

doi: 10.7690/bgzdh.2013.11.020

小型无人机三轴飞行仿真转台设计

张振¹, 都基焱¹, 叶纯²

(1. 解放军陆军军官学院无人机系, 合肥 230031; 2. 中国人民解放军 73146 部队, 福建 南安 362300)

摘要: 针对直接在无人机上验证飞行控制系统成本较高, 危险性较大, 且受场地限制的问题, 设计了一种针对小型无人机的三轴飞行仿真转台。介绍三轴转台主要性能指标和转台结构, 对伺服控制系统和伺服软件系统 2 个方面进行分析, 编写了设计程序。分析结果表明: 该转台具有体积小、成本低、精度高、使用方便等特点, 为小型无人机控制系统的研究提供了一个地面半仿真实验的平台。

关键词: 三轴转台; 结构设计; 步进电机; 控制系统

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Design of a 3-Axis Flight Simulator for a Small UAV

Zhang Zhen¹, Du Jiyang¹, Ye Chun²

(1. Department of Unmanned Aerial Vehicle, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China;

2. No. 73146 Unit of PLA, Nanan 362300, China)

Abstract: Flight tests on UAV flight control system is high-cost, dangerous and restricted. For this reason, a new 3-axis flight simulator is designed for the research of a small UAV. Performance index and structure of flight simulator is introduced. The control system and software system is analyzed, and the program is written. The analysis shows that the simulator has the features of small volume, low cost, high precision and convenient using, and a half-physical simulation platform is provided for a small UAV flight control system.

Key words: 3-axis simulator; structure design; stepping motor; control system

0 引言

小型无人机具有噪音低、目标小、效费比高、雷达信号弱、机动性强等特点, 对起降条件限制小, 特别适合在特殊环境下使用。对于小型无人机而言, 良好的飞行控制系统至关重要。小型无人机的机动性和执行任务的能力很大程度上取决于其飞行控制系统的设计水平。

由于直接在无人机上验证飞行控制系统成本较高, 危险性较大, 且受场地的限制, 使得飞行控制系统的半实物仿真得到了广泛应用。通过半实物仿真实验可以模拟无人机飞行过程中的各种参数, 验证飞行控制系统的设计是否合理, 发现飞行控制系统的设计缺陷, 并作出必要的调整。三轴飞行仿真转台是无人机飞行控制系统进行地面半实物仿真实验中的一个重要设备, 其框架作六自由度运动, 用来模拟飞机在空中的飞行姿态。

一般的仿真转台尺寸大, 系统复杂, 生产成本较高。基于小型无人机对控制系统的要求, 笔者设计了一种适合小型无人机半实物仿真系统的三轴飞行仿真转台。

1 性能指标

小型无人机对三轴转台主要性能指标的设计要求包括:

- 1) 最大承载能力: 3 kg;
- 2) 转角范围: 三轴均连续无限;
- 3) 转台尺寸: 500 mm×650 mm;
- 4) 角位置测量分辨率: 0.5" (角位置测量系统显示的最小增量);
- 5) 角位置控制精度: ±5";
- 6) 角速率范围: 内环 0.001~90 (°)/s, 中环 0.001~90 (°)/s, 外环 0.001~90 (°)/s;
- 7) 角速度精度及平稳度: 2×10^{-3} (1°平均), 5×10^{-4} (10°平均), 5×10^{-5} (360°平均);
- 8) 最大角加速度: 内环 200 (°)/s², 中环 180 (°)/s², 外环 180 (°)/s²;
- 9) 控制系统带宽: 内环 4 Hz, 中环 4 Hz, 外环 4 Hz。

2 结构设计

转台结构主要包括机械台体、驱动电机和连接电缆等^[1], 图 1 为笔者设计的三轴仿真转台实物图。

收稿日期: 2013-07-07; 修回日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61273001)

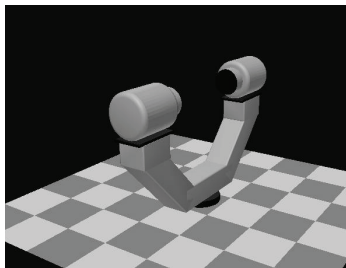
作者简介: 张振 (1991—), 男, 安徽人, 硕士在读, 从事中远程情报侦察研究。



