

# 基于小波分析的电磁兼容自动测试系统设计

邓 皓<sup>1</sup>, 李 军<sup>2</sup>, 张兰勇<sup>2</sup>

(1. 中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710016; 2. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对手动电磁兼容测试系统速度慢的问题,设计了一套基于 LabVIEW 软件开发平台和 GPIB 总线结构的电磁兼容自动测试系统,将 LabVIEW 软件开发平台以及小波分析理论应用于电磁兼容测试,实现了信号发生、监控、分析、记录等功能。解决了函数的快速收敛性、电磁兼容测试系统硬件的控制、设计的周密性、软件的兼容性等难点和关键技术,开发了电磁兼容自动测试系统。与目前使用的普通台式仪器的手动测试相比,该系统大大提高了测试速度与精度,并具有良好的扩展性。

**关键词:**LABVIEW 软件; GPIB 结构; 传导发射; 自动测试系统; 小波分析

中图分类号: TP351

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)04-0086-05

## The Study of Automatic Testing System Design for Electromagnetic Compatibility Based on Wavelet Analysis

DENG Hao<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, ZHANG Lan-yong<sup>2</sup>

(1. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710016, China;

2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** According to the problem that the speed of electromagnetic compatibility(EMC) manual system is slow, an automatic testing system is designed for electrical power wire conducted emission based on general-purpose interface bus(GPIB) and LabVIEW, which actualizes a series of functions, such as signal generating, monitoring, analyzing and showing. It solves the hard problems of the electromagnetic compatibility testing system and key techniques such as hardware's controlling, algorithm's fast convergence, software's compatibility. It is the first time of applying LabVIEW and wavelet analysis theory to the EMC automatic system. Comparing with the other traditional apparatuses and the manual testing, the system improves the test efficiency and has good extensibility.

**Key words:** LABVIEW; GPIB structure; conducted emission; automatic testing system; wavelet analysis

随着我国船舶事业的发展,船舶电子系统以及电气设备日益增多,电子设备之间的通讯日益频繁,尤其是开关电源的使用,使电磁兼容测试成为电磁兼容设计中非常重要的一项。目前大部分电磁兼容测试需要手工进行,受到测试方法的影响,测试效率低、可靠性差,解决电磁兼容的快速可靠测试是一个十分重要和迫切的任务。通过对电磁兼容测试方法的研究,结合当前电磁兼容性技术发展,本文在研究虚拟仪器构建原理的基础上,设计出一套基于虚拟仪器的具有电

磁干扰测试、数据分析和处理、数据存储的电源线传导发射测试系统。由于虚拟仪器技术的引入,使得该系统具有运行效率高、开发周期短的特点,同时有助于减少重复投资,具有很强的扩展性和重用性。本文的研究成果对电磁干扰测量方法的研究以及检测的质量,对电磁兼容性测试技术的发展都具有重要意义,并且在工程中具有重要价值。在基于 LabVIEW 的硬件驱动上获得了创新成果。同时,结合标准测试的实际,设计基于 LabVIEW 的电磁干扰自动测试系统的结

收稿日期: 2013-01-10

基金资助: 中国博士后科学基金(2012M510924)。

作者简介: 邓皓(1981—),男,工程师,主要从事综合空降空投以及电磁干扰测试研究。

构,分析了系统的功能流程,在此基础上构建硬件测试系统平台。通过仪器控制的命令码读写驱动,实现对硬件仪器的控制。在实现对信号进行小波分析与处理功能的基础上,实现数据的采集、波形实时显示、数据存储;通过快速比例控制算法实现信号的精确快速反馈;同时对测量的电磁信号设置区间,进行安全保护设置。

## 1 小波模型

在计算机接收到测量接收机传回信号后,利用计算机强大的计算能力对信号进行处理。小波分析具有可变的时间窗口,在分析高频信号和低频信号时,窗口自动变化,因此适用于分析干扰信号。在 LabVIEW 软件中,建立小波分析子函数,对信号进行分析和处理。同时应用小波分析的多分辨率特性,对干扰信号进行分解,通过多频带上小波分解信号,可以将电磁信号分解为多个频带,并且提取出某段频率范围的时频特性进行频谱分析。根据频谱分析结果可以获得不同于干扰源的电磁干扰。

