

# 嵌入式系统抗电磁干扰体系研究与实践

黄国兵<sup>1</sup>, 刘小芳<sup>1</sup>, 李 宁<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学 计算机科学学院, 西安 710048; 2. 国网榆林供电公司, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 针对嵌入式工业过程产品面临的复杂电磁环境, 通过分析研究电磁干扰源的信号特征, 探讨了抗电磁干扰的应对措施, 提出了嵌入式系统产品设计时应采取的层次化的防护体系结构; 在抗电磁干扰体系中, CPU 及周边电路为核心, 所有外部端口信号都要隔离后接入, 需采取吸收、泄放、过滤等措施预先进行干扰信号衰减, 防止其损坏元件, 突破防护体系; 结合所提出抗干扰体系结构, 通过具体案例详细说明了其实现的方法; 经型式试验结果和现场应用表明, 所提出抗电磁干扰体系的效果良好。

**关键词:** 嵌入式系统; 电磁兼容性; 电磁干扰; 抗干扰体系结构

## Study and Practice on anti-EMI Architecture of Embedded System

Huang Guobing<sup>1</sup>, Liu Xiaofang<sup>1</sup>, Li Ning<sup>2</sup>

(1. Computer Science College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Yulin Electric Power Supply Company, Yulin 719000, China)

**Abstract:** Aimed at the complex electromagnetic environment faced by embedded industrial process product, anti-EMI measures were explored by analyzing mechanism of electromagnetic interference signal, and a hierarchical architecture for anti-EMI was proposed. In this architecture, CPU and adjacent circuits are core component, all peripheral port signals must be linked to the core by isolated components. The measures such as absorption, bypass, filtering and so on are used to reduce the interference signal strength in advance to prevent them breaking through the protective architecture by injuring components. For the proposed anti-EMI architecture, its implementation methods were illustrated by a specific case. The type test results show that the protective architecture has good anti-EMI effects.

**Keywords:** embedded system; electromagnetic compatibility; electromagnetic interference; anti-EMI architecture

## 0 引言

随着智能化和数字化技术的快速发展和推广应用, 嵌入式计算机产品已成为工业过程控制系统的主体, 承担着测量、控制、计量、保护、通信等重要功能。由于嵌入式产品都是一些以微电子和计算机技术为基础的智能组件, 对工业现场的电磁干扰有明显的敏感性和脆弱性<sup>[1]</sup>。而工业现场的电磁干扰环境十分复杂, 强度高, 对嵌入式产品安全可靠运行造成极大的危害。为了能胜任所承担的重要功能, 嵌入式产品必须有很强的抗干扰性能。

针对工业现场复杂的电磁干扰环境, 国际国内的专家学者对干扰信号源的机理进行了深入研究, 提出了许多有针对性的应对措施<sup>[2-3]</sup>。基于 EMC 的研究成果, 在实验室模拟仿真干扰源, 对嵌入式产品的抗电磁干扰性能进行验证测试, 可以有效地改进其的抗干扰设计, 提高其抗干扰的能力。在欧美发达国家, 其有一套 EMC 技术工作体系, 包括理论研究、试验与测试、规范标准及抗干扰技术等<sup>[2]</sup>。经过 20 多年的发展, 我国也建立了较为完善的 EMC 工作体系, 对嵌入式产品按照电磁兼容标准进行型式试验测试<sup>[1]</sup>。

由于产品设计时对抗干扰的重视程度不够, 或者对抗干扰技术的认识不够深入, 不少产品的抗干扰性能较差, 甚至不能通过检测机构的型式试验测试<sup>[4-5]</sup>。本文结合多年来从事嵌入

式产品抗干扰设计和多次带产品到检测中心测试的经验, 提出了嵌入式系统抗干扰体系结构的概念和方法, 并通过一个实际产品的设计, 详细介绍了其的应用方法。

## 1 嵌入式系统产品抗干扰体系结构

### 1.1 嵌入式系统面临的电磁干扰环境

根据文献 [1, 3-6] 的研究, 诸如变电站之类的工业过程控制现场干扰源十分复杂, 嵌入式系统面临的主要的干扰源包括: 1) 电快速瞬变脉冲群, 高压开关操作或高压回路绝缘击穿和火花间隙放电时产生; 2) 雷击时产生的电磁暂态现象; 3) 高压设备运行时产生的工频电场和磁场; 4) 静电放电 (ESD); 5) 无线电发射装置产生的高频电磁场; 等等。为了保证嵌入式产品稳定可靠运行, 必须采取有效的抗干扰措施。

