

# 基于 EtherCAT 总线的串联型分布式数据采集系统设计

李木国, 王延国, 孙慧涛

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对海洋工程实验室现场数据采集过程中, 数据量大、测点分散、实时性要求高、数据种类不一致的问题, 设计了一种基于实时工业以太网 EtherCAT 总线的串联式数据采集系统; 从整体结构、工作原理、主站软件和从站软硬件方面详细介绍了系统的方案设计; 在实验水池中, 通过采集实际波浪信号对数据采集系统进行了测试; 结果表明, 系统性能稳定、精度高、实时性好, 为分布式数据采集监控系统的研究提供了应用和技术上的参考。

**关键词:** EtherCAT; 数据采集; 实时性; 从站软硬件

## Design of Series-Connection Distributed Data Acquisition System Based on EtherCAT Bus

Li Muguo, Wang Yanguo, Sun Huitao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the large amount of data, geographically fragmented acquisition positions, high real-time performance demanding and a variety of data types in the process of data acquisition, we build a series-connection data acquisition system based on EtherCAT bus. The aspects of over-all structure, operating principle, master station software and hardware and software of slave station were introduced in detail. In order to verify the performance, we captured the height of wave in our lab. The experimental results indicate that the system has high reliability and real-time performance. The designed data acquisition system can provide references for the research of distributed data acquisition and control system.

**Keywords:** EtherCAT; data acquisition; real-time performance; hardware and software of slave station

### 0 引言

目前, 在很多工业现场环境的监控工作中, 需要实时采集和监控的物理量越来越多。这些物理量的测点位置往往很分散, 对它们进行统一地数据采集、分析和处理具有现实意义。

传统的现场总线技术在数据采集中很难满足实时性和带载能力的要求。工业以太网技术不断成熟, 已经成为分布式数据采集系统的首选方案。EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) 是由德国 BECKHOFF 自动化公司于 2003 年提出的实时工业以太网技术, 它基于标准以太网技术, 有灵活的网络拓扑结构, 全双工通信, 系统配置简单, 数据传输具有高速、高效的特点, 总线利用率高, 其数据有效率可达 90% 以上<sup>[1]</sup>。可以很好地满足数据采集方面的各项性能要求。

本文运用工业以太网 EtherCAT 技术开发了一种串联型的分布式数据采集系统。这种系统采用菊花链型的拓扑结构, 不仅可以接入不同类型的传感器, 而且能方便地改变系统中的传感器数量, 最小数据刷新周期仅为 1 ms。

### 1 系统整体结构设计与工作原理

#### 1.1 系统整体结构

数据采集过程往往具有以下 3 个特点:

- 1) 测点的位置分布广泛, 间隔距离较长;
- 2) 测点的数目众多, 且不固定;

收稿日期: 2015-12-15; 修回日期: 2016-01-20。

作者简介: 李木国 (1953-), 男, 辽宁庄河人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事海洋工程模拟实验理论、现代控制技术方向的研究。

3) 数据实时性要求高。

为此该数据采集系统采用了菊花链型的拓扑结构。系统整体结构如图 1 所示。一台主站 PC 机, 集中处理各个传感器的数据信号; 多个从站, 各个从站依次通过网线串联在一起, 每个从站只接一个传感器。菊花链型的拓扑结构具有简单可靠, 易于扩充的特点, 可根据实际测点的数目, 合理增减从站数量, 方便、实用。

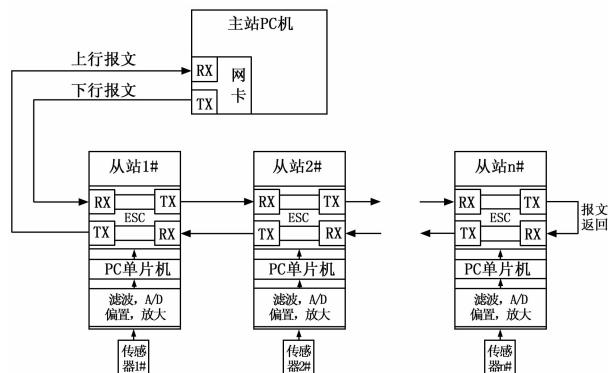


图 1 系统整体结构图

#### 1.2 系统工作原理简介

首先, 各个从站接收与自己相连的传感器的电压信号。电压信号为比较微弱且不断变化的模拟量, 需要依次经过电压偏置、放大、滤波等处理后再进行 A/D 转换, 获得对应的 12 位的数字量, 并将此数字量传给 PIC 单片机, 单片机再传到从站控制器 (ESC) 芯片 ET1100 中。

