

PHM 与保障信息系统信息集成使用方法研究

郭 晓 金 星

(中国航空综合技术研究所质量工程技术中心 北京 100028)

摘 要 为了满足飞机保障向基于状态维修转变的需要,分析预测与健康管理 PHM(Prognostics and Health Management) 系统及保障信息系统的主要功能和系统组成,依据 PHM 信息集成使用的相关需求,提出 PHM 信息集成使用过程。对 PHM 与保障信息系统的接口信息内容、信息传递方式、接口通信类型和信息集成使用的交互步骤等进行深入研究。研究结果为实现由 PHM 使用的飞机主动式自主保障提供了信息集成使用的技术方法。

关键词 PHM 保障信息系统 集成使用

中图分类号 TP311 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2013.09.065

RESEARCH ON INTEGRATED USAGE OF PHM AND LOGISTICS INFORMATION SYSTEM

Guo Xiao Jin Xing

(Quality Engineering Technology Center, China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract In order to satisfy the need of converting the airplanes logistics to state-based maintenance, we analyse the main functions of PHM (prognostics and health management) system and the logistics information system as well as their compositions, and propose the integrated usage of PHM information according to its related requirements. Thorough analyses have been made on the interfaces information contents of PHM and logistics information system, information transmission approach, interfaces communication type and the interactive procedure of information integrated usage, etc. The study results in this paper provide a technical method of information integrated usage for implementing the PHM enabled active self-logistics of the airplane.

Keywords PHM Logistics information system Integrated usage

0 引 言

装备的维修方式经历过如下的发展,首先是基于故障的事后维护方式,也称修复性维修,即设备出现故障后进行维修的方式。随后是基于时间和使用情况的定期预防维护方式,也称计划维修,这两种方式目前被我国装备维修领域所普遍采用。目前正在推广的是基于状态的视情维修方式 CBM (Condition-Based Maintenance),该方式是在装备的状态检测能力和水平逐步提高、维修预算逐渐下降的趋势下带来的一种新维修方式。CBM 将计划性维修与实时检测相结合,使装备维修方式发展为主动维修。国外新研飞机由于具备 PHM,飞机的状态检测能力大幅提高,因而在飞机的维修中逐步加大了 CBM 的力度,逐步减少了计划维修的工作内容或延长了计划维修的间隔期,在维修费用减少的背景下装备完好性稳中有升。

PHM 技术不是为了消除故障,而是预计失效何时发生,并在预料到的失效发生前采取尽可能简便的维修活动。将 PHM 设计引入到飞机中,一是为了借助其检测能力来有效地减少或消除对测试设备、工具和其他诊断设备的需求;二是借助其故障诊断能力提供一种目前由维修人员(尤其是要求经诊断技能或专家训练的维修人员)来执行的功能;第三是发挥其预测功能

便于将某些不重要区域的维修活动推迟到适当的时机进行,从而减少在远程作战时前线部署备件的需要。以上需求使 PHM 技术的发展重点由故障诊断、故障预测向系统集成转移,体现在以集成应用为牵引,提高故障诊断与预测精度、扩展健康监控的应用对象范围,支持 CBM 与自主保障的发展。

基于以上需求,本文研究 PHM 系统故障诊断与预测信息在装备保障过程中的集成使用方法,使由装备健康预测信息触发的维修管理信息流和基于装备健康预测信息而产生的机群调度管理信息流成为整个维修保障管理新的核心信息流,从而实现装备维修保障模式由事后修复性维修、基于时间的预防性维修逐步向 CBM 转变。

1 PHM 系统分析

1.1 系统组成

目前虽然对 PHM 的功能尚缺乏明确、统一的定义,但通常认为 PHM 的主要功能包括能够在使用中自动完成故障检测、预测、隔离和监控,并及时进行故障影响评价、故障报告和飞机状

