

# 航天遥感相机星上自适应图像增强研究与实验

袁航飞<sup>1,2</sup>, 郭永飞<sup>1</sup>, 刘春香<sup>1</sup>, 吕恒毅<sup>1</sup>, 宁永慧<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了解决航天遥感图像在地面增强处理带来的滞后性和失真性, 因此提出了星上自适应图像增强的方法和一种新的基于自适应线性拉伸的拉普拉斯滤波算法, 来实现星上图像增强处理的实时性和自适应性; 在拉普拉斯滤波的基础上, 用自适应调整参数  $A$  和  $B$  对图像的对比度和边缘进行增强, 该算法结构简单, 运算量小; 最后建立以 FPGA 为核心的硬件系统平台, 采用流水线的处理方式, 对该算法进行实验验证; 实验结果表明, 与其他增强算法相比, 文章算法增强的图像目视效果更好, 信息熵提高了 10.21%, 处理一幅图像所需的时间是 79.6 ms, 满足航天遥感相机星上自适应图像增强实时性的要求, 达到了预期效果。

**关键词:** 卫星遥感相机; 图像增强; 拉普拉斯滤波

## Study and Experiment of Adaptive Image Enhancement on Satellite for Space Remote Sensing Camera

Yuan Hangfei<sup>1,2</sup>, Guo Yongfei<sup>1</sup>, Liu Chunxiang<sup>1</sup>, Lv Hengyi<sup>1</sup>, Ning Yonghui<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A method of Adaptive image enhancement on satellite is proposed to solve the problem of Hysteresis and complexity, which is caused by remote sensing image enhancement on the ground, and in order to achieve real-time and self-adaptive of image enhancement, this paper proposes a new Laplace filtering algorithm based on adaptive linear stretch. On the basis of the Laplace filter, enhance the contrast and edge of the image with adaptive parameters  $A$  and  $B$ . The algorithm is simple and has small amount of computation. A platform is established with FPGA as the core of the hardware and then verifies the feasibility of the algorithm by pipelining processing of two images. The results show that the information entropy improved 10.21% by using this algorithm, and the visual effects is better than the other algorithms. The operation speed of an image is 79.6ms. It meet the real-time requirements of adaptive image enhancement on satellite, we achieved the expected results.

**Keywords:** space remote sensing camera; image enhancement; Laplace filter

## 0 引言

目前, 对航天遥感图像的增强处理, 是将卫星上的原始图像数据压缩下传到地面, 在地面上进行解压缩和图像增强处理, 这使得遥感图像得不到及时的应用。而且受数传速度的限制, 在压缩过程中会将 12 bit 的图像压缩成 10 bit 的数据, 舍弃的 4 位可能包含了重要信息, 这样的遥感图像数据缺乏实时性和真实性<sup>[1]</sup>。所以本文提出了航天遥感相机星上自适应图像增强的方法。

遥感相机星上自适应图像增强是指在卫星平台上对 CCD 遥感相机拍摄的原始图像进行实时自适应图像增强处理, 该方法在原始图像压缩前, 根据拍摄遥感图像的参数进行图像自适应增强, 提高了图像的质量, 增强后的图像会将图像中的重要信息凸现出来, 进而在压缩过程中不会将重要信息丢失<sup>[2]</sup>, 使遥感图像的判读变得更加及时, 所以遥感相机星上自适应图像增强的研究有着重大的意义<sup>[3]</sup>。

目前, 对航天遥感相机星上图像增强的方法未见报道, 为了保证遥感图像保真至上的原则, 避免增强后带来的不稳定

性, 航天相机计划采用双模式下传遥感图像, 其中一种模式为原始图像数据直接下传, 而另一种模式则采用本文提出的星上自适应图像增强方法下传增强后的图像<sup>[4]</sup>。本文提出了一种基于航天遥感相机星上实时自适应图像增强的方法并做了实验验证。

