

涡轮泵振动参数与统计特征量的线性相关性分析^{*}

谢光军, 胡莒庆, 秦国军

(国防科技大学 机电工程研究所, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为了剔除冗余的振动参数和统计特征量, 提高涡轮泵故障检测的实时能力, 建立了线性相关性假设检验模型。利用该假设检验模型和某型液体火箭发动机的历史试车数据, 检验了 7 路涡轮泵振动参数以及 13 种常用统计特征量的线性相关性, 并分析了统计特征量对涡轮泵故障的敏感性和稳定性, 以及涡轮泵振动数据的正态性。数据统计分析表明, 大部分涡轮泵振动参数以及统计特征量显著线性相关, 幅值统计特征量的故障敏感性弱, 但稳定性强, 而无量纲统计特征量的情况恰好相反, 并且正常涡轮泵振动数据服从正态分布, 而异常涡轮泵振动数据不再服从正态分布。据此, 为涡轮泵故障检测选择了线性相关性弱, 故障特征反映能力强的 3 路振动参数和 3 种统计特征量。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 涡轮泵; 实时故障检测⁺

中图分类号: V 434⁺. 21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2005) 06-0540-05

Linear correlation analysis of turbopump vibration parameters and statistical features

XIE Guang-jun, HU Niao-qing, QIN Guo-jun

(Inst. of Mechanical and Electrical Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to abscond the redundant vibration parameters and statistical features and enhance the real time capability of turbopump fault detection, the linear correlation hypothesis test model was built. With the help of this model and Liquid Rocket Engine (LRE) historical test data, the linear correlation hypothesis testing of 7 turbopump vibration parameters and that of 13 traditional statistical features were performed here. Then, the turbopump fault detection sensitivity and stability of statistical features and the normality of turbopump vibration data were also analyzed. The data statistic analysis results show that a majority of turbopump vibration and statistical features are evidently linear correlation, and the amplitude statistical features fault sensitivity is weak, but their fault stability is strong, while the dimensionless ones are just the contrary. What's more, the normal turbopump vibration data obey normal distribution, however the abnormal ones do not obey normal distribution anymore. So, 3 vibration parameters and 3 statistical features, which are weak linear correlation and well reflect the faults characteristic, are selected for the LRE turbopump fault detection.

Key words Liquid propellant rocket engine; Turbopump; Real-time fault detection⁺

1 引 言

由于液体火箭发动机涡轮泵工作在极端的转子动力条件下, 因此它的振动数据分析是至关重要的^[1]。虽然, 利用红线阈值方法, 航天飞机主发动机 (SSME) 涡轮泵的先进实时振动监控系统 (ARTVMS)

可监测 10 路振动参数^[2], 但是, 至今还没有文献公开报道 ARTVMS 所监测的参数名称及其选择依据。文献 [3~5] 在涡轮泵故障检测中都选用了统计特征量作为监测指标, 但是并没有研究所选用的振动参数以及统计特征量的线性相关性。然而, 冗余的信息并不能为涡轮泵的故障检测提供任何有益的帮助, 反而会

^{*} 收稿日期: 2005-04-12 修订日期: 2005-08-29

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目 (2002AA722070); 国家自然科学基金资助项目 (50375153)。

作者简介: 谢光军 (1976—), 男, 博士生, 研究领域为机器状态监控与故障诊断、机械信号处理等。

加重故障检测系统的负担, 延误报警时间。为此, 本文首先建立了线性相关性 p 值假设检验模型; 接着利用该模型和某型液体火箭发动机的历史试车数据, 分析了该发动机 7 路涡轮泵振动参数以及 13 种常用统计特征量的线性相关性, 并结合该涡轮泵的主要故障特征, 选择了 3 路振动参数; 然后讨论了这 13 种统计特征量对涡轮泵故障的敏感性与稳定性, 并借助于正态概率图检验了涡轮泵振动数据的正态性, 在此基础上, 选择了 3 种统计特征量。这样, 既保证了涡轮泵故障检测的有效性, 又提高了它的实时能力。

