

机器人技术知识

机械 电控 算法 系统

RoboMaster 技术智囊团，用简单的方式带你入门机器人知识，每周日准时更新。

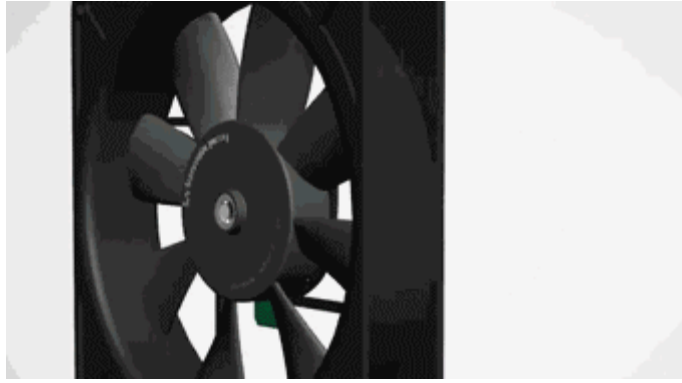
众所周知，在生活和生产中，机器人能模仿人类的行为。比如巨型的机械臂机器人可以组装汽车；扫地机器人可以依靠轮式底盘移动，通过转动小扫把来清洁地面。



工业机械臂

大家对机器人的这些行为已经司空见惯。要让机器人动起来，就需要有动力源驱动它，常见的机器人驱动方式有液压、气动和电动三种。

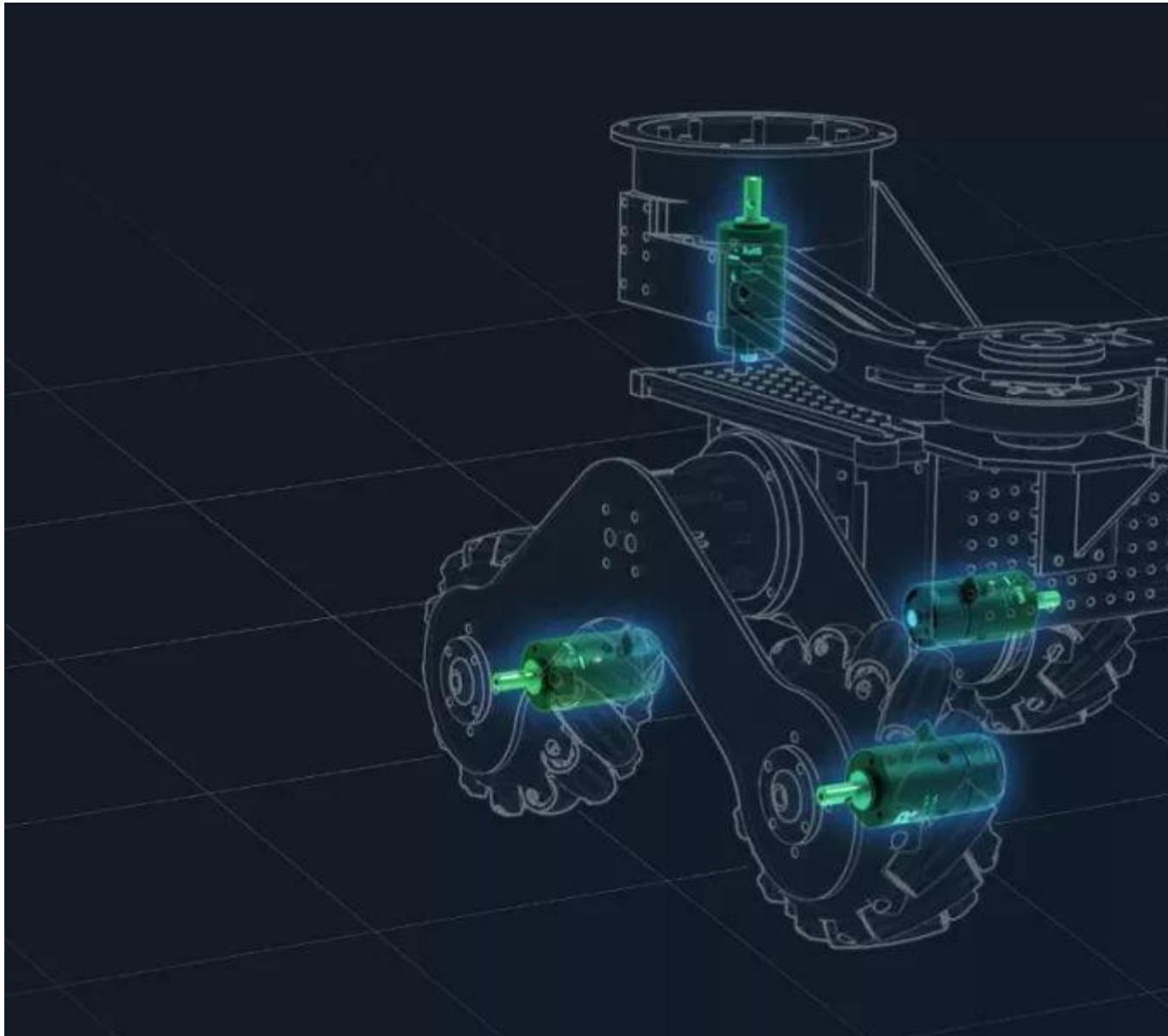
液压驱动常用于大负载的情形，气压驱动常用于负载小、精度要求低的场景。相比之下，电机的驱动就比较简单、稳定性好，应用也最为广泛，比如机械臂的关节、家用电器的驱动。