## 1 星上自适应图像增强方法

卫星遥感图像最主要的特点是动态范围较低且细节不明显, 因此对遥感图像的增强要着重于提高图像的动态范围和锐化细节边缘<sup>[5]</sup>。由于受星上环境条件和实时性要求的影响, 所以星上图像增强的算法不可过于复杂, 且要保证遥感图像增强的效果。

空间滤波是一种基本的空域图像增强方法, 是用掩模算子对图像进行逐点卷积运算, 运算主要由乘法和加法组成, 运算速度基本可以满足实时性的要求。空间滤波又分为平滑滤波和锐化滤波, 遥感图像边缘不明显, 所以通常采用锐化滤波, 锐化滤波算子包含拉普拉斯算子, sobel 算子等<sup>[6]</sup>。遥感相机拍摄的图像会由于光照度的改变或天气的影响, 导致动态范围较低, 所以在锐化滤波的前提下还要考虑增大图像的动态范围。

本文提出了一种基于自适应线性拉伸的拉普拉斯滤波图像增强算法。由于受星上实时性的要求, 所以采用  $3 \times 3$  的掩模窗口, 以减少计算量, 从而提高运算速度<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2014-03-07; 修回日期:2014-04-15。

作者简介:袁航飞(1988-),女,辽宁葫芦岛人,博士研究生,学士,主要从事图像增强方向的研究。

1.1 拉普拉斯滤波原理

函数  $f(x, y)$  在  $(x, y)$  的梯度, 即一阶微分是一个向量:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

二阶微分滤波也叫拉普拉斯滤波, 二维图像函数的拉普拉斯变换定义为:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (2)$$

$f(x, y)$  在  $x$  方向上的二阶偏微分定义为:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y) \quad (3)$$

$f(x, y)$  在  $y$  方向上的二阶偏微分定义为:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y) \quad (4)$$

公式 (2) 中的二维拉普拉斯数字实现可由两个分量相加得到:

$$\nabla^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \quad (5)$$

公式 (5) 可以用图 1 (a) 所示的掩模来实现。图 1 (b) 的掩模是以拉普拉斯定义为基础的, 只是系数相反而已, 它与图 4 (a) 产生同样的效果。

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

(a) (b)

图 1 离散拉普拉斯变换的滤波器掩模

拉普拉斯变换对图像增强的基本方法为:

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \nabla^2 f(x, y)(a) \\ f(x, y) + \nabla^2 f(x, y)(b) \end{cases} \quad (6)$$

其中: 式 (a) 用于中心为负的掩模, 式 (b) 用于中心系数为正的掩模。

本文以图 1 (a) 的掩模为滤波窗口, 将公式 (5) 带入到 (6) 中, 得到简化后的拉普拉斯掩膜算子<sup>[8]</sup>:

$$g(x, y) = f(x, y) - \nabla^2 f(x, y) = f(x, y) - \{ [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \} = 5f(x, y) - [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] \quad (7)$$

公式 (7) 通过图 2 所示的掩模来实现:

1.2 自适应线性拉伸的拉普拉斯滤波

为了能够提高图像动态范围和实现算法的自适应性, 本文对公式 (6) 进行改进, 得到了自适应线性拉伸的拉普拉斯滤波算法, 定义如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} Af(x, y) - B\nabla^2 f(x, y)(a) \\ Af(x, y) + B\nabla^2 f(x, y)(b) \end{cases} \quad (8)$$

$A$  和  $B$  是自适应调整系数,  $A$  主要影响线性拉伸的强度,  $B$  主要影响边缘锐化的程度。对公式 (8) 进行简化得到掩膜算子:

$$g(x, y) = Af(x, y) - B\nabla^2 f(x, y) = Af(x, y) - B\{ [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \} = (A+4B)f(x, y) - B[f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] \quad (9)$$

公式 (9) 通过图 3 所示的掩模来实现, 其中  $A$  和  $B$  由图像的平均灰度值和灰度值标准差来确定。

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

0	-B	0
-B	A+4B	-B
0	-B	0

图 2 合成拉普拉斯掩模 图 3 自适应线性拉伸的拉普拉斯掩模

1.3 自适应调整系数

由于天气, 光照度或传感器等因素的影响, 自适应调整系数  $A$  和  $B$  会根据遥感图像质量的不同, 取相应不同的值, 进而针对每一幅图像都能得到良好的增强效果。