2 相关性 p 值假设检验模型

2.1 变量线性相关分析

两个随机变量 X 与 Y 之间的线性相关程度可以用线性相关系数来衡量, 即

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

式中, $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X 与 Y 的协方差,

$$\text{Cov}(X, Y) = E[(X - EX)(Y - EY)] \quad (2)$$

σ_X 、 σ_Y 分别为 X 与 Y 的标准方差, 即

$$\begin{cases} \sigma_X = \sqrt{E(X - EX)^2} \\ \sigma_Y = \sqrt{E(Y - EY)^2} \end{cases} \quad (3)$$

式 (2) 和式 (3) 中 EX 和 EY 分别表示 X 与 Y 的均值,

$$\begin{cases} EX = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \\ EY = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中的 N 为 X 与 Y 的样本数目。

根据式 (1) 和式 (3), 可以得出 r 与 $\text{Cov}(X, Y)$ 同符号。当 $r > 0$ 称 X 与 Y 正相关; 当 $r < 0$ 称 X 与 Y 负相关; 当 $r = 0$ 称 X 与 Y 不相关。

2.2 p 值线性相关性假设检验

在求出样本的相关系数后, 需要对其作假设检验, 以判断在总体相关系数 ρ 为零的总体中抽到当前相关系数 r 的可能性 (概率), 为此, 建立如下假设检验模型

$$H_0: \rho = 0 \quad H_1: \rho \neq 0 \quad (5)$$

样本相关假设检验一般采用 t 检验法^[6], 因此构造如下 t 检验统计量

$$t_r = \frac{|r - 0|}{S_r} = \frac{|r|}{S_r} \quad (6)$$

其中

$$S_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{N - 2}} \quad (7)$$

按文献 [6], 在统计假设检验中, p 定义为在原假设 H_0 所规定的总体中作随机抽样, 获得大于等于 (或小于等于) 现有样本统计量的最小显著水平。由于式 (5) 是双侧假设检验, 可得

$$p = 2 \times p(t_r \geq (t_{\alpha/2} = \alpha) | H_0 \text{ 为真}) \quad (8)$$

p 的值一般可通过界值表查得。

因此, 在任意给定的显著水平 α (一般取 $\alpha = 0.05$) 下, 当 $p > \alpha$ 时, 则接受 H_0 , 即 X 与 Y 不相关; 而当 $p \leq \alpha$ 时, 则拒绝 H_0 , 即 X 与 Y 显著相关。

3 线性相关性试验分析与参数选择

3.1 振动参数相关性分析与选择

目前, 某型液体火箭发动机涡轮泵可监测的振动参数包括氢泵轴向振动 V_{ha} , 氢泵径向振动 V_{hr} , 氢泵切向振动 V_{ht} , 氢泵某方向振动 V_{hx} , 氧泵轴向振动 V_{oa} , 氧泵径向振动 V_{or} 和氧泵切向振动 V_{ot} 。利用该发动机的历史试车数据 (样本数 $N = 1024$), 由式 (1) 得出表 1 所示的 V_{ha} , V_{hr} , V_{ht} , V_{hx} , V_{oa} , V_{or} 和 V_{ot} 的线性相关系数, 而由式 (6) 和式 (8) 得到表 2 所示的线性相关系数 r 的 p 值。据表 2 可得, 在假设检验显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 氢泵只有 V_{ha} 与 V_{hr} , V_{hr} 与 V_{hx} 不显著相关, 而其它参数显著相关, 故而氢泵的监测参数可选择这两组参数中的任意一组; 又因为氧泵的 V_{oa} , V_{or} 和 V_{ot} 相互显著相关, 所以它的监测参数可选择三者中的任意一个; 在氢、氧涡轮泵之间, V_{ha} , V_{hr} 与 V_{oa} , V_{or} 互不相关, 并且 V_{hr} , V_{hx} 与 V_{oa} , V_{ot} 也互不相关。因此, 氢、氧涡轮泵的监测参数可以选择 V_{ha} , V_{hr} 和 V_{oa} (或 V_{or}), 或者 V_{hr} , V_{hx} 和 V_{oa} (或 V_{ot})。又因为涡轮泵常见的动不平衡、叶片掉块、转子松动、动静碰摩、转子次同步进动以及流体动力激振等故障特征都可反映于涡轮泵轴向振动^[4], 因此本文选择氢泵轴向振动 V_{ha} , 氢泵径向振动 V_{hr} 和氧泵轴向振动 V_{oa} 作为监测参数, 从而使得振动监测参数由 7 个缩减到 3 个。

