

基于图像特征提取的飞行器故障诊断系统设计

陈 思, 贺志伟

(上海机电工程研究所, 上海 200090)

摘要: 为提高飞行器测试数据的利用率, 解决飞行器故障诊断中资源浪费的问题; 提出并实现了一种基于数据图像特征提取的飞行器故障自动诊断系统; 系统通过建立一个历史测试数据库, 对各种测试项目的历史图像提取特征值, 将其存储在数据库中, 且将该次测试对应的诊断信息存储在数据库内; 利用小波变换法作为特征提取的方法, 小波能谱熵作为特征值表征; 将当前测试故障的数据图像进行特征提取, 并与数据库中图像进行比对, 找出相似度最高的历史数据图像; 从而帮助测试人员进行故障定位诊断工作。

关键词: 故障诊断; 特征提取; 小波变换

Design of a Missile Fault Diagnosis System Based on Feature Extraction of Image

Chen Si, He Zhiwei

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to improve the utilization of the test data of missiles, and solve the problem of waste of resources on missile fault diagnosis, a missile fault diagnosis system based on feature extraction of image is presented and realized in this article. The feature extracting algorithm is applied for the images of test data, the eigenvalues and the diagnostic information are stored in the historical database. Wavelet transform is used for the extraction of image features, wavelet energy entropy is used as eigenvalue. By comparing the eigenvalues of current image with the data stored in our historical database, this system can help the test engineer to get the fault locations and diagnose the faults.

Keywords: fault diagnosis; feature extraction; wavelet transform

0 引言

每发飞行器产品的试验、验收均需要进行大量的测试工作。通过测试检测出来的故障产品, 需要进行故障的诊断工作。然而目前的飞行器自动测试诊断技术, 只是对故障进行定位, 确定发生故障的部件^[1]。后续则需要组织产品的总体设计师及分系统设计师专门进行测试数据的排故分析工作。这样一来, 必然将消耗大量时间及人力物力, 且当时故障产品的测试数据, 数据显示的波形图像形状, 诊断分析的结论等信息都不会特地分类保存。下次发生类似故障后, 还得再次组织设计师进行排故分析工作, 影响型号工作进度, 造成资源损失浪费。该现状是目前一个亟待解决的问题。

随着飞行器批产数量的大量增加, 出现故障弹的频率也随着基数增长。经年累月, 测试人员获取了大量的测试数据及数据显示图像。通常情况下, 最终测试结果只是判定是否合格, 打印最终生成的报表后, 便失去效用。然而, 在这些测试数据中, 包含着非常丰富的故障现象信息, 具有很大的利用价值。若两次飞行器某部件故障的测试图像

具有较高的相似度, 则可以判断导致这两次产品故障的原因也具有一定的相似性。那么, 如果可以有效地利用这些历史数据信息, 当被测产品再次发生故障后, 能够方便地查找出历史上某次或某几次与当前相似的故障数据图像。结合当时的诊断结论, 可以很好地辅助测试人员完成故障诊断工作。

基于内容的图像检索技术是一个比较好的解决方式^[2], 该技术利用特征提取方式获取图像的内容信息, 如颜色、纹理、形状等来描述图像的内容, 将大数据量的图像内容压缩到一组或几组特征向量数值, 通过比较各个图像的特征向量的相似度, 找出最为相似的一幅或几幅图像^[3]。因此, 本文主要研究该方法在飞行器诊断系统中的实现与应用。

1 系统结构及原理

1.1 基于内容的图像检索系统

基于内容的图像检索技术融合了信息检索及数据库处理等多项技术^[4]。通常图像检索系统包括数据库构建及数据库查询两大模块。数据库的构建指的是通过特征提取的方法获取数据库中每幅数据图像的特征向量表述值, 将其作为图像内容的描述, 存储在数据库系统的图像特征表中。数据库的查询检索则是为用户提供输入接口, 将用户提交的待检索图像, 同样的进行特征提取。并将提取出来的特

收稿日期: 2018-04-07; 修回日期: 2018-04-22。

作者简介: 陈 思(1987-), 男, 上海人, 工程师, 主要从事导弹测试系统设计与诊断工作方向的研究。

征向量值, 通过匹配算法, 与原数据库中存储的各图像进行相似度匹配, 最终输出给用户匹配度最高的一组或几组图像信息。

在图像检索系统中, 还可以对数据库中每幅图像加以文字类描述信息, 反映该幅图像获取日期、形成原因、以及其它详细信息。并将其存入关联的图像信息表中, 用户可对上述信息进行查阅, 辅助用户进行判断分析工作。

