# 基于AR/CGARCH模型的液体火箭发动机自适应 阈值故障检测算法<sup>\*</sup>

张万旋,张箭,薛薇,张楠

(北京航天动力研究所,北京 100076)

摘 要:为了解决传统自适应阈值算法对时间序列方差跟踪能力不足,以及故障阶段带宽自动放大的 问题,提出了紧广义自回归条件异方差(Compact General Auto-Regressive Conditional Heteroskedasticity, CGARCH)模型。针对液体火箭发动机稳态试车数据的波动性特点,提出一种基于自回归(Auto-Regressive, AR)模型和CGARCH模型的自适应阈值故障检测算法。采用AR模型对稳态参数的均值进行估计,并 采用CGARCH模型对稳态参数的方差进行估计,从而利用均值和方差的估计值自适应地构造检测阈值。用 某氢氧火箭发动机的热试车数据进行验证,结果表明,该算法能够准确、快速、灵敏地检测液体火箭发动机 故障,在正常工作阶段,能够有效跟踪数据波动性,在故障阶段,能够避免阈值变宽带来的漏检。

关键词:液体火箭发动机;时间序列分析;自回归模型;自适应阈值算法;故障检测 中图分类号:V231.1 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2023) 03-210866-06 DOI: 10.13675/j.enki. tjjs. 210866

## Liquid Rocket Engine Adaptive Threshold Fault Detection Algorithm Based on AR/Compact GARCH Models

ZHANG Wan-xuan, ZHANG Jian, XUE Wei, ZHANG Nan

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to solve the problem of the incompetence of traditional adaptive threshold algorithm in tracking the variance of time series, and the problem of automatic amplification of threshold in fault phase, the Compact General Auto-Regressive Conditional Heteroskedasticity (CGARCH) model was proposed. According to the volatility characteristic of static test data of liquid rocket engine, an adaptive threshold algorithm based on Auto-Regressive(AR) model and CGARCH model was presented. Using AR model in mean estimation of static parameters, and CGARCH model in variance estimation, the predicted values of mean and variance may construct the detection threshold adaptively. After validating the algorithm with the hot test data of a  $LH_2/LOX$  engine, the results show that the algorithm enables accurate, fast and sensitive fault detection of liquid rocket engine. In normal working phase, the algorithm is able to track the data volatility effectively, while in fault stage, it avoids missed detection caused by increased threshold bandwidth.

Key words: Liquid rocket engine; Time series analysis; Auto-regressive model; Adaptive threshold algorithm; Fault detection

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-12-12;修订日期: 2022-03-14。

作者简介:张万旋,博士生,研究领域为液体火箭发动机系统设计与故障诊断。

通讯作者:张 楠,博士,研究员,研究领域为液体火箭发动机技术。E-mail: 1035671641@qq.com

引用格式:张万旋,张 箭,薛 薇,等. 基于 AR/CGARCH 模型的液体火箭发动机自适应阈值故障检测算法[J]. 推进技术, 2023, 44(3):210866. (ZHANG Wan-xuan, ZHANG Jian, XUE Wei, et al. Liquid Rocket Engine Adaptive Threshold Fault Detection Algorithm Based on AR/Compact GARCH Models [J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(3):210866.)

### 1 引 言

红线算法是液体火箭发动机故障诊断中广泛采 用的算法,由于发动机生产制造、调节元件更换、外 界扰动等因素,发动机稳态工作性能参数存在差异, 为避免虚警,红线算法的固定门限往往设置较宽,这 又带来检测延迟甚至漏检风险。为此,科研人员提 出了众多自适应阈值算法。美国研究者针对航天飞 机主发动机,研制了异常和故障检测系统(System for Anomaly and Failure Detection, SAFD)<sup>[1]</sup>,该系统可根 据发动机稳态工作前几秒的测量参数,对多路参数 单独设定阈值。为改进SAFD的若干不足,朱恒伟 等<sup>[2]</sup>提出了自适应阈值算法(Adaptive Threshold Algorithm, ATA),该算法利用滑窗内样本的算数平均值 和标准差构造检测阈值。文献[3]进一步利用马氏 距离度量参数瞬时值偏离正常值的程度,将ATA由 单参数推广到多参数检测情况。针对ATA在故障情 况下带宽自动变宽的问题,谢廷峰等[4]提出了改进自 适应阈值算法(Improved ATA, IATA)。杨雪等<sup>[5]</sup>提出 用自回归(Auto Regressive, AR)模型替代ATA的滑窗 方法对均值进行估计,但是仍采用滑窗方法作为方 差估计手段。

