

# 基于自适应数值滤波器的空调系统故障诊断

徐艳雷, 韩 兵

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

**摘 要:**空调系统作为现代飞机空气管理系统的一部分,对于机舱内温度、空气的调节起着至关重要的作用,其工作正常与否直接影响着飞机的乘坐舒适性。因此,研究空调系统的故障诊断具有十分重要的意义。文中从空调系统的物理结构出发,建立了单级循环结构图,得到了各环节的数学模型。采用自适应数值滤波器进行故障检测,引入 $3\sigma$ 原则作为故障判断准则,并结合数学模型提出了联合故障诊断的思想,对系统故障进行定位和故障类型的判断。最后利用计算机仿真实验进行验证,仿真结果表明该联合故障诊断思想能够有效地进行故障诊断和定位,并实现了对传感器故障和元部件故障的准确区分。

**关键词:**空调系统;故障检测;自适应数值滤波器;联合故障诊断

**中图分类号:**TP39

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2011)12-0182-04

## Fault Diagnosis on Air-Conditioning System Based on Adaptive Digital Filter

XU Yan-lei, HAN Bing

(Automation Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As a part of the aircraft air management system, the air-conditioning system is the key controller to keep the cabin warm and comfortable. So the air-conditioning system fault detection and diagnosis is important to keep it in normal working states. At first, analyzed the structure of the air-conditioning system, and then the single-stage loop structure is built, and the mathematical model of each link is obtained as well. The adaptive digital filter method and the  $3\sigma$  criterion are applied to the fault detection. And based on the adaptive digital filter and the mathematical model, the joint fault diagnosis method is proposed for fault location and fault type judgment. At last, this method is verified by the simulation experiments. And the results demonstrate that the Joint fault diagnosis method can be successfully applied to fault detection and fault type judgment.

**Key words:** air-conditioning system; fault detection; adaptive digital filter; joint fault diagnosis

## 0 引 言

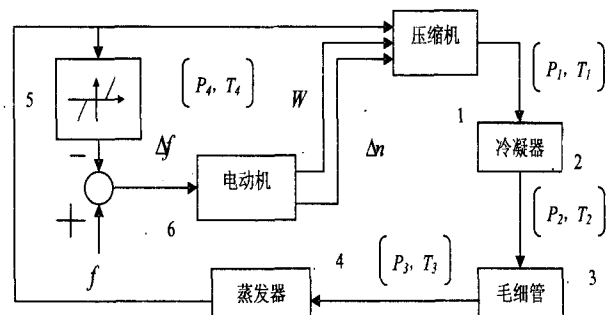
随着变频调速技术的引入,空调系统控制的复杂性大大增加,而空调系统在实际工作过程中不可避免地会发生由元部件、执行器或传感器等所引起的故障,从而造成高耗能、稳定性降低,甚至损害整个系统的正常工作。因此,研究空调系统的故障检测和诊断便成了解决这一问题的有效途径。

## 1 空调压缩制冷系统的结构和数学模型

不同的空调压缩制冷系统,其物理结构略有不同,

但通常情况下它们都是由一些基本的元器件所组成。因此,在分析其结构模型时,只需要研究这些基本元器件的数学模型即可。

一个实际的变频调速空调单级压缩制冷系统的结构图如图1所示。



1、压缩机, 2、冷凝器, 3、毛细管, 4、蒸发器, 5、非线性环节, 6、电动机

图1 空调制冷系统结构图

在文献[1~3]研究的基础上,将该空调制冷系统的数学模型取为如下形式:

收稿日期:2011-05-19;修回日期:2011-08-24

基金项目:上海飞机设计研究院 ARJ21 航电系统改造项目(PONII037013)

作者简介:徐艳雷(1984-),男,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为控制系统的故障诊断;韩 兵,副教授,研究方向为控制系统的故障诊断与容错控制、飞行器自适应控制。

$$\text{冷凝器模型: } \begin{cases} P_2 \approx P_1 \\ \Delta T_2 + \Delta T_2 \frac{1}{T_1 + \tau_1} = \Delta T_1 \frac{K_1}{T_1 + \tau_1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{毛细管模型: } \begin{cases} \Delta P_3 + \Delta P_3 \frac{1}{T_2 + \tau_2} = \Delta P_2 \frac{K_2}{T_2 + \tau_2} \\ \Delta T_3 + \Delta T_3 \frac{1}{T_2 + \tau_2} = \Delta T_2 \frac{K_2}{T_2 + \tau_2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{蒸发器模型: } \begin{cases} P_4 \approx P_3 \\ \Delta T_4 + \Delta T_4 \frac{1}{T_3 + \tau_3} = \Delta T_3 \frac{K_3}{T_3 + \tau_3} \end{cases} \quad (3)$$