### 1.1 小波函数

对于函数  $\phi(x) \in L^2(R)$  由  $\{\phi_{j,k}, k \in Z\}$  生成的闭子空间记为  $V_j$ ,即

$$V_j = \overline{\text{span}\{\phi_{j,k}, k \in Z\}}, j \in Z \quad (1)$$

为了建立函数的多分辨小波模型,给出如下定义:

**定义 1:** 空间  $L^2(R)$  中的多分辨分析(MRA)是指  $L^2(R)$

中的满足如下条件的一个空间序列  $\{V_j\}_{j \in Z}$ :

1) 一致单调性:  $\dots V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \dots$

2) 渐进完全性:  $\bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}$ ,

$$\text{clos}_{L^2|R|} \left\{ \bigcup_{j \in Z} V_j \right\} = L^2(R)$$

3) 伸缩规则性:

$$f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1}, j \in Z$$

4) Riesz 基存在性: 存在  $\phi \in V_0$ , 使得  $\{\phi(x-k)\}_{k \in Z}$  是具有 Riesz 界  $A$  与  $B$  的  $V_0$  中的 Riesz 基, 且另

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j x - k) \quad (2)$$

则  $\forall j \in Z, \{\phi_{j,k}, k \in Z\}$ , 也是具有相同 Riesz 界  $A$  与  $B$  的  $V_j$  的一个 Riesz 基, 称  $\phi$  为一个尺度函数。

如果  $\phi$  生成一个 MRA, 那么因为  $\phi \in V_0 \subset V_1$ , 并且因为  $\{\phi_{j,k}, k \in Z\}$  是  $V_1$  的一个 Riesz 基, 所以存在唯一  $l^2$  两尺度序列  $\{p_k\}$  描述尺度函数  $\phi$  的两尺度关系

$$\phi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_k \phi(2x - k) \quad (3)$$

假设此处的小波满足小波容许性条件, 则  $V_1$  中的小波可以按如下方式生成

$$\psi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} q_k \phi(2x - k) \quad (4)$$

函数族  $\{\psi_{0,k}\}$  也生成一个闭子空间  $W_0$ , 即

$$\psi_0 = \overline{\text{span}\{\psi_{0,k}, k \in Z\}} \quad (5)$$

因此, 由式(2)和式(5)有  $W_0 \subset V_1$ 。在构造小波时, 一般至少保证  $V_1$  是  $W_0$  和  $V_0$  的直接和, 即有

$$V_1 = V_0 + W_0 \quad (6)$$

在实际系统中, 由于测量元件分辨率总是有限的, 可以认为所获得的信息  $f(x(K-1)) \in V_0$ , 依照式(10)将其分解为

$$\begin{aligned} f(x(K-1)) &= f_L(x(K-1)) + g_L(x(K-1)) + \dots + \\ &g_2(x(K-1)) + g_1(x(K-1)) = \\ &\sum_{k \in Z} d_{L,k} \phi_{L,k}(x) + \sum_{j \geq L} \sum_{k \in Z} \phi_{L,k} \psi_{j,k}(x) \end{aligned} \quad (7)$$

当选用正交小波时, 则有

$$d_{L,k} = \langle f, \phi_{L,k} \rangle, c_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (8)$$

式(11)即为信号  $f \in L^2(R)$  的多分辨小波模型, 可将式(11)改写为

$$f(x) = \sum_{j,k} w_{j,k} g_{j,k}(x) \quad (9)$$

### 1.2 滤波阈值函数的构造

目前通用的阈值滤波方法包括软阈值滤波和硬阈值滤波。硬阈值法误差较小但估计的信号会产生附加振荡, 而软阈值则使信号整体连续性好但偏差较大。

经过小波分解, 信号的小波系数幅值要大于干扰信号的系数幅值。小波阈值滤波的原理是把信号的能量在小波域集中在一些大的小波系数中, 而环境噪声的能量却分布于整个小波域内。然后保留大尺度低分辨率下的全部小波系数, 而对各尺度高分辨率下的小波系数, 设定一个阈值对信号进行滤波, 处理后利用逆小波重构恢复信号。所以滤波的关键问题在于阈值的确定。