3.2 统计特征量相关性分析

实际工程中, 常用振动信号统计特征量主要有峰值 X_p , 绝对均值 $\bar{X}_a$, 均方根 X_{RMS} , 方根 X_r , 偏度 α_3 , 峭度 α_4 , 波形因子 K , 峰态因子 C , 脉冲因子 I , 裕度因子 L , 偏态因子 K_3 , 峭度因子 K_4 , 一步自相关系数 R 等, 它们分别从能量和波形等角度描述信号的统计特性。利用某型液体火箭发动机的历史试车氢泵轴向振动

数据(样本数 $N = 1024$), 对上述 13 种常用信号统计特征量进行相关性分析和假设检验, 由式 (1) 得出表 3 所示的统计特征量的相关系数 r , 由式 (6) 和式 (8) 得到表 4 所示的相关系数 r 的 p 值。据表 4 可得, 在假设检验显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 特征量 $X_p, \bar{X}_a, X_r, \alpha_3, R$ 都与 α_3, K_3 非线性相关, 但 $X_p, \bar{X}_a, X_r, \alpha_4$ 与 R 相互之间显著线性相关; X_{RMS} 与 $\alpha_3, K, C, I, L, K_3, K_4$ 非线性相关, 与其它参量显著线性相关; K, C, I, L, K_4 与 X_{RMS}, α_3, K_3 非线性相关, 但 K, C, I, L 和 K_4 相互显著线性相关; α_3 与 K_3 显著线性相关。因此, 根据 p 值假设检验, 可以选择相互独立的均方根 X_{RMS} , 波形因子 K (峰态因子 C , 脉冲因子 I , 裕度因子 L , 或峭度因子 K_4) 和偏度 α_3 (或偏态因子 K_3) 作为监测特征量。此外, 分别利用氢泵径向振动和氧泵轴向振动数据, 同样对上述 13 种常用统计特征量进行线性相关性分析与假设检验, 其结果与氢泵轴向振动数据的一致。

Table 1 Linear correlation coefficients for vibration parameters of turbopump

Item	V_{ha}	V_{hr}	V_{ht}	V_{hx}	V_{oa}	V_{or}	V_{ot}
V_{ha}	1						
V_{hr}	0.026	1					
V_{ht}	-0.159	-0.110	1				
V_{hx}	-0.082	-0.017	0.138	1			
V_{oa}	-0.060	0.005	-0.089	0.035	1		
V_{or}	-0.029	-0.005	-0.044	-0.072	0.102	1	
V_{ot}	0.106	-0.028	0.099	-0.032	-0.258	-0.632	1

Table 2 p values for hypothesis testing of linear correlation coefficients on vibration parameters of turbopump

Item	V_{ha}	V_{hr}	V_{ht}	V_{hx}	V_{oa}	V_{or}	V_{ot}
V_{ha}	1						
V_{hr}	0.346	1					
V_{ht}	0.000	0.000	1				
V_{hx}	0.009	0.581	0.000	1			
V_{oa}	0.054	0.866	0.004	0.264	1		
V_{or}	0.361	0.883	0.164	0.022	0.001	1	
V_{ot}	0.000	0.364	0.002	0.313	0.000	0.000	1

Table 3 Features linear correlation coefficients for axial vibration of hydrogen turbopump