自适应调整系数  $A$  和  $B$  由图像的平均灰度值和灰度值标准差来确定。

设参量  $a$  是离散的随机变量, 代表图像的灰度值, 范围是  $[l \rightarrow 0 \sim L-1]$ ,  $p(a_l)$  表示  $a_l$  对应的标准直方图的分量。我们可认为  $p(a_l)$  为  $a_l$  对应的灰度值在图像中出现的概率<sup>[9]</sup>。

随机变量  $a$  的  $n$  阶中心距定义为:

$$\mu_n(a) = \sum_{l=0}^{L-1} (a_l - m)^n p(a_l) \quad (10)$$

其中:  $m$  是图像的平均灰度值, 或者说是图像灰度值的期望,  $m$  定义为:

$$m = \sum_{l=0}^{L-1} a_l p(a_l) \quad (11)$$

特别的, 随机变量  $a$  的 2 阶中心距定义为:

$$\mu_2(a) = \sum_{l=0}^{L-1} (a_l - m)^2 p(a_l) \quad (12)$$

随机变量  $a$  的 2 阶中心距也可以说是图像灰度值方差, 可以用  $\sigma^2$  表示。图像灰度值的标准差是对方差进行开方, 用  $\sigma$  表示, 定义为:

$$\sigma = \sqrt{\mu_2(a)} = \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} (a_l - m)^2 p(a_l)} \quad (13)$$

$\sigma$  是图像亮度对比度的量度。期望和标准差可以直接由图像采样值计算, 定义如下:

$$m_g = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \quad (14)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - m]^2} \quad (15)$$

$m_g$  和  $\sigma_g$  分别表示图像平均灰度值和灰度值标准差, 它们对图像整体灰度和对比度的调整有着非常重要的作用。

现在, 我们需要一种方法来判断自适应调整系数  $A$  和  $B$  的取值, 利用灰度值标准差  $\sigma_g$  和平均灰度值  $m_g$  的来确定不同遥感图像的掩模窗口<sup>[10]</sup>。

参数  $A$  的增加可以明显的提高图像的对比度和图像的平均灰度值。但是随着  $A$  的增加, 会导致图像原灰度级较高的区域过亮而失去重要细节, 所以  $A$  的取值受图像平均灰度值

的限制，因此给出 A 经验公式：

$$A = \begin{cases} e \left[ \frac{(\rho G_{\max} - m_g)^2}{(\rho G_{\max} + m_g)^2} \times q \right] & m_g < \rho G_{\max} \\ 1 & m_g \geq \rho G_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

其中： $G_{\max}$  代表图像的灰度级， $\rho$  是限制灰度级的常数， $\rho = 2/3$ ， $q$  为一个常量参数，表示图像灰度的放大倍数，经过大量的实验，得到参数  $q$  的取值为 6.5，从公式 (16) 可看出，参数 A 随着全局期望的增加而单调减小。

参数 B 对图像的平均灰度值没有什么贡献，对提高图像的方差也只有略微作用，但是对锐化图像边缘有着巨大的作用，使得图像纹理更加清晰，但是随着 B 的增加，图像的噪声会越来越大，所以 B 要针对于图像的特征选取适当的值，因此给出 B 经验公式：

$$B = \frac{G_{\max}}{2^{\Delta n/2} \sqrt{\sigma}} \quad (17)$$

B 的变化随着标准差的增加而减小，其中  $G_{\max}$  代表图像的灰度级， $\Delta n$  表示图像的量化位数。

## 2 实验和结果

### 2.1 实验平台

针对航天遥感相机及本文算法的特点，建立了以 FPGA 为核心的硬件实验平台。

FPGA 适用于大数据量的快速处理和运算，很容易满足实时性的要求，而且 FPGA 的抗干扰能力也较强，所以它是卫星平台系统上的首选<sup>[11]</sup>。图 4 为航天遥感相机成像流程系统框图。

