

一种模拟倾转旋翼机动力系统姿态的控制方法

吴海浩 刘丹宁 李伟

(中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

摘要: 随着科学技术的不断发展,舰载机在现代战争中的地位越来越重要。但是普通舰艇受到空间、场地的限制,不可能有很长的起降跑道,所以具有垂直起降功能且能高速巡航的倾转旋翼飞行器越来越受到海军的青睐。倾转旋翼机动力系统原理验证机控制系统模拟倾转旋翼飞行器原理,进行了传动系统原理验证机大姿态润滑试验、倾转减速器运转试验等研究性试验,本文介绍了试验控制系统组成及其实现方法。

关键词: 倾转旋翼机; 倾转推杆; 自动控制

1 系统的原理

系统由试验平台、变频电动机、倾转推杆、倾转减速器、螺旋桨等组成,如图1倾转旋翼原理验证平台所示。试验平台是用以支撑和固定试验件和设备的台架;采用变频电动机提供旋转动力,配装飞机螺旋桨进行加载,模拟发动机输出转速及功率^[1];电动推杆是减速器实现倾转功能的驱动机构,通过电动机带动,将电动推杆的直线运动转换为减速器绕承力筒的旋转运动,实现试验件在0°~95°范围内动作。变频电动机用以提供旋转动力,配装飞机螺旋桨进行加载,模拟发动机输出转速及功率。

系统主要验证如下试验:

- (1) 角度倾转姿态试验,初步验证倾转功能,查看倾转角度范围能否达到要求,以及倾转姿态过程中系统的稳定性;
- (2) 螺旋桨载荷试验,由电动机提供动力,进线加载试验,检验润滑、转矩等性能;
- (3) 带载荷角度倾转姿态试验,由电动机提供动力,在一定的转速和载荷下,考核倾转姿态的工作性能。

2 控制系统原理

试验平台控制系统以可编程(PLC)^[2]为逻辑控制中心,通过PROFIBUS通讯,实现变频器的转速控制、信号反馈、参数监控等;通过TCP/IP与采集系统、上位机进行通讯,实现转速、振动、控制等数据交换;采集系统通过RS485与角位移传感器进行数据通讯。为确保试验安全,系统设有变频电

