

# 开放式网络化自动测试系统体系结构研究

钱 锋<sup>1</sup>, 卓家靖<sup>2</sup>, 许爱华<sup>2</sup>

(1. 空军石家庄飞行学院, 石家庄 050051; 2. 武汉军械士官学校 无人机系, 武汉 430075)

**摘要:** 构建一个好的、遵从标准的体系结构是实现网络化自动测试系统开放性的关键; 文章首先通过分析网络化自动测试系统硬件的基本结构模式, 建立了基于 C/S 和 B/S 混合结构模式的网络化自动测试系统硬件模型; 以国际标准为基础, 建立了开放式网络化自动测试系统的软件体系结构, 从框架模型、功能模型、计算模型多个视角对网络化自动测试系统的软件体系结构进行了建模分析, 达到了描述软件体系结构的目的, 为网络化自动测试系统的软件开发奠定了坚实的理论基础。

**关键词:** 网络化自动测试系统; 硬件模型; 软件体系结构

## Research on Architecture of Open Networked Automatic Test System

Qian Feng<sup>1</sup>, Zhuo Jiajing<sup>2</sup>, Xu Aihua<sup>2</sup>

(1. Shijiazhuang Flying College of the PLA air force, Shijiazhuang 050081, China;

2. Department of UAV, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officer School, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** Establishing a good architecture which obeys international standards is the key of realization open networked automatic test system. Firstly, the open networked automatic test system hardware model is built up by analyzing the basic structure mode of the hardware in the test system. The software architecture of open networked automatic test system is established based on international standards. The paper describes the software architecture from various angles such as framework model, function model and calculated model in order to establish massiness theory foundation for software development of networked automatic test system.

**Key words:** networked automatic test system; hardware model; software architecture

### 0 前言

随着测试需求的不断增加, 网络化自动测试系统的规模和结构的复杂性也随之增长, 继之而来的网络化自动测试系统的通用性、设计复用性、仪器互换性、软件可移植性、系统互操作性和可扩展性等问题越来越突出, 亟待解决。解决上述问题的关键是构建一个好的、开放式的网络化自动测试系统的体系结构。关于开放式系统, 目前并没有公认的定义。IEEE 关于开放式系统的定义如下: 一个开放式的系统应能够在多种平台上运行, 能够与其它系统进行互操作, 并能提供一致的接口。网络化自动测试系统作为一个开放式系统, 应具有模块化的结构, 且模块应具有互换性、可移植性和互操作性, 整个系统应具有可扩展性。为了实现其开放性的特征, 网络化自动测试系统的体系结构、功能部件和接口应遵循国际上广泛使用的标准、规范和协议。

### 1 开放式网络化自动测试系统硬件模型

本文首先对目前典型的网络化自动测试系统硬件的基本结构模式进行分析和总结, 在此基础上建立开放式网络化自动测试系统的硬件模型。

#### 1.1 硬件基本结构模式

##### 1.1.1 C/S 结构模式<sup>[1-2]</sup>

C/S 结构模式即客户机/服务器 (Client/Server) 模式, 是网络通信中最常见的一种模式, 通常集散控制多采用这种结构。基于 C/S 模式的典型网络化自动测试系统如图 1 所示。

从图中可以看出, 在 C/S 结构中, 网络化自动测试系统一般由现场测控设备、测控计算机和远程 C/S 服务器组成。一般采用多个客户端来采集数据, 而通常有一个服务器充当数据库的角色, 客户通过通信协议把数据写入远程数据库。

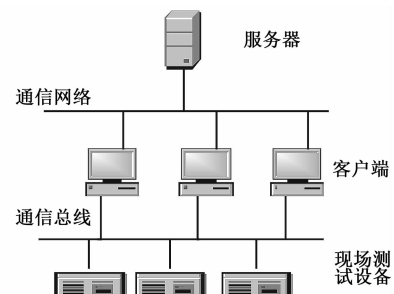


图 1 C/S 结构模型

C/S 结构模式的优缺点在于:

