

电机及其控制的基础概念

电机及其控制的基础概念

四足机器人上安装有12个关节电机，这些关节电机是机器人实现复杂运动的基础。机器人的运动控制算法，最终都是生成了发送给这12个关节电机的命令，因此我们需要熟悉关节电机及其控制。

1 适用于四足机器人的动力系统

从四足机器人控制系统的角度来看，这个系统的输入量是每个关节的力矩。因此一个理想的机器人关节能够准确地输出我们希望的力矩，也就是力矩源。这个需求看似简单，但是实际上许多电机并不能做精确的控制（如异步电机），或者只能对角度做精确控制（如步进电机）。因此在四足机器人上，我们选用了一种特殊的电机：永磁同步电机（Permanent-Magnet Synchronous Motor, PMSM）。

1.1 永磁同步电机概述

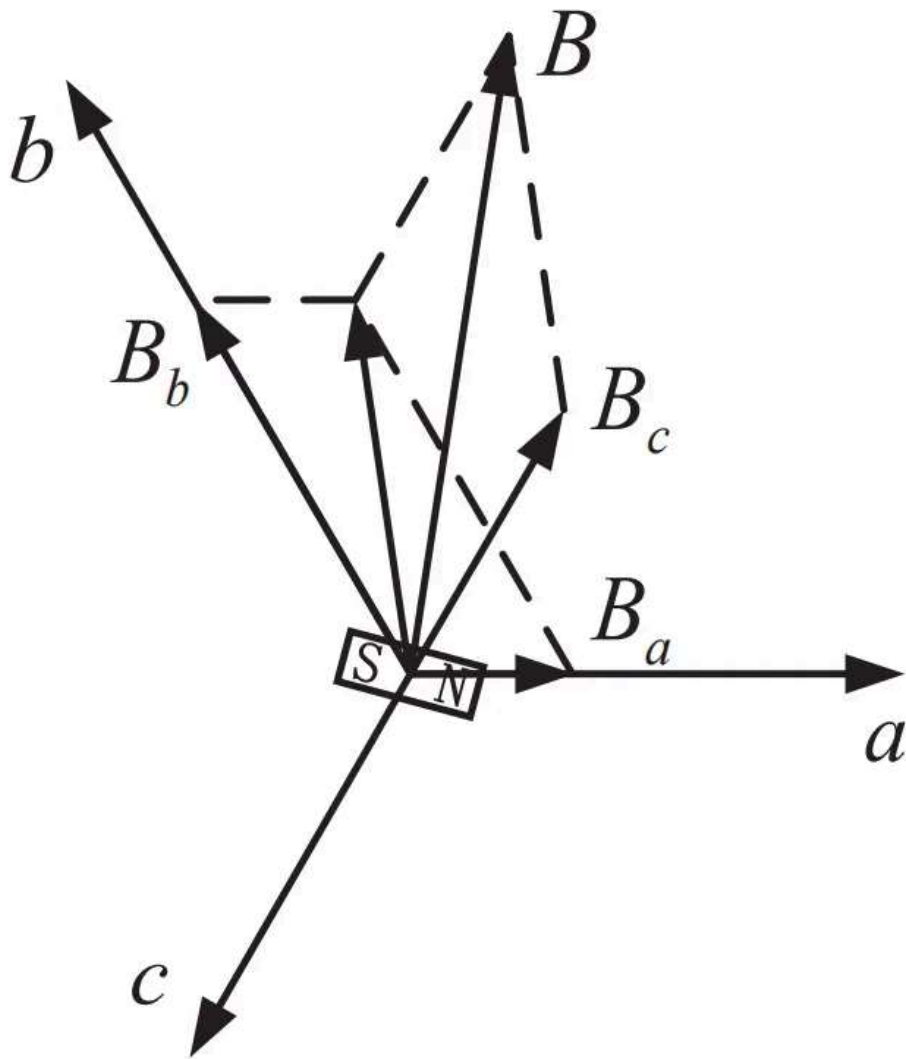
关节电机中的永磁同步电机的定子是一个三相对称正弦波绕组，转子上粘贴有永磁体。我们知道，在一个固定的磁场中，永磁体会旋转并固定在一个平行于磁场的方向。一个典型的例子就是在地球磁场下的指南针，指南针会转动到指向地磁南北极的方向。同样的，如果这个固定的磁场开始转动，那么永磁体也会跟着转动，尽量跟随平行磁场方向，这样我们就可以通过旋转磁场来令永磁体旋转到指定角度。同时，永磁体在磁场中产生的力矩大小和永磁体与磁场方向的夹角有关，所以我們也可以通过控制磁场和永磁体的夹角来控制永磁体产生的力矩。

