

计量活门磨损寿命预测

刘 菁¹, 朱 良², 冯 刚¹

(1. 中国航空工业集团公司 北京航科发动机控制系统科技有限公司, 北京 102200;

2. 中国人民解放军 驻 125 厂军代表室, 北京 100028)

摘 要: 对计量活门的磨损量进行建模,进行了探索研究,考虑了 3 种计算磨损量的方法.基于某型航空发动机燃油控制装置的计量活门试验数据的计算,结果表明:采用灰色理论的基于时间序列的一阶微分方程模型可以较准确地计算出计量活门的磨损量,相对误差小于 5%.对于燃油控制装置计量活门磨损寿命的预测具有实用意义,可以为燃油控制装置整体使用寿命的提供一定的依据.

关 键 词: 燃油控制装置; 计量活门; 磨损寿命; 灰色理论; 预测

中图分类号: V23

文献标志码: A

Metering valve abrasion life prediction

LIU Jing¹, ZHU Liang², FENG Gang¹

(1. Beijing Hangke Engine Control System Science and Technology Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Beijing 102200, China;

2. Military Representative Office in Factory 125,
the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100028, China)

Abstract: Given the complicated traditional abrasion computing process, the opposite direction to model the abrasion loss of the metering valve was studied. Three ways to compute the abrasion loss were found. The result of some model of the aero-engine fuel control unit's metering valve test data shows that, the model of the differential equation of first order based on the time series can accurately calculate the abrasion loss of the metering valve, with the relative error less than 5%. This had the practical meanings to the life prediction of abrasion in the fuel control unit metering valve, providing a basis for the useful life of the fuel control unit.

Key words: fuel control unit; metering valve; abrasion life; gray theory; prediction

航空发动机控制系统离不开液压机械执行机构,例如燃油计量装置就是通过控制燃油流量来实现对发动机工作状态的控制.液压机械执行机构中包含各种滑阀类活门偶件,例如安全活门、压差活门、定压活门、增压活门、放气活门等等.计量活门的寿命与液压执行机构的寿命联系紧密,一旦失效会引起整个液压执行机构功能紊乱,因此对计量活门的使用寿命进行分析很有必要.

根据摩擦学原理,传统的对偶件磨损寿命进

行计算和分析的办法是综合考虑材料的结构参数等多方面因素,需求的已知量较多^[1-3],例如外形尺寸、配合间隙、相对运动速度、接触应力、材料硬度、动摩擦因数、油膜厚度、工作载荷谱等等,若已知量欠缺或者数值可信度不足,采用传统办法进行计算和分析将带来困难.

以往研究证明,偶件的配合间隙随工作时间变化是有规律可循的,如果已知配合间隙随时间变化的试验数据,对试验数据进行分析,摸清规

律,开展对滑阀类偶件的磨损寿命预测并非不可行,这也可以避开传统计算分析方法对已知量要求较多的束缚。

本文以某型燃油控制装置的计量活门为例,对计量活门的持久试验过程中每隔 500 h 记录的配合间隙磨损量数据进行分析,设定磨损上限为 $10\text{ }\mu\text{m}$,介绍 3 种不同的计算方法,通过对比计算结果对计量活门磨损寿命进行了预测和验证,其中引入的灰色理论 GM(1,1)模型用于计量活门磨损寿命研究为首次提出。

对于计量活门磨损寿命进行预测,将对整个燃油控制装置寿命评估起到参考作用,进而对燃油控制装置在外场的使用更换、大修间隔确定提供一定的依据。

1 磨损寿命几种计算方法

1.1 Miner 线性累计损伤理论计算方法

假设构件在某一应力水平 S 下,发生失效时的循环次数为 N 。则产品在一次循环下的损伤为

$$D = \frac{1}{N} \quad (1)$$

在应力水平 S 下加载 n 个循环的损伤为

$$D = \frac{n}{N} \quad (2)$$

对于任意应力水平 $S_i (i=1, 2, \dots, k)$, 循环次数分别为 $n_i (i=1, 2, \dots, k)$, 设构件的临界损伤为 $D_{\text{cr}}=1$, 则可以得到

$$D_{\text{cr}} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

此即是关于线性累积损伤的基本方程^[4-5], 其中 $\frac{n_i}{N_i}$ 称为应力水平 $S_i (i=1, 2, \dots, k)$ 下的损伤率。