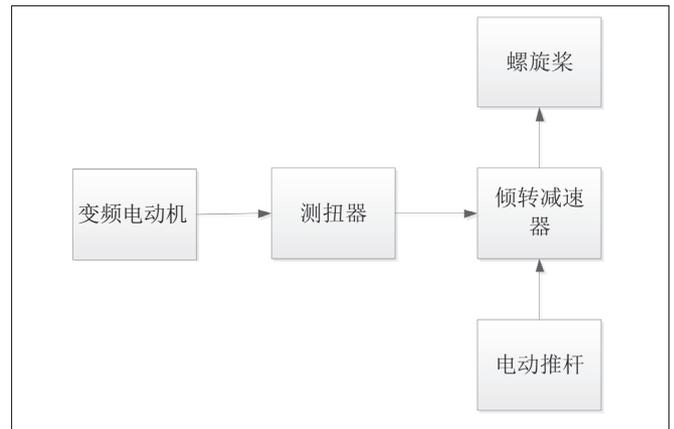


图1 倾转旋翼原理验证平台

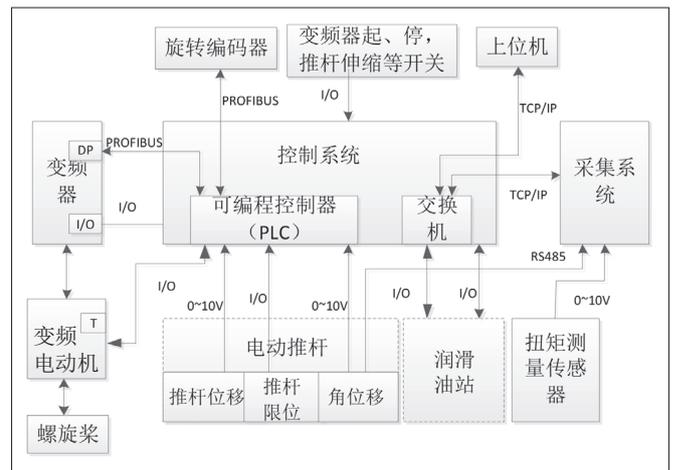


图2 倾转旋翼验证试验平台控制原理图

机绕组温度保护、轴承温度保护、推杆限位等保护功能。

2.1 角度倾转姿态试验

减速器倾转姿态角度通过电动推杆调节^[3],电动推杆是通过电动机带动,将电动推杆的直线运动

转换为减速器绕承力筒的旋转运动，实现试验件在 $0^{\circ} \sim 95^{\circ}$ 范围内动作。通过编码器测量倾转角度测量值，姿态可通过手动、自动调节控制，设有角度限位保护功能。

2.2 载荷试验

载荷试验检查在 0° 角情况下不同载荷情况下的系统工作状态，检查传动系统、滑油润滑是否正常、轴振动是否正常。

动力系统由变频器、变频电动机组成，进行精确转速调节控制，变频器与 PLC 通过 PROFIBUS 通讯进行数据交换，主要包括转速给定、启动、停止、复位等输入信号，同时读取电动机的运行转速、运行电压、运行电流、电动机温度、运行转矩、变频器超温、过压、过载、过扭等数据，PLC、旋转编码器通过 PROFIBUS 通讯对动力单元控制，电动机配置数字编码器进行转速反馈，提高控制精度，电动机输出端配置高精度碟片转矩测量传感器，通过转矩传感器实时监控。

旋转转速可手动、自动进行调节，手动操作通过旋转编码器给定，调节精度 $0.01r/min$ ；自动调节通过上位机输入试验点数据，PLC 根据设定的试验数据自动完成每个点试验。

2.3 带载荷角度倾转姿态试验

在 $0^{\circ} \sim 95^{\circ}$ 不同角度情况下，调节螺旋桨转速进行载荷，模拟不同角度不同载荷下倾转姿态的工作性能。

3 数据通讯

为保障系统通讯快捷、安全，系统采用以太网、PROFIBUS 两种不同通讯方式，与变频器、旋转编码器采用 PROFIBUS 通讯，与数据采集系统采用以太网进行数据交换。两种不同通讯可有效保障试验数据交换速度。

3.1 数据采集系统数据交换

由数据采集系统将发动机数据通过以太网 TCP/IP 协议传输到上位机，通讯速率设置为 10次/s 。上位机软件基于 LABVIEW 平台编写了服务器程序，数据采集系统用 VC 编写客户机程序。服务器与客户机在同一网段内，且双方系统会定期地自动统一系统时间。发动机数据采用多端口通讯，需精确控制的发动机转速和温度值通过专用端口进行传输。

3.1.1 TCP/IP 通讯流程

TCP/IP 通讯流程如图 3 所示，上位机服务器运行后不断地侦听，当客户机需要连接时与其建立连接，然后进行数据通讯；客户机运行后不断地与服务器进行试探连接，与服务器建立连接后进行数据通讯。

