

文章编号: 1000-8055(2010)10-2302-05

基于分形理论的航空发动机推力性能衰退规律

于锦禄¹, 何立明¹, 孙冬¹, 李天亮¹, 孙晓东²

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038;

2. 中国人民解放军 94333 部队, 潍坊 261051)

摘 要: 考虑到航空发动机本身及影响因素的复杂性, 从研究复杂系统的角度出发建立了基于 De Wijs 分形理论的航空发动机推力衰退模型, 在此基础上对航空发动机的推力性能衰退规律进行了分析和研究. 研究发现航空发动机使用过程中全加力状态推力的衰变具有生物体寿命衰退特征, 并在一定程度上可用维数为 0.761 的 De Wijs 分形曲线近似.

关 键 词: 航空发动机; 性能衰退; 推力; 分形曲线; 健康指数

中图分类号: V231

文献标识码: A

Investigation of aero-engine thrust performance deterioration rules based on fractal theory

YU Jin lu¹, HE Li ming¹, SUN Dong¹, LI Tian liang¹, SUN Xiao dong²

(1. The Engineering Institute,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 94333, The Chinese People's Liberation Army, Weifang 261051, China)

Abstract: Considering the complexity of aero-engine and influential factors, a deterioration model for engine thrust degradation was established with De Wijs fractal theory from the perspective of complex system. Aero-engine thrust deterioration rules was analyzed and investigated based on this model. It is found that the thrust deterioration in full afterburning condition is characterized by aging of organism, and can be modeled by the De Wijs fractal curve with fractal dimension of 0.761 to some extent.

Key words: aero-engine; performance deterioration; thrust; fractal curve; health index

航空发动机结构复杂, 子系统多, 各子系统不仅结构和功能迥异, 而且相互之间存在非常复杂的耦合关系, 此外, 在使用过程中导致发动机性能衰退的影响因素众多、机理复杂多样, 传统的基于信号处理以及基于模型的诊断方法在面对这类复杂机械系统时, 显得有些困难. 另一方面, 从时间演化角度看, 可将航空发动机系统视为复杂的非线性动力系统, 对其状态及性能的长期预测, 存在“初始条件敏感性”和“随机不确定性”, 具体讲, 同

一批次的发动机在出厂时由于每一台发动机的装配容差、部件质量差异等原因, 其性能已存在差异, 进入外场使用后, 由于各地的地理条件、使用维护水平的不同, 发动机工作一段时间后其性能和状态会存在较大的差异. 此外, 航空发动机各部件的衰退形式和机理迥异, 不同的使用环境对其性能衰退速度和程度的影响也各不相同, 因此, 系统深入地掌握发动机性能衰退的机理、准确地诊断发动机性能衰退故障部件及其衰退程度是保证

航空发动机安全、高效运行的关键。

分形理论是一门新理论、新学科,是现代数学的一个新分支,它以复杂系统为研究对象,其哲学基础是系统局部在一定条件下或过程中,在某一方面(形态、结构、信息、功能、时间、能力等)表现出与系统或整体的相似性。

把分形理论应用于机械故障诊断及状态监测领域,是近年来国际学术界的新动向。王洪等^[1]在对齿轮故障诊断的研究中指出关联维数对系统吸引子的不均匀性反应敏感,能够很好地反映吸引子的不均匀性;石博强、申炎华^[2]系统研究了分形理论及其在机械故障诊断中应用;李舜酩等^[3]采用分形理论对裂纹转子振动的特性分析后指出,裂纹转子的振动信号具有两个分形维数,实际裂纹转子振动信号是多重分形信号;余波、何田等^[4,5]采用关联维数和 Kolmogorov 熵理论对发动机进行了故障诊断;文献[6]则采用分形理论对发动机早期故障诊断进行了建模研究;而李俊涛等^[7]则将耗散结构理论引入系统性能的变化分析,其研究成果表明了分形等非线性理论在航空发动机性能变化研究中的重要意义。

1 De Wijs 分形模型

De Wijs 是地质学家,他在研究岩石中的矿物分布时发现,矿物分布可用下述模型近似^[8]:“把一块岩石中某种矿物的总质量记作 M ,若把此岩石均分为两半,每块岩石分别含有 aM 和 $(1-a)M$ 的矿物。进一步将两块岩石再各自均分两半,则岩石被均分为四块,在这四块岩石中含有的矿物质量分别为 a^2M , $a(1-a)M$, $(1-a)aM$ 和 $(1-a)^2M$ 。”即每一块矿石分为两份后,矿物被分为 aM 和 $(1-a)M$ 两部分,若 $a=0.5$,则易于理解和接受,且过程毫无复杂性可言。但是,De Wijs 通过大量的试验和研究发现,“矿物的分布虽然是均匀的,但实际上分割比率不是 0.5,而是不依赖分割次数的一个定值。”

