

目 录

专题 EV 电机控制编程

- 有刷电机与无刷电机的转动原理一样吗? 001
——从感觉上理解电机的工作原理
- 无刷电机的逆变器驱动电路 015
——电源电流与相电流及其测量
- 电机控制原理与PWM编程 021
——让EV卡丁车跑起来!
- 引入矢量控制提高电机效率 038
——RX62T评估系统+无刷电机
- 无传感器矢量控制的实现 055
——电流误差估算法
- RX/V850 集成开发环境“CS + ” 066
——高效地开发电机控制程序

技术评论

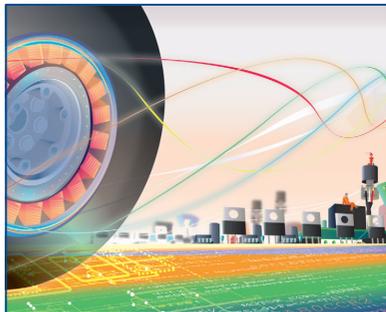
- 电子负载的原理与应用 073
——电源及电池的必要评测
- 节能EV比赛取胜之道 089
——获奖赛车的技术分解

连载讲座

- 材料的特性 104
——进行EV设计前必须知道的那些事儿

特记 EV 制作挑战

- 使用电机设计软件,更改减速比,行驶距离比上届长了20%! 115
——2015年“CQ EV卡丁车袖浦赛”冠军感言
- 秋田自制EV比赛“WEM”综述 123
——无论是初次参赛,还是经验丰富,都有适合你的比赛项目`



有刷电机与无刷电机的 转动原理一样吗？

——从感觉上理解电机的工作原理

〔日〕藤泽幸穗 执笔 | 罗力铭 译

在《电动汽车 第 1 辑》中，我们主要探讨了直流无刷电机的特性是由什么决定的。在本辑中，我们将讲解电机的控制编程。为此，我们先简要回顾电机的结构和转动原理。先看直流有刷电机，它的转动原理相对简单一点。

（编者按）

直流有刷电机（以下简称有刷电机）从构造上可分为定子（静止部分）和转子（旋转部分）两部分。定子上有 3 相线圈（数量是 3 的倍数）。转子上有永磁体（数量是 2 的倍数）。对定子 3 相线圈换流——改变每相的电流方向，也就是输入交流电，就能让转子转动。

在无刷电机中，直流电经逆变器调制后产生线圈所需的交流电。为了随时产生最合适的波形，逆变器中配备了可以进行高速运算的微处理器。可以说，无刷电机控制的关键在于通过正确的运算和编程，随时产生最合适的波形。

因此，本辑的主题为无刷电机控制编程。

直流电机是如何转动的？

在考察无刷电机的转动原理之前，先来看看我们比较熟悉的有刷电机。

无刷电机和有刷电机的主体结构几乎是一样的，都由旋转的转子和静止的定子、永磁体（磁铁）和电磁铁（线圈）组成。

但是，两者的区别很明显。

- 有刷电机：转子 \leftrightarrow 电磁铁；定子 \leftrightarrow 永磁体。
- 无刷电机：转子 \leftrightarrow 永磁体；定子 \leftrightarrow 电磁铁。

■ 有刷电机的转动原理

接下来，我们来看看电机的转动原理。对此熟悉的读者可以跳过这段内容。如果对电机的转动原理解得不够透彻，那么编程就无从谈起。这是关于动能、电能、磁能之间的转换的话题。听起来简单，但是理解起来却有点麻烦。我们先从感觉上理解，然后逐步深入探究。

● 右手螺旋定则、洛伦兹力和左手定则

我们所熟知的四驱玩具车等模型上使用的有刷电机，接通干电池等直流电源便会立即转动。接下来，我们通过几个物理定则对它的转动进行说明（图 1）。

（1）右手螺旋定则

图 1（a）表示的是通过铜线等导体的电流和电流激发磁场（磁感线）之间的关系。磁感线表示磁感应强度和方向。垂直穿过磁场单位面积的磁感线数量（磁通量），与磁感应强度成正比。

（2）洛伦兹力

在磁场（磁感线）中，放入通电导体，导体上产生的力，被称为洛伦兹力（电磁力），如图 1（b）所示。洛伦兹力 F 可表达为

$$F = B \times I \times L$$

式中， B 表示磁感应强度； I 表示通过导体的电流； L 表示导体长度。

这是计算电机转矩的重要公式，后面会详细讲解。

（3）弗莱明左手定则

通过这一定则，我们可以更好地理解洛伦兹力的作用方向。将左手摆出图 1（c）所示的形状。这时，食指指向磁场的方向，中指指向电流的方向，大拇指指向洛伦兹力的作用方向。