ATA认为发动机参数均值、方差由滑窗内数据 算数平均值、标准差确定,该假设对于服从独立同 正态分布的随机变量是成立的,但是在工程实际 中,发动机数据表现为异方差性,即方差随时间波 动,ATA实际上对参数进行了平滑处理,导致该算 法不能很好地跟踪数据波动性,计算得到的阈值偏 大。也正是由于对方差估计不够精确,无法通过置 信区间设定阈值,ATA一般需要依靠工程经验对试 车数据进行统计来确定带宽系数<sup>[6]</sup>。此外,ATA如 果不剔除故障数据将导致阈值随故障数据变宽,为 了避免这种情况,需要单独设计阈值更新停止 策略<sup>[4,7]</sup>。

综上所述,自适应阈值法在波动性跟踪能力、带 宽系数设定、故障阶段阈值自适应能力方面仍具有 提升空间。针对以上问题,本文提出一种在发动机 正常工作阶段具有良好方差拟合性能,在故障阶段 阈值不随参数偏移而变宽的模型——紧广义自回归 条件异方差模型(Compact General Auto-Regressive Conditional Heteroskedasticity, CGARCH),并基于该 模型设计自适应阈值检测算法。

## 2 算法基础理论

#### 2.1 ARCH 模型概述

为了描述英国通货膨胀率中存在的方差波动性, Engle<sup>[8]</sup>于1982年提出了自回归条件异方差模型(Auto-Regressive Conditional Heteroskedasticity, ARCH), 这是一种时间序列分析方法,按下式给出

$$x_{i} = \mu_{i} + \varepsilon_{i}$$

$$\sigma_{i}^{2} = \omega + \sum_{i=1}^{q} \alpha_{i} \varepsilon_{i-i}^{2}$$

$$\varepsilon_{i} = \sigma_{i} z_{i}, \ z_{i} \sim N(0, 1)$$
(1)

式中 $\mu_i$ , $\sigma_i^2$ , $\varepsilon_i$ 为时间序列{ $x_i$ }的条件均值、条件方差、 残差; $z_i$ 为标准正态分布随机变量; $\omega$ 为常数; $\alpha_i$ 为残 差滞后项系数;q为残差滞后阶数。可以看出,若 $\omega$  = 0, $\alpha_i$  = 1/q,则ARCH模型与窗口长度为p的ATA模型 方差计算方法相同。

在实际应用中,式(1)给出的 ARCH 模型为得到 较好的拟合效果,往往需要很大的阶数q,此外还存 在自相关水平随滞后迅速消退等问题<sup>[9]</sup>。因此,实际 得到广泛应用的是 GARCH (Generalized ARCH)模 型<sup>[10]</sup>。该模型将方差视为残差平方滞后项和方差滞 后项的线性函数,可有利用较小的模型阶次取得较 好拟合效果,按下式给出

$$x_{i} = \mu_{i} + \varepsilon_{i}$$

$$\sigma_{i} = \omega + \sum_{i=1}^{q} \alpha_{i} \varepsilon_{i-i}^{2} + \sum_{i=1}^{p} \beta_{i} \sigma_{i-i}^{2}$$

$$\varepsilon_{i} = \sigma_{i} z_{i}, \ z_{i} \sim N(0,1)$$
(2)

