

自动驾驶仪动态测试系统设计

郑鹏¹, 张丽君², 张腾²

(1. 中国人民解放军 61497 部队, 北京 100091; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 自动驾驶仪是导弹制导与飞行控制系统中的重要组成部分之一; 驾驶仪的动态测试主要是检查各组件工作的正确性、可靠性以及组件之间配合的协调性; 对动态测试原理进行了分析; 提出了利用 PXI 总线的通用测试仪器, 结合动态信号分析算法, 实现动态测试的方法, 并进行了方案验证; 搭建了自动驾驶仪动态测试系统, 实现了对自动驾驶仪功能的动态测试; 分析了系统中可能存在的误差并阐述了改进的方法; 该方法的测试精度与传统台式仪器相当, 能够满足装备动态测试的要求。

关键词: 自动驾驶仪; 动态测试; PXI 总线

Design of Autopilot Dynamic Test System

Zheng Peng¹, Zhang Lijun², Zhang Teng²

(1. PLA 61497 Unit, Beijing 100091, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd, Beijing 100041, China)

Abstract: Autopilot is one of the important components of missile guidance and flight control systems. The dynamic test of the pilot is mainly to check the correctness, reliability and coordination of the components. The dynamic test principle is analyzed. A dynamic test method using universal test instruments of PXI bus is proposed, combined with dynamic signal analysis algorithm to realize dynamic test method, and the scheme is verified. The autopilot dynamic test system is built, and the dynamic test of the autopilot function is realized. Analyzed the possible errors in the system and explained the improved method. The test accuracy of this method is comparable to that of traditional benchtop instruments, which can meet the requirements of equipment dynamic testing.

Keywords: autopilot; dynamic test; PXI bus

0 引言

自动驾驶仪^[1]是导弹制导与飞行控制系统中的重要组成部分之一, 在导弹飞行过程中, 起着控制和稳定导弹的作用, 是导弹控制的核心, 使导弹按照制导设备发来的指令准确地飞向弹目遭遇点。自动驾驶仪的组成部分包括控制回路、姿态敏感器件、综合电源、舵机等, 主要实现对导弹的各个通道姿态角进行控制和稳定的功能。

针对自动驾驶仪的测试系统^[2-3]需要对上述部件进行全面测试。驾驶仪的动态测试主要是检查各部件工作的正确性、可靠性以及部件之间配合的协调性, 检查的重点是控制组合性能的好坏。

本文主要讨论对自动驾驶仪控制线路板上的各级运算放大器的动态测试。

1 动态测试原理

动态测试是通过分析被测对象对不同频率正弦信号激励的响应, 来获得其传递函数的技术。

如图 1, 正弦信号 $u(t)$ 施加到传递函数为 $G(s)$ 的系统, 系统输出 $y(t)$ 为与输入信号具有相同频率的正弦信号, 但具有不同的幅度 Y 和相位差 Φ , 如图 2。

输出信号的幅度 Y 和相位差 Φ 与系统在频率 ω 处的响

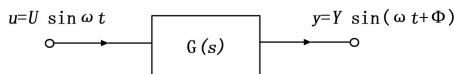


图 1 动态测试基本原理

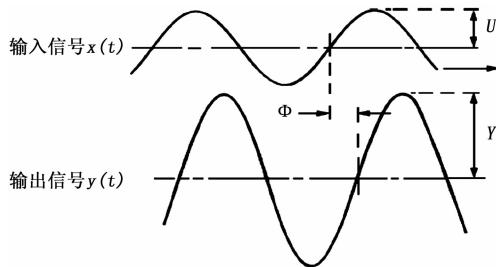


图 2 输入输出信号变化

应具有如下关系:

幅度响应:

$$\frac{Y}{U} = |G(j\omega)| \quad (1)$$

相位响应:

$$\Phi = \angle G(j\omega) \quad (2)$$

上述幅度响应和相位响应结果只与系统有关, 与输入信号无关。改变输入正弦信号的频率 ω , 可得到不同频率下系统的幅度响应和相位响应, 即可得到系统的频率响应曲线 (bode 图), 如图 3 所示。