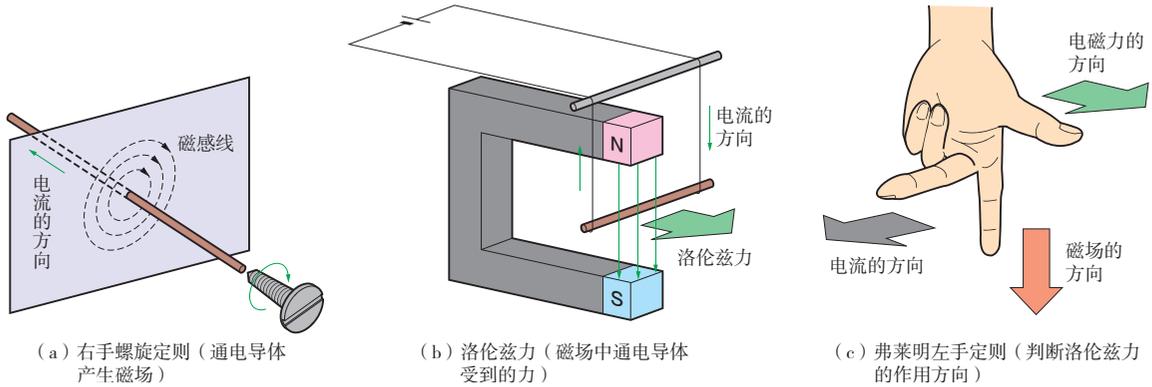


图1 弗莱明定则与洛伦兹力

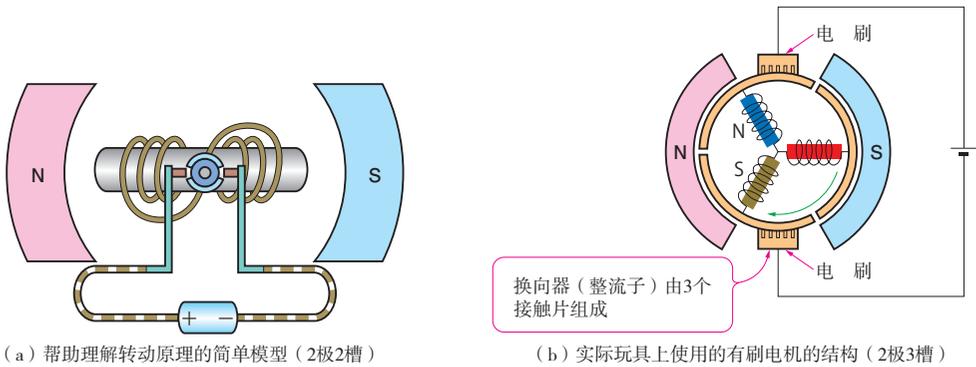


图2 有刷电机的结构

● 电机的结构

为了更好地理解电机的工作原理，我们将电机定子上的永磁体设为2个（内侧为N极和S极），转子上的电磁铁设为1个，并对这个极其简单的有刷电机进行考察，如图2（a）所示。

2个永磁体内侧的N极和S极设置为相反方向（2极）。电流通过电磁铁（线圈）时，铁心两端（2槽）分别形成N极和S极。如果电流方向相反，电磁铁两端的磁极也会转换。实际玩具上使用的电机多为3槽结构，如图2（b）所示。

● 电机的转动原理

电机是利用永磁体与电磁铁之间的排斥力和吸引力来转动的。如图3所示，铁心上缠绕的线圈通电后变成电磁铁，并以其两端为中心形成磁场（N极和S极）。改变流过线圈的电流的方向，就能改变两端磁场的极性。

