

doi: 10.7690/bgzd.2013.05.018

无人驾驶旋翼机桨盘伺服舵机

陈婧, 王道波, 沈娟, 童颖飞

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为了实现无人驾驶旋翼机的桨盘纵横向倾角控制。以某型无人驾驶旋翼机为对象, 分析了样例旋翼机桨盘的操纵性, 制定了旋翼机桨盘伺服舵机的性能技术指标; 并根据舵机性能技术指标设计了一种线位移力输出式舵机, 通过对舵机数学模型的建模与分析设计了舵机控制器, 对所设计的伺服舵机进行了仿真计算和性能分析。应用结果表明, 研制的舵机能成功应用于无人驾驶旋翼机的桨盘控制。

关键词: 旋翼机; 伺服舵机; 控制器; 建模与仿真

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Servo Actuator for Propeller Disk of Unmanned Gyroplane

Chen Jing, Wang Daobo, Shen Juan, Tong Yingfei

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to achieve the horizontal and vertical control of the propeller disk of unmanned gyroplane. Taking certain type unmanned gyroplane as object, establish technical performance index of gyroplane propeller disk servo actuator by analysis the handling of propeller disk. According to the developed technical performance indicators, the linear displacement servo actuator is designed. The servo controller is designed based on the modeling and analysis of the servo mathematical model. The simulation results are calculated and analyzed. The servo actuator is tested and verified in the practical application. The results indicate that the developed servo actuator can be successfully used to control the propeller disk of unmanned gyroplane.

Key words: gyroplane; servo actuator; controller; modeling and simulation

0 引言

无人驾驶旋翼机是一种旋翼类飞行器, 具有与直升机相类似的提供升力的旋翼, 同时具备类似于固定翼飞机滑跑起飞的特点^[1]。无人驾驶旋翼机具有结构简单, 成本低、起降距离短(预旋转速足够高的情况下能够近似实现垂直起飞)和安全性能高的特点, 广泛应用于电子干扰、公路勘测、空中机动靶目标等领域^[2]。

无人驾驶旋翼机共设 5 个伺服舵机实现对旋翼机的控制, 其中 2 个舵机操纵旋翼桨盘的纵向和横向倾角, 一个舵机完成前轮转向和方向舵转向的控制, 一个舵机完成对发动机油门的控制, 另外还设一个用于制动主轮的舵机实现旋翼机滑行中的刹车控制。在这 5 个舵机中, 桨盘纵横向倾角控制是最重要的操纵装置, 其性能和可靠性极大地关联着旋翼机的飞行控制品质和安全; 基于此, 笔者着重探讨主控制伺服舵机的设计和实现。

1 桨盘控制舵机的技术指标

1.1 运动范围

舵机的运动范围主要取决于操纵机构的具体结

构尺寸, 一般而言, 旋翼机的桨盘倾角变化范围在 $-10^{\circ} \sim +15^{\circ}$, 通过杠杆机构与舵机的输出轴连接, 当采用线性位移舵机时, 可以通过杠杆机构解算出桨盘倾角范围内舵机所需输出的全量程^[3], 在本样例无人驾驶旋翼机中, 桨盘倾角通过操纵机构转换到舵机输出轴的位移是 $0 \sim 78 \text{ mm}$, 为此设计的舵机最大线位移应不小于 80 mm 。

1.2 输出控制力

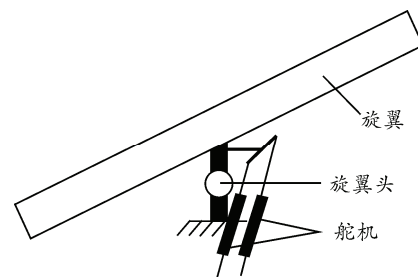


图 1 操纵机构示意图

舵机最大输出的力应能在各种飞行状态下操纵桨盘倾角的运动, 在本样例旋翼机中, 其桨叶数为 2, 桨盘直径为 7 m , 在稳定飞行时的桨盘转速为 325 r/min , 产生最大的桨盘升力为 245 kg 。通过操纵机构将桨盘操纵力转换到伺服舵机的最大操纵力

