

基于 STM32 的气象数据在线监测仪设计

黄飞龙, 黄海莹, 何艳丽

(广东省气象探测数据中心, 广州 510080)

摘要: STM32 系列微控制单元 (MCU) 无论是运行速度、存储空间还是功能接口均远胜于 C51 系列单片机, 采用 STM32 芯片能够提高气象数据在线监测仪整体性能; 文中首先对监测仪进行内部结构与整体设计, 其次在阐述气象传感器工作原理、信号类型特点的基础上进行了循环采样设计, 最后介绍了数据质量控制方法和存储策略; 经测试, 监测仪实现了设计目的, 各个通道的采样性能以及气象要素测量性能均能够满足气象数据在线监测的需要; 该设计可以为基于 STM32 的其他小型环境探测设备的研制提供参考。

关键词: STM32; 气象数据; 在线监测

Design of Meteorological Data Online Monitor Based on STM32

Huang Feilong, Huang Haiying, He Yanli

(Guangdong Meteorological Observation Data Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The STM32 series MCU is far better than the C51 series single-chip microcomputer in terms of operating speed, storage space or functional interface, and using STM32 chip can improve the overall performance of meteorological data online monitor. Internal structure and overall design of the monitor are firstly introduced. Secondly, the cyclic sampling design is carried out based on the description of the meteorological sensor working principle and signal type characteristics. Finally, the data quality control method and storage strategy are introduced. Test results show that the monitor achieves its design goal. Sampling performance of each channel and measurement performance of each meteorological element can meet the needs of meteorological data online monitoring. This design can provide reference for the development of other small environmental detection equipment based on STM32.

Keywords: STM32; meteorological data; online monitoring

0 引言

地面气象观测对象包括地面附近的空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、自然水面蒸发量、降水量、大气能见度、日照时间、云高、云状、雷电等等, 其中温度、湿度、风向、风速、气压和降水是常规观测项目^[1]。气象环境数据是慢变量, 而气象观测仪器是在野外工作, 为了剔除错误和干扰数据, 平滑波动信号, 一般情况下以每分钟的平均值作为气象瞬时值^[2], 分钟数据实时传输到中心数据库以供气象预报、防灾减灾等应用。

目前国内气象行业已经有几万个气象数据在线监测站, 但大部分监测仪主机都是采用 C51 系列单片机作为中央处理芯片, 工作频率低, 存储能力有限, 功能接口简单, 缺乏扩展性。工作频率低造成采样密度低, 样本数量有限, 进而导致数据的可信度满足不了要求。存储能力有限, 当恶劣天气导致野外观测仪器实时传输失败的时候, 重要的气象观测数据不能尽可能多的保存下来, 以待事后的灾害分析。有的采集器只能实现简单要素的采集和数据传输,

例如单雨量站; 绝大部分的采集器不带显示功能, 并且只能保存半个月的数据^[3]。因此当数据质量和数据安全日益被重视的时候, 采用 C51 单片机的气象数据监测设备已经不能满足现代气象监测发展的需要^[4]。

1 结构及原理

监测仪基于现代总线技术和嵌入式系统技术构建, 采用了国际标准并遵循标准、开放的技术路线进行设计, 它由硬件和软件两大部分组成。硬件包括采集器、外部总线、传感器和外围设备四部分; 软件主要为嵌入式软件采集处理。

监测仪主机内部结构如图 1 所示。

主采集器是监测仪的核心, 由硬件和嵌入式软件组成。主采集器嵌入式处理器选取 STM32F207 为 ARM9 系列的 32 位处理器, 具有强大的性能如下: 以 120 MHz 高速运行时可达到 150DMIPS 的处理能力; 自适应实时闪存加速器使得 STM32F2 可以在片内闪存, 具有高达 1 M 字节的片上闪存和 128 K 字节的内嵌 SRAM; 具有灵活的高速外部存储器接口用于扩展片外存储器和外设; 3 个 12 位采样率高达 2M/秒的 ADC 模块; 翻转速率高达 60 MHz 的 GPIO; 实时时钟电路和 USB/CAN 总线/RJ45 接口等等^[5]。主采集器还为处理器配置了 16 位的 A/D 转换电路、大容量的程序和数据存储器、监测电路、触摸显示屏和信号接线板等。

