

第二章 微飞行器介绍

2.1 旋翼微飞行器的结构

旋翼微型飞行器被设计成为四旋翼形式。因为在四旋翼结构中，所有旋翼处于同一高度平面，因此可以通过分别调整四个旋翼拉力的大小，使飞行器具有稳定的飞行姿态。这种结构形式所具有的无须额外增加机械传动机构，只需通过调节四个旋翼的拉力大小就可以保持飞行器稳定飞行的姿态的特点，使它非常适合于微型飞行器的设计，且也已经由相对较大的模型飞机得到了证明。

四旋翼结构主要有以下一些特点：

1. 四个旋翼能产生较大的拉力。由于微型飞行器尺寸的微型化使得旋翼效率大幅度下降，仅从提高旋翼转速和增加单个旋翼面积的方法上来考虑增加拉力，可增加空间将非常有限。但是通过增加旋翼数量的方式，无疑可使微型飞行器的拉力成倍增加，所以四旋翼结构形式是一种提高微型飞行器负载能力的最有效的手段之一。另外，与四个旋翼相比，六旋翼或更多旋翼的微型飞行器的负载能力会更大，但旋翼越多也相应会带来控制上的复杂性，所以这里的设计仅考虑四旋翼的结构形式。
2. 四旋翼的微型飞行器有较大的时间常数，比较利于稳定控制。微型飞行器的体积和重量都比较小，这导致飞行器本身固有时间常数也很小，从控制角度考虑非常不利。但是与传统直升机形式相比，四旋翼的微型飞行器其整体布局可使飞行器具有较大的转动惯量，因而飞行的时间常数也较大，这对微型飞行器而言是非常有益的。所以这里可以定性判断，四旋翼结构形式与其它形式相比有利于微型飞行器的稳定性控制。
3. 四旋翼结构对称，各运动通道之间耦合小。具有对称结构形式的四旋翼微型飞行器，其上下运动与其它运动之间无耦合。在理想无水平转动的情况下，前后运动与横滚运动之间无耦合，这给简化系统分析和设计控制系统带来了很大的方便。
4. 四弦翼结构可以使微飞行器易于实现姿态控制。微飞行器要实现在空中自主飞行，必须要可以进行四种基本的运动状态。即（1）上下飞行；（2）前后飞行；（3）侧向飞行；（4）水平转动。以上四种飞行状态都可以通过控制四个弦翼各自的速度不同来实现。

四旋翼的微型飞行器的结构形式如图2.1所示，该微型飞行器主要由四部分组成：驱动部件、机翼、中心部件和机用设备。驱动部件为四个直径仅10mm的电磁

型微电机。机翼（微型旋翼）由两片桨叶组成，它通过中心部件与微马达相连。微型直升机的四个旋翼两两成对角线分布，中间留有一定空间用来安装必要的机用设备。

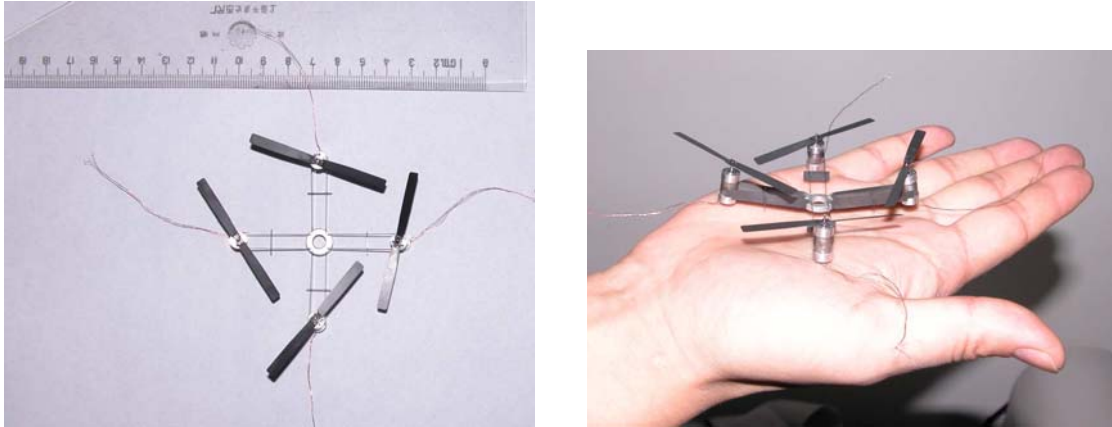


图 2.1 四旋翼微飞行器
Fig 2.1 Four-rotor micro rotorcraft

从结构上来看，微马达外形为圆形，用两片陶瓷薄片从侧面将其固定，陶瓷薄片又通过插槽与一圆形机身相连。为使微型飞行器既重量轻，又有足够的结构强度，所采用的陶瓷薄片及插槽为高强度的碳化钛和三氧化二铝的复合材料。微型飞行器的尺寸小，重量轻。相邻两个微电机距离 6.2cm ，如果加上机翼的长度，其一边最长的长度为 11.5cm 。整个微型飞行器的总重量仅为 8g 。