风扇里的电机驱动

之前，萝卜君用视频简单讲解了电机的工作原理，传送门：[《电机接上电就能动？超通俗讲解有刷、无刷电机的驱动原理》](#)。今天我们再深入聊聊电机。

在机器人的设计过程中，电机是一个极其重要的驱动单元，就好比人类的肌肉和关节。电机将电能转化为机械能，为机器人的运动产生驱动转矩（让机器人动起来），被广泛应用在机器人的关节驱动、轮式底盘驱动等方面。



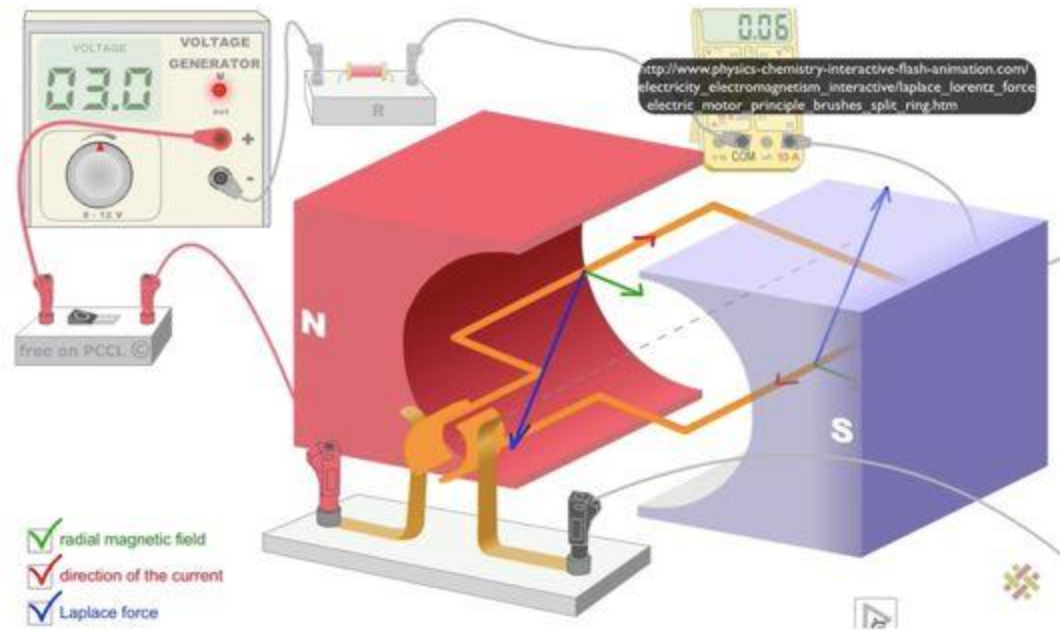
机器人中的应用

电机有两种供电方式，直流和交流。直流电机可以用锂离子电池之类的直流电源供电，所以在机器人领域被广泛应用。

根据是否带有电刷换向器，又可以将直流电机分为有刷电机和无刷电机。

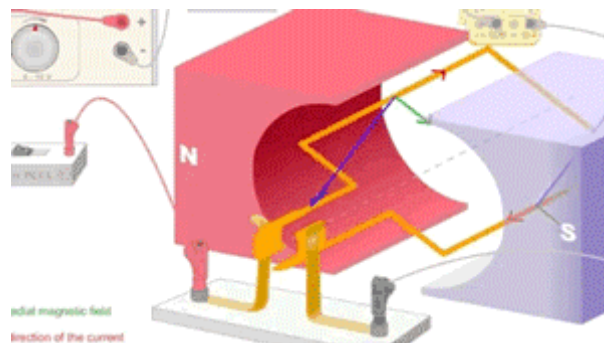
直流有刷电机

直流有刷电机的结构比较简单，通过换向器进行换向。下图中，电流从红色开关流入，经过黄色的转子线圈，从灰色开关流出。通电线圈在磁场中受安培力，开始旋转。



红线为电流、绿线为磁力、蓝线为受力方向

当转到平衡位置时，换向器就会和电源失去连接，但没关系，转子会靠惯性继续转动，转过平衡位置。这时，换向器和电刷的结构会使电流方向发生逆转，线圈产生的磁场方向也随之改变，即完成了一次机械换向的过程。