**优点:** 稳定性、可靠性好, 客户机/服务器模式能用不同组件开发, 这些组件可以被随时修改或替换, 而不会影响系统的其它部分; 软件的可扩展性好, 一个服务器进程可以为多个客户提供服务, 客户也可以连接到不同的服务器上, 连接非常灵活, 而且系统灵活性高。

**缺点:** 效率低, 客户端通过网络连接访问远端数据库, 使得网络通信繁忙, 不仅降低了本机的性能, 而且服务器必须保持同每个活动的客户机连接, 也降低了服务器的性能; 维护和升级困难, 如果应用程序需要升级, 则客户程序都必须升级, 并且每个客户端都需要维护; 共享程度低, 由于程序的存储依赖于特定数据库, 不同的数据库之间难于进行移植, 所以必须对每一个客户机平台建立不同版本的应用系统。

收稿日期: 2013-12-08; 修回日期: 2014-01-29。

**作者简介:** 钱 锋 (1979-), 男, 石家庄人, 测试计量技术及仪器专业博士, 主要从事航空电子、自动测试技术等方面的研究。

### 1.1.2 B/S 结构模式<sup>[1-2]</sup>

B/S 结构模式即浏览器/服务器 (Browser/Server) 模式, 是随着 Internet 技术的兴起对 C/S 结构的一种变化或者改进。基于 B/S 模式的典型网络化自动测试系统如图 2 所示。从图中可以看出, 在 B/S 结构中, 测试系统一般由客户浏览器、B/S 服务器以及与服务器相连的远程测试设备组成。在 B/S 结构模式中, 客户端只需要安装一个浏览器, 直接访问该测控网站的地址就可以监视远程测控点的数据变化情况。

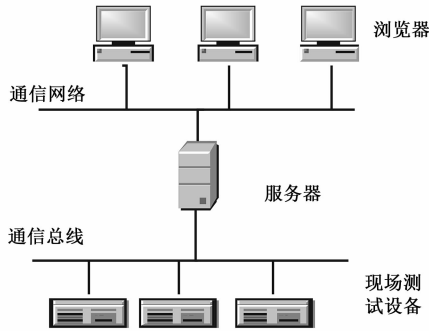


图 2 B/S 结构模型

相对于 C/S 结构模式, B/S 结构模式的优点在于:

客户端不需要专门的客户端软件, 采用网页浏览工具, 直接访问服务器的 Web 地址, 就可以监视、控制远程测试点的数据变化情况; 其主要工作是服务器端软件的开发, 不存在客户端软件的开发和维护, 有利于系统范围的扩展和降低维护的复杂性; 系统集中管理、配置客户端都是标准的浏览器, 因此大规模部署使用 B/S 应用不会引起系统管理难题。

B/S 结构模式同样也存在缺点: 要求服务器端的处理能力强, 否则客户端将会出现长时间的等待, 以至于客户端的浏览器会认为服务器端失去响应而停止服务; 服务器不能在处理用户请求期间与客户端进行交互式信息交换。不能实时显示计算结果或响应用户的操作; 服务器需要处理大量用户的并发请求, 对服务器的稳定性要求高。

### 1.2 基于 C/S 和 B/S 混合结构的网络化自动测试系统硬件模型

本文所研究的开放式网络化自动测试系统结构复杂, 不仅要求能完成测试和控制任务, 而且还要求共享测试资源和信息。因此其通信网络不能是单一结构, 而应是多层的复合结构, 网络化自动测试系统用于测试过程的控制、处理, 采用工业以太网, 而以信息共享为主要目的信息网络采用 Internet。其硬件模型则采用了 C/S 和 B/S 混合结构模式。基于 C/S 和 B/S 混合结构的网络化自动测试系统将 C/S 与 B/S 的优点结合起来, 既有 C/S 高度的交互性和安全性, 又有 B/S 的客户端平台无关性等特点, 具有良好的应用功能。那些交互少、数据传输量小的功能模块应采用 B/S 结构, 在系统中主要完成数据发布、历史数据查询等功能。那些 B/S 结构难以解决的问题, 如交互性强、数据传输量大的功能模块应采用 C/S 结构, 因为这一部分与数据采集密切相关, 系统的实时性就在这部分体现, 所以这部分数据量比较大, 系统与底层的交互也非常强。