本文通过结合软阈值法和硬阈值法, 设计一个阈值函数, 结合软阈值和硬阈值的优点获得平稳滤波性能

$$w_0(x) = \text{sgn}(x) \left( |x| - \frac{b\lambda}{e^{\frac{|x|-\lambda}{\lambda}}} \right), |x| \geq \lambda$$

$$w(x) = 0, |x| < \lambda$$

$$\lambda = \sqrt{2 \log(N) \sigma} \quad (10)$$

式(10)在小波域内连续并在  $|x| \geq \lambda$  时有高阶导, 同时不存在参数选择问题。当  $x > 0$  时, 式(10)变为

$$\frac{w(x)}{x} = 1 - \frac{b\lambda}{x e^{\frac{x-\lambda}{\lambda}}} \quad (11)$$

而在  $x < 0$  时

$$\frac{w(x)}{x} = 1 + \frac{b\lambda}{x e^{\frac{-x-\lambda}{\lambda}}} \quad (12)$$

小波分析由于同时在时频中对信号进行分析, 并且在低频时时间分辨率较低, 高频时时间分辨率较高。而利用这种自动变焦的功能, 能有效区分非平稳信号中的突变部分和噪声, 进而利用上面介绍的阈值函数滤波方法消噪。在 Matlab 里对基于傅里叶分析和小波分析的滤波方法进行比较, 结果如图 1 所示。

从图 1(c) 可以看出, 用小波阈值函数进行非平稳信号的消噪, 不仅可以很好的保存有用信号中的尖峰和突变, 而

且可以显示原信号的特点。由图 1(b)可以看出,利用傅里叶分析进行滤波时,假若低通滤波器太窄时,则在滤波后,信号中仍会存在大量噪声,而弱低通滤波器太宽,则会滤除一部分有用信号。由于信号集中在低频部分,噪声分布在高频部分,所以不能将有用信号的高频突变部分和噪声引起的高频干扰加以区分,所以未能精确重构信号。

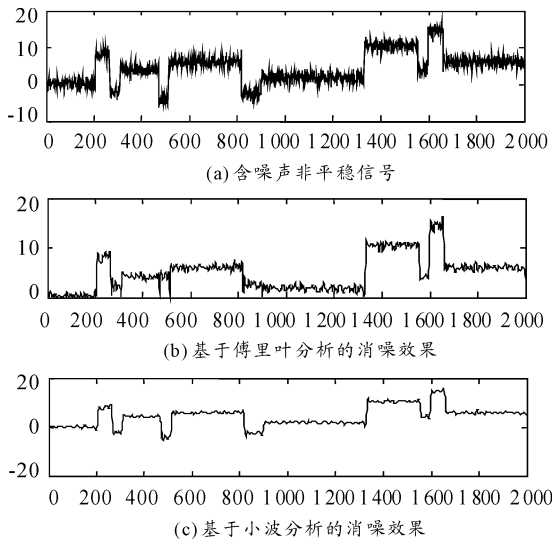


图 1 非平稳信号的傅里叶分析与小波分析滤波效果比较

## 2 系统软件结构

自动测试控制程序是一个独立的可执行文件(EXE 文件),是整个测试软件的核心,在这个独立的可执行程序中会自动调用用户选用仪器的驱动程序来实现对仪器的控制,并提供对所调用动态链接库的检查,确保所编制动态链接库的正确性,在用户改变所用仪器时,程序根据不同仪器的驱动控制相应的仪器,无需在程序中做任何改动。当用户选用新的、且在仪器库中不存在的仪器时,只需开发新仪器的驱动即可,不必修改主程序。

### 2.1 软件模型建立

设计应用程序时,采用由上至下的设计方法(Top-Down),首先明确测试系统的总体要求和性能参数,然后将系统划分为各个功能模块,如:信号产生、数据读取、数据分析、显示等,再将各个模块逐步划分为更小的模块。软件的总体框架设计是整个测试系统的核心,也是系统主要组成部分。电磁兼容传导发射测试系统软件设计采用模块化思想和层次化思想。这样分层模块程序结构不但增加了程序的可维护性,也增加了程序的可读性,使程序流程图更加清晰明了,同时也避免了大量的重复编程工作。LabVIEW 函数库中集成了常用的函数模块,这些模块为开发者完成数据采集、分析、显示等任务,提供了极大的方便。