直流有刷电机原理

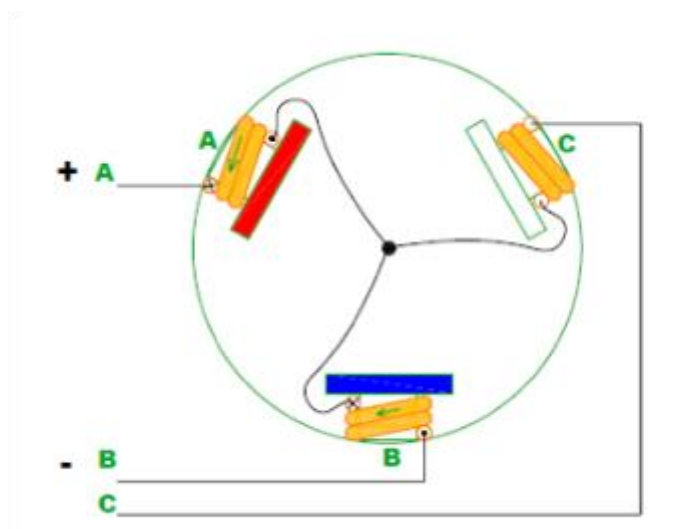
但由于电刷和换向器长期互相摩擦，导致机械磨损，因此有刷电机噪音大、寿命短、需要定期维护。而无刷电机的出现恰好解决了这个问题。



有刷电机受磨损

直流无刷电机

直流无刷电机的结构稍复杂一些，它不利用机械换向，而是用电子换相。下图是无刷电机的定子绕组图（中间的转子结构没有画出）。

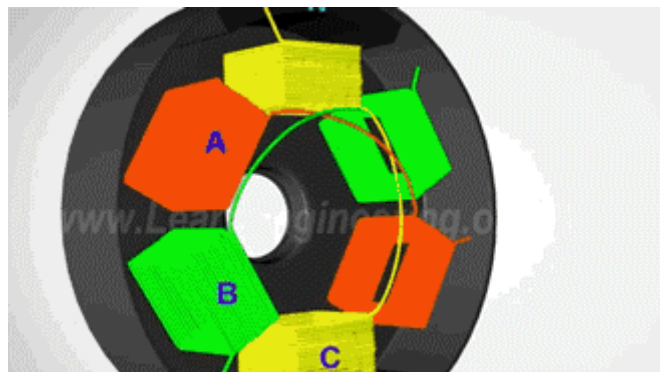


三相内转子无刷电机

图中的黄色部分是三个线圈绕组，代表三个相，它们的一端在中心相连，另一端分别引出“A”、“B”、“C”三个端子。

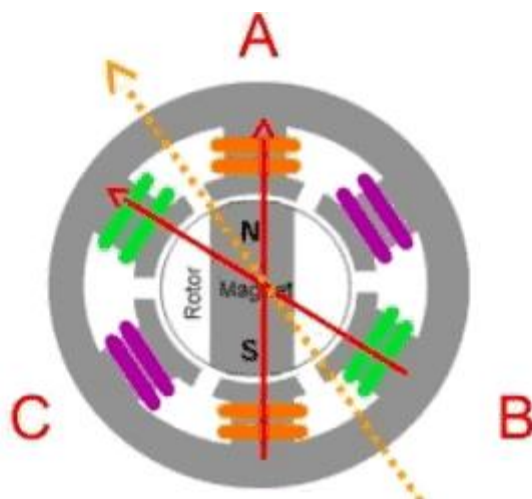
如果对三个端子两两通电，那就有 6 种通电情况：A 正 B 负、A 正 C 负、B 正 A 负、B 正 C 负、C 正 A 负、C 正 B 负。

