

独立分量分析在液体火箭发动机故障检测中的应用*

任海峰,胡小平,魏鹏飞,吴建军

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 针对液体火箭发动机试车中,因噪声干扰、不同源信号之间的混叠而造成的信号信噪比低、信号分析和特征提取难度大的问题,提出采用独立分量分析(ICA)法对液体火箭发动机试车信号进行分离,以提高信号的信噪比,并能实时反映各子系统工作过程,为数据分析、特征提取和故障检测与诊断提供可靠的信号。通过对某型液体火箭发动机热试车压强信号进行实例分析,验证了该方法的有效性。

关键词 液体推进剂火箭发动机;独立分量分析;盲源分离;故障检测

中图分类号:V211 文献标识码:A

Independent Component Analysis for Fault Detection of the Liquid Propellant Rocket Engine

REN Hai-feng, HU Xiao-ping, WEI Peng-fei, WU Jian-jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The experimental data analysis, feature extraction, fault detection and diagnosis are focuses in recent rocket engine study. However, in practice, because of noises and the mixing of signals due to different components, the signal-to-noise ratio(SNR) is always low, so the signal analysis and the feature extraction are quite difficult. This results in the difficulty of fault detection and diagnosis. By applying independent component analysis(ICA) to the separation of source signals from mixed signals, high quality signals have been extracted for further studies. The example reveals this method is very effective.

Key words liquid propellant rocket engine; independent component analysis; blind source separation; fault detection

由于液体火箭发动机系统复杂,工作环境恶劣,各部件参数之间耦合紧密,因而很难建立精确模型,实验研究十分重要。热试车则是试验研究的最重要的手段。试车数据分析、故障检测与诊断水平,直接关系到实验研究的进展和火箭发动机的发展。然而,热试车信号信噪比低,信号分析和特征提取、故障检测与诊断的难度大。采用独立分量法分析实际测量的混合信号,获取源信号,为热试车数据分析和故障诊断提供可靠信息,在理论研究与工程应用方面均具有重要的意义。

1 独立分量分析的原理

在实际工程中,观测信号一般为混合信号,通常源信号是未知的,其混合过程也是不明确的,因此混合信号分离就是“盲源分离”问题。盲源分离技术是用来提高信噪比,保障故障诊断准确性和可靠性的重要手段,独立分量分析是盲源分离问题最主要和最有效的方法之一^[1]。

假定混合信号 $X = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ 是由未知的源信号 $S = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)\}$ ($m \leq n$) 线性组合而成,则可用矩阵形式表示如下:

$$X = AS \quad (1)$$

其中, X 为混合信号矩阵; A 为混合系数矩阵(A 为满秩矩阵, $\det A \neq 0$); S 为源信号矩阵。可以通过求解 A 的逆矩阵 A^{-1} (习惯上记为 W), 得到源信号 S , 即:

$$S = WX \quad (2)$$

* 收稿日期:2003-09-23
基金项目:国家 863 高技术资助项目
作者简介:任海峰(1978—),男,硕士生。

独立分量分析的理论实质是一个最优化问题,其目的是通过估计 W 来获得 S ,使得各源信号之间的独立性最强。

2 快速 ICA 算法

快速独立分量分析算法利用源信号统计独立的条件,可以从混合的观测信号中分离出源信号。当输入的源信号统计独立时,分离得到的各分量之间也应相互独立。以系数矩阵的负熵最大为判据估计 W ,并用迭代法求解,从而分离出源信号,实现盲源分离。下面利用信息论中的互信息和负熵的概念,建立判断 y_i 互相独立的判据。

设随机向量 $y(t)$ 的概率密度为 $p(y)$,其各分量 $y_i(t)$ 的概率密度为 $p(y_i)$,信号 $y(t)$ 的熵为:

$$H(y) = - \int p(y) \log p(y) dy \quad (3)$$

$y(t)$ 和各分量之间的互信息为:

$$I(y_1 \dots y_m) = \sum_{i=1}^m H(y_i) - H(y) = \int p(y) \log \frac{p(y)}{\prod_{i=1}^m p(y_i)} dy \quad (4)$$