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-07。

基金项目: 广东省气象局“气象信息大数据创新团队”项目 (201507)。

作者简介: 黄飞龙 (1980-), 男, 广东郁南人, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事探测传感器研发与数据采集工作方向的研究。

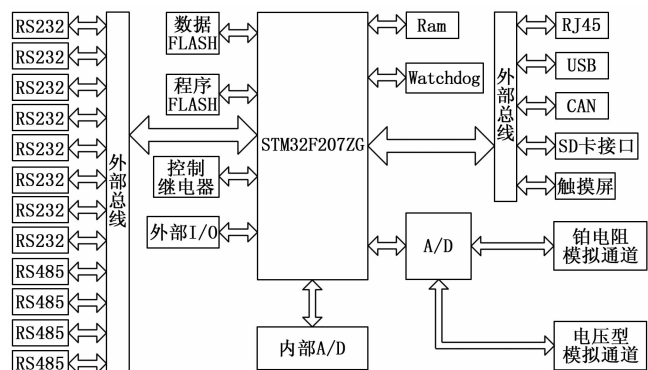


图 1 监测仪内部结构

硬件系统能够支持嵌入式实时操作系统的运行^[6-7]。

主采集器直接挂接的传感器包括: 气温、地温、湿度、气压、降水量、风向、风速、蒸发和能见度^[8-9]。监测仪的信号连接示意如图 2 所示。各种传感器信号线通过信号接线板与监测仪相接, 监测仪进行数据采集与处理之后通过 2 路^[10]RS232 端口分别发送到触摸显示屏和远距离通信模块, 实现远程无线传输和设备监控。

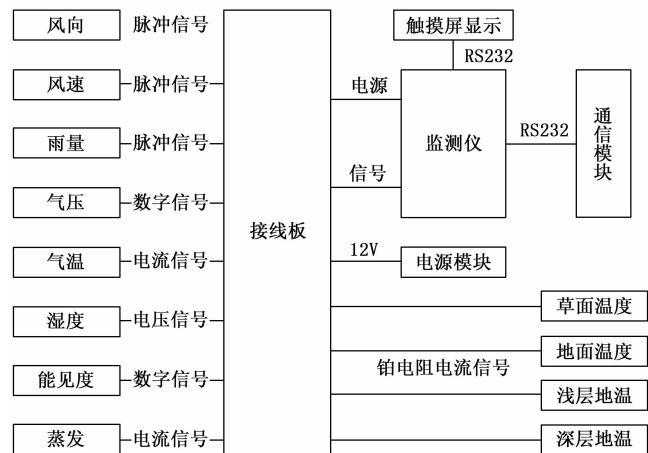


图 2 监测仪连接示意图

如图 2 所示, 自动气象站使用的传感器, 根据输出信号的特点, 可分三类。第一类是模拟传感器: 输出电压或者电流模拟量信号的传感器, 包括气温、湿度、蒸发、草面温度和地面温度等; 第二类是数字传感器: 输出数字量(含脉冲和频率)信号的传感器, 包括风向、风速、雨量等传感器; 第三类是智能传感器: 一种带有嵌入式处理器的传感器, 具有基本的数据采集和处理功能, 一般采用 RS485/232 协议, 输出串行数字信号, 包括气压和能见度传感器。

2 数据采集

为了在增加单位时间内的采样频率的同时不影响外部中断响应的实时性, 设计了循环采样设计, 将各种要素采样程序和时钟中断处理、外部中断处理程序放在一个大循环里面。在详细分析各气象传感器信号特征的基础上设计

了各要素采集的信号流程和关键器件配置, 并按气象观测标准对传感器信号进行采集。

2.1 循环采样设计

由于气象瞬时值和极值统计一般以分钟为基本单位长度, 设计每秒钟内的数据采集循环如图 3 所示。软件每秒钟查询是否到达下一分钟, 如果没有, 则进行温度各通道的数据采集, 包括发送指令选择被采集通道、延时、返回信号滤波、采样前充电、模数转换和读取采样值等序列程序。然后进行湿度各通道的数据采集, 采集时序流程与温度相同。如果出现时钟中断, 运行中断任务, 包括雨量信号探测和识别、风向读取、风速读取转换等。如果出现外部触发中断(主要指串口中断), 则运行气压采样处理、能见度采样处理或者是通信交互程序。