Item	X_p	$\bar{X}_a$	X_{RMS}	X_r	α_3	α_4	K	C	I	L	K_3	K_4	R
X_p	1												
$\bar{X}_a$	0.508	1											
X_{RMS}	0.587	0.984	1										
X_r	0.465	0.992	0.956	1									
α_3	-0.051	-0.034	-0.032	-0.041	1								
α_4	0.716	0.889	0.946	0.843	-0.048	1							
K	0.386	-0.188	-0.011	-0.296	0.015	0.217	1						
C	0.778	-0.133	-0.049	-0.165	-0.039	0.149	0.486	1					
I	0.773	-0.148	-0.047	-0.192	-0.034	0.167	0.583	0.993	1				
L	0.764	-0.158	-0.045	-0.211	-0.027	0.175	0.643	0.981	0.996	1			
K_3	-0.043	-0.016	-0.013	-0.022	0.971	-0.027	0.014	-0.043	-0.038	-0.031	1		
K_4	0.599	-0.175	-0.026	-0.244	-0.036	0.240	0.849	0.762	0.821	0.844	-0.036	1	
R	0.309	0.588	0.588	0.578	-0.001	0.541	-0.060	-0.076	-0.078	-0.080	0.009	-0.071	1

Table 4 p values for hypothesis testing of features linear correlation coefficients on axial vibration of hydrogen turbopump

Item	X_p	$\bar{X}_a$	X_{RMS}	X_r	α_3	α_4	K	C	I	L	K_3	K_4	R
X_p	1												
$\bar{X}_a$	0.000	1											
X_{RMS}	0.000	0.000	1										
X_r	0.000	0.000	0.000	1									
α_3	0.070	0.227	0.258	0.153	1								
α_4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.089	1							
K	0.000	0.000	0.701	0.000	0.596	0.000	1						
C	0.000	0.000	0.087	0.000	0.173	0.000	0.000	1					
I	0.000	0.000	0.101	0.000	0.236	0.000	0.000	0.000	1				
L	0.000	0.000	0.110	0.000	0.345	0.000	0.000	0.000	0.000	1			
K_3	0.133	0.582	0.636	0.443	0.000	0.350	0.634	0.128	0.180	0.268	1		
K_4	0.000	0.000	0.365	0.000	0.201	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	1	
R	0.000	0.000	0.000	0.000	0.979	0.000	0.036	0.008	0.006	0.005	0.750	0.012	1

3 3 统计特征量故障敏感性与稳定性分析

对于涡轮泵故障检测而言,在选择统计特征量时,一方面应尽量选择线性相关性弱,或者非线性相关的统计特征量,另一方面也必须考虑统计特征量对涡轮泵故障的敏感性与稳定性等因素。通过对某型液体火箭发动机大量的历史试车数据进行统计分析,得出了表 5 所示的上述 13 种统计特征量对涡轮泵故障的敏感性和稳定性情况。在研究过程中还发现:

(1)均方根 X_{RMS} 等幅值特征量 (峰值 X_p 除外) 的故障敏感性较弱,但稳定性较强;(2)波形因子 K 等无量纲统计特征量故障敏感性较强,但稳定性较弱,因此它们对脉冲型或幅值突变的故障比较敏感,但对磨损类故障并不敏感;(3)波形因子 K , 偏度因子 K_3 , 峭度因子 K_4 的敏感性不如峰值因子 C , 脉冲因子 I 和裕度因子 L , 且 L 的故障敏感性最高。

Table 5 Turbopump fault sensitivity and stability of statistic features

Item	Sensitivity	Stability
X_p	Better	Worse
$\bar{X}_a$	Worse	Better
X_{RMS}	Worse	Better
X_r	Worse	Better
α_3	Good	Bad
α_4	Good	Bad
K	Better	Bad
C	Much better	Bad
I	Much better	Bad
L	Best	Bad
K_3	Better	Bad
K_4	Better	Bad
R	Worse	Better