De Wijs 分形理论的数学描述为:将集合 $s=[0,1]$ 均分为 2,每个闭区间长度为 2^{-1} ,在 $[0, \frac{1}{2}]$ 上的质量为 aM ,在 $[\frac{1}{2}, 1]$ 上为 $(1-a)M$;将此二区间再分成二等分,并且在 $[0, \frac{1}{4}]$ 上为 a^2M ,在 $[\frac{1}{4}, \frac{1}{2}]$ 上为 $a(1-a)M$,在 $[\frac{1}{2}, \frac{3}{4}]$ 上为 $(1-a)aM$,在 $[\frac{3}{4}, 1]$ 上为 $(1-a)^2M$,将上述操作继续下去则有

$$\begin{aligned} \rho_0 &= M, & x \in [0, 1] \\ \rho &= \begin{cases} aM, & x \in [0, 1/2] \\ (1-a), & x \in [1/2, 1] \end{cases} \\ \rho &= \begin{cases} a^2M, & x \in [0, 1/4] \\ (1-a)aM, & x \in [1/4, 1/2] \\ a(1-a)M, & x \in [1/2, 3/4] \\ (1-a)^2M, & x \in [3/4, 1] \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

$$\vdots$$

De Wijs 分形维数可表示为

$$D = -[a \log_2 a + (1-a) \log_2 (1-a)]$$

显然, $D(a) = D(1-a)$, 当 $a=0$ 或 $a=1$ 时, $D=0$, 仅当矿物质量比率 $a=0.5$ 时 $D=1$, 否则, $D<1$ 。

若设岩石所含矿物的总质量为 1, 对分割后所有岩石块中分布的矿物求和, 记为 $M(t)$, 则

$$M(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \rho(x) = \int_0^1 \rho(x) dx, \quad t \in [0, 1]$$

$$\tag{2}$$

式中 $\rho(x)$ 表示分割后岩石块所含矿物的密度, 结果如图 1 所示, 图中四条曲线对应的分割比率分别为 0.1, 0.22, 0.8 和 0.9 (分割比率实际上是 De Wijs 分形的标度指数^[9]), 对应的分形维数分别是 0.469, 0.761, 0.722, 0.469。

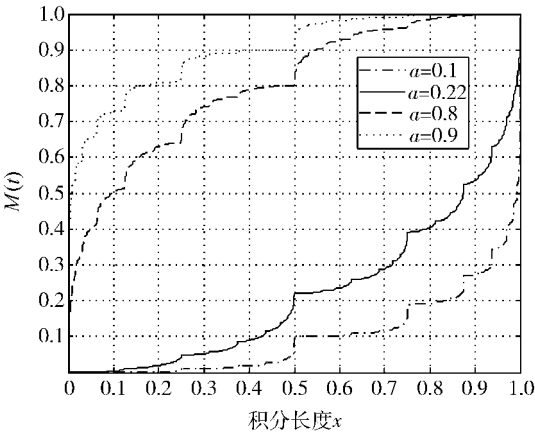


图 1 不同标度指数下矿物积分曲线
Fig.1 Mineral integral curve of different scaling exponents

由图 1 看上去矿物的分布好像分别集中在对应分割小片的某一点上, 进一步研究可知, 曲线 $M(t)$ 处处连续, 而且在几乎所有点处曲线的切线均存在且平行于横轴, 即导数值均为零, 这就好像函数 $M(x)$ 是常数, 这种奇妙的函数称为 Lebes-

gue 异常函数, 也就是说 De Wijs 分形积分曲线实质上是 Lebesgue 异常函数.

2 基于 De Wijs 分形的发动机推力衰退研究

显然, 如果将系统(包括生命系统和一般的机械系统)日复一日的性能消耗比喻为分割后隐含在每个岩块中的矿物质量, 则分割后矿物的积分就可视为系统生命及性能消耗的累积, 而生物体的生命衰退曲线和分割比率 $a < 0.5$ 的积分曲线 $M(t)$ 变化是吻合的. 基于这些相似之处, 采用 De Wijs 分形对发动机的推力性能衰退规律进行研究, 为表示发动机的性能随使用时间的衰退, 设计如下 Lebesgue 异常函数 $L(t)$:

$$L(t) = 1 - M(t) = 1 - \int_0^t \Omega_b(x) dx \quad (2)$$

为方便起见, 本文称此 Lebesgue 异常函数 $L(t)$ 为 De Wijs 分形推力衰退模型, 式(2)中, 发动机推力性能随使用时间的变化为 $L(t)$, 设系统推力性能最大为 1, 发动机寿命为 $[0, 1]$, 显然, $L(0) = 1, L(1) = 0$, 图 2 为分形维数为 0.761 的 De Wijs 分形推力衰退模型曲线 $L(t)$ (对应标度指数为 0.22). 标度指数为 0.22 时, 模型曲线与推力衰退规律变化较为一致, 所以本文选取得标度指数为 0.22.