收稿日期:2012-07-27。郭晓,高工,主研领域:装备综合保障及保障信息化。金星,工程师。

态管理。

PHM 系统通常由机载和地面二部分构成一体化系统,采用分层推理、空地联合的故障诊断、预测架构,实现从部件级到整个系统级的故障诊断和预测,如图 1 所示。

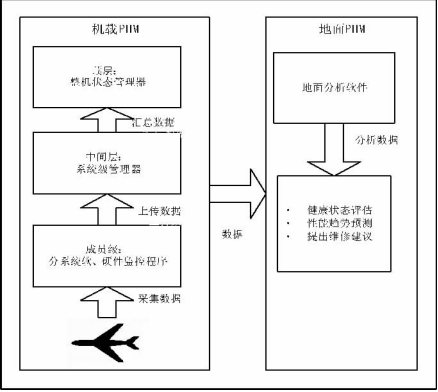


图 1 PHM 系统的组成

机载 PHM 系统具备传感器检测、状态数据处理、故障逻辑诊断等功能,包括成员层、中间层和顶层三个层次。成员层是分布在飞机各分系统部件(称作成员系统)中的软、硬件监控程序(传感器或机内测试/机内测试设备(BIT/BITE));中间层是区域管理器;顶层是飞机平台管理器。

地面 PHM 是一种综合处理软件,具备对状态数据进行深层处理和分析预测的能力,通过处理机载 PHM 发送的整机状态报告的深层分析,完成判别故障模式、确定故障部位和明确维修时机等功能。地面 PHM 重点进行三种类型的推理,具体功能包括:

1) 诊断推理:对监控的结果和其他输入进行评估,确定所报告故障的原因和影响。诊断推理机由一套算法组成,采用模型对故障的输入信息进行评估。这些模型可确定失效模式、监控信息和故障影响之间的关系。

2) 预测推理:确定飞机正朝某种已知的故障状态发展及相关的潜在影响。

3) 异常推理:通过识别原来未预料到的情况,帮助改进飞机设计。地面处理是判断发现的异常是已知的故障状态还是需要研究的新情况。

推理机综合管理器综合上述三种推理机的结果,确定已检测出和预测出的故障及其对任务的影响。

1.2 功能结构

PHM 系统是一个典型的状态监控和诊断系统,在 ISO13374-2《状态监控和诊断系统数据处理、通信和表达-数据处理》中将状态监控和诊断系统分为六个功能层级,如图 2 所示。

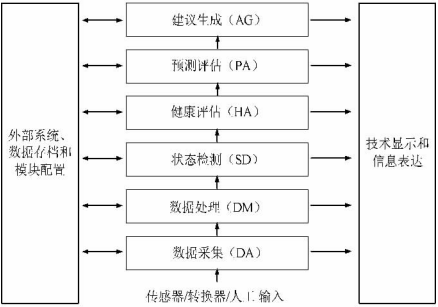


图 2 状态检测与诊断系统功能层划分

PHM 信息的集成使用重点是对地面 PHM 输出信息的集成使用,地面 PHM 的功能组成核心是实现 ISO 13374-2 的上三层功能,即健康管理 HA (Health Assessment)、预测评估 PA (Prognostics Assessment) 和建议生成 AG (Advisory Generation)。

2 保障信息系统核心功能简介

装备保障信息系统是指以装备为受控对象,以系统论和控制论为指导,由一定的组织、人员、设备和软件组成的,按照规定的程序和要求,从事装备技术保障信息服务,以支持和控制装备保障活动有效运行的系统。保障信息系统为军队装备保障机构内部的作业、管理、分析和智能决策提供支持。一个典型的保障信息系统应该具备的主要功能有:保障决策支持、技术状态管理、放飞/维修作业管理、质量管理、远程支持管理、故障综合诊断等。其中保障决策支持是保障信息系统的核心功能,通过保障决策支持功能实现对 PHM 系统信息的集成使用是支持装备维修模式转向基于状态的视情维修的核心。保障决策支持功能的核心是保障计划生成和动态资源调度。

保障计划生成是从整个机群出发,将 PHM 地面站的诊断结论、飞机技术状态管理、放飞/维修作业管理、保障要素支撑等数据充分整合,自动生成使用维修计划,形成任务矩阵(飞机的使用计划及资源保障计划),实现以任务为中心的维修过程。

动态资源调度实现对各类资源的实时智能分配,以保证维修任务的完成,其核心是一套在现有资源保障能力基础上获得最大完好率的解析算法。当计划出现偏差时,动态资源调度需要马上调整各类资源的分配,以便形成最佳的使用维修计划,该计划既要能满足飞机当前的使用要求,又要与机群周、月和年计划保持一致。