压缩机-电动机模型:

$$\begin{cases} \Delta P_1 + \Delta P_1 \frac{1}{T_4 + \tau_4} = \Delta n \frac{K_4}{T_4 + \tau_4} \\ \Delta T_1 + \Delta T_1 \frac{1}{T_4 + \tau_4} = \Delta n \frac{K_4}{T_4 + \tau_4} \\ \Delta n + \Delta n \frac{1}{T_e} = \Delta f \frac{K_e}{T_e} \end{cases} \quad (4)$$

其中,各环节的模型参数均可以通过系统辨识得到。由该模型可知,空调系统各环节都可以作为惯性环节来处理,因此在进行故障检测时,只需实时监测各个过程变量即可。

## 2 自适应数值滤波器进行故障检测的原理

自适应数值滤波器方法<sup>[4]</sup>,是通过对所采集的时间序列利用自适应数值滤波器进行建模,从而得到系统状态的拟合模型,并通过对残差序列的分析来判断系统是否发生故障<sup>[5]</sup>。

$W(t)$  为自适应数值滤波器的输入,  $y(t)$  为其输出,  $X(t)$  为系统输入信号,  $M$  为滤波器的阶数,  $e(t)$  为  $X(t)$  与  $y(t)$  之间的差,  $\hat{X}(t)$  为状态  $X(t)$  的估计值,且有以下关系式。

$$e(t) = X(t) - y(t) \quad (5)$$

$$y(t) = \hat{X}(t) = \Phi_t^T W_t \quad (6)$$

其中:  $\Phi_t = [\varphi_{t1}, \varphi_{t2}, \dots, \varphi_{tM}]^T$ ,  $W_t = [\omega(t), \omega(t-1), \dots, \omega(t-M+1)]^T$

$\varphi_{ti}, i=1, 2, \dots, M$  是滤波器在时刻  $t$  的权值,其递推公式为:

$$\Phi_{t+1} = \Phi_t + 2\gamma W_t e(t) \quad (7)$$

其中:  $0 < \gamma < \frac{1}{\lambda_{\max}}$ ,  $\lambda_{\max}$  代表  $E[W_t W_t^T]$  的最大特征值。

取时延  $\Delta l=1$ , 便可得到状态  $X(t)$  的拟合模型为:

$$\hat{x}(t) = \varphi_{t1} x(t-1) + \varphi_{t2} x(t-2) + \dots + \varphi_{tM} x(t-M) + e(t) \quad (8)$$

对于平稳的时间序列  $\{e(k), k=1, 2, 3, \dots\}$ , 自适应数值滤波器将渐近收敛, 并且可以证明<sup>[6]</sup> 误差序列  $\{e(k)\}$  是一个零均值、高斯白噪声, 并有定常方差  $\sigma_e^2$ 。当突变性的元部件故障或传感器故障引起的异常数据  $X(t)$  进入图2所示的系统时, 预测误差  $\{e(k)\}$  将立刻发生变动, 其白噪声性能也将被破坏。因此, 可以根据这一特点来检测系统是否发生故障<sup>[4]</sup>, 判断标准采用工业生产中常用的  $3\sigma$  准则<sup>[7]</sup>。

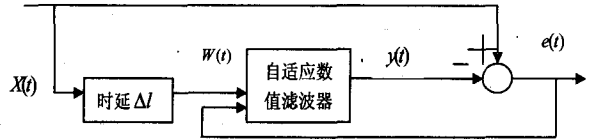


图2 用自适应数值滤波器进行系统辨识

## 3 联合故障诊断

前面得到了空调制冷系统各环节的数学模型, 并引入了自适应数值滤波器进行故障检测。然而, 自适应数值滤波器只能用于故障检测, 不能对故障做进一步的诊断<sup>[4]</sup>。为了能够判别故障类型及对故障进行定位, 提出了基于数学模型和自适应数值滤波器的联合故障诊断思想。结构图(以冷凝器为例)如图3所示。