3 4 振动数据正态性分析与统计特征量选择

在数据统计分析中,通常利用正态概率图来检验数据是否服从正态分布^[6]。图 1 为正常氢泵轴向振动数据 (样本数 $N = 1024$) 归一化后的正态概率图。该图横坐标 x 表示归一化后的氢泵轴向振动数据,纵坐标 $P\{Z \leq x\}$ 表示变量 $Z \leq x$ 的正态概率。图 1 中,“+”表示 $P\{Z \leq x\}$ 的离散点,而“-”表示 $P\{Z \leq x\}$ 的回归直线。根据图 1 可以得出,正常氢泵轴向振动数据的正态概率分布具有良好的线性,因此它服从正态分布。图 2 为异常氢泵轴向振动数据 (样本数 $N = 1024$) 归一化后的正态概率图。根据图 2 可以得出,异常氢泵轴向振动数据的正态概率分布已不具有线性,因此它不服从正态分布。在检验其它的氢泵和氧泵振动数据的是否服从正态分布时,其结果也与氢泵

轴向振动数据的一致。又因为对于服从正态分布的正常涡轮泵数据, K_3 和 K_4 的取值比较固定 ($K_3 = 0$ $K_4 = 3$); 而当涡轮泵出现异常时,其振动数据不再服从正态, K_3 和 K_4 将有明显的变化。因此, K_3 和 K_4 是比较理想的涡轮泵故障检测的统计特征量。虽然根据统计特征量相关性的分析结果, K_3 和 K_4 相比, K_3 与其它统计参量的相关程度要低,但是,考虑到 K_4 检测微弱信号的能力更强,在故障检测中的实用价值更大,所以选择 K_4 。其次, X_{RMS} 与其它无量纲统计参量的相关程度也低,且是振动速度的评定物理量,直接反映了振动能量的大小。再次,因为 L 的故障敏感程度最高,且在定义上与 K_4 没有重复。所以,本文选择均方根 X_{RMS} , 裕度因子 L 和峭度因子 K_4 作为涡轮泵故障检测指标。

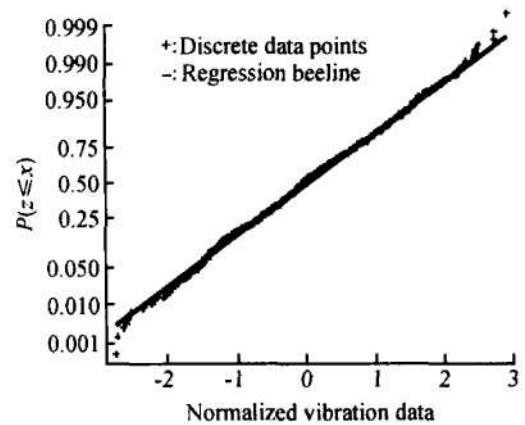


Fig 1 Normal probability plot for normalized axial vibration data of hydrogen turbopump in normal conditions

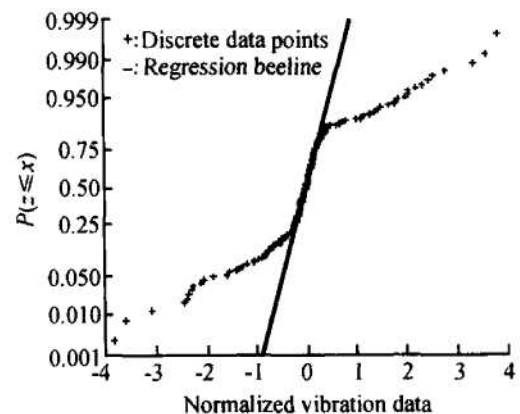


Fig 2 Normal probability plot for normalized axial vibration data of hydrogen turbopump in abnormal conditions

4 结 论

- (1) 氢泵部分振动参数存在显著线性相关现象,
(下转第 547 页)

