

## 如何确定直流电机驱动的 PWM 频率

### —— 圆梦小车改进中的个人感悟

在“[圆梦小车强身健体啦](#)”一文中，提到了新的电机在原来的驱动程序下不能正常工作之事，本文将详述其中原委。

#### 一、问题的来由

此问题在我第一次涉及直流电机驱动时就遇到了，可翻遍所有资料，都没有给我一个完美的答复，因为我一直觉得应该根据电机的特性来选择 PWM 的频率。

直流小电机的特性差别很大，一般遥控玩具的电机通常为 1A 以下，这是为了降低驱动电路的成本，通常使用 8050、8550 就可以驱动。

而遥控模型级别的电机不同，它们的目标是速度，所以电机通常动辄 10A，甚至几十安都有，读者可以去搜索一下模型用的电调（电子调速器，也是 PWM 控制模式），那些指标都是 50A、90A、130A 等等，第一次我看了都“晕”！看看照片，哪个不是一堆 MOS 管并联？所以价格也不菲，通常都成百上千。

一般用于工业控制的减速电机则不然，由于有很大的减速比，且电压一般为 12V，所以电流通常很小，在几百毫安级别，正常工作只有几十毫安，这是由于他们要求低功耗，增加可靠性。

而电机控制的 PWM 模式讨论似乎针对第二类的较多。因为 PWM 控制对于遥控模型的重要程度较高。而遥控玩具一般不调速，H 桥只是为了换向。工业控制由于减速后转速已很低，不再迫切需要调速了，直接用通断控制已能满足大多数的要求。

似乎只是由于“机器人比赛”才将小电流直流电机的调速引入。由于比赛机器人的特殊性，产生了一种中间状态的需求：

- 它们不像遥控模型那样追求速度，但想要类似于遥控模型的操控特性；

- 它们不满足于遥控玩具那种简单的控制，却要相当于遥控玩具电机那样的电流；
- 因为机器人比赛不像赛车，穷其全力一搏，只求瞬间辉煌；它需要有一定时间去做一些蕴含智慧的活动，而不是四肢发达的“莽汉”，所以要有一定的“耐力”。

## 二、少而“模糊”的答案

在写“寻迹小车 FollowMe”一文时，我找了许多资料，但没有找到一篇可以帮我释疑解惑的。下面就是几篇我所找到的文章摘录：

- 1) 有的这样说：“PWM 控制的基本电路与 ON/OFF 控制相同，电路构成也很简单，施加在电机上的 PWM 信号一般为几千赫至几十千赫”（摘自《机器人控制电子学》P76 \*1）。
- 2) 有的这样说：“PWM 控制对频率的要求一般不是太高。从 50Hz 到 1000Hz 的频段，电机都可以正常工作。”（摘自《机器人探索 —— 工程实践指南》P129 \*2）
- 3) 只有这篇描述的略详细（摘自《机器人设计与控制》P183 \*3）：

### 7.9.3 PWM 信号的最佳频率

这是一个难于回答的问题。高频的 PWM 信号更不易使电机发生机械共振。低频信号较容易产生共振，使电机振动乃至“鸣唱”（一种音频域内的低鸣声）。电机的特性将决定应该使用多高的 PWM 频率。如果电机绕组的电阻相对于其电感来说较高，则在导通期间电机不会达到最大电流，从而电机的转速也不会达到最快。大多数的电机对电感都没有具体的说明，所以用户不得不人为地假设。

另一个限制 PWM 信号频率的因素是所使用的硬件或软件。事实上软件通常是一个瓶颈。但作者建议 PWM 的频率无论如何不应该低于 1kHz，否则电机将发出很大的噪声。在低频段，当占空比为 50% 时，电机极易产生噪声。而较高的频率段（8kHz 或更高）将避免这种现象。实际上，作者所测试的绝大多数小型直流电机在 10~20kHz 的频率段运行时，在听觉范围内感觉不到任何噪声。