式中β<sub>i</sub>,p为方差滞后项系数、滞后阶数。

在 GARCH 模型基础上,科学家提出了众多改进 模型<sup>[9]</sup>,其方差回归函数不限于式(2)所示的线性形 式,针对不同场合具有更强的拟合能力。

式(1)中,ARCH模型的条件均值µ,可能为常数, 也可能为随机过程,针对µ,为随机过程的情况,可采 用AR模型进行拟合<sup>[11]</sup>。AR模型是液体发动机故障 诊断中常见的时序分析手段<sup>[5,12-13]</sup>,按下式给出

$$\mu_{t} = \hat{x}_{t} = \gamma_{0} + \sum_{i=1}^{r} \gamma_{i} x_{i-i}$$
(3)

式中  $\gamma_i$ , r 为方差滞后项系数、滞后阶数。

使用 AR 模型进行估计的前提是序列不存在季 节性与趋势性,以往研究<sup>[5,12-14]</sup>表明,发动机稳态工作 段数据可以适用 AR 模型。

#### 2.2 CGARCH 模型

文献[4,7]指出,ATA存在故障阶段阈值随着参数恶化而变宽的问题,从而导致漏检。实践中发现,

如果采用式(2)所示的线性 GARCH 模型进行故障检测,虽然在正常工作段对数据波动性跟踪较好,但是 在故障阶段阈值仍随参数偏离正常区间而变宽,采 用原始 GARCH 模型对某次试车无量纲推力室氧喷 前压力(p<sub>cio</sub>)参数进行检测如图1所示。



Fig. 1 Detection on standardized data using adaptive threshold algorithm based on GARCH, obtained from offline training

分析可知,式(1),(2)中的线性回归公式将残差 平方线性累加到方差中,当残差 $\varepsilon_{i-i}$ 较大,计算得到 方差预测值 $\sigma_i^2$ 较大,导致检测带宽变大,ATA中方差 计算方法是式(1)中方差回归公式的一个特例。

针对该问题,猜想可采用对数形式的GARCH模型进行方差估计,在残差较小(对应正常工作阶段) 时保证方差拟合性能,在残差较大(对应故障)时保 证阈值不会随残差平方线性增大,如下式所示

$$x_{t} = \mu_{t} + \varepsilon_{t}$$

$$\sigma_{t}^{2} = \omega + \sum_{i=1}^{q} \alpha_{i} \ln\left(\left|\varepsilon_{i-i}\right| + 1\right)^{2} + \sum_{i=1}^{p} \beta_{i} \sigma_{i-i}^{2} \qquad (4)$$

$$\varepsilon_{t} = \sigma_{t} z_{t}, \quad z_{t} \sim N(0, 1)$$

但是,实践发现,式(4)所示的模型对方差拟合 能力不足,表现为波动性较小,分析可知这是因为取 对数运算对数据进行了平滑处理。

因此,考虑在式(4)的基础上增加各项幂次,提出紧 GARCH(Compact GARCH, CGARCH)模型, CGARCH(p,q)模型,按下式给出

$$x_{i} = \mu_{i} + \varepsilon_{i}$$

$$\sigma_{i}^{n} = \omega + \sum_{i=1}^{q} \alpha_{i} \left( \ln \left( \left| \ln \left( \left| \varepsilon_{i} \right| + 1 \right) \right| + 1 \right) \right)^{n} + \sum_{i=1}^{p} \beta_{i} \sigma_{i}^{n}$$

$$\varepsilon_{i} = \sigma_{i} z_{i}, \ z_{i} \sim N(0, 1)$$
(5)

式中n取一个较大的数以使取极限运算近似成立,但 是由于数值截断误差的影响,过大的n将导致对方差 的拟合能力减弱,经多次尝试本文取n=24。

由于  $\lim_{x \to 0} \ln(1 + x) = x$ , 当  $\varepsilon_{i-i} \to 0$  时(通常对应 正常状态), 回归公式等价于

$$\sigma_{i} = \left(\omega + \sum_{i=1}^{p} \alpha_{i} \varepsilon_{i-i}^{n} + \sum_{i=1}^{q} \beta_{i} \sigma_{i-i}^{n}\right)^{\frac{1}{n}}$$
(6)

