

一种用于高旋稳定弹药的超声电机调速系统*

陈海鹏¹, 姚俊飞^{1,2}, 贺红林³

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 上海航天科工电器研究院有限公司 上海, 200436) (3. 南昌航空大学航空制造工程学院 南昌, 330036)

摘要 针对高旋转制导弹药平台的固定式舵机控制, 提出了一种旋转型行波超声电机驱动进给机构的制动方式和舵机调速系统, 搭建了舵机性能测试试验平台并获得了良好的速度控制性能。首先, 采用库伦加黏性摩擦理论建立了超声电机驱动的制动盘和旋转盘之间的摩擦制动模型, 综合考虑超声电机的机械负载特性, 计算了制动盘对旋转盘产生的摩擦力矩, 得到了旋转盘(外壁设计有舵翼)的转速输出方程; 其次, 结合试验与仿真分析, 测定了结构的阻尼系数; 最后, 通过试验验证了基于超声电机驱动制动模型的正确性, 测量了舵机的速度控制曲线, 引入速度波动率来衡量速度控制效果。试验表明, 舵机速度调控响应时间小于 150ms, 速度波动率能够控制在 10% 以内。

关键词 旋转型行波超声电机; 舵机; 摩擦制动模型; 动力学方程

中图分类号 TM356; TH122

引言

旋转型行波超声电机(下面简称超声电机)是一种新型的微特电机, 具有体积小、响应快、控制精度高、电磁兼容性好、断电自锁、无需减速机构就能实现低速大扭矩等优点^[1-3], 在高真空、高低温、强辐射的航空航天极端环境下具有很好的应用前景^[4-6]。由于超声电机具有结构简单、紧凑和设计灵活的特点, 因此将超声电机用在制导弹药的驱动和执行系统中具有一定的优势^[7-8]。

基于膛线身管发射的榴弹需要利用弹体的高速旋转来维持飞行的稳定, 最高转速达到了 20 kr/min, 是一种基于陀螺稳定原理的飞行载体。超声电机的输出转速一般在 500 r/min 以下, 与高旋转榴弹本体的速度相去甚远, 若超声电机直接作为驱动舵翼的执行机构, 跟随弹体一起旋转的电机将不能与弹体的高转速匹配, 根本无法调节舵翼相对惯性空间的姿态, 自然也无法实现弹道修正。文献[9]提出了一种基于电磁学原理控制固定翼姿态的修正方式, 采用一对差动翼实现舵机反向旋转(与弹体转动方向相反), 一对同向操纵翼提供修正力。通过调

节舵机中电机的磁阻线圈电流, 控制舵翼相对地面静止, 产生特定方向的修正力, 实现弹道修正。但是, 这种调速方法中的电磁电机固有的响应时间较长, 且极高的载体转速对电磁电机系统的速度和位置控制精度提出了较高的要求, 不仅增大了弹体飞行轨迹的控制难度, 也增加了系统的成本。

针对超声电机响应快、易控制的特点, 笔者设计了一种用于高旋转榴弹的超声电机控制进给结构的舵机调速方法。首先, 建立了基于超声电机驱动进给结构的摩擦制动力学模型, 得到了旋转盘(含舵翼)的动力学方程; 其次, 结合试验和仿真, 测定了结构的阻尼系数; 最后, 通过试验验证了力学模型的正确性, 并测得了舵翼的速度控制曲线。

1 应用于高旋平台的超声电机舵机调速原理和设计

利用陀螺稳定原理的高旋转弹体, 其工作原理如图 1 所示。弹体在飞行过程中依靠自身超过 20 kr/min 的自旋速度保持稳定性, 为了产生有效的法向气动力, 必须要利用电机将舵片控制到相对大地接近静止的状态。然而, 低速输出特性决定了固

* 国家自然科学基金资助项目(51575259, 51665040); 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2015CB057500); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(NS2015004); 江苏省研究生培养创新工程资助项目(KYLX_0236)