这种动态测试方法的优势是能够对系统在不同频率点

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-05-08。

作者简介: 郑鹏 (1983-), 男, 河北保定人, 大学本科, 工程师, 主要从事通信传输安全防护方向的研究。

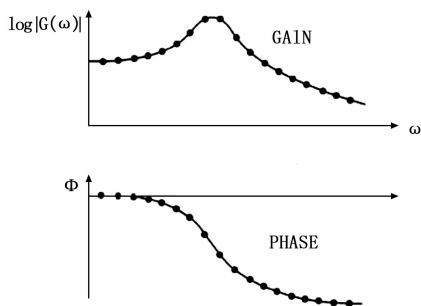


图 3 频率响应曲线

的响应进行独立分析, 精度很高, 适用于具有共振特性的系统测试。

传统台式动态测试仪利用信号相关处理的方式, 可获得高精度的频率响应结果, 如图 4 所示。

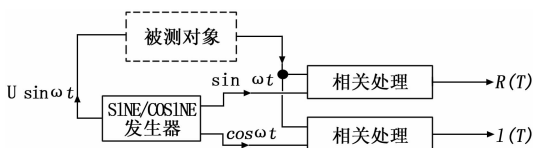


图 4 台式动态测试仪原理框图

对输入信号:

$$u(t) = U \sin \omega t \quad (3)$$

和输出信号:

$$y(t) = Y \sin(\omega t + \Phi) \quad (4)$$

其中幅度增益 $\frac{Y}{U}$ 和相位差 Φ 满足式 (1) 和式 (2)。

则正弦通道输出 $R(T)$ 为:

$$R(T) = \frac{U}{T} |G(j\omega)| \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t + \Phi) dt = \frac{U}{T} |G(j\omega)| \left[\cos \Phi \left(\frac{T}{2} + \frac{\sin 2\omega T}{4\omega} \right) - \sin \Phi \left(\frac{\cos 2\omega T}{4\omega} - \frac{1}{4\omega} \right) \right] \quad (5)$$

其中: $T = \frac{N2\pi}{\omega}$, $N=1, 2, 3 \dots$ 为输入信号周期的整数倍, 令 $a=R(T)$, 则式 (5) 变为:

$$a = R \left(\frac{N2\pi}{\omega} \right) = \frac{U}{2} |G(j\omega)| \cos \Phi \quad (6)$$

同样, 余弦通道输出 $I(T)$ 为:

$$I(T) = \frac{U}{T} |G(j\omega)| \int_0^T \cos \omega t \sin(\omega t + \Phi) dt \quad (7)$$

其中: $T = \frac{N2\pi}{\omega}$, $N=1, 2, 3 \dots$ 为输入信号周期的整数倍, 令 $b=I(T)$, 则式 (7) 变为:

$$b = I \left(\frac{N2\pi}{\omega} \right) = \frac{U}{2} |G(j\omega)| \sin \Phi \quad (8)$$

可得到该系统的频率响应结果:

幅度响应:

$$|G(j\omega)| = \frac{2 \sqrt{a^2 + b^2}}{U} \quad (9)$$

相位响应:

$$\Phi = \arctan \frac{b}{a} \quad (10)$$

由上述分析可知, 传统台式动态测试仪器具备如下功能:

- 1) 根据选定频率 ω , 产生精确的 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 信号;
- 2) 信号相关运算能力;
- 3) 非线性运算能力, 开方、反正切函数等

上述 2) 和 3) 项均可由 DSP (Digital Signal Processor, 数字信号处理器) 完成。

台式仪器中正弦和余弦信号均由内部产生, 因此可以获得精确的信号周期 T , 同时模拟处理部分如滤波也在仪器内部实现, 减少了噪声的影响, 整个系统可以获得较高的精度。

