

# 基于嵌入式技术的风洞模拟测控系统设计

斯仁图雅<sup>1,2</sup>

(1. 锡林郭勒职业学院, 内蒙古 锡林郭勒盟 026000; 2. 内蒙古师范大学, 呼和浩特 010022)

**摘要:** 传统风洞模拟测控系统容易受到测试位置干扰, 导致控制效果不佳, 针对该问题, 提出了基于嵌入式技术的风洞模拟测控系统设计; 在系统硬件部分, 根据 IEEE1588 标准, 设计总线, 在印刷电路板 PCB 上, 确定布线层的层数, 避免线路串扰; 使用 AT91 RM9200 驱动模块控制开关, 并在系统中嵌入测量仪器和执行机构; 在系统软件流程设计过程中, 通过嵌入模拟不同湍流特征脉动风场, 结合 PID 算法, 设置阈值并计算风洞模拟数据偏差值, 通过调节积分控制风洞模拟测控系统的运行; 由实验结果可知, 该系统静风状态下, 与实际情况最大误差为 0.01 cm; 吹风状态下, 与实际距离横向最大相差 0.01 cm, 纵向相差 0.01 cm, 具有精准控制效果。

**关键词:** 嵌入式技术; 风洞模拟; 测控系统; 脉动风场; 湍流特征

## Design of Wind Tunnel Simulation Measurement and Control System Based on Embedded Technology

SIREN Tuya<sup>1,2</sup>

(1. Xilingol Vocational College, Xi Linhaote 026000, China;

2. Inner Mongolia Normal University, Huhehaote 010022, China)

**Abstract:** The traditional wind tunnel simulation measurement and control system is susceptible to the interference of the test location, resulting in poor control effect. To solve this problem, a wind tunnel simulation measurement and control system design based on embedded technology is proposed. In the hardware part of the system, the bus is designed according to the IEEE1588 standard, and the number of wiring layers is determined on the printed circuit board PCB to avoid line crosstalk. Use AT91 RM9200 drive module to control the switch, and embed measuring instruments and actuators in the system. In the design of the system software process, the pulsating wind field with different turbulence characteristics is embedded and simulated, combined with the PID algorithm, thresholds are set and the deviation value of the wind tunnel simulation data is calculated, and the operation of the wind tunnel simulation measurement and control system is simulated by adjusting the integral control. It can be seen from the experimental results that the system has a maximum error of 0.01 cm from the actual situation in the static wind state; in the blowing state, the maximum difference between the horizontal and the actual distance is 0.01 cm and the vertical difference is 0.01 cm, which has a precise control effect.

**Keywords:** embedded technology; wind tunnel simulation; measurement and control system; fluctuating wind field; turbulence characteristics

## 0 引言

通过大迎角风洞试验, 了解和测试飞机部件模型或飞机整体模型在风压下的性能。风洞穴是指通过已知风速的空隙气流, 来测定风洞内物体所受的风压<sup>[1]</sup>。将模型放入风洞中, 用电机驱动, 改变模型的空间位置, 通过调整位置进行风压试验, 得到模型在风压下的性能<sup>[2]</sup>。传统的风洞测控系统由于信号电路复杂, 使得风洞试验中最关键的模拟信号极易受到干扰, 测量精度低, 对专用测控系统的依赖程度高, 可靠性低, 由于研发费用高, 操作和移植性差, 导致风洞测控系统的可靠性、速度和精度出现瓶颈<sup>[3]</sup>。

以往系统设计和开发都是采用虚拟仪器技术, 该技术主要是基于计算机及所需的电路板等外设完成计算机测控系统。通过改变飞行器模型的空间位置, 系统达到了

测试的要求<sup>[4]</sup>。尽管本系统的测试效果良好, 但易受测试点的影响, 导致风洞模拟结果准确性较差, 从而导致控制效果较差。针对这一问题, 提出了基于嵌入式技术设计风洞模拟测控系统的方法。风洞测控系统采用嵌入式技术, 正好适应风洞测控对象分散的特点, 可以充分发挥嵌入式系统的抗干扰能力。

## 1 系统总体架构

该系统主要应用于风洞试验中, 其本质与一般工业测控系统相同, 当前主流的风洞测控系统主要包括分布式测控系统和分布式控制系统<sup>[5]</sup>。一般来说, 风洞体积较大, 测量对象分散。基于 VXI、PXI 和现场总线技术的分布式风洞测控系统是近年来发展起来的一个研究热点<sup>[6]</sup>。图 1 中显示了该系统的总体架构。

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-05-13。

作者简介: 斯仁图雅(1984-), 女, 内蒙古锡林郭勒盟人, 讲师, 主要从事计算机科学与技术方向的研究。

引用格式: 斯仁图雅. 基于嵌入式技术的风洞模拟测控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 84-87, 94.