回到电机的角度来说，就是我们可以通过控制定子上三个绕组电压的大小与通断，来控制转子的角度位置和输出力矩。而这种控制方法就是永磁同步电机的矢量控制（Field Oriented Control，以下简称 FOC）。

1.2 永磁同步电机的FOC控制简介

FOC 控制有许多独特的优势，它可以让我们对永磁同步电机进行“像素级”的控制，实现很多传统电机控制方法所无法达到的效果：

1. 可以在低转速下保持精确控制
2. 可以很好地实现电机换向旋转
3. 能够对电机进行力矩、速度、位置三个闭环控制
4. FOC 控制的永磁同步电机噪音较小



FOC 的磁场矢量

正如1.1节所述，FOC 控制的基础就是旋转磁场。在上图中，我们看到电机定子的三个线圈 a、b、c 可以产生三个方向的磁场 B_a 、 B_b 、 B_c ，它们能合成电机中的磁场 B 。FOC 控制器根据当前永磁体转子的角度、角速度、期望的输出力矩以及采样测量得到的 a、b、c 三个线圈的电流，计算得到三个线圈的电压通断状态与通断时间，进而通过 MOS 管来控制三个线圈的电压通断。这样就可以合成我们期望的磁场 B ，进而拖动电机转子按照我们期望的方式运动。

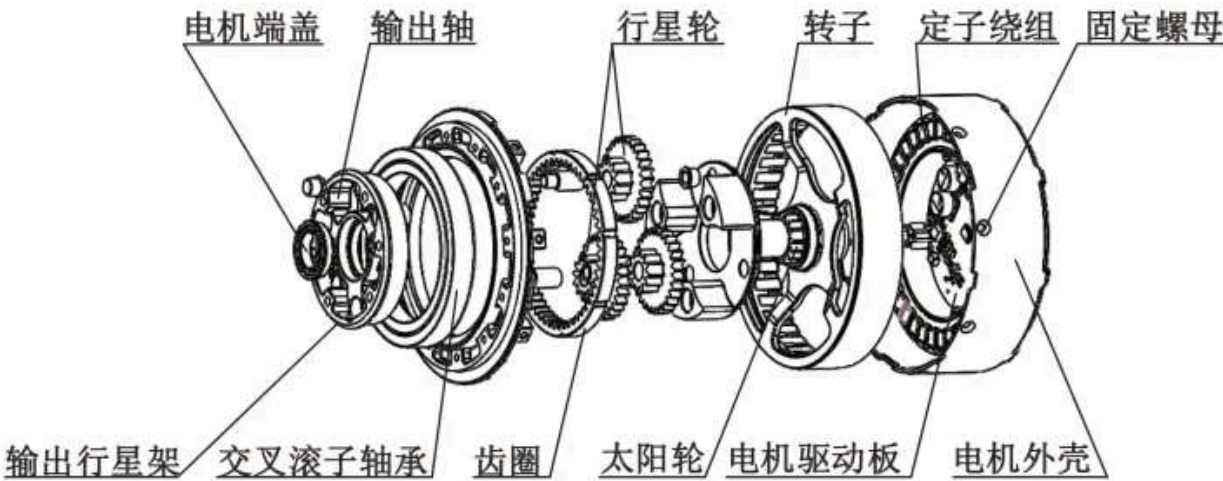
2 关节电机硬件概述

2.1 关节电机基本结构

关节电机的核心构件是电机驱动板、定子、转子和行星减速器。因为电机适合在高转速低力矩的工况下工作，而我们的机器人需要的是低转速高力矩，因此电机转子需要通过一个减速器减速之后，再输出力矩。