C/S 和 B/S 这两部分不是完全分离的, 它们通过网络数

据库进行整合, C/S 部分获取的数据, 及时处理后放入数据库中, 而 B/S 部分则从数据库中不断调用和检索这些数据, 这两部分有机地结合, 各尽其能, 从而起到了改善系统的作用。

开放式网络化自动测试系统其硬件模型如图 3 所示, 其基本功能单元包括: 测试客户端、浏览器端、数据库服务器、Web 服务器、时钟服务器、现场测试服务器、网络化仪器、交换机和路由器等。

测试客户端: 采用 C/S 结构模式, 是系统的控制端, 负责系统的管理和各种测试任务的执行。用户通过其中的测试面板, 通过网络调用测试服务器内相关的远程服务组件, 实现仪器控制、状态监控、数据处理等功能。

浏览器端: 采用 B/S 结构模式, 是系统的用户端。它的权限与测试客户端不同, 用户通过它只能查看测试数据和进行故障诊断, 如观察测试信号的变化或从数据库中查看历史数据记录, 而不能对测试过程产生影响。

现场测试服务器: 是网络化自动测试系统的核心部分, 用来完成对被测对象的测试。现场测试服务器由工控机、 GPIB 总线仪器、PXI 总线仪器、VXI 总线仪器、程控电源等仪器组成。在没有联入网络时组成单机的自动测试系统完成所有的测

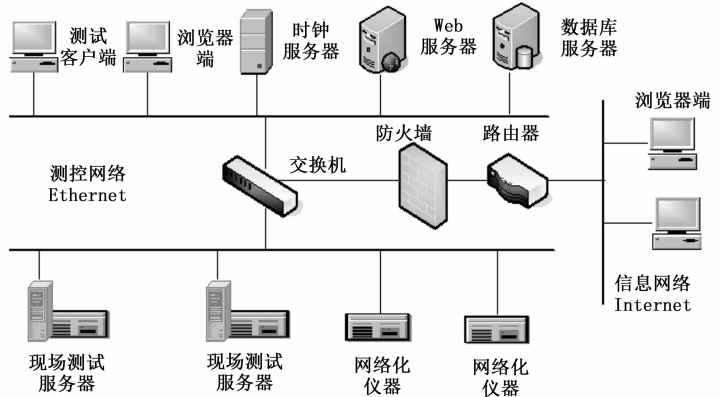


图 3 开放式网络化自动测试系统硬件模型

试功能; 联入网络则是测试服务器, 通过分布式组件技术为远程测试客户端提供操作本地仪器设备的方法, 实现网络化测试, 并及时将测试数据存入数据库服务器中。每个现场测试服务器对外都作为一个测试节点, 而拥有一个 IP 地址。

网络化仪器: 是根据被测对象的测试需求, 扩展的辅助仪器子系统, 包括网络化传感器, LXI 仪器等。

数据库服务器: 负责各种数据信息的保存、读取。

Web 服务器: 提供远程测试数据浏览和故障诊断功能。Web 服务器内放置能浏览测试数据和进行故障诊断的 Web 页面。浏览器端的客户通过浏览器访问 Web 服务器, 下载相应的浏览器页面, 通过浏览器环境查看测试数据和进行故障诊断等工作。

