

某型组合速表检测系统设计

符 鹤¹ 徐爱民² 高 萌³

摘要: 为满足对某型组合速表的性能检测的需求, 在该产品的结构、系统组成、功能分析的基础上, 使用计算机和数据通讯卡 (ARINC 429) 搭建检测系统, 并结合产品测试的流程和需求在 VC++ 平台上编写测试软件。实验结果证明, 该套检测系统运行稳定可靠, 操作简便, 已应用于该产品的检测中。

关键词: ARINC 429; 组合速表; VC++

引言

在现代航空电子系统中, 大气数据分系统犹如飞机的“感官神经”, 而组合速表作为该分系统的核心终端设备, 是飞行员获取关键飞行参数的重要窗口^[1]。其通过直观的指针摆动与数字显示, 将飞机的马赫数、指示空速、真空速等核心大气数据实时呈现, 这些数据不仅是飞行员制定飞行策略、调整飞行姿态的依据, 更是保障飞行任务顺利完成的关键要素。一旦组合速表的指示出现偏差, 小则导致航线偏离、燃油消耗异常, 大则可能引发失速、超速等严重飞行事故, 直接威胁飞行安全。然而, 长期的高空复杂环境运行、频繁的振动冲击以及电子元件的自然老化, 不可避免地会导致仪表性能衰减。因此, 对组合速表进行定期校验与精密修理, 成为保障飞行安全的必要举措。

一、系统整体设计

与以往传统的膜盒式仪表不同, 该型组合速表内部没有膜盒等气压感受元件。该型组合速度表采用机电一

体化结构设计, 电源转换模块: 将 28V 直流输入转换为多路直流稳压输出以供给其他模块使用; 信号处理单元: 接口板用于接收大气数据系统送来的总线数据并进行处理; 电机驱动板采用 PWM 闭环控制, 可达到较高的定位精度。机械传动系统: 三级减速齿轮组配合稀土永磁步进电机及数码轮采用光学编码器定位。(见图 1)

该组合速度表又用于显示马赫数、真空速、指示空速, 但该表并不对空气的动压、静压进行感知, 它与大气数据系统的联系仅为几根数据线。它接收大气数据计算机产生的总线数据来进行各项数据的解算^[2]。

它能同时显示三种关键速度信息, 马赫数、真空速、指示空速。这些数据被大气数据计算机发送时已进行了特殊的编码以便组合速表在接收到总线数据后能分辨出是表示哪种参数的数据以及它确切的数值。

基于对该组合速表的结构和功能分析发现, 该组合速表是一个典型的机电产品, 内部不再对气压进行处理, 为保证测试的精度, 它的测试需要脱离掉气压的束缚。

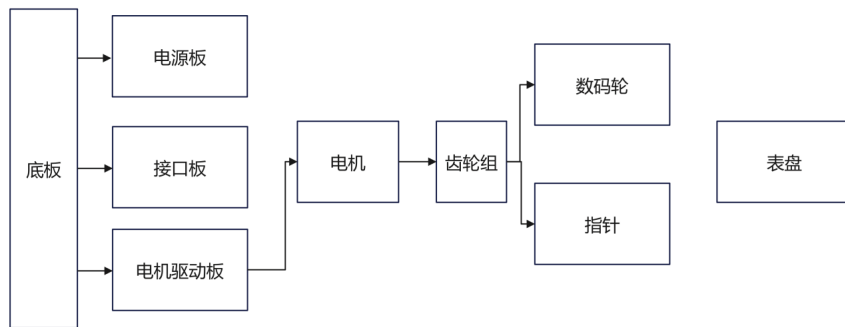


图 1 组合速表结构示意图

作者简介:

1. 符鹤 (1978-), 男, 汉族, 籍贯: 湖南, 本科学历, 专业研究方向: 航空维修。
2. 徐爱民 (1978-), 男, 汉族, 籍贯: 湖南, 本科学历, 专业研究方向: 航空维修。
3. 高萌 (1989-), 女, 锡伯族, 籍贯: 辽宁, 本科学历, 工作单位: 长沙五七一二飞机工业有限公司, 专业研究方向: 航空维修。

测试可以离开大气数据计算机，但大气数据计算机给该型组合速表发送的总线数据在测试中必不可少，因此总线数据的获取、解析、复写就显得尤为关键。以上分析表明，该型组合速度表的测试重点应从传统的气压环境验证转向数据链路的完整性验证。采用开发专用的总线数据模拟测试平台，以实现高效、精确的自动化测试。

因此对此该型组合速表进行检测其设计检测系统的设计可以分为如下四个阶段：

①数据采集阶段：通过总线监听设备（如协议分析仪）实时捕获大气数据计算机输出的标准总线数据（ARINC 429/RS-422等）记录完整通信报文，包括同步头、数据帧、状态字等关键字段建立原始数据库存储不同飞行状态下的数据样本。

