直流电机和PWM

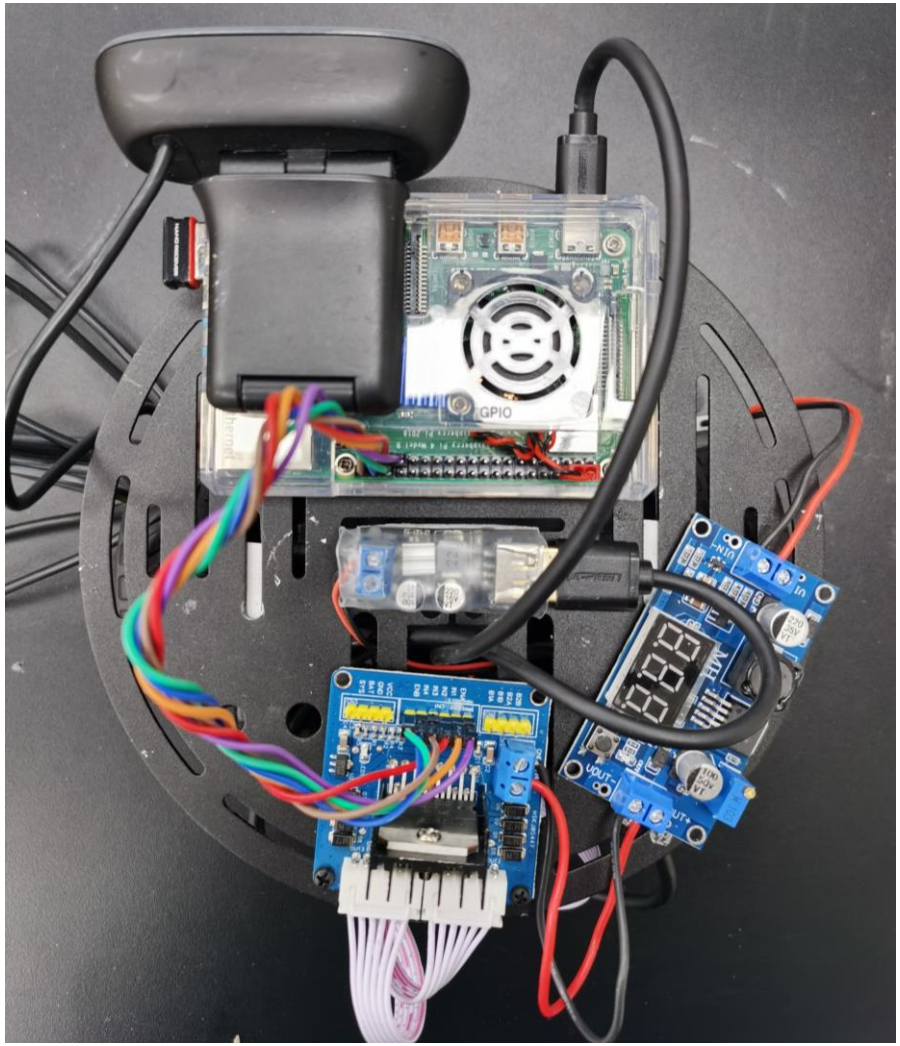
2023/6/12

电子系统导论教学团队

实验目的

- 了解直流电机的控制方法
- 了解PWM的基本概念
- 掌握树莓派PWM的编程方法
- 掌握通过PWM来控制直流电机

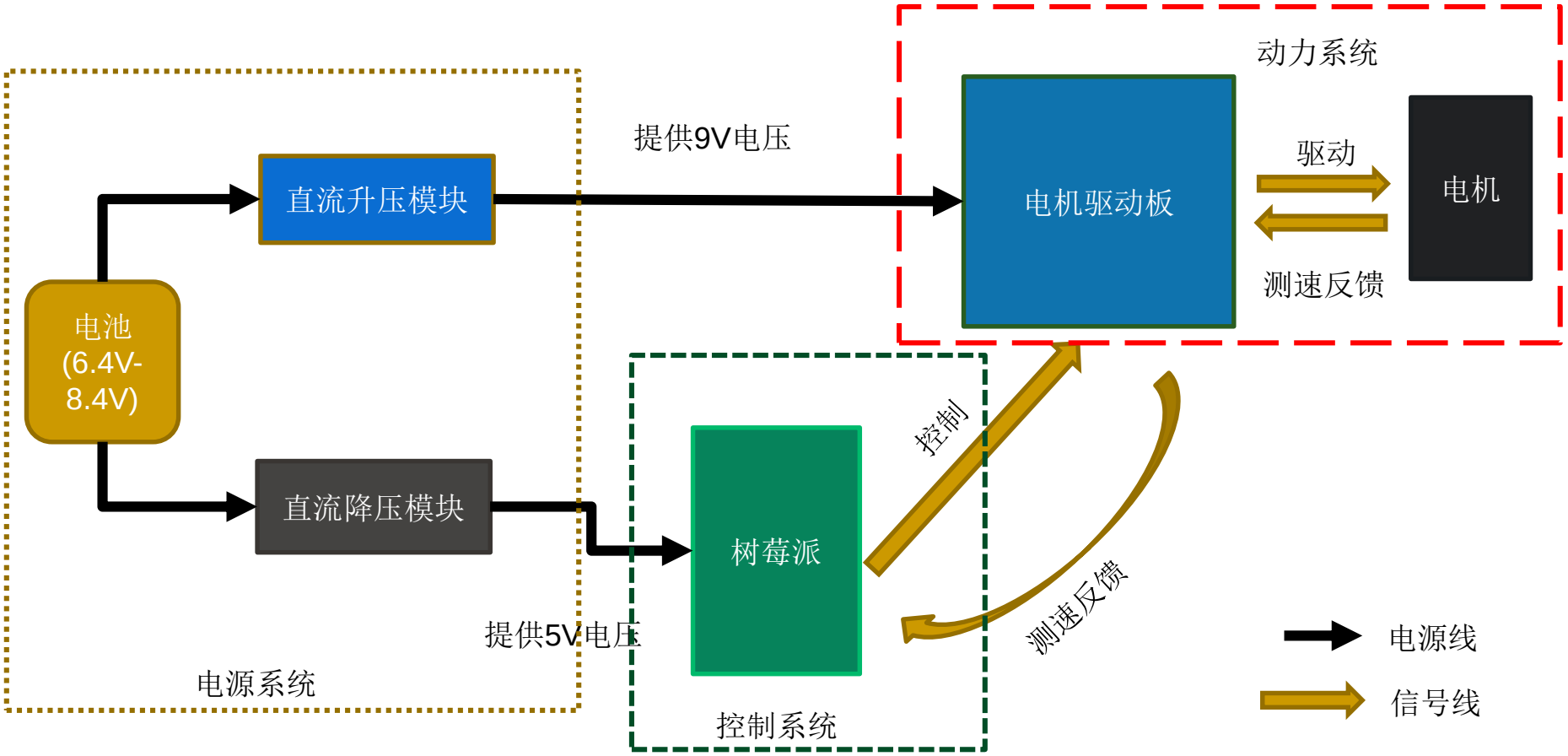
准备工作——接线步骤



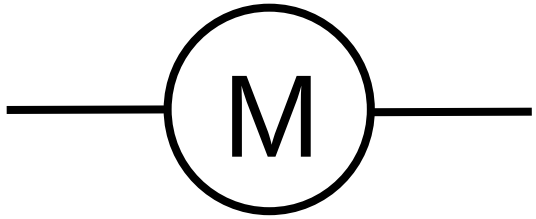
准备工作——接线步骤

1. 把锂电池充电口（三线）和电压显示器接起来。会发出很响的声音，当心受到惊吓。
2. 将ENA, IN2, IN1, ENB, IN4, IN3和树莓派的GPIO相连，具体取决于需求。
3. 将直流升压模块VIN端的EH2.54插座和电池的EH2.54插头相连，注意正负极。
4. 直流降压模块的输出接树莓派的USB TypeC供电口，输入接锂电池的另一对输出线，同样注意正负极。