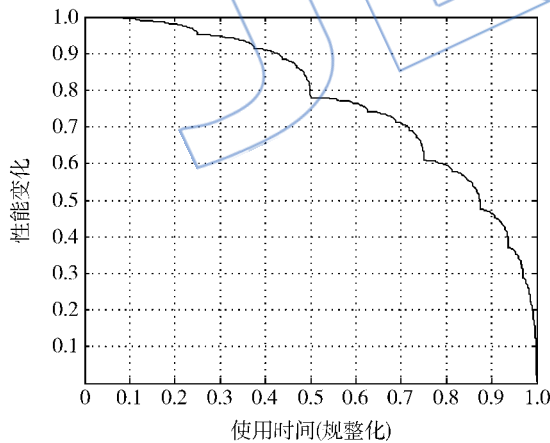


图 2 De Wijs 分形推力衰退模型曲线
(分形维数 $D = 0.761$)

Fig. 2 De Wijs fractal thrust degradation model curve
(fractal dimension $D = 0.761$)

图 3 为某型发动机 600h 的使用过程中全加力状态换算推力的变化^[10].

由图 3 可以看出, 发动机在前 240h 的使用阶段中, 以及在 340~500h 使用阶段, 发动机推力

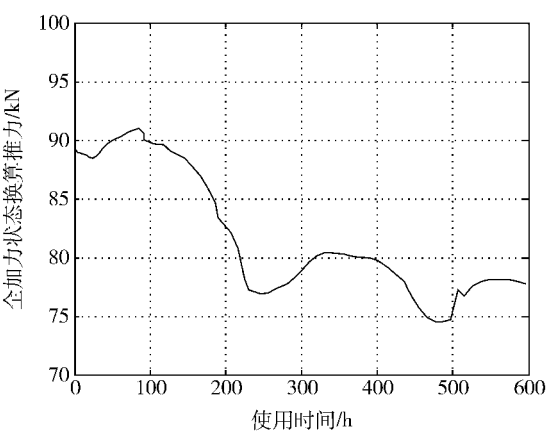


图 3 使用过程中全加力状态换算推力变化

Fig. 3 Conversion thrust varying of full afterburning condition in using process

衰退较快, 且推力数据的衰退趋势与本文所设计的 De Wijs 分形推力衰退模型曲线相似. 为采用 De Wijs 分形推力衰退模型 $L(t)$ 研究发动机推力的衰退规律, 将发动机在前 240h 及 340~500h 使用阶段的推力进行规整化处理

$$x_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3)$$

式中 x 表示全加力状态推力的时间序列, $\max$ 和 $\min$ 分别表示推力的最大、最小值.

图 4、图 5 分别给出了使用过程中前 186, 190, 220h 及前 224h 发动机规整化推力衰变曲线和本文设计的分形维数为 0.761 的 De Wijs 分形推力衰退模型曲线. 由图 4、图 5 的分析可知, 除在发动机前 60h 左右的使用时间内, 推力性能波动较大外, 此后从 60h 到前 240h 左右的使用周期内全加力状态的推力衰退变化和 De Wijs 分形推力衰退模型曲线下趋势拟合很好.

图 6 给出的是发动机在 340~500h 时的推力衰变曲线与 De Wijs 分形推力衰退模型曲线. 由图 6 可以看出, 340~500h 阶段推力的衰退变化与 De Wijs 分形推力衰退模型曲线的拟合可以分为两部分, 在 340~460h 阶段, 两者衰退趋势高度一致, 而在 460~500h 阶段, 发动机推力的衰退趋势加快.