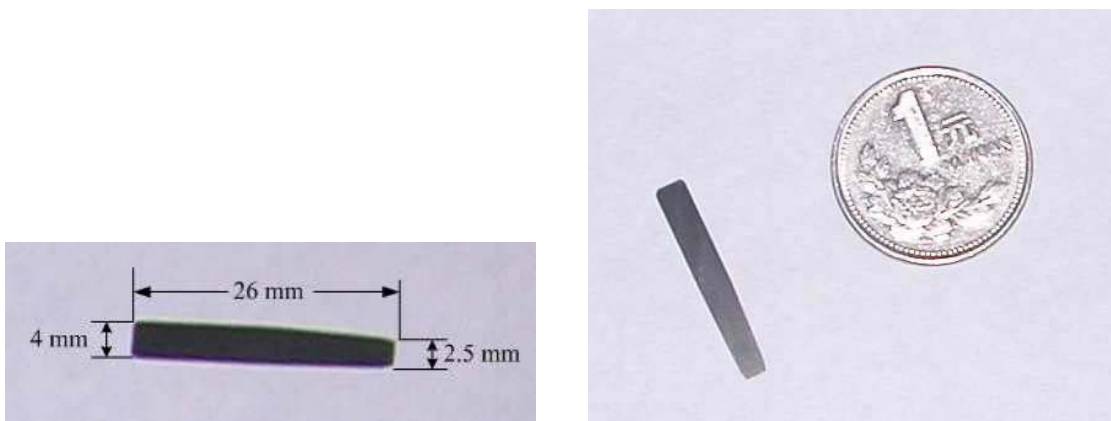


图 2.2 微型旋翼桨叶
Fig 2.2 Micro rotorcraft blade

微型旋翼是微型飞行器产生拉力的最基本部件。微型弦翼所采用的材料也是如上所述的复合材料，保证了弦翼的重量轻，强度高的特点。旋翼桨叶为无扭转的平

板状，经过加工可与对称薄翼型近似，旋翼的平面形状和尺寸是先根据理论分析和计算，然后通过大量实验验证确定的。虽然从产生升力效率角度考虑可能并不是最优方案，但是综合各种因素，认为这种旋翼比较适合在目前的微型飞行器上使用。微型旋翼单个桨叶的外形和尺寸见图2.2所示。微型旋翼的单个桨叶长度26mm，宽的一端宽度4mm，另一端宽度2.5mm，厚度0.1mm，装配时桨叶侧向扭转12°。一个旋翼包括两片桨叶和中间的连接部分，总长55mm。

旋翼微飞行器主要是通过改变旋翼拉力的大小以及旋翼桨盘的方向来控制飞行器运动方向的。大型旋翼飞机的拉力大小由总距控制；旋翼桨盘方向由周期变距控制。以上两种控制方法由于机械结构复杂，所以无法在微型旋翼飞行器中适用。因此本文研究的微型飞行器的驱动器采用直流电机，因为直流电机的转速可以快速的调整，从而达到通过改变旋翼转速来改变和控制拉力大小。旋翼桨盘方向的改变，则可以采用新的旋翼飞行器设计结构，通过改变各个旋翼拉力的大小来调整旋翼桨盘方向，从而控制飞行器的飞行方向。

2.2 主要器件—微电机

2.2.1 结构设计

多旋翼微飞行器的主要驱动器为自行研制电磁型微电机，其整体尺寸较小，最大方向上的尺寸为10mm。重量较轻，单个微电机仅重1g。该电磁型微电机结构设计独特新颖，和以前的微电机从结构上有很大的不同。