5. 如果线太长，小车要在地上跑，可以想办法收一下线或固定一下。

系统结构


动力系统
电机驱动板
驱动
电机
测速反馈
提供9V电压
直流升压模块
电池
(6.4V-
8.4V)
直流降压模块
树莓派
控制
测速反馈
提供5V电压
电源系统
控制系统
电源线
信号线

直流电机



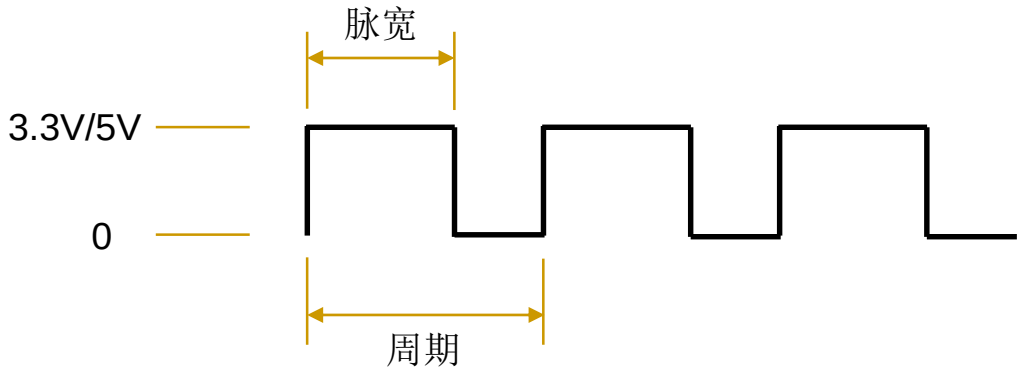
- 能将直流电能转换成机械能的旋转电机。
- 通常搭配减速齿轮（齿轮箱）使用
- **组成**
  - 定子：产生磁场，永磁体或电磁铁
  - 转子：线圈，通电产生电磁扭矩

- **简单地说**
  - 有两个输入端，不分正负，有电压差就会转
  - 把输入电压的正负对换，就会反着转
  - 电压差恒定，转速恒定，电压增大，转速增大
  - 如果给它加上间歇性通断的电压，电机就会“加速-减速-加速-减速-加速……”
  - 如果这个电压“通断”足够快，就会使电机转速较稳定地维持在某一数值。这个“数值”取决于输入电压的平均值。

