

# 伺服机构动态特性测试系统设计

周江平<sup>1</sup>, 杨鹤<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 31008 部队, 北京 100191; 2. 中国人民解放军 31011 部队, 北京 100161)

**摘要:** 动态测试是导弹伺服机构的一项重要测试, 测试结果能够从本质上反映出系统性能的真实状态; 针对传统电液伺服机构动态测试存在测试装备体积大、测试时间长等不足, 文章设计完成了一种新型导弹伺服机构动态测试系统; 通过对比分析电液伺服机构现有的正弦相关分析法、谱分析法、基于多谐波差相信号测试方法和基于 chirp 信号测试方法的测试原理和优缺点, 优选出重复性好且能够对伺服机构频带充分覆盖的 chirp 信号作为测试激励, 显著缩短了伺服机构测试时间, 充分激励出被测对象模态, 完成导弹伺服机构的动态性能测试任务; 伺服机构动态测试系统设计采用 PCI 总线技术和虚拟仪器技术, 基于研华 IPC-610L 工控机和 PCI-1706U 多功能数据采集卡搭建测试平台; 选择面向对象的 C# 语言编程设计友好的人机交互界面, 实现数据采集控制、数据处理和数据库管理功能。

**关键词:** 伺服机构; 动态特性; 相关分析; 数据应用

## Design of Dynamic Characteristic Test System for Servo System

Zhou Jiangpin<sup>1</sup>, Yang He<sup>2</sup>

(1. 31008 Unit of PLA, Beijing 100161, China; 2. 31011 Unit of PLA, Beijing 100161, China)

**Abstract:** Dynamic test is an important test for missile servo mechanism and reflects the performance status in essence. Aiming at the shortcomings of traditional electro-hydraulic servo mechanism dynamic test, such as large volume and long test time, a new dynamic test system for one missile servo mechanism was designed. By comparing and analyzing the existing test method for electro-hydraulic servo mechanism, namely sinusoidal correlation analysis method, spectrum analysis method, multi-harmonic phase signal test method and chirp signal test method, the chirp signal with good repeatability and sufficient coverage of the servo frequency band was selected as test excitation for one missile servo mechanism, which could significantly shorten test time, fully stimulate modal state, and complete dynamic performance test. The dynamic test system based on PCI bus and virtual instrument technology, was completed by using the IPC-610L computer and PCI-1706U multi-function data acquisition card, and the computer interface was designed by C# programming to realize data acquisition control, data process and data management functions.

**Keywords:** servo mechanism; dynamic characteristic; correlation analysis; data application

## 0 引言

伺服机构是导弹控制系统的重要执行部件, 其功用是通过推动发动机喷管方向, 而改变导弹飞行的轨迹和姿态。伺服机构的动态性能对导弹飞行稳定性和命中精度具有直接影响<sup>[1]</sup>。因此, 在导弹发射前必须对伺服机构进行必要的性能测试<sup>[2-5]</sup>。

伺服机构的动态特性是伺服系统的重要品质, 能够从本质上表征其真实状态<sup>[1,3]</sup>。传统的电液伺服机构动态测试方法大多采用正弦相关分析法, 存在测试装备体积大、测试时间长和不能在测试频带范围内对伺服机构的模态充分激发的缺点<sup>[6-7]</sup>。为快速、准确获得伺服机构测试频带范围的频率特性, 课题采用基于调频脉冲(chirp)信号的动态测试方法, 设计了采用 PCI 总线技术和虚拟仪器技术的动态测试系统, 具有测试时间短、测试频带内充分激励伺服机构模态等特点。

## 1 系统设计方案

动态测试系统设计主要包括测试平台搭建、人机交互软件设计和数据处理算法三部分。测试平台部分, 采用研华 IPC-610L 工控机和 PCI-1706U 多功能数据采集卡实现激励信号产生和响应信号采集功能, 放大器电路实现激励信号放大功能, 信号调理电路实现响应信号衰减和滤波功能, 继电器选择通道实现系统自检通道和多测试通道切换功能。测试平台的具体硬件结构组成如图 1 所示。