收稿日期: 2012-11-22; 修回日期: 2012-12-04

作者简介: 陈婧(1988—), 女, 江苏人, 在读硕士, 从事控制理论与控制工程研究。

约为 96 kg。笔者采用的操纵机构示意图如图 1。

采用 2 只舵机共同实现对桨盘纵向和横向倾角的位置控制时, 每个舵机的最大输出力应 48 kg, 考虑到舵机动态力为其静态力的 70%, 为此可设定伺服舵机的最大输出力不小于 80 kg。

1.3 控制精度

舵机控制精度与旋翼机的姿态控制精度关联, 按无人机对伺服舵机控制精度的要求, 伺服控制精度应为无人机姿态控制精度的 50% 以下, 当旋翼机姿态控制精度要求为 $\pm 2^\circ$, 则伺服舵机对桨盘的控制精度应小于 1° , 通过操纵机构传动比的解算, 舵机线位移控制误差最大为 3 mm, 从线位移伺服舵机的可实现性而言, 舵机控制精度可设为 0.5 mm。

1.4 运动速率

舵机运动速率的设定与无人旋翼机姿态控制的稳定性和响应速度直接相关, 对于样例无人驾驶旋翼机而言, 在其稳定飞行时纵向姿态最大变化速率约为 $20^\circ/\text{s}$, 横向姿态最大变化率约为 $30^\circ/\text{s}$, 因此桨盘倾角的最大变化速率应为姿态变化率的 1.5~2.0 倍, 从而对应于桨盘倾角最大变化速率时的伺服舵机最大运动速率应不小于 60 mm/s。

1.5 响应频率

舵机的响应频率由操纵的无人旋翼机横纵向响应频率所决定。笔者所研究的无人旋翼机纵向响应频率为 0.5~0.75 Hz, 横向响应频率为 1.0~1.5 Hz, 航向响应频率为 1.0~2.0 Hz。对应于 -10° 相移时, 舵机的带宽频率应为其操纵面的 -10° 频率响应的 1~2 倍, 因此舵机的 -10° 响应频率应不小于 3 Hz。对于低通特性而言, 舵机对应于 -90° 相移的响应频率是其 -10° 相移时的 5 倍, 不小于 15 Hz。

2 舵机结构设计

根据上述的舵机设计要求, 笔者针对样例无人驾驶旋翼机设计了用于桨盘控制的伺服舵机, 所设计的舵机原理图如图 2 所示。

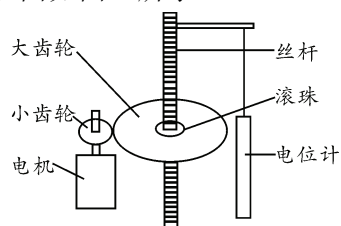


图 2 舵机结构原理

由图 2 可见, 这种伺服舵机采用电气拖动和线

位移方式, 由力矩电机、减速装置、滚珠丝杆和电位计等组成, 其工作原理为: 力矩电机在驱动电压作用下转动, 带动与其相连的减速齿轮将电机的转速降低, 并由此获得足够的输出力矩, 利用滚珠丝杆传动机构将角位移转换为控制桨盘所需要的线位移和力输出, 为构成舵机的位置闭环控制回路, 采用线性电位计为反馈传感器, 实现舵机的线位移伺服运动。滚珠丝杆传动机构在线位移线性舵机中使用具有传动摩擦力小, 传动精度高等特点, 在输出丝杆的两端增设 2 个机械限位装置, 以防止舵机超限运动导致卡死现象。

舵机的驱动力矩电机选用瑞士 Maxon 公司的货架产品, 型号为 RX38 直流电机, 功率为 70 W, 电机额定转速为 7 500 r/min, 反馈电位计选用日本 MIDORI 公司 XPP-100F 精密直线位移电位器, 其有效行程为 100 mm, 能够满足舵机设计的最大线性位移为不小于 80 mm 的要求, 具有耐磨性好, 抗震能力强的优点。减速齿轮采用钢件制作, 能传递足够大的扭力, 减速装置的传动比为 5.4, 丝杆的齿间距为 3 mm, 由此计算出舵机的最大运动速率为 94 mm/s, 满足运动速率不小于 60 mm/s 的要求。