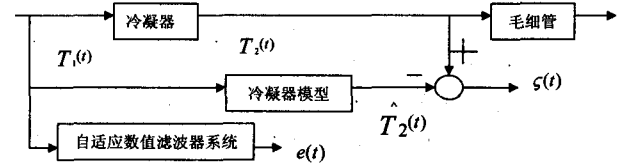


图3 联合故障诊断结构示意图

在正常工作状态下, 通过(8)式可以得到状态

$T_1(t)$  的估计值  $\hat{T}_1(t)$ ,  $e(t)$  为其残差, 通过残差序列  $\{e(k)\}$  的变化来检测系统是否发生故障; 同时将  $T_1(t)$  值输入冷凝器数学模型, 得到状态  $T_2(t)$  的估计值  $\hat{T}_2(t)$ , 其残差定义为  $\zeta(t)$ , 于是

$$\zeta(t) = T_2(t) - \hat{T}_2(t) \quad (9)$$

可以证明正常状态下, 残差序列  $\{\zeta(t)\}$  为零均值、高斯白噪声, 并有定常方差  $\sigma_\zeta^2$ 。

当系统发生故障时, 若由元部件故障引起的异常数据  $T_1(t)$  进入系统, 该状态值会直接进入下一环节(冷凝器), 引起下一环节(冷凝器)输出状态  $T_2(t)$  发生同样的变化, 于是残差变量  $\zeta(t)$  无明显变化, 其白噪声性质不发生改变; 若是由传感器故障引起状态  $T_1(t)$  的测量值发生变化, 通过数学模型计算得到其输出值  $\hat{T}_2(t)$  也会发生同样变化, 而传递给冷凝器的状态变量  $T_1(t)$  的实际值并不变化, 因此冷凝器的输出变量  $T_2(t)$  不会发生变化, 从而导致  $\zeta(t)$  产生突变现象, 破坏其白噪声性质。据此即可区分元部件故障和

传感器故障,并能判断故障发生部位。根据自适应数值滤波器进行故障检测和诊断的完整结构流程图如图 4 所示。

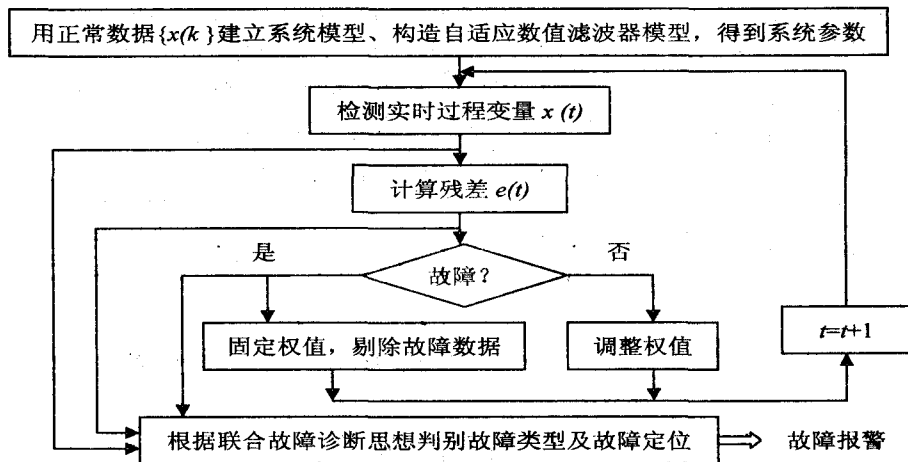


图 4 采用自适应数值滤波器的故障检测和诊断系统结构流程图

#### 4 计算机仿真实验

在这一部分,以格力 KFR-35GW/K(35556)B3-N2 型号空调为研究系统,以冷凝器环节为研究对象对所提出的故障检测和诊断方法进行验证。

##### (1) 冷凝器模型辨识。

利用系统辨识的方法求取冷凝器环节的温度信号输入输出模型。其模型为一阶惯性延迟环节,故可采

用由阶跃响应曲线确定模型参数的方法<sup>[8]</sup>来进行辨识,采用多次测量取平均值的方法取得相关测量数据。通过阶跃响应计算公式<sup>[8]</sup>计算得到冷凝器的模型参数

