

一种云环境下的发动机健康管理系统及其应用

周利敏, 闫国华, 瞿红春

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 针对航空公司对大量飞机发动机进行健康管理的需求, 通过建立发动机健康管理云端数据中心, 建立了一种云环境下的民航发动机健康管理系统, 该系统对于验证发动机故障诊断方法的有效性具有突出优势, 并且对于实现多种方法协同进行发动机故障诊断具有重要价值; 提出了一种基于灰色关联分析的灰色故障识别方法, 通过在云端平台使用灰色故障识别方法实现 JT9D-7R4 发动机的典型气路性能故障诊断为例, 表明云环境下的发动机健康管理系统可以有效地进行航空发动机故障诊断。

关键词: 云计算; 发动机健康管理系统; 故障诊断; 灰色关联分析

Engine Health Management System in Cloud and Its Applications

Zhou Limin, Yan Guohua, Qu Hongchun

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: For the demand of airlines to manage the health conditions of large number of aircraft engines, based on the establishment of engine health management cloud data center, a cloud-based civil engine health management system was established; The system is of outstanding advantages for verifying the validity of the engine fault diagnosis methods, and also of important value for realizing collaborative analysis with a variety of methods in engine fault diagnosis. Finally, a grey fault recognition method based on grey incidence analysis was proposed, by the example of using grey fault recognition method to implement the typical gas path performance fault diagnosis of JT9D-7R4 engines in the cloud platform, it indicated that the engine health management system in cloud is effective in the aero-engine fault diagnosis.

Keywords: cloud computing; engine health management system; fault diagnosis; grey incidence analysis

0 引言

随着航空公司运营的飞机数量增多, 实现快速高效地对飞机运行中的大量发动机性能数据进行分析, 从而掌握发动机部件性能的变化趋势, 对于部件的故障诊断和维修具有重要意义。以发动机气路部件为例, 发动机健康管理系统实时监控的性能参数数据是进行发动机气路性能故障预测和诊断的基础, 已有相关的故障诊断方法^[1-2], 但是均没有考虑到充分地应用已知的发动机故障类型以及当前机载发动机健康管理系统在数据存储容量方面的局限性。

云计算技术在大数据分析^[3]以及高性能计算^[4]方面具有突出的优势, 发展迅速, 在工业和信息等领域具有广泛的应用前景^[5]。因此本文以云环境下的发动机气路性能故障分析为例, 使用已知的发动机故障类型建立标准故障模式数据库, 并储存在云端数据中心, 飞机运行期间的发动机实时监控性能参数同步传输到云端数据中心, 在云端计算中心以使用灰色关联分析方法为例, 建立一种云环境下的发动机健康管理系统, 为云计算技术在航空领域的应用进行探究。

1 云环境下的发动机健康管理系统

发动机健康管理系统 (engine health management, EHM) 是现代航空发动机的重要组成部分, 国外先进的航空发动机大

部分都装有发动机健康管理系统, 有效地提高了发动机的总体性能, 降低了耗油量, 提高了发动机运行的可靠性, 相比于传统航空发动机, 具备更好的可维护性和保障性^[6]。对于发动机使用方制定视情维护计划, 以及延长发动机在翼时间和降低维护成本等起到了重要作用^[7], 对于航空公司来说, 维修成本的降低有助于提高飞机运营的经济效益。

对发动机运行过程中的性能参数进行实时监控和分析是发动机健康管理系统的的功能, 航空界对于飞机的安全性要求越来越高, 因此发动机健康管理系统的功能也更加完善, 但是对于发动机来说, 过于复杂的健康管理系统存在诸多弊端, 比如飞机结构重量增大等, 航空公司同时面临着管理大数据的问题, 云计算技术提供了一种可能的解决途径。

1.1 当前的发动机健康管理系统

目前国外的民用发动机健康管理系统发展迅速, 相应研究已有一定的成果, 并开始安装在民用飞机中进行工程试验, 美国 GE 公司的 GEnx 发动机和英国罗罗公司的 Trent900 发动机所安装的健康管理系统是现代发动机健康管理系统的典型代表, 其系统的物理结构由机载部分和地面部分共同组成^[8], 国内已有研究者对其进行了详细研究^[9], 该型号发动机健康管理系统的物理分布结构如图 1 所示。