目前 Miner 线性累计损伤理论用于零组件耐久性仿真分析计算有着较成熟的应用实例。

1.2 正态分布计算方法

经过人们实践和试验统计分析发现,绝大多数零件的磨损量基本服从正态分布^[6-7], 磨损量的概率密度函数为^[8]

$$f_t(\omega) = \frac{1}{\sigma_\omega \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_\omega} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中 $\bar{\omega}$ 为磨损量均值, σ_ω 为磨损量标准差。

对应的可靠度 R 的计算为^[8]

$$R(W_p, t) = \int_{-\infty}^{W_p} f_t(\omega) d\omega \quad (5)$$

式中 W_p 为规定的最大磨损量, t 为工作时间, ω 为概率密度函数自变量。

1.3 灰色理论计算方法

1982 年, 中国学者邓聚龙教授创立的灰色系统理论, 是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法。灰色系统理论以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象, 主要通过对“部分”已知信息的生成、开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。

灰色系统 GM(1,1)模型是其依据系统中已知的多种因素的综合资料, 将此资料的时间序列按微分方程拟合去逼近上述时间序列所描述的动态过程, 进而外推达到预测的目的。这种拟合得到的模型是时间序列的一阶微分方程, 简记为 GM(1,1)模型。

本文采用的模型是 GM(1,1)模型^[9]使用的是累加生成方式^[10], 累加生成是通过数列间各时刻的依个累加以得到新的数据与数列。累加生成是使灰色过程由灰变白的一种方法, 它在灰色系统理论中占有极其重要的地位。通过累加生成可以看出灰量积累过程的发展态势^[11-12], 使离散的原始数据中蕴含的积分特性或规律加以显化^[13]。

基本计算过程如下:

1) 对原始数据重新生成

设有原始序列

$$X^{(0)} = \{x_{(0)}^{(0)}, x_{(1)}^{(0)}, \dots, x_{(n)}^{(0)}\}$$

一阶累加生成序列为

$$X^{(1)} = \{x_{(0)}^{(0)}, x_{(1)}^{(1)}, \dots, x_{(n)}^{(1)}\}$$

其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)}{2}$$

$$k=1, 2, \dots, n-1 \quad (7)$$

2) 建立 GM(1,1)模型

对 $X^{(1)}$ 建立关于时间 t 一元一阶微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (8)$$

其中 a, b 为待解参数。

设 $\hat{a}=[a, b]^T$, 则运用最小二乘法可以求解得到

$$\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (9)$$

其中

$$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3) 得到白化方程解

求解出 $\hat{a}$ 后, 就可以得到白化形式微分方程解

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

4) 还原数据进行预测

将计算结果代入累积还原, 即可得到预测结果

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (13)$$

5) 精度检验

令 $\epsilon(k)$ 为残差, 则

$$\epsilon(k) = \frac{\text{实际值} - \text{模型值}}{\text{实际值}} \times 100\% \quad (14)$$

一般要求 $\epsilon(k) \leq 20\%$, 最好是 $\epsilon(k) \leq 10\%$.

