“拍频”方法来检测频率的变化。拍频是两束频率相近的光波叠加时产生的低频率变化，这种变化比原始光波的频率要低得多，因此更容易检测。本实验使用了两片完全相同的光栅（A 和 B）来形成光拍。光栅 A 以速度 v_A 移动，起到频移作用，而光栅 B 保持静止，只起到衍射作用。当激光通过这两个光栅时，由于它们紧贴在一起，激光束的宽度使得两束光能够平行迭加，从而形成光拍。光拍信号的形成可以通过以下电矢量方程来描述：

光束 1（未频移）：($E_1 = E_{10} \cos(\omega_0 t + \phi_1)$)

光束 2（频移）：($E_2 = E_{20} \cos((\omega_0 + \omega_d)t + \phi_2)$)，其中 $k = 1$

光电流（I）可以表示为两个电矢量的平方和：

$$I = \xi[E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\omega_d t + (\phi_2 - \phi_1))]$$

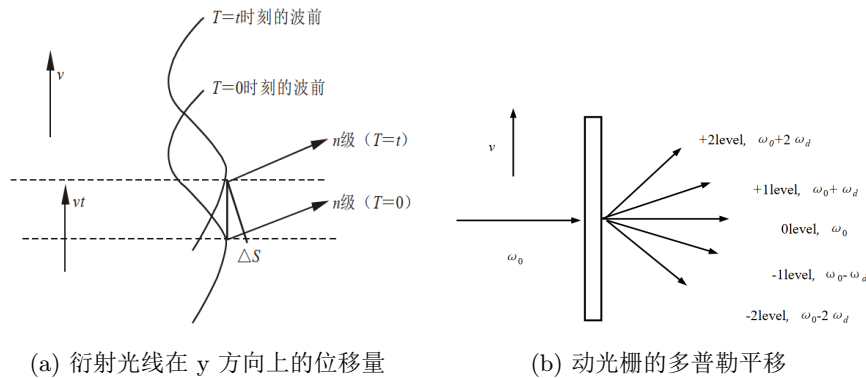
其中 ξ 是光电转换常数。由于光波频率 ω_0 非常高，光电检测器无法响应方程中的第一、二、四项，只能响应第三项，即拍频信号。因此，光电流 i_S 可以简化为：

$$i_S = \xi[E_{10}E_{20} \cos(\omega_d t + (\phi_2 - \phi_1))]$$

拍频 F 可以通过以下公式计算：

$$F = 2\pi\omega_d = dvAn_\theta$$

其中 n_θ 是光栅密度，本实验中 $n_\theta = \frac{1}{d}$ ，（ $d = 100$ ）条/mm。通过测量拍频 F ，我们可以间接地检测出多普勒频移量。



1.3.3 微弱振动位移量的检测

微弱振动位移量的检测是通过分析光拍频率来实现的。这个过程不依赖于光源的频率，而是与光栅的移动速度成正比。当光栅粘贴在振动的音叉上时，光栅的移动速度会随着音叉的振动而周期性变化，从而导致光拍信号频率也随时间变化。以下是检测微弱振动位移量的步骤：

- (1) 拍频波的个数测量：首先，需要测量在一定时间内（例如音叉振动周期的一半）的拍频波的个数。这可以通过示波器来完成。
- (2) 波形数的计算：波形数由完整波形数、波的首数和波的尾数三部分组成。对于不是完整波形的首数和尾数，可以使用反正弦函数将其转换为波形的分数部分。
- (3) 位移振幅的计算：使用积分公式 $A = \int_0^{T/2} F(t)dt$ ，可以计算出位移振幅，其中 $F(t)$ 是拍频波的频率， A 是位移振幅。
- (4) 示波器读数：通过示波器读取波形数，包括整数波形数和分数波形数。
- (5) 波形数的最终计算：将整数波形数和分数波形数相加，得到总波形数。如果波群的首尾幅度与完整波形的振幅之比为 (a) 和 (b)，则波形数可以表示为：波形数 = 整数波形数 + 波的首数和尾数中满 1/2 或 1/4 或 3/4 个波形分数部份 + $\frac{\sin^{-1} a}{360^\circ} + \frac{\sin^{-1} b}{360^\circ}$
式中 a、b 为波群的首、尾幅度和该处完整波形的振幅之比。