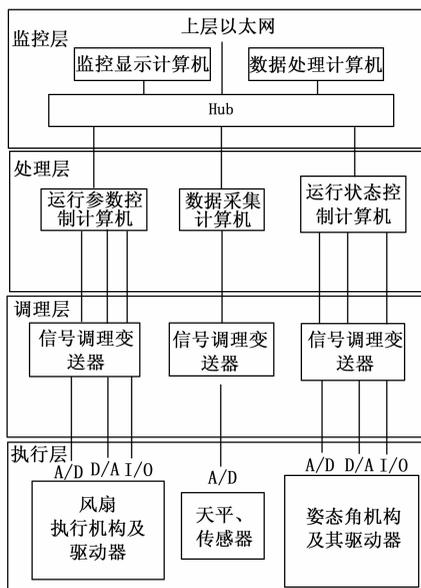


图 1 系统总体架构

由图 1 可知，分布式风洞测控系统的处理层和调整层的大部分功能都嵌入了执行层的设备和机构中。处理层负责采集风洞测试数据，监控层对系统运行状态进行监控，调理层对风洞数据进行信号调制，便于信号的传输和接收，执行层包括风扇执行机构及驱动器、姿态角机构及驱动器，可实现风洞模拟测控系统的实际工作运行。各智能单元通过某种标准的现场总线连接，利用现场总线技术实现实时、双向数据通信，还可以与监控层的监控计算机进行通信<sup>[7]</sup>。

## 2 风洞模拟测控系统硬件设计

风洞模拟测控系统硬件主要包括总线设计、驱动器模块、开关控制模块、分布嵌入式测控模块设计及印刷电路板 PCB 设计。采用 CAN 总线保证风洞现场总线传输速度，设计伺服驱动电机控制飞机模型的空间位置，采用 FPGA 控制开关的驱动电路，提升控制响应速度。基于以太网设计分布式嵌入式测控系统，自主完成风洞测控功能。最后对印刷电路板 PCB 进行设计，提升 PCB 的抗干扰能力，保证风洞模拟测控系统对系稳定性和实时性。

### 2.1 总线设计

在风洞试验装置中，试验段马赫数、总压等参数的测量和执行机构离这些参数的控制很远，需要及时、快速地传递数据，因此要求风洞现场总线传输速度快、距离远<sup>[8-9]</sup>。采用以太网作为现场设备之间的通讯网络平台，采用 CAN 总线，作为现场总线技术，其总线驱动器 PCA82C250 能够为总线提供差分传输及差分接收功能。它可以在两条具有差分电压的总线上以高达 1 Mbps 的比特率传输数据，并且该总线可以连接 110 个节点。其高效传输性能避免了现场总线技术与计算机网络技术的脱节，可将风洞现场总线技术与传统网络技术相结合，提升通讯性能。同步和触发是嵌入式测试系统中的一个重要问题，它能保

证多台测试设备的协同工作，保证测试数据的可靠性。根据 IEEE1588 标准，同步和触发分辨率测试系统可以达到 10 ns 左右<sup>[10]</sup>。

### 2.2 驱动器模块

飞行器模型是风洞试验控制系统的控制对象，它由伺服电机控制。伺服器从伺服器驱动器接收指令，并把这些指令连接到伺服器。它由工控箱、运动控制卡、显示、打印及其它外围设备组成<sup>[11]</sup>。本系统采用运动控制卡控制系统，为控制系统的应用软件提供操作平台。编码传感器连接到飞行器模型上，获得飞行器模型的实际位置，将数字信号反馈给运动控制卡<sup>[12]</sup>。采用两个伺服电机，利用光码传感器装置控制和测量飞机模型在两个垂直面上的摆动角度，来控制飞机模型的空间位置。