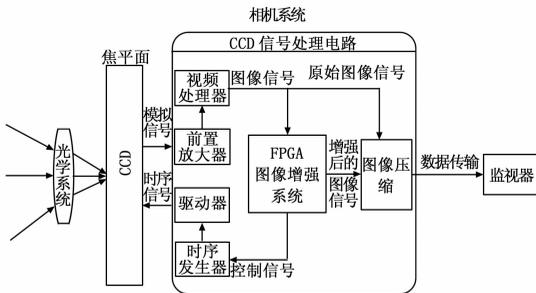


图 4 卫星遥感相机成像流程图

景物经由 CCD 焦平面成像，产生模拟信号，并由前置放大器放大，经视频处理器处理，通过模数转换，得到图像数字信号，一方面直接进入图像压缩部分，一方面进入图像增强模块的 FPGA 进行图像增强处理。最后的遥感图像数据在进行压缩后由数传传送给监视系统<sup>[12]</sup>。

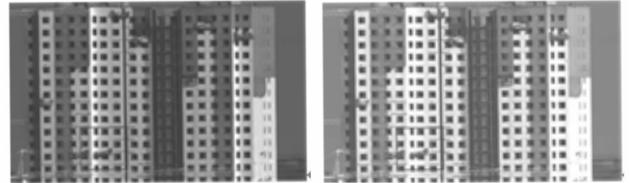
由于遥感相机的输出数据量非常大，输出速度非常快，所以就要求图像增强模块有高速的处理速度，图像增强模块的处理速度要等于或者高于图像的输出速度。基于上述要求，FPGA 选用 Xilinx 公司的 Virtex 5 系列，处理模块由一片 FPGA 和两片 SRAM 构成，采用流水线处理的方式<sup>[13]</sup>，在增强一幅图像的同时，计算下一幅图像的平均灰度值、灰度标准差以及参数 A 和 B，这样大大提高了运算速度。

### 2.2 实验结果

利用本文提出的算法，在所搭建的实验平台上对遥感相机拍摄的图像进行实时自适应增强处理<sup>[14]</sup>。遥感相机拍摄的原

始图像是 12 位的全色，图像灰度级为  $2^{12} = 4096$ 。

图 5 是遥感相机实验图像 (1) 的原始图像及用本文算法增强后的图像，通过公式 (14) (15) 求出遥感相机实验成像 (1) 的灰度平均值和灰度值标准差， $m_g = 1731.2352$ ， $\sigma_g = 598.9328$ 。利用所求的灰度平均值和标准差，代入到公式 (16) (17) 中，求出对应的自适应参数  $A = 1.3856$ ， $B = 2.6151$ ，则对应的拉普拉斯掩模如图 6。



(a) 原始遥感图像 (b) 用本文算法增强后的图像

图 5 遥感相机实验成像 (1)

0	-2.6151	0
-2.6151	11.8460	-2.6151
0	-2.6151	0

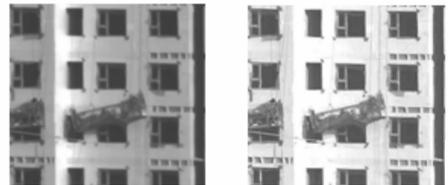
图 6 实验成像 (1) 的自适应合成拉普拉斯掩模

表 1 是原始图像与增强后图像的灰度平均值和灰度值标准差对比。

表 1 实验成像(1)原始图像与增强后图像的灰度平均值和灰度值标准差对比

	原图	增强后图像
$m_g$	1731.2352	2358.4656
$\sigma_g$	598.9328	794.6624

图 7 是遥感相机实验成像 (1) 的局部放大图。



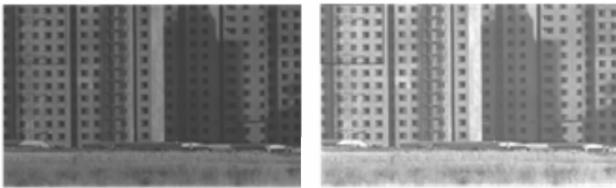
(a) 原始遥感局部图像 (b) 增强后的局部图像

图 7 遥感相机实验成像 (1) 局部放大图

从表 1 可以看出增强后的图像平均灰度值明显提高，灰度标准差也有了显著提升。从图 7 中可以看出增强后的图像亮度和对比度都有了提高，而且边缘细节也变得清晰，没有了原始图像的模糊感。