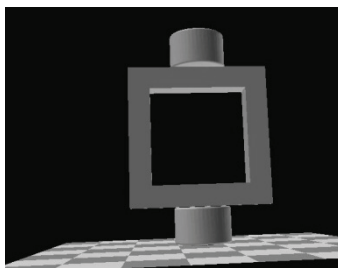
图 1 三轴飞行仿真转台

2.1 台体结构

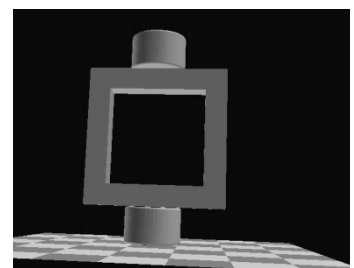
转台的台体结构可分为立式和卧式。其中，立式转台外框垂直于水平面，采用 U 型结构，框架自身重量较小，适合于高精度仿真实验，但是 U 型半封闭式结构刚度较低。立式转台外框平行于水平地



(a) 外环



(b) 中环



(c) 内环

图 2 转台框架结构

2.2 材料选取

材料的选取要满足转台对刚度和稳定性的要求，仿真转台的底座采用铸铁材料 HT150 整体铸造结构，具有良好的减震能力。轴承采用全滚珠结构，轴系加工精度高，具有较高的定位精度。框架采用 LY16 硬铝合金材料整体线切割制作，材料硬度高、密度小。

2.3 驱动电机

转台的驱动元件主要有液压驱动和电机驱动。其中，液压驱动转角小、设施复杂，不适合尺寸较小的转台。电机驱动主要包括直流伺服电机驱动、交流伺服电机驱动和力矩电机驱动。直流伺服电机转动力矩大、特性曲线好、响应迅速，但结构较为复杂；交流伺服电机具有较高的功率，但存在参数时变和负载扰动等缺点，适用于大型仿真转台；直流力矩电机反应速度快、转动波动小、过载能力强，适用于负载轻、控制要求简单的转台。对适用于小

面，采用 O 型结构，结构刚度较高，但是框架尺寸大，转动惯量较强。

笔者设计的小型无人机三轴飞行仿真转台尺寸较小，负载重量轻，对刚度要求不是很高。框架设计主要遵循提高精度，减小转动惯量的原则；因此，采用立式转台框架结构，外环为音叉型结构，中环为封闭的 O 型结构，内环为平面载物台结构(图 2)。进行仿真试验时，转台的外框架负责无人机偏航姿态模拟，中框架负责无人机的俯仰姿态模拟，内框架负责无人机的滚转姿态模拟。仿真计算机给出的控制指令经过伺服控制卡校正后，送入内环驱动控制器，由内环电机驱动控制器放大后驱动转台轴承。在内框上安装测速机和光电码盘，可测出与实际飞行中相同的角运动，再送入主控计算机，实现闭环控制。3 个框架的转角和转速对应于上述 3 个姿态角运动，通过 3 个框架的组合运动，复现无人机在空中的角运动。

型无人机的仿真转台来说，适合采用直流步进电机。

按驱动方式分，转台的驱动分为直接驱动和间接驱动。直接驱动即电机的输出轴直接与台体相连，其优点是可以提高系统的传动精度，缺点是其低速性能由驱动元件决定。间接驱动即在电机轴和台体间加入减速器，其优点是可以提高低速性能，但传动精度会有所下降。小型三轴转台的电机驱动的设计主要遵循高精度和快速反应的要求，选用电机直接驱动方式。

电动机的类型和驱动方式确定以后，依据负载所需的力矩大小确定电动机的具体型号，框架的系统力矩主要由转动惯量、所需的加速度和负载摩擦力矩决定的。其计算公式为： $T_g = I \times a + T_f$ (T_g 为框架的系统力矩， I 为框架的总转动惯量， a 为电机的加速度， T_f 为电机的摩擦力矩)，由公式推导出各框采用的电机型号，推导过程省略。各框采用的电机型号如表 1。

表 1 电机型号

类型	型号	额定电压/V	电流/A	电阻/ Ω	电感/mH	转动惯量/($\text{g}\cdot\text{cm}^2$)	保持转矩/(N·m)	重量/kg
内框电机	DM8665E	4	2.80	0.700	1.95	1 000	3.4	1.7
中框电机	DM8680E	6	4.24	0.375	1.70	1 400	4.6	2.3
外框电机	DM86118E	6	4.20	0.450	3.00	2 700	8.7	3.8

3 伺服控制系统

转台的技术指标对控制系统的要求越来越高,最重要的性能指标可以用“高频响、超低速、宽调速、高精度”来概括。为了达到这些技术指标,转台采用三环位置随动系统,即电流环、速度环和位置环^[2]。图 3 为转台的控制系统原理框图。