如果能够得到电机的详细参数，就可以通过计算求出被采用的电机所允许的最高 PWM 信号频率，下面给出相应的计算公式。在该计算公式中必须让不等式的左边项远大于右边项，比如说 10 倍或以上。否则，电机电流将不足以达到峰值，输出转矩也不会达到最大。

$$2\pi fL \gg R$$

式中， $f$  为频率， $L$  为电枢电感， $R$  为电枢电阻。

式中电枢电阻可由数字万用表测得。但是电感  $L$  如果没有专门的电感测量仪器，就无法得知它的具体数值，除非这一参数被事先给定。

此段文字提到了我所关注的问题：电机特性对 PWM 频率的影响。可是它的结论和建议

却给我带来了更多的困惑！（看红线所标注的）

读者可以对照一下，这三篇内容就相互“冲突”的厉害，也许读者认为我是断章取义，作者也许在前或后有先决条件，那可以帮我仔细看看原作，但愿能有所发现。

4) 我以前文章中推荐过多次的《电动机的单片机控制》一书对直流电机驱动描述的相当详细，可唯独没有阐述如何确定 PWM 的频率，只是留了一道思考题：

“4、PWM 频率如何选择？”（摘自书中 P149 \*4）。

郁闷！是否此问题简单到不用描述了？！

5) 还有一本我推荐过的书——《直流电动机实际应用技巧》，书中也只是泛泛的说了  
一下：（摘自书中 P122 \*5）

脉冲列驱动实际上是利用无触点开关电源来驱动直流电动机，即电动机处于快速地通电、断电、又通电、又断电……状态，人们自然会想到，采用这种驱动方式是否将引起电动机的振动呢？事实上，如果采用与  $\tau_e$  相比脉冲周期足够小的脉冲列信号来驱动，这种担心就完全没有必要了。在  $\tau_e$  期间内，电动机在自身电感储能的作用下（即  $I_D$  的作用下）将继续旋转。电气时间常数  $\tau_e$  与电动机的大小有关，一般不小于几个毫秒。

在图 7.3 的电路中，与电动机并联连接的二极管起着非常重要的作用。这个二极管为功率三极管  $Tr_1$  关断时的电动机提供了电流  $I_D$  继续流通的通路，因此，常把这个二极管称为续流二极管。

文中所说“脉冲列驱动”就是指 PWM；电器时间常数  $\tau_e$  为电机等效电感  $L_a$  与等效电阻  $R_a$  之比（摘自书中的描述，P121 \*5），至于如何确定这两个值不太清楚。

这段和第三篇中所描述的比较一致。似乎都是说 PWM 频率越高越好。我在网上还看到有这样的言论：频率越高的 PWM 调速器档次越高！

正是这些“模糊、混乱”的概念导致我“无所适从”，所以在“寻迹小车 FollowMe”中，编写程序时将 PWM 值和 PWM 的频率都交给使用者确定，期望读者能摸索出合适的选择，并找出选择的依据。

但一直没有看到我想要的反馈，自己略作尝试也未能得出清晰的结论，所以在设计圆梦小车时就放弃了 PWM 频率改变的功能，使用定频方式（7200Hz）。用在当时的 130 电机上没有发现什么明显不妥，也就不再深究了。

### 三、问题再次显现

这次减速箱装配好后，我满怀希望的替换下原来的 130 电机，并且用直流电源先试了一下，感觉不错（详见“圆梦小车强身健体啦”一文）。

立马装上控制部分，发控制命令；本想“秀”一下，用较低的 PWM 值，因为我认为减速比加大后，力矩应该增加，低 PWM 值也应能启动。可实际效果让我大失所望，用“走直线”模式测试，基准 PWM50 启动不了，加到 100 才勉强能走，到 200 才算比较流畅。此时，我脑子里立马掠过一个念头：“坏了，几万块钱要打水漂了！”。

冷静一会儿才想起可能是 PWM 频率的问题。又将上面看过的资料再次研读一番，而且拆了一个电机测量电阻和电感。但第三篇中的那段话还是让我不得其解：

如果能够得到电机的详细参数，就可以通过计算求出被采用的电机所允许的最高 PWM 信号频率，下面给出相应的计算公式。在该计算公式中必须让不等式的左边项远大于右边项，比如说 10 倍或以上。否则，电机电流将不足以达到峰值，输出转矩也不会达到最大。

$$2\pi fL \gg R$$

式中， $f$  为频率， $L$  为电枢电感， $R$  为电枢电阻。

如果为了满足文中的不等式，PWM 频率不是越高越好吗？何来“所允许的最高 PWM 信号频率”？应该是最低频率才对吧？不知原文是如何描述的。

但按基本的电学常识分析，不可能频率越高越好，因为电机的线圈肯定有电感，且电流越小的电机由于匝数多，电感量会越大。基于电工学常识，电感中的电流不能突变，其感抗与频率成正比。

