FJ44型发动机状态监控与故障诊断

FJ44 Condition Monitoring and Fault Diagnosis

唐庆如　李一帆　杨晓强／中国民航飞行学院

导　读：以FJ44型发动机为研究对象，使用相似换算和十点平滑法绘制了发动机性能参数的状态趋势图，并据此编制了状态监控软件，并介绍了采用BP算法实现发动机故障诊断。

关键词：状态监控；相似换算；平滑处理；BP算法；故障诊断
Keywords：condition monitoring；similar conversion；smoothed process；BP algorithm；diagnosis

0 引 言

发动机状态监控和故障诊断是一个综合技术系统，通过从被测发动机的气动热力参数和机械性能参数中提取出的信息，实现发动机状态的识别，寻找发动机的故障，指出故障的原因、部位、程度和趋势，并编制相应的检查和维修计划。发动机状态监控和故障诊断是实现维修策略的变革，将定期维修过渡到视情维修的关键技术和必要手段，对保障飞行安全正点，提高飞机发动机的利用率，减少了燃油消耗、维修费用和备件数量，起到了重要作用。

FJ44型发动机是由威廉姆斯国际公司在巡航导弹发动机WR44的基础上改进而成的轻型公务机用双转子涡轮风扇发动机，额定推力1900磅。主要安装在“奖状”525型飞机上。由于某种原因，该发动机没有提供发动机状态趋势监控软件，无法利用现成的软件对其参数进行分析。因此，设计一套有助于维护FJ44发动机的状态监控及故障诊断软件，对发动机整体性能趋势的衰退进行监控就显得十分必要。

1 状态监控的实现

1.1数据采集

数据采集分为计算机自动采集和人工采集两种方式，由于该型飞机没有安装数据自动采集系统，因此只能采用人工记录的方式来收集数据。“奖状”飞机是两人制机组，为了不增加飞行员的负担，数据采集放弃了起飞阶段的记录而选择记录爬升和巡航阶段的数据，并制作了数据记录单以减轻飞行员记录数据时的工作量，也确保了所记录数据的规范化。主要采集的数据如表1所示。

表1　发动机状态监控主要参数表

发动机号	2119	2119	2119
日期	2009－4－19	2009－4－20	2009－4－20
飞行高度(ft)	12700	16700	15900
大气压力(mbar)	1013	1013	1013
大气温度(℃)	0	－6	－2
空速(Kn)	182	178	200
N1(%)	95.5	95.8	96.6
N2(%)	94.9	94.7	89.5
燃油流量(PPH)	620	580	460
ITT(℃)	730	730	690

1.2 数据的相似换算与平滑

1）数据的相似换算

一般发动机设计时取某大气条件作为设计状态，如取标准海平面大气条件作为设计状态，P_0=101325帕，T_0=288K。但是，发动机试车或进行压气机试验时，不可能正好处于这样的大气条件下。为判断发动机性能或压气机性能是否达到设计指标，需要将试验数据换算到标准大气条件下。

$$N_1^* = N_1 \cdot \sqrt{\frac{288.15}{T}}$$

$$N_2^* = N_2 \cdot \sqrt{\frac{288.15}{T}}$$

$$\mathrm{ITT}^* = \mathrm{ITT} \cdot \sqrt{\frac{288.15}{T}}$$

$$W^* = \frac{W}{P} \cdot \sqrt{T} \cdot \frac{101325}{\sqrt{288.15}}$$

其中，N_1^*为换算到标准大气条件下的低压转子转速，N_2^*为换算到标准大气条件下的高压转子转速，ITT*为换算到标准大气条件下的涡轮级间温度，W^*为换算到标准大气条件下的燃油流量，T为外界大气温度，P为外界大气压力。

2）数据的平滑

由换算值与基线值的偏差量绘制出的趋势图有时分散度较大，难以呈现出参数变化的趋势。为消除随机误差以及人为误差的影响，改进趋势图的可读性，绘制趋势图前应对实际偏差量进行

