

# 一种飞行控制计算机高精度 A/D 采集单元设计与研究

原兵兵, 陈欣, 徐敏  
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 模拟信号是飞行控制计算机关键数据类型之一。设计了一种对噪声和电磁干扰具有强抑制能力、高速、高精度 A/D 转换单元。采取差分信号采集电路, 结合硬件和软件成型滤波器设计技术, 达到抑制和消除噪声干扰、增强 A/D 采样数据稳定性之目的。测试结果表明, 该高精度 A/D 数据采集单元在典型干扰条件下数据采集分辨率达到 15 位, 精度达到 14 位, 相比较于原样例飞行控制计算机 A/D 单元数据采集精度提高 2~3 位, 工作稳定, 满足无人机飞行控制计算机模拟量数据采集要求。

**关键词:** 飞行控制计算机; 高精度 A/D 转换单元; 差分; 数据稳定性

**中图分类号:** V271.4; TP273.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)05-0082-05

## Design and Research of a High Precision A/D Acquisition Unit for Flight Control Computer

YUAN Bing-bing, CHEN Xin, XU Min

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Analog signal is one of the key data types of flight control computer. We designed a kind of A/D conversion unit with high speed, high precision and strong inhibiting ability to the noise and electromagnetic interference. To suppress and eliminate the noise interference and improve the stability of the A/D sampling data, we used the differential signal acquisition circuit, combining with the hardware and software design of the filter. The test results showed that: under the condition of typical interference, the high precision A/D unit's resolution of data acquisition reaches 15 bit and the accuracy is 14 bit. Compared with the original example of flight control computer, the A/D data acquisition precision is increased by 2~3 bits and flight control computer works stably, which meets the requirements of UAV flight control computer analog data acquisition.

**Key words:** flight control computer; high precision A/D conversion unit; differential; data stability

### 0 引言

飞行控制计算机对无人机的控制, 需要通过输入接口单元将各种信号类型的机载传感器的信息采集进来。在样例飞行控制计算机中, 模拟量 (Analog Input and Output, AIO) 单元主要用于采集角运动传感器、大气数据传感器和舵回路反馈位置传感器等模拟量信号<sup>[1]</sup>, 将采集信号进行预先处理后, 通过样例飞行控制计算机内部总线将采集数据传递给中央处理单元<sup>[2]</sup>。

数据信号采集是飞行控制计算机获取信息的重要

途径, 是飞行控制计算机与外部世界连接的纽带<sup>[3]</sup>。无人机上的模拟量信号, 无论是以电压、电流还是电阻的信号形式, 最终都要转化为电压信号进行信号处理。而模数转换技术是信号采集的核心, 模数转换是通过将输入的模拟信号转换为输出信号为  $N$  位二进制数字的技术<sup>[4]</sup>。但在进行数据采集时, 由于电源的波动干扰, 信号的电磁干扰等原因, 出现一些不正常的数字信号, 使数据处理无法进行下去。特别是当被测信号很微弱时, 会被干扰噪声“沉没”掉, 出现很大的数据采集与处理误差, 系统可靠性降低, 还可能造成系统失灵, 影响无人机在整个飞行过程中的飞行姿态、航迹、速度等控制, 甚至酿成重大事故。

随着无人机对飞行控制的功能与性能要求的日益提高, 对信号进行高速、高精度和高可靠性的采集以及

收稿日期: 2016-05-16

修回日期: 2017-01-12

作者简介: 原兵兵 (1991—), 女, 河南温县人, 硕士生, 研究方向为飞行控制计算机设计与研究。

实时传输已经成为信号处理的关键所在。由于现有飞行控制计算机工作环境和电磁环境限制,12 位的 A/D 转换通道信号分辨率仅能达到 10 ~ 11 位,精度只有 9 ~ 10 位;16 位的 A/D 转换通道精度仅能达到 10 ~ 12 位,已经接近信号通道的噪声水平。因此需要进一步开展高精度 A/D 单元研究。