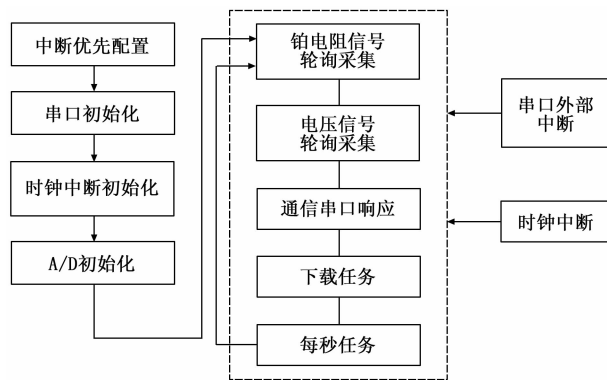


图 3 循环采样

图中可见嵌入式程序的大循环中还包含下载任务和每秒任务。下载任务指采集器接收到下载多条数据命令之后在循环中逐一发送, 避免连续发送多条数据的情况, 因为串口发送中断占用系统时间过长会影响其他任务的执行。每秒任务指设备定时自检和按照气象观测要求定时运行的采样数据质量控制、分钟气象瞬时值计算、数据储存和分钟数据显示任务。

2.2 温度采集

温度传感器采用铂电阻, 其阻值随着温度的变化产生线性变化, 当温度为 0℃ 时, 铂电阻为 100Ω。模数转换采用 16 位芯片 AD7792, 参考电平 5V, 能够转换 0~5V 信号电压。温度采集的硬件原理图如图 4 所示, 标准电阻为精度为万分之一的 100Ω 电阻, 其电阻值不随温度的变化而变化。通过比较同一时刻标准电阻与铂电阻上的压降, 可以计算出温度的变化值。根据《新型自动气象(气候)站功能需求书》要求, 温度的每分钟采样次数必须大于 30 次, 测量灵敏度为 0.1℃, 最大误差不超过±0.2℃。

为了提高测量精度, 降低测量误差, 温度铂电阻采用了四线制^[11], 即工作回路与信号回路分开。由于信号回路中电流非常微弱, 使得回路电缆的线上压降基本为 0。此外, 由于监测仪需要采集多个温度信号, 监测回路中的标准电阻是各温度通道的共用器件, 当某一铂电阻传感器未

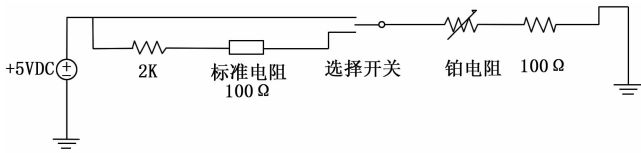


图 4 温度监测回路

被处理器选择采样的时候，电子开关使该传感器不经过标准电阻直接使用 5VDC 工作，当该铂电阻被选择进行采样时，电子开关使传感器与标准电阻串联，这样无论是否被采样，铂电阻传感器一直处于稳定工作状态。

2.3 湿度和蒸发采集

湿度传感器一般采用湿敏电容作为核心元件，湿敏电容以流通的空气作为绝缘电介质，当空气中的相对湿度发生变化，电介质的介电常数发生变化，电容值也随之改变。传感器与湿度的变化相对应输出 0~1 V 的连续电压信号。蒸发传感器采用超声波测距组件为核心器件，测距组件探测到蒸发器皿水面高低的变化，并将 0~100 mm 的变化使用 4~20 mA 的连续电流信号来表示。对于蒸发传感器的电流信号，采集器端增加了 100 Ω 的负载电阻，以便将电流信号转换成电压信号再进行数据采集。