时钟服务器: 本文在建立网络化自动测试系统硬件模型时, 充分考虑了测试系统对实时性, 特别是对时间同步的要求, 因此在硬件模型中加入了支持 IEEE1588 协议的高精度时钟服务器。时钟服务器作为网络化自动测试系统中的唯一主时钟, 用来同步系统中的所有从时钟设备, 从而保证网络化自动测试系统中各测试仪器设备之间的时间同步。

## 2 开放式网络化自动测试系统软件体系结构建模

### 2.1 软件体系结构建模方法

软件体系结构在软件开发中为不同的人员提供了共同交流的语言, 体现了系统早期的设计决策, 有利于提高软件的质量和开发效率并降低成本, 作为系统设计的抽象, 为实现框架和构件的共享和重用提供了支持。软件体系结构建模是软件体系结构研究的一个主要领域, 也是软件体系结构应用的重要途径。而如何对软件体系结构进行建模, 就涉及到软件体系结构建模的方法问题。

传统的建模方法有 Kruchten 提出的“4+1”视图模型<sup>[3]</sup>, “4+1”视图模型根据建模的侧重点的不同, 将软件体系结构的模型分为 5 种: 结构模型、框架模型、动态模型、过程模型和功能模型。每一个视图模型只关心系统的一个侧面, 5 个视图模型结合在一起反映系统软件体系结构的全部内容。这些视图模型不一定要全部出现在某个软件体系结构模型中, 应根据项目的规模和本身的特点进行选取, 同时也可以额外地增加一些视图模型来对系统进行详细说明。本文借鉴 Kruchten 的方法, 并结合网络化自动测试系统的特点, 从框架模型、功能模型和计算模型多个视角对网络化自动测试系统的软件体系结构进行建模, 从而达到描述软件体系结构的目的。

### 2.2 开放式网络化自动测试系统软件框架模型

框架模型是一个最直观、最普遍的建模方法, 框架模型侧重系统整体的结构, 通过结构来反映系统的重要语义内容, 包括系统的配置、约束、隐含的假设条件、风格和性质。框架模型提供了建立复杂系统的强有力手段, 它具有结构预制、体系结构统一、减少应用开发的复杂度、形成构件的软件开发基础等功能特点。

本文给出的开放式网络化自动测试系统的软件结构框架是建立在国际上广泛使用的相关标准和规范基础之上的, 因此具有良好的开放性和适用性, 其框架模型如图 4 所示。网络化自动测试系统软件结构包括两部分: C/S 结构模式软件(测试客户端和现场测试服务器端软件, 简称测试客户端软件)和 B/S 结构模式软件(浏览器端和 Web 服务器端软件, 简称浏览器端软件)。浏览器端软件结构比较简单, 浏览器端用户通过浏览器访问 Web 服务器, 下载相应的页面, 通过浏览器查看测试数据和进行故障诊断, 这里不再详述。测试客户端软件是开放式网络化自动测试系统的核心部分, 结构复杂, 采用层次化结构。层次化软件结构把系统按照功能的扩展性, 分成若干层, 每一层向其上层提供服务, 并利用下层的的服务。采用层次化的软件结构可以减少复杂模型的耦合程度, 使得系统的功能模块具有良好的可重用性, 有利于系统的裁剪与扩充。本文参照 ABBET 标准, 把开放式网络化自动测试系统测试客户端软件划分为 4 个层次: 测试需求/策略层、测试程序层、资源管理层、仪器驱动层。层次间的接口遵循标准和规范, 层次之间、模块之间都按照标准进行数据交换和信息共享。

(1) 测试需求/策略层: 测试需求/策略层描述了如何查找测试各种类型产品的最好方法, 查找与测试环境无关的测试定义形式, 并提供了测试程序编写的依据。数据和知识规范集成了支持高级诊断控制所要求的诊断数据和知识表示。测试需求/策略层中的各种测试需求信息都采用了基于 ATML 标准的信息描述方式, 这样便于测试需求信息的共享和复用。