不管什么组合，每一时刻都有两个线圈有电，然后产生磁场。



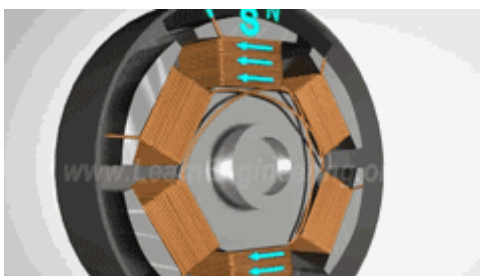
两个带电线圈产生磁场

如果再按照一定的次序通电，就产生了下图的磁场：



红箭头表示每个线圈产生的磁场，黄箭头表示两个线圈合成的磁场。可以看出，无刷电机是定子绕组产生了旋转的磁场。

那么，转子又在干嘛呢？转子是永磁体，因为异性相吸同性相斥的原理，转子会被定子产生的磁场带动，跟随定子磁场的脚步一起转起来。

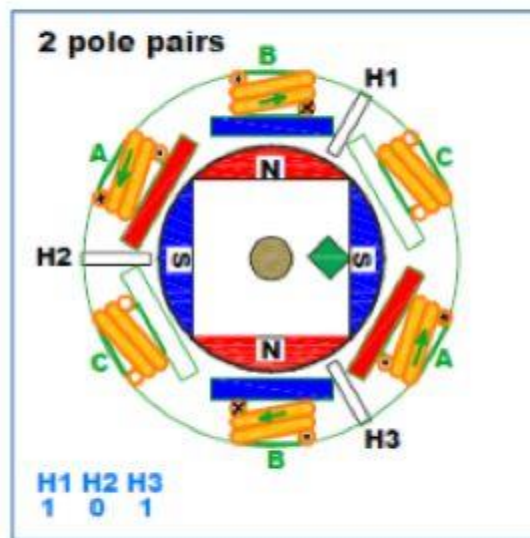
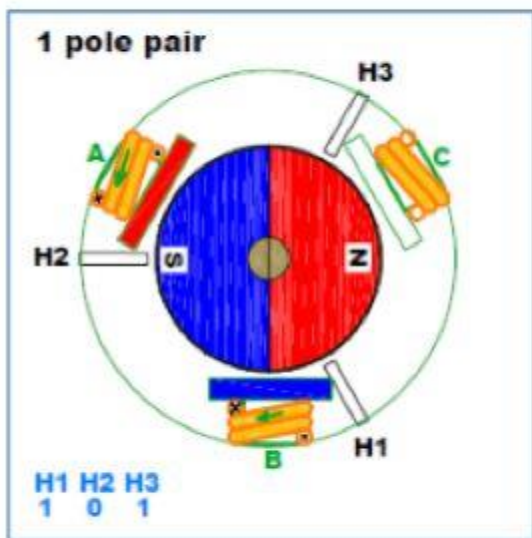