②逆向工程总线通信协议：确定数据帧结构（位宽、校验方式、波特率、标志位等），解析参数编码规则，建立物理量与数字量的映射关系表，验证数据更新时序（典型50-100ms周期）。

③信号模拟阶段：选型工业级通讯板卡将分析出的串行数据发送给该型组合速表。

④测试系统集成：开发可视化测试平台实现自动测试流程。

二、通讯数据的采集

搭建由三部分组成的闭环测试环境：全/静压测试仪采用XX-3000型精密压力控制器（精度0.01%FS）、大气数据计算机、数据采集系统配备PXIe-4309通讯数据卡（支持ARINC 429双通道采集）。在全/静压测试仪上配置，模拟动压，模拟静压，模拟高度，大气温度等参数，将动静压的管路连接到大气数据计算机上。建立气路连接（需进行5psi保压测试）配置总线终端电阻（ $75\Omega \pm 1\%$ ）。执行三级压力扫描测试：静态特性测试（21点标定）动态响应测试（0.5Hz斜坡信号）故障注入测试（模拟管路泄漏）。

采集参数技术指标采样率 $\geq 100\text{kHz}$ （满足200Hz更新率要求）触发方式上升沿触发+软件触发双模式数据存储格式TDMS+CSV双备份对大气数据计算机总线出口上的数据进行采集、存储。该方案建立了标准化的航空电子设备测试流程，通过精确的压力控制和总线数据分析。

三、测试数据解析

由于全/静压测试仪模拟范围：50-1100hPa，压力控制分辨率： $\pm 0.05\%FS$ ，温度漂移影响： $0.02\%/^{\circ}\text{C}$ 。为减少误差带来的影响采取多点采样策略每个测试点位执行：20次连续采样（间隔500ms）并剔除 3σ 外的异常值后计算加权平均值^[3]。并做重复性测试，同一工况下进行5组采样，要求组间偏差 $<0.1\%FS$ 。

该方案通过建立科学的误差抑制体系，在设备限制条件下仍能获得可靠测试数据。采用动态补偿与统计处理相结合的方法，将测量不确定度控制在0.15%FS以内，满足测试要求。

通过示波器捕获和逻辑分析仪解码，分析关键特征包括：传输速率：低速模式 $12.5\text{kHz} \pm 1\%$ （周期 $80\mu\text{s}$ ），数据格式：32位字结构（8位标签、21位数据、3位SSM+奇偶校验）电气特性：差分电压数值。确认被测系统采用标准ARINC 429总线协议。

对采集到的数据进行解析，推断出ARINC 429的编码格式并可得知其波特率。为了能够满足更多测试点的要求，需要找出串行数据与各指示值之间的关系^[4]。

在函数关系构建阶段，根据数据分布特性选择合适的拟合算法。对于真空速与串行数据的关系，由于其呈现非线性特征，采用最小二乘法结合多项式拟合，通过不断调整多项式阶数，使拟合曲线与实测数据的均方误差最小化，最终确定最优的多项式函数 $f(v)$ 。对于马赫数与串行数据的关系，采用分段函数拟合策略，最后整合为完整的函数 $g(M)$ 。指示空速与串行数据的关系则基于流体力学公式，结合实测数据采用非线性回归算法，建立精确的函数 $h(v)$ 。经测试，真空速函数的RMSE控制在0.5以内，马赫数函数在全量程范围内误差不超过0.01马赫，指示空速函的精度达到0.1，满足航空仪表高精度测试要求^[4]。这些函数关系的成功构建，为组合速表的自动化测试与故障诊断提供了可靠的数学依据，使检测仪能够快速、准确地将串行数据转换为直观的仪表参数，极大提升了测试效率与准确性。

四、信号模拟

本系统采用陕西正鸿航科电子有限公司研发的ZHHK429-USB-22型USB总线接口板卡作为核心通信单元。该设备具有以下技术特性：接口类型：USB2.0高速接口（兼容USB3.0），工作温度： $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ 军工业级宽温设计，通道配置：2路独立发送通道（TX1/TX2），协议支持：完全符合ARINC 429规范HB6096标准，波特率范围：支持12.5K/48K/100Kbps三档可调。

其内置有专用协议模块，可以实现计算机系统与航空总线的通信，通过调用板卡提供的应用程序接口函数（API）能够实现ARINC 429数据的收发^[5]。

```
class ZH429_API {
public:
    int SetLabel(uint8_t ch, uint32_t label);
    int SendData(uint8_t ch, uint32_t* data, uint16_t len);
    int GetStatus(uint8_t ch);
};
```

该数据卡具有独立的发送和接收通道。由于要测试的该型组合速表仅需要接收 ARINC 429 数据。本测试系统中对该数据板卡仅使用其发送功能，在软件上仅做发送数据的配置。通道资源分配方案禁用接收通道（RX1/RX2）电源供应，物理隔离接收电路（降低功耗 15%）保留发送通道（TX1/TX2）全功能支持。