如何可控的调节直流电机的速度呢？

PWM

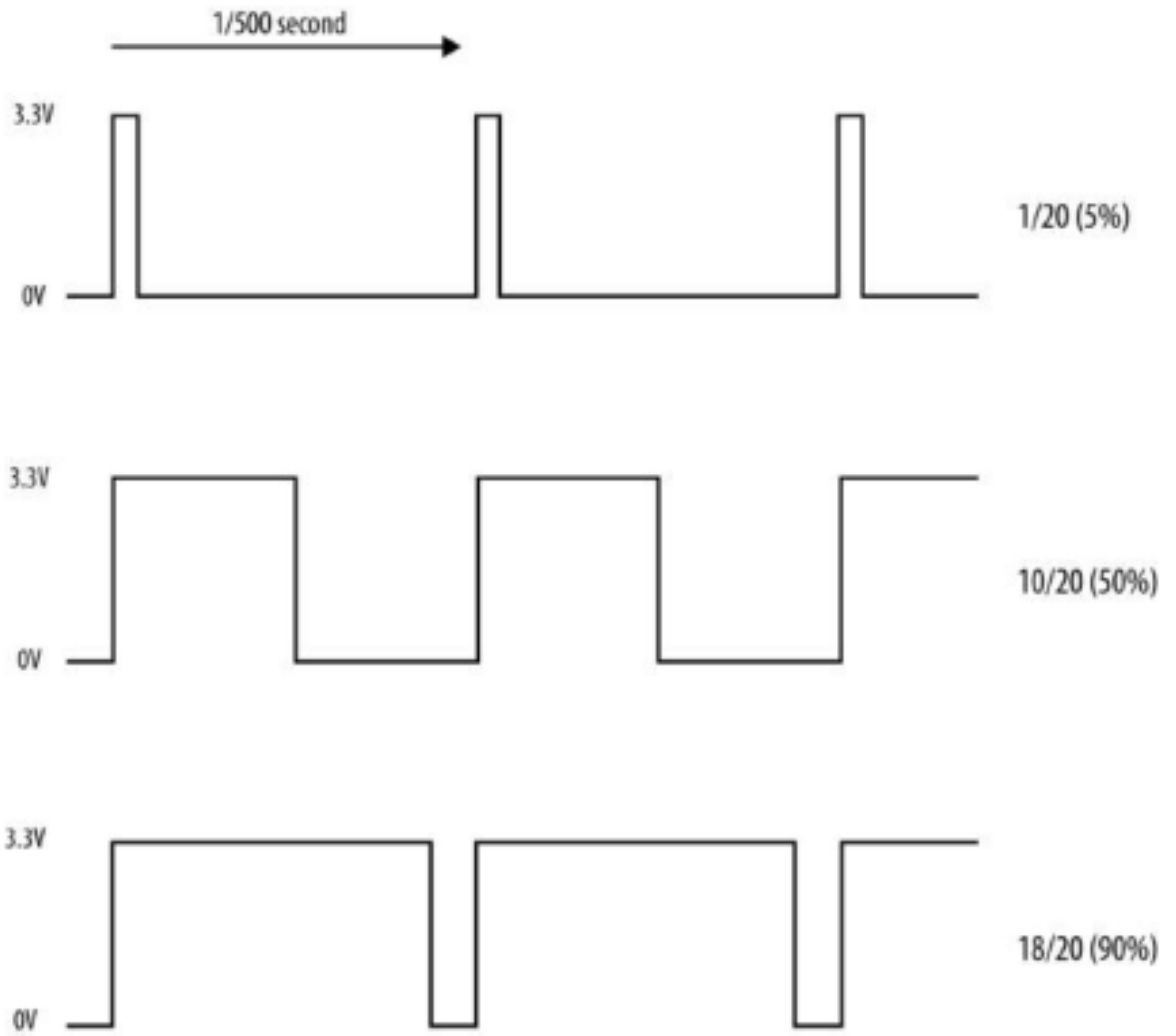
PWM(Pulse Width Modulation)，中文译为脉冲宽度调制，是利用数字输出来对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术，广泛应用在从测量、通信到功率控制与变换的许多领域中。



上图是PWM波的波形示意图。在实际应用中，PWM波的占空比是PWM的主要特性。

- 占空比 = 脉宽 / 周期
- 调节占空比：可以固定脉宽，改变周期；也可以固定周期，改变脉宽。我们通常采用后者。
- 占空比越大，从整个周期来看，平均电压越高；占空比越小则平均电压越低。

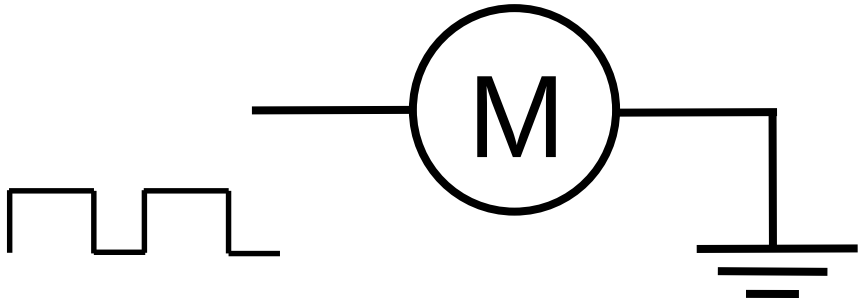
PWM



同周期，不同占空比的PWM

用PWM给直流电机调速

- 常用PWM波作为直流电机的输入，可以通过改变PWM波的占空比方便地给直流电机调速。

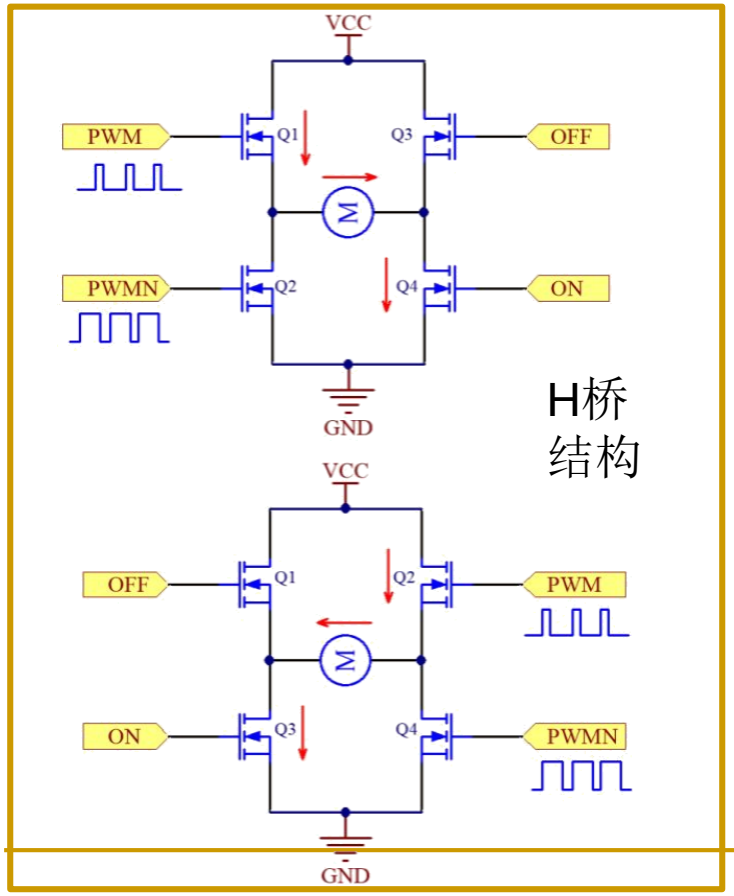


- 但是，一般小型处理器的引脚不能直接驱动直流电机。因为直流电机将电能转换为机械能，需要比较大的电流提供电能，我们的小车上的直流电机所需的电流可能是安培级的，而树莓派的GPIO只能提供毫安级的电流。

