

四轴飞行器的结构形式和工作原理

1.结构形式

直升机在巧妙使用总距控制和周期变距控制之前，四轴飞行器结构被认为是一种最简单和最直观的稳定控制形式。但由于这种形式必须同时协调控制四个旋翼的状态参数，这对驾驶员认为操纵来说是一件非常困难的事，所以该方案始终没有真正在大型直升机设计中被采用。这里四轴飞行器重新考虑采用这种结构形式，主要是因为总距控制和周期变距控制虽然设计精巧，控制灵活，但其复杂的机械结构却使它无法再小型四轴飞行器设计中应用。另外，四轴飞行器的旋翼效率相对很低，从单个旋翼上增加拉力的空间是非常有限的，所以采用多旋翼结构形式无疑是一种提高四轴飞行器负载能力的最有效手段之一。至于四旋翼结构存在控制量较多的问题，则有望通过设计自动飞行控制系统来解决。四轴飞行器采用四个旋翼作为飞行的直接动力源，旋翼对称分布在机体的前后、左右四个方向，四个旋翼处于同一高度平面，且四个旋翼的结构和半径都相同，旋翼 1 和旋翼 3 逆时针旋转，旋翼 2 和旋翼 4 顺时针旋转，四个电机对称的安装在飞行器的支架端，支架中间空间安放飞行控制计算机和外部设备。四轴飞行器的结构形式如图 1.1 所示。

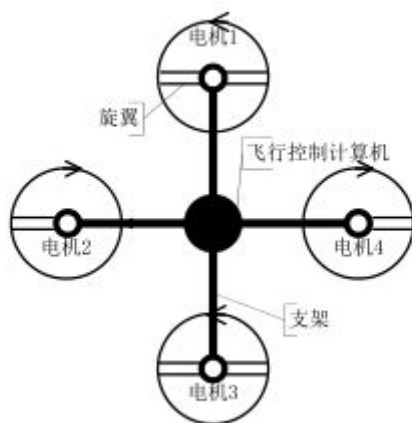


图 1.1 四轴飞行器的结构形式

2.工作原理

典型的传统直升机配备有一个主转子和一个尾桨。他们是通过控制舵机来改变螺旋桨的桨距角，从而控制直升机的姿态和位置。四轴飞行器与此不同，是通过调节四个电机转速来改变旋翼转速，实现升力的变化，从而控制飞行器的姿态和位置。由于飞行器是通过改变旋翼转速实现升力变化，这样会导致其动力部稳定，所以需要一种能够长期保稳定的控制方法。四轴飞行器是一种六自由度的垂直升降机，因此非常适合静态和准静态条件下飞行。但是四轴飞行器只有四个输入力，同时却有六个状态输出，所以它又是一种欠驱动系统。