转子转动

而每当转子要与定子对齐的时候，我们就换一次相，转子就永远都追不上定子了。想想也是一个伤感的故事。

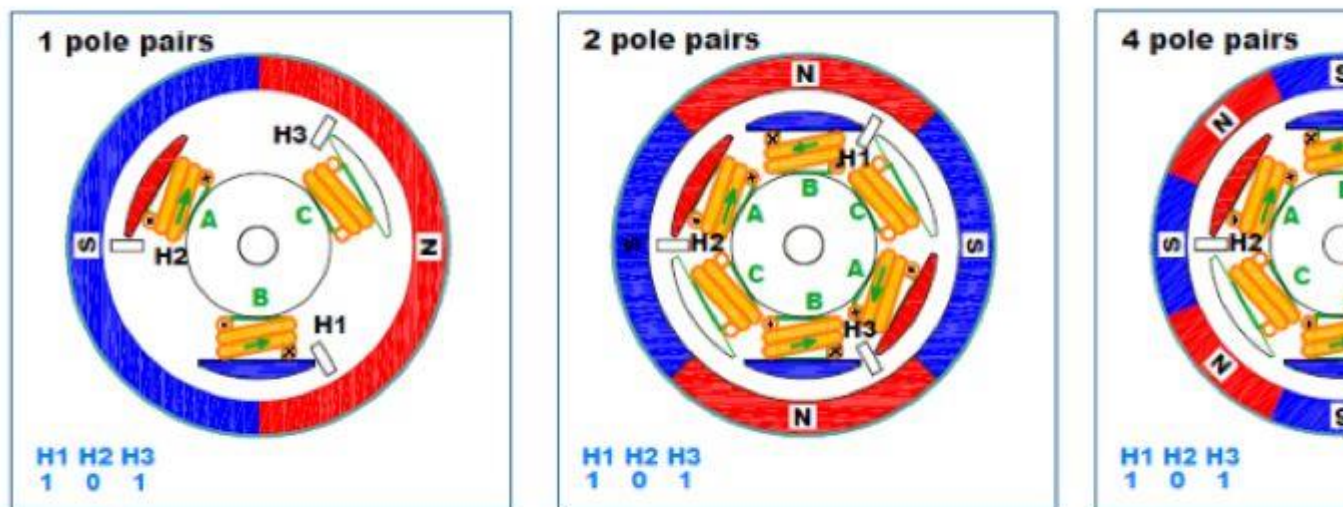
我们把转子的结构加上，看几个典型的例子：

下图从左往右分别是，三相三绕组一极对、三相六绕组二极对、三相六绕组四极对内转子电机，绕组数就是它的定子中线圈绕组的数量，极对数就是内转子的极对数量。



转子在内部

不仅有“转子在内部”的无刷电机，还有“转子在外部”的无刷电机。虽然转子位置不同，但基本原理是一致的：



转子在外部

它的转子在电机外壳上，电机转动时，内部的线圈绕组不动，外壳和转子转动。因为一般外壳的质量比较大，所以转子的转速较低，电机扭力输出大，航模用得比较多。

电机驱动器

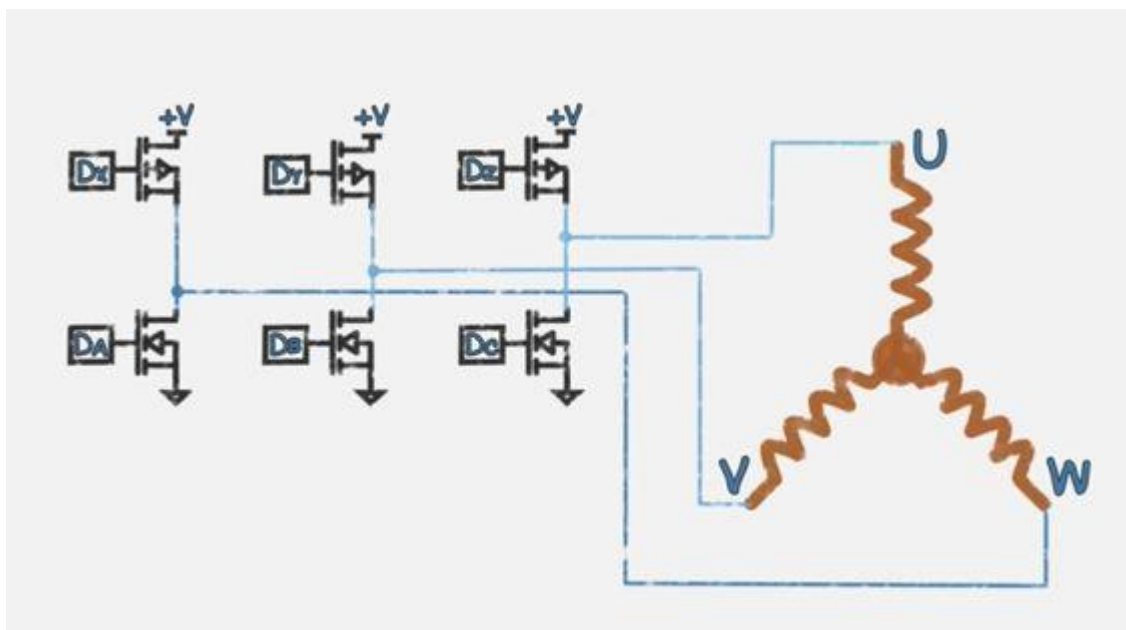
要给它们两两交替着通电，不可能用双手疯狂地换着插电，就算你的手速跟得上电机转速让它顺畅地转起来，你也没法控制转速。这时，就需要用到**电机驱动器**，也称**电子调速器** (Electronic Speed Control, ESC)，简称**电调**。



电机驱动器

萝卜君视频版的电调讲解，可以帮助理解这部分内容：《电机是如何调速的？今天我把它整个都拆开，总算整明白了》

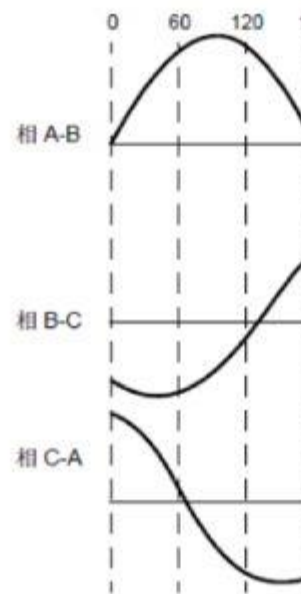
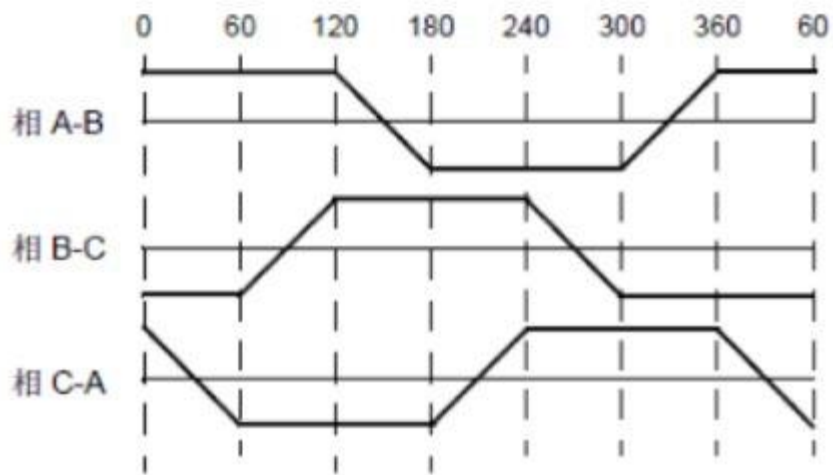
顾名思义，电机驱动器就是驱动电机的，它通过控制 A、B、C 三端的输入，让电机转起来，并且控制电机的转速和方向。