- 所以需要有个驱动电路，它有输出大电流的能力，能接收树莓派的控制信号，并按照树莓派的意思让电机转或不转。

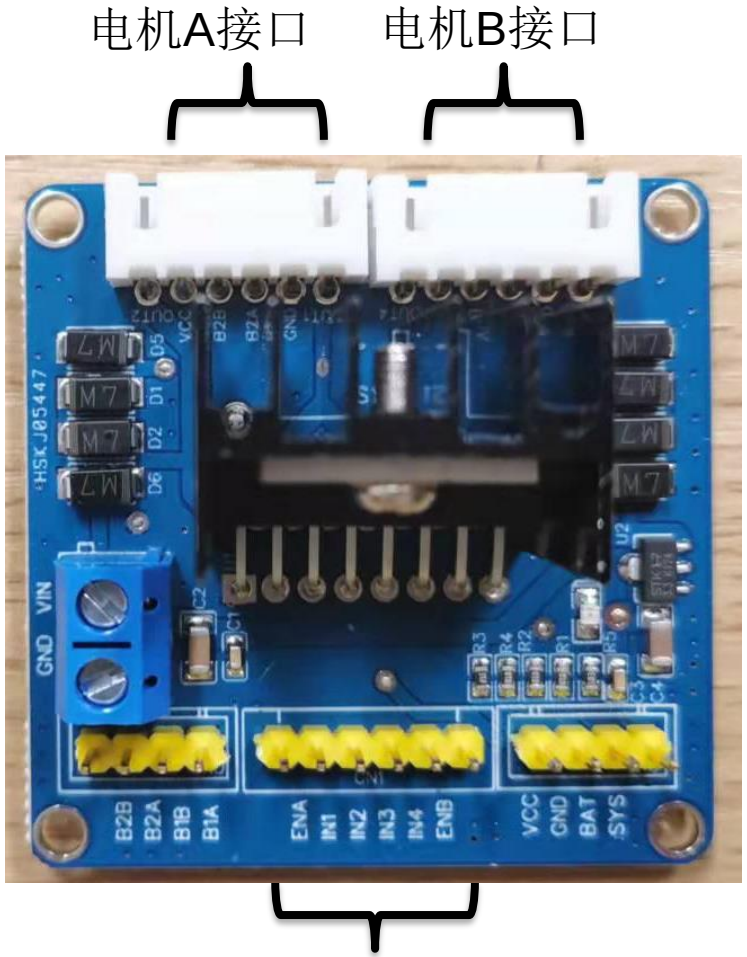
电机驱动板

- 这块驱动板的核心是L298N芯片，该芯片包含了两个H桥结构
- 下方中间的6个引脚，分别控制两边的电机： ENA, IN1, IN2, IN3, IN4, ENB



电源正极

地

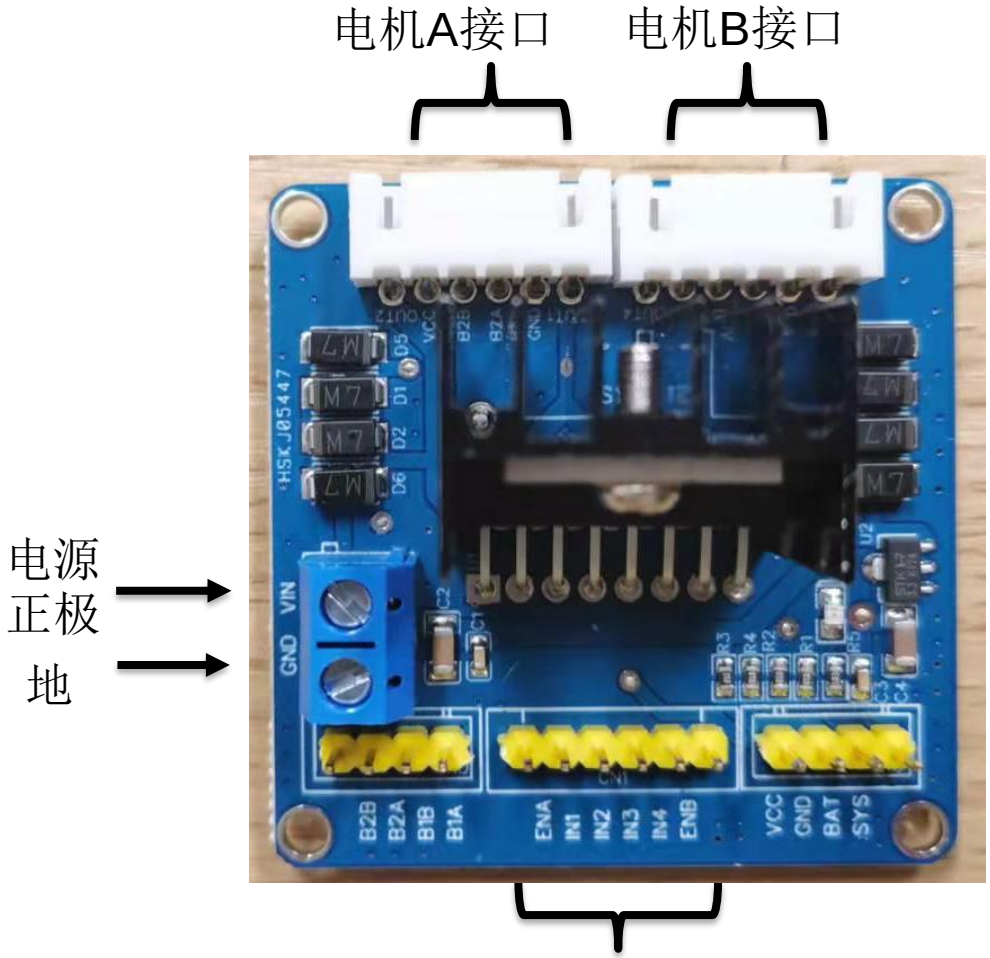


从左至右为：
ENA,IN1,IN2,IN3,IN4,ENB

电机驱动板

注意事项：

- 树莓派和驱动板的逻辑部分需要共地即GND连在一起，否则树莓派的逻辑就无法被驱动板识别。
- 如果树莓派未使用锂电池供电：树莓派的GND需要和电池负极一同接到GND端以共地
- 如果树莓派也使用锂电池供电，则本身就共地，GND端接入电池负极即可（建议使用电池供电）