1.2 云环境下的发动机健康管理系统

云计算技术对解决大数据分析问题具有突出的优势, 可以帮助大量需要处理大量数据的非 IT 企业减少信息管理及硬件设施维护等的费用。随着云计算技术的发展, 基于云计算平台的系统设计相关研究将逐渐增多, 国内基于云计算技术的应用系统设计在部分领域已经有研究者进行了探究^[10-11], 但在航空领域还没有相关研究, 基于航空公司对大量飞机运行数据管理的需求, 以航空发动机为例, 构建基于云计算平台的航空发

收稿日期:2014-05-15; 修回日期:2014-06-09。

基金项目:中央高校基本科研业务资助项目(SY1451)。

作者简介:周利敏(1988-),男,江西人,硕士研究生,主要从事模式识别与故障诊断方向的研究。

闫国华(1964-),男,教授,博士,主要从事发动机故障诊断、适航与维修方向的研究。

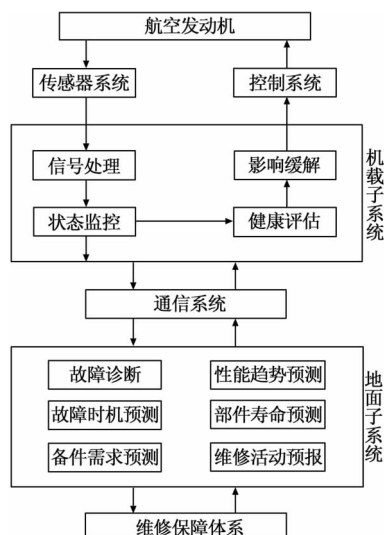


图 1 EHM 系统物理分布结构

动机健康管理系统具有重要意义, 不仅可以解决机载发动机健康管理系统储存数据的容量限制问题, 还能同步快速高效地对发动机的性能进行分析, 因此进行相关探究具有重要价值。

参考当前的航空发动机健康管理系统结构, 结合云计算技术的特点, 可建立云环境下的发动机健康管理系统, 如图 2 所示。

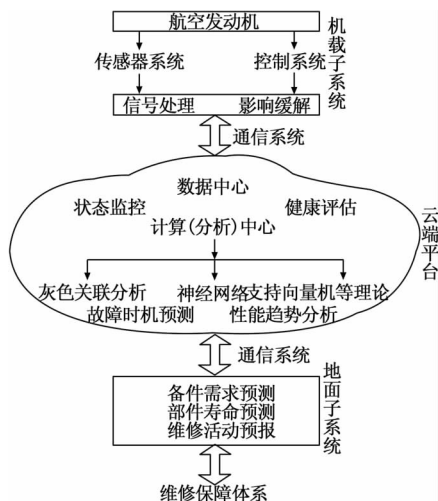


图 2 云环境下的 EHM 系统物理分布结构

相比于当前的发动机健康管理系统, 可以使机载子系统的结构更加简单, 重量降低, 对于飞机来说, 耗油率将降低; 此外, 云端平台可以使航空公司和维修部门对在翼飞机的整体健康情况进行管理, 得到飞机部件性能及寿命等相关的详细信息, 为飞机维护决策提供依据, 实现高水平的视情维修。同时, 很多在研究的航空发动机故障诊断算法将可以通过在云端平台下编程实现, 用于实际飞机运行中的故障分析和决策, 在工程实际中检验算法的有效性和可靠性, 当前的航空发动机管理系统无法实现这样的设想。

2 系统应用及实例分析

航空发动机是一种典型的灰色机械系统, 已有学者使用灰色理论对发动机进行故障预测和诊断^[12]。灰色关联分析作为

灰色理论中的经典决策方法, 其原理简单, 且易用计算机程序实现, 将基于灰色关联分析的算法在云计算环境下实现, 可以作为一种云环境下的发动机健康管理系统的故障分析基础方法, 并充分利用云计算在大数据分析中的优势, 同时可以快速验证灰色故障识别方法的有效性; 此外, 通过在云端平台同时使用支持向量机等理论对发动机性能数据进行实时协同分析, 将有助于提高发动机故障诊断的精确度。

2.1 灰色关联分析

灰色关联分析是分析灰色系统中的随机量的一种方法, 通常利用灰色关联度作为识别未知故障模式与标准故障模式的判别函数, 此方法的突出优点是对样本数量及其数据分布要求不高, 计算量较小, 同时可以得到较多的信息。