以 A1电机 为例，关节电机的大致结构如下图所示：

3572 字



A1电机主要构件

2.2 单圈绝对位置编码器

编码器 (encoder) 是用来测量旋转角度的传感器。编码器分为增量编码器、多圈绝对位置编码器与单圈绝对位置编码器等多种。我们在此只详细讨论关节电机实际应用的单圈绝对位置编码器。

关节电机的单圈绝对位置编码器安装在电机转子上。对于单圈绝对位置编码器 (以下简称编码器)，可以将它当做一个“时钟表盘”。我们每次看表的时候，都可以读到当前的日期和时间，例如 4 月 1 日 23 点。如果时间经过了 2 个小时，那么时钟转过了 4 月 1 日 24 点，日期会增加 1 天变成 4 月 2 日，时间重新从 0 点开始计时，变成了 4 月 2 日 1 点。为了方便计算经过的时间，我们也可以说现在是 4 月 1 日 25 点。看上去 25 点超过了一天 24 个小时的范围，实际上是因为日期增加了 1 天。

单圈绝对位置编码器也是同样的道理。每次开机上电后，我们的转子可能处于任意位置，编码器会告诉我们转子所处的角度位置 (0 至 2π 之间的某个值)。如果转子旋转转过了 2π 这个角度位置，编码器也能够记录转过的圈数增加了 1，从而输出一个超出 0 至 2π 范围的角度位置。看上去编码器也能够输出超过一圈的角度位置，那么为什么叫它“单圈”绝对位置编码器呢？原因在于这种编码器在断电之后不能够储存之前旋转的圈数，我们以下面这个例子来说明。

假设当前编码器输出的角度值为 2.3π ，这意味着编码器在开机之后经过了 2π ，旋转圈数从 0 变为 1，同时编码器当前位于 0.3π 这个位置。此刻我们将编码器关机，不做任何旋转，再将编码器开机，那么此时编码器输出的角度值就会变为 0.3π 。因为关机之后旋转圈数重置为 0，所以编码器只会输出当前位置 0.3π 。

3 关节电机的混合控制

关节电机作为一个高度集成的动力单元，其内部已经封装了电机底层的控制算法。作为用户，只需要给关节电机发送相关的命令，电机就能完成从接收命令到关节力矩输出的全部工作。

对于电机的底层控制算法，唯一需要的控制目标就是输出力矩。可是对于机器人，我们通常需要给关节设定位置、速度和力矩。这时就需要对关节电机进行混合控制。

宇树科技的关节电机包含如下 5 个控制指令：

1. 前馈力矩： τ_{ff}
2. 期望角度位置： p_{des}
3. 期望角速度： ω_{des}
4. 位置刚度： k_p
5. 速度刚度（阻尼）： k_d

在关节电机的混合控制中，使用 PD 控制器将电机在输出位置的偏差反馈到力矩输出上：

$$\tau = \tau_{ff} + k_p \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

式中， τ 为关节电机的电机转子输出力矩， p 为电机转子的当前角度位置， ω 为电机转子的角速度。在实际使用关节电机时，需要注意将电机输出端的控制目标量与发送给电机转子的指令进行换算。

4 电机控制模式

根据上节的内容，我们知道，通过5个控制参数可以控制电机。

这5个参数的不同搭配组合就能够形成不同的控制模式。

需要特别注意的是，给电机发送的命令都是针对减速器之前的电机转子，而不是经过减速之后的关节电机输出轴。所以在进行实际控制的过程中，一定要注意考虑电机的减速比。以A1电机为例，减速比为 9.1。

还有，实际控制时，电机的摩擦等阻力也需要考虑在内。

4.1 位置模式

在位置模式下，电机的输出轴将会稳定在一个固定的位置。

5个控制参数中，将 τ_{ff} 与 ω_{des} 设置为 0，即可成为针对 p_{des} 的 PD 控制。其中 k_p 为比例系数， k_d 为微分系数。将速度的期望值设为零，是把速度当作阻尼项。通过上述控制参数，电机转子的位置将稳定在指定的弧度。

$$\tau = \tau_{ff} + k_p \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

$$\tau_{ff} = 0, \quad \omega_{des} = 0$$

↓

$$\tau = 0 + k_p \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (0 - \omega)$$