图 8 是遥感相机实验图像 (2) 的原始图像及用本文算法增强后的图像。

遥感相机实验成像 (2) 灰度平均值和灰度值标准差， $m_g = 1532.3824$ ， $\sigma_g = 418.8992$ 。利用所求的灰度平均值和标准差，求出对应的自适应参数  $A = 1.6712$ ， $B = 3.1270$ 。表 2 是原始图像与增强后图像的灰度平均值和灰度值标准差对比。图 9 为遥感相机实验成像 (2) 的局部放大图。



(a) 原始遥感图像 (b) 用本文算法增强后的图像

图 8 遥感相机实验成像 (2)

表 2 实验成像(1)原始图像与增强后图像的灰度平均值和灰度值标准差对比

	原图	增强后图像
$m_g$	1 532.382 4	2 536.132 8
$\sigma_g$	418.899 2	699.630 4



(a) 原始遥感局部图像 (b) 增强后的局部图像

图 9 遥感相机实验成像 (2) 局部放大图

从图 8 和图 9 可以看出增强后的效果很明显, 目视效果得到了良好的改善。

从上述实验结果可以看出本文的增强算法显著的提高了图像的目视效果, 灰度值和对比度都得到了明显的提升, 边缘锐化的效果也很明显, 而且图像基本未出现明显噪声, 细节也基本没有丢失, 图像效果达到了预期效果。

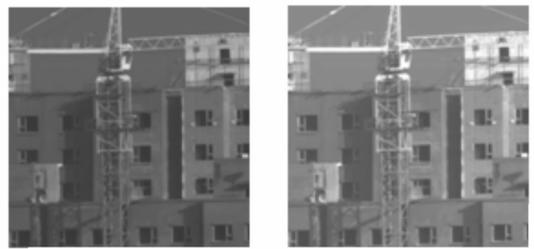
图像增强还有很多种方法, 在硬件上容易实现且能满足实时性的还可以有线性拉伸、直方图均衡化和拉普拉斯滤波等等, 下面对这几种图像增强算法进行比较<sup>[15]</sup>。以遥感相机实验图像 (1) 为例, 图 10 是原始图像和处理后图像的局部放大图。表 3 是对几种增强算法的图像质量的客观评价。

表 3 几种增强算法的图像质量的客观评价

	$m_g$	$\sigma_g$	信息熵
原图	1 731.235 2	598.932 8	6.356 1
线性拉伸	2 378.788 8	743.505 6	6.472 2
直方图均衡化	2 052.203 2	1174.593 6	6.327 4
拉普拉斯滤波	1 730.724 8	619.963 2	6.636 3
本文算法	2 358.465 6	794.662 4	6.905 2

从图 10 和表 3 中看出, 本文算法增强后的图像各项指标都很高, 信息熵比原图提高了 10.21%, 线性拉伸没有边缘锐化效果, 图像细节不够清晰; 拉普拉斯滤波没有增强图像的动态范围, 对比度较低; 直方图均衡化虽然增大了动态范围, 但是在过亮和过暗的区域都出现了细节的丢失, 噪声也被放大, 信息熵降低; 本文算法增强后的图像, 信息熵很高, 而且提高了对比度, 使边缘得到了锐化, 图像亮度适中, 保持了图像的真实性。