### 2.3 开关控制模块

开关控制模块负责开关控制泵，电磁阀，冷盘，通过输出高能量和低能量信号实现对开关的控制。三相交流功率为 380 V，电磁阀和冷板运行功率为 24 VDC，说明 AT91RM9200 不能直接驱动该装置<sup>[13-15]</sup>。采用 FPGA 控制开关的驱动电路，通过该集成电路可以简化接口，提升控制响应速度。

### 2.4 分布嵌入式测控模块设计

分布式嵌入式测控系统将传统测控系统的 3 个节点分别为风洞运行参数节点、风洞运行状态节点和风洞数据采集节点，嵌入到测控设备和执行机构中。通过 Internet 连接 3 个智能节点，与主机通信<sup>[16-17]</sup>。分布嵌入式测控模块如图 2 所示。

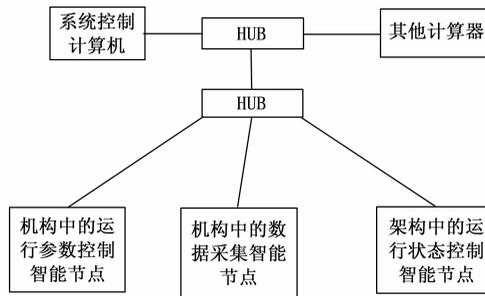


图 2 分布嵌入式测控模块

基于以太网的分布式嵌入式测控系统由智能单元、系统监控单元和以太网构成。各智能单元基本相同，由以太网单元控制器和相应的处理信道模块组成，通过不同的硬件处理信道模块及相应的单元软件，实现各智能单元的不同功能；各智能单元控制器负责本地计算和处理，并与网络通信。单元控制器和单元内部处理通道模块采用嵌入式实时操作系统，既能保证单元模块的内部性能，又能充分发挥以太网实时总线的优势。各单位可通过网络进行双向通信，或与监控机进行通信，整个系统可由系统监控机控制，各智能单元无需上位机参与就能自主完成风洞测控功能<sup>[18-20]</sup>。

### 2.5 印刷电路板 PCB 设计

风洞模拟测控系统对系统稳定性和实时性的要求很高，

所以在具体实现时要特别注意 PCB 的抗干扰能力。此外，由于系统具有高精度的 A/D、D/A 转换电路和各种类型的差分信号对，因此必须保证系统信号的完整性。在设计过程中充分考虑了叠层设计、布局布置和系统布线。

### 2.5.1 叠层设计

由于系统尺寸要求清晰，芯片密度高，布线紧凑，系统时钟为 72 mHz，因此需要按照 5/5 规则设计多层电路板。多层 PCB 设计的主要工作是确定 PCB 的每一层布局。系统的工作频率、接线数量和费用都必须考虑。在电性方面，需要综合考虑时序、信号完整性和电磁兼容性等因素对系统性能的影响。

合理的设计可以提高产品的性能。在多层 PCB 设计中，首先要确定线路板的布线层数和功率层数。增加接线密度可以减少接线层数，而线路密度过高也会引起信号间串扰的增加，从而影响最大的接线力。串扰通过影响信号的时序和接收电路的噪声容限来影响电路的正常工作。另外，如果传输线承受的电流过大，导线之间可能会发生击穿。线密法测量线路板的成本，估算串扰的影响，从而确定布线层的层数。

### 2.5.2 叠层分配

划分好等级后，下一步就是对等级进行合理分配。根据以下原则，高速信号层应在电源层附近，而非电源层附近。利用该方法，高速信号层能快速地将高频干扰信号放入结构中，而靠近电源层时，又能将高频干扰传播到电源的其他电路中。能源层应尽量靠近地面，而一般的能源层应尽量靠近地面，以减少噪音。它还可以屏蔽分布在能层处的辐射电流。在此基础上，图 3 给出了系统 PCB 的 6 层结构。

## 3 风洞模拟测控系统软件设计

系统应用软件由显示模块、控制模块和硬件设置模块组成，通过硬件接口接收传感器双轴迎角、转速等信号，并在控制面板上显示数值。本系统由静力测试部分、吹风测试部分和整体控制部分组成，根据控制要求，采集控制信号，通过运动控制卡将控制信号发送给伺服电机。