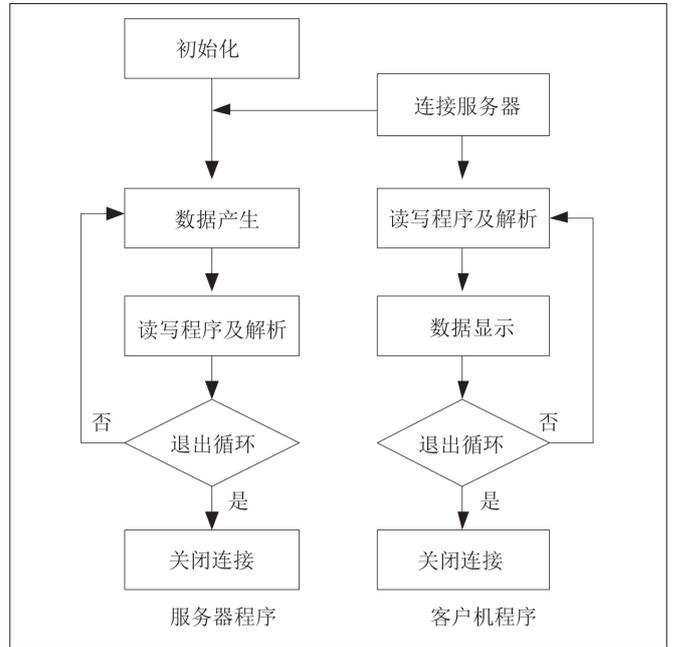


图 3 TCP/IP 通讯流程

3.1.2 通讯数据格式

服务器与上位机成功建立连接后，双方互相发送的数据格式如图 4 所示，通讯数据为固定长度，以约定起始字节开始，并带有时间戳。

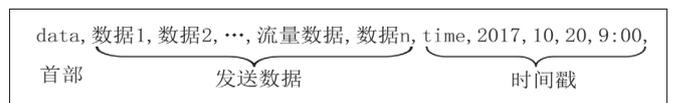


图 4 通讯数据格式

3.1.3 收发数据

上位机软件发送和接受的数据具体如表 1 所示。

3.2 变频器数据交换

变频器、旋转编码器通过 PROFIBUS 进行数据控制通讯，如表 2、表 3 所示。

4 控制系统硬件设计

4.1 拖动系统

4.1.1 变频电动机选择

电动机通过倾转减速器配装螺旋桨，减速器输入侧转速 $2000r/min$ ，对应桨叶转速 $565r/min$ 时，设计功率 $231kW$ ，对应转矩为 $88Nm$ 。电动机输出端由

表1 上位机接收数据

接收数据	数据类型
输入轴转速	浮点型
滑油压力	浮点型
滑油温度	浮点型
倾转角度	浮点型
电动机轴振动	浮点型
试验件振动1	浮点型
试验件振动2	浮点型
试验件振动3	数据类型
转矩	浮点型

表2 PLC接受变频器数据交换

接收数据	数据类型
输入轴转速	浮点型
滑油压力	浮点型
滑油温度	浮点型
倾转角度	浮点型
电动机轴振动	浮点型
试验件振动1	浮点型
试验件振动2	浮点型
试验件振动3	数据类型
转矩	浮点型

表3 PLC发送变频器数据

接收数据	数据类型
输入轴转速	浮点型
滑油压力	浮点型
滑油温度	浮点型
倾转角度	浮点型
电动机轴振动	浮点型
试验件振动1	浮点型
试验件振动2	浮点型
试验件振动3	数据类型
转矩	浮点型

平键轴传递转矩和转速，通过变频器控制，实现电动机输出转速无级可调，电动机在额定转速以上恒功率调速的特点。

变频电动机根据技术指标需求选择ABB电动机，主要技术参数电压：380VAC；额定功率：75kW，额定转速：3000r/min；最大转矩倍数：2.3；效率（100%负载）：96.6%；功率因数（100%负载）0.9。单端轴输出、连续工作，防护等级≥IP55，F级绝缘，B级考核；配置轴承及绕组测温元件，温度传感器均为Pt100，配置测速编码器，强制冷却风扇；配置P+F

RH158N测速编码器进行转速测量。

4.1.2 变频器

根据电动机配套变频器选用ABB的ACS850-04传动模块，重过载功率为90kW；配置进线EMC滤波器（符合C2环境要求），输入电抗器，制动单元，制动电阻，编码器接口模块，Profibus-DP通讯模块；变频器控制精度≥0.01。

4.2 电动推杆设计

电动推杆是倾转姿态功能的驱动机构，通过电动机带动，将电动推杆的直线运动转换为减速器绕承力筒的旋转运动，实现试验件在0°~95°范围内动作。电动推杆由推杆、端头、电动机和旋转轴承组成，电动推杆一端铰接于减速器上，另一端通过螺栓将推杆底座固定在试车平台上。该型电动推杆行程为200mm，最大提升拉力15kN。

5 控制逻辑设计

通过设备初始化后检测系统是否有故障报警，无报警信号可进行试验正常运行，通过手自动调节选择，开始试验件的转速、倾转姿态角度控制。在试验过程中，出现振动过大、滑油压力低等故障时，会自动停止电动机运转，并使倾转姿态角度恢复至0°。