在缠绕线圈的铁心中心部位设置一个旋转轴，

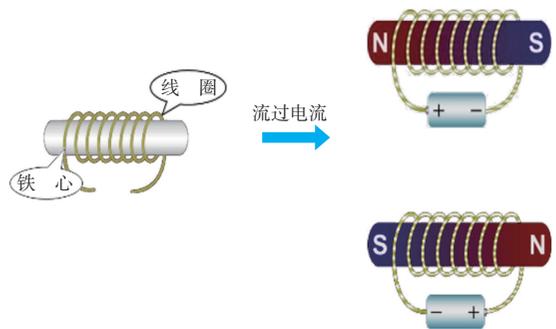


图3 电机原型的转子部分的结构

切换电流方向即可改变转子两端磁场的极性

铁心就变成了转子。同时，在不干涉铁心旋转的附近位置，放置两个与旋转轴相对且极性相反的永磁体，永磁体就是定子。转子和定子组成电机的原型，电机的转动原理如图4所示。

从图4中可以看出，转子线圈（电磁铁）两端

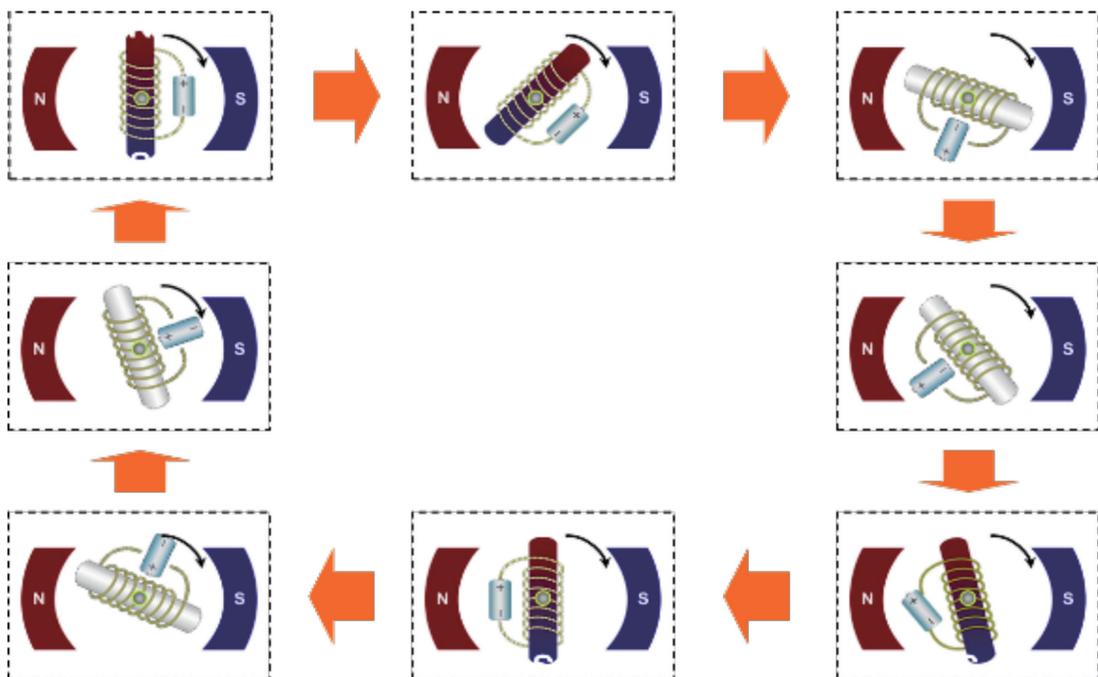


图4 直流电机的转动原理
转子线圈中流过直流电，如果根据电机的旋转位置进行换流，电机就会持续转动

产生的磁场与定子的永磁体磁场极性不同而相吸，致使转子转动。但是，当电磁铁（转子）转动到距永磁体最近的位置时，就会停止转动。

这时，如果线圈中流过与原来电流方向相反的电流，那么转子线圈与定子的永磁体就会因磁场极性相同而相斥。在最佳的时间点切换电流方向（换流），就可以使转子连续转动。

● 电机换流的结构

电机中存在着一个可以改变电流方向的换流结构。实际上，有刷电机和无刷电机的换流结构是不同的（这也是两者在工作原理上的区别）。

（1）有刷电机

在有刷电机中，换流是通过换向器（整流子）和电刷的简单组合实现的（图2）。

（2）无刷电机

换流即改变电流的方向，实际上也可以理解为产生交流电。然而，50Hz/60Hz的市电频率是不变的，无法满足电机的换流需要。为此，我们通过逆变器产生可以让电机转动的交流电。

● 2极2槽的局限性与3槽的必要性

电机是靠恰当地利用磁力来实现转动。然而，

大家看了图4就会产生疑问：事实真是这样吗？如果转子线圈从停止位置重新通电，也有可能出现与原方向相反的转动（反转）。可是玩具中使用的电机并没有出现这样的现象。

为了防止反转，玩具中使用的电机中设置了3个互成120°的线圈（2极3槽），而不是2个线圈。而且，同一时刻仅让电流流过其中的2个线圈，而不是1个线圈或全部3个线圈。这样，就能确保电机只朝一个方向转动了（专栏A）。

■ 电机的特性——对转矩与转速的考量

● 产生的转矩

转矩是用来表示电机的转动性能的参数，是产生转动的力的力矩（力×转动半径）。这里所说的“力”，就是前面提到的洛伦兹力。也就是说，电机的转矩来源于洛伦兹力。接下来，我们引入洛伦兹力方程来表示转矩。

作为转矩来源的电磁力：

$$\text{电磁力 } F = \text{磁通密度 } B \times \text{导体长度 } l \times (\text{电流 } I \times \sin\theta)$$

$$\text{导体单位长度上的力 } F' = \text{磁通密度 } B \times (\text{电流 } I \times \sin\theta)$$

与前面的公式有些不同，“电流 I ”变成了“ $I \times \sin\theta$ ”。

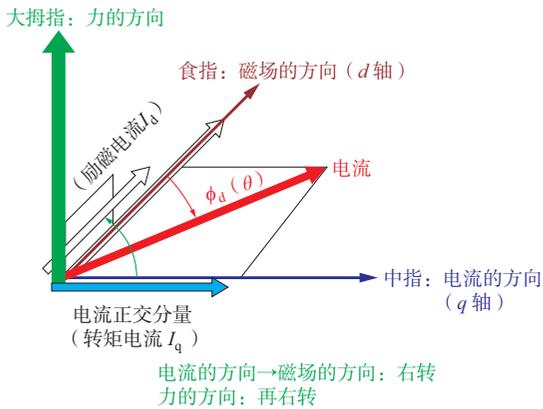


图5 关于弗莱明定则的更严谨的说明

线圈与磁场的位置关系，如果遵循弗莱明左手定则，保持并固定在 90° ，则得到 $F' = B \times I$ 。

如果导体与磁场的角度为 θ ，那么导体看起来就变短了，它的实际有效长度是 $l \times \sin\theta$ 。

前面公式中，括号里是电流 I ，而不是导体长度 l 。的确， I 和 l 长得很像，很容易混淆。这个公式中只有乘法计算，因此，括号放在式中任何位置都不影响结果。那么，“ $I \times \sin\theta$ ”代表什么意义呢？

这就是重点！

● 探究电流与 θ 的关系

图5是关于弗莱明定则的更严谨的说明。我们用矢量的概念来解释三维空间中力之间的关系。这里的角度 ϕ_d 与前面提到的 θ 是相同的。

实际上，当 θ 为 90° 时，线圈中流过的电流都会产生电磁力；当 θ 为 0° 时，电流方向与磁场方向平行，电磁力为0。如图5所示，电流方向与磁场方向的角度都在 θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的坐标轴范围内。