### 3.1 不同湍流特征脉动风场嵌入模拟

- 1) 采用顶部单扇风机吸气、底部单扇风机吹气和关闭排风装置的方法模拟龙卷风风场；
- 2) 上单风扇，下单风扇，排气装置关闭。从塔顶进入塔底的气流，从而实现下风量场的模拟；

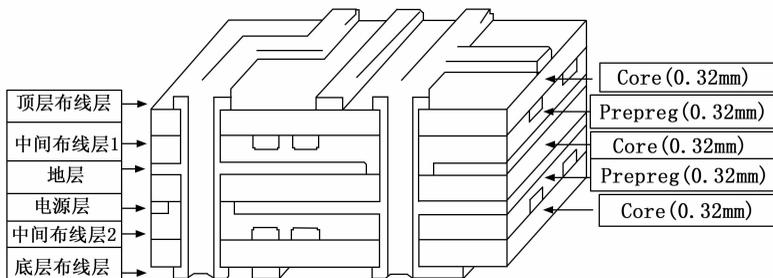


图 3 PCB 分层

3) 采用旋风驱动顶上单扇风机俯仰旋转，使龙卷柱产生扭曲变形，从而实现龙卷场的自然扭曲模拟；

4) 第二级旋转载驱动轴向的第一个底单风扇，在水平和垂直方向上摆动，并调整喷射入射风角流入区域的第一个底单风扇，以便调整涡流的风场，从而使之大于龙卷风和下击暴流；

5) 在此基础上，利用传统的多扇风机阵列风洞对正常风场和脉动风场进行模拟，通过控制二底单扇风机的脉动参数，对具有不同紊流特征脉动风场进行模拟。

这个风洞是由单扇顶部，第一个底部和第二个底部单风扇组成，单扇可以俯仰旋转，模拟龙卷风和下击风场龙卷风失真和可变涡流比例，并与第二个底部单风扇的轴向波动和垂直方向有关。

### 3.2 总体控制流程

数字 PID 与模拟 PID 相比具有更大的灵活性，可根据控制系统的不同而有所改进。比如，在普通数字 PID 中，为消除稳态残差而引入的积分环节，在系统启动时会输出较大的偏差，使设定值有很大的增减，累积的积分作用会产生很大的超调甚至振荡。为消除稳态残差，积分函数必须保持不变。

针对积分过程中存在的过度调整问题，提出了积分分离 PID 算法。积分 PID 是一种消除或降低输出值与设定值偏差较大时对积分的作用，避免积分过多。当输出接近设定值时，引入积分来消除稳态误差，提高了控制精度。下面是具体的步骤。