收稿日期: 2018-11-05; 修回日期: 2018-12-13

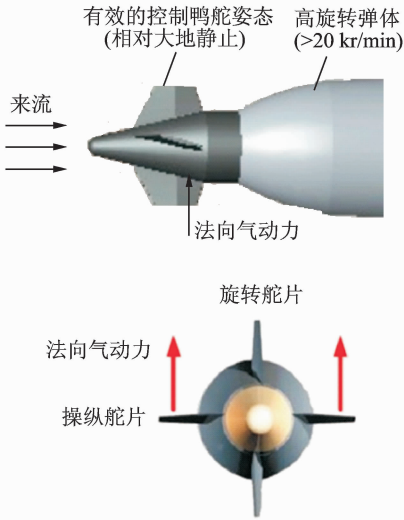


图 1 弹道修正力产生原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of trajectory correction principle

定于弹体的超声电机不能直接对鸭舵进行有效控制——即将鸭舵转速控制到相对大地静止^[9]。为了实现舵机的有效速度控制,提出一种利用超声电机驱动进给机构以摩擦制动的方式对舵翼速度实现调控,其原理如图 2 所示。

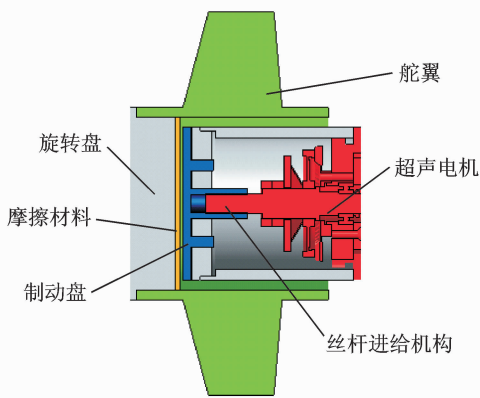


图 2 超声电机驱动进给机构的摩擦制动调速原理

Fig. 2 Principle of friction braking speed regulation

在超声电机输出轴上设计有螺纹,通过输出轴与制动盘的螺纹配合,将超声电机的旋转输出转变为制动盘的直线往复运动,摩擦材料通过胶粘方式固定在旋转盘上。当制动盘与旋转盘上的摩擦材料接触后,制动盘对旋转盘产生摩擦力矩。通过控制超声电机来调节该摩擦力矩,旋转盘转速能够得到精确的控制。为了使旋转盘的制动调速曲线更为平滑,防止调速过程中出现旋转盘由自由旋转到抱紧的突变,摩擦材料应该选取较小的摩擦因数。因此,试验采用了聚四氟乙烯^[10]作为摩擦材料。

2 基于摩擦制动原理的舵机速度调控模型

为了建立舵机的摩擦制动力学模型,采用库伦摩擦加黏性摩擦^[11]来描述旋转盘和制动盘之间的摩擦作用

$$F_{\tau} \approx \begin{cases} (\epsilon_c v + \mu_s) F_0 & (v \geq 0) \\ (\epsilon_c v - \mu_s) F_0 & (v < 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中: F_{τ} 为摩擦力; ϵ_c 为黏性摩擦因数; v 为摩擦副之间的相对速度; μ_s 为摩擦副之间的滑动摩擦因数; F_0 为摩擦副之间的正压力。