从左至右为：
ENA,IN1,IN2,IN3,IN4,ENB

电机驱动板

右边是一组电机接口控制信号
的真值表。

ENA	IN1	IN2	直流电机状态
0	X	X	停止
1	0	0	制动
1	0	1	正转
1	1	0	反转
1	1	1	制动

树莓派控制驱动板通常有两种方法。
方法一：IN1和IN2端输入固定电平，ENA端输入PWM波。当PWM在高电平时，电机加速；PWM在低电平时，电机停止。
方法二：ENA端和IN1（或IN2）端输入固定电平，IN2（或IN1）端输入PWM波。

严防电机堵转！
会烧坏电机！！

用树莓派控制PWM给直流电机调速

那么，用多少频率的PWM比较合适？

- 如果频率太低，直流电机将会产生明显的抖动。
- 如果频率太高，直流电机很可能会转不起来，因为电机转子的角速度的建立需要一定时间。
- 一般人的耳朵能听到的频率范围在几十Hz到近20kHz之间，如果频率在这个范围内，会听到比较明显的啸叫。
- 所以选择一个合适的频率是一个权衡的过程。

经过实验，对于我们小车上的电机，用50Hz到一两百Hz的频率已经不会产生明显的抖动，而且频率不算高，即便是软件PWM也能胜任。

如何用树莓派产生PWM波

- 对于微处理器，一般可以分为软件PWM和硬件PWM。
- 软件PWM：先在目标GPIO上输出一个电平（高电平或低电平），持续一段时间，然后把电平取反，再持续一段时间，再取反，循环往复。这种方式的精度一般较低，受到定时器精度、操作系统调度等影响，并且一般依赖于CPU中断，会占用少量CPU资源。
- 硬件PWM：有些CPU自带PWM硬件，只要给出期望的频率和占空比，这些硬件就会独立产生PWM波，依赖于内部的硬件定时电路，精度通常较高，而且不需要占用额外的CPU资源。
- 在接下来的例子里，我们将会使用RPi.GPIO模块的PWM类产生PWM波，这个模块产生的PWM全部是软件PWM。

用树莓派产生PWM波——直接控制GPIO

这段代码要实现功能是：让GPIO21输出频率为40Hz，占空比为40%的PWM波，采用定时-翻转的方法实现。

设定一些参数。

定义一个方法：
calc_delay_period(freq, duty)
计算高电平和低电平的持续时间，单位是毫秒

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
PWM = 21
FREQUENCY = 40
DUTY = 0.4
GPIO.setup(PWM, GPIO.OUT)

# don't use too large freq
def calc_delay_period(freq, duty):
    t = 1.0/freq
    ph = t*duty
    pl = t - ph
    return ph, pl
```

用树莓派产生PWM波——直接控制GPIO

```
period_h, period_l = calc_delay_period(FREQUENCY, DUTY)