所以当施加过高频率的电压后，由于感抗作用，可能电流很小。

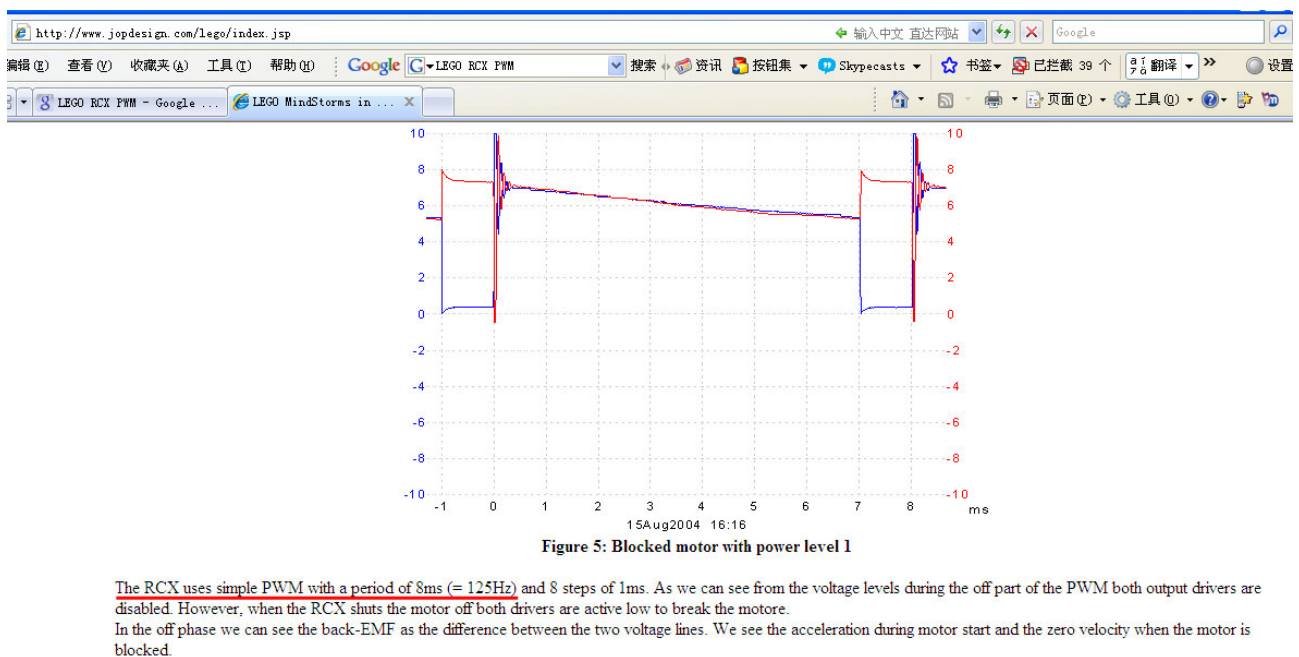


而电机的力矩产生于磁场作用，而磁场的强弱与电流成正比，所以过小的电流将大大降

低磁力，从而导致电机“无力”。

这就像十字路口的红绿灯，假设各方向占 50% 的通行时间，如果所设间隔恰当，就能保证最佳的通行效果，如果一味缩短周期，直到小于汽车的启步时间，即使仍保持 50% 的比例，那路口也将完全无法通行。这和电机上施加过高频率的电压应该是一样的。

我觉得在新电机上遇到的现象就是这个原因，可遍寻不到依据，只是从 LEGO 的 RCX 技术资料上看到：**RCX 的 PWM 频率是 125Hz!** 我觉得 LEGO 的电机和这次选择的电机参数类似，所以下决心修改 PWM 频率。