由  $\lim_{n \to \infty} (x^n + y^n)^{\frac{1}{n}} = \max(x, y),$ 如 果  $|\varepsilon_{\iota-i}| < \sigma_{\iota-i},$ 则  $\sigma_{\iota-i}$ 对  $\sigma_{\iota}$ 贡献较大,  $\sigma_{\iota} \to \sigma_{\iota-i},$ 式(5)趋近于定方差 过程。当 $\varepsilon_{\iota-i} \to 0$ 且 $|\varepsilon_{\iota-i}| > \sigma_{\iota-i},$ 则 $\varepsilon_{\iota-i}$ 对 $\sigma_{\iota}$ 贡献较 大,式(5)趋近于GARCH过程。

当 $|\varepsilon_{t-i}|$ 较大时(通常对应故障阶段),则两次取 对数运算导致作用在 $\varepsilon_{t-i}$ 上的扰动对 $\sigma_t$ 贡献较小,预 测方差不会随残差平方增大而线性增大。因此, CGARCH模型在残差较小时保证了方差拟合性能, 并且在残差较大时保证了阈值不会随残差平方线性 增大,这一性质是基于该模型设计故障检测算法的 关键。

## 3 基于 AR/CGARCH 模型的自适应阈值算法 设计

某发动机在副系统氧涡轮燃气路设置两台燃气 阀,可对发动机混合比进行阶跃式调节。在地面试 验中,发动机性能参数在点火约20s后趋于稳定,若 发动机燃气阀作动,则发动机进入另一个工况的稳 态工作阶段。对发动机稳态工作段数据进行研究。

#### 3.1 模型训练

模型阶数和参数估计的精度直接影响到检测性能。均值估计过程中,AR模型通过偏自相关函数(PACF)进行定阶<sup>[15]</sup>,即对于给定的时间序列{*x<sub>i</sub>*},若偏自相关函数图表现为*p*阶截尾,则可以确定AR模型阶数为*p*。方差估计过程中,CGARCH利用AIC准则进行定阶<sup>[15]</sup>,经计算各测点采用CGARCH(1,1)模型就可以取得较好拟合效果。

AR模型和ARCH模型的参数估计方法有很多, 常见的方法<sup>[7,10]</sup>有极大似然估计法、最小二乘估计 法,本文采取极大似然估计法。

由于AR模型是线性模型,对变工况系统拟合效 果减弱,因此需要针对高、中、低三种工况,分别利用 稳态工作段数据训练模型。训练在离线条件下进 行,在下一次发动机试车就可以利用训练好的模型 进行故障检测。

#### 3.2 故障检测

检测阶段,首先采用AR模型对各测点时序参数 { $x_i$ }进行参数估计后,得到均值序列{ $\mu_i$ }和残差序列 { $\varepsilon_i$ },然后采用CGARCH模型计算 $\sigma_i$ 。

根据ARCH模型假设,参数 $z_i = \varepsilon_i / \sigma_i$ 服从标准正态分布,因此,可以利用标准正态分布的分位数来计

#### 算带宽系数b,从而计算得到t时刻检测阈。

图 2 给出了基于 AR/CGARCH 模型的自适应阈 值算法流程。



Fig. 2 Adaptive threshold algorithm based on AR/ CGARCH model

#### 4 试车数据分析

用某氢氧火箭发动机的14次试车数据进行离线 算法验证,其中,T01~T10为正常试车,T11~T14次试 车在稳态工作段发生故障,试后故障定位如表1 所示。

综合考虑可靠性和敏感性,选取19个发动机传 感器参数作为检测参数,如表2所示。

#### 4.1 正常试车数据的检测

根据图 2 训练 AR/CGARCH 模型,选取标准正态 分布分位数为 0.0001, 计算得到带宽系数 b<sub>0.0001</sub> = 3.719, 利用该带宽系数和估计方差计算阈值,则正常