try:
    while True:
        GPIO.output(PWM, GPIO.HIGH)
        time.sleep(period_h)
        GPIO.output(PWM, GPIO.LOW)
        time.sleep(period_l)
except KeyboardInterrupt:
    pass
GPIO.cleanup()
```

随后进入无限循环，利用**time.sleep()**方法进行延时控制。

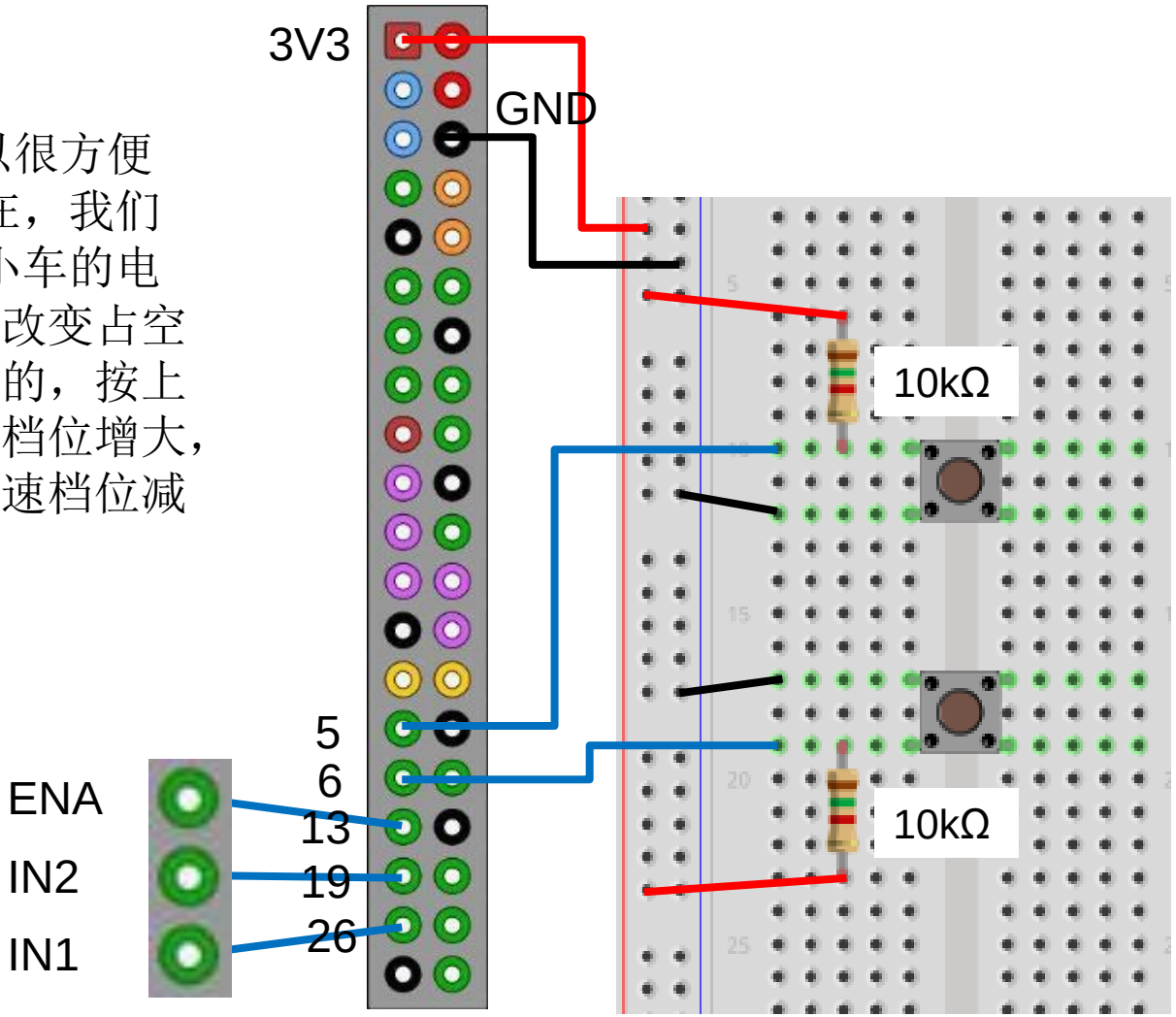
这个例子有助于理解PWM波的产生原理，但是实际应用中肯定不能这样。因为这样需要持续占用CPU资源，而且**time.sleep()**的精度很低，所以频率和占空比的取值都受到很大的限制。

这个例子的完整代码见 pwm_sleep.py

产生PWM波并控制电机——引入按键

利用`RPi.GPIO`库可以很方便地产生PWM波。现在，我们尝试用PWM波控制小车的电机，并使用两个按键改变占空比，以达到调速的目的，按上面的按键可以使转速档位增大，按下面的按键则使转速档位减小。

这个例子的完整代码见 pwm_button.py



产生PWM波并控制电机——引入按键

- 首先定义一些变量和常量：**BTN1**和**BTN2**分别为减速和加速的按键；**DUTYS**是查找表，表示不同档位时占空比的值（0~100）；**duty_level**是一个变量，表示当前占空比的档位，此处初始化为最大档位，即占空比100%
- 然后，如以前所学，设置各GPIO的输入输出模式和初始值。
- 其中I1和I2控制了电机的转向，如果发现实际情况与预期不符，只要在代码中或硬件连线上把I1和I2的值互换即可。

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time

EA, I2, I1 = (13, 19, 26)
BTN1, BTN2 = (6, 5)
FREQUENCY = 50

DUTYS = (0, 20, 40, 60, 80, 100)
duty_level = len(DUTYS) - 1

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup([EA, I2, I1], GPIO.OUT)
GPIO.output([EA, I2], GPIO.LOW)
GPIO.output(I1, GPIO.HIGH)
GPIO.setup([BTN1, BTN2], GPIO.IN,
    pull_up_down = GPIO.PUD_UP)
```

用RPi.GPIO库的PWM功能

```
pwm = GPIO.PWM(EA, FREQUENCY)
```

接下来，这行代码创建了一个PWM类的实例**pwm**，创建时需要指定两个参数：第一个参数指定输出引脚，第二个参数指定PWM波的频率。

```
pwm.start(DUTYS[duty_level])
print("duty = %d" % DUTYS[duty_level])
```

执行这行代码之后，相应的引脚开始持续产生PWM输出。需要指定一个参数：占空比的值。范围是0~100。

用RPi.GPIO库的PWM功能

```
def btn_pressed(btn):
    return GPIO.input(btn) == GPIO.LOW

def update_duty_level(delta):
    global duty_level
    old = duty_level
    duty_level = (duty_level + delta) % len(DUTYS)
    pwm.ChangeDutyCycle(DUTYS[duty_level])
    print("duty: %d --> %d" % (DUTYS[old], DUTYS[duty_level]))
```

现在，初始化工作完成了。我们开始准备和按键相关的事项。定义两个方法：

btn_pressed(btn)返回**boolean**值，表示某个按键此刻是否被按下。

update_duty_level(delta)的**delta**为**+1**或者**-1**，表示占空比的档位增加或减少一档，据此算出新的占空比档位，然后调用**ChangeDutyCycle(duty)**方法更新占空比。参数**duty**同样是0~100之间的数。

用RPi.GPIO库的PWM功能

- 最后，在程序的主线中加入一个无限的循环，用以检测按键是否按下。
- 为了能**ctrl-c**退出程序并做好收尾工作，同样在**while**的外层套了一个**try...except...**表达，用以接收**ctrl-c**的信号。
- 在程序结束前，不仅要调用**GPIO.cleanup()**，还要调用**pwm.stop()**来停止PWM输出，否则程序结束后，这个PWM会持续输出，造成不必要的能耗以及以外损坏的风险。

```
btn1_released = True
btn2_released = True
try:
    while True:
        if btn1_released:
            if btn_pressed(BTN1):
                time.sleep(0.01)
                if btn_pressed(BTN1):
                    update_duty_level(-1)
                    btn1_released = False
        else:
            if not btn_pressed(BTN1):
                btn1_released = True
        if btn2_released:
            if btn_pressed(BTN2):
                time.sleep(0.01)
                if btn_pressed(BTN2):
                    update_duty_level(1)
                    btn2_released = False
        else:
            if not btn_pressed(BTN2):
                btn2_released = True
except KeyboardInterrupt:
    pass
pwm.stop()
GPIO.cleanup()
```