### 1.2 嵌入式系统抗电磁干扰的设计依据

根据文献 [2-3], 电磁干扰对嵌入式产品的影响量的数学模型如式 (1) 所示:

$$N(\omega) = G(\omega)C(\omega)/I(\omega) \quad (1)$$

式 (1) 中,  $N(\omega)$  为干扰对嵌入式产品的影响量,  $G(\omega)$  为干扰强度,  $C(\omega)$  为干扰信号传输的耦合函数,  $I(\omega)$  为产品抗干扰的能力, 即对干扰信号的敏感度阈值。由于变电站的干扰信号  $G(\omega)$  客观存在, 只有通过降低  $C(\omega)$  和提高  $I(\omega)$  来减小  $N(\omega)$ 。为了减小干扰信号的耦合度  $C(\omega)$ , 对其实施隔离, 切断耦合通道是最有效的办法。如果干扰信号的强度过高而隔离器件无法承受, 或者对嵌入式产品的过程通道的精度、可靠性有影响, 则事先必须对干扰信号进行泄放、吸收、滤波等, 对干扰信号进行衰减<sup>[7-9]</sup>。另外采取 CPU 总线不出芯片, 提高 I/O 通道信号的驱动信号电平等, 降低嵌入式系统对干扰信号的敏感度阈值  $I(\omega)$ 。为了有效抗击工业现场

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-03-07。

基金项目: 西安市 2012 年产业技术创新计划—技术转移促进工程 (CX1347-2)。

作者简介: 黄国兵 (1965-), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 主要从事嵌入式系统应用方向的研究。

EMI的干扰,从嵌入式产品设计的角度,针对上述抗电磁干扰的3个要素,还必须有完整的抗干扰解决方案。

### 1.3 嵌入式系统抗电磁干扰体系结构

根据文献[1]的研究,从抗电磁干扰检测的角度,嵌入式产品模型由其本体和外部端口两部分组成,外部端口又由电源端口、外壳端口、功能地端口、信号端口、通信端口等部分组成,如图1所示。图中,电磁干扰主要从系统外部的5个端口通过传导和辐射两种途径引入。既然如此,抗干扰设计方案就从这5个耦合途径着手,阻隔、吸收、过滤干扰信号,防范其对产品的影响。为此,本文构建了如图2所示的抗EMI的层次体系结构。

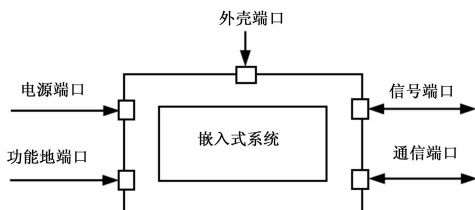


图1 从抗电磁角度嵌入式系统的组成模型

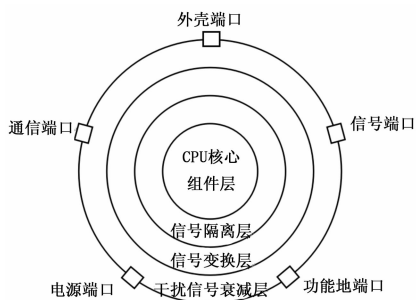


图2 嵌入式系统抗干扰层次体系结构

由图2可以看出,CPU及周围电路组成的核心组件为层次体系的中心。对嵌入式产品而言,CPU及周围电路无疑是最核心的部件,如果这些部件损坏,系统就完全不能运行;如果该部件受到干扰运行异常,则可能采集到错误的的数据造成误动和拒动。相反,在系统受到干扰时,如果核心组件运行正常,则可以通过软件辨别、滤波等手段排除干扰对系统的影响,从而大幅度提升系统抗干扰的敏感度阈值。因此对CPU及核心组件的保护最为重要。为此,抗干扰体系中,所有外部端口信号都经过隔离后再与CPU核心部件连接。这样做的目的只有一个,阻隔干扰信号向CPU核心组件的传导耦合。此外,CPU核心部件设计时尽量做到总线不出CPU,提高嵌入式系统自身的敏感度阈值。