	Table 1	Test fault dataset
Test		Fault location
T11		Turbine pump sealing ring fault
T12		Turbine pump burn
T13	Turbine disk failure	
T14		Pump blade failure

#### Table 2 Parameters for detection

Parameter	Symbol
Combustion chamber pressure	p <sub>c</sub>
Combustion chamber hydrogen pressure before injection	$p_{\rm cif}$
Combustion chamber oxygen pressure before injection	$p_{\rm cio}$
Hydrogen turbine inlet pressure	$p_{\rm itf}$
Oxygen turbine inlet pressure	$p_{ito}$
Hydrogen valve before pump inlet pressure	$p_{\rm ivf}$
Oxygen valve before pump inlet pressure	$p_{ivo}$
Gas generator hydrogen pressure before injection	$p_{\rm gif}$
Gas generator oxygen pressure before injection	$p_{\rm gio}$
Gas generator pressure	$P_{\rm g}$
Gas injector inlet pressure	$p_{ m igv}$
Hydrogen turbine inlet pressure	$p_{\rm wif}$
Oxygen turbine inlet pressure	$p_{\rm wio}$
Hydrogen pump outlet pressure	$p_{\rm ef}$
Oxygen pump outlet pressure	$p_{eo}$
Hydrogen turbine outlet pressure	$p_{\rm etf}$
Oxygen turbine outlet pressure	$p_{\rm eto}$
Hydrogen turbine rotation speed	$n_{\rm f}$
Oxygen turbine rotation speed	n

状态下,参数超过阈值的概率低于10<sup>-4</sup>。在离线环境 下对T01~T1010次正常试车数据进行检测,检测过 程未出现虚警,单参数平均单步检测用时为5.8× 10<sup>-5</sup>s。图3给出了T01次试车稳态工作段部分参数 (经无量纲化处理)的检测过程。

由图 3 可知,本文提出的自适应阈值法在对象阈 值能够较好地动态跟随参数变化,并且没有产生误 检测。

#### 4.2 异常试车数据的离线检测

用 AR/CGARCH 模型对 T11, T13, T14次发生故 障的试车数据进行离线检测。其中, T11次试车在主 级 93~98s发生涡轮泵密封环脱落故障, 98s后参数恢 复正常。T13次试车在 302s参数大幅下降, 试后分析 为涡轮盘振动破坏导致的突变型故障。T14次试车 在发生故障破坏前有一个缓慢的参数恶化过程, 73s 参数缓慢下降, 290s参数大幅下降, 试后定位在诱导 轮叶片疲劳断裂。图 4~6 给出了这三次典型故障 (T11为故障后恢复, T13为突变型故障, T14为缓变 型故障)的参数检测结果。



由图 4~6 可以看出,本文提出的自适应阈值算法 对三种典型故障进行有效检测,没有发生误检。其 中,针对图 4发生故障后恢复的情况,稳态参数在恢复 后略有偏差,但是算法仍然对参数波动性进行有效跟 踪。针对图 5突变故障的情况,由于阈值紧跟参数波 动水平,且带宽较窄,该算法能够降低检测延迟。

针对T14缓变故障情况,图7给出了无量纲氧泵 后压力(p<sub>eo</sub>)残差绝对值与检测带宽的曲线。当250s









后稳态参数发生微弱变化时,残差绝对值变大,但是 阈值没有随参数恶化而线性放大,因此该算法可以 对缓变故障进行有效检测。 **(s)** 

为了量化评价本文方法,对T11~T14次试车用红 线、ATA方法、本文方法进行故障检测。其中,红线 法采用该型发动机紧急关机条件,ATA采用文献[7] 中的带宽系数确定方法和阈值更新停止策略。由于 三次试车故障均与涡轮泵相关,用三种方法对氧泵 后压力参数进行检测,比较其检测时间,结果如表3 所示。