微弱振动位移量的确定：通过上述步骤，可以确定微弱振动的位移振幅。

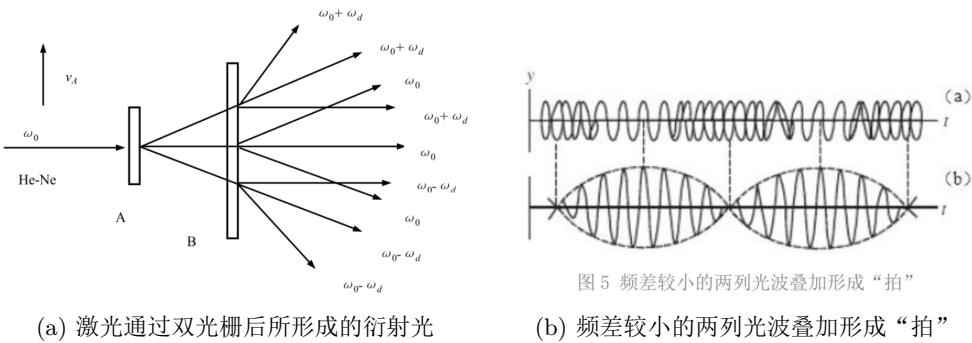


图5 频差较小的两列光波叠加形成“拍”

1.4 实验前思考题

- 思考题 1.1：简述位移光栅的多普勒频移原理。
- 思考题 1.2：简述光拍的获得与检测方法和原理。
- 思考题 1.3：简述微弱振动位移量的检测方法和原理。

三道思考题详见前面原理概述部分

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉	学号:	22344016
室温:	xx°C	实验地点:	A508
学生签名:		评分:	
实验时间:	2024/xx/xx	教师签名:	

XXX XXXXXXXXXXXX 实验记录

2.1 实验内容和步骤

2.1.1 实验一测量光栅常数

该实验使用（已知谱线波长为 $\lambda = 589.4nm$ 的）低压钠灯为光源

- (1) 望远镜聚焦于无穷远（既能接受平行光），然后平行光管产生平行光，使平行光管和望远镜的光轴都垂直仪器的转轴，随后调整光栅平面与平行光管光轴垂直，光栅的刻痕与仪器转轴平行。
- (2) 打开钠灯电源，照亮狭缝，记录主极亮的位置，即望远镜分化板竖直线与零级光谱（即平行光管狭缝像）重合时的位置，这个位置就是上一步中调节好了的位置。记下此时刻度盘两窗口的读数；
- (3) 把望远镜向零级光谱的一边转动（如向右），直到看到一级光谱中的黄线，并使它与分化板垂直线重合。记下刻度盘两窗口读数，计算出衍射角；继续原方向转到望远镜，并在二级光谱中找到该谱线再做同样的测量；
- (4) 把望远镜往零级光谱的另一边转动（刚才向右，现在则向左），做步骤（2）中相同测量；
- (5) 把光栅法线左右两边所测同级光谱中的两个衍射角求平均后代入光栅衍射公式，求光栅常数。要求两个值之差不能超过 $10'$ ，否则，应重新调节入射光与光栅面垂直。最后求一、二级谱线测得的光栅常数 d 的平均值及其实验不确定度。

	主极亮位置	+1 级	+2 级
左窗口	08°15	358°05	347°37
右窗口	188°16	178°08	167°39
		-1 级	-2 级
左窗口		18°25	29°03
右窗口		198°27	209°03

表 1: 实验一测量数据

2.1.2 实验二测定未知光波波长及角色散率 D

以汞灯为光源，按上面方法测出各级光谱的衍射角，计算出它们的波长。然后计算角色散率及不确定度。（实际实验中测量了蓝、绿、黄三色的谱线）

	主极亮位置	+1 级	+2 级	+1 级	+2 级	+1 级	+2 级
左窗口	08°14	00°45	353°06	358°51	349°12	358°16	348°03
右窗口	188°15	180°45	173°08	178°53	169°13	178°16	168°04
		-1 级	-2 级	-1 级	-2 级	-1 级	-2 级
左窗口		15°46	23°27	17°44	27°25	18°14	28°37
右窗口		195°47	203°27	197°43	207°25	198°16	208°38
		蓝色		绿色		黄色	