1.2 系统结构

基于数据图像特征提取的飞行器故障诊断系统, 与飞行器的测试系统同一硬件平台。测试过程中出现的故障数据图像可直接输入至诊断系统中, 获取诊断结论。

本系统的工作原理是使用基于内容的图像检索技术, 通过建立一个历史测试数据库, 使用特征提取的方法, 对各种测试项目的历史数据波形提取特征值, 并将其存储在数据库中, 且将该数据当时测试对应的测试结果、出现的故障现象、设计师最终排故分析, 获取的故障诊断结论等均存储在内。当下次再进行总装综测, 某产品测试出现异常后, 对此次输入系统的产品故障测试项目波形同样进行特征提取。对提取出来的特征值, 将其与数据库中的历史数据利用相似性测度的方式比较, 找出与其相似度最为接近的几组历史数据。同时调出当时的测试结果及相关诊断信息, 并最终通过这些辅助诊断信息, 帮助测试人员可以更快地判断定位飞行器故障原因。系统数据流图如图 1 所示。

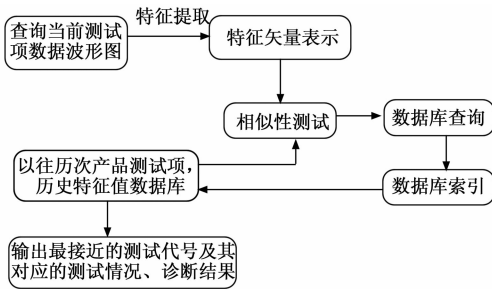


图 1 基于特征提取的飞行器故障诊断系统数据流图

2 特征提取

本系统中, 对于数据图像的特征提取, 是指对飞行器测试采集的数据波形图像, 对其固有特性进行提取并将其以数值的形式表示的过程。对测试数据波形图像内部的信息提取并解析, 将其中不会轻易被各种随机情况影响的信息, 作为该数据图像的特征值, 进行提取并以数值的形式表现。特征提取是一个剔除繁杂图像信息中大量无用信息的过程, 提取出来的特征值能够很好地体现出数据波形曲线的变化和趋势, 为数据图像相似性的分析比对, 提供一个可靠的分析判据, 具有提高匹配图像的识别精度、提升系统图像匹配的运行速度, 降低计算复杂度等作用。

目前, 对图像信息进行特征提取方法包括对图像颜色、纹理、形状特征的提取三类方法。由于实际使用过程中, 飞行器测试采集的信号数据图像并不具备颜色特征, 且形

状特征也并不突出, 因此本系统选择使用图像的纹理特征提取法作为测试数据图像的特征提取方法。目前, 对于数据图像纹理的特征提取方法主要包括: 频谱方法, 有傅里叶功率谱、小波变换、Gabor 变换等^[5]; 统计类方法, 主要包括纹理谱法^[6]等; 以及马尔可夫随机场模型 (MRF) 等方法。本系统采用小波变换法作为测试数据图像的特征提取方法。

2.1 小波变换

小波变换 (continuous wavelet transform) 是一种能够将输入信号从某一频段分层到多个 各异频段的技术^[7]。在对信号的时频分析上, 小波变换法有着较好表现。通过合理选取小波基, 可以在频域与时域内同步获得明晰的数据局部信息特征。因此, 小波变换技术在实际工程应用中, 对工程信号的处理与分析上得到了非常广泛的运用^[8]。

小波变换的原理见图 2, 输入信号 S 首先进入低通滤波器 L 与高通滤波器 H , 经过滤波选通后, 获得低频与高频小波系数 cL 与 cH 。然后将获得的系数 cH , 继续经 L 和 H 滤波选通后, 得到下一层级系数 $cL1$ 与 $cH1$, 依照此模式一直进行 n 次, 即对输入信号 S 进行了 n 层分解。通过将输入信号执行 n 层小波变换分解, 可一共获得 $n+1$ 组的小波系数。最后, 再将获得的每组小波系数使用信号回构的方法, 就能使原信号分解到各个频率段下。