动态测试 (又称动态信号分析、频响分析) 是控制系统设计、生产和维护保障中的重要测试手段。传统的动态测试必须使用专用的台式动态测试仪器才能满足高精度、信号调制等要求。随着保障设备向自动化、集成化、通用化、虚拟化发展, 传统的台式仪器及测试方法已经无法满足装备维护保障的要求。

自 20 世纪末以来, 基于 PXI 总线^[4]的模块化测试仪器因其具有自动化、集成化程度高, 通用性强等优势, 在通用测试、保障维修、工业自动化领域获得了越来越多的应用, 产品覆盖了数字多用表、信号源、示波器、计数器等门类, 功能和性能能够完全替代相应的台式仪器。利用虚拟仪器的专用软件处理思想, 可以实现大部分传统台式仪器的专用功能, 进一步拓展了通用测试仪器的应用范围。

本文提出利用 PXI 总线的通用测试仪器, 结合动态信号分析算法, 实现动态测试的方法, 具有重要的应用意义:

- 1) 硬件基于通用模块化仪器, 使动态测试设备能够与通用测试系统集成, 实现保障设备的集成化、小型化, 提高机动性。
- 2) 软件利用虚拟仪器的思想, 动态测试的核心处理由软件实现, 易于维护和升级, 扩展性强, 可随需要的变化改变产品功能, 增强保障设备适应性。
- 3) 大大降低部署和维护成本, 提高保障设备战斗力, 通用仪器硬件可互换、重用性强, 减少了备件的种类, 降低了维护保养代价。

2 测试方案设计

2.1 基于通用仪器的动态测试原理分析

利用基于 PXI 总线的通用信号源、示波器及计算机软件构建的动态测试设备^[5]如图 5 所示, 信号源产生激励信号 $u(t) = U \sin \omega t$ 进入被测对象, $y(t) = Y \sin(\omega t + \Phi)$ 为被测对象的输出信号, 示波器采集激励信号和响应信号, AD 转换后的信号成为数字信号, 设采样率为 F_s , 则采样点序号 n 与时间 t 有如下关系:

$$t = \frac{n}{F_s} \quad (11)$$

代入式 (3)、(4) 则输入输出信号变为:

输入信号:

$$u(n) = U \sin \omega \frac{n}{F_s} \quad (12)$$

输出信号:

$$y(n) = Y \sin \left(\omega \frac{n}{F_s} + \Phi \right) \quad (13)$$

由于采样起始点不可能刚好在整周期过零点处, 因此实际输入和输出信号与采样起始点都有相位差, 即:

输入信号:

$$u(n) = U \sin \left(\omega \frac{n}{F_s} + \Phi_1 \right) \quad (14)$$

输出信号:

$$y(n) = Y \sin \left(\omega \frac{n}{F_s} + \Phi_2 \right) \quad (15)$$

而相频响应结果变为:

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (16)$$

将数字信号通过 PXI 总线上传到主控计算机, 计算机对激励和响应信号的数字信号进行软件处理, 得到动态测试结果, 如图 5 所示。

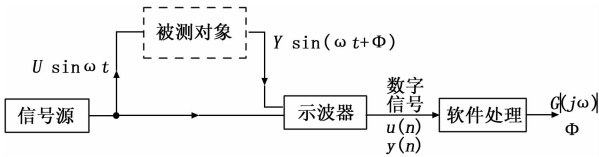


图 5 基于通用仪器的动态测试原理

该动态测试方法硬件结构简单, 核心功能由计算机软件算法实现。软件算法的原理与传统动态测试仪器的处理类似, 区别在于仅针对数字信号使用数字信号处理的方法实现传统仪器中复杂模拟信号处理的功能。