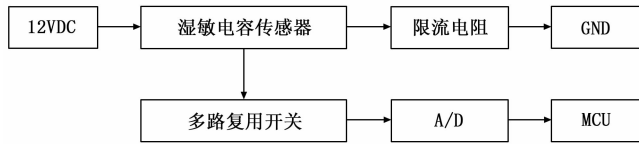


图 5 湿度信号流程

图 5 为湿度和蒸发的信号流程图。工作回路供电为 12VDC，信号回路连接至多路复用开关 ADG1607BRUZ。当中央处理器 MCU 运行程序轮询采集湿度或者蒸发信号的时候，软件指令接通多路复用开关，将该信号输入 16 位 A/D 转换通道。经过必要的稳定时间（一般为 10~40 ms）之后，A/D 将该电信号转换为数字信号，并通知处理器读取。根据功能需求书要求，湿度采集精度为 1%RH，当湿度大于 80%RH 时，最大允许误差为 ±5% RH，否则为 ±3% RH；蒸发采集精度为 0.1 mm，最大允许误差为 ±2%。两者的采样频率要求大于 30 次/分。

2.4 风向风速和雨量采集

格雷码是一种特别的二进制编码，其大小相邻的两个码之间仅有一位二进制数不同；位数相同的两个码，最大值与最小值之间也仅有一位二进制数不同，这种特性很适合使用电路实现物理量到脉冲数字量的转换。气象观测中风向传感器主要采用 7 位格雷码脉冲信号，即使用 7 个信号共同表示一个风向角度^[12]。风向标随着风向的改变而朝向不同的方向，转轴带动格雷码盘，在 0~360°方向对应输出不同的 7 位格雷码脉冲信号。例如风的来向为北偏东 3°时，7 位格雷码为 0000001，即最低位输出高电平，其他 6 位输出低电平。

风速传感器则多采用光敏元件或者霍尔元件。使用光敏元件的传感器其转轴速度随风速变化，转轴带动的遮光板以不同的频率遮挡光敏元件，使其导通频率与风速具有线性的关系，可通过导通脉冲的频率计算风速。使用霍尔元件的传感器其转轴带动导线以不同的频率切割传感器中永久磁铁产生的磁力线，产生与风速具有线性关系的感生电势，可通过感生电势的脉冲频率计算风速。

雨量传感器则利用干簧管吸合的动作产生与降雨量成线性关系的脉冲个数。因此这几类传感器都具有相似的原理以及相同的信号采集方法，如图 6。

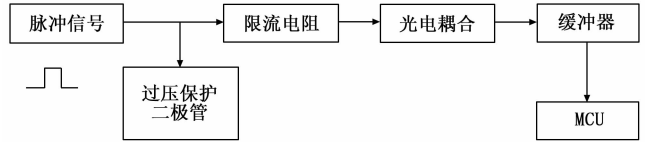


图 6 脉冲信号流程

图中过压保护二极管采用 SMCJ6.0CA，光电耦合采用 P621，缓冲器为 74LV14D。脉冲信号经过压保护之后从限流电阻到达光电耦合器，被耦合器隔离之后传输至缓冲器再与 MCU 的 I/O 端口连接。I/O 端口配置为无上拉/下拉的悬浮输入模式，响应频率为 100 MHz，响应上升沿触发的外部中断，中断优先级最高为 0。

不同的传感器信号使用不同的处理程序得到气象要素测量值。代表风向的 7 个电平信号被处理器逐一读取之后，作为 7 位格雷码，与存储在处理器中的格雷码—风向表对比检索，得到相对应的风向值。代表风速的脉冲信号则被高速采集，计算每一秒的信号脉冲个数，通过传感器厂家提供的脉冲频率与风速的关系式计算所代表的风速值。代表降雨量的脉冲信号则按分钟计算脉冲个数，通过脉冲频率与降雨量的关系式计算所代表的降雨量。为了防止高频干扰，处理器将检查雨量脉冲高电平的持续时间，只有持续时间为 50~150 ms 才被认为是正常的干簧管吸合产生的脉冲信号，否则认为是异常信号。根据要求，风向的采样频率为 1 次/秒，风速的采样频率为 4 次/秒。