信号隔离层主要由一些具有隔离功能的元件组成,如光耦、变压器、隔离运放、DC/DC电源模块、内部具有隔离功能的模块、数字隔离器等。使用隔离元件可以实现核心层组件和信号变换层组件的电气隔离,隔断干扰信号的传播途径,降低干扰信号的耦合度,对核心层组件进行有效保护。

信号变换层主要进行信号传递和信号调理,实现各端口要求的功能。提高信号调理电路驱动电压的电平,可以有效防止正常信号和干扰信号的混叠,提高调理电路的敏感度阈值。

有一些干扰信号的强度极高,信号变换层和隔离层的有源元件无法承受,嵌入式产品运行过程中遇见这样的干扰信号将

会造成器件烧毁,甚至穿越隔离层烧毁CPU核心组件。对于这样的强干扰信号,必须首先对其吸收、泄放,对其进行强制衰减。在干扰信号衰减层,由于有源器件承受电压和电流能力的限制,一般采用磁珠、磁环、压敏电阻、瞬态吸收二极管、放电管等无源元件实现。此外,对一些特殊的干扰源,需要在端口外附加涌浪雷击保护器。

综上所述,通过构建抗EMI的防护体系,对嵌入式系统面临的电磁干扰信号进行层层设防,确保其在复杂的电磁环境中稳定可靠运行。

## 2 基于嵌入式系统抗干扰体系的应用实践

基于所构建的嵌入式系统抗干扰体系结构,项目组在多个产品的设计中制定了抗干扰解决方案,所设计产品具有抗电磁干扰能力强的特点。这里以GIS开关电子式油压监控器抗电磁设计为例,介绍该体系的应用方法。

### 2.1 项目背景

GIS开关的油压监控器主要用于对操作机构的油压进行监控,并向自动化装置指示机构的状态,在油压异常时闭锁对开关的控制操作。由于油压监控器安装在靠近GIS开关本体的操作箱内,油压传感器靠近油箱安装,GIS操作时产生的特快瞬变过电压(VFTO)作用在油箱体上时,最高的电快速瞬变脉冲(EFT)幅值在15~20kV之间,对油压监控器安全运行威胁极大。因此,该监控器设计时必须有针对性极强的抗干扰解决方案。

### 2.2 GIS开关油压监控器解决方案

1) CPU核心组件。由于油压监控器实现的功能很简单,CPU选用STC12C5A系列新一代的MCS-51单片机设计,该单片机属于片上系统(SoC),总线不出CPU。

2) 电源端口。采用AC220V电源供电,产品内部使用AC/DC开关电源模块生成所需的+5V主工作和+24V外设工作电源,电源内部采用脉冲变压器隔离,且2路输出各自独立。为了抗击来自GIS操作产生的强EFT干扰,在AC/DC模块的输入端进行了抗高共模EFT设计,方案如图3所示。

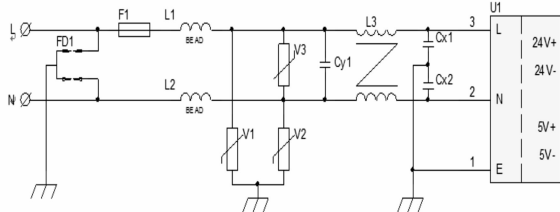


图3 电源端口抗干扰电路

由图3可见,在电源接入端口,首先采用放电管进行间隙放电,当GIS操作时,耦合在电源线上的共模电压过高时,放电管击穿放电,对干扰信号起到泄放作用;F1为自恢复保险丝,当电流过大时,起到短时断开的作用;L1和L2吸收高频干扰成份,将其转换成热能释放;V1~3为压敏电阻,共模电压高时,短时自动与大地短接,对共模电压继续泄放;Cy1、L3和Cx1、Cx2构建的电源滤波器对相对低频的串共模干扰信号进行过滤。其中,放电管和压敏电阻都起泄放共模干扰的作用,放电管能承受的电压高,对后者起保护作用。