↓

$$\tau = k_p \cdot (p_{des} - p) - k_d \cdot \omega$$

根据上述公式，如果目标位置和当前位置之间差距很大，那么电机产生的力矩 τ 也会很大，从而产生一个很大的电流。如果给电机供电的电源的输出电流上限较小，可能会出现电源保护，即电机停止旋转。此时就需要考虑让 p_{des} 缓慢变化，避免产生瞬间的极大力矩。

而且，异常的大力矩，容易引起电机的烧毁。

4.2 速度模式

在速度模式下，电机的输出轴将会稳定在一个固定的速度。

速度模式下 τ_{ff} 和 k_p 必须为 0，这样就构成了对 ω_{des} 的 P 控制。其中 k_d 为速度的比例系数。

$$\tau = \tau_{ff} + k_p \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

$$\tau_{ff} = 0, \quad k_p = 0$$

↓

$$\tau = 0 + 0 \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

↓

$$\tau = k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

实际控制时，速度模式下， k_d 如果过小，会导致速度不够或者转不起来。

理想情况下，力矩对应速度差值的比例控制，但是本身电机要克服摩擦等阻力，所以比例小了上不去。

4.3 阻尼模式

阻尼模式是一种特殊的速度模式。

当我们令 $\omega_{des} = 0$ 时，电机保持转轴速度为 0。并且在被外力旋转时，产生一个阻抗力矩。这个力矩的方向与旋转方向相反，大小与旋转速度成正比。当停止外力旋转后，电机静置在当前位置。因为这种状态和线性阻尼器类似，所以被称为阻尼模式。

$$\tau = \tau_{ff} + k_p \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

$$\tau_{ff} = 0, \quad k_p = 0, \quad \omega_{des} = 0$$

↓

$$\tau = k_d \cdot (0 - \omega)$$

↓

$$\tau = -k_d \cdot \omega$$

4.4 力矩模式

在力矩模式下，电机会持续输出一个恒定力矩。

$$\tau = \tau_{ff} + k_p \cdot (p_{des} - p) + k_d \cdot (\omega_{des} - \omega)$$

$$k_p = 0, \quad k_d = 0$$

↓

$$\tau = \tau_{ff}$$

测试时，我们可以给定 τ_{ff} 一个比较小的值，可以观察到电机在恒定力矩下逐渐加速的过程，比如

$$\tau_{ff} = 0.05。$$

因为各个电机之间存在细微差异，如果电机无法顺利旋转，可以适量增大 τ_{ff} 的数值。（减速器等机构摩擦力存在导致的）

但是当电机空转时，如果给一个较大的目标力矩，电机会持续加速，直到最大速度，这时也仍然达不到目标力矩。

4.5 零力矩模式

零力矩模式是一种特殊的力矩模式。

当我们令 $\tau_{ff} = 0.0$ 时，电机会保持转轴的力矩为 0。此时电机并不是停止运转，而是主动产生力矩来抵抗自身的摩擦力矩。因此在零力矩模式下，尝试转动输出轴，会感觉输出轴的阻力明显小于未开机时的阻力。

4.6 混合模式

在四足机器人的实际控制时，机器人运动控制器往往会给关节同时发送前馈力矩 τ_{ff} 、目标角度 p_{des} 和目标角速度 ω_{des} 。这时的控制模式就是混合控制，这也是我们在实际应用中最多的一种控制模式。

有些客户会产生误解，以为混合控制是同时控制目标位置和目标速度，即以一个特定速度到达特定位置，这个单靠5个参数设置是达不到的。如果我们要实现以上效果，需要先对轨迹进行规划，然后再离散轨迹进行控制，轨迹的斜率就是目标速度。

建议对控制模式有疑问的用户，自己学习提升 关节动力学 及 控制的力学原理 等相关知识。

1cb849692ae9.png&title=%E7%94%B5%E6%9C%BA%E5%8F%8A%E5%85%B6%E6%8E%A7%E5%