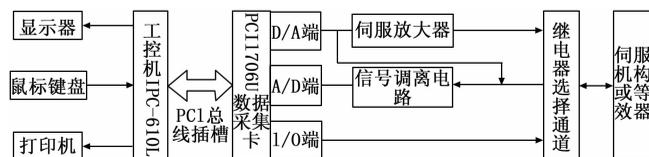


图 1 伺服机构测试系统原理图

系统工作原理为: 1) 测试前, 首先进行系统自检, 通过控制继电器通道将信号调理电路与伺服放大器连接形成闭环, 实现系统激励信号产生和响应信号采集自检, 检查系统 A/D 和 D/A 功能是否正常; 2) 系统自检正常后才能进行动态测试操作。测试时首先手动设置激励信号和响应

收稿日期: 2019-03-24; 修回日期: 2019-04-25。

作者简介: 周江平(1986-), 男, 四川省开江县人, 助理工程师, 主要从事系统性能测试和数据处理工作方向的研究。

采集参数,通过控制继电器通道将被测试对象与伺服放大器连接形成闭环;然后工控机发出 D/A 转换指令和 A/D 启动指令,控制 D/A 端口产生激励信号,激励信号经过伺服放大后作用于电液伺服机构,系统响应输出信号需由信号调理电路进行电平调整和滤波等处理,满足 A/D 端口采集范围后,数据采集板卡才进行模拟量信号的采集操作;最后工控机测试程序向多功能板卡 A/D 模块发出数据采集结束的查询指令,数据采集结束后,调用分析算法处理测试数据,得到测试结果并显示。

## 2 算法原理

### 2.1 正弦相关分析法

正弦相关分析法作为一种成熟的动态特性测试方法,广泛应用于伺服机构的频率特性测试。采用一组频率点的扫频信号通过测试系统,根据输入输出的相关运算,可求出扫频信号频率对应的幅值比和相位差。正弦相关分析法的测试原理<sup>[8-9]</sup>如图 2 所示,采用正弦扫频信号作为激励,基于互相关方法对采集到的激励和响应信号进行计算,最后得到系统频率特性。

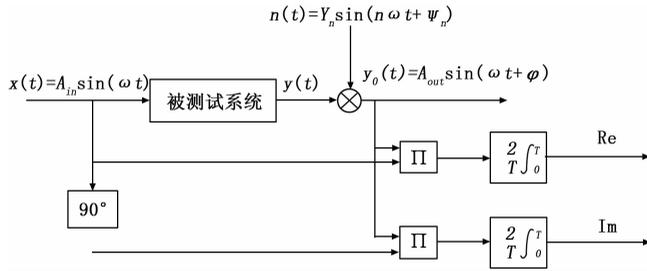


图 2 正弦相关分析法

计算得到的系统频率特性如下。

幅频特性:

$$K = \frac{\sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}}{A_m^2} \quad (1)$$

相频特性:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)}\right) \quad (2)$$

$U(\omega)$  和  $V(\omega)$  的计算满足:

$$U(\omega) = \frac{2}{nN_T} \sum_{n=0}^{nN_T} A_{out} \sin\left(\frac{2\pi}{nN_T}n + \varphi\right) A_m \sin\left(\frac{2\pi}{nN_T}n\right) = A_m A_{out}(\omega) \cos(\varphi) \quad (3)$$

$$V(\omega) = \frac{2}{nN_T} \sum_{n=0}^{nN_T} A_{out} \sin\left(\frac{2\pi}{nN_T}n + \varphi\right) A_m \cos\left(\frac{2\pi}{nN_T}n\right) = A_m A_{out}(\omega) \sin(\varphi) \quad (4)$$

其中:  $A_m$  表示激励信号幅值,  $\omega$  表示激励信号角频率;  $A_{out}$  表示响应信号幅值,  $\varphi$  表示响应信号相角;  $Y_n$  表示噪声信号幅值,  $n\omega$  表示噪声信号角频率,  $\psi_n$  表示噪声信号初相角;  $N_T$  表示数字周期。