算法输入输出信号为式 (12)、(13) 所列数字信号。在通用测试系统中, 由于集成度高、信号种类多, 信号通路可能受到各种外来干扰。数字信号处理中有必要进行数字滤波。由于滤波后的信号将产生相位移, 为了不影响相位响应结果, 对 $u(n)$ 和 $y(n)$ 应用同一滤波器进行滤波, 使其相位移相同, 相位响应结果将不受影响。

幅度响应结果可以直接对 $u(n)$ 和 $y(n)$ 进行整周期均方根计算得到, 在采样率足够的情况下精度可以很高。高精度相位差计算需使用相关运算处理。

基于通用仪器的动态测试方法中信号源只产生激励信号 $u(t)$, 不能同时产生与其相差 90° 的 \cos 信号, 因此无法使用图 4 中的方法将输入信号与输出信号直接进行相关运算。在算法中, 需要产生零相位的 \sin 和 \cos 信号用于相关运算, 因此就需要对输入信号的周期进行检测。已知输入输出信号 u 和 y 为同频率, 只要对 $y(n)$ 进行周期检测即可, 得到周期 P 用于生成 \sin 和 \cos 信号。周期 P 的含义为数字信号每周期的采样点数。 P 与 ω 具有如下关系, 其中 F_s 为采样率:

$$P = \frac{2\pi F_s}{\omega} \quad (17)$$

\sin 和 \cos 信号与滤波后的数字信号 $u(n)$ 和 $y(n)$ 分别进行相关运算, 根据式 (5) 和 (7), 对离散数字信号可得:

$$R_u = \frac{U}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{n}{F_s} \sin \left(\omega \frac{n}{F_s} + \Phi_1 \right) = \frac{U}{2} \cos \Phi_1 \quad (18)$$

$$I_u = \frac{U}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \cos \omega \frac{n}{F_s} \sin \left(\omega \frac{n}{F_s} + \Phi_1 \right) = \frac{U}{2} \sin \Phi_1 \quad (19)$$

其中: N 为参与运算的信号总周期数。

可得到 $u(n)$ 的特征参数 Φ_1 :

相位响应:

$$\Phi_1 = \arctan \frac{I_u}{R_u} \quad (20)$$

同样的可得到 $y(n)$ 的特征参数 Φ_2 :

相位响应:

$$\Phi_2 = \arctan \frac{I_y}{R_y} \quad (21)$$

由式 (16) 进一步得到 $u(n)$ 和 $y(n)$ 的频响分析结果。

动态测试方案如图 6 所示。信号源输出参考信号。在输入调幅信号 x 的不同频率下, 用示波器去采集被测对象的相敏检波输出, 同时采集被测对象的输出信号 y 。将 x 信号和 y 信号均上传至计算机。 x 信号和 y 信号进行相关运算^[6]即得到被测对象的幅频和相频响应。