表 2: 实验数据

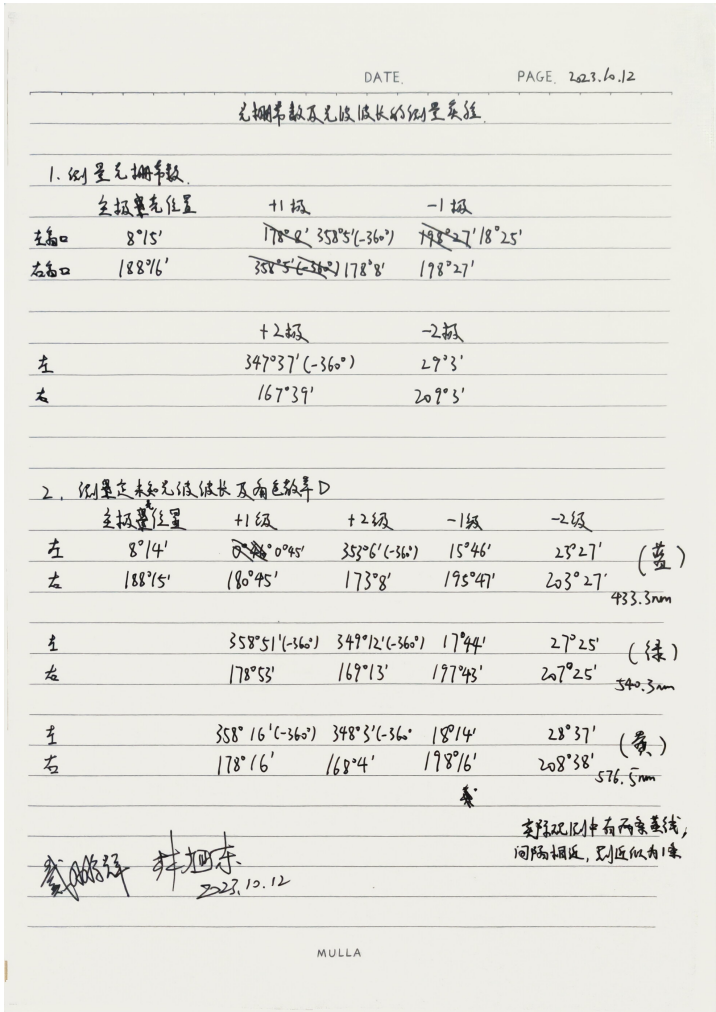


图 2: 原始实验数据

2.2 实验过程中遇到的问题记录

- (1) 测量过程中，弯游标在转动过程中可能越过 0 刻度线，应当在计算时注意修正。
- (2) 在使用钠灯或汞灯观测黄色谱线时，理论上应存在两条，但由于分辨率问题，或二者在实际观测中距离较近，不易区分，则当作一条谱线，实际测量时，目镜中的垂直叉丝对准两谱线平均位置。
- (3) 在使用汞灯测量谱线时，理论上应存在紫色谱线（波长 $\lambda = 404.7\text{nm}$ ），但其强度较弱，实际观测中很难观测到，则略去，只测量蓝、绿、黄三色（即亮度最亮的三条）谱线。
- (4) 在目镜中观察时，有些谱线亮度较低，被环境光所影响导致难以观察，可以使用挡板遮挡部分环境光，使得观察更加容易。
- (5) 注意调节平行光管进光狭缝宽度至合适值，若其宽度过宽，则谱线宽度也会过宽，会降低谱线的分辨率和对比度；若其宽度过窄，会导致入射光强度减弱，使得谱线亮度不足，难以观察和测量。

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉	学号：	22344016
日期：	2024/xx/xx	评分：	

XXX XXXXXXXXXXXX

分析与讨论

3.1 实验数据分析

3.1.1 实验一测量光栅常数

由表 1 中的数据，可计算得到各级衍射条纹的衍射角，如下表所示

φ_{+1}	φ_{+2}	φ_{-1}	φ_{-2}
10°09	20°37	10°10	20°47

则可由正负级衍射角计算平均值，并根据光栅衍射公式 $k\lambda = d \sin \varphi$ ，计算光栅常数，其中钠灯的谱线已知，取 $\lambda = 589.4nm$ ，则计算结果如下表所示