3 信息集成使用需求分析

国外在研制 PHM 系统时对 PHM 的定位非常明确,强调 PHM 故障诊断与预测信息的集成使用问题。

在 F-35 飞机的自主式维修保障系统中,维修保障活动由机载 PHM 系统触发,PHM 根据故障检测和故障隔离并利用智能推理机,对机载设备或组件进行故障诊断及预测、剩余寿命跟踪、故障过滤和告警,向飞行员建议下一步采取的 necessary 行动等。地面 PHM 提供了用于启动自主保障事件链的数据、信息和知识,它的故障诊断和装备健康自主管理功能确保了保障任务需求生成的自主化,即通过机载报警、地面实时分析诊断,并将诊断结果及时传递给保障信息系统,使保障信息系统针对保障任务需求的管理更精确、更智能。

总的来说,通过 PHM 信息的集成使用,能够有效增强保障信息系统的维修任务和维修时机确定等辅助决策能力。具体表现为:

1) 保障信息系统能够与 PHM 系统一起集中管理和共享所有的故障信息,从而增强基于故障库和知识库的自动故障诊断能力。

2) 增强了保障信息系统对飞机状态的实时健康分析和结合任务的剩余寿命预测信息管理能力。

3) 通过对基于视情维修触发的维修工作内容的融合以及维修任务辅助决策的自动化,增强了保障信息系统“按需”而非“按计划”的维修方案的管理能力,通过预测为保障系统争取到

获取零部件和训练维修人员的更多时间,从而保障更高水平的任务完好性。

4) 增强了保障信息系统根据任务需求和各种不同零部件的残余寿命,组织开展维修活动的任务决策能力。

4 PHM 与保障信息系统信息集成使用研究

4.1 集成过程

地面 PHM 系统与保障信息系统信息的集成使用主要表现为地面 PHM 系统将装备及部件的健康信息、预测信息和维修建议传递给保障信息系统用于启动基于飞机状态的先导式的主动维修保障活动,典型的集成使用过程如图 3 所示。

具体过程为:

1) 机载 PHM 实时采集并综合处理飞机各种状态信息,通过空地数据链或其他方式,将状态数据下传给地面 PHM 系统;

2) 地面 PHM 完成精确的故障诊断,在对飞机各种状态检测 SD(State Detection)的基础上综合分析的结果,具体包括故障的位置、故障发生次数、发生故障的模式、导致故障的原因、故障的严重程度和故障后果等内容,同时将一些瞬时故障和虚假信息过滤掉,而且对故障信息和驾驶舱效应 FDE(Flight Deck Effect)信息进行关联。

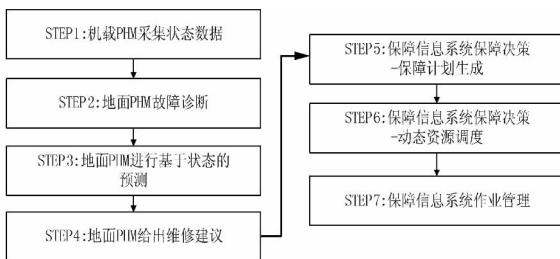


图3 集成使用过程

3) 地面 PHM 根据机队信息和趋势情况完成预测推理,在健康评估的基础上得出预测结果,包括故障部件的剩余可用时间和预测故障部件即将出现的性能变化趋势,为了根据故障部件的实时状态即使调整预测结果,PHM 在给出趋势预测的同时还会给出各种趋势的发生概率,供飞行员和地勤人员制定各自的工作计划。

4) 地面 PHM 对状态检测数据进行分析后给出维修建议,包括进行维修工作的时机和维修工作方法的建议。

5) 保障信息系统接收 PHM 信息,综合考虑飞机使用计划、维修代价、资源情况、机群状态等因素生成基于状态的精确保障计划。

6) 保障信息系统依据保障计划,通过多代理协商产生资源调度建议,下达资源调度指令(备件、人员、设备、设施等)、串换件指令和飞机调整指令等。

7) 保障信息系统依据保障计划和各种指令开展维修保障作业管理,实现飞机基于状态的维修。

4.2 接口信息

PHM 系统的检测结果由地面 PHM 输出,包括装备的健康评估(HA)、故障部件的性能趋势预测评估(PA)和维修建议(AG)三个层次。

4.2.1 健康评估信息描述

1) 故障位置 故障位置是 PHM 根据检测得到的状态进行

分析的结果,通常情况下会定位到现场可更换单元 LRU(Line Replaceable Unit)级别,并给出该 LRU 发生故障的置信区间。如果 PHM 不能根据状态数据将故障精确定位到 LRU,也会将故障尽可能减少到最小的范围内。