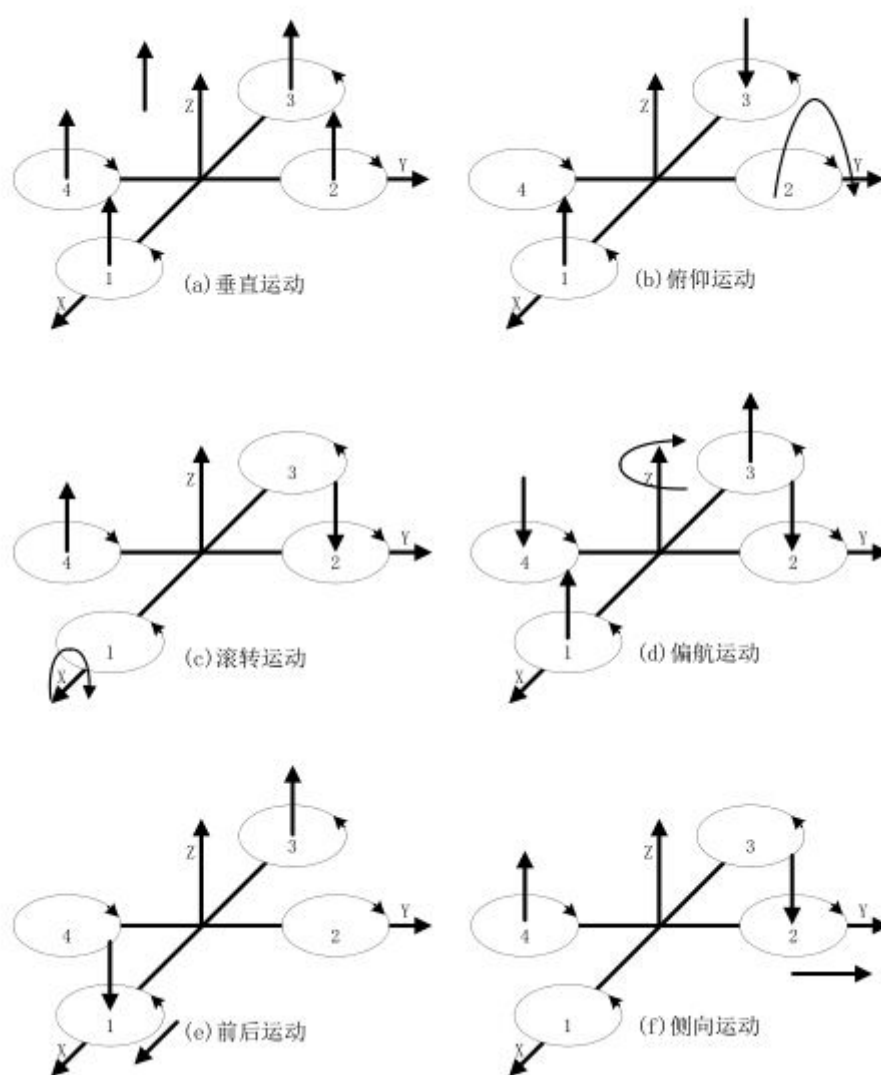


图 1.2 四轴飞行器沿各自由度的运动

四轴飞行器结构形式如图所示，电机 1 和电机 3 逆时针旋转的同时，电机 2 和电机 4 顺时针旋转，因此当飞行器平衡飞行时，陀螺效应和空气动力扭矩效应均被抵消。与传统的直升机相比，四轴飞行器有下列优势：各个旋翼对机身所施加的反扭矩与旋翼的旋转方向相反，因此当电机 1 和电机 3 逆时针旋转的同时，电机 2 和电机 4 顺时针旋转，可以平衡旋翼对机身的反扭矩。

四轴飞行器在空间共有 6 个自由度（分别沿 3 个坐标轴作平移和旋转动作），这 6 个自由度的控制都可以通过调节不同电机的转速来实现。基本运动状态分别是：（1）垂直运动；（2）俯仰运动；（3）滚转运动；（4）偏航运动；（5）前后运动；（6）侧向运动。在图 3.2 中，电机 1 和电机 3 作逆时针旋转，电机 2 和电机 4 作顺时针旋转，规定沿 x 轴正方向运动称为向前运动，箭头在旋翼的运动平面上方表示此电机转速提高，在下方表示此电机转速下降。

（1）垂直运动：垂直运动相对来说比较容易。在图中，因有两对电机转向相反，可以平衡其对机身的反扭矩，当同时增加四个电机的输出功率，旋翼转速增加使得总的拉力增大，当总拉力足以克服整机的重量时，四轴飞行器便离地垂直上升；反之，同时减小四个电机的

输出功率，四轴飞行器则垂直下降，直至平衡落地，实现了沿 z 轴的垂直运动。当外界扰动量为零时，在旋翼产生的升力等于飞行器的自重时，飞行器便保持悬停状态。保证四个旋翼转速同步增加或减小是垂直运动的关键。

(2) 俯仰运动：在图 (b) 中，电机 1 的转速上升，电机 3 的转速下降，电机 2、电机 4 的转速保持不变。为了不因为旋翼转速的改变引起四轴飞行器整体扭矩及总拉力改变，旋翼 1 与旋翼 3 转速该变量的大小应相等。由于旋翼 1 的升力上升，旋翼 3 的升力下降，产生的不平衡力矩使机身绕 y 轴旋转（方向如图所示），同理，当电机 1 的转速下降，电机 3 的转速上升，机身便绕 y 轴向另一个方向旋转，实现飞行器的俯仰运动。

(3) 滚转运动：与图 b 的原理相同，在图 c 中，改变电机 2 和电机 4 的转速，保持电机 1 和电机 3 的转速不变，则可使机身绕 x 轴旋转（正向和反向），实现飞行器的滚转运动。

(4) 偏航运动：四轴飞行器偏航运动可以借助旋翼产生的反扭矩来实现。旋翼转动过程中由于空气阻力作用会形成与转动方向相反的反扭矩，为了克服反扭矩影响，可使四个旋翼中的两个正转，两个反转，且对角线上的两个旋翼转动方向相同。反扭矩的大小与旋翼转速有关，当四个电机转速相同时，四个旋翼产生的反扭矩相互平衡，四轴飞行器不发生转动；当四个电机转速不完全相同时，不平衡的反扭矩会引起四轴飞行器转动。在图 d 中，当电机 1 和电机 3 的转速上升，电机 2 和电机 4 的转速下降时，旋翼 1 和旋翼 3 对机身的反扭矩大于旋翼 2 和旋翼 4 对机身的反扭矩，机身便在富余反扭矩的作用下绕 z 轴转动，实现飞行器的偏航运动，转向与电机 1、电机 3 的转向相反。

(5) 前后运动：要想实现飞行器在水平面内前后、左右的运动，必须在水平面内对飞行器施加一定的力。在图 e 中，增加电机 3 转速，使拉力增大，相应减小电机 1 转速，使拉力减小，同时保持其它两个电机转速不变，反扭矩仍然要保持平衡。按图 b 的理论，飞行器首先发生一定程度的倾斜，从而使旋翼拉力产生水平分量，因此可以实现飞行器的前飞运动。向后飞行与向前飞行正好相反。当然在图 b 图 c 中，飞行器在产生俯仰、翻滚运动的同时也会产生沿 x 、 y 轴的水平运动。

(6) 倾向运动：在图 f 中，由于结构对称，所以倾向飞行的工作原理与前后运动完全一样。