如果 $y(t)$ 的各分量之间互相独立,即

$$p(y) = \prod_{i=1}^m p(y_i) \quad (5)$$

则 $y(t)$ 和各分量之间的互信息为零,即 $I(y_1 \dots y_m) = 0$ 。

定义 y_i 的负熵:

$$J(y_i) = H(y_{gauss}) - H(y_i) \quad (6)$$

由负熵的定义,显然 $J(y_i) \geq 0$,当 y_i 具有高斯分布时, y_i 的负熵为零。当 $y(t)$ 的各分量 y_i 互不相关时,互信息可表示为^[3]:

$$I(y_1 \dots y_m) = J(y) - \sum_{i=1}^m J(y_i) \quad (7)$$

如果 $y(t)$ 的各分量 y_i 互相独立,则它们的互信息为零, y_i 的负熵取得极大值,计算负熵涉及到各分量的高阶统计量,而估计三阶以上统计量的计算量较大,为此对负熵进行近似计算^[3]:

$$J(y_i) = \{E\{G(y_i)\} - E\{G(y_{gauss})\}\}^2 \quad (8)$$

其中 y_{gauss} 是与 y_i 具有相同方差的高斯随机变量。近似负熵的特点是在每个输出分量之后逐分量地加上一个非线性环节 $G(y_i)$ 来取代高阶累积量的计算^[2]。 $G(y_i)$ 取为非二次型函数时,通过自适应学习可使 $y(t)$ 逼近于 $s(t)$ 。

设 w 为分离矩阵 W 的一列向量, x 是已经白化处理的数据,具有零均值和单位协方差,将 $y_i = w^T x$ 代入式(8)得:

$$J(w^T x) = \{E\{G(w^T x)\} - E\{G(y_{gauss})\}\}^2 \quad (9)$$

由此可得到 ICA 的负熵判据:寻找 w^* ,使 $y_i = w^{*T} x$ 的负熵取得极大值,就获得了一个独立分量 $s_i(t) = y_i(t)$ 。由式(9)知, $w^T x$ 负熵的极大值相当于 $E\{G(w^T x)\}$ 的极大值。在约束 $E\{w^T x\} = \|w\|^2 = 1$ 下,构造如下目标函数:

$$F(w) = E\{G(w^T x)\} + \lambda(\|w\|^2 - 1)^2 \quad (10)$$

现求 w 使得 $F(w)$ 取极大值,因此有:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(w) &= \frac{\partial F(w)}{\partial w} = E\{xG'(w^T x)\} + 2\lambda(\|w\|^2 - 1)w \\ &= E\{xg(w^T x)\} - \beta w = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

使用牛顿迭代法解方程(11),得解 w 的迭代公式

$$u(k+1) = u(k) - \mathcal{J}(u(k))/\mathcal{J}'(u(k)) \quad (12)$$

其中:

$$f'(u(k)) = E\{xx^T g'(w^T x)\} - \beta I \quad (13)$$

$$\beta = E\{w^T x g(w^T x)\} \quad (14)$$

为提高算法的稳定性,在迭代公式中加入学习步长 μ ,得迭代算法:

$$u(k+1) = u(k) - \mu f(u(k)) / f'(u(k)) \quad (15)$$

根据迭代公式(15),就可递推求得 w ,进而获得一个独立分量 $S = w^T x$ 。

3 算法的改进

由于火箭发动机压强信号并非简单地线性叠加,所以非线性因子 $\alpha(y_i)$ 的选取对分离结果影响很大。通过研究证明,火箭发动机燃烧室压强信号的峰度为正值,则火箭发动机燃烧室压强信号符合超高斯信号的特征。经过验证,选取非线性因子:

$$\alpha(y_i) = y_i + \tan k(ay_i) \quad (1 \leq a \leq 2) \quad (16)$$

比文献[2]中取 $\alpha(y_i) = \tan k(y_i)$ 更适合。此外,算法本身也有些缺点,由于分离矩阵 W 是估计得出的,所以 S_i 的顺序不确定,信号幅值正负可能反向。又因为实测压强信号曲线形状相似,造成分离前后信号对应关系不明确。针对以上问题,本文引入相关系数:

$$\text{Corrcoef}(s_i, y_j) = \text{cov}(s_i, y_j) / \sqrt{[\text{cov}(y_j, y_j) \text{cov}(s_i, s_i)]} \quad (17)$$

$$\text{cov}(x_1, x_2) = E[(x_1 - \mu_1)(x_2 - \mu_2)] \quad (\mu_i = E(x_i)) \quad (18)$$