用RPi.GPIO库的PWM功能

循环体部分是由2个**if...else...**并列组成的，每个**if...else...**各自负责检测一个按键。以第一个**if...else...**为例：

- 如果**btn1_released**为**True**，表示上个时刻**BTN1**没有被按下。在这种情况下，如果检测到**BTN1**被按下，说明现在用户确实正在进行按键的动作，*而不是由于上次按住按键还没有释放而导致的误判*。经过10ms的去抖动延时之后，调用之前的**update_duty_level()**函数来实现占空比的更新，并把**btn1_released**置为**False**.
- 如果**btn1_released**为**False**，表示上次循环检测到按下了按键。如果这次循环没有检测到按下了按键，说明已经松开了按键，于是把**btn1_released**置为**True**

```
btn1_released = True
btn2_released = True
try:
    while True:
        if btn1_released:
            if btn_pressed(BTN1):
                time.sleep(0.01)
                if btn_pressed(BTN1):
                    update_duty_level(-1)
                    btn1_released = False
        else:
            if not btn_pressed(BTN1):
                btn1_released = True
        if btn2_released:
            if btn_pressed(BTN2):
                time.sleep(0.01)
                if btn_pressed(BTN2):
                    update_duty_level(1)
                    btn2_released = False
        else:
            if not btn_pressed(BTN2):
                btn2_released = True
except KeyboardInterrupt:
    pass
pwm.stop()
GPIO.cleanup()
```

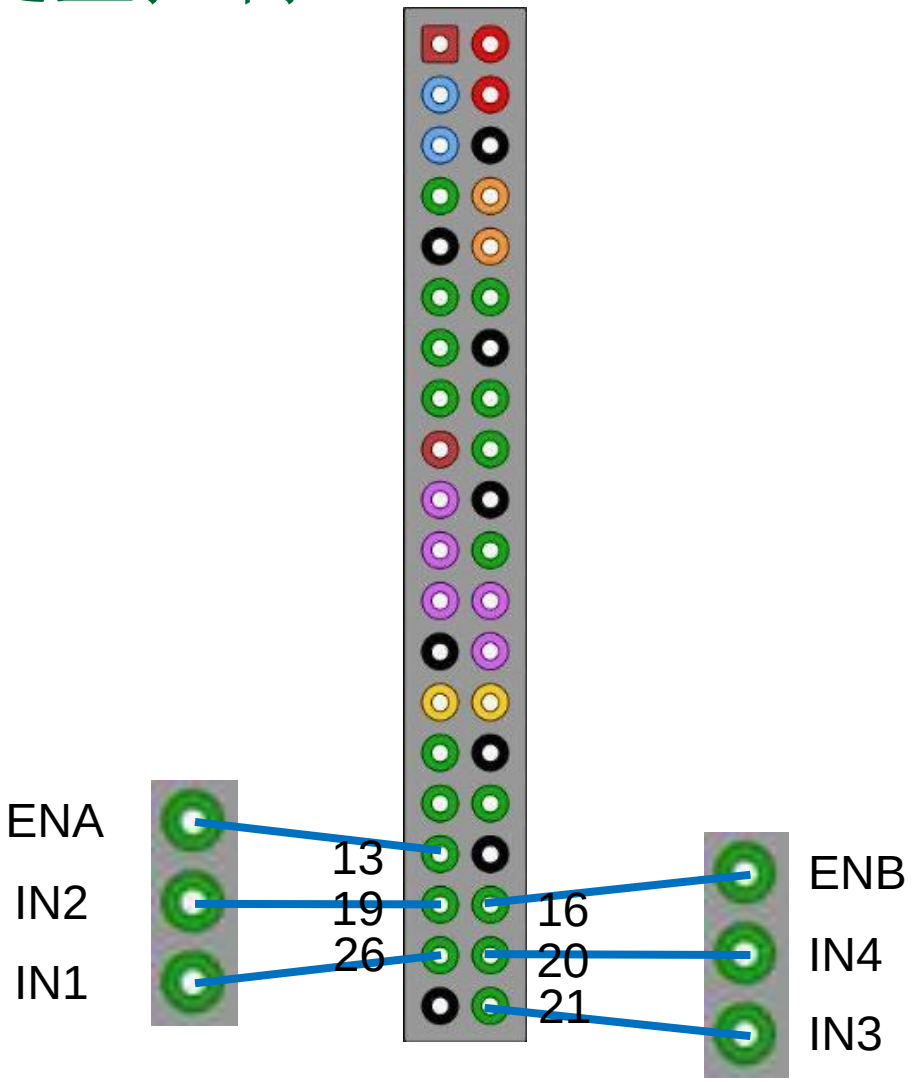
让小车跑起来——用键盘控制

现在，我们要写个程序让小车的两个轮子一起转，并且可以在电脑中输入指令，控制小车的动作。

仍然使用**`RPi.GPIO`**模块。

驱动板和树莓派的连线如图所示，用到的GPIO口为：
13, 19, 26
16, 20, 21

这个例子的完整代码
见 pwm_keyboard.py



让小车跑起来——用键盘控制

有了上个实验的经验，这次的代码显得很简单。

先定义一些变量和常量

初始化GPIO

初始化PWM。这次创建了2个独立的PWM实例。

```
import RPi.GPIO as GPIO

EA, I2, I1, EB, I4, I3 = (13, 19, 26, 16, 20, 21)
FREQUENCY = 50
DUTYS_A = {'w':20,'a':0, 's':0, 'd':20}
DUTYS_B = {'w':20,'a':20,'s':0, 'd':0 }
EXPRESSIONS = {'w':'move forward!',
               'a':'turn left!',
               's':'stop!',
               'd':'turn right!'}

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup([EA, I2, I1, EB, I4, I3], GPIO.OUT)
GPIO.output([EA, I2, EB, I3], GPIO.LOW)
GPIO.output([I1, I4], GPIO.HIGH)

pwma = GPIO.PWM(EA, FREQUENCY)
pwmb = GPIO.PWM(EB, FREQUENCY)
pwma.start(DUTYS_A['s'])
pwmb.start(DUTYS_B['s'])
print("ready!")
```