也就是说，电流是由产生电磁力的电流分量 I_q 和不产生电磁力的励磁电流 I_d 两部分组成的。

这一概念，实际上是矢量控制的基础。

● 对电机转矩的考量

转矩是电机的重要参数。如前所述，转矩 T 是由电磁力 F 在转动半径 r 上产生的，用“ $F \times r$ ”表示。对于同一电机， r 是相同的。所以，这里将转矩等同于电磁力 F 来讲解（暂不考虑严谨性）。

永磁体的磁通密度是不变的，而电流产生的磁通密度是变化的，进而转矩也是变化的。电流增大时，磁通密度变大，转矩增大。相反，如果电流保持不变，则永磁体的磁通密度越大，转矩越大。

因此，要想增大电机转矩，有两个选择：

- 增大电流
- 使用磁通密度高的线圈

这个结论十分重要。换言之，就是

- 转矩与电流成正比
- 转矩与磁通密度成正比

● 要获得大的转矩，取多少线圈匝数？

想要增大转矩时，线圈匝数越多越好吗？

这里有两个问题。一是物理上的限制。线圈匝数越多，体积越大。线圈体积太大，必定会超过电机的容纳量。因此，线圈匝数是不能随心所欲地增加的。二是铜损。虽说是铜，但它本身也有电阻。其电阻的大小与长度成正比，与截面积成反比。因此，线圈匝数越多，电阻越大，发热越严重。这里产生的热量是电能转换而来的。也就是说，这导致了电能的消耗，是不可取的。

另外，增加线圈匝数也会带来转速的问题。线圈匝数与电机转速成反比。线圈匝数越多，越容易成为低速电机。

● 线圈匝数越多，越容易成为低速电机的原因

有些人可能认为，匝数越多，线圈的磁力越大，转速越高。

众所周知，在不通电的状态下转动电机，电机就相当于发电机。但是，仅限于在不通电的情况下转动，电机才会发电（反电动势）。

按图6连接玩具用的有刷直流电机的定子电路，实际用手转动一下，便可观察到电机作为发电机的工作情况。这时应该可以测得与转速成正比的电压。

电机通电转动时，其自身也因转动而发电。当发电电压与电源（电池）电压相等时，电流为0。但是，实际上它永远也不会是0，因为转子转动是要消耗能量的。

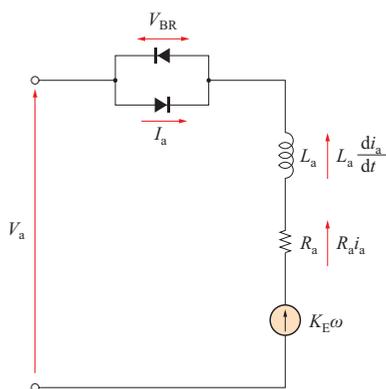
线圈匝数增加会引起反电动势增大，电机转速下降。那么，究竟转速会降低多少呢？在电源电压不变、空载的情况下，电机转速与线圈匝数成反比。例如：

- 线圈匝数：100 → 转速：1000r/min

线圈匝数发生如下变化时，转速也会随之发生变化。

- 线圈匝数：200 → 转速：500r/min
- 线圈匝数：20 → 转速：5000r/min

（以电机的基本性能所能支撑的转速为前提）



忽略电刷的电压降 V_{BR} ，则电机的端子电压 V_a 为

$$V_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_E \omega$$

正常状态下电流一定时，

$$V_a = R_a i_a + K_E \omega$$

电机产生的转矩 T 为

$$T = K_T i_a$$

该公式也适用于加速时惯性转矩、黏性制动力矩、摩擦力矩。

$$T = K_T i_a = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L$$

这里， K_E 为反电动势常数 (V·s/rad)， K_T 为转矩常数 (N·m/A)， ω 是旋转角速度 (rad/s)， J 为惯性力矩， D 为黏性阻尼系数， T_L 为负载转矩。

图 6 有刷电机内部等效电路与发电计算

不同规格的电机的“电源电压 ÷ 空载转速”都是一定的，即反电动势常数是一定的。

反电动势常数 = 电源电压 / 空载转速

电机最大转速 (空载转速) 是反电动势常数决定的。这个值可以从电机特性图中获得 (图 7)。

● 线圈匝数 / 线径与转矩的关系

改变线圈匝数，可以改变电机的转矩和转速，大家对这一特性应有所了解了。

如图 8 所示的特性图，我们可以将线圈匝数与电机特性的关系总结为以下几点。

- ① 线圈匝数越多，空载 (最大) 转速越低。
- ② 线圈匝数越多，获得相同转矩所需的电流越小 (转矩常数越大)。
- ③ 无论线圈匝数如何变化，最大转矩不变。