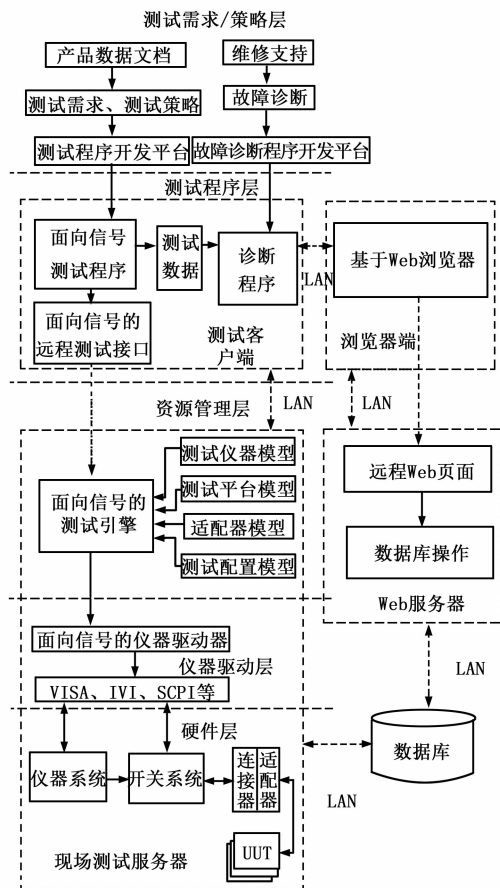


图 4 开放式网络化自动测试系统软件框架模型

(2) 测试程序层: 测试程序层是面向信号的, 建立在 STD 标准之上。面向信号的概念基础是: 信号是所有测试操作的基础。测试系统提供的测试能力通过信号进行描述, 称为真实资源; 被测对象的测试需求也通过信号进行描述, 称为虚拟资源; 面向信号的测试引擎完成虚拟资源到真实资源的匹配与映射, 测试程序中不包含任何针对真实物理资源的操作。由于面向信号的网络化自动测试系统的测试程序层描述的是信号的特征, 与具体所使用的仪器无关, 因此做到了测试程序的系统无关性, 实现了仪器可互换性和代码可移植性, 满足了网络化自动测试系统开放性的需要。

测试程序层主要由面向信号的测试程序和面向信号的远程测试接口组成。面向信号的测试程序指利用面向信号的信号接口编写的测试程序。面向信号的远程测试接口为测试软件编程人员提供了面向信号的远程编程接口, 测试软件编程人员可通过面向信号的远程测试接口在现场测试服务器上创建信号对象接口, 然后指定操作, 完成远程测试任务。面向信号的远程测试接口采用分布式组件技术, 隔离了物理硬件的各异性和网络的分布性, 是实现网络化自动测试系统分布式测试的基础。

(3) 资源管理层: 资源管理层是网络化自动测试系统软件结构中的重要组成部分, 它实现了面向信号的测试程序和测试资源功能之间的对接, 在仪器驱动器的支持下, 为网络化自动测试系统的仪器互换性、软件移植性和系统互操作性给出了完备的解决方案。资源管理层主要包括系统资源模型和面向信号

的测试引擎。

系统资源模型包括测试仪器模型、测试平台模型、测试适配器模型和测试配置模型。这些模型规范了测试资源能力、测试平台通道连接关系、测试适配器信号变换和通道转接关系以及被测对象测试配置的信息描述内容，它们是测试资源管理的基础。系统资源模型包含的所有信息都是采用 ATML 标准进行标准化描述。

在资源管理信息的配合下，面向信号的测试引擎将调用测试仪器和开关系统的驱动程序完成对物理仪器的功能调用，从而把面向信号的测试程序中所标记的虚拟资源需求映射到真实的物理资源控制上来。