与此同时，主站周期地发送 EtherCAT 报文，报文依次经过所有从站，当报文经过第一个从站时，1# 从站中的 ET1100 芯片将之前收到的 12 位数字量写入到报文中对应 1# 从站的指定位置。1# 从站再将报文发给下一从站，下一从站也进行类似的操作处理，直到最后一个从站将自己的数据写入到报文的对应位置。最后一个从站再将这个报文作为上行报文直接发送给主站，主站处理并解析这个报文，就可以获得所有从站上传的数据。将各数据换算成被测物理量的实际值，存储并显示，一次数据采集过程就完成了。

本数据采集系统每隔 1 ms 就能采集一次所有传感器的数据，实时性非常高，可以满足很多领域的数据采集要求。

## 2 EtherCAT 总线通信原理

### 2.1 EtherCAT 总线特点与数据帧结构

EtherCAT 是一种实时工业以太网技术，它具有高速和高数据有效率的特点，支持多种设备连接拓扑结构<sup>[2]</sup>。EtherCAT 数据帧结构如图 2 所示。EtherCAT 总线网络采用主从式控制，主站使用标准的以太网卡发送 EtherCAT 报文给各个从站，从站使用专门的 EtherCAT 从站控制器 ESC (数据链路层芯片 ET1100) 处理数据帧。在数据帧经过时，ESC 寻址到本机报文，根据报头中的命令，从数据帧中抽取数据或者插入数据到数据帧的指定位置。此过程无需对数据帧进行编码/解码，且全部由硬件电路完成，处理时间仅为十几纳秒<sup>[3]</sup>。

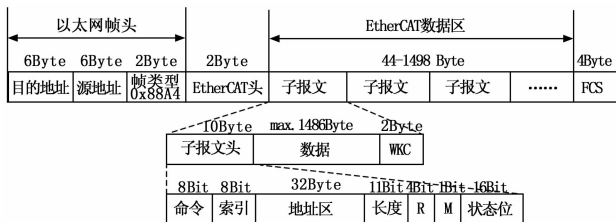


图 2 EtherCAT 数据帧结构

### 2.2 EtherCAT 状态机和通信初始化

EtherCAT 状态机 (ESM, EtherCAT State Machine) 负责协调主站和从站应用程序在初始化和运行时的状态关系。EtherCAT 网络一共有 5 个通信状态，分别是：初始化 (Init)、预运行 (Pre-Operational)、安全运行 (Safe-Operational)、运行状态 (Operational)、引导状态 (Boot-strap)。

EtherCAT 网络系统依次经过初始化，预运行，安全运行，运行状态的状态转换，到达运行状态之后可以进行周期的数据采集通信，这个过程就是 EtherCAT 通信初始化过程。系统的状态转换命令由主站应用程序发起，从站程序响应主站命令，主站从站一起协同配合来完成状态转换任务。

## 3 系统主站设计

### 3.1 主站功能与结构

主站是整个 EtherCAT 网络的控制核心。选用 PC 机作为主站时只需用标准的以太网网卡 NIC 作为硬件接口，控制功能完全由软件实现。主站功能结构如图 3 所示。主站功能主要有：导入并解析 XML 设备描述文件，创建主站设备，构造初始化命令帧，进行通信初始化并引导从站完成状态机转换；周期性的发送并解析 EtherCAT 数据帧，周期性的存储并显示数据，对采集数据进行处理分析；利用最小二乘法计算出每个传感器的标定系数并标定传感器。