同样，线径与电机特性的关系如图 9 所示，总结如下。

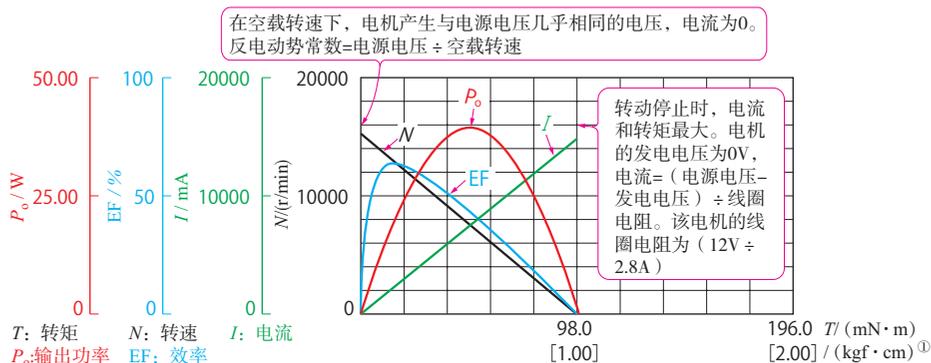
- ① 线径变化时，空载 (最大) 转速不变。
- ② 线径变化时，获得某一转矩所需的电流相同 (转矩常数不变)。
- ③ 线径变大时，最大转矩变大。

● 根据用途选择电机

接下来，我们来考量不同用途的 EV 电机特性。不同用途的电机的转速与转矩的关系如图 10 所示。可以看出，因用途不同，电机负载转矩有很大差异。

型号	额定电压 /V	空载转速 / (r/min)	空载电流 /mA	额定转矩		额定转速 / (r/min)	额定电流 /mA
				/(mN·m)	/(gf·cm)		
TG-85R	12	15620	512	15.19	155	13167	2800

(a) 电机参数



(b) 电机负荷特性图

图 7 电机特性图与反电动势常数 (以 TUSKASA 电工 TG-85R 为例)

① 1kgf·cm=0.098 N·m

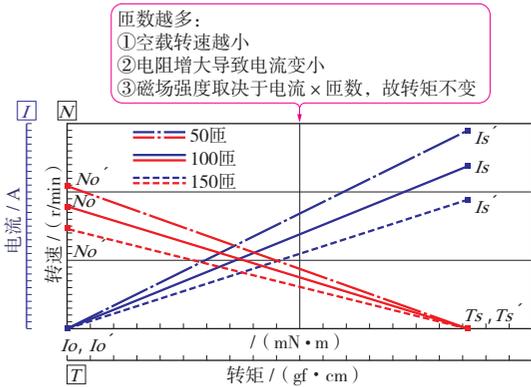


图 8 不同匝数的电机的特性 (万宝至马达)

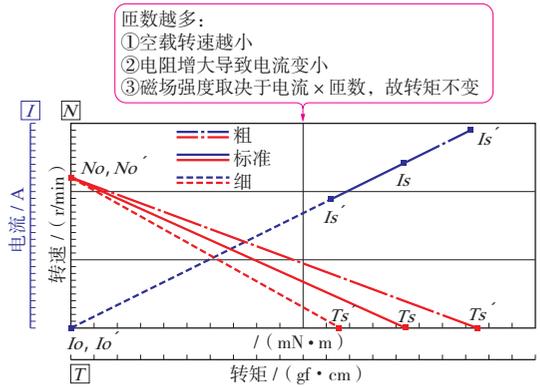


图 9 不同线径的电机的特性 (万宝至马达)

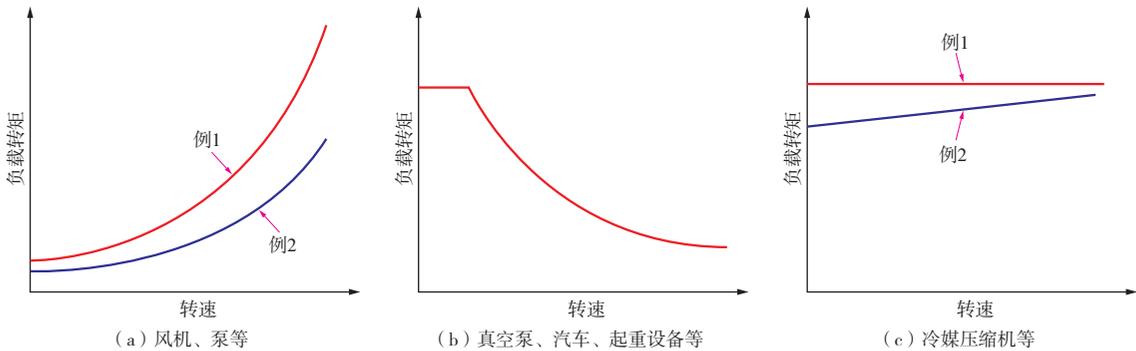


图 10 不同用途的电机、负载特性

图 11 是电机的各种特性关系的总结。

EV 电机产生的转矩如图 10 (b) 所示。在停止时 (正确来说应该是从静止状态启动的瞬间), 电机通过最大电流, 产生最大转矩。对于汽车, 人们都很重视低速时的加速性能, 这与电机的特性相符 (电机的特性是, 转速越大, 转矩越小。发动机正好相反)。

但是, 汽车行驶速度加大时, 受到的空气阻力也会急剧上升。再者, 由图 11 可知, 电机在最大转矩将要出现时的效率最低。

也就是说, 发热导致的能量损失增大了。但是, 我们没有必要利用所有的电机特性, 只要利用最大效率出现时的电机特性。当然, 如果是短时间使用, 可以利用效率不高的部分的电机特性。

从电机的用途来看, 有时也需要利用电机转速升高后负载变大时的转矩。如空调等的压缩机, 在进行压缩时, 负载变得越来越大, 应该选择达到最大负载时依然可以维持运行所需转矩与转速的电机。