利用 LabVIEW 提供的各种函数设计测试程序,结合仪

器的命令码开发驱动程序,实现对被测信号的发生、放大与模/数转换、数据采集,由此可以获得真实信号,供计算机进一步分析处理。数据分析利用软件平台中丰富的信号分析函数实现。数据处理部分主要完成对采集信号的显示、分析。

### 2.2 测试系统程序流程

系统通过 GPIB 总线控制信息控制仪器,通过设计仪器驱动自动加入探头和接收机的修正系数,调节频率的增加,并实时监控输出功率,动用小波分析模块进行信号处理,感应电流的大小,生成测试曲线和测试报告,完整测试电磁干扰。

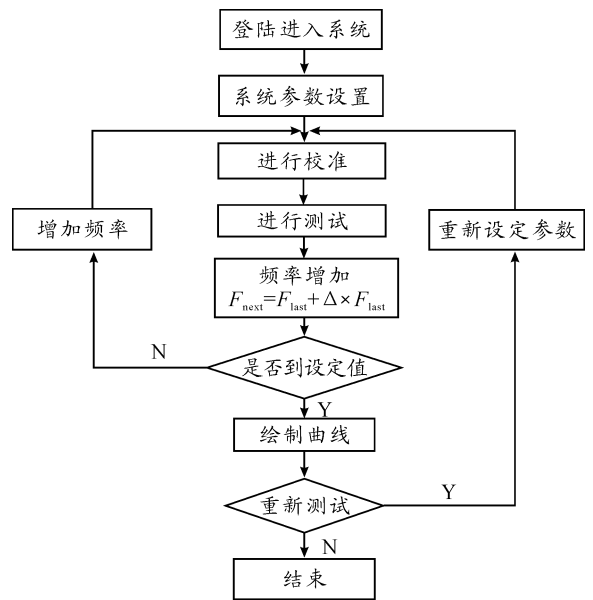


图 2 电磁干扰测试流程

## 3 系统实现

电源线传导发射测试,主要目的是确认射频电流是否通过电源线影响其他设备,这种低频电流会通过滤波电容传到外壳上,干扰系统内的低频灵敏接收设备,同时也可测量可能出现在电源线上的噪声。电源通过线性阻抗网络(LISN)连接被测设备,电流探头卡在传输线将测得的电流值传送到测量接收机,测量接收机则通过 GPIB 总线连接到计算机上,数据由 LabVIEW 软件分析处理。

测试系统硬件构成框图如图 3 所示。

测试软件程序以频谱曲线、测试记录的形式给出检测报告,由检测报告可以得到实时测试的各种数据。同时仪器与打印机相连,直接打印测试报告,既减少了测试人员的工作量,使工作效率得到了有效提高,又满足了客户在尽可能短的时间内获得报告的要求。从而也就避免了由手动输入测试数据所带来的测试误差,有效提高了检测质量。