φ_1	φ_2	
10°09	20°42	
d_1	d_2	\bar{d}
$3.344 \times 10^{-6}m$	$3.334 \times 10^{-6}m$	$3.339 \times 10^{-6}m$

下面计算不确定度：

(1) 角度的重复测量引起的标准不确定度分量 u_1 ,

$$u_1 = \sqrt{\sum (\left|\frac{\partial d}{\partial \varphi_i}\right| \sigma_i)^2} = 4.55 \times 10^{-8}m$$

(2) 仪器的示值误差引起的标准不确定度分量 u_2 ，由分光计游标最小分度值 1’，按照均匀分布考虑

$$u_2 = \sqrt{\sum (\left|\frac{\partial d}{\partial \varphi_i}\right| \sigma_i)^2} = 1.99 \times 10^{-7}m$$

(3) 合成不确定度

$$u_c = \sqrt{\sum (u_i)^2} = 2.04 \times 10^{-7}m$$

(4) 展伸不确定度

考虑正态分布，取置信概率为 95%，查表得包含因子 $k = 1.96$
则最终测量结果表示为 $d = \bar{d} \pm ku_c = (3.34 \pm 0.40) \times 10^{-6}m$

分析误差来源

- (1) 可能是由于光栅本身的刻线不均匀，或者刻线与仪器转轴不平行，导致不同级次之间的测量数据计算所得结果之间有较大误差；这是仪器本身的系统误差，无法消除，只能通过更换质量更好的光栅来避免。
- (2) 平行光管进光狭缝的宽度可能过宽，使得入射谱线的宽度也变宽，则会降低谱线的分辨率和对比度，使得测量衍射角时不准确，从而影响计算结果。

3.1.2 实验二测定未知光波波长及角色散率 D

根据表 2 数据，重复实验一中的处理操作，计算正负级衍射角，计算平均值，并根据光栅衍射公式 $k\lambda = d \sin \varphi$ ，计算不同衍射谱线对应光波波长，式中光栅常数取实验一中的计算结果 $d = 3.34 \times 10^{-6}m$ ，则计算结果如下表所示

颜色	蓝色 (b)	绿色 (g)	黄色 (y)
φ_{+1}	07°29	09°22	09°58
φ_{+2}	15°07	19°02	20°11
φ_{-1}	07°32	09°29	10°00
φ_{-2}	15°12	19°10	20°23
φ_1	07°30	09°25	09°59
φ_2	15°10	19°06	20°17
λ_1	435.83nm	546.30nm	578.86nm
λ_2	436.79nm	546.29nm	578.75nm
$\bar{\lambda}$	436.31nm	546.30nm	578.80nm

下面计算不确定度：

- (1) 角度的重复测量引起的标准不确定度分量 u_1 ,

$$u_{b1} = \sqrt{\sum \left(\left| \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi_i} \right| \sigma_i \right)^2} = 0.402nm$$
$$u_{g1} = \sqrt{\sum \left(\left| \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi_i} \right| \sigma_i \right)^2} = 1.14nm$$
$$u_{y1} = \sqrt{\sum \left(\left| \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi_i} \right| \sigma_i \right)^2} = 1.36nm$$

- (2) 仪器的示值误差引起的标准不确定度分量 u_2 ，
由分光计游标最小分度值 1'，按照均匀分布考虑

$$u_{b2} = \sqrt{\sum \left(\left| \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi_i} \right| \sigma_i \right)^2} = 0.10nm$$

$$u_{g2} = \sqrt{\sum \left(\left| \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi_i} \right| \sigma_i \right)^2} = 0.13nm$$
$$u_{y2} = \sqrt{\sum \left(\left| \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi_i} \right| \sigma_i \right)^2} = 0.14nm$$

(3) 合成不确定度

$$u_{cb} = \sqrt{\sum (u_i)^2} = 0.41nm \quad u_{cg} = \sqrt{\sum (u_i)^2} = 1.15nm \quad u_{cy} = \sqrt{\sum (u_i)^2} = 1.36nm$$