(4) 仪器驱动层：仪器驱动层完成测试仪器和开关通道的控制。面向信号的仪器驱动器在封装内部实现时可以调用的具体仪器驱动器类型有 VPP、IVI、IVI-MSS 等，而具体的物理控制指令可以是 VISA、SCPI、488.2 中的一种或几种混合起来。VISA 规范屏蔽了测试仪器的物理接口，仪器接口可以是 VXI、PXI、GPIB、PCI 等类型中的任意一种。对于不同接口的测试仪器的相似功能，VISA 均通过相同的控制代码来实现。

### 2.3 开放式网络化自动测试系统软件功能模型

功能模型主要是用来支持对系统功能需求的描述，即系统提供给最终用户的服务，它与问题领域紧密相连，是系统工程师与领域专家之间有效的交流媒体。功能模型对于理解问题空间的实体间的相互作用很重要，还有利于进行功能规划和理解领域可变性。通过建立功能模型，开发人员能够把握用户的需求，从而为系统的构建和实施提供必要的依据。功能模型所关心的问题是：系统的主要功能是什么；系统是如何满足应用需求的；系统如何能最大限度地减少领域方面的需求变化而带来的结构变化。开放式网络化自动测试系统软件的功能由用户管理、测试网络管理、测试管理、同步管理、数据服务、故障诊断 6 个功能模块构成，其功能模型如图 5 所示。

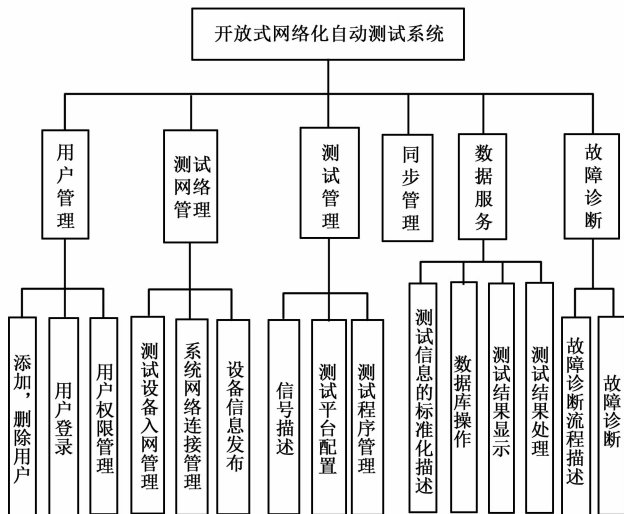


图 5 网络化自动测试系统软件功能模型

用户管理：管理员添加新用户、注销过期用户、为用户更改密码、对用户的权限进行管理，以及用户登录、退出系统等。

测试网络管理：包括系统网络连接管理、测试设备入网管理和设备信息发布 3 个功能模块。随着系统的不断使用，测试

设备等系统资源可能会逐渐加入到系统中，同时也可能因为设备损坏，维修等原因从系统中移去，或者关闭设备。因此要对这些设备进行管理，并把这些设备的变更信息记录在日志里，以供用户查询分析，了解系统中资源的维护信息。

测试管理：测试管理是网络化自动测试系统的核心功能，包括信号描述、测试平台配置管理和测试程序管理 3 个功能模块。信号描述为面向信号的测试程序提供信号的数学模型、基本信号与复杂信号的描述、信号状态描述、信号功能描述、信号参数设置等功能。测试平台配置完成仪器、测试平台、测试适配器与被测对象的配置功能。测试程序管理完成测试程序的编辑、编译、链接与运行等功能。

同步管理：完成网络化自动测试系统中测试设备的时间同步功能。

数据服务：包括测试信息的标准化描述、数据库操作、测试结果显示、测试结果处理 4 个功能。

故障诊断：包括故障诊断流程描述与故障诊断 2 个功能。

### 2.4 开放式网络化自动测试系统软件计算模型

框架模型和功能模型主要体现了网络化自动测试系统的结构抽象和功能抽象。为了更加完整地描述网络化自动测试系统的软件体系结构，还需要为其建立计算模型。计算模型主要描述系统的业务处理模式。网络化自动测试系统的计算体系结构经历了主机结构、客户/服务器结构，随着网络技术的发展而进入基于网络的分布式结构阶段。