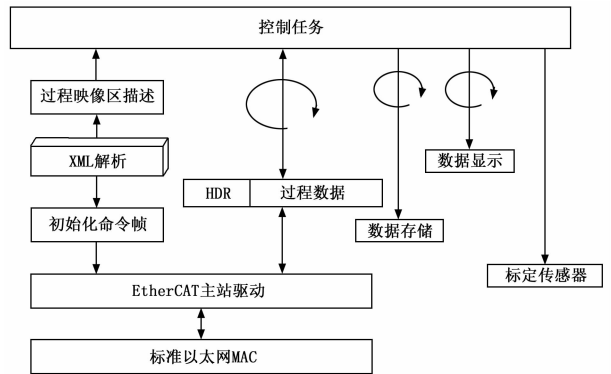


图 3 EtherCAT 主站功能结构框图

### 3.2 主站软件的关键技术

EtherCAT 状态机的转换、数据帧的发送和解析、数据存储和数据显示这 4 个主站功能都需要周期地独立进行。根据主站的功能特点采用多线程配合多媒体定时器的编程技术来编写主站软件。

线程是计算机程序执行的最小单位，在 Windows 操作系统下，每个线程被分配不同的 CPU 时间片，某一时刻，CPU 只能执行一个时间片内的线程，多个时间片中的相应线程在 CPU 内轮流执行，但是时间片时间很短，从宏观上看，每个线程好似是并行执行<sup>[4]</sup>。

多媒体定时器是 Windows 系统下精度非常高的定时器，它不依赖于消息响应机制，而是使用 TimeSetEvent () 函数产生一个独立的线程，在定时周期到达时，直接调用预先设置好的回调函数进行处理操作，不用等到消息队列为空，能够保证定时中断得到及时响应，最小定时周期可达 1 ms。

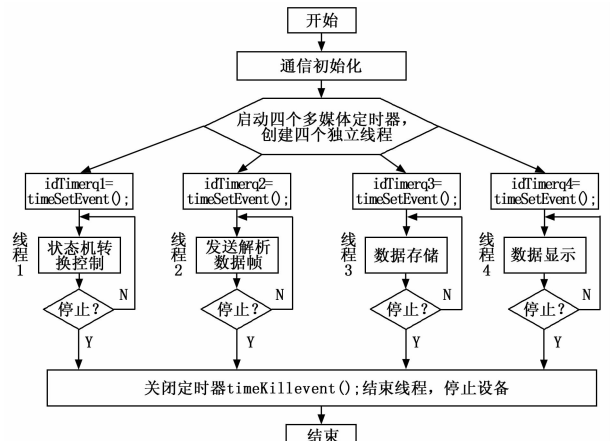


图 4 主站软件程序流程图

主站软件使用 C++ 语言来编写，程序流程图如图 4 所示<sup>[5]</sup>。把 EtherCAT 网络状态机转换控制、数据帧的发送和解析、数据存储、数据显示这 4 个功能分别放到一个线程中去执行。利用多媒体定时器来控制每个功能的循环周期，利用多线程技术来保证各个功能的并行执行。

## 4 系统从站设计

### 4.1 从站硬件电路设计

系统从站为自主开发设计的电路板。从功能上主要分为两个模块，模拟电压信号处理模块和 EtherCAT 网络通信模块<sup>[6]</sup>。模拟信号处理模块的电路原理图如图 5 所示。

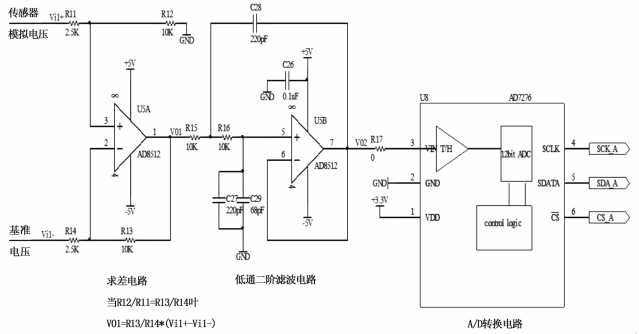


图 5 从站模拟信号处理模块电路原理图

传感器输出的模拟电压信号往往非常微弱且带有一定的干扰噪声。为了使 A/D 芯片尽可能的满量程转换, 在进行 A/D 转换之前, 要对模拟电压信号进行偏置、放大、滤波处理。AD8512 芯片是双路精密 JFET 放大器, 具有低失调电压, 低输入偏置电流, 低输入电压噪声和低输入电流噪声特性。它的一个运算放大器被设计成求差电路, 当  $R_{11}$ 、 $R_{12}$ 、 $R_{13}$  和  $R_{14}$  的阻值满足  $R_{12} / R_{11} = R_{13} / R_{14}$  时, 第一级输出电压  $V_{o1}$  [7] 由式 (1) 决定:

$$V_{o1} = \frac{R_{13}}{R_{14}}(V_{i1+} - V_{i1-}) \quad (1)$$

根据传感器输出的电压  $V_{i1+}$  的变化范围, 确定基准电压  $V_{i1-}$  和放大倍数  $\frac{R_{13}}{R_{14}}$  的值。使第一路运放的输出电压  $V_{o1}$  在  $0 \sim 3.3 \text{ V}$  之间变化, 保证后面的 A/D 芯片可以在量程内转换。AD8512 芯片的另一个运算放大器被设计成一个二阶低通滤波器, 根据实际电路的应用要求, 它的截止频率  $F_N$ 、品质因数  $Q$  和反馈增益  $A_0$  的理论值分别确定为  $64 \text{ kHz}$ 、 $0.707$  和  $2$ 。其中截止频率  $F_N$  可由式 (2) 求得, 品质因数  $Q$  [7] 可由式 (3) 求得。

$$F_N = 1/2\pi \sqrt{R_{15}R_{16}(C_{27} + C_{29})C_{28}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_{15}R_{16}(C_{27} + C_{29})C_{28}}}{(C_{27} + C_{29})R_{15}R_{16} + R_{15}C_{28}(1 - A_0)} \quad (3)$$

考虑到市场上电容电阻的常用值, 各电容电阻的实际取值见图 5, 根据各项参数的计算公式, 实际值  $F_N = 63.26 \text{ kHz}$ 、 $Q = 0.7065$ 、 $A_0 = 2$ , 均非常接近理论值, 可以满足实际的使用要求。模拟信号  $V_{i1+}$  在依次经过偏置、放大、滤波之后, 就可以进行 A/D 转换了。这里选用美国 ADI 公司的 AD7276 作为 A/D 转换器, AD7276 是 12 位的低功耗、高速逐次逼近型 A/D 转换器, 最高采样频率可达  $3 \text{ MSPS}$ , 转换速度快, 精度高。A/D 转换之后的数字量通过 SPI 总线发送给 PIC 单片机。

从站 EtherCAT 网络通信模块的电路如图 6 所示。PIC24 单片机作为 EtherCAT 网络通信部分的微控制器, 一方面通过 SPI 总线控制 A/D 转换芯片 (AD7276) 的转算速率并接收转换之后的 12 位数字量; 另一方面 PIC24 单片机还要响应主站的控制命令, 通过 SPI 总线与数据链路层芯片 ET1100 通信, 完成 EtherCAT 网络的通信初始化配置并周期地将接收到的 12 位数字量发送给 ET1100。ET1100 为 EtherCAT 网络的专用数据链路层芯片, 它可以处理 EtherCAT 数据帧实现 EtherCAT 数据链路层协议。EEPROM 中存储了 ET1100 的配置信息。PHY (0) 和 PHY (1) 是两个物理层芯片, 可实现数据

的编码、译码和收发。为了提高通信的可靠性它们与 RJ45 接口之间还要接入网络变压器。

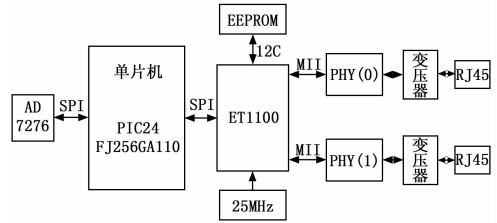


图 6 从站 EtherCAT 通信模块电路示意图

整个从站电路中需要  $+5 \text{ V}$ 、 $3.3 \text{ V}$  和  $-5 \text{ V}$  的电源, 为了补偿长距离供电的压降, 使用  $+6 \text{ V}$  供电。电源线也采用菊花链型的拓扑结构, 依次经过各个从站, 所有的从站共用一个电源。在从站电路中首先通过稳压芯片 LP2952 将  $+6 \text{ V}$  电压稳压成  $+5 \text{ V}$ , 再通过电荷泵反相器 CAT660 将  $+5 \text{ V}$  转换成  $-5 \text{ V}$ , 同时还要使用稳压芯片 LR1106 将  $+5 \text{ V}$  转换成  $3.3 \text{ V}$ 。