// 初始化代码示例

```
ZH429_Init(DEVICE_MODE_TX_ONLY);
```

```
ZH429_DisableChannel(RX1);
```

```
ZH429_DisableChannel(RX2);
```

应用层参数设置，数据发送模式：周期发送（默认）/事件触发定时器分辨率：1 μ s 精度，缓冲区管理：双缓冲乒乓操作。消除接收中断处理开销，发送 DMA 通道独占使用优化字间隔控制算法。

五、测试系统集成

该组合速度表采用多参数交叉验证设计理念，其核心工作机制要求同时接收马赫数、真空速）和指示空速三个关键飞行参数。这三个参数通过 ARINC 429 数据总线以 32 位字格式传输，更新频率通常为 50–100Hz。设备内部设有三重数据校验机制，任何单一参数的缺失或异常都会触发系统保护逻辑。当检测到以下情况时会升起故障旗：任一参数丢失超过 200ms，参数间逻辑关系不成立，数据跳变率超过 10%/s^[5]。

组合速度表的性能检测采用分项渐进式测试方法，这是由航空电子设备验证规范的标准化流程。整个检测过程需要通过总线实时监控设备状态字，确保故障旗的正确触发机制。这就要求在程序中给出主要检测项目数据的同时也要给出其他两项的数据。例如：做真空速 600m/s 的检测时，程序中除了需要给出表示真空速 600m/s 的数据外还要给出合适的马赫数和指示空速的值。

在新型组合速表检测仪的软件开发中，为彻底解决传统手动测试模式的效率瓶颈与操作复杂性问题，团队基于模块化、智能化设计理念，构建了高度自动化的测试程序系统。该程序采用图形化用户界面（GUI）开发技术，将复杂的串行数据协议解析与测试指令生成过程完全封装于后台，为操作者提供了简洁直观的交互体验。

在测试流程设计上，引入“一键式”测试机制。操作者无需掌握底层的串行通信协议细节，仅需在可视化操作界面的下拉菜单中，选择诸如“指示空速测试”“真空速测试”等具体检测项目，系统便会自动从预存的测试数据库中调取对应参数组，按照航空标准协议格式生成完整的测试指令数据包。例如，在进行指示空速测试时，程序会根据预设的测试点，自动生成包含不同高度、温度、气压条件下的动压与静压模拟数据，通过串行总线以精确的

波特率、校验位配置发送至组合速表。经实际测试对比，采用该自动化测试流程后，单项目平均测试耗时从传统手动输入的 15 分钟缩短至 3 分钟以内，效率提升高达 80%。

六、测试验证

在测试系统实际运行过程中，当组合速度表通过专用航插线缆与测试系统完成物理连接后，操作者在测试界面的树形目录中选择具体测试条目，如“指示空速测试”或“马赫数测试”。此时，程序立即启动多线程处理机制：主线程负责实时更新界面状态显示，确保操作可视化；子线程则根据所选测试条目，向 ARINC 429 数据通讯卡发送包含特定大气参数（如高度、静压、动压）的测试数据帧。例如，在进行马赫数测试时，子线程会按照预设的测试序列，以每秒 10 帧的速率发送不同马赫值对应的 ARINC 429 数据，驱动组合速度表的指针电机或数码轮驱动电路动作。随着测试数据的持续传输，组合速度表的指针开始平稳转动，数码轮快速切换，精准指示出与测试数据对应的马赫数、指示空速或真空速数值。同时，程序通过通讯卡的接收通道实时采集仪表的反馈数据，在界面上同步显示实际指示值与理论测试值的对比曲线，方便操作者直观判断仪表性能状态，整个测试过程流畅高效。

结语

为满足某型组合速表性能检测需求，本文提出一种集成化、智能化的检测仪设计方案。在系统架构层面，采用计算机作为控制中枢，确保检测任务的高效、稳定运行。在通信链路设计上，深度融合 ARINC 429 等航空标准总线通信技术，实现与组合速表、大气数据计算机系统之间的高速、可靠数据交互。通过自动化测试流程编排，大大提高检测效率和准确度。经实际测试验证，该检测仪将组合速表的单次检测时间缩短 70% 以上，故障诊断准确率提升至 98%，显著提升了航空维修保障效率与可靠性。

参考文献

- [1] 赵淑荣, 罗云林. 大气数据系统 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004
- [4] 张毅, 杨秀霞, 周绍磊. 大气数据测试系统中 ARINC 429 信号解码实现 [J]. 计算机技术与应用, 2001, 21: 41–48
- [2] 王艳永, 张德宝, 戴磊, 等. 通用型大气数据计算机自动测试系统的研制 [J]. 航空计算技术, 2003, 33 (3).
- [3] 周庆, 刘斌, 余正伟, 等. 综合模块化航电软件仿真测试环境研究 [J]. 航空学报, 2012, 33 (4): 722–733.
- [5] 宋东, 叶浩, 周宇晗. 大气数据计算机仿真系统设计可与可信度分析 [J]. 计算机仿真, 2009, 26 (1): 65–69