

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，电机很容易产生噪声。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 τ_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 τ_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 τ_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 τ_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。

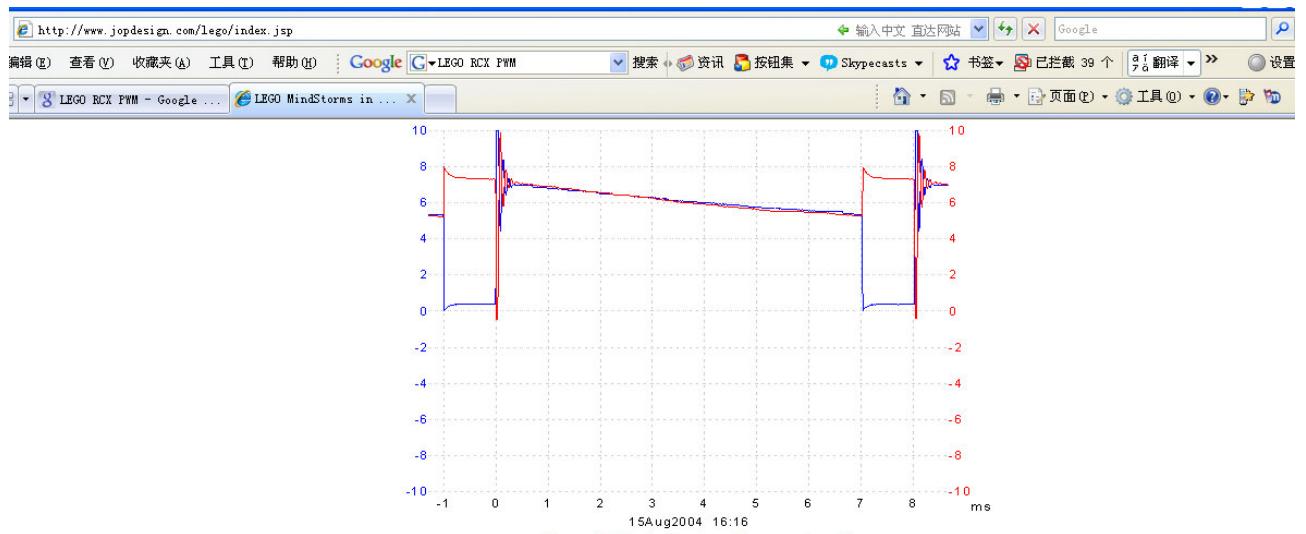
所以当施加过高频率的电压后，由于感抗作用，可能电流很小。

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。



The RCX uses simple PWM with a period of 8ms (= 125Hz) and 8 steps of 1ms. As we can see from the voltage levels during the off part of the PWM both output drivers are disabled. However, when the RCX shuts the motor off both drivers are active low to break the motor. In the off phase we can see the back-EMF as the difference between the two voltage lines. We see the acceleration during motor start and the zero velocity when the motor is blocked.

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——Fosc/12 或者 Fosc/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，大于此均强制变为此值，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

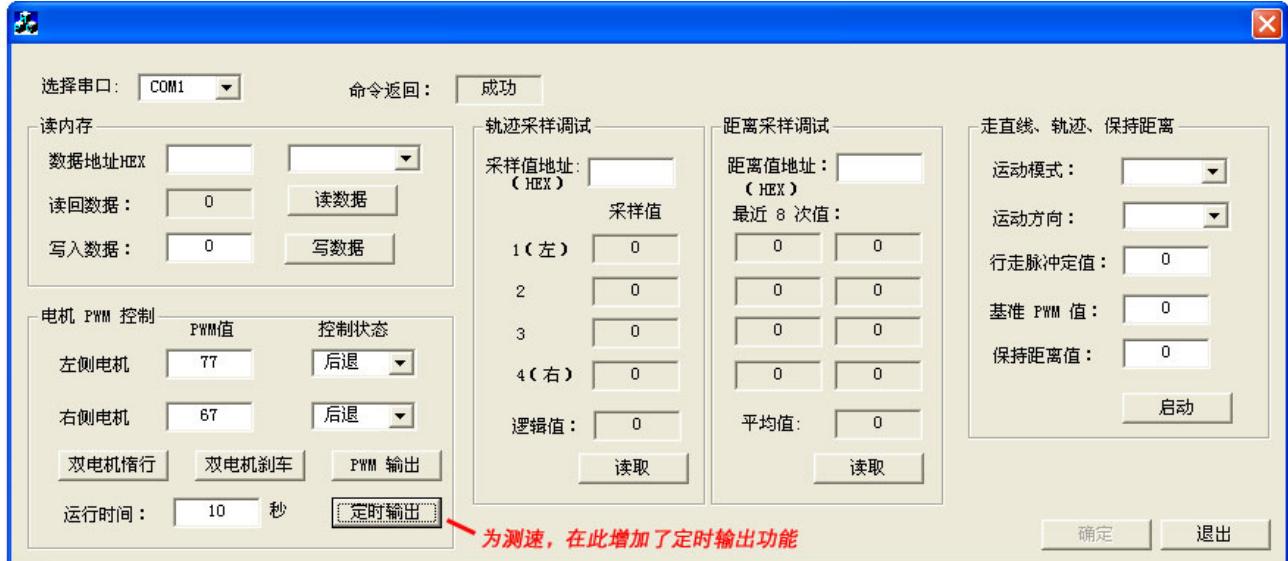
```

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>