2) 故障发生次数 故障发生次数是 PHM 在一个检测周期内检测到故障发生的具体数量,通过分析故障发生的次数可以有效地避免虚警现象,进而评估故障的严重程度,是深入分析故障的依据。

3) 故障模式 故障模式是 PHM 根据故障逻辑,结合状态检测的数据确定故障部件的具体表现,具体表现为输入信号波动大、输出功率为零、非线性放大等,是深入分析故障原因的依据。

4) 故障原因 故障原因是 PHM 根据故障逻辑和故障模式对故障进行深入分析的结果,是判断故障部件的主要依据,如系统短路、系统开路、放大电路失效等,是对状态监控数据深入分析的结果。

5) 故障严重程度 故障严重程度是 PHM 根据故障逻辑和预先约定规则确定的故障后果,是飞行和地勤人员判断飞机状态的重要依据,通常分为四级,具体包括严重威胁飞行安全、危险性故障、警告性故障、注意性故障、提示性故障和正常工作状态等。

6) 故障影响 故障影响是 PHM 根据故障逻辑和事先约定的原则对故障后果的综合分析结论,如外部灯光失效、发电机无输出、交流电压过低等,是飞行员和地勤人员制定飞行和维修工作计划的重要依据。

4.2.2 预测信息描述

1) 剩余正常工作时间 部件的剩余正常工作时间是 PHM 根据故障部件的性能变化趋势,结合目前状态在性能特征曲线上的位置所预测的剩余正常工作时间,该时间是执行飞行任务、制定维修计划、确定维修时机的重要依据,为了保证预测的精确性,PHM 会在预测剩余正常工作时间的同时给出所预测时间的置信区间,并随着故障部件状态的变化而进一步调整。

2) 性能变化趋势 故障部件性能变化趋势是 PHM 根据故障逻辑和故障曲线对部件性能的预测,是根据部件目前的状态对即将出现的性能变化的分析。通过预测性能趋势的变化,可以确定部件故障失效的具体时间和具体表现,为了保证预测的精确性,PHM 会在预测性能变化趋势的同时给出所预测趋势的置信区间,并随着故障部件状态的变化而进一步调整。

4.2.3 维修建议信息描述

1) 维修时机的建议 维修时机的建议是 PHM 根据预测故障部件的剩余工作时间、故障的严重程度和后果等因素综合分析后得出的结论,是飞行和地勤人员制定维修计划的主要依据,也是充分发挥部件的工作性能,降低维修成本的重要依据。

2) 维修工作方案 维修工作方案的建议是 PHM 根据预测故障部件的性能变化趋势、故障原因、故障模式等因素得出的维修建议,是地勤人员制定维修计划、开展维修工作的重要参考依据。PHM 产生的维修决策依据是保障信息系统输入的重要信息。

4.3 接口类型

OSA-CBM 规范定义了 4 种类型的通信,分别为:同步、异步、服务和预订,如图 4 所示。

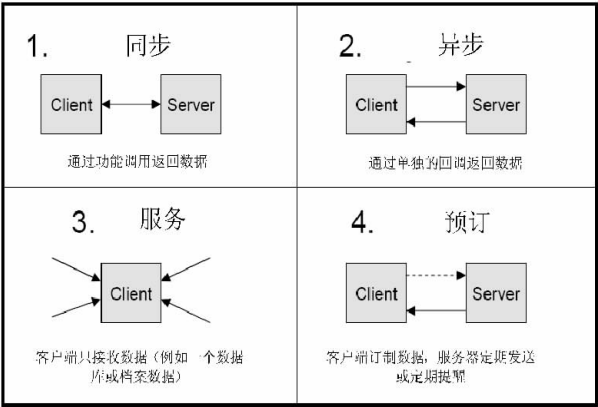


图 4 接口通信类型

依据 PHM 系统与保障信息系统的部署情况 ,可能采用的数据传输方式有三种:有线传输、介质摆渡和无线传输。

如果地面 PHM 系统与保障信息系统同处于一个局域网环境 ,PHM 系统与保障信息系统的数据传输直接通过局域网进行。如果地面 PHM 系统驻留在 PMA 上 ,则可采取介质摆渡的方式 ,在保密要求许可的情况下 ,也可采取无线传输的方式。