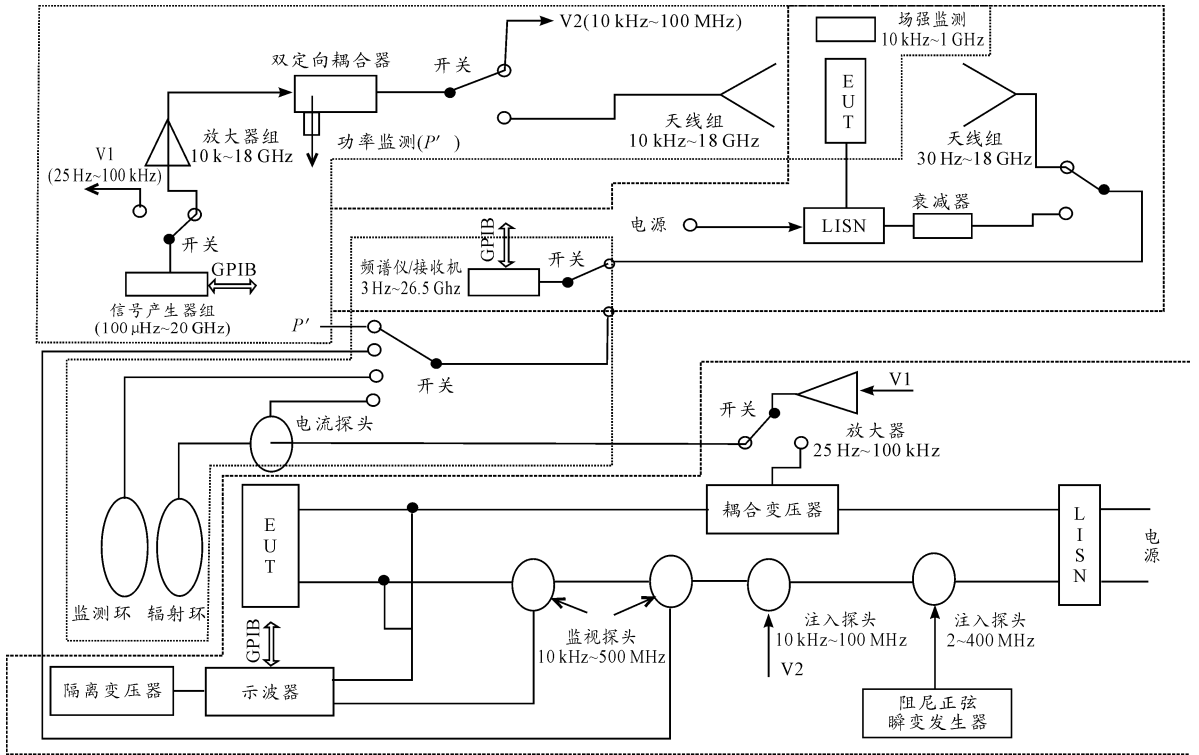


图3 测试系统硬件构成

下面以电源线传导发射测试为例,检验测试系统的工作效率。点击测试,系统开始自动测试。打印测试结果如图4所示。

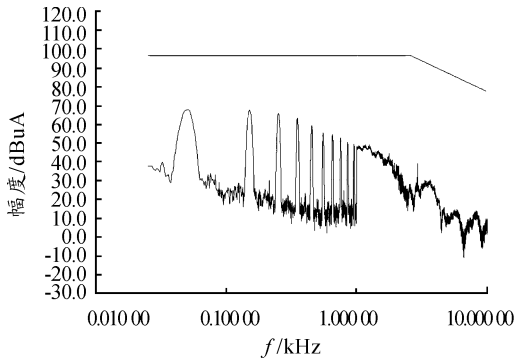


图4 电磁干扰测试

图4中直线是GJB151A规定的电源线传导发射的极限值。曲线表示测试系统测得的实际传导发射值。由图4可知,电源线传导发射性能完全满足GJB151A的标准,并且留有一定裕度。

通过多次测试,可以对手动测试和自动测试的效率进行对比。

图5中虚线代表手动测试,实线代表自动测试。可见随着测试次数的增长,自动测试比手动测试大大节省了时间。

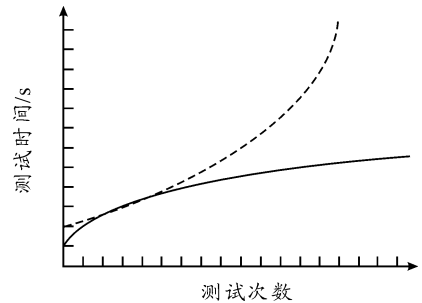


图5 手动测试与自动测试对比结果

## 4 结束语

本文从国内外电磁兼容性自动测试技术发展、技术要求出发,采用先进的虚拟仪器软件平台LabVIEW开发出满足GJB151A/152A要求的船舶装置系统的传导发射自动测试系统软件,解决了当前电磁兼容测量方面急需解决的问题。利用软件与硬件的结合,实现了一台计算机同时对多个试验仪器的自动协调控制,做到了各仪器设备参数自动设置、自动调整,并且完成了对信号进行精确分析和处理以及实时评判测试结果的功能,从而大大提高了电磁兼容测试的效率和精度。系统的运行已证明,基于LabVIEW电源线传导发射自动测试系统的开发提高了测试工作的效率和精确度,减轻了测试人员的工作强度。