假设旋转盘与制动盘均为刚体,粘贴在旋转盘上的摩擦材料为线性弹簧。下面是旋转盘与制动盘之间摩擦力矩的计算。

在摩擦材料上取一个微元如图 3 所示,当沿其接触面法向施加力 ΔF 时,微元由于受压力而产生变形 ΔL 。微元面积为 dA , 则可知

$$\Delta L = \frac{\Delta F L}{E dA} \quad (2)$$

其中: E 为摩擦材料的弹性模量。

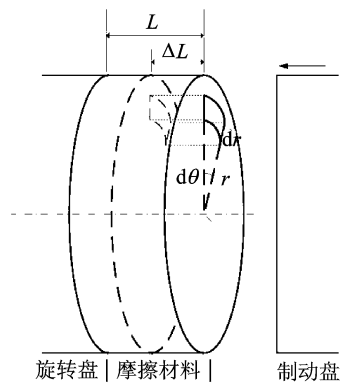


图 3 制动接触模型

Fig. 3 Contact model of the brake

该摩擦材料中微元的等效弹簧刚度为

$$K_m = \frac{\Delta F}{\Delta L} = \frac{E dA}{L} \quad (3)$$

当摩擦材料被压缩长度 l 时,微元所受正压力

$$F_0 = K_m l = \frac{l E dA}{L} \quad (4)$$

此时微元所产生的摩擦力矩为

$$M = [\epsilon_c (\omega + \omega_0) r + \mu_s] F_0 r \quad (5)$$

其中: ω 为旋转盘转速; ω_0 为制动组件的转速(即高速电机输出转速)。

旋转盘受到的摩擦力矩为

$$M_f = \iint M dA = \iint \left(\frac{\epsilon_c \omega l E r^2}{L} + \frac{\epsilon_c \omega_0 l E r^2}{L} + \frac{\mu_s l E r}{L} \right) r dr d\theta \quad (6)$$

分析时可以认为摩擦材料的变形量 l 与制动盘前进的距离相等, 而制动盘前进的距离可以表示为

$$l = \frac{p}{2\pi} \int \beta dt \quad (7)$$

其中: β 为超声电机的转速; p 为传动螺杆的螺距。

显然, 超声电机的转速不是一个恒定的值, 制动盘接触摩擦材料后, 超声电机的负载随着其转动而增加。因此, 在计算摩擦材料变形量 l 时, 需要综合考虑其机械负载特性, 如图 4 所示。

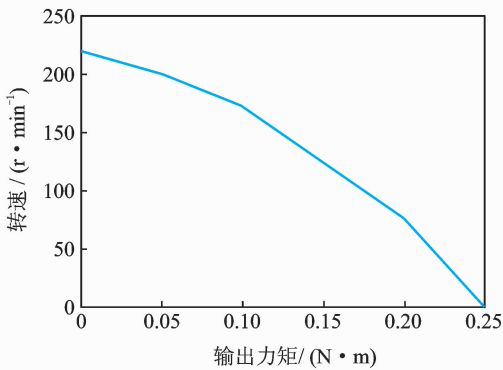


图4 超声电机的机械负载特性

Fig. 4 The mechanical performance of the ultrasonic motor

将式(7)代入式(6), 得到

$$M_f = \frac{pER^3}{L} \left(\frac{\epsilon_c \omega R}{4} + \frac{\epsilon_c \omega_0 R}{4} + \frac{\mu_s}{3} \right) \int \beta dt \quad (8)$$

其中: R 为旋转盘的半径。

建立旋转盘的动力学方程为

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega}{dt} + c_r \omega = T_d - M_f \\ t = 0, \omega = \omega_m \end{cases} \quad (9)$$

其中: J_1 为旋转盘(包含舵翼)的转动惯量; c_r 为结构的阻尼系数; T_d 为旋转盘受到的驱动力矩; ω_m 为旋转盘初始转速。

3 仿真分析与试验研究

3.1 结构的阻尼系数确定

整个系统中, 结构的阻尼系数对于制动力学模型尤为关键。阻尼主要来自于结构中的轴承、舵翼旋转引起的空气阻尼以及整个旋转运动的阻尼。为了分析需要, 这里假定阻尼为一个常数。测量了力矩电机驱动舵翼时的关断曲线, 通过仿真拟合计算

得到了结构的阻尼系数。表1为各项参数数值。

表1 各项参数数值

Tab. 1 Values of various parameters	
参数	数值
$J_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	4.36×10^{-4}
E / Pa	0.8×10^9
L / mm	0.5
ϵ_c	0.05
μ_s	0.15
R / mm	5
$\omega_m / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 000
$\omega_0 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000
p / mm	1
$T_d / (\text{N} \cdot \text{m})$	0.1