● 改变磁场的特性

可以通过改变永磁体的特性来改变电机的特性。由洛伦兹力方程可知, 磁通密度越大, 电机的转矩越大。而且, 我们可以通过选择不同的永磁体来改变磁通密度。

不仅如此, 在同一个永磁体上, 改变其不同截面上的磁场分布 (可以从头到尾均匀分布, 也可以让两端的磁场弱一些), 也可以改变电机的特性 (但是成本高)。

在线圈方面, 电机性能也不仅仅是受匝数与线径的影响。前文已述, 电机的体积并不是无限大的。线圈的截面是圆形、椭圆形, 还是矩形, 都会影响匝数。

稀疏地缠绕, 还是紧密地缠绕, 当然也会改变电机的特性。绕组线 (也叫漆包线) 上绝缘漆膜的厚度, 也会影响电机的特性。

缠绕漆包线的铁心涂覆着一种非常重要的绝缘材料。

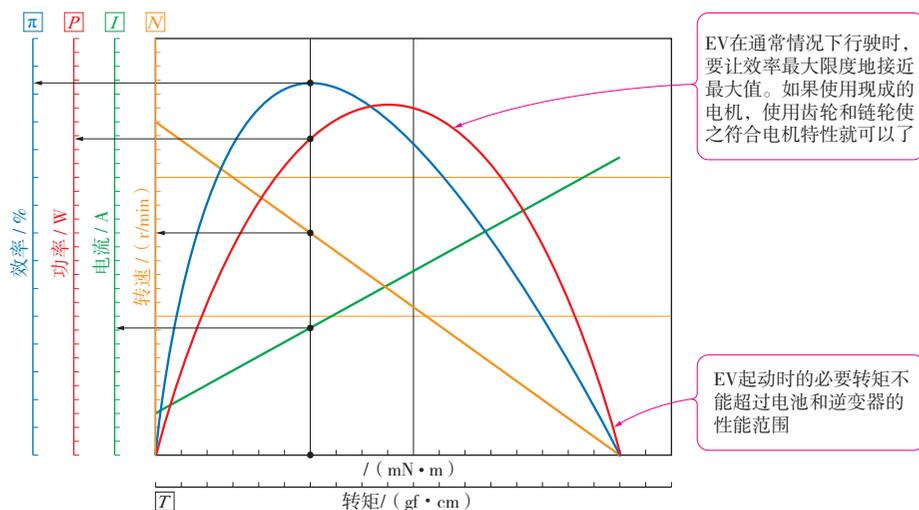


图 11 电机的特性（效率、功率、电流、转速与转矩的关系）

铁心是由涂覆绝缘材料的薄电磁钢板层叠而成的。为了提高磁通密度，必定免不了用铁。但是，当磁场急速变化时，用铁的部分将产生涡流，导致发热损失^①。

采用层叠的方式，是为了减小涡流。最近，市面上出现了不易产生涡流的非晶电磁钢板，铁心材料得到了进一步的改良和提高。

线圈等导线的发热损失叫做铜损，而电磁钢板的涡流发热损失叫做铁损。要提高电机的效率，就必须对这两种发热损失采取对策。还有，电机中的电磁钢板（铁的部分）与绕组线（铜的部分）的比例也可以改变。空心杯电机没有铁的部分，因此不会产生铁损。

此外，温度上升会使永磁体的磁力急剧下降。因此，对电机进行冷却也很重要。

■ 有刷电机的控制

● 转速控制

改变电源电压可以控制直流电机。电机转速是由电机产生的转矩和负载转矩的平衡点决定的。若电源电压与负载转矩相匹配，则转速不变。若改变电源电压，则电机特性曲线平移，当产生的转矩与负载转矩平衡时转速保持不变。

当要求负载转矩即使受到负载特性或外界的影响，

也保持转速稳定时，要根据负载转矩最大值所需的电机转速来确定电机的电压或电流，并通过电路对电压实施控制（图 12）。

通过模拟改变电压、电流进行速度控制的方法，请参考图 13。

● 电压控制方式

电压控制方式的电路如图 13（a）所示。

电压的模拟控制电路虽然简单，但存在电压下降时晶体管发热的缺点。也就是说，转速下降，不会改变电机的消耗功率，从而影响效率（图 14）。假设流过电机的电流为 1A，晶体管的分压是 3V，仅这里的功率消耗达到了 3W 之大。

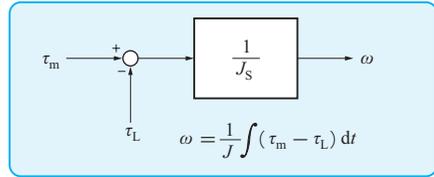
也可使用输出可调型开关电源，但是其规模太大。因此，在电机控制方面，经常使用 PWM（Pulse Width Modulation）进行速度控制。其电路如图 15 所示。这时，晶体管的栅极在高速电压信号的作用下高速通断，形成开关电路。晶体管的通断速度比电机转速更快。晶体管开通时，电流流向电机。这种控制方式，通过改变晶体管的开通时间和关断时间的比例，获得平均电压。平均电压上升，电机转速升高；平均电压下降，电机转速下降（图 16）。

^① 电磁炉不使用明火加热食物，就是利用了涡流的原理。但是，这里要避免发热损失。

• 速度由什么决定？

※重要的运动方程

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_m - \tau_L$$



J : 惯性 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) (一定或可变)
 ω : 角速度 (rad/s) (可检测或不可检测)
 τ_m : 电机转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$) (可根据电流计算)
 τ_L : 负载转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)