为:  $K_1' = 0.195, T_1' = 22.53, \tau_1' = 4.71$ 。

##### (2) 自适应数值滤波器模型辨识。

以图 3 所示的冷凝器环节为例,首先采集空调系统在正常工作状态下的一组温度信号序列  $\{T_1(k), k = 1, 2, 3, \dots, 1000\}$ , 自适应数值滤波器的阶数取  $M = 2$ , 由于空调系统的各环节模型均为一阶模型,考虑到在建模过程中为了简化数学模型所忽略的因素,因此取自适应数值滤波器阶数  $M = 2$ 。通过计算,得到正常状态下温度信号  $T_1(t)$  的拟合模型<sup>[4]</sup>如下:

$$T_1^0(t) = 0.9556T_1^0(t-1) - 0.0299T_1^0(t-2) + e^0(t) \quad (10)$$

##### (3) 故障诊断。

以图 3 所示的冷凝器结构图为例进行计算机仿真实验,采用联合故障诊断思想对元部件故障和传感器故障这两种类型的故障进行检测和诊断。

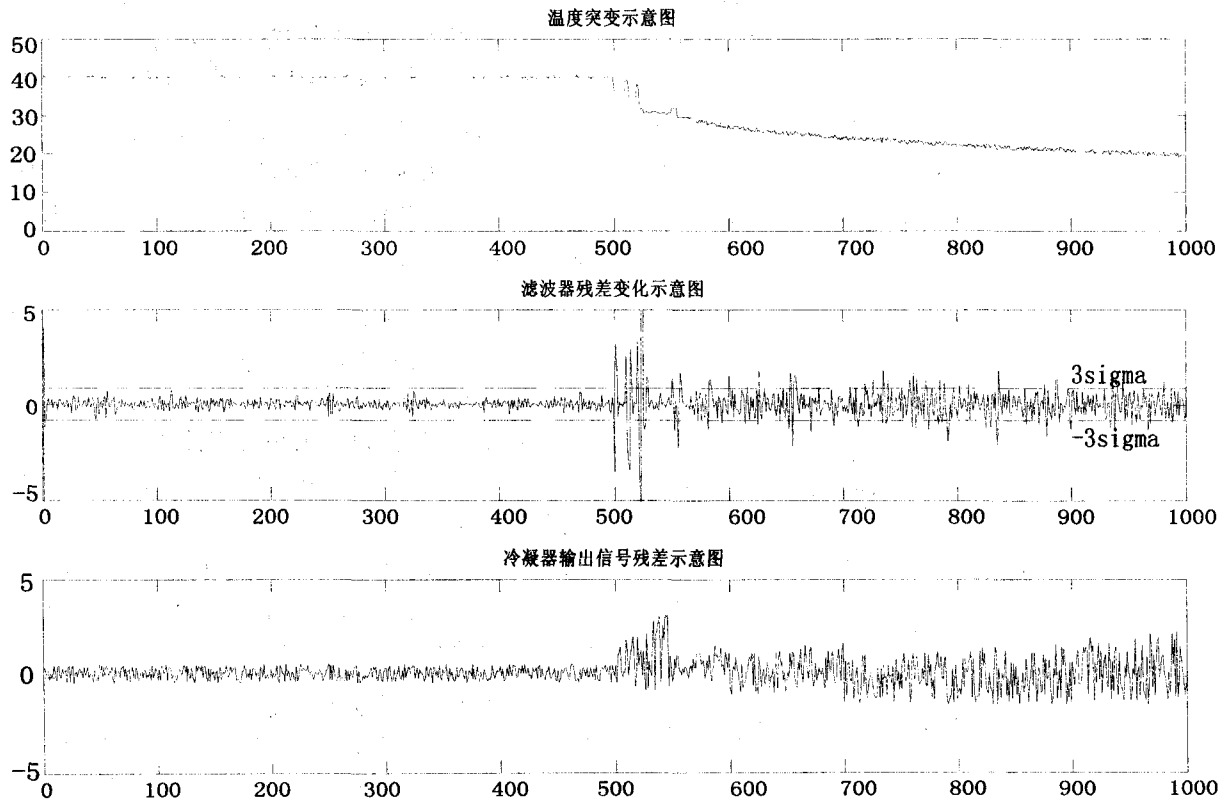


图 5 元部件故障时  $\{e(t)\}$ 、 $\{z(t)\}$  与  $\{T_1(t)\}$  变化关系比较图

## a) 元部件突变性故障。

在这一部分研究的故障对象为压缩机堵塞。当压缩机发生堵塞时,压缩机输出的高温高压制冷剂量将急剧下降,因而冷凝器的输入温度  $T_1(t)$  也会突然减小,并随时间的变化逐渐降低<sup>[9,10]</sup>。而由模型计算得到的温度信号  $T_2(t)$  的状态估计值  $\hat{T}_2(t)$  由于始终跟随温度信号  $T_1(t)$  而变化,故而残差序列  $\{\zeta(t)\}$  不会发生明显跳变,其白噪声性质也不会被破坏。