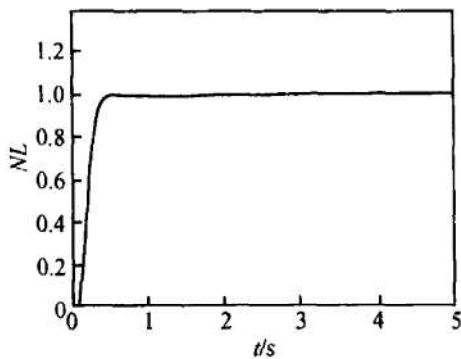


Fig 5 Step response of NL ($H = 18.0 \text{ km}$ $Ma = 1.5$)

出于抗干扰的考虑,工程实际中,通常令 $k_d = 0$ 。在这种情况下,寻优获得的 k_p , k_i 的量值均大幅下降,相应的阶跃响应均无超调、无静差,但调节时间将延长至 2.5 秒左右。针对 $H = 18.0 \text{ km}$ $Ma = 1.5$, PID 整定结果为 $k_p = 1.7605$, $k_d = 0.0$, $k_i = 1.5432$ 。响应曲线如图 6 所示。

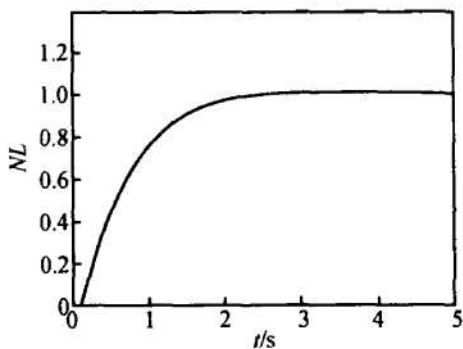


Fig 6 Step response of NL ($H = 18.0 \text{ km}$ $Ma = 1.5$)

5 结 论

研究表明,将遗传算法用于航空发动机控制器 PID 参数整定是可行的。控制器参数整定速度极高,整定后的 PID 控制器控制效果良好。此外,该方法能否用于航空发动机的多变量控制还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Åström K J, Hägglund T. PID controllers: theory, design and tuning[M]. Instrument Society of America, 1995.
- [2] 张文修,梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [3] 李敏强. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] Periaux J. Genetic algorithms in aeronautics and turbomachinery[J]. John Wiley, 2002.
- [5] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 熊光楞,肖田园,张燕云. 连续系统仿真与离散事件系统仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

(编辑: 张奕春)

(上接第 543 页)

而氧泵的振动参数都显著线性相关。

(2) 均方根、偏度和偏度因子的独立性较强; 峰值、绝对均值、方根、峭度和一步自相关系数之间显著线性相关; 波形因子、峰值因子、脉冲因子、裕度因子和峭度因子之间显著线性相关。

(3) 绝对均值、均方根、方根、偏度、峭度和一步自相关系数等对涡轮泵故障的敏感性较弱, 但稳定性较强; 波形因子、峰值因子、脉冲因子、裕度因子、偏度因子和峭度因子对故障的敏感性较强, 但稳定性较弱。

(4) 正常涡轮泵振动数据服从正态分布, 而异常涡轮泵振动数据并不再服从正态分布。

(5) 涡轮泵故障检测中, 可选择氢泵轴向振动、氢泵径向振动和氧泵轴向振动作为监测参数, 而统计特征量可选择均方根、裕度因子和峭度因子。

参考文献:

- [1] Fionucci T R, Lakin H D R, Reynolds T D. Advanced engine health management applications of the SSME real-time vibration monitoring system[R]. AAA 2000-3622.
- [2] Davidson M, Stephens J. Advanced health management system for the space shuttle main engine[R]. AAA 2004-3912.
- [3] 朱恒伟. 液体推进剂火箭发动机地面试车故障检测与诊断研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1997.
- [4] 王慧. 基于振动参量的涡轮泵健康状况判别方法的研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司, 2003.
- [5] Xie G J, Hu N Q, Wen X S, et al. Health monitoring system of turbopump[R]. AAA 2005-3948.
- [6] Stephen Bemstein, Ruth Bemstein. Elements of statistics II: inferential statistics[M]. New York: McGraw Hill Companies, Inc, 1999.

(编辑: 郭振伶)