左：电调；右：电机

无刷电机的转子在匀速转动时，各定子绕组会产生反电动势，电机结构不同，产生的反电动势波形也会不同，有方波反电动势和正弦波反电动势。

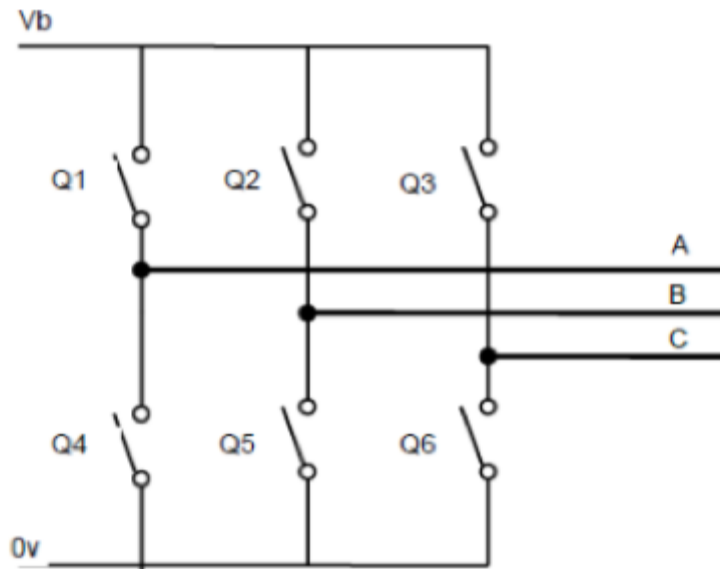
方波的通常采用方波电流驱动，正弦波的通常采用正弦波电流驱动。



方波反电动势和正弦波反电动势

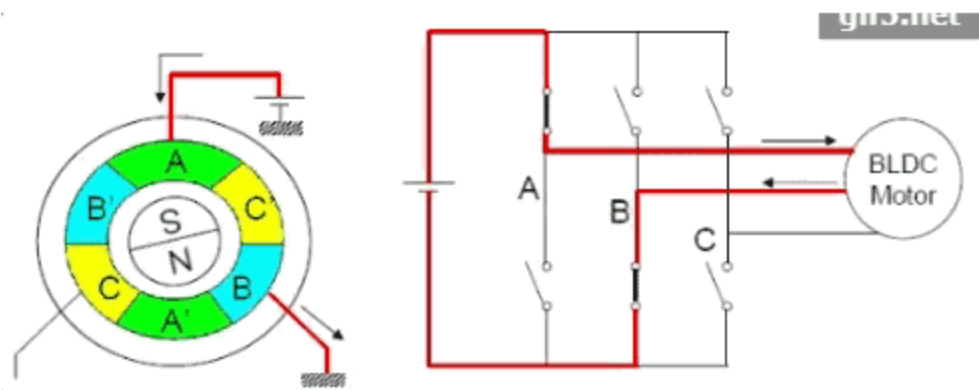
方波驱动

无刷电机有 A、B、C 三相输入端口，所以电调有三个输出端，一个端有两个开关，一共是六个开关，这也叫全桥驱动电路：



全桥电路

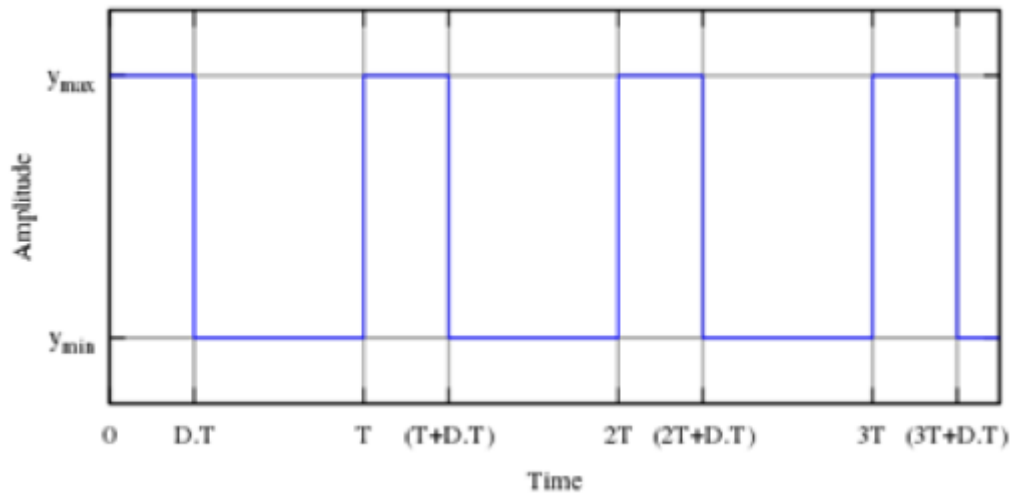
每次按照一定的次序同时闭合两个开关，就可以保证 A、B、C 每次都有两个端口连接电源的正负极：