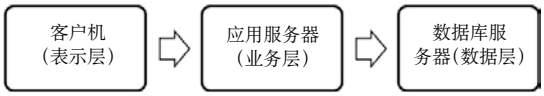

图1　FJ44远程状态监控基本架构示意图

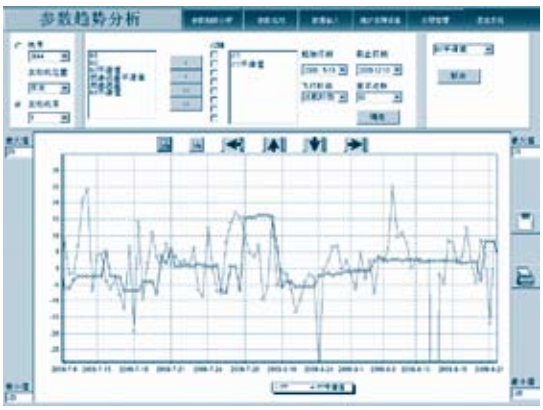

图2　FJ44型发动机参数趋势分析监控图

平滑处理。

统计平滑法是建立在数理统计基础上的一种平滑方法。该方法取某一性能参数未平滑偏差值的当前值及其之前的10个值进行平滑计算。

未平滑的偏差值记作△Y，平滑过的偏差值记作△Y_S。具体计算方法如下：

a) 取某一性能参数未平滑偏差值的当前值△Y_i及其之前的10个值构成时间数据序列，这些值呈正态分布。

b）计算数据序列的均值和标准差，计算公式为：

$$\overline{\Delta Y}=\frac{\Delta Y_{i-10}+\Delta Y_{i-9}+\cdots+\Delta Y_{i-1}}{10}$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{10}(\Delta Y_{i-t}-\overline{\Delta Y})^2}{10-1}}$$

c）由S和10查数理统计“t”分布表可获得置信水平为95%的置信区间，即

$$\left\{\overline{\Delta Y}-\frac{S}{\sqrt{10}}t_{0.025}(10-1),\overline{\Delta Y}+\frac{S}{\sqrt{10}}t_{0.025}(10-1)\right\}$$

d）分别将这十个值与上述计算所得置信区间比较，将不在置信区间内的未平滑偏差值从数据序列中去除。

e）对剩余的数据序列重复以上过程，直至所有未平滑偏差值均在置信区间内或仅剩小于等于3个点为止。

f）将当前值△Y_i与最终置信区间比较，若当前值△Y_i在最终置信区间内，则将当前值与最终均值进行算术平均，其算术平均值即为当前值的平滑值△Y_i；若当前值△Y_i不在最终置信区间内，则直接用当前值绘制趋势图，并在图中作标记以示区别。

经如此平滑处理，如果当前值由粗大误差而导致在置信区间以外，将不会影响其后续值的平滑计算。如果当前值的突变是由发动机突发故障所致，而且这种突变又连续出现了几次，则会使以后的值在置信区间内，这样便可看出突变趋势。

1.3 发动机状态监控软件的设计

Delphi是基于窗体和面向对象的方法，是高速的编译器，具有强大的数据库支持以及成熟的组件技术。Delphi提供了各种开发工具，包括集成环境、图像编辑，以及各种开发数据库的应用程序，适应于多种数据库结构。

基于以上特点，选用Delphi进行后台的数据处理、数据库服务器和Web端Activex控件的开发。本文采用delphi的medias服务器技术，图1所示为实现远程状态监控的基本架构示意图。图2为客户端对ITT未平滑和平滑后的趋势在一定时间内的监控图。

2 故障诊断

2.1故障样本的选取与预处理

选取FJ44发动机发生故障时的巡航性能参数N_2、ITT、FF作为故障样本，常见故障有起动发电机密封圈漏油、燃油流量传感器故障、电嘴烧蚀和磁传感器故障四类。分别将这四类故障定义为目标矩阵(1 0 0 0)，(0 1 0 0)，(0 0 1 0)，(0 0 0 1)。对故障样本进行相似换算，并对换算后的参数按下式进行归一化处理。

$$P=\frac{p_0-p_{\min}}{p_0-p_{\max}}$$

相似换算与归一化后的故障样本如表2所示。

表2　相似换算与归一化后的故障样本

故障类别	N_2	ITT	FF
起动机密封圈漏油	0.80256	0.76942	0.56833
	0.79934	0.67439	0.56833
	0.73356	0.58516	0.50133
	0.73356	0.69673	0.50133
燃油流量传感器故障	0.51014	0.34601	0
	0.52471	0.34601	0.06146
	0.02170	0	1
	0.81659	0.69673	0.59466
	0	0	0.96564
	1	0.92388	0.76632
电嘴烧蚀	0.45226	0.72594	0.37967
	0.49662	0.28881	0.30865
	0.92393	0.72711	0.65963
	0.98610	1	0.73684
	0.87327	0.68370	0.55514
	0.87327	0.62647	0.58955
	0.91854	0.69160	0.60193
	0.91078	0.63425	0.60193
	0.70373	0.41825	0.48433
	0.48362	0.29797	0.29411
	0.45944	0.31302	0.27461
	0.96426	0.64811	0.59049
磁传感器故障	0.62035	0.41780	0.47063
	0.56444	0.40394	0.50593
	0.59451	0.40394	0.50593