上图为网页截图，注意红线所标信息以及图示，说明小于 1000Hz 的 PWM 频率还是可以使用的。

#### 四、实施

好在 STC12LE5412AD 所提供的 PCA 比较灵活，程序只需略作修改即实现了。

原来 PWM 信号是使用 PCA 的 PWM 模式产生的，好处是不需要软件干预，只要向相应的寄存器中赋值即可；缺点是频率变化较单一，靠改变 PCA 计数器的信号分频，只有两种选择 ——  $F_{osc}/12$  或者  $F_{osc}/2$ 。对应 MCU 振荡器频率 22.1184MHz，只有两个 PWM

频率可选：43200Hz 和 7200Hz。

由于此次是需要降低频率，所以可以用软件干预方式实现，即：

使用 PCA 的比较器模式，允许匹配中断，在中断中产生 PWM 信号，通过不断加载新的比较值控制 PWM 的频率。PCA 初始化如下：

```

624 // 删除原来的PCA2、3 PWM 模式初始化 080523
625 CCAPM2 = EnCMP_C|EnMAT_C|EnCCFI_C; // PCA 的模块 2 用于电机 1 控制，16 位定时模式，允许比较器匹配时中断。080523
626 CCAP2L = 0;
627 CCAP2H = 0;
628
629 CCAPM3 = EnCMP_C|EnMAT_C|EnCCFI_C; // PCA 的模块 3 用于电机 2 控制，16 位定时模式，允许比较器匹配时中断。080523
630 CCAP3L = 0;
631 CCAP3H = 0;
632
633 CL = 0;
634 CH = 0;
635 CCON = CCON|STARTPCA C; // 启动 PCA

```

按此模式，只要 PWM 信号的周期不大于：

$1 / (22.1184\text{MHz} / 12) * 65536 = 3.5\text{ms}$ ，即频率不低于 28Hz 都可以实现。

中断中产生 PWM 信号的处理如下：

```

1655 if(CCF2 == TRUE)
1656 {
1657     CCF2 = FALSE;
1658     if(g_bPWM_LOutHold == FALSE)
1659     {
1660         g_bMotorLPwmOut = ~g_bMotorLPwmOut; // 左电机PWM脉冲输出 080523
1661
1662         if(g_bMotorLPwmOut)
1663         {
1664             g_uiMotorLTimeCmp.all += g_uiMotorLTime[0];
1665         }
1666         else
1667         {
1668             g_uiMotorLTimeCmp.all += g_uiMotorLTime[1];
1669         }
1670
1671         CCAP2L = g_uiMotorLTimeCmp.b[1]; // 加载到PCA
1672         CCAP2H = g_uiMotorLTimeCmp.b[0];
1673     }
1674 }