此外, 在发动机使用的过程中前 200h 的时间内, 未对发动机进行大的维护工作, 即发动机此阶段内的性能衰退可认为是正常使用条件下的自然衰退. 而在使用至 200h 左右时, 由于发动机的性能衰退较为严重, 故对发动机进行了清洗等维护工作, 性能有所恢复, 但经过一段时间后, 推力

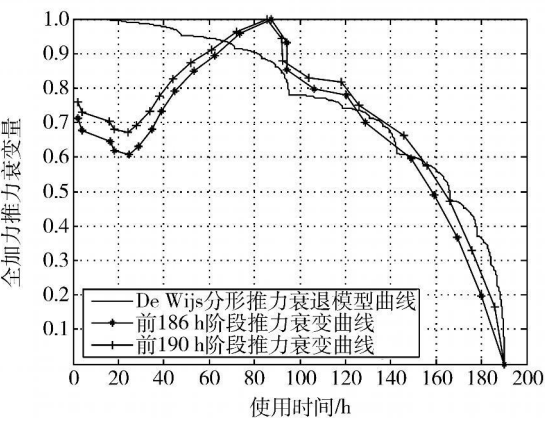


图 4 前 186, 190 h 阶段规整化推力衰变曲线与 De Wijs 分形推力衰退模型曲线

Fig.4 Thrust performance deterioration of normalized prior to 186, 190 hours and De Wijs fractal curve

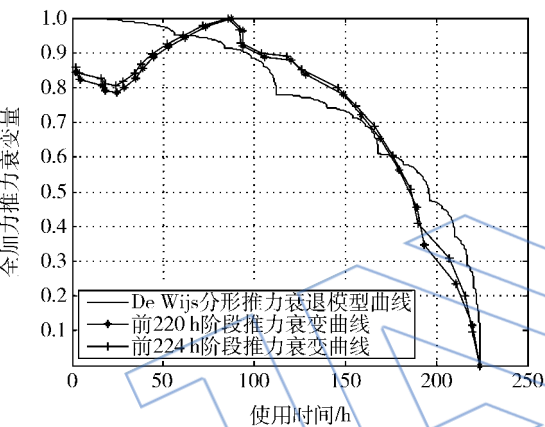


图 5 前 220, 224 h 阶段规整化推力衰变曲线与 De Wijs 分形推力衰退模型曲线

Fig.5 Thrust performance deterioration of normalized prior to 220, 224 hours and De Wijs fractal curve

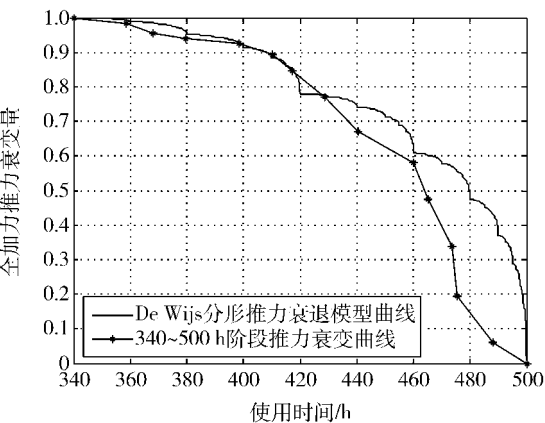


图 6 340~ 500 h 阶段规整化推力衰变曲线与 De Wijs 分形推力衰退模型曲线

Fig.6 Thrust performance deterioration of normalized prior to 340~ 500 hours and De Wijs fractal curve

又开始衰退, 这由图 3 中推力的变化也可反映出。

结合使用中的维护工作, 分析发动机推力性能的衰退模式, 本文认为对于此型发动机, 其新发动机或大修新组装的发动机首先经历大约 40~60h 的磨合调整期, 在此期间推力性能略有上升; 此后发动机经历大约 180~200 h 的推力性能衰退期, 而这一期间推力的衰退具有生物体寿命衰老的特征, 并可以用分形维数为 0.761 的 De Wijs 分形曲线近似。

航空发动机在使用过程中推力性能衰退趋势与生物体生命周期内的衰退变化相像, 原因可能与控制这些系统衰退变化的内在物理机制相似有关, 比如系统内禀的非线性、开放性、耗散性等特性。虽然本文设计的 De Wijs 分形推力衰退模型是 Lebesgue 积分异常函数, “曲线上几乎所有点的导数平行于横轴”, 发动机的性能“似乎不变”, 但实质上发动机的性能衰退是呈加速趋势, 随着使用时间的增长, 发动机性能衰退越来越快直至需要大修。

另一方面, 由文献[11-12]的研究可知, 发动机部件健康指数衰退速度可表示为

$$\Delta f_i = a_i b_i e^{-b_i t} + c_i \tag{4}$$

式中 a_i, b_i, c_i 为健康指数 f_i 衰退曲线的形状因子, 其中 t 表示有效使用时间, 用飞行小时或循环数计。对其再次求导, 即

$$\frac{\partial^2 \Delta f_i}{\partial t^2} = -a_i b_i^2 e^{-b_i t} < 0 \tag{5}$$