所设计和研制的舵机实物图如图 3 所示。

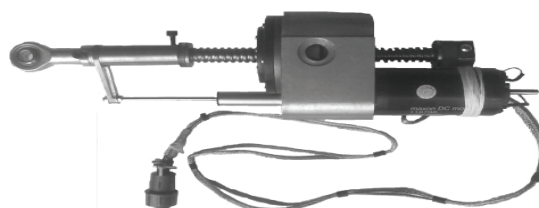


图 3 舵机实物

3 舵机控制器设计与仿真

为使设计和研制的舵机满足技术要求, 还需设计和研制相应的舵机控制电路。舵机控制电路是一个闭环控制系统, 控制电路将完成舵机指令和反馈信号的综合与校正, 通过 PWM 功率放大器输出控制伺服电机所需的电压和电流, 以驱动舵机伺服电机转速, 达到舵机的力输出和线性位移输出目的^[4]。

舵机控制器由反馈信号调理、闭环控制、电机功率放大器等组成, 其原理图如图 4 所示。

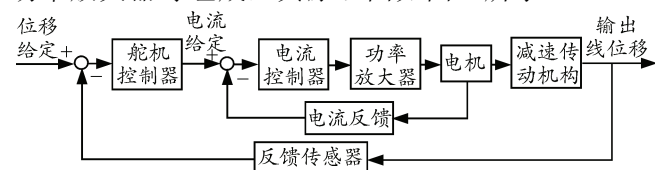


图 4 舵机控制原理框图

舵机控制包括了电流反馈控制和位置/速度反馈控制 2 个回路, 电流反馈控制用于抑制电源波动

带来的扰动作用，尤其是在电机启动和反向运动瞬间，可以限制超限电流，防止因瞬时电流过大损坏器件和电机，能够补偿当电机激励信号频率过高时，由于电机电感特性引起的电机电枢电压损失。位置/速度反馈控制回路实现舵机对于给定位置的跟踪，舵机伺服系统的位置跟踪性能决定了舵机的控制精度和动态特性，由于仅采用直线位移电位计作为反馈传感器，速度反馈信号则通过对位移信号的一阶微分电路实现。