针对以上问题,本文对飞行控制计算机 A/D 单元进行系统研究,采用硬件 + 软件信号处理方法:硬件消除可抑制类型干扰、软件上处理随机类型干扰。同时,选择高分辨率 A/D 采样芯片和高速信号处理器作为控制器对数据进行采集<sup>[2]</sup>。在此基础上开展对一种具有高精度、低噪声、抗干扰能力强,高的共模抑制比和串模抑制比,对噪声和电磁干扰具有强的抑制性的飞行控制计算机 A/D 单元的设计与研究。

## 1 A/D 单元系统构成

系统数据采集是将飞行控制计算机传感器输出的模拟信号转换成飞控计算机能识别的数字信号,然后送入相应单元进行数据处理,根据不同需要进行计算和处理,得出所需的数据<sup>[5]</sup>。在样例飞行控制计算机中,A/D 单元采集的信号主要包括姿态角、各轴向加速度、气压高度、刹车、舵机的反馈电压等,中央处理单元利用采集到的模拟量数据进行控制律的解算。飞行控制计算机根据预定任务或地面指挥控制站发来的各种指令,完成无人机从起飞、空中飞行到着陆的整个飞行过程的飞行姿态、航迹、速度等控制。因此,A/D 单元输出的模拟量信号精度直接影响执行机构的输出状态。图 1 所示为飞行控制计算机 A/D 单元数据采集框。

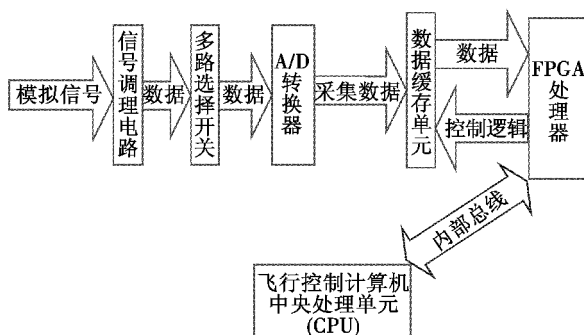


图 1 A/D 单元数据采集框图

Fig. 1 A/D unit data acquisition block diagram

在模拟信号进入 A/D 转换器前,需进行转换信号的调理、滤波及放大,从而达到 A/D 转换器的输入电平要求,以充分利用 A/D 转换器的满量程分辨率。在实际的控制过程中,由于一些传感器采集的信号比较弱,加上其周围的电磁环境、传输线长度等因素影响,必然会降低数据采集的精度。因此,在整个数据采集

系统中,A/D 是数据采集通道的核心,也是影响系统采集数据的速率和精度的主要因素。

## 2 系统硬件方案设计

电路中的无用信号可以统称为噪声,根据噪声对电路作用的形态可以分为共模干扰和串模干扰两种类型。共模干扰是叠加在信号对地的电位差,主要由电网串入、电位差以及空间电磁辐射在信号线上感应的共态电压迭加形成。共模电压通过不对称电路能转换成差模电压,直接影响测控信号,造成元器件损坏,这种共模干扰可为直流,也可为交流。串模干扰指作用于信号两极间的干扰电压,主要由空间电磁场在信号间的耦合感应及不平衡电路转换所形成的电压,这种干扰叠加在信号上,直接影响数据测量与控制精度。除信号线引入的干扰外,信号源本身的漂移、纹波和噪声,以及电源变压器屏蔽不良或稳压滤波效果不良等也引入串模干扰。因此,如何抑制和消除干扰,提高 A/D 单元的高可靠性,保证 A/D 电路单元的高精度是设计的重点。

随着对无人机飞行任务要求越来越复杂,为了精确地采集与处理数据,必须减小或抑制各种系统干扰对飞行控制系统模拟量单元的影响。因此,本文设计了一种具有高精度、低噪声、抗干扰能力强,且有高的共模抑制比和串模抑制比,对噪声和电磁干扰具有强抑制性的 A/D 信号调理电路。

### 2.1 A/D 单元信号采集方式

为了保证飞控计算机 A/D 单元数据采集精度,必须抑制或消除飞行控制系统的共模干扰和串模干扰。采用输入为双端的差分放大器作为 A/D 单元的前置放大器输入通道,是抑制共模干扰的有效方法。与以往飞行控制计算机 A/D 单元所采用的单端信号传输相比,差分信号传输有以下优点<sup>[6]</sup>:

- 1) 输出驱动总的临界电路上升率会比单端线上的值大幅降低,进而减少了轨道塌陷和潜在的电磁干扰;
- 2) 差分信号在一对紧耦合差分对中传播时,在其返回路径中对串扰和突变的鲁棒性更好;
- 3) 因为每个信号都有自己的回路,所以差分信号通过接插件或封装时,不易受到开关噪声的干扰;
- 4) 在电路对称的条件下,差分放大器具有很强的抑制零点漂移及抑制噪声与干扰的能力。

### 2.2 A/D 单元调理电路设计

由于飞行控制计算机 A/D 单元是通过输入接口单元采集各种信号类型机载传感器的信息,为了获得较高的性能,模拟输入前端将输入信号转换成差模信号,从而对共模噪声有很好的抑制作用<sup>[7]</sup>。在传感器

输入处理中采用差动运算放大器,且运算放大器选择高共模抑制比,保证处理线路高性能。本设计单元采用的是美国 AD 公司的调理放大器 ADA4940,该放大器可实现将输入信号转变为差分信号输出的功能,可不使用变压器,直接与输入信号相连进而省略隔离放大器,精简了电路结构设计。图 2 所示为 ADA4940 的应用电路。

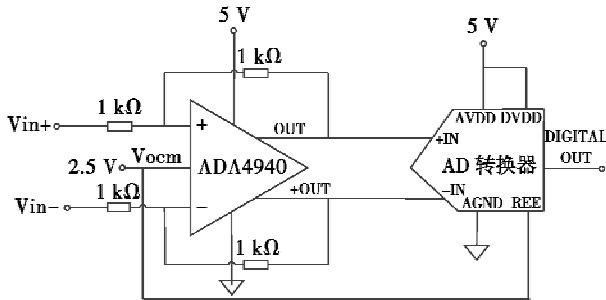


图 2 ADA4940 典型应用电路图

Fig. 2 Typical application circuit diagram of ADA4940

而在后续系统电路中的器件会产生差模电压,人为发射源也可通过各种耦合渠道使信号通道感染噪声。在控制系统中,主要的抗串模干扰方法是采用低通滤波器滤除交流信号干扰而提高模拟输入信号的信噪比,所以对于经过传感器输入处理后的差分信号,各信号通道采用典型的低通滤波器。如图 3 所示,通过对比几种模拟滤波器的幅频特性,其中,  $H(j\omega)$  为传递函数的模,  $\omega/\omega_0$  是频率  $\omega$  对  $\omega_0$  的归一化频率,巴特沃斯滤波器在低频内具有平滑单调的特性,则选择巴特沃斯作为其信号调理电路,其主要功能是抑制高频串模干扰,并保持信号不产生相位偏移且对噪声信号进行一定的衰减,降低对 A/D 单元数据采集精度的影响。图 4 所示为二阶巴特沃斯低通滤波器的应用电路。

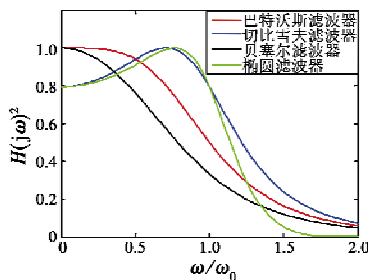


图 3 几种典型滤波器特性图

Fig. 3 Characteristic of several typical filters

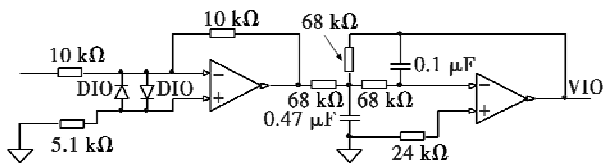


图 4 二阶巴特沃斯低通滤波器电路

Fig. 4 Two-order Butterworth low-pass filter circuit

### 3 软件设计

#### 3.1 FIR 数字滤波器

串模干扰是指将干扰信号与被测信号串联在一起,成为被测信号的一部分,被送到放大器进行放大,影响很大。同时,信号源固有的漂移、纹波和噪声,以及电源变压器屏蔽不良或稳压滤波效果不良等引入串模干扰。系统的串模干扰主要来自空间的电磁场,其抑制较为困难,仅采取硬件上滤波无法对串模干扰进行抑制,难以确保 A/D 单元数据采集的精度,所以可采取软件滤波即数字滤波技术进一步增强抗干扰强度。而本模拟量单元采用可编程器件 FPGA 为处理器,实现有限脉冲响应 FIR 低通滤波的数字滤波器。FIR 滤波器具有线性相位特性,并具有恒定的群延迟、拥有更为灵活的设计方法和信号在带内失真小的特点,它能更好地满足滤波器对幅度特性和相位特性的要求,从根本上避免或抑制硬件滤波所无法克服的温度漂移、电压漂移等噪声问题。