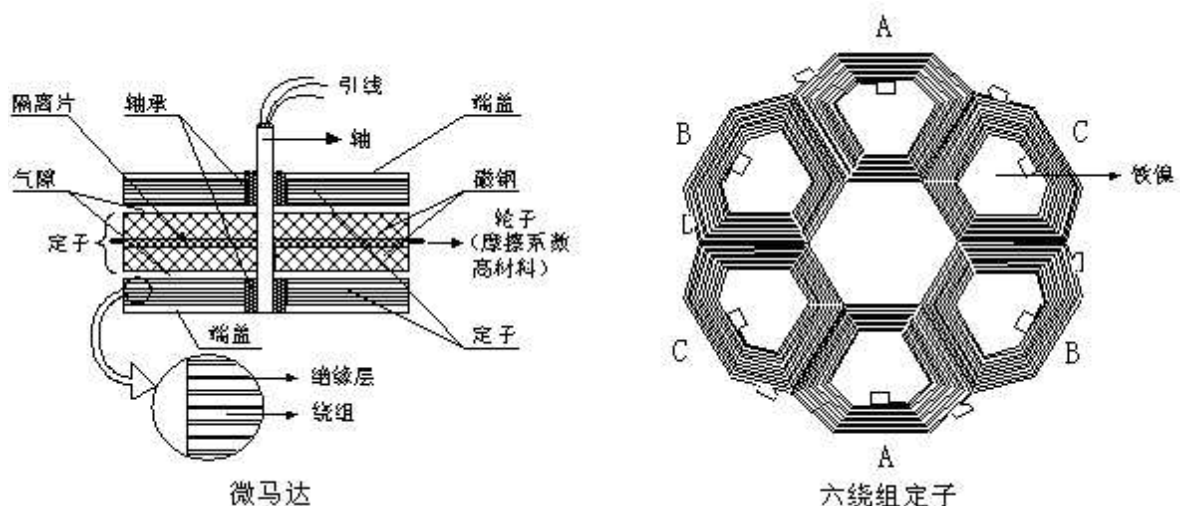


图 2.3 微电机的结构示意图

Fig 2.3 The schematic of electromagnetic micro-motor

以前常用的微电机的平面绕组结构如图2.3所示，结构是具有双定子单转子多层结构（定子是微加工工艺来完成）。它的基本成分为三大部分：

1. 平面型定子部分（六绕组）；
2. 八极磁钢制作的转子部分；
3. 主轴部分。

这种结构的特点是其定子和转子的面积相当，在相同的体积下，可以产生更大的转矩。此外，便于其定子绕组采用平面型绕组，以利于微细加工工艺的应用。

从图2.3中可知，单个线圈的形状在平面内为三角形，而沿圆周方向的一条边不作切割磁力线运动，因此其不产生力矩。可以看到，将近1/3的线圈属于无效线圈，但这又是线圈形成回路所必需的。这在一般应用场合是可以接受的，但对于微飞行器来讲是非常不合适的。

在微飞行器驱动器设计中，绕组效率是设计中必须解决的问题。为此在本文的设计中，设计出了特殊的线圈形状，去除无效段，大大的提高效率。同时，两定子、三转子结构大大提高了驱动器的输出力矩。同将两个电机串联相比，该结构设计提高了功率输出，可控性和一致性也大大提高，如图2.4所示。



图 2.4 微飞行器专用马达结构设计图
Fig 2.4 The constructions of micro-motor

2.2.2 加工技术

一般来说，当微型电动机的几何尺寸减小到几个 mm 以下时，由于它的某些特殊结构和微小尺寸效应，使得许多传统电机制造工业中的加工工艺很难适应它的加工要求。只能借助于现代微电子工业中的微细加工工艺技术。因此微型电动机的发展与其相关的微制造加工技术是密不可分的。其中微电子集成工艺是其基础。它主要分为三大类：分离加工，结合加工和变形加工。而在其中众多的微细加工工艺中，目前常用的微型电动机加工工艺的主要有体微加工技术，表面微加工技术，高深宽比微加工技术，组封装与键合技术以及微精密加工和装配技术等。

2.2.3 力矩分析^[14]

这里分析的轴向磁场电机采用的永磁转子的极数为8，相应的绕组数为6。8极的永磁转子每个磁极占 45° ，相邻磁极的极性相反，相应定子上的绕组每个占 60° ，在 360° 范围内周期分布，绕组中各线圈的宽度和间隔相同。

由微电机结构分析可得：当微电机工作时，转子永磁体发出磁力线汇聚到软磁薄片上，通过气隙进入定子基体，再经过气隙回到永磁体。形成完整的磁路，根据磁路的高斯定律和基尔霍夫第二定律，可推出：

$$B_m \times S_m = \sigma \times B_g \times S_g \quad (2.1)$$

$$H_m \times L_m = f \times H_g \times L_g \quad (2.2)$$

其中

B_m, S_m — 永磁体磁感应强度和截面积，

B_g, S_g — 气隙中磁感应强度和有效截面积，

H_m, L_m — 永磁体磁场强度和磁路长度，

H_g, L_g — 气隙的磁场强度和磁路长度，

f, σ — 分别为磁阻系数和漏磁系数。由(2.1)与(2.2)式可求得磁路中工作气隙的磁感应强度 B_g

$$B_m S_m H_m L_m = \sigma B_g S_g H_g L_g f \quad (2.3)$$

因为 $B_g = \mu_0 H_g$

所以

$$B_g = \sqrt{\mu_0 \left[B_m H_m \frac{S_m L_m}{\sigma f S_g L_g} \right]} = \sqrt{\mu_0 \left[B_m H_m \frac{V_m}{\sigma f V_g} \right]} \quad (2.4)$$