测试过程中,扫频时间越长,获得测试精度越高。根

据所选频率点处的幅频特性,通过最小二乘法得到其他频率点的频率特性。正弦相关分析法对噪声具有良好的抑制作用,测试精度高,常作为其他测试的比较基准,具有良好的重复性<sup>[9]</sup>。缺点是采用扫频信号,因需要多次扫频采样,使得测试时间较长,而且测试过程中,不能够充分激发系统模态,对于频率特性变化剧烈的情况,通过不同频率点最小二乘法获得频率特性会存在不准确的情况。

### 2.2 谱分析法

谱分析法测试过程中,采用的激励信号为白噪声信号。白噪声信号是一种具有丰富频率成分的随机信号,但实际上不存在。因此在测试过程中,一般采用有色噪声替代白噪声,称为伪随机信号。

谱分析法测试过程中,当输入激励信号为理想脉冲时,它将均匀激励被测系统,从而得到系统的频率特性,采用谱分析法能够一次激励就把选定频带范围的各频率点的频率特性求出<sup>[10]</sup>。但在实际测试过程中白噪声信号是不可能实现的,因而常采用其他带宽信号如正弦连续扫频信号或者随机噪声信号作为激励信号<sup>[11]</sup>。谱分析法的测试原理<sup>[9]</sup>如图 3 所示:

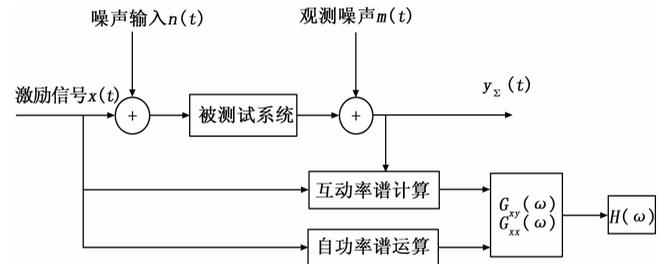


图 3 谱分析法测试原理

在频率特性测试过程中,相关分析法需要伺服机构处于“离线”状态下,即在正弦信号扫频激励下,只有等到输入输出信号稳定以后才能开始计算频率特性,而谱分析法可以实现伺服机构的“在线”快速测试,即在不影响伺服机构正常工作的情况下快速获得系统频率特性。但是频率特性测试过程中,谱分析法的可重复性差,测试的精度不高。

### 2.3 基于多谐差相信号的测试方法

多谐差相信号 (Schroeder Phased Harmonic Signal, 简称 SPHS) 是由美国学者 R. Schroeder 在 20 世纪 70 年代提出的,由若干正(余)弦信号叠加而成,但其叠加方式不同于普通的多频信号,其性能也更优<sup>[12]</sup>。基于 SPHS 信号的测试原理<sup>[13]</sup>如图 4 所示。

采用相关分析法可以有效抑制噪声干扰,采用 SPHS 信号作为激励信号的频率特性测试不仅可以缩短测试时间,还可以有效抑制噪声干扰。SPHS 激励信号具有如下特点<sup>[5]</sup>:

- 1) 具有较低的峰峰比。采用 SPHS 信号作为伺服机构

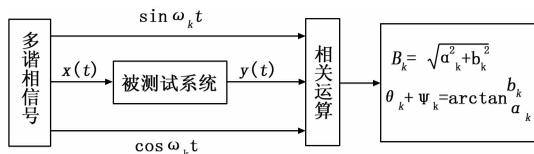


图 4 SPHS 信号测试原理

动态测试的激励信号, 信号变化比较平稳, 能量分布比较均匀, 有利于伺服机构动态测试。

2) SPHS 信号为周期信号, 具有丰富的波形变化。此外, SPHS 信号的频谱为离散谱, 对噪声干扰能够有效抑制, 测试精度高。

3) SPHS 信号的周期可以根据需要设定, 通过改变周期的大小可以间接改变基频, 这样可以通过设置基波的周期将待测试频率点包含到 SPHS 信号中去, 可以实现一次性完成多个频率点的测试, 提高频率特性的测试速度。