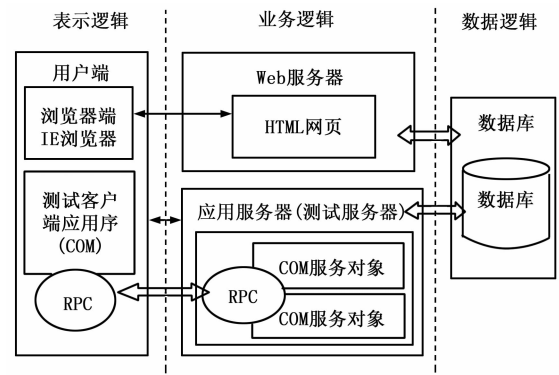


图 6 网络化自动测试系统软件计算模型

图 6 为开放式网络化自动测试系统软件的分布式计算模型。计算模型在功能和具体实现上可分为表示逻辑、业务逻辑和数据逻辑 3 个相对独立的层次。表示逻辑层是整个系统的顶层，通过创建用户界面向最终用户提供特定应用；业务逻辑层与系统功能有关，由构建系统的各种功能构件组成；数据逻辑层为系统提供数据库的访问服务。这种分层的计算结构使表示逻辑、业务逻辑和数据逻辑实现分离，这样就可以得到一个便于进行系统功能扩展、逻辑修改的应用集成框架，进而提高系统的柔性。

本文所研究的开放式网络化自动测试系统软件的计算结构是基于 COM<sup>[4]</sup>（Component Object Model，组件对象模型）技术和 Web 技术的，测试客户端采用 COM 技术，浏览器端采用 Web 技术。COM 是通用的对象模型，采用标准的对象接口，不依赖各种平台和实现技术。基于 COM 的系统具有语言无关性、进程透明性和可重用性等特点。采用 Web 技术的浏览器

（下转第 1339 页）

表 4 第二阶段中 RFA 在不同时刻的预测结果

Time stamp[s]	Output Class							Overall Accuracy(%)
	Turbine OK(%)	Maintenance downtime(%)	Weather downtime(%)	Axle l fault pitch controller(%)	Pitch overrun 0°(%)	Pitch thyristor 2 fault(%)	Pulse sensor rotor monitor defect(%)	
$t$	99.64	82.70	99.29	100.0	98.93	87.83	61.90	98.83
$t+10$	99.34	81.08	97.84	98.67	97.77	85.43	58.94	96.44
$t+30$	97.15	79.26	95.23	97.13	95.52	83.29	55.03	94.09
$t+60$	95.28	76.87	92.86	95.45	93.26	80.09	51.98	91.68
$t+120$	90.10	71.58	88.41	91.90	90.23	77.67	48.83	87.82
$t+180$	87.98	68.71	85.73	86.39	86.88	74.87	46.29	84.69
$t+240$	84.45	65.32	83.66	82.55	83.34	71.45	43.91	81.53
$t+300$	82.76	62.43	81.45	80.76	79.55	68.32	40.67	78.35

表 5 第 10 号涡轮机的状态预测

Actual output	Anticipated output	Correctly identified cases(%)
Emergency stop nacelle	Fault	85.66
Maintenance downtime	Maintenance downtime	100
Rotor impulse sensor defect	Fault	60.90
Weather downtime	Weather downtime	69.84
Yaw runaway	Fault	99.62
Turbine OK	Turbine OK	99.96