根据相关电机控制理论，通过对舵机回路的机理分析，可以建立舵机伺服控制回路的数学模型^[5]，如图 5 所示。

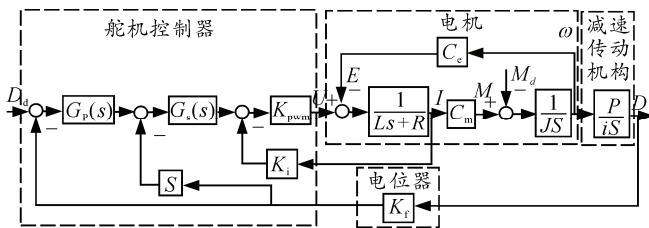


图 5 舵机控制回路数学模型

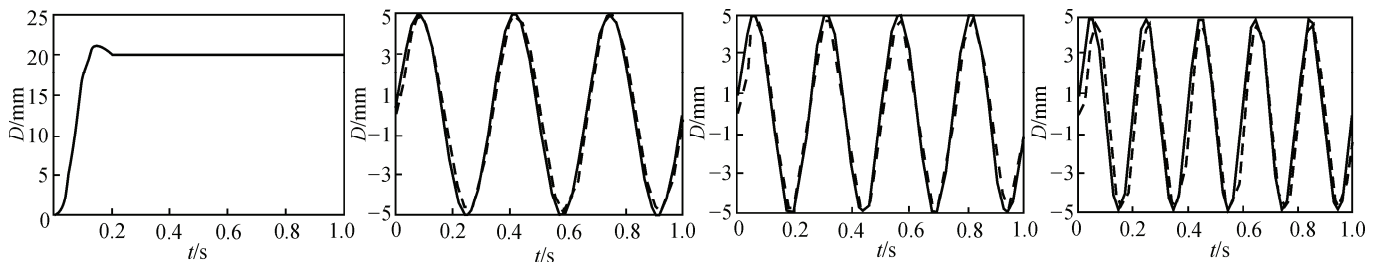
图中 $G_p(s)$ 和 $G_v(s)$ 分别为舵机控制回路的位置控制器和速度控制器， K_i 为电流控制器。功率放大器的模型为一个惯性环节 $G_{pwm}(s) = K_{pwm}/(T_s s + 1)$ ，由于 PWM 放大器的频率较高，迟滞时间 T_s 可忽略不计，模简化为 K_{pwm} 。电机模型中， R 和 L 分别是电枢回路等效电阻和电感， C_e 和 C_m 是反电动势系数和电机电力矩系数， M 和 M_d 是电机输出力矩和干扰

力矩。 J 是转动惯量， U 和 I 是电枢电压和电流， ω 电机角速度。 i 是减速传动机构的传动比， P 为丝杆的螺距。电位器作为线性反馈原件，器模型为一比例环节，比例系数为 K_f 。

根据图 5 数学模型，可进行舵机控制的工程设计，需完成控制参数整定和控制电路的设计。在工程实践中，控制参数的整定可采用工程试凑设计方法，即从内环向外环层层扩展，依次完成回路参数整定，保证各回路能满足舵机的静态和动态性能指标要求。

电流控制回路是舵机控制的内回路，电流反馈回路应具备对给定电流的快速跟随性能和较小超调量，根据电流环的特性，电流环可采用比例控制^[6]，通过计算和动态仿真，可得 $K_i = 8.5$ 。

位置/速度控制回路是舵机控制中的主要控制回路，需整定的控制参数包括 K_p 和 K_s ，由于舵机伺服控制回路与舵机的负载特性相关，可假设舵机的负载为一恒值力，如将舵机反力折算至电机负载力矩 $M_d = 4.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，通过对舵机伺服回路在阶跃信号下响应特性的数字仿真，在保证舵机具备足够快响应特性并在超调量小于 10% 的情况下，采用参数优化法，确定控制参数为： $K_p = 4.32$ 、 $K_s = 8.15$ 。为满足舵机伺服回路的频率响应要求，加入串联超前校正环节^[7]提高系统的响应频率，通过仿真调试确定校正环节为 $(0.018s + 1)/(0.002s + 1)$ 。舵机伺服控制回路的阶跃响应特性和正弦响应特性如图 6 所示。



注：(b)、(c)、(d)中实线代表参考输入正弦信号，虚线代表实际输出正弦信号

(a) 阶跃响应曲线 (b) 3 Hz 正弦响应曲线 (相移: 6.9°) (c) 4 Hz 正弦响应曲线 (相移: 9.0°) (d) 5 Hz 正弦响应曲线 (相移: 10.3°)

图 6 舵机控制回路阶跃响应曲线和正弦响应曲线

由图 6 可知，笔者所设计的舵机伺服控制回路满足了设计要求，适用于无人旋翼机的装机使用。

对应于图 5 的舵机控制器电路原理^[8]如图 7。

图 7 中，舵机控制电路采用模拟器件实现，运算放大器实现信号调理和控制规律的解算，A1 为舵机位移信号调理，A2 为微分电路，实现将舵机位移信号转换成速率信号，A3 实现舵机控制律解算，其

输出的信号被调理成功率放大器 U1 的输入调量 ($5 \text{ V} \pm 2 \text{ V}$)，功率放大器 U1 为美国 APEX 公司的功率模块器件 SA01，可将输入的模拟电压信号转换成 PWM 调制信号，并能产生高达 20A/100V 的电机驱动信号，可直接用于伺服电机的驱动。SA01 器件内部自带电流负反馈和过流保护，是小型伺服电机的理想功放器件。