采用了进一步的判断准则:

(1) 相似准则:由源信号与实测信号求相关系数,相关系数最大的认为相互对应;

(2) 拒判准则:如出现两个以上(含两个)的源信号与某个实测信号对应,或者源信号对某个实测信号相关系数差异小于给定常数 C ,则重新执行快速 ICA 算法。

4 实例分析

4.1 发动机模型

采用某火箭发动机推力室热试数据进行实例分析。针对火箭发动机结构复杂、工况恶劣、精确模型建立困难、参数变化大、数据特征不明显和数据分析困难的特点,结合独立分量分析要求,建立推力室简化模型如图1所示。其中, P_f 为燃料喷前压强, S_f 为燃料喷前压强源信号。氧化剂是由氧气和空气在混合腔混合后,进入燃烧室,其中 P_m 为氧化剂(混合气体)喷前压强, S_m 为氧化剂(混合气体)喷前压强源信号; P_c 为燃烧室压强, S_c 为燃烧室压强源信号(由燃烧等因素引起)。

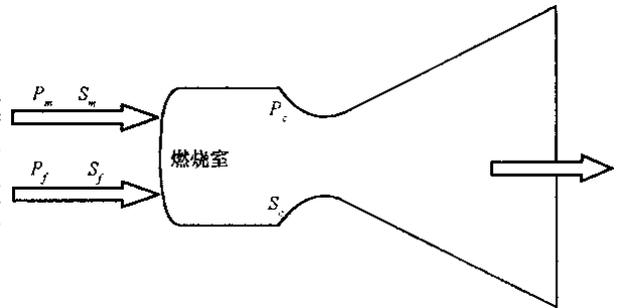


图1 推力室简化模型

Fig.1 Thrust chamber model

4.2 盲源分离实例

以某次试车数据为例进行分析,实验测量信号与独立分量分析分离出的信号如图2、图3所示,算法程序运行了2.832s(Celeron^(TM)633MHz CPU,128MB RAM),远小于数据长度4.6875s(每条曲线有1200个数据采样点),实时性较好。

计算了分离前后的信噪比,如表1所示。

表1 实测的混合信号与源信号的信噪比(SNR) [dB]