4) SPHS 信号的频谱是等间隔离散分布的, 此外 SPHS 信号的频谱虚部为零。

综上, SPHS 信号作为伺服机构的激励信号时, 具有一定的优越性。相对正弦相关分析法能够一次性完成对选定频率点的测试, 有效提高测试速度, 缩短测试时间。相比谱分析法, SPHS 作为激励信号变化平稳, 有利于伺服机构的动态测试, 因频谱离散还能够有效抑制噪声。但是 SPHS 信号产生比较困难, 频谱为离散谱, 不能够充分地激励系统模态, 对动态特性随频率的连续变化的情况不能够充分的反映。

### 2.4 基于 chirp 信号的测试方法

chirp 信号是幅值不变, 频率随时间作线性变化的连续信号, 数学表达式为:

$$x(t) = A \cos(2\pi(\beta t + f_0)t) \quad (5)$$

基于 chirp 信号的测试原理<sup>[14-15]</sup>如图 5 所示, 对采集到的激励  $x(k)$  和响应信号  $y(k)$  进行快速傅立叶变换 (FFT), 计算得到复数  $Y(\omega_k)/X(\omega_k)$ , 其绝对值为幅值比, 相角为相位差。

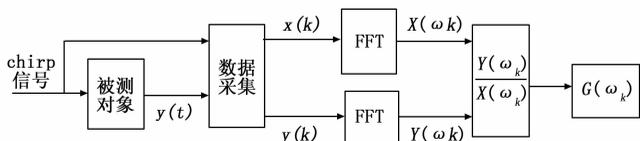


图 5 chirp 信号测试原理

基于 chirp 信号的测试方法, 因一次扫频测试就可完成对所测试频域范围内的频率特性的获取, 测试速度快、测试效率高, 能够对系统模态充分激励<sup>[10]</sup>。采样时间与调频脉冲信号扫描时间有关, 较正弦相关分析法采样时间大大缩短, 因 FFT 变换能够对噪声有抑制作用, 测试过程中也表现出了较好的测试结果, 保证快速准确地获得系统频率特性。

本文对伺服机构常见的测试方法进行了分析研究, 针对正弦相关分析法测试过程测试时间长, 测试频率点较少且不连续, 测试频率点对伺服机构的模态激励不够充分; 谱分析法测试过程中测试精度低, 抗干扰能力和可重复性差; 多谱差相信号的测试方法激励信号频谱是等间隔的离散谱不能够对伺服机构动态特性充分反映且信号产生困难。基于 chirp 信号的测试方法能够充分激励模态, 测试速度快。因此选择重复性好且能够对伺服机构频带充分覆盖的 chirp 信号作为激励信号, 采用 FFT 变换, 缩短伺服机构的测试时间, 充分激励模态, 完成导弹伺服机构的动态性能的测试。

### 3 软件设计

动态特性测试系统的软件功能设计如图 6 所示, 主要包括系统自检、激励信号产生、数据采集、数据处理和数据管理等功能模块。各模块具体功能为:

1) 系统自检模块: 通过控制继电器选择通道形成激励—采集闭环回路, 检测数据采集卡和激励信号产生、数据采集、数据处理等功能模块是否完好。

2) 激励信号产生模块: 通过调用底层驱动库函数, 控制数据采集卡中写寄存器的时序逻辑操作, 产生正弦信号、chirp 信号和阶跃信号等激励。将产生激励信号的控制逻辑封装为通用函数库, 通过交互界面设置激励信号幅值、起始截止频率等参数, 调用相应库函数, 产生激励信号。

3) 数据采集模块: 通过调用底层库函数, 控制数据采集卡中读写寄存器的时序逻辑操作, 完成采集端口选择、数据采集触发及结果读取等功能。

4) 数据处理模块: 主要包括数据预处理和计算两部分。数据预处理部分实现采集数据的滤波、野值剔除等操作; 计算部分实现频率特性计算, 完成正弦相关分析和 chirp 信号处理。