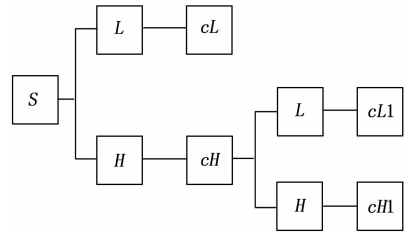


图 2 小波分解原理示意图

连续小波变换函数定义为: $CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt$

其中: $f(t)$ 为原信号, a, b 分别为尺度和位移参数。由于 a, b, t 都是连续变量, 所以上式被称作连续小波变化。式中 $\psi_{a,b}(t)$ 又叫做小波基, 是由基本函数 $\psi(t)$ (母小波) 经过位移及缩放后变化, 公式表示为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 是在连续小波变换 (CWT) 基础上发展而来, 对尺度 a 和位移 b 同时进行幂级数离散化变换, 令 $a = a_0^j, b = k2^j b_0$, 如此, 对 a, b 进行幂级数离散化变换可得:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}(t - ka_0^j b_0)) = a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}t - kb_0)$$

对确定的输入信号 $f(t)$, 可得其离散小波变换公式为:

$$CWT(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{j,k}(t)dt$$

2.2 特征值获取

原始信号经小波变换后得到的各频段的信号, 若对其

进行特征提取, 首先需要选定表征特征的指标。

熵通常作为衡量对象混乱层次的指标, 其数值高低反映对象的混乱程度的大小。在工程应用中, 熵最早使用在热力学领域, 叫作热力学熵。后面逐渐提出了信息熵^[9]的概念。信息熵即熵的概念在信息学科的应用。Blanco 等将信息熵概念与小波变换结合^[10], 得出小波能谱熵的概念。小波能谱熵可以对非平稳信号在时域和频域内的复杂度较好地度量, 在信号分类、信号检测、图像处理中均得到了很好的应用效果。因此, 本系统选用小波能谱熵, 作为故障数据图像的特征值表征, 来进行图像的特征提取工作。

输入信号 S 经过小波分析后, 获取各频段信号的小波谱能量为 E_1, E_2, \dots, E_m , 小波谱能量用公式表示为:

$$E_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_j(i)|^2} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

式中, E_j 为小波谱能量; $x_j(i)$ 为每频段信号内样本点。根据小波分解特性, 各谱能量相加为输入信号 S 的总体小波谱能量, 即 $E = E_1 + E_2 + \dots + E_m, P_j = E_j/E$, 则 $\sum_{i=1}^m p_j =$

1。信号 S 的小波能谱熵 W 定义为 $W = -\sum_{i=1}^m p_j \log p_j$

由上述可知, 小波能谱熵反映了在 m 层小波分解下, 各频段能量分布情况。各频段谱能量大小相同时, 小波能量熵值最大。若其中一频段谱能量远远高于其它频段时, 小波能谱熵值最小。小波能谱熵能够较好地反映被测信号图像的空间能量信息, 在时频分析上较为精确的对飞行器测试的故障数据图像进行描述。

3 相似性度量

在对图像特征提取的实际应用过程中, 除非进行匹配的两幅图像完全一样, 否则极少有可能出现提取的特征向量, 完全一致的情况。在飞行器的实际测试中, 由于测试厂房环境、外部供电电源及测试设备、配套工装的情况不同, 及被测产品个体之间的差异性, 几乎不会存在测试数据波形完全相同的情况。因此, 在本故障诊断系统, 图像的特征值匹配比较模块, 需要采用相似性匹配的方法找出最为接近的历史数据图像。

相似性匹配法其原理是选取一个阈值, 当进行匹配的两幅图像之间的相似度比阈值小时, 说明匹配成功。该方法也可不用事先选取比较的阈值, 而是将输入图像与全部待匹配图像进行相似性度量, 并将获得的每个相似度从高到低进行排序。并按照使用方的设置需求输出相应数目最为接近的相似图像。

使用较为精准的图像相似度的度量方法, 得出结论与人的视觉判断结论应该是一致或相近的。系统的相似性匹配模块有未选用最为适宜的相似性度量法, 将直接决定整个飞行器故障诊断系统的检索效果的优劣。