通过仿真得到了残差序列  $\{e(t)\}$ 、 $\{\zeta(t)\}$  与温度信号  $\{T_1(t)\}$  的变化关系图,如图 5 所示。

## b) 传感器突变性故障。

这一部分研究的故障对象为温度信号  $T_1(t)$  的测量传感器损坏。当该传感器损坏时,传感器输出信号将发生突变,最终输出信号为零<sup>[11]</sup>,因此由模型计算所得到的输出信号  $\hat{T}_2(t)$  最终也为零,而冷凝器输出信号  $T_2(t)$  不会改变,故由(9)式可得:  $\zeta(t) \approx T_2(t)$ ,从而造成  $\{\zeta(t)\}$  出现明显跳变,其白噪声性质也被破坏<sup>[12]</sup>。

通过仿真计算得到了残差序列  $\{e(t)\}$ 、 $\{\zeta(t)\}$  与温度信号  $\{T_1(t)\}$  的变化关系图,如图 6 所示。

比较图 5 和图 6 可知,在  $t = 500$  时刻,自适应数值滤波器的残差序列连续出现异常值,说明系统发生了故障。而图 5 中虽然  $\zeta(t)$  出现了跳变,但并未改变其白噪声性质,因此可以判定故障类型为元部件故障<sup>[13-15]</sup>;图 6 中  $\{\zeta(t)\}$  也出现跳变,其白噪声性质也被破坏,因此可以判定故障类型为传感器故障。而  $\{\zeta(t)\}$  的变化也说明了冷凝器环节并未出现故障,故障信号是由前一环节传递过来的,这与所研究的故障发生部位也是一致的。

## 5 结束语

文中分析得到了空调系统的数学模型,引入自适应数值滤波器进行故障检测,并以  $3\sigma$  原则作为故障判断准则,在此基础上提出了联合故障诊断的思想。最后通过仿真实验验证了该方法能够准确地判别故障类型和故障发生部位,具有优良的故障诊断性能。