 Table 3
 Detection time of three methods

Test	Redline	ATA	Algorithm proposed
T11	—	93.31	93.17
T12	191.15	188.92	188.90
T13	302.19	302.15	302.15
T14	290.83	290.74	250.18

由表3可知,对于T11故障后恢复情况,由于参数没有触碰红线,红线法失效,本文方法和ATA方法均可以进行有效检测,本文方法优于ATA。对于T12和T13突变故障,由于性能参数没有任何征兆,本文方法和ATA方法检测时间相当,均优于红线法。对于T14缓变故障情况,ATA方法由于采用阈值停止更新策略不能完全避免故障数据污染模型,导致检测时间与红线法相近;本文方法可在参数出现微弱偏移时就检测出故障,较ATA方法领先了40.56s。

#### 5 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)在发动机正常工作状态下,该模型可以对方 差进行精确预测,有效跟踪参数波动性,使用较窄的 带宽进行检测,从而减小了检测延迟与虚警风险;在 故障阶段,可以避免阈值随参数变宽带来的漏检;针 对缓变故障,该方法敏感性优于ATA方法。

(2)由于对均值和方差进行了精确建模,该算法 可采用置信区间法确定带宽系数,不需要依赖工程 经验与历史数据调整设定带宽。

#### 参考文献

[1] OReilly D. System for Anomaly and Failure Detection (SAFD) Development[R]. NASA-CR-193907, 1993.

- [2]朱恒伟,王克昌,陈启智.液体火箭发动机地面试车 故障检测的自适应阈值算法[J].推进技术,2000,21
  (1):1-4.(ZHU Heng-wei, WANG Ke-chang, CHEN Qi-zhi. Adaptive Thresholds Algorithm for Fault Detection of Liquid Rocket Engine in Ground Test[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(1):1-4.)
- [3] 朱恒伟,王克昌,陈启智.液体火箭发动机地面试车 故障检测的自适应相关方法[J].导弹与航天运载技 术,1998,3:19-24.
- [4] 谢廷峰,刘洪刚,黄强,等.液体火箭发动机地面 试车实时故障检测算法[J].航天控制,2008,26(1): 74-78.
- [5] 杨 雪,张振鹏,向世勇,等.基于自回归模型的自适应阈值算法[J].航空动力学报,2005,20(6): 1088-1092.
- [6]朱恒伟,王克昌,陈启智.基于数据统计的液体火箭 发动机地面试车故障检测算法[J].推进技术,1997, 18(1):43-46.(ZHU Heng-wei, WANG Ke-chang, CHEN Qi-zhi. A Statistic Approach to Fault Detection of Liquid Rocket Engine in Ground Test[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(1):43-46.)
- [7] 李艳军.新一代大推力液体火箭发动机故障检测与诊断关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
- [8] Engle R F. Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of U.K. Inflation [J]. Econometrica, 1982, 50: 987-1008.
- [9] 张世英,柯 珂. ARCH 模型体系[J]. 系统工程学报, 2002, 17(3): 236-245.
- [10] Bollerslev T. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity[J]. Journal of Economics, 1986, 31: 307-327.
- [11] 程晋军.基于 AR/ARCH 模型的结构非线性损伤识别 [D].重庆:重庆大学,2017.
- [12] Fiorucci T R, Lakin D R, Reynolds T D. Advanced Engine Health Management Applications of the SSME Real-Time Vibration Monitoring System[R]. AIAA 2000-3622.
- [13] 吴建军,张育林,陈启智.液体火箭发动机基于时序 分析的实时在线故障检测算法[J].航空动力学报, 1996,11(3):289-293.
- [14] 邓 晨.氢氧补燃发动机故障诊断算法设计及验证 [D].北京:中国运载火箭技术研究院,2020.
- [15] 易丹辉,王 燕.应用时间序列分析(第5版)[M].北 京:中国人民大学出版社, 2019.

(编辑:朱立影)