式(9)中, T_d 和 M_f 两项为 0, 即得到关断曲线模型为

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega}{dt} + c_r \omega = 0 \\ t = 0, \omega = \omega_m \end{cases} \quad (10)$$

积分求解式(10), 得到关断曲线的解为

$$\omega = \omega_m \exp\left(-\frac{c_r}{J_1} t\right) \quad (11)$$

将试验数据代入式(11), 得到结构的阻尼系数 $c_r = 0.045$ 。图5为转动舵翼自然停止试验与仿真曲线。可以看到, 试验数据和仿真分析的曲线在前段较为吻合, 然而后段相差极大。这是因为在仿真计算时将阻尼数据假定为常数, 然而实际试验中阻尼是非线性的。

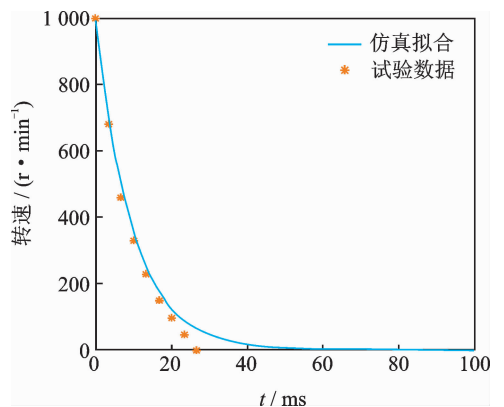


图5 转动舵翼自然停止试验与仿真曲线

Fig. 5 Stopping test and simulation of rotating rudder

3.2 仿真分析

利用 Runge-Kutta 法^[12] 求解式(9), 计算得到舵翼从初始转速 ω_m 下降到 0 的时间历程曲线。将仿真分析曲线与试验数据进行对比, 如图 6 所示。可以看到, 仿真分析中舵翼从初速到停止所需的时

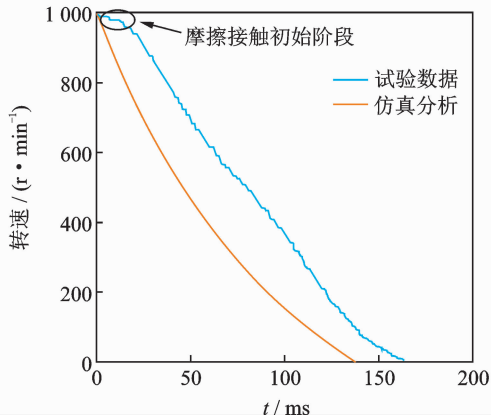


图 6 舵翼调速仿真分析与试验曲线

Fig. 6 Simulation and experimental curve of the rudder speed regulation

间小于试验结果。这是因为在实际试验中,由于装配误差造成旋转盘和制动盘不平行,旋转盘和制动盘之间的接触面在接触初始不能完全贴合,而是部分摩擦。在摩擦接触初始阶段,舵翼的转速有一个缓慢下降的过程,这个过程也正是旋转盘和制动盘完全贴合的过程。

图 7 为超声电机转速与摩擦力矩的时间历程曲线。在整个制动过程中,超声电机转速在 18 ms 时便趋于 0,此时制动盘对旋转盘的摩擦力矩达到最大,约为 0.24 N·m。