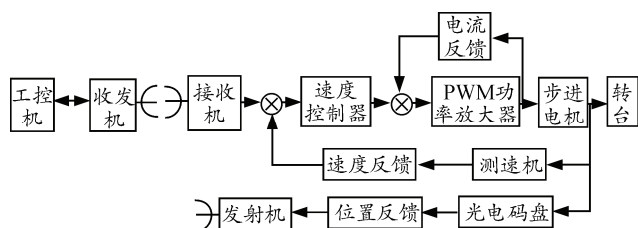


图 3 控制系统原理框图

工控机通过串口通信将控制信号传输到发射接收模块,控制信号通过 2.4 G 无线通信模块传递到转台伺服控制系统。伺服放大器通过 PWM 脉宽调制方式来驱动伺服电机转动,电机驱动电流和 PWM 功率放大器构成电流反馈,以改善步进电机的动态品质。测速机信号经处理后反馈到速度控制器,以改善转台系统的动态性能、低速性能和非线性影响。光电码盘产生与转台轴角位移相关的正交脉冲信号,通过 2.4 G 无线通信模块传递到工控机,工控机经计算处理后产生的位移误差码,经过控制算法校正处理后发送到转台控制系统,构成位置反馈,以保证达到实验精度要求。下面,笔者将对外框进行 PID 设计,中框和内框控制系统设计可参考外框 PID 设计^[3-5]。设计的主要步骤如下:

- 1) 调节带宽,使相角裕度、剪切频率接近满足要求值;
- 2) 增加极点,根据相角裕度、剪切频率的改变量,调节增益,使剪切频率为满意值;
- 3) 当超调量较大时候,可以增加积分系数,超调量会减小。

3.1 速度环设计

速度环要以有较大的开环增益、较好的调速特性为设计目标。电流环是速度环的内环,在设计速度环时,可以把电流环看成速度调节系统的一个环

节。电流闭环可等效为一个惯性环节,将电机等效为一个积分环节,故速度环的控制对象可认为是一个惯性环节和一个积分环节的串联,按工程设计方法将速度环校正成典型 II 型系统。经试验调试和经验计算,最终确定传递函数为

$$G_{cv}(s) = \frac{820(0.35s+1)(0.015s+1)}{(1.2s+1)(0.002s+1)}$$

系统开环 Bode 图如图 4 所示。

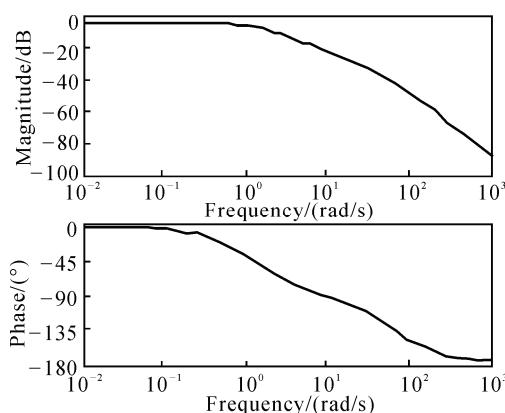


图 4 速度环开环频率响应 Bode 图

3.2 位置环设计

位置环要求位置响应速度快且无超调,因而可以校正成典型 I 型系统,外环的位置反馈信号直接取自伺服电机上自带的高分辨率光电编码器,闭环传递函数如下:

$$G_p = \frac{0.87(0.0042s+1)}{0.0042s}$$

系统开环 Bode 图如图 5 所示。

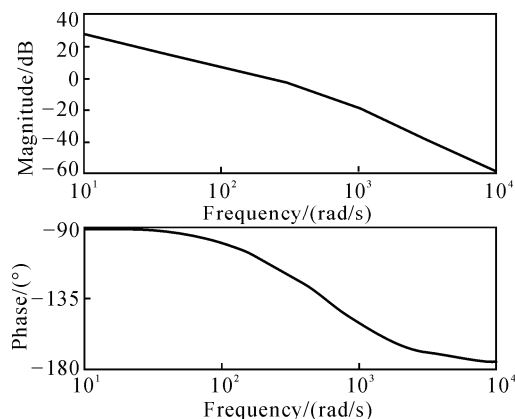


图 5 位置环开环频率响应 Bode 图

4 伺服软件系统

系统的软件部分反应了整个控制系统的控制方法和策略，软件流程根据实际需要进行编写。为了使三轴仿真转台易于维护，便于扩充，控制软件系统采用了模块化设计思想，在对三轴转台进行控制的同时，可实时采集其 3 个框架的位置、速度、状态等信息，并通过三维视图实时展示转台的姿态。其中，转台的三维视图由 3Dmax 绘制，通过 Open G2 设计后显示在软件界面上，整个软件系统是在 Windows 下使用 VC++6.0 编写的。本系统主要用于小型无人机三轴飞行仿真，具体流程图如图 6。