式中

$B_m H_m$ — 永磁体的磁能积

V_m — 永磁体体积

V_g — 工作气隙体积

由式(2.4)可看出， B_g 与永磁体的磁路、尺寸和工作气隙的大小密切相关。经计算表明：永磁体转子在微电机气隙中的磁通密度随气隙宽度的增加而衰减，说明微电机各层绕组的磁通密度是不同的，设计时必须考虑其产生的磁场与气隙和定子层数之间的关系。在磁感应强度为 \vec{B} 的磁场中，如果电流方向沿导线方向，作用在电流恒定 i ，长度为 $\Delta \vec{l}$ 的导线上的电磁力为：

$$\Delta \vec{F} = i \Delta \vec{l} \times \vec{B} \quad (2.5)$$

如果作用点相对于转动轴的位置矢量为 \vec{r} ，相应的力矩为：

$$\Delta T = i\vec{r} \times (\Delta\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.6)$$

在自由空间O-XYZ内，对于微电机来说，因为定子电流的方向在定子平面(XY平面)内，故只需计算Z轴向力矩，因此对于特定单元上的力矩为：

$$\Delta T = i|\vec{r}| \times |\Delta\vec{l}| \times B_z \cos \theta \quad (2.7)$$

其中 θ 为导线与磁通方向的夹角。

将微型电机的线圈离散成许多小的单元，它们通过相同的电流，合力矩为各个单元产生的力矩之和，即

$$\vec{T} = \sum_i \Delta T = \sum_i i|\vec{r}_i| \times |\Delta\vec{l}_i| \times B_{Zi} \cos \theta_i \quad (2.8)$$

在计算时必须考虑各线圈与磁极的相对位置，各线圈的通电情况（是否通电，电流的方向与大小），以及线圈所在的层面的位置等。定子各层上的磁场分布不相同需对各层面上的力矩单独分析。

电磁微电机的输出力矩 T 与磁通密度 B 、通过绕组的电流 I 、切割磁力线的绕组有效长度 L 和该绕组的旋转半径 r 成正比。微电机的微小体积确定了参数 I 、 L 、 r 可变化范围的局限性，因此，加大气隙磁通密度在超微电机中尤为重要。而加大气隙磁通密度的关键是选择高性能的磁性材料和磁路优化设计。微细加工的工艺要求使微电机的定子绕组不能置于导磁材料的槽中，因此必须将定子所占据的空间和通常所指的定转子之间的气隙两部分共同作为超微电机的气隙。为提高输出力矩，电机定子绕组设计成多层以增加绕组的匝数。这样的多层绕组所占据的空间一般与定转子之间气隙相当，是超微电机气隙的重要组成部分。深入研究表明，多极永磁转子在电机中的磁通密度，随着气隙厚度的增加要不断的衰减。在微电机的多层绕组中，各层绕组的磁通密度是不同的，设计中要综合考虑绕组的层数、每层厚度与磁通密度之间的关系。由此，要想使电机的输出力矩增大，可以在增大绕组电流，增长绕组长度等方面来考虑。

2.3 小结

本章首先介绍了本文的控制对象—微飞行器的结构，然后围绕着微飞行器的主要器件—微电机进行了详细的介绍，讨论了微电机的结构设计、加工技术、力矩分析等方面。

第三章 微电机的控制方法

微电机从结构上可以分为有刷电机和无刷电机。从通过的电流上可以分为直流电机和交流电机。这里我们要控制的对象是微型直流无刷电动机，所以我们主要研究的是微型直流无刷电动机的控制方法^[15]。

同一般直流无刷电动机相比，微型直流无刷电动机的基本原理并没有改变。凡是适用于一般直流无刷电动机的控制方法，基本上都适用于微型直流无刷电动机。但由于微小尺寸的影响，使得微型直流无刷电动机具有许多特殊之处，因此它们的控制方法不能生搬硬套。例如对于直径小于 $2mm$ 的微型直流无刷电动机，一般的转子磁钢位置传感器的体积就大于微型直流无刷电动机本身，因此无法安装。