本设计单元采用有限脉冲响应(FIR)滤波器进行数字滤波。滤波器的输出可以通过卷积形式表示为

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (1)$$

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)z^{-i} = \frac{h(0)z^N + h(1)z^{N-1} + \dots + h(N-1)}{z^N} \quad (2)$$

FIR 滤波器的极点只在原点处存在,这使 FIR 有全局稳定性。FIR 滤波器具有线性相位,而且系统的频移和相移成比例,可达到无失真传输。

数据在通信中,一个理想的系统特性是在一定的频率范围内能够维持相位的完整性。所以,设计的数字滤波器能够具有线性相位频率性能。数字滤波器的脉冲响应为实数,且满足下面的条件时,线性相位的 FIR 数字滤波器在  $n = (N-1)/2$  处对称,即

$$h(n) = \pm h(N-n-1) \quad (3)$$

则 FIR 滤波器具有线性相位。线性相位滤波器的对称性还可以降低滤波器中所需乘法器的个数,其结构如图 5 所示。FIR 滤波主要由乘法器和带有流水线设计的加法器组成,完成对输入信号的滤波处理<sup>[7]</sup>。

一般正常的 A/D 信号是频率在 0.05 ~ 10 Hz 范围内的低频信号,其本身就是一种比较微弱的信号,当受到其他信号干扰后,采样信号会严重失真,同时还要考虑到 50 Hz 的工频信号的存在,这需要尽可能地消除噪声和干扰的影响。本设计采用阶数为 15 阶、滤波长度为 16 位、量化位宽为 16 位的低通滤波器。图 6 所示为数字滤波器的特性曲线。

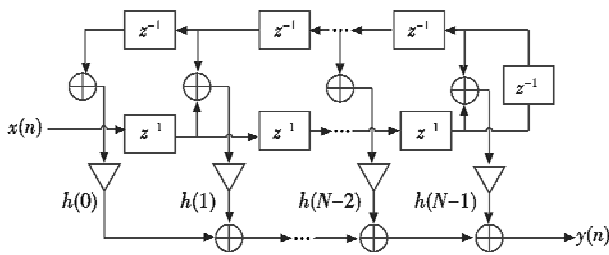
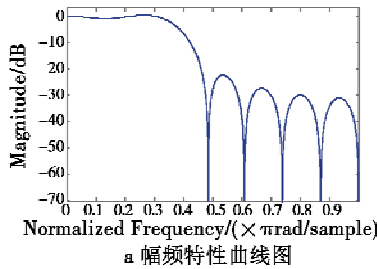
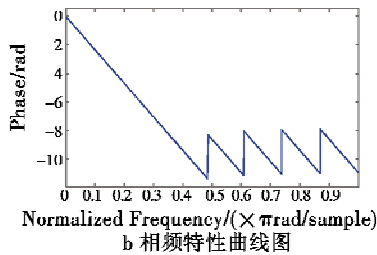