两两通电

利用开关器件来控制电机和电源的连接，就是驱动的原理。（如何控制开关，这属于电控知识，在这不展开说。）

那如何调速呢？我们引入**脉冲宽度调制**（Pulse Width Modulation, PWM），PWM 通过调制一系列方波的脉冲宽度，来改变输出到电机的平均电压，而平均电压一变化，速度就变化了。



一系列方波

电机的驱动和调速原理就到此为止了？

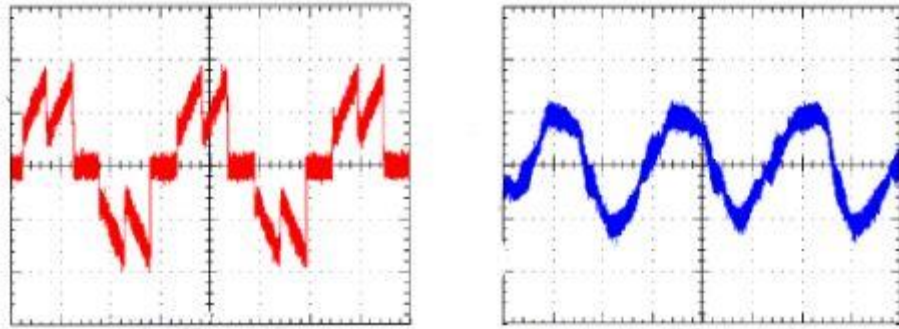


方波驱动的定子线圈绕组中的电流是瞬间变化的，产生的磁场力合力的方向也是瞬间偏移 60° ，所以转子并不是平稳地转过每一个 360° ，而是像时钟一样，一格一格地走，这就形成了转矩脉动。

如何抑制转矩脉动？我们还有第二种驱动方式——正弦波驱动。

正弦波驱动

利用正弦波电流驱动可以有效降低转矩脉动的现象。但正弦波驱动也有缺点，就是控制过程较复杂，且成本较高。想用正弦波电流来驱动电机，就要求反电动势是正弦波。



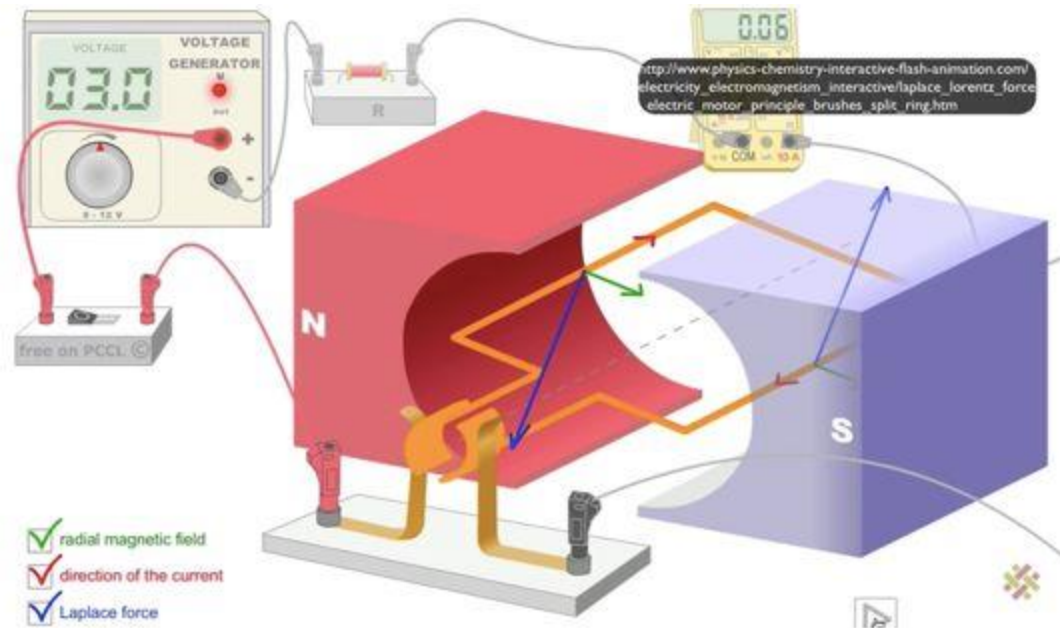
左：方波；右：正弦波

正弦波驱动电机的方式也是全桥电路，但它的调速方式和方波驱动不同。

常见的正弦波控制方法有电压正弦波控制（sinusoidal pulse width modulation, 简称 spwm）、**磁场定向控制**(field-oriented control, 简称 foc, 也称**矢量控制**, vector control) 和直接转矩控制（direct torque control, 简称 dtc）。