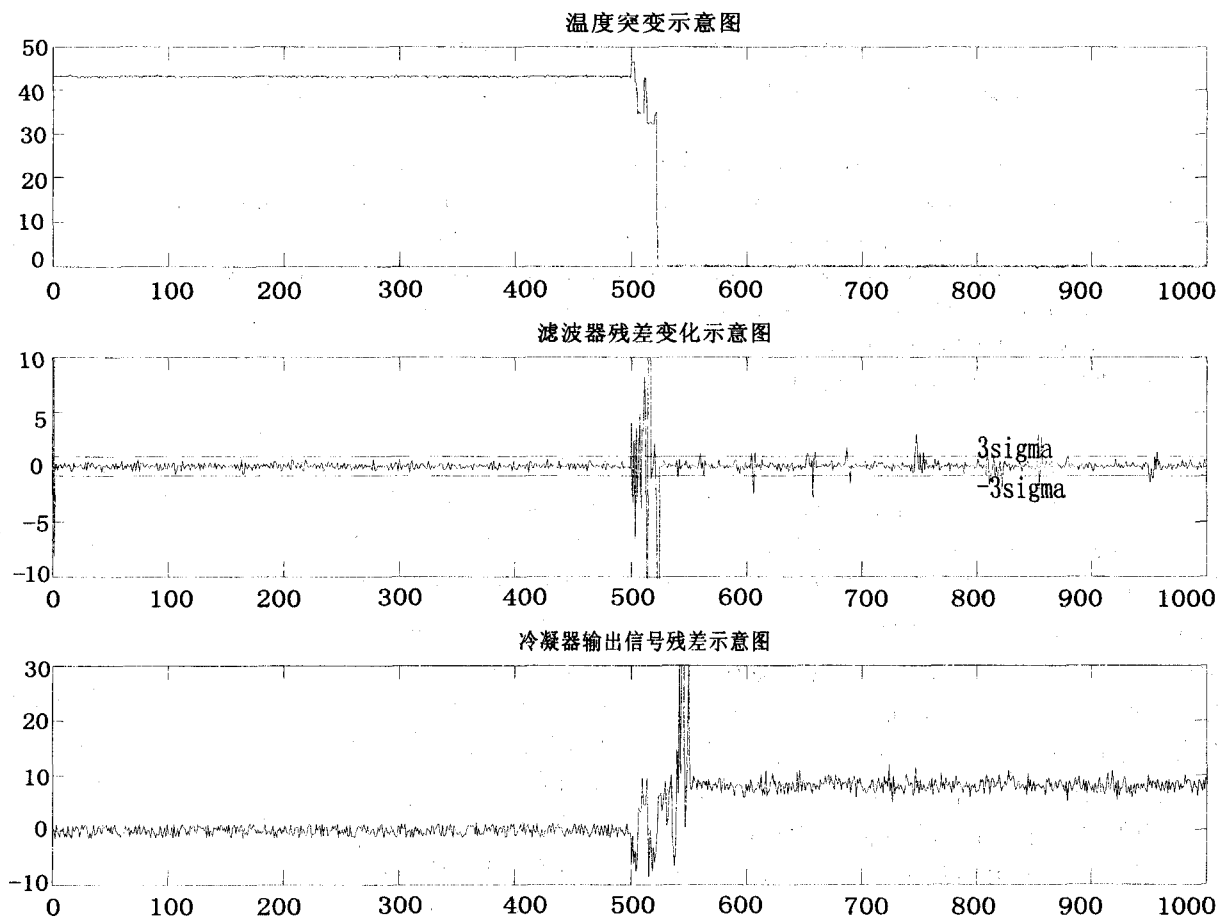


图 6 传感器故障时  $\{e(t)\}$ 、 $\{\zeta(t)\}$  与  $\{T_1(t)\}$  关系比较图

## 参考文献:

[1] 陈则韶, 戚学贵, 程文龙, 等. 压缩制冷空调装置动态仿真研究[J]. 低温工程, 2000(6): 35-39.

[2] 刘国平, 金凯鹏. 传播制冷控制系统的模型研究[J]. 船舶工程, 2003, 25(3): 51-53.

[3] 周东, 伍志坚, 岳丹婷. 蒸汽压缩制冷装置仿真的发展

将各种消息通知各个组成员,就需要服务器推送技术。该技术的基本思想是将客户端主动查询信息改为服务器主动发送信息。在服务器推送过程中,服务器可以控制客户接收什么数据,何时接收和由谁接收,能够控制更新数据的时间和效率。在该数据交换中心,实现服务器推送需要完成两部分工作<sup>[11]</sup>。

(I)当群组某个成员首次登录时,服务器端会启动一个初始化线程,用来从服务器端获取用户个人信息以及用户所加入的群组信息。登录完成后,该线程停止工作,直到用户退出时它将再次启动。当客户以正常方式退出系统时,该线程将发送用户的下线状态给服务器,服务器会根据此状态来决定数据源发送数据去向,是及时发送给接收方还是放到数据缓存队列中<sup>[12]</sup>。

(II)当客户端初始化工作完毕后,数据交换中心将启动一个 HTTP 的长连接来监听服务器端数据的实时更新,客户端通过接收数据源发送的实时数据来更新自己的数据库,从而和服务器以及数据源保持数据同步更新。