### 4.2 从站软件程序设计

从站软件程序指的是 PIC 单片机里面的程序。它的主要功能是: 响应主站的命令、执行状态机转换操作、配置 ET1100 和周期地接收 A/D 数据并周期地向 ET1100 发送 A/D 数据。从站 PIC 单片机程序流程如图 7 所示。

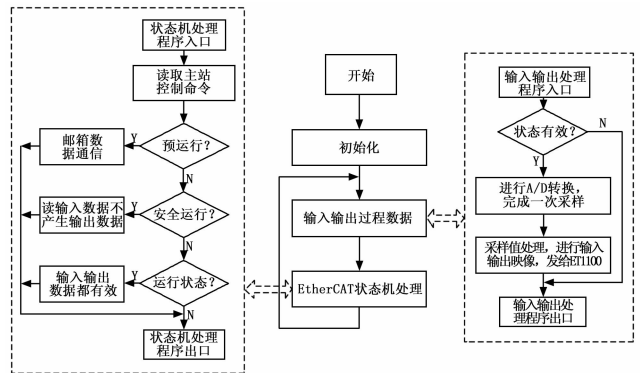


图 7 从站 PIC 单片机程序流程图

首先程序初始化各相关寄存器, 然后循环执行输入输出过程数据模块和 EtherCAT 状态机处理模块。初始化操作主要包括硬件初始化、EtherCAT 从站接口初始化、对象字典初始化和分配过程数据字节空间 [8]。在输入输出过程数据模块中, PIC 单片机在 EtherCAT 网络状态是运行状态的情况下, 控制 A/D 芯片进行 A/D 转换, 并将转换得到的数据发送给 ET1100。状态机处理模块主要执行网络状态机的状态转换操作: 程序先接收主站的状态转换命令, 并与当前网络的状态进行比较, 若一致则不进行状态转换, 否则进行相应的状态转换。系统在不同网络状态下能够进行的通信操作也是不一样的, 详细信息可查阅参考文献 [2]。

### 5 性能测试及结果分析

为了测试这种数据采集系统的性能, 每个从站接上一个浪高仪 (测量波浪高度的传感器), 组成一个分布式的浪高采集系统。一共有 20 个从站, 分布在实验水池中的不同位置, 1 台 PC 机作为主站放在集控室, 并运行自主开发的主站软件。在实验水池中, 利用造波机产生周期为  $1.2 \text{ s}$ , 波高为  $30 \text{ mm}$

的规则波。系统的数据采集频率为 1 000 Hz，动态数据曲线刷新频率为 100 Hz。图 8 为主站软件上显示的 1、9、15 号从站的实时浪高曲线，从图中可以看出，浪高曲线具有很好地平滑性。采集 100 s 的波浪信号，主站 PC 机的本地数据文件中共存储了 100 000 组数据，没有数据丢失。

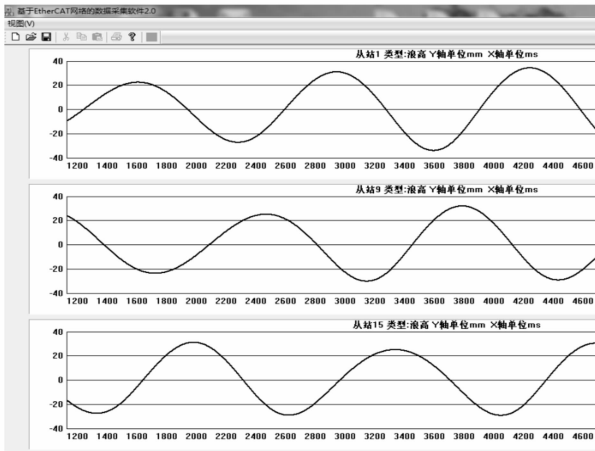


图 8 主站软件上显示的实时浪高曲线

## 6 结束语

本文利用工业以太网 EtherCAT 技术开发的数据采集系统

(上接第 169 页)