在有线传输方式下 ,PHM 系统与保障信息系统可以依据需要使用同步、异步、服务和订阅四种接口通信类型传输数据 ,我们推荐采用异步类型的接口传输数据。

在介质摆渡和无线传输的方式下 ,PHM 系统与保障信息系统可以使用服务和订阅方式传输数据。

4.4 交互步骤

地面 PHM 系统与保障信息系统的信息交互步骤可以分为三个阶段 ,分别为传输的准备阶段、实施阶段和提取阶段。数据的传输和交互的步骤如图 5 所示。

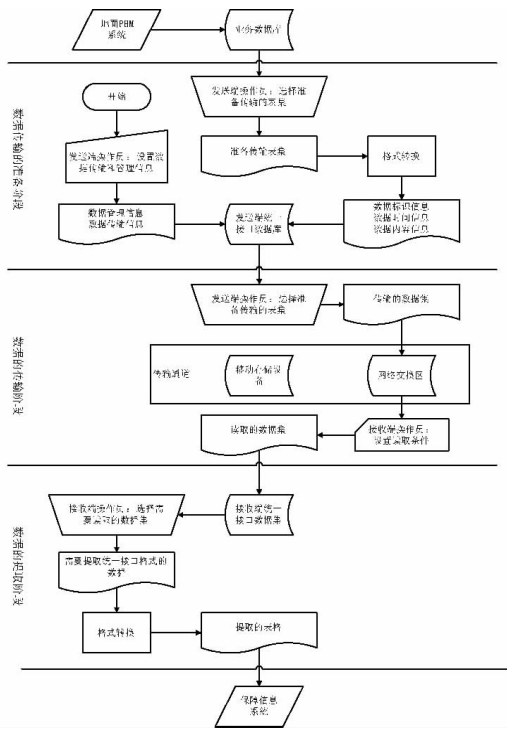


图 5 信息交互步骤

首先是数据传输的准备阶段。地面 PHM 系统端得操作人员先在业务数据库中选择准备传输的信息。然后通过格式转换程序 ,将相关信息的数据转化成统一接口中数据标志信息、数据

内容信息和数据时间信息 ,分别存入统一接口数据库的统一接口表中。然后设置其数据传输和管理信息 ,将其存入统一接口数据库的统一接口表中。至此数据传输准备完毕。

接下来是数据传输的实施阶段。地面 PHM 系统端操作人员在地面 PHM 系统端统一接口数据库中选择统一接口格式原表中的数据 ,然后将数据输入到传输通道的存储设备中 ,保障信息系统端操作员通过设置读取条件 ,从传输通道的存储设备中读取统一接口格式的原表中的全部数据或部分数据 ,并保障信息系统端统一接口数据库中 ,两系统之间的数据传输完毕。

最后是数据的提取阶段。保障信息系统端操作员先在统一接口数据库中选择需要提取的统一接口格式的原表中的数据 ,然后将数据通过格式转换程序 ,将统一接口表中的数据格式转换为保障信息系统的数据格式 ,并且存储在保障信息系统的业务数据库中 ,此时数据的提取完毕。

4.5 主要效果

通过对 PHM 信息的集成使用 ,飞机的维修保障模式转变为一种基于能力的新保障模式 ,这种模式的主要优点如下所述 :

- 1) 飞机的维修保障活动以基于飞机状态的视情维修为主 ,维修时机更准确 ;
- 2) 维修控制强调基于构型的单机控制 ,在机群同步协调的基础上 ,更加注重飞机的实时健康分析 ;
- 3) 维修内容更优化 ,维修活动更通用 ,维修效率高 ;
- 4) 通过自主保障信息系统连接智能飞机 (机载 PHM) 与训练、供应、运输和维修等各类保障信息 ,实现保障决策的智能化和保障信息流的闭环自动化管理。

5 结 语

本文对 PHM 信息的集成使用方法进行了深入研究 ,通过研究 ,我们得出以下结论 :