首先，根据情况预设阈值  $\alpha$ ：

1) 当偏差值较大时，即  $|f(x)| > \alpha$ ，取消积分控制，可避免过调过大，同时系统响应速度也较快；

2) 当偏差值较小时，即  $|f(x)| \leq \alpha$ ，加入积分控制，以保证系模拟精度；

PID 控制程序流程，如图 4 所示。

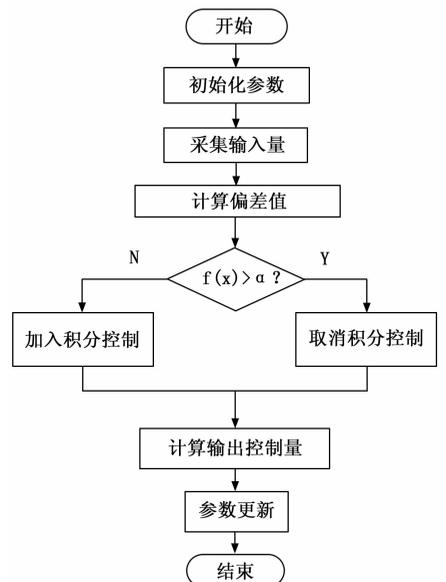


图 4 PID 控制程序流程

### 4 系统测试

为了验证基于嵌入式技术的风洞模拟测控系统设计合理性，进行系统测试。风洞模拟测控系统现场图如图 5 所示。



图 5 风洞模拟测控系统现场图

#### 4.1 测试装置设置

风扇阵列风洞结构示意图如图 6 所示。

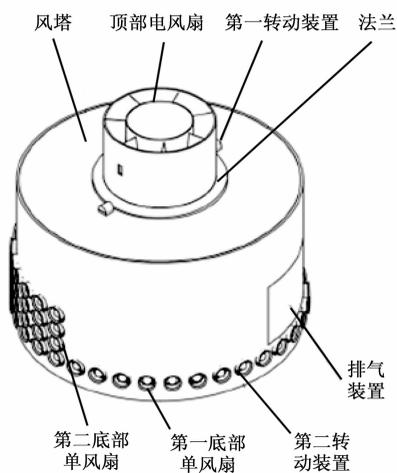


图 6 风扇阵列风洞结构示意图

风塔顶部设有收容顶部单风扇开口，在该开口中，顶部单风扇对风塔内部吹气或者吸气，并在开口两侧设置驱动顶部单风扇转动第一装置。在单风扇最下端沿着风塔周围形成一圈排列的风扇，风扇位于风塔一侧，而风塔另一侧设有与第二底部单风扇相对应排气装置。

#### 4.2 测试结果与分析

以航天器在空中运行为基础，采集风洞模拟系统当前实际转速，计算控制精度。结果如表 1 所示。

表 1 风洞模拟测控系统转速控制精度

给定值/rpm	实测值/rpm
2000	2004
2500	2502
3000	2999
3500	3501
4000	4003

对转速的控制精度平均值为 99%，证明了该系统的控制精度较好。

在此基础上，分别使用虚拟仪器技术和嵌入式技术对风洞模拟测控系统的控制效果对比分析。在静风和吹风状态下，测试两种技术的控制精度。

##### 4.2.1 静风状态

在静风状态下，分别使用两种技术对系统控制效果进行对比分析，对比结果如图 7 所示。

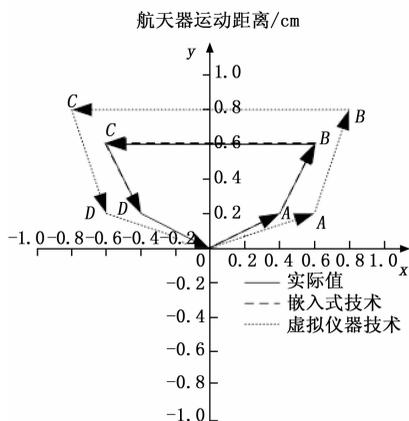


图 7 静风状态下两种技术控制效果对比分析

由图 7 可知，使用虚拟仪器技术控制的航天器运动轨迹与实际情况不一致，A 点、D 点均与实际距离相差 0.2 cm；B 点、C 点均与实际距离横向相差 0.2 cm，纵向相差 0.2 cm。而使用嵌入式技术控制的航天器运动轨迹与实际情况基本一致，最大误差为 0.01 cm。

##### 4.2.2 吹风状态

在吹风状态下，分别使用两种技术对系统控制效果进行对比分析，对比结果如图 8 所示。

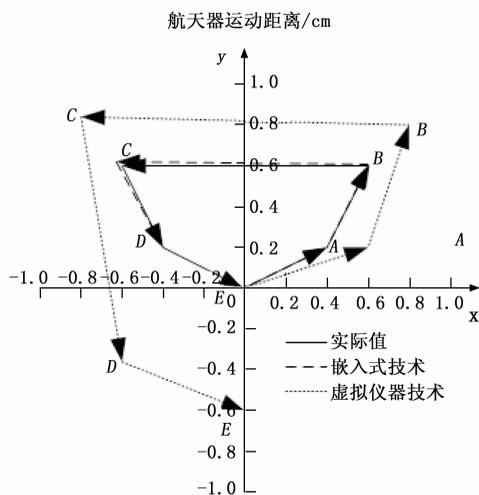


图 8 吹风状态下两种技术控制效果对比分析

由图 8 可知，使用虚拟仪器技术控制的航天器运动轨迹与实际情况不一致，A 点与实际距离相差 0.2 cm；B 点与

分析表 1 可知，基于嵌入式技术的风洞模拟测控系统

(下转第 94 页)