图5 FIR 数字滤波器结构框图

Fig. 5 Structure diagram of FIR digital filter



a 幅频特性曲线图



b 相频特性曲线图

图6 滤波器频率特性曲线图

Fig. 6 Frequency characteristic of the filter

根据幅频特性曲线可以看出,该滤波器在低频段通带平稳且截止频率满足滤波器要求。通过相位特性曲线可看出,该系统为线性相位系统,满足设计要求。

### 3.2 A/D 转换器

A/D 转换器是影响飞控系统数据采集采样速率和精度的主要因素之一。常用 A/D 转换技术有逐次逼近型 A/D 转换器、积分型 A/D 转换器、闪烁型 A/D 转换器、流水线 A/D 转换器等<sup>[7]</sup>。根据飞行控制计算机 A/D 单元需要 16 路输入信号,在进行 A/D 转换时,选择多路模拟开关和单片单通道逐次逼近型 A/D 转换器,再辅以同步信号产生电路,通过模拟开关切换分别送入 A/D 转换器进行转换。由于采用多路开关来进行 16 路数据通道切换,则在每路通道过程有一定的时间延迟,同时在后续数据处理器中采用软件滤波,由于 FIR 低通滤波具有恒定的群延迟,而模拟量数据影响无人机飞行状态的控制、整个飞行控制计算机的正常工作即飞机飞行的安全可靠,因此,飞行控制计算机对传感器的飞行数据实时性要求高,故数据转换器既具有较高的采集精度,又有较高的数据采集速率,因而要选取高速采样、高精度转换的 A/D 转换器。

原飞控系统中模拟量单元的 A/D 转换器与本设

计单元所选择的转换芯片的性能对比如表 1 所示。

表 1 转换芯片的性能对比

Table 1 Performance of the conversion chip

项目	原转换芯片	所选芯片
采样率/(kbit · s <sup>-1</sup> )	250	500
输入方式	单端	差分
分辨率	16	16
信噪比/dB	90	94
积分非线性/LSB	最大值 ±2	最大值 ±1
延时特性/ms	1.5	无流水线延迟

折衷考虑各因素后,选择美国 AD 公司研制的 5 V 单独直流电源供电、低功耗、快速、逐次逼近型、内置 16 位串行或并行采样转换速度可达到 500 kbit/s 的全差分 A/D 转换器 AD7676。该转换器的差分输入量程为 ±2.5 V,并在高速转换的同时能够保持较低的功耗。A/D 转换芯片与 FPGA 的连接如图 7 所示。

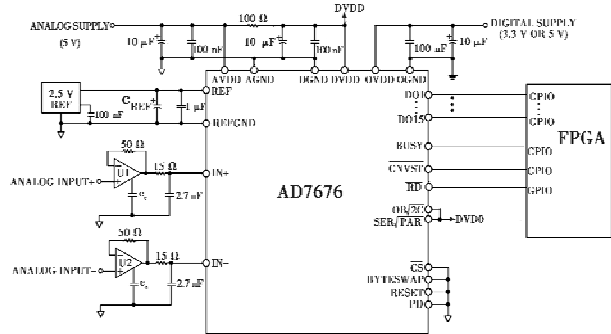


图7 A/D 连接电路图

Fig. 7 A/D connection circuit diagram

## 4 系统测试

为验证 A/D 采集单元软硬件设计的正确性,本文从硬件系统设计和加入软件滤波两个方面进行测试。

### 4.1 硬件系统测试

首先将稳压直流电源连接至 A/D 模块的数据采集单元的输入端,用于模拟飞行控制计算机外部传感器信号,对设定的电压值进行测试。运用美国 Xilinx 公司提供的 ISE 12.4,EDK 开发平台,对所设计的 A/D 单元进行测试。

在模拟量采集过程中,共模与串模的干扰会导致很大的数据采集与处理误差,系统可靠性降低。由于本文所选的 FPGA 内嵌硬核,其内部存在挂接如 PLB, XCL 等总线,因此,在内部总线挂接自封的 IP 核,对系统采集数据进行控制,由于本设计单元存在 16 路模拟量信号,在 EDK 测试环境下,可选取 16 路通道中任意通道,其外部输入一定电压值(1 V,即 0b1011001100110010)进行测试,测试结果如表 2 所示。通过对比原始飞行控制计算机 A/D 单元单端采集数据和改进后的差分采集数据的结果可以发现,由于干扰的影响,在没有进行数据采集

改进时,测试得到的结果会对模拟量采集的后 6 位数据产生影响,表现为在对同一电压采集时后 6 位的二进制数据是浮动的。但是,在对 A/D 单元进行差分形式设计时所得采集数据只有 3~4 位在浮动,将模拟量采集的精度由 10 位提高到了 12 位以上,提高了 A/D 单元数据采集的精度。

表 2 A/D 单元单端采集和差分采集转换电压对比  
Table 2 Single-ended and differential acquisition conversion voltage of A/D unit