(4) 展伸不确定度考虑正态分布，取置信概率为 95%，查表得包含因子 $k = 1.96$
则最终测量结果表示为

$$\lambda_b = (436.31 \pm 0.41)nm \quad \lambda_g = (546.30 \pm 1.15)nm \quad \lambda_y = (578.80 \pm 1.36)nm$$

将各谱线波长计算值与标准值比较（预习报告中所查得的数据），计算各谱线波长的相对误差（计算黄光谱线相对误差时，参考值取两条黄色谱线的平均波长），得到

$$\eta_b = \left| \frac{435.8 - 436.31}{435.8} \right| \times 100\% = 0.117\%$$
$$\eta_g = \left| \frac{546.1 - 546.30}{546.1} \right| \times 100\% = 0.037\%$$
$$\eta_y = \left| \frac{578.05 - 578.80}{578.05} \right| \times 100\% = 0.130\%$$

下面计算角色散率，根据角色散率公式 $D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \theta}$ ，由上表数据计算得

颜色	蓝色	绿色	黄色
D1	$2.98 \times 10^5 m^{-1}$	$2.99 \times 10^5 m^{-1}$	$3.00 \times 10^5 m^{-1}$
D2	$6.11 \times 10^5 m^{-1}$	$6.24 \times 10^5 m^{-1}$	$6.29 \times 10^5 m^{-1}$

下面计算角色散率的不确定度，重复上面的操作，最终包含不确定度结果如下表所示

颜色	蓝色	绿色	黄色
D1	$2.98 \pm 0.002 \times 10^5 m^{-1}$	$2.99 \pm 0.03 \times 10^5 m^{-1}$	$3.00 \pm 0.01 \times 10^5 m^{-1}$
D2	$6.11 \pm 0.07 \times 10^5 m^{-1}$	$6.24 \pm 0.004 \times 10^5 m^{-1}$	$6.29 \pm 0.10 \times 10^5 m^{-1}$

分析误差来源：

- (1) 观察数据可发现，在测量 2 级谱线时，正负级衍射角的差偏大，个别数据甚至超过了 10’（由于超过 10’ 的数据是最后一组测量数据，故没有及时发现），说明光栅并未完全与平行光管光轴垂直，存在一个小角度偏差，引入了一定的系统误差。
- (2) 平行光管进光狭缝的宽度可能过宽，使得入射谱线的宽度也变宽，则会降低谱线的分辨率和对比度，使得测量衍射角时不准确，从而影响计算结果。

3.2 实验后思考题

思考题 3.1: 检索文献，列举三种测量光波波长的方法，给出参考文献列表。

通过查阅资料，我找到了以下几种可以测量光波波长的方法：

- (1) 双棱镜干涉法，它利用双棱镜将单色光分成两束相干光，然后在屏幕上形成干涉条纹。通过测量条纹间距和双棱镜的夹角，可以计算出光波的波长。[1][2]
- (2) 傅里叶红外光谱仪法，它利用傅里叶变换将单色光的干涉信号转换为频率域的信号，然后通过测量信号的频率，可以计算出光波的波长。[3][4]
- (3) 激光多普勒干涉法，该方法利用激光束与一个高速旋转的多面棱镜发生多普勒效应，产生频率变化的干涉信号。通过测量干涉信号的频率差，即可求得激光波长。[5]