3.1 微电机的驱动

电动机的本体主要分为定子和转子两部分，多数直流无刷电动机的定子绕组采用三相绕组，电路的基本类型其包括三相半控电路，三相Y联结全控电路和三相 Δ 联结全控电路，全控时转矩的波动比半控时小得多，我们在这里分析采用Y联结全控电路的微电机。

如图3.1所示，电机驱动电路主要是由六个开关型的功率管和微控制器组成。

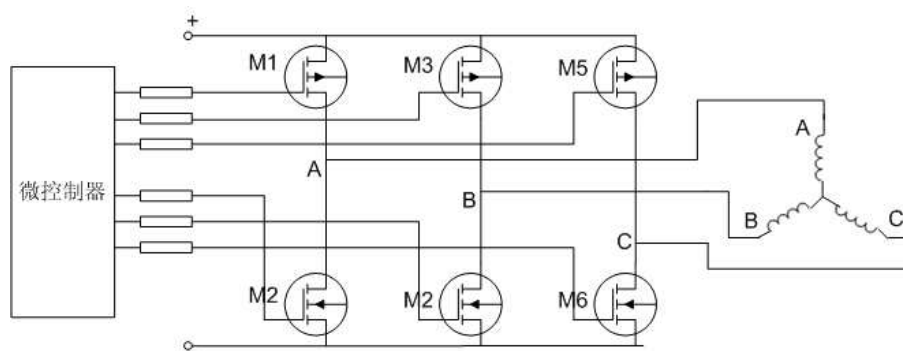


图 3.1 电机驱动电路原理图

Fig 3.1 Schematic of motor driving circuit

微电机的驱动就是以功率管的导通和关闭来控制定子绕组。图3.1中A、B、C分别接定子绕组的A、B、C三相，当控制功率管M1和M6通的时候，电流从A相流入，从C相流出，这种状态是A-C状态。如控制功率管M2，M3，M6通的时候，相当于电流从B相流入，从A相和C相流出，此时A相和C相是并联连接，然后和B相串联连接。A相和C相的电流是B相的一半，这种状态是-AB-C状态。在两两通电的通电方式下，微马达转子的换相规律和合成转矩矢量图如图3.2所示。

功率管的导通和关闭由微控制器提供的高低电平信号来控制。而微控制器提供这些控制信号的依据就成为控制微型直流无刷电动机的关键。根据这些依据的不同，微型直流无刷电动机的控制方法大体可以分为两种：

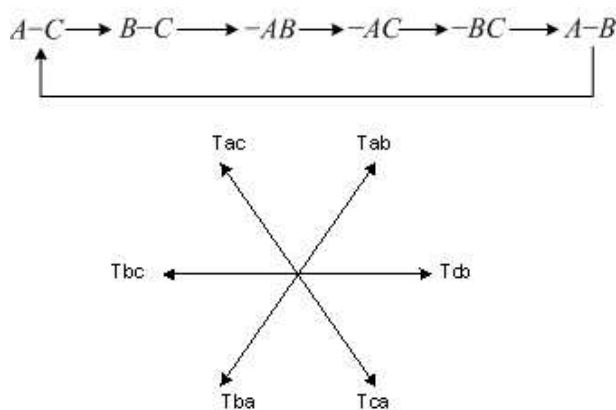


图 3.2 两两通电时合成转矩矢量图

Fig 3.2 Vector of torque in 2-2 phase style

- 开环控制方法
- 闭环控制方法

下面我们将对这两种方法进行详细的讨论。

3.2 开环控制方法

所谓的开环控制方法指的是微控制器提供功率管导通关闭控制信号的依据是一组事先制定好的速度变化曲线。这时直流无刷电动机的运行方式实际上跟步进电机的运行方式是一样的。

3.2.1 主要特点

开环控制方法中没有对电机当前运行状态的反馈，因此当电机突然受到外界干扰或者电机转速突然发生剧烈变化的时候会发生失步，进而停转。所以在电机升速或降速的过程中要进行控制使电机的加速度不超过其临界失步点。然而，电机的临界失步加速度是随着运行频率和负载而变化的。所以，利用开环控制方法控制直流无刷电动机的主要研究内容就是要根据具体的应用环境（控制电机的类型、运行状态、负载的特性等）确定最佳的升降速曲线。

一般来说，能够体现电机动态特性的性能指标主要有以下几个：

- 启动频率
- 连续运行频率
- 启动力矩— 频率特性
- 连续运行力矩— 频率特性
- 惯量— 频率特性