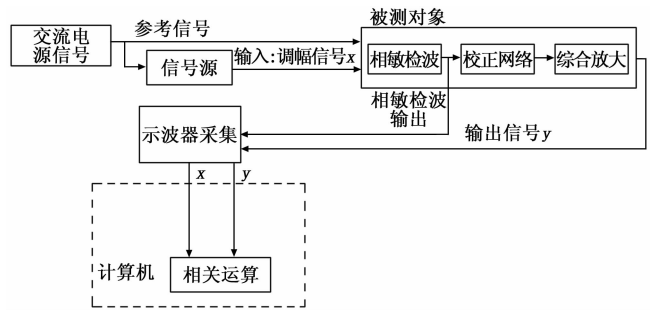


图 6 动态测试方案

2.2 方案验证

对信号频率 0.318 Hz, 采样率 10 ksps, 采样时间 20 秒 (约 6 个周期), 多次相位测量结果如图 7 所示。

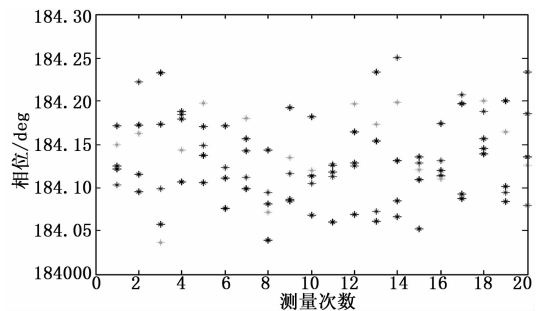


图 7 相位测量结果散点图

对信号频率 0.318 Hz, 增加采样长度后采样率 10 ksp/s, 采样时间 200 秒 (约 63 个周期), 相位测量结果如图 8 所示。

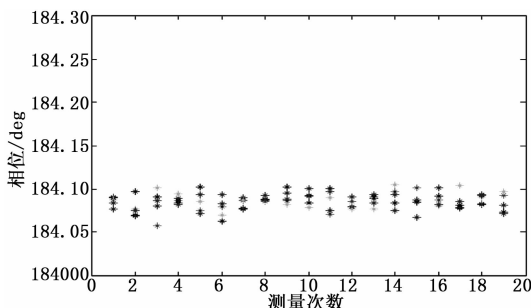


图 8 增加采样长度下相位测量结果散点图

由上述实验可知, 增加采样长度后相位测量误差为士 0.03°以内, 已经达到传统台式频响分析仪器同等的精度水平。

3 测试系统的构成和实验

3.1 系统构成

3.1.1 硬件构成

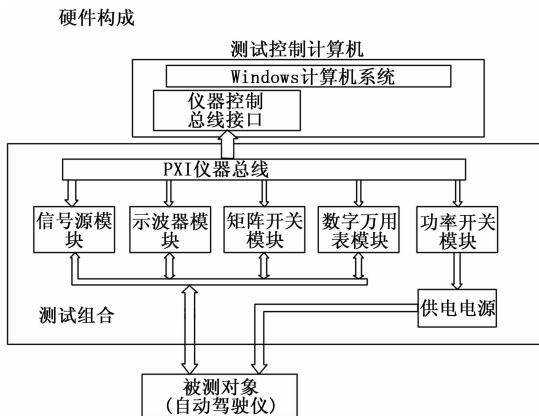


图 9 自动驾驶仪测试系统总体架构

如图 9 所示, 系统由测试控制计算机、信号源模块、示波器模块、矩阵开关模块、数字万用表模块、功率开关模块和供电电源组成, 从而实现对自动驾驶仪的测试。

测试控制计算机通过 PXI 仪器总线来控制和管理各个 PXI 模块。通过 PXI 总线控制功率开关模块, 从而控制供电电源对被测对象进行供电。数字万用表和矩阵开关模块用于对模拟信号的值进行测量。信号源模块用于输出激励信号, 示波器模块用于采集激励和响应信号。

测试控制计算机负责对电源、各个 PXI 模块以及被测对象的运行实行控制; 负责对自动驾驶仪的测试流程进行控制; 另一方面, 供电电源信号、信号源输出的激励信号和示波器采集的响应信号、数字万用表和矩阵开关模块所采集的模拟信号等均通过 PXI 总线上传至测试控制计算机, 由测试控制计算机进行存储和相关运算等。

在此测试系统中, 测试控制计算机和测试仪器通过采集自动驾驶仪的输入输出信号值, 从而实现对自动驾驶仪

功能的动态测试。

3.1.2 软件构成

常用的测试软件开发平台^[7] (如 NI 公司的 LabView、CVI、TestStand, 安捷伦公司的 VEE 等) 集成了基本的测试平台功能, 包含仪器驱动配置、测试流程开发和执行、用户自定义测试模块、历史数据管理等, 能够满足大部分通用测试设备需求, 具有较高的重用性、通用性和扩展性。

而对于武器系统维修测试和保障设备而言, 需要更加重视软件的专用功能实现和高可靠性, 还要兼顾软件的轻量化以降低对硬件资源的需求, 从而进一步提高可靠性和装备完整性。因此, 必须选择可靠、成熟、专业化的软件开发平台作为自动驾驶仪动态测试设备软件平台, 本文选用 VITE 产品。