```

以上为一个电机的处理，另一个电机完全相同。

变量 g\_uiMotorLTime[2] 用于存放 PWM 信号的高低电平时间，两个单元之和为 PWM 的周期。

变量 g\_uiMotorLTimeCmp 是高低电平时间的累计值，作为 PCA 通道的比较值，通过其控制 PCA 的中断。



程序中作了一些防护，主要是占空比低于一定值后输出恒为“0”，高于一定值后输出恒为“1”。具体可看所附程序（查找“0805”即可找到所有为此修改的地方）。

以下为设置的常量，通过修改这些值，可方便的改变 PWM 频率和限定值：

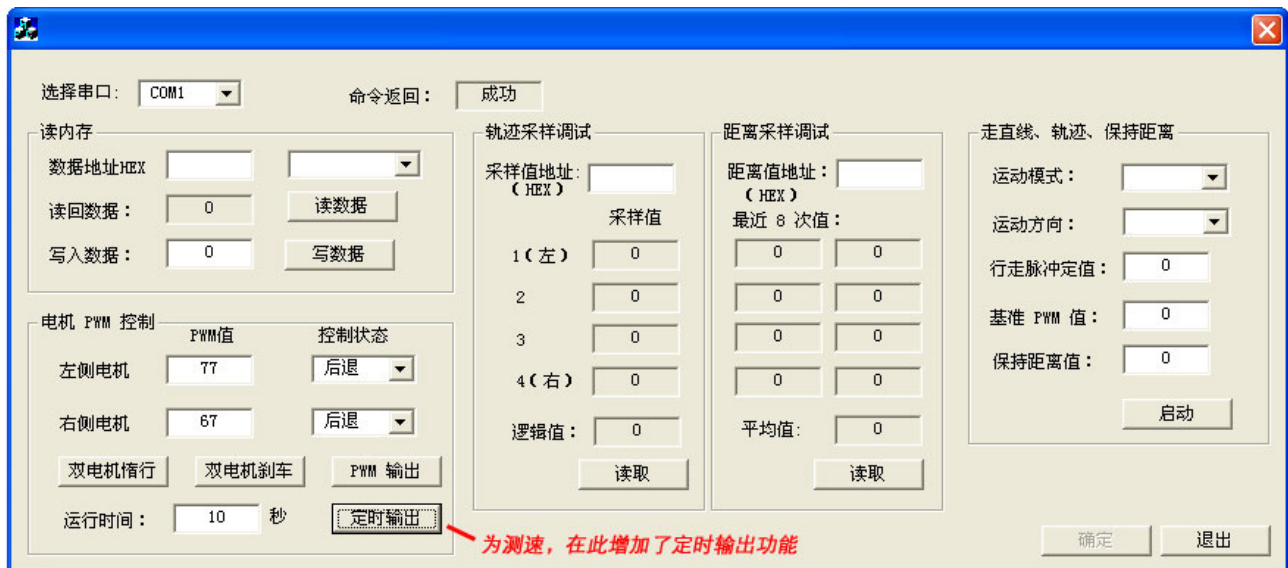
```
444 // PWM 波形发生方式修改 080523
445
446 #define PWM_PERIOD      14746 // 对应 PCA 计数频率 Fosc(22.1184MHz)/12 , 125Hz, 8ms 周期值
447 #define MIN_ACT_TIME    1475  // 设定 10% 为最小输出值, 小于此均强制变为此值
448 #define MAX_ACT_TIME    14000 // 设定 95% 为最大输出值, 大于此均强制变为 PWM_PERIOD, 恒定输出
449
450 #define PWM_OUT_VALID    1      // PWM 脉冲输出控制上臂导通
451 #define PWM_OUT_INVALID 0      // PWM 脉冲输出控制上臂截止
```

读者可修改上述参数方便地实现不同的 PWM 频率，观察对电机特性的影响。

## 五、效果

以下所做测量只是两个 PWM 频率的对比：7200Hz vs 125Hz。

为了方便测量，在原来的 PC 机控制界面增加了一个定时输出功能，可以设定小车的运行时间，利用 PC 定时期到时发出停止命令。界面如下：



之所以选用直接的 PWM 输出而不用原来的走直线功能，是因为走直线程序中小车会根据偏移不断改变 PWM 值，这样的结果就不真实了。

由于电机的差异，所以左右电机的 PWM 值略有不同，以使小车走的接近直线。

测试结果如下：

PWM 频率：125Hz					PWM 频率：7200Hz				
左 PWM	右 PWM	距离 cm	时间 秒	速度 cm/s	左 PWM	右 PWM	距离 cm	时间 秒	速度 cm/s
250	235	174	4	43.5	250	235	174	4	43.5
208	195	164	4	41	205	195	140	4	35
160	140	172	5	34.4	157	143	120	5	24
110	90	151	6	25.1	108	93	86	6	14.3
77	60	150	10	15	77	67	75	10	7.5
注：小车程序中 PWM 值 250 为 100%!									

从上表中可以看出，在 PWM 值比价大的时候，两个频率的速度差别不大；随着 PWM 值降低，速度差明显变大，我认为是前述原因所致，因为随着 PWM 值降低，有效驱动脉冲宽度逐渐缩小，导致电机无法得到有效的能量，所以其出力自然不足。

可以肯定，125Hz 不是最佳频率，只能说比 7200Hz 好，什么频率更好？如何确定之？有待读者共同探讨。

收笔于：2008 年 6 月 20 日星期五

参考资料：

- 1、《机器人控制电子学》 科学出版社 ISBN7-03-013168-1
- 2、《机器人探索——工程实践指南》 电子工业出版社 ISBN7-5053-9911-X
- 3、《机器人设计与控制》 科学出版社 ISBN5-03-012843-5
- 4、《电动机的单片机控制》 北京航空航天大学出版社 ISBN 7-81077-175-2
- 5、《直流电动机实际应用技巧》 科学出版社 ISBN 7-03-017498-4
- 6、Lego RCX 电机 PWM 信息：<http://www.jopdesign.com/lego/index.jsp>