在处理速度方面, FPGA 的时钟频率是 100 MHz, 遥感相机输出的原始图像每行有 6 176 个像素, 每 1 000 行作为一幅



(a) 原图像 (b) 线性拉伸, k=1.3930



(c) 直方图均衡化 (d) 拉普拉斯滤波



(e) 本文算法

图 10 几种增强算法的比较

图像存入一个 SRAM 中, 从一幅图像的储存到增强处理再到输出图像共耗时约 79.6 ms。遥感相机图像输出的行周期为 83.32  $\mu$ s, 输出 1 000 行需要 83.32 ms, 所以该系统满足实时性的要求。

### 3 结论

根据航天遥感相机的特点, 提出了在卫星上进行实时自适应图像增强的方法。本文介绍了拉普拉斯滤波的基本原理, 并在此基础上提出了一种自适应线性拉伸的拉普拉斯滤波算法。从实验的结果可以看出, 用本文算法增强的遥感图像的对比度更高, 细节边缘更清楚, 视觉效果更好, 信息熵比原图提高了 10.21%, 利用本文的算法在实验平台上进行实验得到一幅图像的处理时间为 79.6ms, 小于遥感相机图像输出的最小行周期。结果表明, 本文算法在航天遥感相机星上自适应增强中能够得到令人满意的效果, 证明了方法的有效性。

#### 参考文献:

[1] 朱宏殷, 郭永飞, 司国良. 多 TDICCD 拼接相机成像非均匀性实时校正的硬件实现 [J]. 光学精密工程, 2011, 19 (12): 3034-3042.

[2] 王静轩, 尹传历. 基于 DSP 和 FPGA 的嵌入式实时图像增强系统 [J]. 液晶与显示, 2013, 28 (3): 459-463.

[3] 刘春香, 郭永飞, 李 宁, 等. 基于 DSP 的嵌入式实时图像增强系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 529-531.

[4] 白永强, 孙 腾. 基于金字塔模型和各向异性滤波的分层自适应图

像增强算法 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32 (3): 263-267.

[5] 汤晓春. 遥感图像增强方法的研究及实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[6] 黄 果, 陈庆利, 许 黎, 等. 可变阶次分数阶微分实现图像自适应增强 [J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34 (4): 446-453.

[7] 孙海江, 王延杰, 刘伟宁. 基于自适应平台阈值和拉普拉斯变换的红外图像增强 [J]. 中国光学, 2011, 4 (5): 474-479.

[8] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital image processing, second edition [M]. Publishing House of Electronics Industry, 128-133.

[9] Nafis uddin Khan, Arya K V, ManishaPattanaik. Histogram statistics based variance controlled adaptive threshold in anisotropic diffusion for low contrast image enhancement [J]. Signal Processing 2013 (93) 1684-1693.

[10] Onur Karal A, Erman O kman O, Tayfun Aytac. Adaptive image

enhancement based on clustering of wavelet coefficients for infrared sea surveillance systems [J]. Infrared Physics & Technology, 2011, (54): 382-394.

[11] 李洪祚. 实时图像增强算法研究 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2 (5): 395-401.

[12] 刘春香, 郭永飞, 李 宁, 司国良. 星上多通道 TDICCD 相机内部的图像实时合成压缩 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42 (8): 2068-2075.

[13] 王炳健, 刘上乾, 程玉宝. 基于 FPGA 的红外焦平面实时图像处理系统 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35 (6): 655-658.

[14] 郭汉洲, 吴振刚, 宋宣晓. 用于标定 CCD 相机的高精度数控 LED 点光源 [J]. 中国光学, 2013, 6 (5): 759-766.

[15] 杨利红, 赵变红, 张星祥, 等. 点扩散函数高斯拟合估计与遥感图像恢复 [J]. 中国光学, 2012, 5 (2): 181-187.