在作关联度分析之前, 必须建立参考模式 (标准故障模式), 并进行数据化而形成标准故障模式序列矩阵 $[X_i(k)]$, 具体形式如下:

$$[X_i(k)] = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1(1) & X_1(2) & \cdots & X_1(k) \\ X_2(1) & X_2(2) & \cdots & X_2(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_n(1) & X_n(2) & \cdots & X_n(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: n 为标准故障模式的个数, 在发动机故障诊断中取 $n \geq 3$; k 为标准故障模式所含模式向量的个数。

令 $[X_j(k)] = [X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(k)]$ 为待检故障模式序列, 其中, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$, m 为待检故障模式的个数; k 为待检故障模式所含模式向量的个数, 取值同前。

依据灰色关联分析的基本理论, 可得灰色关联分析方法的步骤如下:

1) 确定标准故障模式序列 $[X_i(k)]$, 待检故障模式序列 $[X_j(k)]$, 分别求序列的初值像, 有

$$X_i'(k) = X_i / x_i(1) = (x_i'(1), x_i'(2), \dots, x_i'(k)), \\ i = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$X_j'(k) = X_j / x_j(1) = (x_j'(1), x_j'(2), \dots, x_j'(k)), \\ j = 0, 1, 2, \dots, m$$

2) 求绝对差序列, 记

$$\Delta_i(k) = |X_j'(k) - X_i'(k)| \quad (2)$$

3) 利用灰色极差变换公式求得两极最大差和最小差, 即

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k), m = \min_i \min_k \Delta_i(k) \quad (3)$$

4) 求得待检故障模式序列 $[X_j]$ 与标准故障模式序列 $[X_i]$ 在第 k 点的关联系数, 其表达式为:

$$\epsilon_{ji}(k) = \frac{m + k_1 M}{\Delta_j(k) + k_1 M} \quad (4)$$

其中: k_1 为分辨系数, 本文取 $k_1 = 0.5$ 。

5) 令 γ_{ji} 为 $[X_j]$ 对 $[X_i]$ 的关联度, 最后求得 $[X_j]$ 对 $[X_i]$ 的关联度为:

$$\gamma_{ji} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \epsilon_{ji}(k) \quad (5)$$

不同的关联度表示标准故障模式与待检故障模式之间的相似度, 依据关联度的大小顺序可以对待检故障模式进行有效地识别。

结合航空发动机故障模式识别的要求以及当前民用航空发动机健康管理系统的技术水平, 以发动机性能参数向量 $[\Delta EGT, \Delta FF, \Delta N_2, \Delta N_1]$ 作为故障模式识别向量, 将标准故障模式数据库储存在云端的数据中心, 进而可实时调用发动机

健康管理系统的监控性能数据, 建立云环境下的发动机故障模式灰色识别方法, 其过程如图 3 所示。

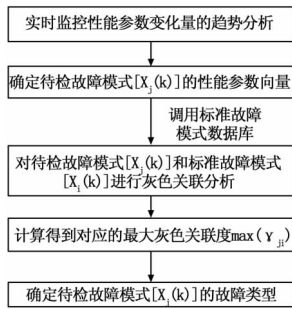


图 3 云环境下的灰色故障模式识别过程

2.2 应用实例

以 JT9D-7R4 发动机的典型气路性能故障为例, 检验上述故障模式识别方法的有效性。首先依据发动机厂商提供 JT9D-7R4 发动机的部分标准气路故障数据, 分别为涡轮间隙控制系统关闭、高压涡轮模块性能衰退、高压压气机模块性能衰退及低压压气机模块性能衰退等 4 种故障状态, 如表 1 所示, 建立相应的标准故障模式序列; 同时从某航空公司的机务维修部门调研得到相应故障模式的实测性能参数数据, 建立待检故障模式序列, 如表 2 所示。

表 1 JT9D-7R4 发动机标准气路故障参数

故障类型	ΔEGT	ΔFF	ΔN_2	ΔN_1
涡轮间隙控制系统关闭	14	1.5	-0.2	-0.2
高压涡轮模块性能衰退	22	2.5	-0.7	0.1
高压压气机模块性能衰退	13	1.4	1.0	0.1
低压压气机模块性能衰退	12	1.7	0.4	0.5

表 2 JT9D-7R4 发动机待检实测气路故障参数

故障类型	ΔEGT	ΔFF	ΔN_2	ΔN_1
涡轮间隙控制系统关闭	14.2	1.52	-0.2	-0.3
高压涡轮模块性能衰退	21.5	2.3	-0.65	0.12
高压压气机模块性能衰退	12.7	1.35	0.9	0.1
低压压气机模块性能衰退	11.8	1.65	0.38	0.49

