

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.04.019

## 某型空中加油机加油吊舱涡轮驱动电机性能研究

周学平, 王丛岭, 张军兆

(电子科技大学 机械电子工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 针对混合式步进电机驱动某型空中加油机加油吊舱冲压空气涡轮的工作过程, 分析步进电机的结构和使用特点, 总结多元素影响下如何提高步进电机的工作性能。重点分析加减速度曲线、细分数等对电机性能的影响。结果表明, 该电机能有效解决新型电动机耐高温、体积小、重量轻、功耗小、转矩大、控制精度高、响应速度快的

问题。

**关键词:** 加油吊舱; 冲压空气涡轮; 混合式步进电机; 性能

**中图分类号:** TM32 **文献标志码:** A

## Research on Characteristic of Certain Type Refueling-Pod Ram Air Turbine Drive Motor

Zhou Xueping, Wang Congling, Zhang Junzhao

(College of Mechanics and Electronic Engineering, University of Electronic Science &amp; Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Based on hybrid stepping motor drive a type of air tankers refueling-pod ram air turbine work process, analysis of the stepper motor structure and use features, summarizes many elements under the influence of how to improve the stepping motor characteristic. Focus on the analysis to the influences of the characteristic of motor deceleration/slow curve and fine fraction. The results show that the motor can effectively resolve new motor high temperature resistant, small volume, light weight, low consumption, great torque, and high control precision and response speed problems.

**Keywords:** refueling-pod; ram air turbine; hybrid stepping motor; characteristic

### 0 引言

随着微电子和计算机技术的发展, 步进电机被广泛应用于各种自动化控制系统中。普通的直流电机、交流电机均可在常规下使用, 而步进电机必须由双环形脉冲信号、功率驱动电路、步进电机和负载组成控制系统才能使用。由于步进电机涉及到机械、电机、电子及计算机等许多专业知识, 因此, 用好步进电机决非易事。空中加油机加油吊舱冲压空气涡轮中的步进电机具有体积小、转矩大、控制精度高的要求。笔者对某型空中加油机加油吊舱涡轮驱动电机性能进行研究<sup>[1]</sup>。

### 1 概述

笔者所研究的电动机是某型号空中加油机加油吊舱控制系统上的一种特殊耐高温步进细分控制电动机, 是加油吊舱控制系统的关键执行元件, 见图 1。电动机接受吊舱控制系统的指令信号后驱动顶杆, 改变冲压空气涡轮的桨叶角, 从而调节加油吊舱加油泵输出的燃油压力和流量。

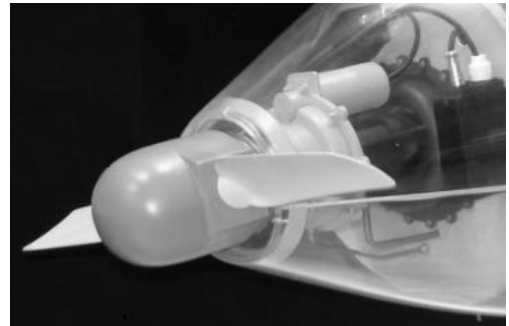


图 1 驱动电机在加油吊舱的位置

### 2 冲压空气涡轮驱动步进电机的理论分析

步进电动机的类型主要有反应式步进电动机 (Variable Reluctance, VR)、永磁式步进电动机 (Permanent Magnet, PM)、混合式步进电动机 (Hybrid, HB)。

混合式步进电动机也称为永磁感应子式步进电动机, 最早见于美国专利, 称为 SLO-SNY 电动机<sup>[1]</sup>。混合式步进电动机通常有二相、三相、四相和五相, 图 2 为典型二相混合式步进电动机的结构。定子铁心上有若干大极齿, 在每个大极齿上设计有若干小

收稿日期: 2010-12-18; 修回日期: 2011-01-25

作者简介: 周学平 (1982—), 男, 广西人, 壮族, 助理工程师, 从事电力电子与电力传动研究。

齿。在定子相邻大极齿的槽内放置绕组。转子由转子铁心、永磁材料和轴组成。该型电动机的转子铁心分为 2 部分, 2 部分的铁心相差半个齿距装配而成, 定、转子小齿的齿距通常相同。永磁材料为轴向充磁的圆环形, 位于转子的中部。它的磁路内含有永久磁钢, 也算是永磁式步进电动机。磁钢在电动机工作中的作用反映了永磁电动机的特点, 另一方面又像反应式一样, 定、转子表面开有齿槽使步距角做得很小。它是反应式和永磁式步进电动机的结合, 可以做成像反应式一样的小步距, 也具有永磁式控制功率小的优点, 满足了空中加油机加油吊舱冲压空气涡轮各种工作性能的要求<sup>[2]</sup>。