结合实际使用情况, 使用小波变换及小波能谱熵表征的测试数据图像的特征值, 比较容易进行计算处理。选取

欧式距离法可以很好地对获取的特征值相似程度进行比较。欧式距离法也是目前大多系统常用的比较度量法。本系统采用欧式距离法, 对两幅待比较对象的特征值进行比较。

欧式距离的公式如下式所示:

$$L_2(A, B) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^2 \right)^{1/2}$$

欧式距离法作为常用的图像间的相似性度量, 具有计算相对简单、度量相对精准的特点。但是该方法并没有考虑图像不同特征的差别, 各特征的重要程度没有得到体现, 因此本系统采用加权欧式距离公式法实现图像比对。加权欧式距离公式如下式所示:

$$L_w(A, B) = \left(\sum_{i=1}^n \omega_i |a_i - b_i|^2 \right)^{1/2}$$

相较传统欧式距离法, 加权欧式距离法可通过对不同的特征向量, 依照其重要程度赋予不同的权重值, 可以更好地体现不同特征的差别, 具有更好地匹配效果。

4 数据库设计

本系统采用 SQL SERVER 数据库来存储飞行器历史测试的数据图像信息, 使用 LabVIEW 作为前台程序, 进行数据库中的数据信息的调用工作。对于数据库存储数据表设计, 由于将测试波形图数据直接保存到数据库中, 将导致数据库规模过大, 浪费空间, 而且存储时间过长。因此, 本系统直接把每幅历史图像的保存路径存储至数据库, 即将历史测试数据与数据库系统看作一个整体, 将其一并存储于同一个文件夹中。本数据库内仅保存历史各次测试数据的相对路径。如此可节省大量空间, 提升数据库中读取图像、计算处理的效率。系统使用 SQL SERVER 数据表来管理历史测试数据图像的保存路径及其对应的特征值。各历史数据图像的路径及对应的测试情况说明表的结构如表 2 所示, 各历史测试数据图像特征值表的结构如表 3 所示。

表 2 数据路径存储表结构

字段名	类型	说明
ID	整形	测试数据图像的编码(key word)
历史数据图像路径	文本	历史测试数据图像的保存地址
测试数据说明	文本	此次测试的时间日期、是否故障及对故障的定位、当时诊断的详细方法等

表 3 特征值存储表结构

字段名	类型	说明
ID	整形	测试数据图像编码(key word)
特征值	双精度型	测试数据波形图相应特征值

历史数据图像的特征值存储表与图像的数据路径存储表通过图像的编号一一对应, 数据库系统通过读取数据路径存储表中图像的存储路径, 调取相应的测试数据图像, 对其进行特征值提取后, 将获得的特征值存入特征值存储表。

5 系统实现

本飞行器故障诊断系统软件安装于飞行器测试设备中，并使用与飞行器综合测试软件相同的计算机语言 LabVIEW 编写。故障诊断软件与综合测试软件融合对接，以实现测试—诊断一体化平台的搭建。测试人员使用测试设备对飞行器进行综合测试时，若检测出故障，故障数据图像会自动进行保存，其存储路径会自动写入测试诊断数据库中，以供随后测试人员进行故障诊断时调用。本系统最终实现的软件界面如图 3 所示。

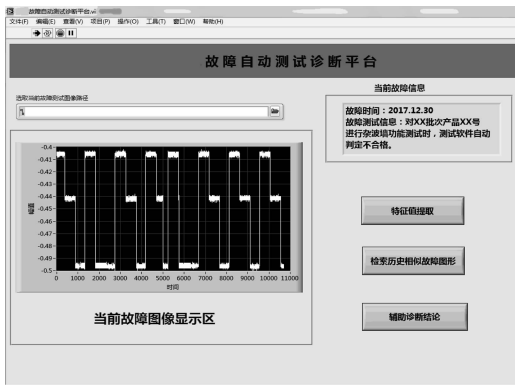


图 3 系统软件界面图

如图 3 所示，读取当前故障测试项数据图像路径后，故障图像显示在界面左边栏，数据库中对应对的该测试故障信息也显示在屏幕上，以供测试人员参照。点击特征值提取按钮，程序自动对当前测试故障图像进行特征提取操作。

使用小波变换法对故障图像进行特征提取，选取 DB6 (Daubechies 六阶) 正交小波作为母小波，对故障图像进行 7 层小波分解。使用 2.2 节的特征值获取方法，对分解下各频段的故障图像信息计算小波能谱熵作为图像的特征值。

