

基于综合关联度分析的风机故障诊断

扶名福 谢明祥 饶 泓 杨国泰
南昌大学,南昌,330031

摘要:在分析了灰色关联分析的基本理论和方法的基础上,考虑到故障诊断中模式的各特征参数的随机性和模糊性引起的模式间“相似性”的形状变异和“相近性”的距离差别,引进了相似系数,将关联度和相似系数联合形成综合关联度,提出了综合关联度分析诊断法,并将该方法用于风机的故障诊断。实例表明,将综合关联度分析法引入风机故障诊断中是可行的,且具有方法简单、计算量小、识别可靠等特点。

关键词:故障诊断;灰色关联分析;相似系数;综合关联度

中图分类号:TP391.5 **文章编号:**1004—132X(2007)20—2403—03

Fault Diagnosis of Suction Fan Based on the Synthetically Relational Analysis

Fu Mingfu Xie Mingxiang Rao Hong Yang Guotai
Nanchang University, Nanchang, 330031

Abstract: Based on the theory and method of gray relational analysis, the similar coefficient was introduced to reduce the influent of relational degree affected by the maximum value or the minimum value in data and relational coefficient. The suction fan faults were diagnosed according to the synthetical relational degree composed by the relational degree and the similar coefficient. It is indicated that the method is available for the fault diagnosis of suction fan and has the characteristics of simplicity, low computation and high reliability.

Key words: fault diagnosis; gray relational analysis; similar coefficient; synthetically relational degree

0 引言

灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授于 20 世纪 80 年代创立的一种新理论,它包括灰色预测、灰色关联度分析、灰色聚类 and 灰色决策等内容^[1-3]。灰色系统理论认为,客观世界是信息的世界,把未知的不确定的信息称为黑色信息,已知的确定的信息称为白色信息,既含有未知信息又含有已知信息的系统称为灰色系统。在机械设备运行过程中,机械故障与故障征兆之间并不是一一对应的关系,没有确定的映射关系,因此可将一台运行的机械设备看作是一个复杂的灰色系统。到目前为止,对机械故障的诊断和识别应用最广泛的是灰色关联度分析法^[4]。本文利用灰色关联度,结合相似系数,提出了一种基于综合灰色关联度的风机故障诊断方法。

1 灰色关联度分析法

灰色关联是指事物间的不确定关联^[5]。灰色关联度是灰色系统分析和处理随机量的一种方法,代表了不同研究对象(灰色因数)之间的关联程度,是一种数据到数据的“映射”。

根据文献[6-8],设 $\mathbf{X}_i = \{X_i(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ 为第 i 个标准模式向量(参考系列), $\mathbf{Y}_j = \{Y_j(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ 为第 j 个待检模式向量(比较系列),则数列 $\{X_i(k)\}$ 和 $\{Y_j(k)\}$ 在时刻 k 的关联度定义为

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (1)$$
$$\Delta_{ij}(k) = |X_i(k) - Y_j(k)|$$

式中, Δ_{\max} 为 $\Delta_{ij}(k)$ 的最大值; Δ_{\min} 为 $\Delta_{ij}(k)$ 的最小值; ρ 为分辨率系数,一般取 $\rho = 0.50$ 。

由式(1)可求出待检模式与标准模式的关联度,通过关联度指标的大小可判断待检模式与所有标准模式之间的关联程度,根据关联度的最大原则,可判断出各待检状态属哪类故障的可能性最大。由式(1)可以看出,关联度受 Δ_{\min} 、 Δ_{\max} 的影响较大,一旦数据在某个时刻出现极大值或者极小值时,关联度就会受到影响,同时,分辨率系数 ρ 也会影响关联度的大小,最终影响关联度指标,从而影响诊断精度。

在模糊聚类系统中,为了确定各检测数据之间的亲疏关系,给检测数据中每两组数据都赋以一相似系数 u_{ij} 。相似系数 u_{ij} 可以按实际情况不同采用不同的方法计算。这里采用相关系数法计算相似系数 u_{ij} ,公式如下^[9]:

$$u_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n |X_i(k) - \overline{X}_i| |Y_j(k) - \overline{Y}_j|}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_i(k) - \overline{X}_i)^2 \sum_{k=1}^n (Y_j(k) - \overline{Y}_j)^2}} \quad (2)$$
$$\overline{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k) \quad \overline{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_j(k)$$