编号	单端采集	差分采集
1	0b1011001100101101	0b1011001100110011
2	0b1011001100100111	0b1011001100110111
3	0b1011001100100111	0b1011001100111001
4	0b1011001100101000	0b1011001100111101
5	0b1011001100100100	0b1011001100110010
6	0b1011001100100001	0b1011001100111110

#### 4.2 A/D 单元测试

验证系统内部加入数字滤波器后,对 A/D 单元进行系统测试。运用美国 Xilinx 公司所提供的 ISE 12.4 ISim 对整个系统设计进行了系统测试,所得测试结果如表 3 所示。

表 3 A/D 单元加入数字滤波处理数据  
Table 3 A/D unit adds digital filter to process data

编号	数字滤波器前	数字滤波器后
1	1011001100111011	1011001100110011
2	1011001100111100	1011001100110010
3	1011001100110111	1011001100110001
4	1011001100111100	1011001100110000
5	1011001100111111	1011001100110011
6	1011001100111010	1011001100110001

从表 3 可以看出,通过所设计的低通数字滤波器做滤波处理,A/D 单元的采集数据有效位提高到 14 位,且工作稳定,满足无人机飞行控制计算机模拟量数据采集要求,验证了所研究设计的飞行控制计算机 A/D 单元

具有可行性。

## 5 结论

模拟量采集处理是飞行控制计算机中非常重要的功能,由于现有飞行控制计算机工作环境与电磁环境限制,导致现有转换精度已经接近信号通道的噪声水平。本文对飞行控制计算机的模拟量采集方法进行了研究,设计了差分形式的数据采集系统,介绍了系统的工作原理,描述了模数转换器的电路设计与软件设计,经实验测试,将模拟量采集的精度由 10 位提高到了 14 位以上,符合 A/D 单元数据采集要求,为飞行控制系统 AIO 单元实现信号的高速、高精度采集提供了一种新思路,本文的研究成果对相关系统测试研究具有参考价值。

### 参考文献

(上接第 43 页)

- Recognition, 1999;246-252.
- [5] BARNICH O, VAN DROOGENBROECK M. ViBe: a powerful random technique to estimate the background in video sequences [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009;945-948.
- [6] BARNICH O, VAN DROOGENBROECK M. ViBe: a universal background subtraction algorithm for video sequences [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20 (6):1709-1724.
- [7] 牛化康,何小海,汪晓飞,等.一种改进的 ViBe 目标检测算法 [J]. 四川大学学报:工程科学版,2014 (s2): 104-108.
- [8] 徐久强,江萍萍,朱宏博,等.面向运动目标检测的 ViBe 算法改进 [J]. 东北大学学报:自然科学版,2015, 36 (9):1227-1231.
- [9] 李建江,张磊,李兴钢,等. CUDA 架构下的灰度图像匹配并行算法 [J]. 电子科技大学学报,2012,41 (1):110-113.
- [10] GOYETTE N, JODOIN P M, PORIKLI F, et al. Changedetection.net: a new change detection benchmark dataset [C]//Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2012;1-8.
- [11] LI L, HUANG W, GU Y H, et al. Statistical modeling of complex backgrounds for foreground object detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13 (11):1459-1472.
- [1] 徐向荣,陈昌涛,欧阳月华.飞行控制计算机采集处理系统的设计与实现 [J]. 计算机与现代化,2011 (2): 89-91.
- [2] 王琳,商周,王学伟.数据采集系统的发展与应用 [J]. 电测与仪表,2004,41 (8):4-8.
- [3] 梁葆华,陈欣,吕迅竑.一种支持双冗余 CAN 总线接口的 A/D 采集单元设计 [J]. 航空计算技术,2008, 38 (2):107-110.
- [4] 马海潮.超高速数据采集技术发展现状 [J]. 测试技术学报,2003,17 (4):287-292.
- [5] 孙文.多通道数据采集系统的设计与实现 [D].长沙:湖南大学,2013.
- [6] 许嘉林,卢艳娥,丁子明. ADC 信噪比的分析及高速高分辨率 ADC 电路的实现 [J]. 电子技术应用,2004 (4):64-67.
- [7] 杨延善,苏长莱,梁恺.航空测控系统实用手册 [M]. 北京:航空工业出版社,1997:15-16.