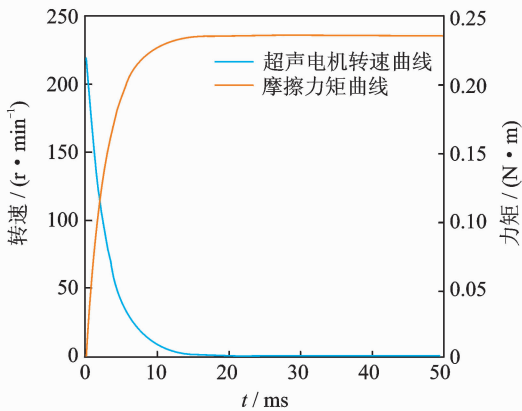


图 7 超声电机转速与摩擦力矩的时间历程曲线

Fig. 7 Time history curve of speed and friction torque of the ultrasonic motor

3.3 试验分析

舵机模拟试验系统如图 8 所示,采用力矩电机以恒定力矩驱动舵翼,将包含超声电机的制动组件、电池以及超声电机的驱动模块连接为一个整体,由高速电机驱动其反向旋转(与舵翼转动方向相反)。考虑到旋转零部件与非旋转零部件之间的信号传

递,试验采用无线收发模块将力矩电机的速度信号发送到超声电机驱动控制模块中。制动系统控制原理如图 9 所示。通过控制超声电机实现对舵翼速度的调控,得到舵翼速度调控时间曲线如图 10 所示。

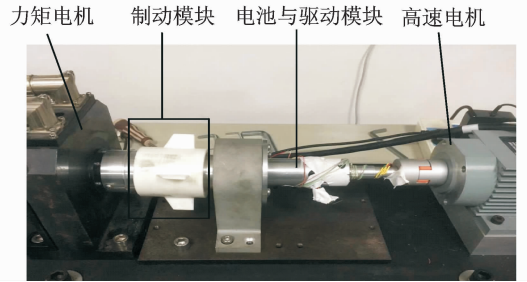


图 8 舵机模拟试验系统

Fig. 8 Rudder-actuator simulation test system

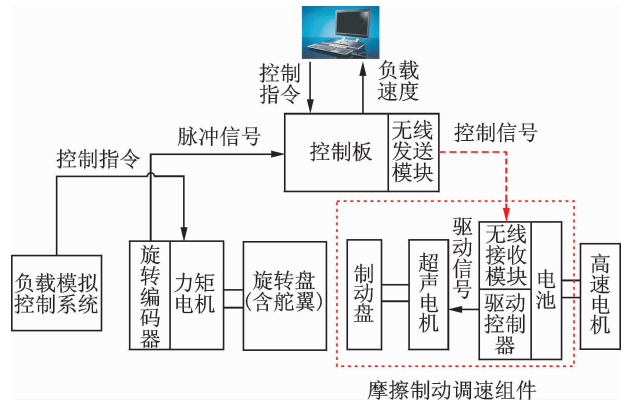


图 9 制动系统控制原理

Fig. 9 Control principle of the brake system

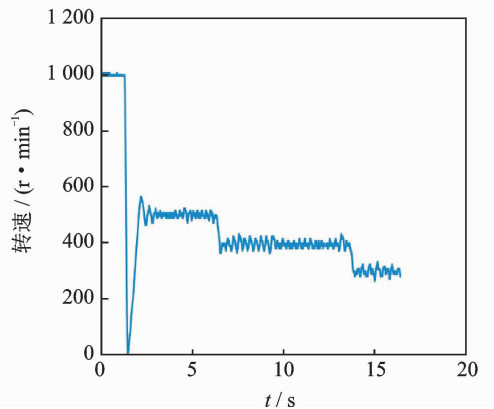


图 10 舵翼速度调控时间曲线

Fig. 10 Speed regulation curve of the rudder

舵翼以 1 kr/min 的初始转速开始自由转动,迅速降低为 0(响应曲线放大后如图 6 所示)。舵翼转速在 1000,0,500,400 和 300 r/min 之间连续变化。其中:0~500 r/min 的响应时间为 135 ms;500 r/min 降速到 400 r/min 耗时 84 ms;400 r/min 降速到 300 r/min 耗时 95 ms。

引入速度波动率 η 来衡量舵翼的速度波动, 定义为

$$\eta = \frac{\int_T^{T+\Delta T} |\omega - \omega_{ta}| dt}{\int_T^{T+\Delta T} \omega_{ta} dt} \times 100\% \quad (12)$$