关联度反映模式之间的相似性,它描述事物随时间发展的函数曲线之间的关联程度,函数曲线的几何形状越相似,则事物发展趋势越接近,其关联度也越大。相似系数反映模式之间的相近性,也就是事物间的距离的差别,距离越近,相似系数越大。由于故障中各模式的特征参数通常同时具有随机性和模糊性,既会造成“相似性”的形状变异,又会造成“相近性”的距离差别,为了能精确地描述模式之间的关联度,将相似系数 u_{ij} 与关联度 r_{ij} 综合起来组成综合关联度 z_{ij} ,其定义为

$$z_{ij} = \alpha r_{ij} + \beta u_{ij} \quad (3)$$

其中, α 、 β 为权值系数,反映了关联度与相似系数的重要程度,同时 α 、 β 的取值也可改变 Δ_{\min} 、 Δ_{\max} 和 ρ 的影响程度,并有 $\alpha + \beta = 1$ 。

由式(3)可知,综合关联度 z_{ij} 越大,则待检模式与标准模式越相似。

2 风机故障诊断灰色关联模型的建立

假设有 m 个典型故障,每种典型故障可以由几个特征参数构成一个特征向量,由这 m 个特征向量可构成一个标准故障的特征矩阵。同样,假设有 p 组待检数据,同理也可构成一个待检数据特征矩阵。

所谓灰色故障模式识别,就是在灰色诊断中

利用关联度分析来进行故障模式识别。假设第 r 个待检模式向量为 \mathbf{Y}_{jr} ,它与标准模式向量之间分别进行关联度和相似系数计算,最后得出综合关联度系列 $\{z_{1r}, z_{2r}, \cdots, z_{mr}\}$,把综合关联度按由大到小顺序排列,求得最大综合关联度,设为 z_{qr} ,其中 $q = 1, 2, \cdots, m$,根据综合关联度最大原则,则待检模式 r 属于标准模式 q 类的故障类型。

3 实例分析

以国内某著名汽车厂离心式风机为例,采集常见故障类型风机的振动信号。由于故障的发生常表现为一定的频谱分布特点,故将频率范围划分为几个特征频率段。以旋转频率 f 的倍数考虑,可将故障频率分为低于1倍频部分和1倍频、2倍频、3倍频及高频部分。通常,低于1倍频的频率部分主要反映非线性振动部分,如转子与定子摩擦产生的振动、转子上紧固件松动产生的振动、油膜涡动等;1倍频频率部分是振动中的主要成分,反映转子不平衡状态;2倍频频率部分反映转子不对中状态,同时对轴裂纹、轴结构不对称等情况也比较敏感;3倍频频率部分反映轴松动、轴裂纹等情况。将振动信号频谱中9个频段上的不同频率的谱峰能量归一化处理的矢量值作为特征量建立标准模式,如表1(其中 f 为工频)所示。同时,采集到该厂风机发生故障时的振动信号,并将其频谱中的9个频段上的不同频率的谱峰能量值归一化处理,得到表2(其中 f 为工频)。按式(1)计算,得到关联度 r_{ij} ,见表3。按式(3)计算,得到综合关联度 z_{ij} ,见表4。

表 1 风机标准模式

标准模式	频 率								
	$(0.01 \sim 0.39)f$	$(0.40 \sim 0.49)f$	$0.50f$	$(0.51 \sim 0.99)f$	f	$2f$	$(3 \sim 5)f$	f 的奇数倍	大于 $5f$ 的高倍频
不平衡	0	0	0	0	0.90	0.05	0.05	0	0
不对中	0	0	0	0	0.40	0.50	0.10	0	0
油膜涡动	0.10	0.80	0	0.10	0	0	0	0	0
转子径向摩擦	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
共生松动故障	0	0	0	0	0.20	0.15	0.40	0	0.25
喘振	0	0.30	0.10	0.60	0	0	0	0	0
轴承座松动	0.90	0	0	0	0	0	0	0	0.10
不等轴承刚度	0	0	0	0	0	0.80	0.20	0	0

表 2 4种待检模式

待检模式	频 率								
	$(0.01 \sim 0.39)f$	$(0.40 \sim 0.49)f$	$0.50f$	$(0.51 \sim 0.99)f$	f	$2f$	$(3 \sim 5)f$	f 的奇数倍	大于 $5f$ 的高倍频
待检模式 1	0.031 447	0.028 436	0.023 407	0.034 984	0.729 662	0.081 492	0.035 677	0.028 241	0.006 654
待检模式 2	0.030 624	0.021 195	0.002 210	0.032 965	0.733 688	0.079 666	0.034 323	0.034 323	0.031 006
待检模式 3	0.015 114	0.001 634	0.008 497	0.020 425	0.282 680	0.491 013	0.155 310	0.012 255	0.013 072
待检模式 4	0.017 825	0.012 543	0.008 576	0.013 281	0.022 972	0.023 846	0.881 385	0.005 894	0.013 678