5) 数据管理模块: 实现登录人员权限管理、测试数据存储、查询、打印和系统维护等功能。

测试系统软件流程如图 7 所示, 系统启动后, 首先进行用户身份验证, 用于用户权限管理和系统操作信息记录; 然后开始系统状态自检测操作, 主要检测工控机、多功能数据采集卡、放大器电路、信号调理电路、继电器通道选择模块等硬件电路的功能完好性; 系统自检正常后, 进行测试方法选择, 主要有正弦相关分析法、chirp 信号方法和阶跃响应法三种测试方法; 测试参数设置环节主要完成通道切换选择, 激励信号幅值、频率设置, 采样频率设置等操作; 参数设置完成后开始测试操作, 通过激励信号产生模块调用底层板卡驱动, 输出需要的激励信号, 同步采集系统激励和响应信号并保存; 采集结束后, 调用数据处理函数完成滤波和计算功能, 并绘制结果曲线。

本课题选用 Visual Studio 软件作为测试系统的开发平台, 在该软件平台环境下采用 C# 语言进行编程, 主要实现

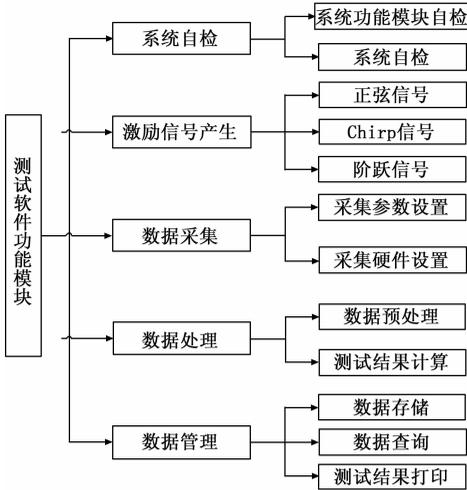


图 6 软件功能模块

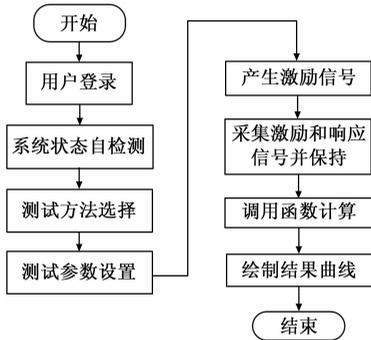


图 7 软件流程图

登录人员记录管理、在线测试和离线分析功能。

1) 登录人员记录管理：动态测试软件通过控制权限对特性用户开放，主要包括用户名、密码键入和系统功能选择操作。

2) 在线测试功能：在线测试功能主要包括首页系统自检、调频脉冲扫描法、相关分析法和阶跃特性测试等功能模块组成，设计完成的操作界面如图 8 所示。

3) 离线分析：离线分析软件主要用于读取在线测试过程中存储的数据，进行回访分析以及打印等功能，设计完成的操作界面如图 11 所示。

程序主要用到事件结构以及读取电子表格 Excel 表格文件函数，通过点击界面的读取数据按钮读取存储的数据文件，并根据前期的存储规则进行数据提取图表显示。

### 4 实验结果分析

采用 RLC 电路模拟被测对象伺服机构，其数学模型采用简化的三阶系统数学模型代替，模型如下：

$$G(s) = \frac{7.8780 \times 10^{-6} s^2 + 4.2572 \times 10^{-3} s + 1.022}{2.9883 \times 10^{-6} s^3 + 4.6235 \times 10^{-4} s^2 + 0.0408s + 1} \quad (6)$$