2 计量活门磨损寿命计算

如表1所示, 为某液压执行机构计量活门磨损间隙随着试验时间增加而变化的微分计量数据, 现根据表1数据计算到达最大磨损量 $10 \mu\text{m}$ 前的工作时间。

表1 磨损量试验数据
Table 1 Valve wear test data

试验时间/h	磨损量/ μm	平均值/ μm
500	0~1	0.5
1000	1~2	1.5
1500	1~3	2
2000	2~4	3

2.1 Miner 线性累计损伤计算结果及验证

取表1中磨损量平均值为研究对象, 根据Miner的线性累计损伤理论, 假定计量活门对偶件的磨损仅与它们之间相对运动循环次数有关, 而己知计量活门工作循环每小时为8次, 则每次循环磨损量平均值为

$$\delta = \frac{0.5 + 1.5 + 2 + 3}{(500 + 1000 + 1500 + 2000) \times 8} = 1.75 \times 10^{-4} \mu\text{m} \quad (15)$$

所以磨损量为 $10 \mu\text{m}$ 时计量活门工作时间为

$$t = \frac{10}{\delta \times 8} \approx 7142.8 \text{ h} \quad (16)$$

另对已有数据进行验算结果如表2。

表2 Miner 线性累计损伤磨损量计算结果及验证

Table 2 Calculation and validation of Miner linear cumulative damage

试验时间/h	实际磨损/ μm	计算值/ μm	相对误差/%	备注
500	0.5	0.7	28.5714	验证值
1000	1.5	1.4	7.1429	验证值
1500	2	2.1	4.7619	验证值
2000	3	2.8	7.1429	验证值
7142.8		10		预测值

2.2 正态分布计算结果及验证

对磨损量的上限及下限进行线性回归, 可以得到上限回归方程为

$$\omega = 0.002 t_e \quad (17)$$

其中 t_e 为试验时间(单位为h)。

下限回归方程为

$$\omega = 0.0012 t_e - 0.5 \quad (18)$$

根据式(4)、式(5), 验算 Miner 线性累计损伤计算结果的可靠度, 代入 $t_e = 7142.8$, 求出试验时间为 7142.8 h 时磨损量的上限、下限值, 然后计算出正态分布均值和标准差, 经计算均值 $\bar{\omega} = 11.18$, 标准差 $\sigma_w = 1.0357$, 可靠度为

$$R = \int_{-\infty}^{\bar{\omega}} \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_w} \right)^2 \right] d\omega = \left\{ \int_{-\infty}^{10} \frac{1}{1.0357 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega - 11.18}{1.0357} \right)^2 \right] d\omega \right\} \times 100\% = 87.3\% \quad (19)$$

根据正态分布计算结果, Miner 线性累计损伤计算结果的可靠度为 87.3% , 可见 Miner 线性累计损伤计算结果存在明显误差。

假定当 $R=100\%$ 时, 预测结果可信度最高, 经查阅标准正态分布表计算可得对应的 $t_e = 4681.6$, 代入计算计算可得 $\bar{\omega} = 7.24$, 标准差 $\sigma_w = 0.708$, 可靠度为

$$R = \int_{-\infty}^{\bar{w}} \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{w - \bar{w}}{\sigma_w}\right)^2\right] d\bar{w} =$$

$$\left\{ \int_{-\infty}^{10} \frac{1}{0.708\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{w - 7.24}{0.708}\right)^2\right] \right\} \times$$

$$100\% = 100\% \quad (20)$$

因此正态分布预测结果为 $t=4681.6$ h 时, 磨损量达到了 $10 \mu\text{m}$, 另对已有数据验证结果见表 3.

表 3 正态分布磨损量计算结果及验证

Table 3 Calculation and validation of normal distribution

试验 时间/h	实际 磨损/ μm	计算值/ μm	相对 误差/%	备注
500	0.5	1.135	55.9471	验证值
1000	1.5	2.195	31.6629	验证值
1500	2	3.255	62.75	验证值
2000	3	4.315	43.8333	验证值
4681.6		10		预测值

2.3 灰色理论计算结果及验证

限于篇幅, 因此未分别对磨损量的上限、下限单独按照 GM(1,1) 模型进行计算^[14], 因此仅针对表 1 磨损量的均值进行计算. 从表 1 可知, 该数据为明显的等间距数据, 时间间距为 500 h. 则可得

$$X^{(0)} = \{0.5, 1.5, 2, 3\}$$

$$X^{(1)} = \{0.5, 2, 4, 7\} \quad (21)$$

$$Z^{(1)} = \{1.25, 3, 5.5\}$$

根据式(8)~式(10)计算可得

$$a = -0.3562 \quad b = 1.0091 \quad (22)$$

得到白化方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} - 0.3562x^{(1)} = 1.0091 \quad (23)$$