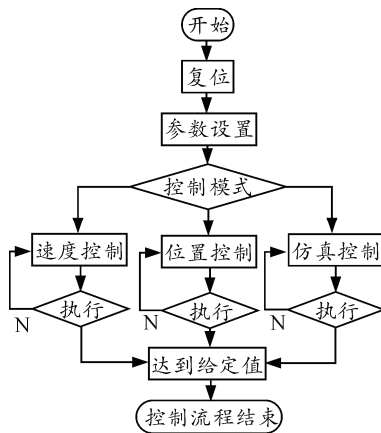


图 6 软件流程

软件界面如图 7 所示。

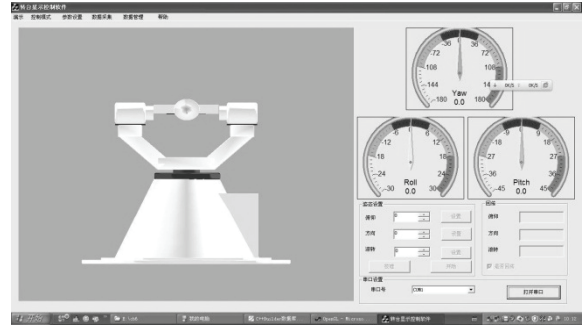


图 7 软件界面

5 结束语

笔者设计了一个小型无人机半实物仿真系统的三轴飞行仿真平台，现已用于对小型无人机控制系统的研究与测试，并取得良好的效果，具有体积小、成本低、性能好、精度高等特点。

参考文献：

- [1] 冯清秀. 机电传动控制[M]. 武汉：华中科技大学出版社, 2011: 11-18.
- [2] 周武能. 自动控制原理[M]. 北京：机械工业出版社, 2011: 53-57.
- [3] 贺兆民. 自动控制系统解析法设计[M]. 长沙：国防科技大学出版社, 2009: 103-115.
- [4] 张晓江, 黄云志. 自动控制系统计算机仿真[M]. 北京：清华大学出版社, 2008: 120-135.
- [5] 陈睿璟, 刘晓飞, 罗珊. 无人直升机自主飞行的全数字仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(10): 33-34.

据已有结果预测，大大减小了误码率。又由于在步长中引入了功率自适应，使检出的信号功率不会因噪声的湮没而明显减小。

参考文献：

- [1] 曾伟, 吴国辉, 代冀阳. LMS 自适应滤波算法的改进及性能分析[J]. 计算机仿真, 2011(4): 111-114.
- [2] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京：国防工业出版社, 2000: 249-257.
- [3] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京：清华大学出版社, 2002: 190-195.
- [4] 谢胜利, 何昭水, 高鹰. 信号处理的自适应理论[M]. 北京：科学出版社, 2006: 104-109.
- [5] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 算法分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094-1097.
- [6] 侯强, 吴国平, 黄鹰. 统计信号分析与处理[M]. 武汉：华中科技大学出版社, 2008: 145-155.
- [7] 伊鑫, 张伟, 王忠思, 等. 统筹法在军事通信系统开发中的应用[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 94-96.

(上接第 72 页)

对指标 2，在已完成上述过程的基础上，对笔者提出的改进算法和其它比较算法检出的信号，计算在仿真时间内均衡器输出的平均功率与发射信号功率之比，即输出增益。仿真结果如图 4。

由图 3 可见，在误码率上，大信噪比和小信噪比下误码率均明显小于与之比较的其他算法，特别是信噪比较大时，误码率有 1~2 个数量级的改善。由图 4 可见，在功率增益上，基本 LMS 算法、判决均衡算法等检出的信号功率增益很小，而笔者提出的改进算法即使在信号被噪声湮没时，也能有大于 1 的增益，在大信噪比下增益会明显提高。

3 结论

仿真结果表明：笔者提出的前向预测—判决算法在步长和预测方面的优势，每一步滤波结果先判决后比较误差，能够较好地适应双极性序列，跟踪多径信道，在未知训练序列前后码元相关性时能根