(上接第 2961 页)

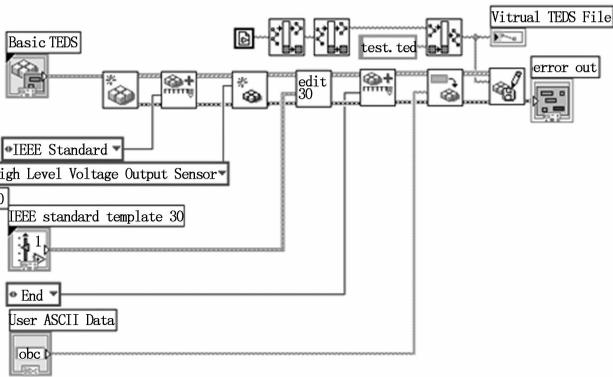


图 6 创建 TEDS 程序框图

传感器提供了统一描述方式, 因此网关能更加容易识别和控制各种不同传感器。TEDS 按照信息功能被划分为 3 类<sup>[7]</sup>: 基本 TEDS、IEEE 标准 TEDS 和自定义 TEDS。基本主要包含传感器的制造厂商, 型号和序列号等必要的识别信息; IEEE 标准 TEDS 主要描述传感器特有的“数据表”信息, 如测量范围、电气输出范围、灵敏度、功率要求以及校准数据等; 自定义 TEDS 可以存放如传感器位置信息、附加维修信息或其他驻留在传感器内的自定义信息。

主要是基本 TEDS 信息的创建, 包括了生产商 ID 号、标识序列号、测量范围等基本的信息; 图 6 为程序框图。当 TEDS 信息创建好之后并保存, 可以通过读取 TEDS 操作查看 TEDS 信息, 以表格的形式清晰的显示出来, 显示结果如图 7 所示。

### 4 结论

将 IEEE 1451 标准加入物联网体系结构中, 提高了物联网网关的接入能力, 能够兼容不同通信协议的传感节点, 从而解决物联网中异构节点的协议转换问题。在 LabVIEW 中利用 TEDS 函数库设计 TEDS 读写系统, 更加方便的识别和控制传感器。

### 参考文献:

[1] 陈海明, 崔 莉, 谢开斌. 物联网体系结构与实现方法的比较研究 [J]. 计算机学报, 2013, 36 (1): 169-187.

[2] Command U S N. About USNORTHCOM [J]. undated Web page. No longer available, 2009.

[3] IEEE Std 1451.5<sup>TM</sup>-2007, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators—Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats [S].

[4] Lee K B, Song E Y. Object—Oriented Application Framework for IEEE 1451.1 StandardC. IMTC: Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. 2005: 1527-1533.

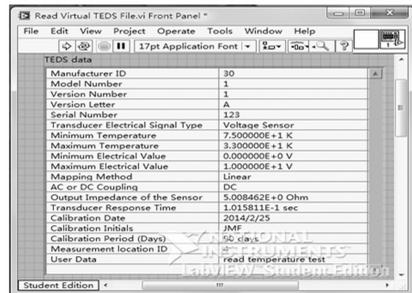
[5] Song E Y, Lee K B, Fick S E, Donmez A M. An IEEE 1451. 5-802. 11 Standard—based Wireless Sensor Network with Embedded WTIM [A]. /I2MTC: Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. BinJiang, 2011: 1-6.

[6] Seng R, Lee K B, Song E Y. An Implementation of a Wireless Sensor Network Based on IEEE 1451. 0 and 1451. 5-6LoWPAN Standards [A]. I2MTC: Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. BinJiang, 2011: 1-6.

[7] IEEE Std 1451.0<sup>TM</sup>-2007, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators—Common Functions, Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats [S].

[8] Song E Y, Lee K B. Sensor Network based on IEEE 1451.0 and IEEE p1451. 2-RS232 [A]. IMTC: Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings [C]. Victoria, 2008: 1728-1733.

[9] 刘桂雄. 基于 IEEE 1451 的智能传感器技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.



(a) 读取 TEDS 前面板 (b) 读取 TEDS 程序框图

图 7 显示结果

NI (national instrument) 美国国家仪器公司专门为 IEEE 1451 标准开发了 TEDS 函数库<sup>[8]</sup>, 运用这些函数库可以快捷的设计出传感器 TEDS 的读写仿真系统。创建 TEDS 前面板,