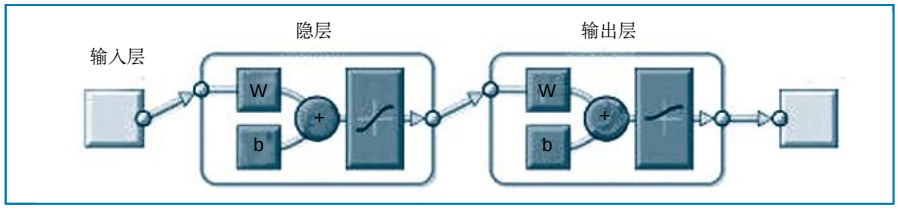

图3 BP算法神经网络结构图

p=

0.8026	0.7993	0.7356	0.8733	0.9108	0.9643	0.5247	0.8166	0.6203	0.5644
0.7694	0.6744	0.6967	0.6873	0.6342	0.6481	0.3460	0.6967	0.4178	0.4039
0.5683	0.5683	0.5013	0.5551	0.6019	0.5905	0.0615	0.5947	0.4706	0.5059

t=

1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

p_test=

0.7336	0.5852	0.5013
0.7336	0.5852	0.5013
0.5945	0.4039	0.5059

图4 输入训练样本、目标样本和测试样本

y=

0.9997	0.0198	0.0076
0.0000	0.9677	0.0123
0.0001	0.0000	0.0003
0.1975	0.0247	0.9877

图5 测试样本的故障诊断结果

2.2 故障诊断算法的建立

BP网络是一种多层前馈型神经网络，其神经元的传递是S型函数，输出量为0到1之间的连续量，它可以实现从输入到输出的任意非线性映射，权值的调整采用反向传播学习算法。BP算法神经网络结构图如图3所示。

选取隐层的传递函数为tansig函数，输出层传递函数为logsig函数。隐层的神经元个数设为7个。将矩阵P定为输入训练样本，矩阵T定为目标样本，P_{test}定为测试样本，如图4所示。

采用BP算法对输入训练样本进行训练，设置训练精度为0.01。经计算，训练在迭代22次后收敛。将测试样本代入程序，结果如图5所示。

由计算结果可知，测试矩阵P_{test}第1行(0.7336 0.5852 0.5013)所对应的结果(0.9997 0.0000 0.0001 0.1975)'与目标矩阵(1 0 0 0)'相似，即为起动机密封圈漏油。测试矩阵第2行(0.5847 0.3460 0.0615)所对应的结果(0.0198 0.9677 0.0000 0.0247)'与目标矩阵(0 1 0 0)'相似，为燃油流量传感器故障。测试矩阵第3行(0.5945 0.4039 0.5059)所对应的结果(0.0076 0.0123 0.0003 0.9877)'与目标矩阵(0 0 0 1)'相似，为磁传感器故障。

2.3故障诊断的实现

将故障诊断的BP算法利用labview与matlab的接口技术编成FJ44发动机故障诊断软件，其界面如图6所示。

在故障数据一栏输入发动机故障时的巡航性能数据，软件将自动对数据进行相似换算和归一化，再根据BP算法，以故障灯的形式显示故障类别。

3 总结

FJ44 发动机状态监控与故障诊断能够快捷地对未来的参数漂移进行较为准确的预测，并能根据巡航阶段的性能参数较为准确地判定发动机的故障类别。

本文通过编制基于BP算法的航空发动机的故障诊断软件，根据发动机历史故障信息建立故障样本，实现了以巡航阶段性能参数判断故障类别的功能。该方法能显著提高发动机故障诊断的准确性，缩短排故时间。AST

图6 FJ44发动机故障诊断界面

参考文献

[1] Diagnostics trend interpretation [M]. CFMI, 2006.

[2]Customer Training Center. CFM56-7B Training Manual: Basic Engine [M].France:Snecma.

[3]张德丰. MATLAB神经网络应用设计[M]. 机械工业出版社，2009.

[4]唐庆如. 航空发动机状态监控[J]. 中国民航飞行学院学报，2007.

作者简介：

唐庆如，教授，主要从事民航维修领域相关研究。

李一帆，硕士研究生，主要从事民用航空发动机状态监控与故障诊断相关研究。

杨晓强，讲师，主要从事民航安全管理相关研究。