参考文献列表：



图 3: 原始实验数据

Appendices

.1 代码记录

Listing 1: 代码记录示例

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 # Data for plotting
5 t = np.arange(0.0, 2.0, 0.01)
6 s = 1 + np.sin(2 * np.pi * t)
7
8 fig, ax = plt.subplots()
9 ax.plot(t, s)
10
11 ax.set(xlabel='time (s)', ylabel='voltage (mV)',
12       title='About as simple as it gets, folks')
13 ax.grid()
14
15 fig.savefig("test.png")
16 plt.show()
```

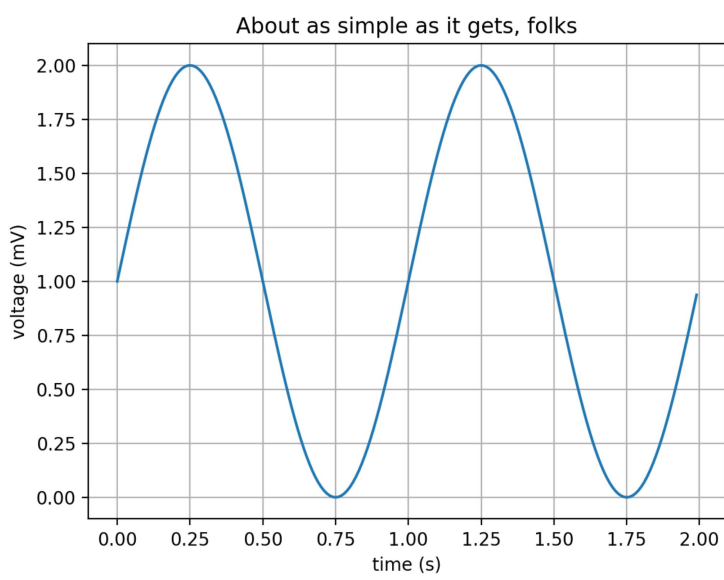


图 4: Test Figure

.2 常用命令展示

这部分将展示其他常用命令。

颜色设置

- 赤橙黄绿青蓝紫
- 谁持彩练当空舞

字号设置

(1) 江晚正愁余

(2) 江晚正愁余

(3) 江晚正愁余

(4) 江晚正愁余

(5) 江晚正愁余

(6) 江晚正愁余

(7) 江晚正愁余

字体设置（中文）

(1) 宋体：山有扶苏，隰有荷华

(2) 仿宋：山有扶苏，隰有荷华

(3) 黑体：山有扶苏，隰有荷华

(4) 楷书：山有扶苏，隰有荷华

Set font(English)

(1) roman: Hello world!

(2) sans-serif: Hello world!

(3) typewriter: Hello world!

公式

无编号公式

$$J(\theta) = \mathbb{E}_{\pi_\theta}[G_t] = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) V^\pi(s) = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi_\theta(a|s) Q^\pi(s, a)$$

$$J(\theta) = \mathbb{E}_{\pi_\theta}[G_t] = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) V^\pi(s) = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi_\theta(a|s) Q^\pi(s, a)$$

有编号公式

$$J(\theta) = \mathbb{E}_{\pi_\theta}[G_t] = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) V^\pi(s) = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi_\theta(a|s) Q^\pi(s, a) \quad (1)$$

$$J(\theta) = \mathbb{E}_{\pi_\theta}[G_t] = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) V^\pi(s) = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi_\theta(a|s) Q^\pi(s, a) \quad (2)$$

波尔文积分

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} dx = \frac{\pi}{2} \\ \int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} \frac{\sin(x/3)}{x/3} dx = \frac{\pi}{2} \\ \dots \\ \int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} \frac{\sin(x/3)}{x/3} \dots \frac{\sin(x/13)}{x/13} dx = \frac{\pi}{2} \\ \int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} \frac{\sin(x/3)}{x/3} \dots \frac{\sin(x/15)}{x/15} dx = \frac{467807924713440738696537864469}{935615849440640907310521750000} \pi \end{array} \right.$$

多行对齐公式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta_k} J(\theta) &= \frac{\partial}{\partial \theta_k} \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \log(1 + e^{-y^{(i)} \theta^T x^{(i)}}) \right] \\ &= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 + e^{-y^{(i)} \theta^T x^{(i)}}} y^{(i)} x_k^{(i)} \\ &= -\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m h_\theta(-y^{(i)} x^{(i)}) y^{(i)} x_k^{(i)} \end{aligned}$$

引用

对公式的引用，如??

$$J(\theta) = \mathbb{E}_{\pi_\theta}[G_t] = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) V^\pi(s) = \sum_{s \in \mathcal{S}} d^\pi(s) \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi_\theta(a|s) Q^\pi(s, a) \quad (3)$$

对图像的引用，如??



图 5: 测试图片

对表格的引用，如??

表 3: 一个空表格

表格

tabular 可以自己更改宽度

表 4: 一个空表格

tabularx 可以自适应宽度

表 5: 一个空表格