3) 油压信号端口。油压信号调理电路的工作原理如图4所示。

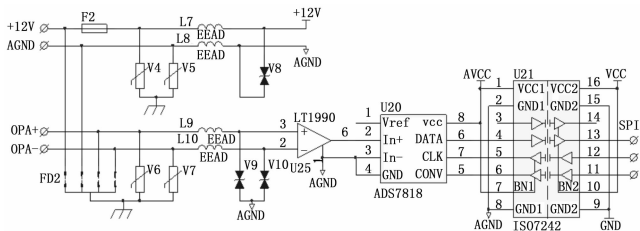


图 4 油压信号端口电路

由图 4 可以看出，给传感器供电和油压信号接入处都采用了放电管、自恢复保险、压敏电阻、磁珠、TVS 进行最外层的衰减处理，降低干扰信号的强度；油压信号经过能承受高共模电压的差分运放 LT1990 后传递给 ADS7818 模数转换器，ADS7818 与 CPU 连接 SPI 总线采用 ISO7242 进行了隔离。此外，模拟电路的工作电源采用 DC/DC 模块生成。

4) 输出信号端口。油压监控器需要根据当前油压自动控制“打压”和“释压”操作，并输多种对应的闭锁状态。本文采用继电器触点实现控制操作和闭锁状态指示，各输出通道原理类似，其中“打压”操作电路如图 5 所示。图中，CPU 通过 GPIO 输出 OPLC 和  $\overline{\text{OPLC}}$  两个信号控制继电器动作，实现输出功能。电路中上拉电阻 R8 和下拉电阻 R9 用于确定初态，与 1G125 一起构成双端口逻辑电路，防止系统供电电压瞬态变化过程中门电路的不确定状态造成误出口。继电器 DS2E-S-DC24V 由带达林顿的光耦 (G3) 驱动。为了自检和判断继电器操作的正确性，通过光耦 (G11) 对继电器触点状态进行返校监测。

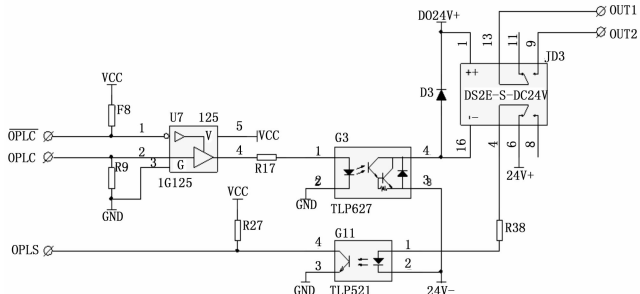


图 5 打压操作端口电路

5) RS-485 通信端口。RS-485 通信端口电路如图 6 所示，这里采用具有隔离功能的 RS-485 接口芯片 ISO3082 实现信号转换，采用自恢复保险、压敏电阻、TVS 衰减通信线上的电磁干扰信号。

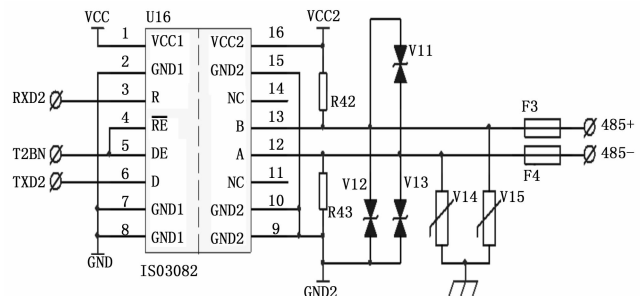


图 6 RS-485 通信端口电路

6) 外壳端口。本装置安装在操作箱内“黑模式”运行，

电路板安装在铝合金型材壳体内，只有几个指示灯指示装置的工作状态，采用带导光柱的发光管实现，防止壳体静电对装置的干扰。

7) 功能地端口。电路板上的“大地”信号线通过端子与壳体相连，壳体上设置专门的接地柱与操作箱内的接地铜排连接。

### 2.3 电路板 PCB 工艺设计

电路板的 PCB 图也要进行抗干扰设计<sup>[10]</sup>。在元器件布局时 CPU 核心组件和外部端口电路之间放置隔离器件，形成隔离栅，隔离栅要保持足够的爬电距离，所有的信号线都不能穿越隔离栅，由此构建嵌入式系统抗干扰的核心层及信号隔离层。