2.5 气压、能见度采集

气压和能见度都是智能传感器，自带嵌入式处理器，能够对环境进行自主探测得到基本的采样数据，因此对这一类传感器进行数据采集主要是解析智能传感器的输出报文，读取所需要的采样数据。如图 7 所示，传感器使用 RS232 标准协议，串口配置参数为 9 600 波特率，无校验，8 位数据位，1 位停止位，即 (9600, N, 8, 1)。按照采集要求的频率输出基本的采样数据，采集器串口通过中断接收数据，在接收完一次完整报文之后，通知处理器解析报文，并将其中的气象值读取出来作为该气象要素的分钟采样值。按照要求，气压的采样频率为 30 次/分，能见度的采样频率为 6 次/分。

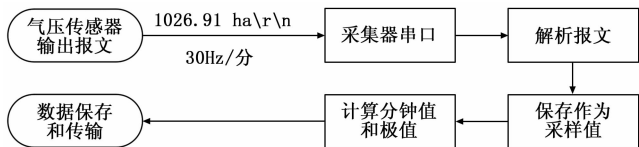


图 7 智能传感器数据采集

3 质控和存储

高速运行的 MCU 能够将分钟采样频率提高, 样本数的增加增强了监测数据的代表性。此外, MCU 还有更多的时间进行数据的质量控制, 提高了监测数据的可靠性和可信性。检测仪的数据质控分为 3 个级别: 首先检查各个气象传感器采样数据是否落在传感器测量范围之内, 超出范围的数据被剔除, 不参与计算气象瞬时值; 其次, 对相邻两个采样值的变化幅度进行检查, 按照相关的阈值, 剔除掉变化幅度超出允许范围的采样值; 最后在计算气象瞬时值之后, 再根据相邻几分钟气象瞬时值的变化幅度, 记录当前计算值的质控码, 以表示本分钟的气象瞬时值是可信的、存疑的还是确定异常的。

MCU 扩展控制读写 4 G 以上的外部存储模块。外部存储模块上除了自身坏块管理数据, 需要保存的数据有: 台站参数, 包括时间日期、台站号、通信波特率、传感器种类、台站经纬度、主动发送数据间隔等等; 分钟内的采样数据, 包括各种传感器信号每分钟的多个采样值, 便于从中发现信号异常原因; 分钟测量数据, 即由采样数据计算得到的每分钟一份气象瞬时值。其中绝大部分空间用于分钟测量数据存储, 按每份数据 4 kb 计算, 4 G 容量大约能容纳 2 年的分钟数据, 考虑到坏块、坏块备份、台站参数和采样数据需要一部分空间, 本设计能够保证 1 年以上的数据存储。

4 结果与分析

如图 8 为屏幕显示界面, 每分钟更新一次气象瞬时值, 在调试设备的时候, 也可以实时显示每一次采样数值, 让现场操作人员能够马上发现被监测数据的变化^[13]。该显示屏还兼备触摸操作功能, 可以在屏上直接进入选择菜单或者参数设置, 便于监测仪保存不同的监测站点参数。



图 8 屏幕显示界面

各测量通道的测试结果如表 1 所示。

表 1 通道测试结果

通道	扰动/误码率	要素	分辨率	最大误差
PE12	5×3/65536V	气温	0.1℃	±0.2℃
PE1	5×3/65536V	湿度	1%RH	±5%RH
PE1	5×3/65536V	蒸发	0.1mm	±2%
PC1	0.00003%次	雨量	0.1mm	±4%
PC0	0.00003%次	风向	3°	±5°
PF0-PF6	0.00003%次	风速	0.1m/s	±0.5+0.03V _{m/s}
EX-COM2	0.001%次	气压	0.1hPa	±0.3hPa
EX-COM1	0.001%次	能见度	1m	±10%
COM1	0.001%次	通信	-	-