- 1) PHM 信息集成使用非常必要
- PHM 技术发展的根本目的要求 PHM 信息集成使用。根据对国内外 PHM 技术的发展研究 ,我们可以看出发展 PHM 技术的根本目的就是通过对 PHM 输出的装备健康评估 (HA)、预测评估 (PA) 和维修建议 (AG) 等这些信息的集成使用促进复杂装备维修保障模式向基于状态的视情维修转变。PHM 信息与保障信息系统集成使用有利于充分发挥保障信息系统的优势 ,便于根据装备状态及时调整装备的使用计划、制定装备的保障方案、生成保障工作工卡包等提供依据 ,增强装备保障工作的时效性和针对性 ,有针对性地制定出装备 (系统) 维护计划 ,消除故障并延长预防性维修间隔 ,降低装备全寿命周期费用。

信息化条件下的装备维修保障呈现出由静态管理向动态管理、单一管理向系统管理、分散管理向集中管理、阶段管理向全程闭环管理转变等新特点 ,这些特点要求解决好装备保障相关数据信息统一采集、综合处理、共融共通、集成使用问题。为了提高基于信息系统的维修保障能力 ,必须统筹规划 PHM、保障信息系统等装备保障核心应用系统以便提高各类保障相关信息的共享和融合能力 ,不断提高装备保障信息化建设效益。

2) PHM 系统信息集成使用具备技术基础

只要 PHM 系统和保障信息系统在研制时做好统一规划工作 ,仔细分析 PHM 信息集成使用要求 ,尽早选定数据格式标准及系统架构标准 ,着力解决好信息安全等问题就能确保 PHM 信 (下转第 244 页)

3.2 富文本编辑器

富文本编辑器^[6]是一种可内嵌于浏览器、所见即所得的文本编辑器。它提供类似于 Microsoft Word 的编辑功能。最初只有 IE 浏览器支持,目前谷歌、火狐等浏览器相继跟进,但从功能的丰富性来说,还是 IE 强些。

为实现信息管理模块公告通知、政策法规、行业标准、成功案例、常见问题、个人事务与系统问答等内容的编辑、存储与发布,基于 ExtJS 的富文本编辑器 HTMLEditor 并做适当扩展^[7],实现了一套广泛适用的通用文档信息管理系统。该系统可以管理各种样式的符合 HTML 规范的文档信息,能够实现图片和 Word 与 Excel 文件的上传,能够查看 HTML 源代码,效果如图 5 所示。

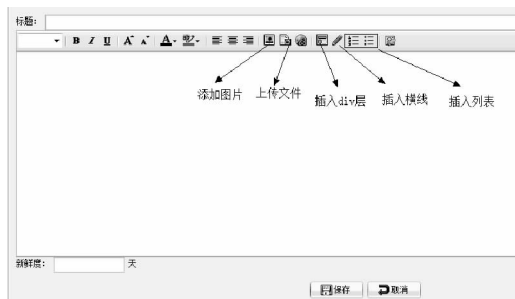


图 5 通用文档信息管理系统富文本编辑器

以添加图片功能为例,富文本编辑器的设计思路分为三步:

第一步 扩展 ExtJS 的富文本编辑器 HTMLEditor。同其它 ExtJS UI 库的组件一样,“上传图片”窗体的上传按钮也是以“事件-响应”的方式来实现页面动态交互的,它通过监听页面中的鼠标单击事件并操作网页的 DOM 对象来实现动态交互。在按钮提交过程中,需要指定提交后的地址 url 属性;创建 img 元素;并且获取 img 元素的 outerHTML 属性,该属性可以获取 DOM 元素及其后代节点所形成的序列化的 HTML 片段;然后根据浏览器的类型将生成的 HTML 代码或者生成的 Element 元素插入到文本编辑器中。

第二步 在需要嵌入文本编辑器的页面设定文本编辑器的类型,对于上图所示的 content 内容字段,其 xtype 属性要设定为第一步扩展后的新的 HTMLEditor。