图 2 混合式步进电动机的典型结构

冲压空气涡轮中混合式步进电动机的工作特点主要有:

- 1) 步距角能在很大的范围内变化, 例如从几分到几十度, 在小步距情况下, 可以在超低速下获得高转矩稳定运行, 可以不经减速器直接驱动负载。
- 2) 在停止供电的状态下, 具有一定的自锁能力。
- 3) 角位移输出与输入脉冲信号数相对应, 步距误差不会长期积累, 几乎不受外界条件影响, 高精度时组成闭环控制系统。
- 4) 具有良好的控制性和响应性, 易于起动、停止、正反转及变速。转速与控制脉冲的频率同步, 可在相当宽范围内平滑调节。

同时, 该步进电动机存在以下缺点:

- 1) 步进电动机的负载要与电动机的参数及传动装置适当配合, 才能获得良好的步进性能。
- 2) 由于存在失步和共振, 需要加机械阻尼器, 因此, 步进电动机的加减速方法根据利用状态的不同而复杂化<sup>[3]</sup>。

### 3 冲压空气涡轮驱动步进电机的工作原理

空中加油机加油吊舱中加油泵输出的燃油压力

通过调节冲压空气涡轮的桨叶角来实现。

桨叶角的调节靠步进电机来实现。步进电机转动经过圆柱齿轮时, 滚珠螺旋副将旋转运动变换成丝杠的直线运动。步进电机有 3 种工作方式: 断电状态、正/反向运行状态和锁相状态。

步进电机处于断电状态时, 桨叶处于起始位置, 称为顺桨状态。设此时的桨叶角  $\alpha$  为零。

图 3 是叶片安装座的示意图, 桨叶绕其转轴  $o$  转动。桨叶角  $\alpha$  增大, 涡轮转速升高。作用在叶片安装座上使桨叶转动的力矩有 5 个:

- 1)  $M_{气}$  为桨叶所受气动力中心偏离转轴而产生的转动力矩, 它的方向是使桨叶角  $\alpha$  增大的方向;
- 2)  $M_{离}$  为桨叶的离心力中心偏离转轴而产生的转动力矩, 它的方向是使桨叶角  $\alpha$  增大的方向;
- 3)  $F_{驱}$  为顶杆作用在销钉 A 上来自步进电机的驱动力, 它产生的力矩使桨叶角  $\alpha$  增大;
- 4)  $M_{配}$  为配重块的离心力偏离转轴而产生的力矩, 它的方向是使桨叶角  $\alpha$  减小;

- 5)  $F_{弹}$  为作用在销钉 A 上的顺桨弹簧力, 它产生的力矩使桨叶角  $\alpha$  减小。

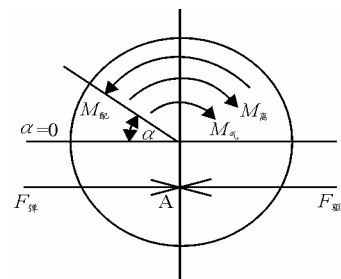


图 3 冲压空气涡轮叶片安装座的示意图

步进电机的驱动力  $F_{驱}$  存在时, 使桨叶角增大的力矩要大于使其减小的力矩, 而没有  $F_{驱}$  存在时, 必须使桨叶角增大的力矩小于使其增大的力矩。因此, 步进电机正向运行时的桨叶角  $\alpha$  增大, 而反向运行时, 顶杆后进,  $F_{驱} = 0$ , 桨叶角  $\alpha$  减小, 达到调节桨叶角的目的。

当步进电机处于锁相状态时, 顶杆被锁住, 因此桨叶角  $\alpha$  不会变化。一旦步进电机断电, 顺桨弹簧克服  $M_{气}$ ,  $M_{离}$  和滚珠螺旋副等的摩擦力带动步进电机反转, 快速返回顺桨位置 ( $\alpha=0$ )。

### 4 使用性能的影响因素及改进

影响空中加油机加油吊舱冲压空气涡轮驱动步进电机整体性能的因素是多方面, 不仅电机本身的性能参数, 其相关的相电阻、相电压也至关重要。

作为步进电机的驱动元件，驱动器可根据实际需要选择，如需高速高扭矩可选电压较高的型号，而细分数的应用能很好地解决实际中的很多问题。此外，控制程序的编写，加速度的设计及工步间的相互关系都会影响到实际的使用效果。

#### 4.1 冲压空气涡轮驱动步进电机驱动器的选择<sup>[4]</sup>

两相混合式步进电机驱动器的种类，从电机驱动技术上可分为单级驱动和双极驱动；从控制核心技术上可分为传统的模拟量控制和近几年快速发展的数字式 PID 控制；从驱动电压的不同来分有直流驱动器和交流驱动器。