让小车跑起来——用键盘控制

```
while True:
    cmd = input("command >> ")
    if cmd == 'q':
        pwma.stop()
        pwmb.stop()
        GPIO.cleanup()
        break
    elif (cmd=='w') or (cmd=='a') or (cmd=='s') or (cmd=='d'):
        pwma.ChangeDutyCycle(DUTYS_A[cmd])
        pwmb.ChangeDutyCycle(DUTYS_B[cmd])
        print(EXPRESSIONS[cmd])
    else:
        pass
```

随后又是一个循环，接收键盘的输入以改变占空比。'w', 'a', 's', 'd' 分别表示前进、左转、停止和右转，'q' 表示退出程序。退出之前别忘了收尾工作。

如果小车跑得太快或太慢，可以调节**DUTY_A**和**DUTY_B**的值。不过当占空比小于15左右的时候，小车是跑不动的。

更精确的PWM波——硬件PWM

右图是使用`RPi.GPIO.PWM`产生PWM波的期望值和实际值（来自Raspberry Pi Cookbook）。可以看到这个模块产生的PWM的稳定性其实很差。实际测量结果和这个表格基本相符。

Requested frequency	Measured frequency
50 Hz	50 Hz
100 Hz	98.7 Hz
200 Hz	195 Hz
500 Hz	470 Hz
1 kHz	890 Hz
10 kHz	4.4 kHz

树莓派上还有其他的库可以产生性能更好的PWM波，比如下面要介绍的pigpio库。

- pigpio是一个用C语言编写的高效的树莓派GPIO库，适用于所有版本的树莓派，有python2和python3的接口，并且已经预装在Raspbian上了
- pigpio基于底层硬件，因此控制精度高，速度快。
- 可以在GPIO0~31上独立产生基于硬件定时器的软件PWM
- BCM2711上有两个channel的硬件PWM，用pigpio可以调用，不过树莓派4 model B只支持调用channel 0
- pigpio文档: *http://abyz.me.uk/rpi/pigpio*
- pigpio的完整例子见 pwm_pigpio.py

pigpio使用方法

pigpio库包含一个名为pigpiod的daemon（常驻内存提供服务的进程），在使用pigpio的任何功能以前，必须先确保daemon处于运行状态，然后创建一个实例连接该daemon。连接成功后，这个实例就能提供pigpio的所有功能。具体地说：

首先启动pigpiod. 在终端输入

```
sudo pigpiod
```

如果要确保pigpiod是否已成功开启，可以用这个命令查看

```
ps -A | grep pigpiod
```

接着，在python代码中，引入pigpio模块

```
import pigpio
```

然后，调用以下方法创建一个连接daemon的实例 **pi**

```
pi = pigpio.pi()
```

可以检查是否连接成功：

```
if not pi.connected:
    exit()
```

pigpio使用方法

然后就可以任意使用pigpio了。右边是在GPIO21上产生频率为8000Hz，占空比为30%的PWM波的示例代码。

```
# start daemon first: sudo pigpiod
import pigpio
PWM = 21
pi = pigpio.pi()
pi.set_PWM_frequency(PWM, 8000)
pi.set_PWM_range(PWM, 100)
pi.set_PWM_dutycycle(PWM, 30)
```

- 21表示GPIO21，pigpio库强制使用Broadcom number表示GPIO，相当于**RPi.GPIO.BCM**. 0~31号GPIO都可以用这些方法独立产生PWM波（不过我们的板子上只有2~27号GPIO）
- **pi.set_PWM_frequency(channel, freq)**设置PWM波的频率。注意它不能设置任意频率，只能在18个频率中选一个，具体由当前底层硬件的采样率决定（见后一页），底层的采样率则是由daemon启动时决定的。在启动deamon的命令后面加上**-s value**参数就可以把采样率设定为**value(us)**，采样率可选的值为**1, 2, 4, 5, 8, 10**，默认值为**5us**.
- **pi.set_PWM_range(channel, range)**方法用来更改占空比的范围，默认范围是0~255，经过更改后变为100，即100表示满占空比。
- **pi.set_PWM_dutycycle(channel, dutycycle)**方法用来调整占空比，调用该方法后，占空比将立即被更新。同时它也是PWM波的开关，设置占空比为0就表示关闭PWM输出。

pigpio使用方法

```
                          Hertz

       1: 40000 20000 10000 8000 5000 4000 2500 2000 1600
           1250  1000   800  500  400  250  200  100   50

       2: 20000 10000  5000 4000 2500 2000 1250 1000  800
            625   500   400  250  200  125  100   50   25

       4: 10000  5000  2500 2000 1250 1000  625  500  400
            313   250   200  125  100   63   50   25   13
sample
 rate
 (us)  5:  8000  4000  2000 1600 1000  800  500  400  320
            250   200   160  100   80   50   40   20   10

       8:  5000  2500  1250 1000  625  500  313  250  200
            156   125   100   63   50   31   25   13    6

      10:  4000  2000  1000  800  500  400  250  200  160
            125   100    80   50   40   25   20   10    5
```

对于每种采样率，有18种可选的频率。

实验内容

- 在树莓派上输出不同占空比的PWM波形，并用示波器进行观察
- 通过按键和键盘输入实时调整PWM的占空比并控制电机转速

附件

- pwm_sleep.py --- 用time.sleep()方法手动产生PWM波。
- pwm_button.py --- 用RPi.GPIO模块产生PWM波控制一个电机，用两个按钮可以调速。
- pwm_keyboard.py --- 用RPi.GPIO模块产生PWM波控制两个电机，用键盘输入控制小车前进、停止、左转、右转。
- pwm_pigpio.py --- 用pigpio库产生高频率、高精度的PWM波的示例。

实验报告中需要回答的问题

1. 电机驱动板的作用是什么？
2. 为什么电机要和树莓派“共地”？

致谢

- 本课件由以下同学协助编写
  - 马锦玓（14307130171）