实现干扰信号衰减和泄放的组件与接线端子靠近，放置在电路板的边沿区域，“大地”信号布在电路板边沿，线宽  $\geq 100$  mil，不要封闭；电源层和地线层分割时，各区域之间也要布置隔离栅，爬电距离也要足够大，电路板四周放置接线端子和衰减层组件，放置衰减层组件的区域不要布置内层，使内层离干扰信号的距离尽可能大，防止外部的干扰信号通过内层窜入。

信号变换和调理电路按功能分区，各自独立完成自己的功能，也要保证足够的爬电距离。

### 2.4 抗干扰层次体系应用总结

综上所述，油压监控器的抗干设计遵循了本文提出的抗干扰层次体系结构，其抗干扰解决方案如图 7 所示。

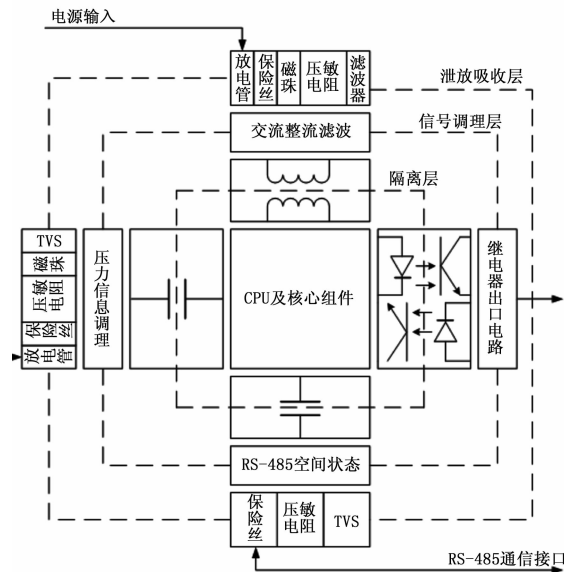


图 7 油压监控器抗干扰层次体系

图 7 中，由于继电器的线圈回路和触点回路本身相互隔离，控制回路通道离干扰信号相对较远，没有设计最外层的衰减电路。其他端口的设计都是遵循了抗干扰体系的原则。

### 2.5 抗干扰层次体系效果验证

根据上述嵌入式系统抗干扰体系结构设计的产品具有良好的抗电磁干扰性能，都能顺利通过国家相关检测机构的型式试验检测，其电磁兼容性都能满足电磁干扰严酷等级为 IV 级的标准，产品的实际工程应用的效果也十分理想。

## 3 结论

构建嵌入式系统抗电磁干扰的防护体系模型对其在恶劣的

电磁环境中稳定可靠运行至关重要,该体系模型已应用在电子式油压控制器、隔离开关智能组件、操作机构电机保护装置等产品设计中,从所设计产品在检测机构检测、现场运行的经验来看,这些产品都具有较高的抗电磁干扰性能。型式试验的结果和现场运行的经验表明,本文所提出的抗干扰体系可以较好地解决了嵌入式系统产品面临的复杂电磁环境的问题。

#### 参考文献:

- [1] 肖保明,傅静波.智能变电站智能组件电磁干扰分析与测试[J].安全与电磁兼容,2014,(3):23-26.  
 [2] 姚刚,贺家李,王钢,等.电力系统自动化设备的电磁兼容技术[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(4):52-57.  
 [3] 黄益庄.变电站智能电子设备的电磁兼容技术[J].电力系统保护与控制,2008,36(15):6-9,59.

- [4] 梁志成,傅静波,李富同,等.微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J].电力系统自动化,2003,27(11):65-68  
 [5] 程利军,李铁群,焦韶华.快速瞬变脉冲群对微机保护装置数据采集系统的影响及对策[J].电力自动化设备,2004,24(1):14-19.  
 [6] 王尧,李奎,郭志涛,等.智能漏电断路器抗电快速瞬变脉冲群干扰研究[J].电力自动化设备,2012,32(4):129-133.  
 [7] 刘尚合,刘卫东.电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J].高压技术,2014,40(6):1605-1613.  
 [8] 王景利,杜祥岭,梁波.用铁氧体模型进行抑制电磁干扰的分析[J].辽宁工学院学报:自然科学版,2002,22(1):22-23.  
 [9] 吴启蒙,魏明,张希军,等.瞬态抑制二极管电磁脉冲响应建模[J].强激光与粒子束,2013,25(3):799-804.  
 [10] 张兰勇,刘黎明,李冰.印制电路板电磁辐射等效偶极子建模与预测[J].仪器仪表学报,2013,34(4):942-947.