同样的电机匹配不一样的驱动器有时会产生很大的差异，笔者研究的冲压空气涡轮驱动步进电机要求运行性能为：1 个脉冲的定位精度，无累积误差；大扭矩高速运转（5 000 rpm）；快速启动（30 ms 达到 3 000 rpm 的速度）；频繁启停（1 s 内做将近 30 次的启停动作）。为了实现近似苛刻的性能要求，采用高驱动电压的数字式 PID 控制的驱动器。此类驱动器相对模拟量控制的驱动器而言，具有以下优点：1) 较低的静态电流噪音；2) 灵活可调的启动电流；3) 发热量低；4) 电机性能自动匹配；5) 可通过上位机（电脑）进行在线调试等。

#### 4.2 冲压空气涡轮驱动步进电机工作曲线的作用

图 4 是冲压空气涡轮驱动步进电机的工作曲线图，从图 4 中可以看出，当电机运行在阴影部分的运行区时，电机将无法直接起动，而必须先起动区域内起动，然后通过加速的方式才能到达该工作区域；同理，当电机减速时，如果在高速运转下直接停止，则会导致步进电机失步，无法实现准确定位，必须通过减速到达起动区域后再进行制动<sup>[5]</sup>。

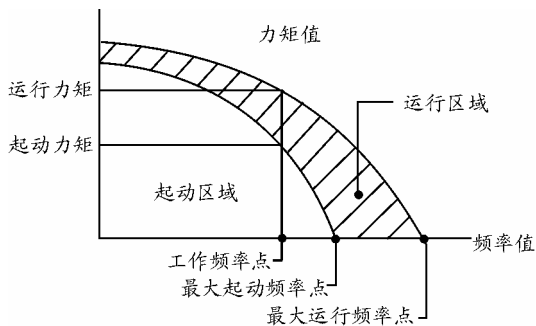


图 4 加减速工作曲线图

从图 4 可以看出，起动频率越大，其起动力矩

越小，当步进电机空载的情况下，可以用较高的速度启动（如 10 rps），而当电机带有负载时，需根据负载的大小决定起跳频率的范围，一般建议起跳速度在 2~4 rps 之间<sup>[6]</sup>。

简单地说，步进电机的细分驱动是将原来一步完成的动作分几步完成<sup>[7]</sup>。

若两相步进电机的步距角为 0.9°，当给其输入 400 个步进脉冲后，电机将转过 360°，这就是最基本的整步控制方式。随着控制技术的发展，步进驱动器的控制由半步（400 ppr）控制发展到现在的 125 细分（25 000 ppr），细分数的应用可以避开机构的共振区，改善电机低速的震动，提高每个脉冲运行的精度，提升电机的输出性能<sup>[8-10]</sup>。

## 5 结束语

笔者总结了该型空中加油机加油吊舱涡轮驱动混合式步进电动机的结构、工作原理和优缺点，对影响混合式步进电动机整体性能的若干因素进行分析。有效地解决了航空领域内新型电动机耐高温、体积小、重量轻、功耗小、转矩大、控制精度高、响应速度快的问题。

## 参考文献：

- [1] 哈尔滨工业大学，等. 步进电动机[M]. 北京：科学出版社，1979.
- [2] 软磁合金手册编写组. 软磁合金手册[K]. 北京：合金工业出版社，1974.
- [3] 陈理壁. 步进电动机及其应用[M]. 上海：上海科学技术出版社，1985.
- [4] 冯绍娟. 步进电机驱动器的设计与实现[J]. 机械制造与自动化，2001(5): 33-39.
- [5] 胡建华，等. CNC 系统中几种升降速控制曲线的研究与比较[J]. 南京航空航天大学学报，1999, 31(6): 706-710.
- [6] 李海波，何学涛. 步进电机升降速的离散控制[J]. 北京化工大学学报，2003, 30(1): 92-94.
- [7] 邹丽新，党兰芬. 步进电动机运行细分设计[J]. 苏州大学学报，2001, 17(4): 44-48.
- [8] 罗东辉，等. 步进电机高精度细分驱动器的研究[J]. 微特电机，1993, 13(1): 30-33.
- [9] 蒋三青，蒋朝平，汤建，等. 跨坐式单轨交通车辆用驱动轴有限元强度分析[J]. 四川兵工学报，2010, 31(4): 41-43.
- [10] Middleton, et al. Electronmagnetic damping for stepper motors with chopper drivers[J]. IEEE Transaction on industry electronics, 1986, 33(3): 241-246.