VITE (虚拟仪器测试环境) 软件平台主要针对武器装备在研制、使用和维修过程中对人员的编程要求高、TPS 的移植性差、智能化的诊断方法少等问题, 突破了基于 ATML 的全寿命周期内测试信息共享、TPS 的图形化开发、IVI 仪器互换架构、IEEE1641 信号模型、测试信号到仪器动作的转换、执行界面定制等关键技术, 建立了复杂装备全寿命周期的统一信息框架。

该软件具有测试开发快捷、数据接口规范、深度定制、专业程度高等特点, 可实现被测对象建模、测试流程开发、系统执行服务、诊断处理分析、系统资源管理等主要功能, 已经成功应用于多项军工领域的测试开发与诊断任务。

3.2 实验结果

自动驾驶仪单通道动态扰动下的回路传递特性测试结果。

表 1 单通道动态扰动下的回路传递特性测试结果

序号	测试项目	指标	实测值	结论
1	50Hz 输出幅度	3.84dB±1.5dB	3.93dB	合格
2	50Hz 输出相位移	9.20°±2°	9.26°	合格
3	40Hz 输出幅度	3.59dB±1.5dB	3.62dB	合格
4	40Hz 输出相位移	8.22°±2°	8.14°	合格
5	30Hz 输出幅度	3.37dB±1dB	3.41dB	合格
6	30Hz 输出相位移	7.13°±1.2°	7.21°	合格
7	20Hz 输出幅度	3.18dB±0.7dB	3.25dB	合格
8	20Hz 输出相位移	6.15°±0.8°	6.20°	合格
9	10Hz 输出幅度	2.94dB±0.5dB	3.00dB	合格
10	10Hz 输出相位移	6.28°±0.5°	6.31°	合格
11	5Hz 输出幅度	2.44dB±0.3dB	2.47dB	合格
12	5Hz 输出相位移	8.23°±0.3°	8.28°	合格
13	2Hz 输出幅度	1.17dB±0.2dB	1.17dB	合格
14	2Hz 输出相位移	8.94°±0.3°	9.04°	合格

该型自动驾驶仪侧向稳定回路传递特性理论值和实测值如图 10 所示。

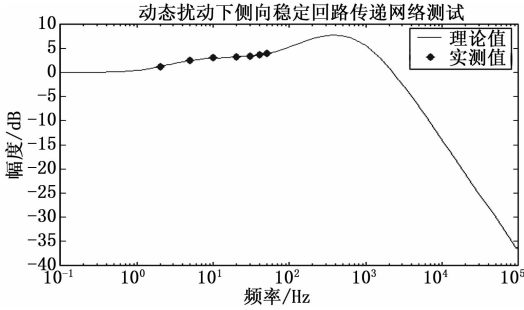


图 10 单通道动态扰动下的回路传递特性测试结果

由上述测试结果可见，本文所述的自动驾驶仪动态测试系统对自动驾驶仪测试精度较高，能够满足性能测试要求。

4 误差分析与噪声抑制

4.1 理想化计算误差

2.1 节中的推导建立在理想情况下，实际应用中存在误差，最主要的来源是周期 P 检测误差，进而导致 \sin 和 \cos 信号频率误差。设实际检测周期为 P_1 ，相应的 \sin 信号频率为 ω_1 ：

$$\omega_1 = \frac{2\pi Fs}{P_1} \quad (22)$$

显然 P_1 为整数，而理想周期 P 应满足式 (17)，不一定为整数，注意即便理想周期 P 为整数，实际检测到的周期 P_1 往往也不会刚好与 P 相等，检测误差必定存在。令：

$$\Delta = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega} = \frac{P}{P_1} - 1 \quad (23)$$