foc 方式被广泛应用，接下来我们主要介绍 foc 的控制思想。

要理解 foc 的控制思想，我们得再复习一下直流有刷电机。直流有刷电机能转起来是因为磁场和电流互相作用产生了力（转矩），转矩的大小由磁场和电流决定，而定子（永磁体）产生的磁场是固定的。**所以只要控制电流就可以控制转矩量，速度也就能控制了。**



再用一次这张图

而无刷电机设计强行增加了游戏难度。它的电流不仅产生了转矩（称作转矩电流），还磁化了定子中的磁通材料并产生磁场（称作励磁电流）。这两个量耦合在一起，使得整个控制系统非线性、高阶、又具有强耦合性（也就是很难控制的意思）。

所以，要想控制速度，我们必须将转矩电流和励磁电流彼此分离，单独控制。foc 利用了坐标旋转变换的方式，分解了定子三相电流。将电流分解后，就可以得到励磁电流分量和转矩电流分量，分别控制这两个量，就可以控制转矩了。转矩大了，力大了，速度就上去了。

foc 方式的转矩脉动极小，所以转动非常平稳，也降低了噪声。好东西当然也有缺点，就是算法复杂，成本高昂。坐标旋转变换中涉及 clarke 变换和 Park 变换，各种高频率的数学变换对微处理器的要求很高。

转子位置的检测

终于终于，速度能控制了，但这时候的电机就像一个蒙着眼睛跑步的人，知道自己跑快或跑慢，但假设要精确到 3 米/秒，还是做不到。

这时，我们就需要一个教练在旁边看着，看到他跑了 2 米/秒，就让他再跑快点。而在电机里，我们只要检测转子的位置，就能清楚地得知电机的转速，进而控制它跑快点还是跑慢点（这也叫速度闭环）。



而且, 转子的位置直接影响电子换相, 电调就是通过读取转子的位置来决定什么时候换相的。

如何检测转子位置呢? 根据电调是否有传感器, 分为有感检测和无感检测。有感检测相对简单, 利用编码器、霍尔传感器等传感器就可以检测转子的位置。



光电编码器

无感检测不需要在电机内部添加传感器, 成本低、应用广, 常用的有反电动势法。

反电动势法

转子转动过程中,旋转的转子会在定子上产生反电动势,我们通过这个反电动势的变化情况,也可以判断转子的位置。

foc 对转子位置精度要求比较高,所以无感 foc 驱动设计也是一个难点。传统方法有高频信号注入法、滑模变结构控制方法、模型参考自适应方法等。随着人工智能的发展,神经网络、模糊控制、专家系统等智能算法也被用来检测转子的位置。智能算法的自适应能力强、鲁棒性好,但目前依然处于研究阶段。

总结和应用

最后,我们做一个小总结:无刷电机没有电刷换向器结构,不需要定期维护,寿命较长。在驱动原理上,无刷电机的驱动又分为方波驱动和正弦波驱动,前者原理简单、成本较低,后者算法较复杂,但可以有效地抑制转矩脉动,使电机转动更平稳。

在实际的应用中,我们可以根据实际需求,综合考虑各方面因素,去选择合适的电机方案和驱动方案。

直流有刷电机成本较低,机械磨损大,可以用作机器人的轮式底盘结构;无刷电机的一大优点是换向的时候不会产生电火花,所以广泛用于特种机器人上。



机器人的底盘和关节运动

正弦波驱动的电机转矩脉动小,可以应用在控制精度要求高的地方,如机器人的关节驱动;方波驱动的电机控制较简单,但相比正弦波驱动存在着转矩脉动大、噪音大的缺点,可以应用在空中机器人的多旋翼动力系统。



想深入了解电机和电调的小伙伴可以阅读书籍：《无刷直流电机控制系统》；作者：夏长亮；科学出版社

本期作者



电子科技大学 小泽

RoboMaster2017 校机器人队电控组

一个闷骚佛系、朋克养生的逗比疯子

本文来自 RoboMaster 技术智囊团小泽，文章部分有修改。如果你也希望加入技术智囊团，请通过 robomaster@dji.com 联系我们。文章部分素材来自公共网络，侵权删除。

[阅读原文](#)

学习往期机器人的技术文章

机甲大师
ROBOMASTER



[长按识别二维码关注]

- 专业不枯燥，解读机器人信息 -