在标准气路故障模式中, 令 $X_1 = \{\text{涡轮间隙控制系统关闭}\}$, $X_2 = \{\text{HPT 模块性能衰退}\}$, $X_3 = \{\text{HPC 模块性能衰退}\}$, $X_4 = \{\text{LPC 模块性能衰退}\}$; 在待检实测故障模式中, 令 $Y_1 = \{\text{涡轮间隙控制系统关闭}\}$, $Y_2 = \{\text{HPC 模块性能衰退}\}$, $Y_3 = \{\text{LPC 模块性能衰退}\}$, $Y_4 = \{\text{HPT 模块性能衰退}\}$ 。通过使用基于灰色关联分析的故障模式识别方法进行分析, 计算结果见表 3。由表 3 可知, X_1 与 Y_1 的灰色关联度最

表 3 灰色关联度计算结果

灰色关联度	X_1	X_2	X_3	X_4
Y_1	0.965 7	0.808 1	0.732 9	0.619 4
Y_2	0.764 6	0.786 9	0.966 1	0.693 2
Y_3	0.566 8	0.586 8	0.600 6	0.976 8
Y_4	0.874 3	0.960 4	0.820 6	0.665 5

大, 即待检故障模式 Y_1 的最可能故障模式为涡轮间隙控制系统关闭。维修人员可据此首先检查 TCC, 若 TCC 正常, 则再

进一步分析其它可能的故障原因。结合实测故障类型可知其与计算结论相符, 即待检故障模式 Y_1 为涡轮间隙控制系统关闭。 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 所表现出的故障现象的诊断方法同上, 实测故障类型与计算结论均相符。计算结果表明, 相同故障模式之间的灰色关联度总体上明显较大, 可以有效地对相应故障进行诊断。

通过以上分析, 可以看出对于常见的航空发动机气路性能故障, 使用灰色故障识别方法可以得到较好的故障诊断结果, 可以作为云环境下的发动机健康管理系统中的一种故障分析基础方法; 同时从中可以发现基于云计算技术在大数据分析中的优势, 如果在云端平台同时采用多种基础方法对发动机性能数据进行协同分析, 将可以提高发动机故障预测和诊断的精确度, 随着云计算技术的进一步发展, 云环境下的发动机健康管理系统可能将成为发动机健康管理系统的方向。

3 结论

基于云计算技术的突出优点, 提出了基于云计算技术的航空发动机健康管理理念, 并建立了一种云环境下的发动机健康管理模型; 同时为证明云环境下的发动机健康管理对于实现多种方法协同分析发动机故障类型的重要价值, 以 JT9D-7R4 发动机的典型气路性能故障为例验证了云环境下的灰色故障识别方法的有效性。考虑到云计算技术在工业和信息业等领域的重要应用价值, 为国内研究航空发动机健康管理提供一种新思路, 具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Lee Y K, Mavris D N, Volovoi V V, et al. A fault diagnosis method for industrial gas turbines using Bayesian data analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2010, 132 (4): 1-6.
- [2] Simon D L, Armstrong J B. An Integrated approach for aircraft engine performance estimation and fault diagnostics [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135 (7): 1-10.
- [3] 孟小峰, 慈 祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50 (1): 146-169.
- [4] Mauch V, Kunze M, Hillenbrand M. High performance cloud computing [J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29 (6): 1408-1416.
- [5] 龚 强. 云计算应用展望与思考 [J]. 信息技术, 2013 (1): 1-4.
- [6] 姜彩虹, 孙志岩, 王 曦. 航空发动机预测健康管理系统的的核心技术 [J]. 航空动力学报, 2009, 24 (11): 2589-2593.
- [7] Holtz C, Smith G, Friend R. Modernizing systems through data integration: a vision for EHM in the United States Air Force [A]. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit [C]. Florida: AIAA, 2004: 40-49.
- [8] 韩建军, 张 华, 张 瑞, 等. 航空发动机健康管理系统的技术与标准发展综述 [J]. 航空标准化与质量, 2013 (3): 5-8.
- [9] 王 施, 王荣桥, 陈志英, 等. 航空发动机健康管理综述 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22 (1): 51-58.
- [10] 郭夫兵. 基于云计算技术的新一代 GPS 卫星定位系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3370-3372.
- [11] 李嘉斌, 陈华根. 基于云计算的地学云系统设计 [J]. 计算机工程与科学, 2011, 33 (6): 108-113.
- [12] 杨 帆, 张玉杰, 张彩丽. 发动机运行状态的主分量灰色诊断模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 9-13.