第三步 文件的提交是发送给 url 属性所指定的地址的。此处使用免费插件 SmartUpload 以 JSP/JavaBean 的方式实现文件上传。整个 SmartUpload 组件定义的类有五个,分别是:File、Files、Request、SmartUpload、SmartUploadException。其中,File 代表用户上传的文件,Files 代表用户上传的多个文件,Request 相当于 HttpServletRequest 的功能,用于获取表单数据,SmartUpload 是最核心的类,负责文件上传下载,SmartUploadException 是自定义异常类。使用时:首先将 SmartUpload.jar 拷贝到项目的 lib 目录下;然后在第一步的 url 属性所指定的 upload-picture.jsp 中使用 jsp:useBean 标签用来装配该 JSP 页面中使用的 SmartUpload 类。

因为 ExtJS 在提交过程中使用的是 UTF-8 编码,所以要求所有文件都使用 UTF-8 编码方式,防止出现乱码^[8]。此外,在实施过程中,由于在 upload-picture.jsp 中最初使用 getRemoteAddr() 方法以 IP 地址 + 时间戳的形式重命名上传的图片文件,导致上传图片时出现 File can't be saved (1120) 错误。这是因为 getRemoteAddr() 方法在浏览器中返回的是 0:0:0:0 的形式,与设计的类接收类型不符(类定义接收类型为:0.0.0.0),而且这个名字是不能作为图片名称的。所以改用 getLocalAddr() 方

法就能够正确上传图片了。

4 结 语

本文针对污水处理信息化发展趋势中亟须解决的问题和水务管理工作的特殊要求,设计并实现了基于 ExtJS 的污水管理信息平台,其优点在于 ExtJS 良好的组件化设计提升了 Web 界面品质和开发效率,提供了跨浏览器的特性,提高了异步交互的效率。平台还在数据库技术与网络系统的结合运用方面做了成功尝试,实现了水务数据的共享。这些系统特点为水务管理工作进入新的层次奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] ExtJS [EB/OL]. 2012-04-26. <http://baike.baidu.com/view/1350145.htm>.
- [2] 任伟,林晓东. 基于 Spring 框架和 ExtJS 的药品库房管理系统实现[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(18):4313.
- [3] 复制发布模型概述[EB/OL]. <http://msdn.microsoft.com/zh-cn/library/ms152567.aspx>.
- [4] 李天鸣,何月顺. 基于 ExtJS 技术与 SSH 框架的权限管理研究[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(5):165-166.
- [5] 介绍 JSON [EB/OL]. 2010-01-28. <http://www.json.org/json-zh.html>.
- [6] 富文本编辑器[EB/OL]. 2012-05-31. <http://baike.baidu.com/view/3454175.htm>.
- [7] Extjs 扩展 Htmleditor [EB/OL]. 2010-03-27. <http://hi.baidu.com/jackvoilet/blog/item/38551a3dc709d40cbba16717.html>.
- [8] 王建文,张俊明,等. 基于 ExtJS 的物资管理系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2011, 31(3):5013-5014.

(上接第 237 页)

息在集成使用时发挥最大的作用。

参 考 文 献

- [1] 童止戈,郭创,李颖晖. PHM 技术在先进军机保障中的应用研究[J]. 航空保障与工程, 2009(1):37-39.
- [2] 冯辅周,司爱威,邢伟,等. 故障预测与健康管理系统的应与发展[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009(12):1-7.
- [3] 刘志伟,刘锐,徐劲松,等. 复杂系统故障预测与健康管理(PHM)技术研究[J]. 计算机测量与应用, 2010(12):2687-2689.
- [4] 彭宇,刘大同,彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010(1):1-7.
- [5] 王绪智,张宝珍. 国外 PHM 的发展动态及经验教训[J]. 测控技术, 2010(29):216-219.
- [6] 翟庆刚,童中翔,陈新,等. 数字化保障关键技术研究[J]. 中国科技信息, 2005(24):14.
- [7] 王晗中,杨江平,王世华. 基于 PHM 的雷达装备维修保障研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008(8):83-86.
- [8] 张西山,闫鹏程,孙江生,等. 维修保障信息系统的的历史处理方法[J]. 兵工自动化, 2011(7):93-96.
- [9] 杨洲,景博,张劫,等. 飞机故障预测与健康管理应用模式研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(9):2061-2063.
- [10] ISO 13374-1. 机器的状态监测与诊断[S].
- [11] ISO 13374-2. 机器的状态监测与诊断—数据处理、通信和表达第二部分[S].
- [12] MIMOSA. OSA-CBM Specification[S].