点击检索历史相似故障图像，程序自动在历史测试故障数据库中，调用特征值存储表，获取相同测试项目历次存储的特征值。对当前测试图像与历史数据图像，使用第 3 节所述的加权欧式距离相似性测度法，分别计算其之间的相似度，并按相似度从高到底进行排序，从中搜索出最为接近的 4 幅历史数据图像。并通过调用数据路径存储表，读取其测试数据说明列，将 4 幅图像当时的具体处理信息包括：测试日期、故障描述、故障诊断、处理意见等，连同检索图像一起，均显示在界面上。

以某次飞行器总装测试某部件发生的故障图像（如图 4 所示）为例，将其与数据库中存储的历史图像进行比对检索，获取的 4 幅相似度最为接近的历史图像软件界面如图 5 所示。

本系统中各测试项目数据图像样式共 24 项，数据库中每项含样本数各 426 个（随测试次数更新增加），选用测试用例故障图每项各 10 幅，即 240 幅测试故障图，使用本系统进行相似图像检索并按相似性测度进行排序，由专业设

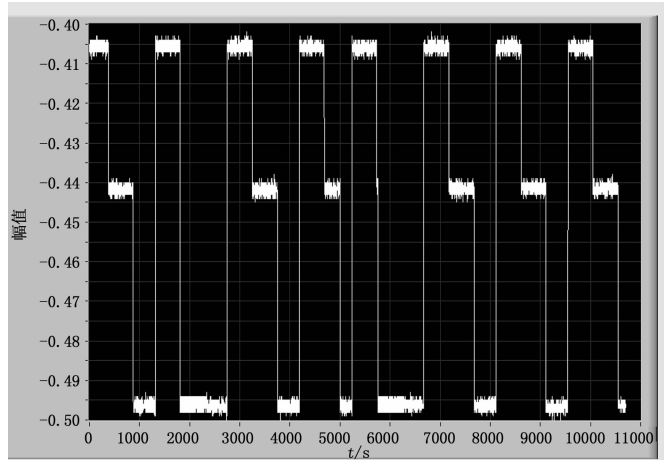


图 4 某部件发生的故障图像

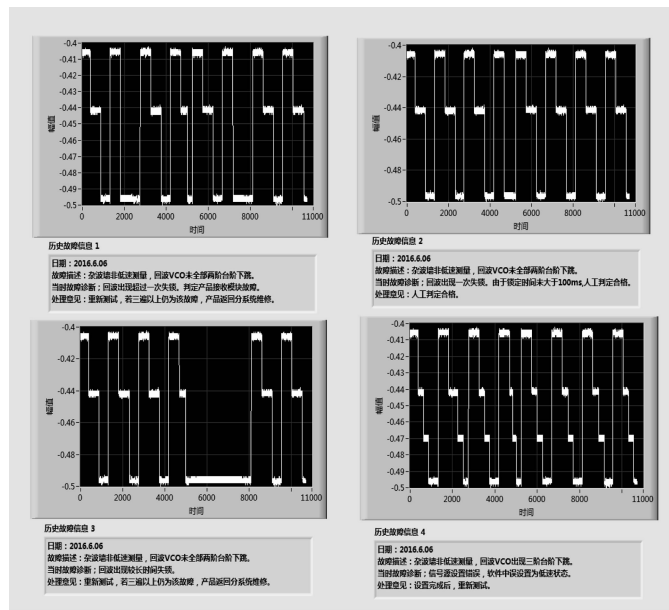


图 5 检索出最接近的历史测试故障图形及信息

计师对检索出来的相似图像进行判别评价，本系统判别准确度达 86.7%。且软件具备自动辅助诊断功能。对检索出来的图像特征值相似度进行比对排序，最终给出辅助诊断结论如图 6 所示。

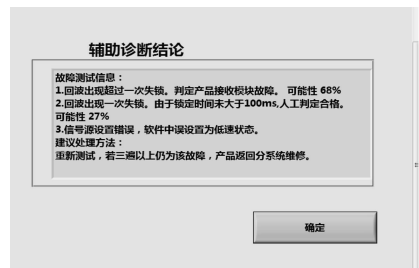


图 6 软件辅助诊断结论

6 结论

本文设计并实现了一种基于图像特征提取的飞行器故
(下转第 65 页)