求解白化方程

$$x^{(1)}(t) = \left[x^{(1)}(1) + \frac{1.0091}{0.3562} \right] e^{0.3562t} -$$

$$\frac{1.0091}{0.3562} = (0.5 + 2.833)e^{0.3562t} - 2.833 =$$

$$3.333e^{0.3562t} - 2.833 \quad (24)$$

根据白化方程, 可以得到 GM(1,1) 模型计算值, 另对已有数据验证结果见表 4.

表 4 GM(1,1) 模型计算结果及验证

Table 4 Calculation and validation of GM(1,1) model

试验 时间/h	实际 磨损/ μm	计算值/ μm	相对 误差/%	备注
500	0.5	0.5	0	
1000	1.5	1.4261	4.9267	验证值
1500	2	2.0363	-1.815	验证值
2000	3	2.9075	3.0833	验证值
3500		8.4638		预测值
4000		12.0849		预测值

从表 4 可以看出, GM(1,1) 计算值与已知的试验数据很接近, 相对误差小于 5%, 具有很高的精度, 预测结果显示, 当试验进行到 3500~4000 h 之间时, 磨损量将达到设定值的 $10 \mu\text{m}$.

综合 3 种方法计算结果可看出灰色理论计算结果验证值相对误差最小, 精度最高, 其外推的预测值可信度较高. 但需要注意的是灰色理论也存在一定的适用范围^[15], 采用时需要注意.

从结构上分析, 凡是与计量活门类似的滑阀, 采用灰色理论 GM(1,1) 模型开展磨损寿命计算与预测也是可能的, 目前有待更多实例验证.

本文采用的试验数据为等间距数据, 若数据为非等间距数据, 采用现有的 GM(1,1) 模型进行预测将会带来较大误差, 需采用非等距 GM(1,1) 模型进行分析^[16-18], 相关步骤本文限于篇幅不在赘述, 因此应用 GM(1,1) 模型对试验数据进行预测分析时需要留意.

3 结 论

1) 采用简单的线性平均方法计算预测计量活门磨损寿命, 其预测精度、可靠性较低, 不适宜用于长远预测, 但由于线性平均方法所需的数据较少, 在一些精度要求不高的情况下, 仍具有一定的参考意义.

2) 采用正态分布计算方法显示, 正态分布可靠度计算是将过程磨损量转化成随机变量, 允许磨损量既可以处理为定值, 也可以处理成随机变量的安全概率, 预测精度较低.

3) 采用灰色理论计算, 结果表明, 灰色理论 GM(1,1) 计算精度在 3 种方法中最高, 可以较好的对计量活门的磨损情况进行验算, 其外推的计算结果对磨损情况预测的可信度较高. 作为一种新方法, 对计量活门的磨损寿命预测有实际的参

考意义。

参考文献:

- [1] 吴亮,杨曙东,刘书胤,等. 某大通径滑阀的磨损寿命预估[J]. 机械设计与制造,2012(8):234-236.
WU Liang, YANG Shudong, LIU Shuyin, et al. Wear life prediction for a large diameter slide valve[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(8):234-236. (in Chinese)
- [2] 刘书胤,杨曙东,吴亮. 大通径滑阀阀体强度与配合间隙优化设计[J]. 液压与气动,2012(5):90-94.
LIU Shuyin, YANG Shudong, WU Liang, et al. Optimization design of the valve body strength and fit clearance for a large diameter slide valve[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2012(5):90-94. (in Chinese)
- [3] 温诗涛,黄平. 摩擦学原理[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2008.
- [4] 赵少汴. 常用累积损伤理论疲劳寿命估算精度的试验研究[J]. 机械强度,2000,22(3):206-209.
ZHAO Shaobian. Study on the accuracy of fatigue life prediction by the generally used damage accumulation theory[J]. Journal of Mechanical Strength, 2000, 22(3):206-209. (in Chinese)
- [5] 冯胜,程燕平,赵亚丽,等. 线性疲劳损伤累积理论的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(3):608-610.
FENG Sheng, CHENG Yanping, ZHAO Yali, et al. Linear fatigue damage cumulation theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(3):608-610. (in Chinese)
- [6] 张健. 利用正态分布方法对糙率数据统计分析[J]. 水利科技与经济,2012,18(4):63-65.
ZHANG Jian. Analysis and statistics on roughness data by using of normal distribution method[J]. Water Conservancy Science and Economy, 2012, 18(4):63-65. (in Chinese)
- [7] 王金星,于新方. 产品磨损试验寿命延拓方法[J]. 鞍钢技术,2007(1):18-20.
WANG Jinxing, YU Xinfang. Wear test to prolong product life[J]. Angang Technology, 2007(1):18-20. (in Chinese)
- [8] 瑟里岑. 液压和起动传动装置的可靠性[M]. 曾德尧,译. 北京:国防工业出版社,1989.
- [9] 刘思锋. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [10] 同小军,陈绵云,周龙. 关于灰色模型的累加生成效果[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(11):121-125.
TONG Xiaojun, CHEN Mianyun, ZHOU Long. On AGO effect of the grey model[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2002, 22(11):121-125. (in Chinese)
- [11] 王利,吕大伟,吴立容. 基于灰色理论与模糊数学相结合的矿山地质灾害预测[J]. 煤炭工程,2009,41(4):77-79.
- [12] 闫玉涛,李雪娟,胡广洋,等. 石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测[J]. 航空动力学报,2014,29(2):314-320.
YAN Yutao, LI Xuejian, HU Guangyang, et al. Friction/wear behaviors and prediction of graphite seal material under high temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2):314-320. (in Chinese)
- [13] 程哲,胡葛庆,秦国军. 基于物理模型和灰色关联分析的直升机传动系统损伤定量检测方法[J]. 航空动力学报,2011,26(3):716-720.
CHENG Zhe, HU Niaoqing, QIN Guojun. Quantitative detection approach for trasmission system of helicopter based on physical model and gray relational analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3):716-720. (in Chinese)
- [14] 刘晓叙,陈敏. 内燃机汽缸磨损量灰色预测[J]. 润滑与密封,2009,34(3):78-80.
LIU Xiaoxu, CHEN Min. The grey forecasting for cylinder line wear of internal combustion Engine[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(3):78-80. (in Chinese)
- [15] 刘思锋,邓聚龙. GM(1,1)模型适用范围[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(5):121-124.
LIU Sifeng, DENG Julong. The range suitable for GM(1,1)[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2000, 20(5):121-124. (in Chinese)
- [16] 崔建国,巩俊杰,董世良,等. 基于灰色理论的飞机结构疲劳寿命预测[J]. 沈阳航空航天大学学报,2011,28(1):23-27.
CUI Jianguo, GONG Junjie, DONG Shiliang, et al. Fatigue life prediction of aero-plane structures based on grey theory[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2011, 28(1):23-27. (in Chinese)
- [17] 戴文战,李俊峰. 非等间距 GM(1,1)模型建模研究[J]. 系统工程理论与实践,2005,25(9):89-93.
DAI Wenzhan, LI Junfeng. Modeling research on non-equidistance GM(1,1) model[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2005, 25(9):89-93. (in Chinese)
- [18] 李翠凤,戴文战. 非等距 GM(1,1)模型背景值构造方法与应用[J]. 清华大学大学学报:自然科学版,2007,47(S2):1729-1731.
LI Cuifeng, DAN Wenzhan. Determinator of the background level in the non-equidistant GM(1,1) model[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(S2):1729-1731. (in Chinese)

(编辑:叶 青)