相应的式 (18) 应为：

$$R_u = \frac{U}{NP_1} \sum_{n=1}^{NP_1} \sin \omega_1 \frac{n}{Fs} \sin \left(\omega \frac{n}{Fs} + \Phi_1 \right) \quad (24)$$

可见 R_u 的计算有两方面的误差，一是 ω_1 计算不准的误差，二是求和区间 NP_1 不等于整周期带来的误差。对于前者，由于采用过零法检测信号周期，对其影响最大的是信号噪声，应通过低通滤波器消除其影响。

对于求和区间的误差，通过提高采样率，提高周期 P_1 ，可将相对误差降低，但同时要考虑计算量不能太大，本方法中的 P_1 应不小于 5 000 (点/周期)。

4.2 信号噪声引起的误差

信号噪声除了对上述周期检测引入误差外，对相关运算本身也将产生误差。为满足 P_1 不小于 5 000 (点/周期)，采样率 F_s 远大于有用信号频率，因此也不可避免的引入了噪声。经过对相位结果进行大量测试后统计发现，相位误差为随机误差，服从正态分布。

这里以输入信号 $u(n)$ 为例， $y(n)$ 的推导结果类似。设实际输入信号为：

$$u(n) = U \sin \left(\omega \frac{n}{Fs} + \Phi_1 \right) + E(n) \quad (25)$$

其中： $E(n)$ 是有一定幅度的白噪声，带宽受限于采样率 F_s 。则 R_u 为 (这里不考虑周期误差)：

$$R_u = \frac{1}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{n}{Fs} \left[U \sin \left(\omega \frac{n}{Fs} + \Phi_1 \right) + E(n) \right] = \frac{U}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{n}{Fs} \sin \left(\omega \frac{n}{Fs} + \Phi_1 \right) + \frac{1}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{n}{Fs} E(n) \quad (26)$$

其中前一项为理想计算结果，后一项 $\frac{1}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{n}{Fs} E(n)$ 为噪声影响，表现为随机误差。

又：

$$P = \frac{2\pi Fs}{\omega} \quad (27)$$

则噪声影响：

$$\Delta R_u = \frac{1}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{n}{Fs} E(n) = \frac{1}{NP} \sum_{n=1}^{NP} \sin \omega \frac{NP-n}{Fs} E(n) \quad (28)$$

上式为两个序列的互相关函数，在运算周期 NP 无穷大时，噪声项的期望为 0。然而实际应用中， NP 受限于采样长度不会太大，上述噪声误差将存在。但增大 NP 将会降低噪声的影响。

对于随机误差，可通过增加样本求平均的方法减小误差。在本系统中就是增加采样长度。

5 结论

基于通用仪器的动态测试方法适应了未来保障设备向自动化、集成化、通用化、虚拟化发展的要求，具有极高的应用价值。本文从动态测试方法的原理、关键技术、误差消除等方面介绍了基于通用仪器的动态测试方法的使用，并搭建了自动驾驶仪的动态测试系统，最后给出了实际测试结果。实际测试说明本文所述的方法精度与传统台式仪器相当，能够满足装备动态测试的要求。

参考文献：

- [1] 金其明. 防空导弹工程 [M]. 北京：中国宇航出版社，2004.
- [2] 王冠男. 自动驾驶仪检测设备的设计与实现 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2007.
- [3] 翟超，杨志峰，李小兵. 导弹自动驾驶仪测试系统的开发研究 [J]. 计算机测量与控制，2007，15 (12).
- [4] 黄晓晴. 基于 PXI 总线的测试系统实验平台研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2004.
- [5] 万能. PXI 总线测试系统的设计与开发 [D]. 西安：西北工业大学，2001.
- [6] 杜藏，骆源. 科学计算语言 MATLAB 简明教程 [M]. 天津：南开大学出版社，1998.
- [7] 李彦保. 基于虚拟仪器的导弹测试系统研究 [D]. 西安：西北工业大学，2005.