通道以 MCU 管脚区分, 表中湿度与蒸发采集数据均从 PE1 输入 MCU。模拟信号采样通道性能主要取决于 A/D 采集电路的稳定性和抗干扰能力, 16 位 A/D 测量分辨率为 5×1/65536 V, 在给定已知稳定信号的情况下, 采样扰动平均值为 5×3/65536 V, 相对于气温和湿度的要素分辨率和最大误差要求, 该采样扰动是可以接受的。基于脉冲计数的 I/O 采样中断设置为 100 MHz, 按每秒 8 次的采样频率测试误码率为 0.00003%, 即平均连续运行 4 天出现一个误码, 考虑到要素采集的要求最多为 4 次每秒, 实际的误码率会大幅降低, 转换成要素之后的测试结果最大误差也是符合要求。串口测试的频率设置为每分钟传输 10 次, 连续运行 7 天出现一次误码, 误码率为 0.001%, 在纠错和质控的程序后并没有影响要素的采集和数据的传输, 满足采集的要求。

5 结论

本设计在 STM32 最小系统的基础上, 充分利用 MCU 的计算能力、存储能力、高速 I/O、中断管理和扩展串口的功能, 增加 16 位 A/D、大容量存储卡和触摸屏显示屏实现了气象要素在线监测。由于对传感器的原理和电气性能了解得比较详细, 监测仪并没有发现信号连接方面的问题。各个通道的采样性能以及气象要素测量性能均能够满足气象数据在线监测的需要。由于测试条件有限, 测试参数和测试数据点不够全面, 考虑将设备送到具有相关资质的气象检定部门测试, 进一步发现并改善本设计。本设计可以为基于 STM32 的其他小型环境探测设备的研制提供参考。

参考文献:

[1] 陈刚. 新型自动气象站的分析与对比 [J]. 现代建筑电器, 2014, 5 (3): 36-40.
 [2] 中国气象局综合观测司. 新型自动气象(气候)站功能需求书(修订版) [Z]. 北京: 气象出版社, 2012.
 [3] 韩广鲁, 孙嫣, 任燕, 等. 自动气象站数据采集器校准方法 [J]. 山东气象, 2015 (1): 57-59.
 [4] 宋宇晨, 潘大为, 黄涛, 等. 基于 DSP 的嵌入式在线振动信号分析系统 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (5): 291-295.

[5] 罗 铿, 平佳伟. 基于 ARM 的全自动数据采集系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (4): 159-162.

[6] 黄 欢, 王 威, 杜 昊, 等. 基于嵌入式 linux 的杆塔倾斜度在线监测仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 4246-4252.

[7] 王 威, 岳灵平, 杨 吉, 等. 基于嵌入式 Linux 的输电线路杆塔倾斜度自动化测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 70-73.

[8] 郭颜萍, 崔天刚, 邵宝民, 等. 气象仪功能模块自动检测仪器的设计 [J]. 山东科学, 2012, 25 (6): 61-64.

[9] 徐 伟, 杨绪森, 张光宇, 等. 手持式气象传感器现场测量

仪器的开发 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (22): 131-134.

[10] 吕雪芹, 敖振浪. 新型自动气象站 4 路高速串口的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2014, 37 (5): 121-123.

[11] 行鸿彦, 武向娟, 吕文华. 自动气象站数据采集器温度通道的环境温度补偿 [J]. 仪器仪表学报, 2012 (8): 1868-1875.

[12] 刘 莹, 王海军, 李中华. 基于观测数据的风向传感器故障检测方法设计与应用 [J]. 气象, 2015, 41 (11): 1408-1416.