实验过程中，激励信号幅值设置为 3 V，采样频率选择 5 kHz，相关分析法测试频率 f 选择为 0.1、0.5、1、5、

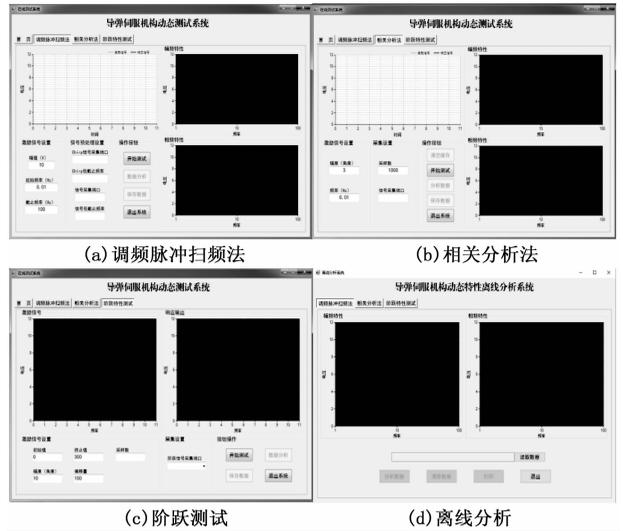


图 8 测试软件操作界面

10、15、20 Hz，基于 chirp 信号的测试方法测试频带为 0.1 ~ 20Hz。得到的测试结果分别如图 9 和图 10 所示。从中可以看出，本文设计的动态特性测试系统中基于正弦相关分析法和基于 chirp 信号的系统频率特性测试模块均能够实现伺服系统的频率特性测试，且误差较小。基于正弦相关分析法的频率特性测试结果优于基于 chirp 信号的系统频率特性测试方法，但测试时间却显著增加。

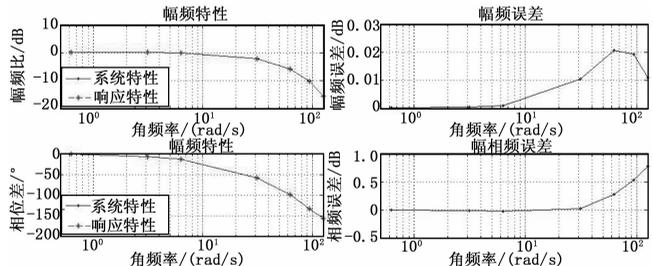


图 9 基于正弦相关分析法的系统频率特性和误差

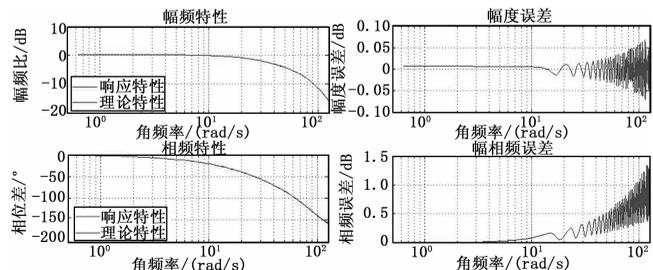


图 10 基于 chirp 信号的系统频率特性和误差

### 5 结论

本文设计完成了一种新的伺服机构动态特性测试系统，具备基于 chirp 信号处理和正弦相关分析的频率特性测试和阶跃特性测试功能。系统硬件平台主要由研华 IPC-610L 工控机和 PCI-1706U 多功能数据采集卡，自研信号调理电路和继电器通道选择模块组成；软件部分采用模块化设计

思想, 将硬件底层驱动进行封装得到激励信号产生和采集模块, 采用 C# 设计友好人机交互界面; 数据处理过程中, 选择重复性好且能够对频带充分覆盖的 chirp 信号作为激励, 显著缩短测试时间, 充分激励模态, 同时继续保留传统的正弦相关分析算法作为基准。测试试验表明该系统操作简单, 能够圆满完成电液伺服机构的动态测试任务。

#### 参考文献:

- [1] 沈秀存, 李谟喜, 陈世年等. 导弹测试发控系统 [J]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [2] 申 军. 基于 chirp 信号的导弹伺服机构动态测试系统 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (04): 28-30.
- [3] 马瑞萍, 董海迪. 基于正弦相关分析法的导弹伺服机构动态测试系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2018, 31 (05): 39-40.
- [4] 张晓雨, 何华锋, 郑建飞, 等. 基于 PXI 总线的伺服机构测试系统 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (12): 1-3, 7.
- [5] 王建华, 岳瑞华, 顾 凡. 基于 chirp 信号导弹伺服机构频率特性测试研究 [J]. 现代防御技术, 2017, 4: 030.
- [6] 张婷婷. 液压元件与系统测试技术内涵、发展趋势 [J]. 液压气动与密封, 2016 (2): 92-95.