左边 右边
 转速一定=电机转矩与负载转矩相等

• 如何确定电机的转矩？

要使电流变化与转矩成比例
 ⇒ 改变电流就要改变电压

图 12 电机的转速控制

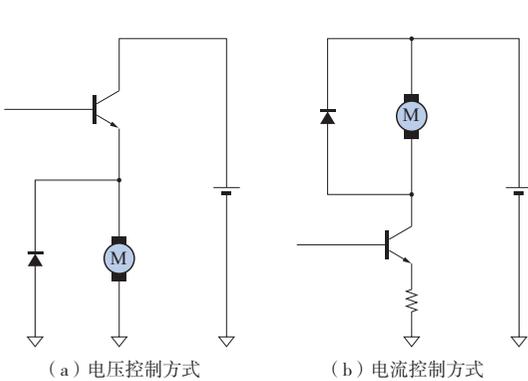


图 13 电机的电压 / 电流控制方式

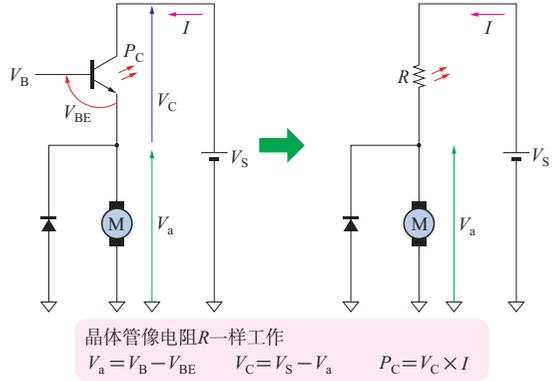
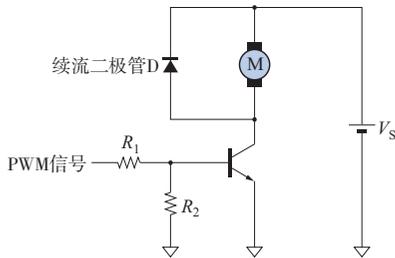
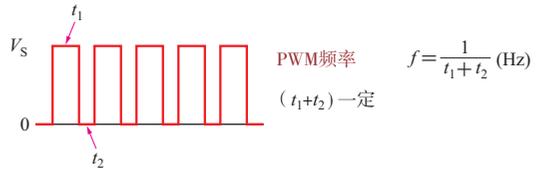


图 14 使用了晶体管的电压控制



晶体管起开关作用。PWM信号为0V时，晶体管关断；为高电平时，晶体管开通。PWM频率越高，电机转速越平稳

(a) 驱动电路



输出电压 $V = \frac{t_1}{t_1+t_2} \times V_S$

(b) PWM信号

图 15 没有发热损失的电压控制——PWM

● 增加转向控制

图 15 所示的电路可以进行较高效率的电机转速控制，缺点是电机不能反转。而在实际应用中，需要电机正反转切换的情况不在少数。在电机领域，正转表示为“CW”（Clockwise，顺时针），反转表

示为“CCW”（Counter-Clockwise，逆时针）。

H 桥驱动电路既可以控制电机的转向，又可以控制电机的转速，其工作原理如图 17 所示。此电路中使用的开关驱动器件是 MOSFET。作为开关器件，MOSFET 适应大功率的能力比晶体管强。而在

专栏 A 无刷直流电机按一个方向转动的原理

图 4 所示的有刷电机的工作原理，是电机实现转动的前提条件。图中表示的是静止状态下线圈的位置。如果停止状态下线圈的位置正好与永磁体平行，则通电时不确定电机是正转（CW），还是反转（CCW）。如果两个方向上的力相等，那么线圈依然保持不动，电机也不转。然而，市售的有刷电机，只要与电池的正负极连接起来，就会按一个方向转动。

这是如何实现的呢？我们对有刷直流电机进行分解后（照片 A）发现，对应 2 个磁铁，有 3 个缠绕线圈的槽，如图 2（b）所示。这种结构可使电机按一个方向转动。因为电流不会同时流过电机的 3 个槽，也不会只流过其中 1 个槽，而是同时流过其中的 2 个槽。这样，通电时就能让电