5.1 设备初始化

设备初始化是开启滑油站，并调节滑油倒需要的压力；开启变频器、电动推杆、上位机等电源，扫描与变频器的通讯数据是否正常，并确认是否有报警信息；扫描检查数据采集系统的通讯数据是否正常，确认初始状态值；确认后发送初始化完成信号，允许进入手、自动选择。

5.2 手动试验

手动试验是手动开启变频电动机，并通过旋转编码器进行手动转速调节，确认转速调节到试验目标值；手动起、停推杆电动机，使推杆伸缩到需要的倾转角度值。按照所有的试验点进行手动调节。完成试验后，手动停止变频器、推杆等设备。

5.3 自动试验

自动调节程序是预编辑的试验状态点进行顺序试验，在上位机界面可输入需要试验的状态点的倾转减速器角度、输入转速、停留时间、状态点选择，如表4所示。程序根据状态点自动进行调节，试验结果如图5所示。

根据预设的状态点转速，程序会自动输入变频器

表4 参数设置表

序号	试验状态点	倾转角度	运行转速	运行时间
1				
2				
3				
...				

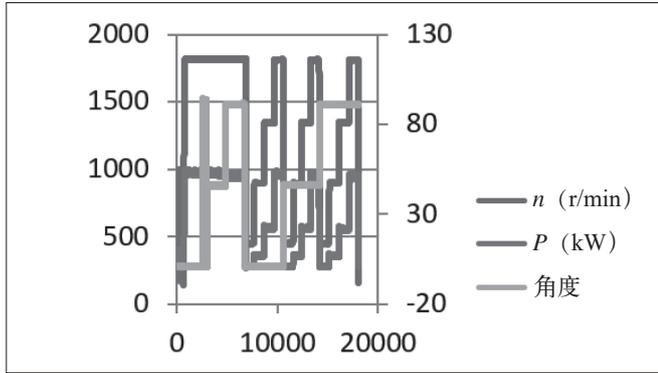


图5 自动试验数据图

进行转速调节，在不同状态点切换时，转速切换步进速率限制为 200r/s，可以保证转速平滑切换，避免试验件振动、阶跃切换等问题。当电动机的实际测量转速与试验件设定的状态点进行对比，进行闭环调节，确保达到需要的转速目标。

倾转姿态是电动推杆电动机旋转，推动伸缩杆移动，电动推杆角度是在外壁安装磁性位移传感器，测量推杆的移动距离，根据推杆移动的距离标定 0° ~ 95° 的位置，根据标定的角度与推杆移动位置，设置数学模型，同时在 95° 位置安装限位开关进行角度保护。

6 安全故障报警

在倾转旋翼机姿态试验过程中，由于倾转姿态变换会导致螺旋桨转矩过载，润滑系统故障，振

动过大等危险，为保证试验安全设定如下保护功能：

(1) 旋转系统设有过流、过载、缺相、过载、电动机绕组超温等保护功能；

(2) 车台设置紧急停车按钮，操作人员可通过紧急停车按钮停止电动机旋转；

(3) 电动推杆设有 0° 与 95° 的限位开关，到限位点可自动停止推杆动作；

(4) 滑油供油压力不低于 0.15MPa，滑油精油温度不高于 110℃ ；

(5) 试验件姿态不大于 95° 或电动推杆行程不大于 200mm。

7 结语

倾转旋翼机姿态试验获得了在不同姿态角度下，不同载荷运行的关键数据；同时检验了减速器、螺旋桨、传动系统的运行状态，为保证后续试验提供了可靠的借鉴价值。

参考文献：

[1] 尹昱康,王红州. 倾转旋翼机的发展 [J]. 兵器装备工程学报, 2018(2):111-113.
 [2] Zhong Liu, Yuqing He, Liying Yang, Jianda Han. Control techniques of tilt rotor unmanned aerial vehicle systems [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017:135-148.
 [3] 薛蒙, 孙强. 倾转旋翼机军事需求与关键技术分析 [J]. 直升机技术, 2020(1):4.

作者简介: 吴海浩 (1979.02-), 男, 汉族, 浙江东阳人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 航空发动机电气设计与试验。