其中: T 为时间周期; ω 为舵翼的实时转速; ω_{ta} 为调控目标转速。

当舵翼转速控制为 500 r/min 时, η 约为 4.7%; 当转速调控到 300 r/min 时, η 约为 5.3%; 当转速低至 100 r/min 时, η 约为 7%。由此可见, 当舵翼转速较大时, 系统速度控制效果较好; 转速降低, 速度波动较大。这与力矩电机的输出特性有关, 当力矩电机带载低速转动时, 其速度波动会比较大, 这不利于速度调控。

4 结 论

1) 建立了摩擦制动动力学模型, 综合考虑超声电机的机械负载特性, 得到了旋转盘(包含舵翼)的动力学方程, 通过数值方法求解方程可以得到舵翼的调速曲线。

2) 通过试验与仿真结合, 确定了结构阻尼系数, 验证了动力学模型的正确性, 实现了对舵翼的速度调控, 引入参数 η 来评价制动机构的速度调控效果。试验表明, 舵机速度调控响应时间小于 150 ms, 速度波动率能够控制在 10% 以内。

3) 调速系统的响应时间和速度稳定性很大程度上受限于系统的加工和装配精度, 且超声电机的控制策略与调速系统的机械性能也是密切相关。因此, 通过提高加工和装配精度, 优化超声电机控制策略, 能够极大地提高调速系统的机械性能。

参 考 文 献

- [1] UEHA S, TOMIKAWA Y. Ultrasonic motors: theory and applications[M]. Oxford: Clarendon Press, 1993:1-16.
- [2] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007:1-25.
- [3] ZHAO Y, YUAN S, CHU X, et al. Ultrasonic micro-motor with multilayer piezoelectric ceramic and chamfered driving tips[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(9):291-300.
- [4] 李晓牛, 周盛强, 姚志远, 等. 超声电机在磁悬浮飞轮锁紧装置中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(4): 555-559.
LI Xiaoni, ZHOU Shengqiang, YAO Zhiyuan, et al. Application of ultrasonic motor in locking device for

magnetic bearing flywheel [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(4): 555-559. (in Chinese)

- [5] 王乐, 王永杰, 芦小龙, 等. 用于微型飞行器的高转速超声电机[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 170-175.
WANG Le, WANG Yongjie, LU Xiaolong, et al. A new type of rotary ultrasonic motor applied to micro air vehicles [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 170-175. (in Chinese)
- [6] LU X, HU J, YANG L, et al. A novel in-plane mode rotary ultrasonic motor [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(2):420-424.
- [7] THEODOULIS S, GASSMANN V, WERNERT P, et al. Guidance and control design for a class of spin-stabilized fin-controlled projectiles [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2013, 36(2): 517-531.
- [8] THEODOULIS S, WERNERT P. Flight dynamics & control for smart munition; the contribution[J]. IFAC-papers Online, 2017, 50(1): 15512-15517.
- [9] 郝永平, 孟庆宇, 张嘉易. 固定翼二维弹道修正弹气动特性分析[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(3):171-173.
HAO Yongping, MENG Qingyu, ZHANG Jiayi. Aerodynamic characteristic analysis on two-dimensional trajectory corrector shell with fixed-wing [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(3):171-173. (in Chinese)
- [10] 凡玉, 丁庆军, 赵淳生. 聚苯酯填充聚四氟乙烯基超声电机转子摩擦材料性能研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(9): 36-39.
FAN Yu, DING Qingjun, ZHAO Chunsheng. Research on properties of POB filled PTFE-based friction materials of ultrasonic motor[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(9): 36-39. (in Chinese)
- [11] ARMSTRONG-HeLOUVRY B, DUPONT P, WIT C C D. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction [J]. Automatica, 1994, 30(7):1083-1138.
- [12] 胡海岩. 机械振动基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 145-146.



第一作者简介: 陈海鹏, 男, 1988年10月生, 博士生。主要研究方向为超声电机技术及其应用。

E-mail: hpchen1020@163.com