表 3 待检模式与标准模式的关联度

待检模式	标准模式							
	不平衡	不对中	油膜涡动	转子径向摩擦	共生松动故障	喘振	轴承座松动	不等轴承刚度
待检模式 1	0. 934 986	0. 859 399	0. 801 598	0. 835 265	0. 810 363	0. 777 901	0. 795 044	0. 805 995
待检模式 2	0. 926 569	0. 850 442	0. 791 351	0. 825 995	0. 810 397	0. 759 166	0. 797 938	0. 797 905
待检模式 3	0. 844 958	0. 949 046	0. 758 226	0. 809 820	0. 844 570	0. 736 081	0. 768 997	0. 887 468
待检模式 4	0. 840 780	0. 813 256	0. 811 601	0. 780 197	0. 843 626	0. 789 696	0. 823 443	0. 849 847

表 4 待检模式与标准模式的综合关联度

待检模式	标准模式							
	不平衡	不对中	油膜涡动	转子径向摩擦	共生松动故障	喘振	轴承座松动	不等轴承刚度
待检模式 1	0. 966 565	0. 768 658	0. 574 664	0. 915 790	0. 656 252	0. 599 611	0. 560 757	0. 556 914
待检模式 2	0. 962 219	0. 764 661	0. 573 289	0. 911 129	0. 655 059	0. 588 999	0. 564 624	0. 553 786
待检模式 3	0. 702 214	0. 964 378	0. 625 275	0. 695 820	0. 698 957	0. 655 758	0. 613 754	0. 923 467
待检模式 4	0. 557 522	0. 554 211	0. 578 417	0. 545 675	0. 865 753	0. 607 767	0. 574 983	0. 590 799

由表 3 和表 4(黑体数字)可以看出:待检模式 1、待检模式 2、待检模式 3 分别属于不平衡、不平衡、不对中故障类型;由关联度判定待检模式 4 属于不等轴承刚度故障类型,这与实际不相符,而由综合关联度判定待检模式 4 属于共生松动故障类型,这与实际相符。可以看出,综合关联度提高了故障诊断精度。

4 结 论

本文在灰色关联度的基础上,引进了模糊聚类系统中的相似系数来弥补灰色关联度计算中的不足,提出了综合关联度,并将其应用于风机故障实例,提出了基于综合关联度分析的风机故障诊断模型。实例证明,该方法简单、计算量小、诊断准确性高。

参考文献:

[1] 贺晓,刘景宁,李淑霞. 基于灰色关联理论的案例推理在故障智能诊断系统中的应用[J]. 中国机械工程,2004,15(22):2022-2026.

[2] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1987.

[3] Zhang Laibin, Wang Zhaohui, Zhao Shangxin. Short-term Fault Prediction of Mechanical Rotating Parts on the Basis of Fuzzy-grey Optimizing Method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 4:1-10.

[4] 李尔国,俞金寿. 基于灰色关联度分析法的压缩机故障诊断研究[J]. 上海海运学院学报,2001,22(3):294-297.

[5] Liu Gousheng, Yu Jianguo. Gray Correlation Analysis and Prediction Models of Living Refuse Generation in Shanghai City[J]. Waste Management, 2006, 19:1-7.

[6] Zhu Chihui, Li NianPing, Re Di, et al. Uncertainty in Indoor Air Quality and Grey System Method[J]. Building and Environment, 2007, 42(4):1711-1717.

[7] Chian Ko Tag, Chang Fu Ping, Tsai Te Chang. Optimum Design Parameters of Pin-fin Heat Sink Using the Grey-fuzzy Logic Based on the Orthogonal Arrays [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33:744-752.

[8] Chan J W K, Tong T K L. Multi-criteria Material Selections and End-of-life Product Strategy: Grey Relational Analysis Approach [J]. Materials and Desing, 2007, 28(5):1539-1546.

[9] 温熙森,胡莒庆,邱静. 模式识别与状态监控[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社,1998.

(编辑 郭 伟)

作者简介:扶名福,男,1953 年生。南昌大学机电工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为力学及材料工程。发表论文 70 余篇。谢明祥,男,1982 年生。南昌大学机电工程学院硕士研究生。饶 泓,女,1973 年生。南昌大学计算中心副教授。杨国泰,男,1936 年生。南昌大学机电工程学院教授、博士研究生导师。