(上接第 24 页)

的试验, 获得了以组合不同车流密度的车辆作为训练集, 基于 YOLO9000-md 网络结构模型选取 2000 次迭代的视频下多车辆目标检测方法。文章最后, 对所建立模型进行了实测实验, 通过实验结果的多种分析发现: 本文改进的 YOLO9000-md 模型的实验结果正确率可以达到 96.15%, 相比于传统的机器学习, 无论在准确率或者运行效率上都得到了大大的提高; 对比经典的 YOLO9000 模型可以看出, YOLO9000-md 模型在获得较好 Precision 值的条件下损失的 Recall 值明显较小; 同时最终检测结果更好, 普适于视频下的多目标检测, 虽正确检测结果相差不远, 但效果良好。

#### 参考文献:

- [1] 赵 静. 基于物联网的智能交通流探测技术研究 [J]. 科技创新与应用, 2016 (34).
- [2] 李 珣, 南恺恺, 景军锋. 基于改进混合高斯模型的车辆多目标检测方法 [J]. 西安工程大学学报, 2017 (6).
- [3] 孙志军, 薛 磊, 许阳明, 等. 深度学习研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2012 (8).
- [4] Szegedy C, Toshev A, Erhan D. Deep neural networks for object detection [M]. Advances in Neural Information Processing Systems [S. l.]: NIPS Press 2013: 1673-1675.
- [5] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [A]. Proc. of Image Net Large-Scale Visual Recognition Challenge Workshop [C]. ICCV Press, 2013: 10-15.

- [7] 白清鹏. 国内液压测试技术的现状与发展趋势 [J]. 液压气动与密封, 2015 (1): 20-23.
- [8] 申 军. 嵌入式频率特性分析仪的设计及实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (08): 310-312.
- [9] 谢 虎. 基于相关分析的控制系统的频率特性建模研究 [J]. 船舶电子工程, 2012, 32 (7): 92-94.
- [10] 肖凯明, 白志大. 电液伺服阀静态特性 CAT 和故障诊断应用 [J]. 液压与气动, 1999 (5): 16-19.
- [11] 王向周, 王 渝, 白志大. 电液伺服阀动态性能测试的谱分析法研究 [J]. 北京理工大学学报, 1997, 17 (3): 307-313.
- [12] 陈连华, 岳瑞华, 赵 娜. 多谐波相信号激励下的频率特性测试方法 [J]. 国外电子测量技术, 2011, 30 (3): 13-16.
- [13] 张笑可, 张胜修, 王 楠. 基于多谐波相信号的某型导弹多级系统测试方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29 (3): 77-79.
- [14] 李晓涛, 张跃军, 魏列江. 电液伺服阀动态特性数据处理方法的研究 [J]. 液压与气动, 2018 (08): 102-106.
- [15] 王志洋. chirp 信号参数估计方法的研究 [D]. 吉林大学, 2013.

- [6] He K, Zhang X, Ren S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [A]. Proc. of the 14th European Conference on Computer Vision [C]: ECCV Press, 2014: 865-973.
- [7] Girshick R. Fast R-CNN [A]. Proc of IEEE International Conference on Computer Vision [C]: ICCV Press, 2015: 10-15.
- [8] 李 明, 景军锋, 李鹏飞. 应用 GAN 和 Faster R-CNN 的织物缺陷识别 [J]. 西安工程大学学报. 2018 (6).
- [9] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [A]. Proc of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. CVPR Press, 2016: 13.
- [10] 李 珣, 刘 瑶, 李鹏飞, 等. 基于 Darknet 框架下 YOLO v2 算法的车辆多目标检测方法 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (6).
- [11] Redmon J, Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger [J]. Cornell University Library, 2016.
- [12] 刘苗梅, 李鹏飞, 景军锋. 基于稀疏表示的印花织物疵点检测 [J]. 西安工程大学学报, 2018 (2).
- [13] 张宏伟, 张凌婕, 李鹏飞. 基于深度卷积神经网络的印花花型分类 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2017 (2).
- [14] Li X, Zhao Z F, Liu L, et al. An optimization model of multi-intersection signal control for trunk road under collaborative information [J]. Journal of Control Science and Engineering, 2017 (1): 1-11.