图 4 数据采集 APP 飞行监视界面

为了验证功能和性能，本文设计的数据采集系统在北京南苑机场附近航班早/晚高峰时期进行了多次采集测试，采集数据总量均超过 50 万条，统计数据见表 2。

表 2 1090ES 数据链数据采集统计

数据类别	数据量比例/%	误码率/%
二次雷达应答信息	34.2~35.5	较低 约 8.5
ADS-B 报文	22.2~23.5	低约 4.0
TCAS 报文	41.5~42.8	较低 约 9.0
其他格式数据	0.3~0.5	高 100

限于可能的广播重叠、1 090 MHz 天线的灵敏度以及信号的滤波处理，剔除系统启动初始化阶段及其他格式噪音数据影响，高峰时段系统数据采集平均误码率约为 6.4%，正确探测解码率仍满足不小于 90% 的应用指标<sup>[10]</sup>；在视距无遮挡条件下，系统能够有效采集 150 公里范围的 1 090 MHz 航空数据，大气能见度条件良好时最远接收距离达 220 公里，能够有效实

数据精度高，可靠性好，经实验测试最小数据刷新周期可达 1 ms。EtherCAT 数据帧一次最多可以传输 1486 个字节的过程数据，每个从站只占用 3 个字节，可接入近 500 个从站，根据实际采集需要，可以灵活增减从站数量。从站的模拟信号接口上接上不同类型的传感器就可以采集不同种类的物理量，适用于多种实时性要求高、测点分散的现场数据采集监控场合。

## 参考文献:

- [1] IEC/PAS 62407: Real-Time Ethernet Control Automation Technology (EtherCAT) [S].
- [2] 郇 极, 刘艳强. 工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [3] 李木国, 王 磊, 王 静, 等. 基于 EtherCAT 的工业以太网数据采集系统 [J]. 计算机工程, 2010 (3): 237-239.
- [4] 常发亮, 刘 静. 多线程下多媒体定时器在快速数据采集中的应用 [J]. 计算机应用, 2003, S1: 177-178.
- [5] 单春荣, 刘艳强, 郇 极, 等. 工业以太网现场总线 EtherCAT 及驱动程序设计 [J]. 制造业自动化, 2007, 29 (11): 79-82.
- [6] 李木国, 孔丽丽, 王 磊, 等. EtherCAT 网络数据采集系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010 (4): 961-964.
- [7] 康华光. 电子技术基础模拟部分 (第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] 赵 君, 刘卫国, 彭 喆. 基于 EtherCAT 总线的分布式测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (1): 11-14.

现空中目标的飞行监视。

## 4 结论

本文基于 Android 平台和 1 090 MHz 信号采集板卡构建了一种微型的地面接收设备，可以较好的实现对 1090ES 数据的采集和可视化飞行监视；同时，设计了对广播数据的融合编码，相比单二次雷达监视或 ADS-B 监视提高了数据采集频率和跟踪精度；另外，所使用的移动地图支持离线模式应用，方便开展野外作业。整个系统轻便智能，兼容性好，应用前景广阔。

## 参考文献:

- [1] Clarification Mode S Transponder in an Airport/A-SMGCS Environment [S]. European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2005.
- [2] 王 菲. 基于 1 090 MHz ES 数据链 ADS-B 关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [3] 金 凡, 王 成, 白丽红, 等. 基于 Android 平台的脉搏波监测系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 994-996.
- [4] 魏崇毓, 张菲菲. 基于 Android 平台的视频监控系统设计 [J]. 计算机工程, 2012, 14: 214-216.
- [5] 程 军, 陈贵灿, 姜 飞. 通用串行总线的 OTG 技术 [J]. 微电子学与计算机, 2003, 6: 54-56.
- [6] 孙 洁, 付友涛, 孔凡鹏, 等. Android 系统下的 USB 设备驱动程序的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 5: 1386-1388.
- [7] 姚 娇, 林云松. 1090ES ADS-B 接收机模型关于空中交通管理的仿真研究 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2010, 21 (5): 19-22.
- [8] 刘 萍, 倪育德, 马宇申. ADS-B BINCPR 编解码仿真及同频干扰研究 [J]. 现代导航, 2003, 5: 342-347.
- [9] 王 柯, 马宏斌. 一种基于 Android 平台数据采集系统的设计与实现 [J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37 (10): 29-32.
- [10] 1 090 MHz 扩展电文广播式自动相关监视地面站 (接收) 设备测试要求 [S]. 中国民用航空局, 2012.