(上接第207页)

图像处理取得重心坐标点和相应的Y轴坐标线的图像如图5(e)所示。

#### 2.3.3 系统的标定

系统使用比较标定法获得标定系数。具体步骤如下:利用标准金属量器上的读数标尺作为液位精度值的来源,首先测出示液管的长度 $L$  mm,将这段距离平均分成 $N$ 个像素点,则每个像素点代表距离 $\frac{L}{N}$  mm,下参考点作为零点,液位图像处理

后测得像素高度 $M$ ,则液位的实际高度:

$$x = M \times \frac{L}{N} \quad (8)$$

例如, $L=200$  mm, $N=2000$ , $M=152$ ,则可以计算实际液位高度 $x=M \times \frac{L}{N}=15.2$  mm,分辨率达0.1 mm。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 实验结果

数字USB摄像头采集的图像像素为 $1600 \times 1200$ b,示液管的高度为 $L=200.00$  mm,通过openCV中cvResize算子将图像高度分辨率 $N=2000$ ,数字USB摄像头支柱距示液管中心距离为150 mm,摄像头中心线下测距离暗箱底部100 mm,在Linux平台下,对10幅计量示液管图像进行了测试,并与相应的人工读取游标卡尺的值进行对比,最终结果统计如表2所示。

表2 图像识别与人工读数比较

图像编号	图像处理	人工读取	绝对误差
1	121.3	121.2	0.1
2	123.4	123.5	-0.1
3	124.6	124.3	0.3
4	126.7	126.9	-0.2
5	127.4	127.8	-0.4
6	128.3	128.1	0.2
7	129.4	129.5	-0.1
8	132.8	132.5	0.3
9	135.3	135.8	-0.5
10	138.6	138.2	0.4

#### 3.2 误差分析

液位图像识别过程中造成测量误差主要由以下几个原因:

(1) 图像畸变产生的误差 图像的畸变主要包括拍摄的液位图像时产生的几何畸变。

(2) 玻璃液位计倾斜带来的误差 由于地面不平会造成玻璃液位计的倾斜,系统中使用自动调平来减小玻璃液位计倾斜带来的误差。

(3) 摄像头和凹液面的距离随着液位的改变而变化带来的误差 由于液位会上下浮动,距离摄像头的距离会发生改变,距离摄像头水平面的距离越大,带来的误差会随之增大。因此测量时尽量缩短玻璃管的长度。

由表2可见,在误差允许范围内,图像识别与人工读数结果很接近,绝对误差都在 $\pm 0.5$  mm内,这验证了液位图像检测具有较高的测量精度,可以满足液位检测精度要求。

### 4 结论

本文设计了一种关于标准量器液位的自动计量的方法并测试完成,分辨率为0.1 mm,在燃油加没机计量检定测试中,完全能够取代人工测试。从而克服了人工读取液位的繁琐、耗时以及误差大等问题,提高了计量检定测试的速度、效率、精度和自动化程度。

#### 参考文献:

- [1] 中国计量科学研究院.标准金属量器检定规程[M].北京:中国计量出版社,2005.  
 [2] 赵刚,唐得刚.几种常用的液位在线检测方法的比较[J].中国仪器仪表,2005,(5):36-40.  
 [3] 张毅刚.嵌入式应用设计[M].黑龙江:哈尔滨工业大学出版社,1997.  
 [4] 王敏,秦肖臻.自动控制原理[M].北京:北京化工出版社,2003.  
 [5] 胡春海.玻璃液位实时监测系统的研究[J]自动化与仪表,2000,15(2):9-11  
 [6] 陈胜勇,刘盛.基于OpenCV的计算机视觉技术实现[M].北京:科学出版社,2008  
 [7] 刘治锋.基于图像的水位自动检测研究[D].南京:南京理工大学,2004.  
 [8] 雷丽珍.数字图像边缘检测方法的探讨[J].测绘通报,2006(3):40-42.