机按一个方向转动。

也许说到这里，你还存有疑惑。那么，请实际分解一个电机看看，并画出它的简图来思考，相信就不难理解了。



照片 A 分解后的有刷直流电机

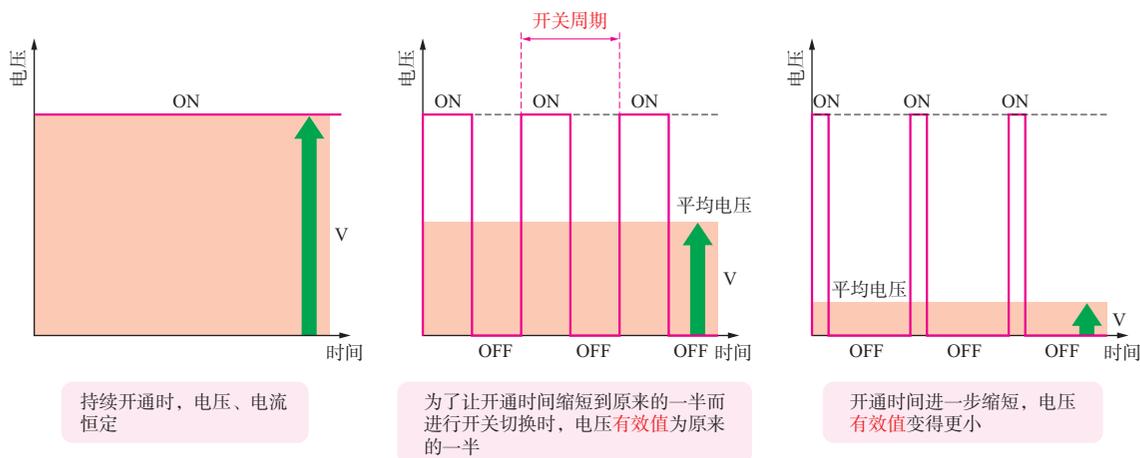


图 16 PWM 电压控制原理

更大功率的家用汽车和火车的开关控制上，使用的是 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor，绝缘栅双极晶体管）。

● H 桥的驱动方法

H 桥的驱动方法有如下 3 种：

- ① CW（驱动）→ 空转（惯性）
- ② CW → 停止（再生）
- ③ CW → CCW

这 3 种电机控制方法中，①可以使电机平滑地转动，但是空转时电机自身发电产生的能量无法释

放，会导致电机的控制性能变差；②的控制性能比较好；③以 50% 的转矩驱动让电机处于某种停止状态，非常适合位置控制。

即使是相同的电路，使用微处理器等进行控制，也可以满足各种各样的使用目的。

无刷电机是如何转动的？

● 无刷电机的用途

结构简单、故障率低、启动转矩高，这些都

专栏 B S 极磁铁与 N 极磁铁

● 不可思议的磁铁

本文通过图片解释电机原理时，使用的词汇是“N 极磁铁”和“S 极磁铁”。通常，其他书籍采用的也是类似的说法。这种说法其实是不正确的。因为实际上使用的并不是仅仅只有 N 极或只有 S 极的永磁体。将条形磁铁从中间分割开来，并不能得到仅有 N 极的和仅有 S 极的半块磁铁。这个结果不可思议吧？

N 极和 S 极一定是相对存在的。虽然我们肉眼看不见，实际上磁体（铁等）的内部也有磁感线（人们定义的，肉眼看不见的线）通过，磁感线从磁体出发的地方就是 N 极，进入磁体的地方就是 S 极。

这里补充一下，同样被称为“极”，但电的正极与负极是可以单独存在的。

● 存在 N 极磁铁吗？

那么，为什么在解释电机原理的图示中，N 极和 S 极是单独分开的呢？其实，在其反面（背面）还存在相反的磁极。但这与电机原理没有关联，因此在图中省略了。

话虽如此，真的与电机原理没有关联吗？如果你这样问，笔者只能回答“有关系”。作为转矩来源的磁感线连接着磁铁的 N 极、S 极。在没有其他磁体的情况下，距离两个磁极越近的地方，磁感线越密集（磁通密度越大）。也就是说，如果

磁铁与转子之间没有磁感线通过，就不会产生力。背面的磁极与磁感线也是相连的，但它对转子产生的磁力影响因受到阻碍，已经变得非常小了。因此，我们让磁体与磁极紧靠在一起，以减小不需要的磁极产生的磁力。

● 磁轭的作用

在使用永磁体的电机中，永磁体转子、定子的正面和背面，几乎都是由铁等磁体连接起来的，并没有为了减轻电机质量而使用塑料。前面提到，玩具上用的电机有两个永磁体。CQ 无刷电机套件中用了 12 个永磁体。在它们的背面，是通过铁等磁体相连的（照片 B.1，照片 B.2），这个磁体叫做“磁轭”。如果没有磁轭，磁通无法集中，磁力就变得非常弱。

顺便提一下，可以将纸条夹在白板或冰箱上的磁性贴，有的也使用了磁轭来增加磁通密度，进而增加吸附强度。另外，大多数缠绕了线圈的电磁钢板也起这样的作用。

● 存在单极磁铁吗？

最近，据新闻报道，在日本的学会杂志上发表的题为《单极磁体理论上存在》的论文引起了全世界的关注。也就是说，存在只有 N 极的磁铁并不奇怪。然而，这并不意味着，过不了多久我们就可以买到只有 S 极的磁铁。

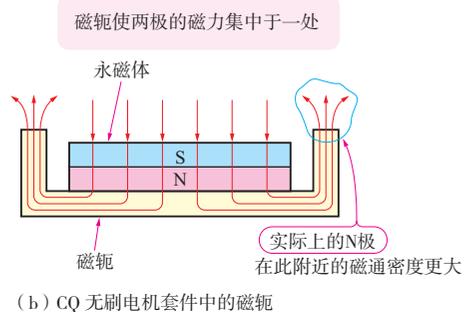


照片 B.1 永磁体与磁轭



(a) 玩具用有刷电机的磁轭
(万宝至马达)

图 B.2 线圈骨架与磁轭中的磁感线



是有刷电机的突出优点。在市售汽车上，它主要用来控制车窗玻璃、雨刮器和调整座椅位置，应用范围十分广泛。但是，其缺点是电刷会产生噪声（干扰），根据不同使用条件其寿命不一。

相反，在静音、使用寿命长（免维护），且对小型化和效率要求高的设备上，宜选用无刷电机。无刷电机还有好几种类型的应用。这里要介绍的是无刷直流电机。