### 3 结论

本文提出了一种基于数据挖掘算法的涡轮机故障状态预测方法。为了降低计算难度,我们采用数据挖掘算法进行模型参数的选择。最终采用发电机转速、变速箱速度、温度枢纽、叶片螺距角这些参数进行预测模型的建立。建立预测模型的过程分为 3 个阶段:预测任意故障;预测系统的特殊故障;确定未知故障。通过对各种数据挖掘算法基于大量风力涡轮机数据的性能分析,选择了性能最优的随机森林算法模型。这种模型的预测准确率能够达到 98%;同时还能够预测训练数据没有包含的故障类型。通过在实际风力涡轮机数据的验证,表明了这种模型的稳健性。

#### 参考文献:

[1] Kusiak A, Li W. The prediction and diagnosis of wind turbine faults [J]. *Renew. Energy*, 2011, 36 (1): 16-23.  
 [2] Hyers R, McGowan J, Sullivan K, et al. Condition monitoring and

prognosis of utility scale wind turbines [J]. *Energy Mater*, 2006, (13): 187-203.

[3] Caselitz P, Giebhardt J. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters [J]. *J. Solar Energy Eng*, 2005, 127 (2): 253-261.  
 [4] Becker E, Posta P. Keeping the blades turning: Condition monitoring of wind turbine gears [J]. *Refocus*, 2006, 7 (2): 26-32.  
 [5] Kusiak A, Verma A. A data-driven approach for monitoring blade pitch faults in wind turbines [J]. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2011, 2 (1): 87-96.  
 [6] Kusiak A, Verma A. Prediction of status patterns of wind turbines: A data-mining approach [J]. *Trans ASME J. Solar Energy Eng*, 2011, 133 (1): 1-10.  
 [7] Tavner P J, Bussell G J W, Spinato F. Machine and converter reliabilities in wind turbines [A]. in *Proc. Inst. Elect. Eng. 2nd Int. Conf. Power Electronics, Machine & Drives [C]*, Dublin, 2006.  
 [8] Kohavi R, John G H. Wrappers for feature subset selection [J]. *Artif. Intell*, 1997, 97 (1-2): 273-324.  
 [9] Sbihi A. A best first search exact algorithm for the multiple-choice multidimensional knapsack Problem [J]. *J. Combinatorial Optimization*, 2007, 13: 337-351.  
 [10] Kudo T, Matsumoto Y. A boosting algorithm for classification of semi-structured text [J]. in *Proc. EMNLP*, 2004, 301-308.  
 [11] McCormick A C, Nandi A K. Classification of rotating machine condition using artificial neural networks [J]. *Proc. IMechE: Part C*, 1997, 11 (6): 439-450.

(上接第 1326 页)

端不需要开发客户程序,直接利用 IE 浏览器作为客户端。因此开放式网络化自动测试系统软件采用这种基于 COM 技术和 Web 技术的计算体系结构可以保证系统软件的可移植性、互操作性和可重用性,以及高度的可扩展性<sup>[5]</sup>。

### 3 结论

本文采用 C/S 和 B/S 混合结构模式,建立了开放式的网络化自动测试系统硬件模型。以国际标准为基础,建立了开放式网络化自动测试系统的软件体系结构,从框架模型、功能模型、计算模型多个视角对软件体系结构进行了建模,达到了描述软件体系结构的目的,为开放式网络化自动测试系统的软件开发奠定了坚实的理论基础。

#### 参考文献:

[1] 陈国顺, 宋新民. 网络化测控技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
 [2] 丁婵媛, 宋 杨. 基于 C/S 模式多层结构的通用计算机在线考试系统的实现 [J]. *微型机与应用*, 2011, 30 (14): 23-27.  
 [3] 丁伟华. UML 在软件体系结构描述中的应用 [D]. 大连: 大连海事大学, 2007.  
 [4] 郭 瑞, 姜玉海. 基于 COM 的分布式自动测试系统的设计与实现 [J]. *现代电子技术*, 2006, (22): 146-152.  
 [5] 李文星. 船舶机电设备故障诊断方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21 (3): 2094-2096.