## 参考文献:

- [1] Zhong-hao Lu, Ji-bin Liu, Pei-guo liu. A novel method of ambient interferences suppressing for In situ electromagnetic radiated emission test [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(6): 1205 - 1215.
- [2] 韦韬. 舰载电子设备电磁兼容研究与设计[J]. 船舶电子工程, 2008, 8(1): 170 - 172.
- [3] 刘俊伟, 汤仕平. LabVIEW 的低频传导敏感度自动测试系统[J]. 仪表技术, 2007, 3(1): 30 - 32.
- [4] Surajit Midya, Rajeev Thottappillil. An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System [J]. Transportation Research, 2007 (Part C): 5 - 20.
- [5] Hourtoulle J, van Houtte D, Fejoz P, et al. Magnetic compatibility of standard components for electrical installations Tests on programmable logical controllers and other electronic devices[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 24(2): 179 - 183.
- [6] ZHU Zhi-yu, ZHANG Bing, LIU Wei-ting. Marine Electromagnetic Compatibility Measurement Technique Based on Multi-Resolution Waved Analysis[J]. Navigation of China, 2005, 64(3): 81 - 83.

- [7] Jagadish Nadakuduti, Sven Kuhn, Mark Douglas. The effect of diode response of electromagnetic field probes for the measurements of complex signals[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(6): 1195 - 1204.
- [8] Letertre. Thierry, Azoulay. Alain, De Lacerda. Raul. Study of RF emissions of various electronic devices used by the public [C]//2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. Tel Aviv: [s. n.], 2011: 1340 - 1245.
- [9] Ren Shouxin, Gao Ling. Application of a wavelet packet transform based radial basis function neural network to analyze overlapping spectral [C]//2008 Congress on Image and Signal Processing. [S. l.]: [s. n.], 2008: 874 - 878.
- [10] 刘胜, 张兰勇, 张利军. 基于小波分析的电磁干扰测量技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1229 - 1233.
- [11] Zamow. Dirk, Hamann. David, Genender. Evgeni, et al. On estimating the directivity of electrically large cable dominated desktop systems [C]//10th international Symposium on Electromagnetic Compatibility. York, United kingdom, 2011, 1: 482 - 487.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 85 页)

相对于实时目标的位置误差来说, 系统机械误差对于天线跟踪系统的影响是在无人机处于较远距离的时候。这种误差主要来源于机械结构自身存在一定的耦合精度。鉴于此, 我们采用了二阶闭环锁相的反馈式控制, 利用电机转动轴角编码器完成闭环控制, 从而使机械方面误差精度小于  $0.8^\circ$ 。

## 4 结束语

由于天线自动稳定实时跟踪无人机飞行方向对保障飞行安全起至关重要作用, 因此随计算机运行速度飞速提升, 北斗卫星、电机等设备发展, 将会有更多不同类型天线系统得到研制和广泛应用, 同时也推动我国中小型无人机在民用领域的更广领域使用, 提高无人机执行森林火警预报、地质勘探、灾区救援等任务时具备更强工作效率。

## 参考文献:

- [1] JIN S, ZHANG X, MA W. Development of antenna tracking system for pilotless helicopter [J]. Journal of Beijing Uni-

versity of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(4): 366 - 369.

- [2] JIN S, ZHANG X, MA W. A design of tracking antenna controller based on FPGA technology [J]. Telemetry Tracking and Command, 2002, 23(3): 48 - 52.
- [3] 樊昌元, 邓洪. 单片机在卫星天线控制系统中的应用 [J]. 成都信息工程学院学报, 2005(1): 41 - 44.
- [4] 赵毅强, 管大年, 豪敏. 电子罗盘在精确定位平台中的应用 [J]. 传感技术学报, 2005(1): 140 - 142.
- [5] 陈向明. 机载天线稳定跟踪系统的设计与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [6] 王晓明. 电动机的单片机控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [7] 史飞, 喻洪麟. 单脉冲自跟踪体制在车载“动中通”的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2004.
- [8] ZHOU H, JING Z, WANG P. Dynamic target tracking [M]. National Defence Industry Press, 1991: 33 - 35.
- [9] 孙超, 都基焱, 段连飞. 一种空间两点交会无人机定位方法 [J]. 兵工自动化, 2011(6): 35 - 36.

(责任编辑 周江川)