式(5)说明发动机部件性能的绝对衰退速率的加速度是负值, 即部件性能的衰退速度是减小的, 但基于分形理论对发动机全加力状态推力的研究却表明推力的衰退是呈加速趋势, 这看似矛盾的结论正说明:

- 1) 航空发动机系统的性能衰退速度不等同于各部件的衰退速度, 系统性能的衰退也不是性能衰退的各部件的线性叠加;
- 2) 航空发动机系统具有强非线性特征, 各部件的非线性耦合影响使得整机的衰退特征不简单地等于各部件衰退特征之和;
- 3) 对航空发动机性能衰退的研究必须考虑系统的复杂性和整体性。

3 结 论

本文从复杂动力系统的角度出发, 建立了基于 De Wijs 分形理论的航空发动机推力衰退模型, 对发动机性能衰退这一复杂过程进行了研究,

并对发动机使用过程中全加力状态推力的变化进行了分析与研究,可以得出如下结论:

1) 航空发动机在使用过程中推力性能衰退趋势与生物体生命周期内的衰退变化相像,采用 De Wijs 分形理论建立的发动机推力衰退规律模型能够较好的刻画发动机的性能衰退规律.

2) 发动机推力衰退规律可以用分形维数为 0.761 的 De Wijs 分形曲线近似.

3) 航空发动机系统的推力性能衰退速度不等于各部件的衰退速度,系统性能的衰退也不是性能衰退的各部件的线性叠加. 航空发动机具有强非线性特征,对其性能衰退规律这一复杂过程进行研究必须考虑系统的复杂性和整体性.

参考文献:

- [1] 王洪,左行中,柳亦兵. 关联维数在齿轮故障诊断中应用的试验研究[J]. 现代电力, 2002, 19(4): 21-26.
WANG Hong, ZUO Xingzhong, LIU Yibing. Application of correlative dimension on fault diagnosis of gear[J]. Modern Electric Power, 2002, 19(4): 21-26. (in Chinese)
- [2] 石博强,申炎华. 机械故障诊断的分形方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
SHI Boqiang, SHEN Yanhua. Fractal curve method of mechanical failure diagnostic[M]. Beijing: Metallurgy Industry Publishing, 2001. (in Chinese)
- [3] 李舜酩,高德平. 裂纹转子非线性振动特征的谐波小波与分形识别[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 581-586.
LI Shunming, GAO Deping. Identification of nonlinear vibration characteristics of cracked rotor using harmonic wavelet analysis and fractal theory[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 581-586. (in Chinese)
- [4] 余波,李应红,张朴. 关联维数和 Kolmogorov 熵在航空发动机故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 217-224.
YU Bo, LI Yinghong, ZHANG Pu. Application of correlation dimension and Kolmogorov entropy in aeroengine fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 217-224. (in Chinese)
- [5] 何田,刘献东,李其汉. 一种改进的航空发动机转静件碰磨故障诊断方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1093-1097.
HE Tian, LIU Xiangdong, LI Qihan. Improved fault diagnosis method for aero engine rotor stator rubs[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1093-1097. (in Chinese)
- [6] 何红. 基于小波分形的飞机发动机早期故障模型研究与设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
HE Hong. The forepart failure model investigation and design of aero engine based on wavelet[D]. Xi'an: Northwestern Industry University, 2006. (in Chinese)
- [7] 李俊涛,张凤鸣,李永宾. 耗散结构理论在飞机系统性能分析中的应用初探[J]. 微计算机信息, 2006(25): 186-188.
LI Juntao, ZHANG Fengming, LI Yongbin. Preliminary research on the application of dissipative structure theory to performance analysis on aircraft system[J]. Microcomputer Information, 2006(25): 186-188. (in Chinese)
- [8] 高安秀树. 分形维[M]. 沈步明, 常子文, 译. 北京: 地震出版社, 1989.
Takayasu H. Fractal dimension[M]. Translated by SHEN Buming, CHANG Ziwen. Beijing: Earthquake Press, 1989. (in Chinese)
- [9] 董连科. 分形理论及其应用[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1991.
DONG Lianke. Fractal theory and application[M]. Shenyang: Liaoning Technology Publishing, 1991. (in Chinese)
- [10] 李天亮. 航空发动机性能衰退规律研究及其诊断[D]. 西安: 空军工程大学, 2008.
LI Tianliang. Research on performance deterioration of a certain aero engine[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [11] Sasahara O. JT9D engine/module performance deterioration results from back to back testing[R]. ISABE 85-7061, 1985.
- [12] Simon D, Simon D L. Aircraft turbofan engine health estimation using constrained Kalman filtering[R]. ASME GT 2003-38584, 2003.