### 3 结束语

文中是在充分研究了 Web Service 技术、异构数据库、LDAP、数据融合等理论的基础上结合 J2EE 技术实现的基于 Web Services 的群组数据交换系统,很好地解决了数据集成与共享等问题。而且本系统的应用非常广泛,可以用于学校之间、政府机构、商业部门等诸多异构系统,只要用户加入到该系统中,上传自己的数据格式,将本站点需要共享的操作包装成 Web Serv-

ice,然后注册到数据中心,其它所有的配置过程都交给数据中心来实现,极大地简化和方便了用户的使用。

### 参考文献:

- [1] 郭文越,陈虹,刘万军. 基于 SOA 的数据共享与交换[J]. 计算机工程,2010,36(19):280-282.
- [2] 李玉华. 面向服务的数据挖掘关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [3] Alonso G, Casati F, Kuno H, et al. Web Services: Concepts, Architectures and Applications[M]. [s. l.]: Springer-Verlag, 2004.
- [4] 汪勇,王备战. 基于 Web Service 的数据交换平台解决方案[J]. 微处理机,2007,8(4):120-125.
- [5] Gosu A K. Analysis of Web Services on J2EE Application Servers[D]. Texas: University of North Texas, 2004.
- [6] 单明. 基于 J2EE 的项目管理系统设计与实现[D]. 济南:山东大学,2009.
- [7] 焦静,李勇. 基于 LDAP 的统一身份认证的设计与实现[J]. 科学技术与工程,2007,7(4):646-649.
- [8] 袁磊,李帅. 基于 Web Services 的异构系统信息交换的实现[J]. 计算机技术与发展,2008,18(12):8-10.
- [9] Amer-Yahia S, Kotidis Y. A Web-Services Architecture for Efficient XML Data Exchange[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Data Engineering. [s. l.]: [s. n.], 2004.
- [10] 陈航,赵方. 基于服务器推送技术和 XMPP 的 WebIM 系统实现[J]. 计算机工程与设计,2010,31(5):925-928.
- [11] 李爱军,郭学俊. 基于 Web 服务的异构数据交换方案设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2006,16(7):79-82.
- [12] 郑淮宇,吴健. 基于 XML 和 Web 服务的数据交换共享研究[J]. 微机处理,2008(4):71-76.

(上接第 185 页)

- [J]. 大连海事大学学报,2003,29(2):107-111.
- [4] 周东华,孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京:清华大学出版社,1994:57-63.
- [5] Keir M C, Alleyne A G. Dynamic Model-Based Fault Detection and Diagnosis Residual Considerations for Vapor Compression Systems[C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, USA; [s. n.], 2006:14-16.
- [6] Tomita S, Oe Y, Soeda T. Failure Detection and Prediction System by Using Adaptive Digital Filter[C]//Proc of IFAC Workshop on Real Time Digital Control Applications. Mexico: [s. n.], 1988:93-99.
- [7] Bashi A, Jilkov V P, Li X R. Fault Detection for Systems with Multiple Unknown Modes and Similar Unites-Part I[C]//Proc. 2009 International Conf. on Information Fusion. Seattle, WA, USA; [s. n.], 2009.
- [8] 邵裕森. 过程控制及仪表[M]. 上海:上海交通大学出版社,2004:24-25.
- [9] 田祥宏,陈爱萍. 一种自适应数据流值预测模型[J]. 福建电脑,2006(12):12-15.
- [10] 周洪,钟明慧. 控制系统的一种简单实时在线仿真方法系统[J]. 仿真学报,2003(12):5-8.
- [11] Bashi A, V. P. Jilkov, and X. R. Li. Fault Detection for Systems with Multiple Unknown Modes and Similar Unites-Part II[J]. 12th International Conf. on Information Fusion, Seattle, WA, USA, 2009:6-9.
- [12] 陈红,邓良才,吕凡. 制冷系统蒸发器动态过程数学模型模糊辨识[J]. 重庆大学学报,2007,30(3):22-25.
- [13] 陈小芬,李翠华,杜晓凤. 自适应阈值的舌象裂纹检测[J]. 计算机技术与发展,2009,19(1):16-18.
- [14] 许国威,马胜前,危淑平. 自适应 RLS 算法研究与 DSP 实现[J]. 计算机技术与发展,2010,20(10):35-38.
- [15] 谭雪花,王华伟. 飞机维修方案优化支持系统框架研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(11):11-13.