[13] 刘艳中, 吕玉嫦. 一种新型自动气象站触控屏交互式系统设计 [J]. 2016, 7: 145-148.

~~~~~  
(上接第 287 页)

步骤 2: 获取 3 个待评价对象的 18 种度量元数值, 如表 2 的待评价对象列。

步骤 3: 分别计算 3 个待评价对象的研制过程测试质量评价价值  $T_1$ , 三方测评质量评价价值  $T_2$ , 鉴定/定型测评质量评价价值  $T_3$  和用户使用质量评价价值  $T_4$ , 并根据式 (5) 分别计算 3 个待评价对象的计算航空机载软件测试质量评价价值  $T$ 。

表 2 度量元样本采集数据表

| 序号 | 度量元            | 待评价对象 |      |      |
|----|----------------|-------|------|------|
|    |                | A     | B    | C    |
| 1  | 显性需求覆盖率        | 1     | 1    | 1    |
| 2  | 隐性需求覆盖率        | 0.85  | 0    | 0.68 |
| 3  | 测试策略充分性        | 0.91  | 0.67 | 0.79 |
| 4  | 测试环境差异性        | 0.87  | 0.54 | 0.77 |
| 5  | 测试需求覆盖率        | 1     | 1    | 1    |
| 6  | 测试用例颗粒度        | 0.93  | 0.78 | 0.84 |
| 7  | 测试用例执行率        | 1     | 1    | 1    |
| 8  | 回归测试用例比例       | 0.31  | 0.22 | 0.35 |
| 9  | 软件缺陷接受率        | 0.96  | 0.86 | 0.91 |
| 10 | 组织资产贡献度        | 0.25  | 0    | 0    |
| 11 | 测试工具分析度        | 1     | 0.8  | 1    |
| 12 | 测试人员能力分析度      | 1     | 0.8  | 1    |
| 13 | 三方测评缺陷发现率      | 0.34  | 0.54 | 0.47 |
| 14 | 三方测评严重缺陷发现率    | 0.13  | 0.38 | 0.15 |
| 15 | 鉴定/定型测评缺陷发现率   | 0.17  | 0.43 | 0.22 |
| 16 | 鉴定/定型测评严重缺陷发现率 | 0.03  | 0.27 | 0.17 |
| 17 | 用户使用缺陷发现率      | 0.05  | 0.16 | 0.11 |
| 18 | 用户使用严重缺陷发现率    | 0     | 0.08 | 0    |

步骤 4: 3 个待评价对象的航空机载软件测试质量评价价值  $T$  分别与研制单位组织测量库的质量评价基准值进行比较, 确定 3 个待评价对象软件测试质量优劣, 评价结果分别为: A 优秀, C 合格, B 不合格。

表 3 质量评价计算分值

| 质量评价 | A     | B     | C     |
|------|-------|-------|-------|
| T    | 82.78 | 52.80 | 73.08 |

### 5 结束语

软件测试是提高航空机载软件产品质量和降低软件维护成本的重要手段之一。本文介绍了一种航空机载软件测试质量评价方法, 通过实际工程实践表明, 该方法具有计算过程简单、评价要素完整、评价模型合理和评价结果客观的特点。其主要创新点在于: 一是将典型缺陷和可复用测试用例组织资产贡献度纳入度量元体系, 其作用是鼓励测试人员将好的测试用例和典型的软件缺陷纳入组织资产管理, 便于积累测试经验、沉淀测试成果和提高测试技能, 达到反哺软件研发的目的; 二是根据航空机载软件研制全生存周期特点, 除软件研制过程测试外, 将三方测评质量、鉴定/定型测评质量和用户使用质量纳入航空机载软件测试质量评价模型, 使得评价要素更完整、评价模型更合理和评价结果更客观。

### 参考文献:

[1] 张义德, 王国庆, 杨 平, 等. 基于需求的航空嵌入式软件测试技术研究 [J]. 计算机工程与设计, 2002, 23 (10): 4-5.

[2] 王 珺. 基于度量的航空机载软件质量控制研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

[3] 朱少民. 软件质量保证和管理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[4] 冯 惠, 王 凌, 陈森芬, 等. GJB 5236-2004, 军用软件质量度量 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.

[5] 姚 奕, 刘晓明, 黄 松. 基于模糊偏序关系的软件测试评价方法 [J]. 电子科技大学学报, 2007, 36 (3): 503-505.

[6] 费清春, 史莹莹, 王卫蔚. 基于灰色理论的软件测试质量评价方法 [J]. 测控技术, 2016, 35 (3): 110-112.

[7] 漆莲芝. 基于过程度量的软件测试质量管理 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (7): 935-938.

[8] 徐中伟, 吴芳美. 软件测试质量的度量 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 38 (21): 100-103.

[9] 邢薇薇, 王新刚. 航空机载软件缺陷分类方法研究及应用 [J]. 测控技术, 2016, 35 (9): 102-104.

[10] 王 峰, 郑彦兴, 包 阳. 软件第三方测评 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45 (增刊): 345-347.