Tab.1 SNRs of mixed signals by measurement and source signals by ICA

P_f	S_f	P_m	S_m	P_c	S_c
2.1161	6.1009	9.0102	14.9619	2.1275	4.8847

可以看出分离出的源信号比实测的混合信号信噪比有明显提高。对比图2、图3,证明了该方法的有

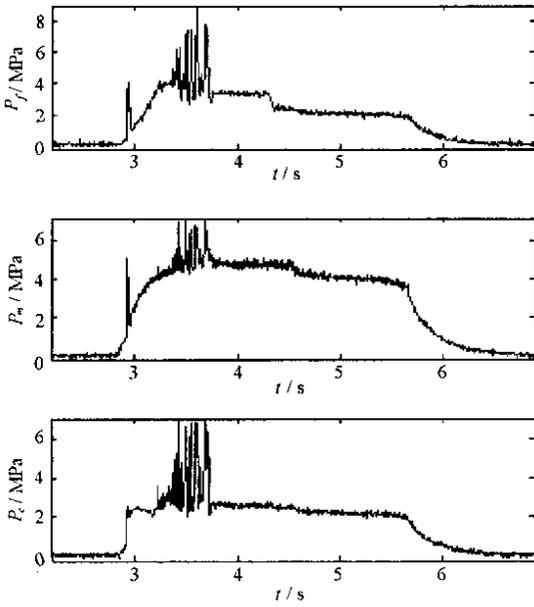


图2 实测压强信号

Fig.2 Mixed signals by measurement

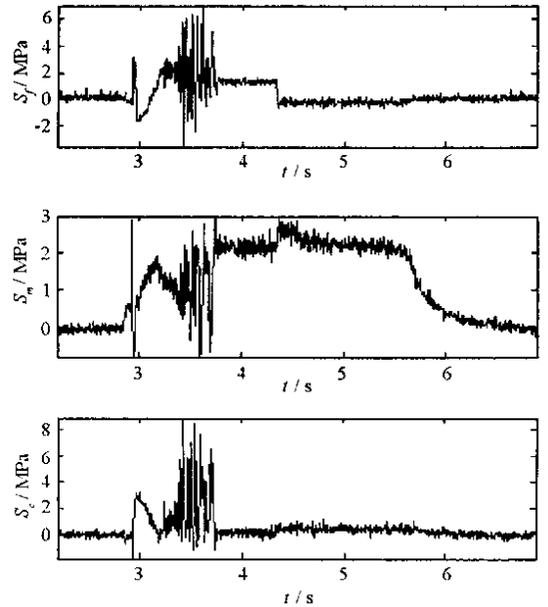


图3 ICA分离出的源信号

Fig.3 Source signals by ICA

效性。实验测量信号是由分离的各源信号混叠而成的,而独立分量分离出的源信号反映了更多信息。2.85s 打开阀门喷注推进剂,源信号 S_f 、 S_m 、 S_c 比实验测量信号 P_f 、 P_m 、 P_c 更清楚地反映了开阀时的冲击及充填过程中测压点压强波动的情况。3.2s 点火,由燃烧室压强源信号 S_c 可知,在点火后立即发生了爆轰。4.3s 关闭了燃料阀门,而此现象在实测信号中并不直观。此后 4.3s 至 6.5s 实测压强曲线有次高平稳段后下落,在源信号曲线图中可以明确得知,是由氧化剂压强源信号引起。此阶段燃料已切断,燃烧也已结束,燃烧室压强源信号已回落,而实测信号并不能明确显示此信息。试验记录显示,在关机时关闭了燃料阀和氧气阀,空气阀最后关闭,所以上述现象是由继续通入空气引起的, S_c 曲线在此阶段略有上升,也证明了这一点,说明燃烧结束后,在 4.3s 至 6.5s 时段仍有气体通入,使得室压略有上升,未降到点火前水平。而 S_f 曲线并无此段,意味着该段不是由燃料端引起,进一步说明了该方法的有效性,而在测量信号中并没有直观地反映出这些信息。

通过独立分量分析,从测量信号中分离出源信号。各源信号再现了子系统的工作状况。例如,本例中氧化剂喷前压强源信号 S_m 充分反映了氧化剂供应系统的工作细节; S_f 、 S_c 则分别反映了燃料供应系统和燃烧室的工作细节,各子系统的故障特征集中体现在与该系统对应的源信号上,因此有利于简化故障分类,为热试车分析和故障诊断提供了有价值的参考。

5 结论

通过实例分析,证明了独立分量分析(ICA)方法应用于此类问题的有效性,较为清晰地再现了源信号,较大幅度地提高了信号的信噪比,并能反映各子系统工作过程的细节,为数据分析和故障诊断提供了高质量的信息。该方法有利于简化故障分类,方便了分析和诊断过程,具有较好的实时性,可应用于火箭发动机试车结果的分析与故障的监测与诊断。

参考文献:

- [1] 张海军,温广瑞,屈梁生.一种提高诊断信息质量的方法[J].西安交通大学学报,2002,36(3):295-299.
- [2] Hyvärinen A,Oja E.Independent Component Analysis: Algorithms and Applications[J].Neural Networks,2000(3):411-430.
- [3] Hyvärinen A,Oja E.A Fast Fixed-point Algorithm for Independent Component Analysis[J].Neural Computation,1997(9):1483-1492.

