

飞机压力加油系统管道泄漏检测方法研究

周瑞祥, 苏新兵

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:提出基于最小阶非线性观测器的设计方法,通过对管路两端点处的压力流量在线采集处理,运用状态解耦技术,选择适当的状态线性变换方式,有效地分离出反映管路中间节点状态的残差数值,进而对非线性状态方程序列生成相应的系统残差集,以达到对管内泄漏的有效定位。该方法在飞机压力加油系统地面模拟试验中成功地进行了验证,得到了较为满意的结果。

关键词:压力流量;泄漏检测定位;残差集;状态解耦

中图分类号:V21;TH137 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)06-0007-03

近几十年来,管道传输方式在天然气及燃料输送过程中发挥着不可替代的作用,在航空方面,飞机液压传动及燃油传输过程中也不无例外的要依赖于管路传输,且由于在飞机上安装部位的限制,很多导管及其接头部位对仪器和维护人员来说均是不可达,而腐蚀、振动、冲刷及焊缝缺陷等原因引起的管道泄漏,以及法兰盘、螺纹扣、管接件连接部位的泄漏正变得日益严重。液压油的泄漏会导致飞行操作失效,严重影响到飞行安全,而燃油的泄漏更是易于引起火灾爆炸事故,管道泄漏问题对环境及公众安全造成十分巨大的危害,解决该问题已成为一项国际性的课题^[1]。

1 管路简化模型

针对长度为 L 的导管,忽略管道中流体的压缩性、逆向流动及导管膨胀的影响,设其中流体(液压油、燃油)的密度及管径均为常数,将导管划分为 n 段,则管路沿程最大泄漏位置数量为 $l = n - 1$,沿管路流动方向上,可列出以下反映流动特性的压力流量动态关系的非线性方程:

$$\begin{cases} \dot{Q}_i = a_1(P_i - P_{i+1}) - \mu Q_i |Q_i| \\ \dot{P}_i = a_2(Q_i - Q_{i+1} - \lambda_i \sqrt{P_{i+1}}) \end{cases} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

式中: P_i 、 Q_i 代表在第 i 处泄漏位置上的压力、流量, λ_i 是泄漏大小及位置的表征, b 为油液传递音速。式(1)

中各系数为 $a_1 = \frac{gA}{\Delta z}$, $a_2 = \frac{b^2}{gA\Delta z^2}$, $\mu = \frac{f}{2DA}$ 。首末端点处压力作为系统控制量,流量为输出量,并引入式(2)为

残差评估集。其目的是为了将泄漏 λ_i 分离出来,从而设法从二者之间找出泄漏大小及位置的表征^[2],并可以从中发掘出 λ_i 变换是由干扰还是泄漏故障现象而引起。本文所研究的对象是飞机燃油管道,鉴于其管路相对较短,且每一组油箱通油仅始末端可测,故可将其导管分为3段,共考虑4组压力流量参数。该系统最多可检测出在同一段管路上同时发生两处泄漏现象^[3],模型简图见图1。状态方程见式(3)。

$$R_i = [\lambda_1 \dots \lambda_{i-1}, \lambda_{i+1} \dots \lambda_{n-1}] \quad (2) \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu - \mu n_i(x) - a_i n_f(x, \lambda) \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = [Q_1, P_2, Q_2, P_3, Q_3]^T$ 为状态变量, $u = [P_1, P_4]^T$ 为输入变量, y 为系统输出状态,方程中的线性化部分的矩阵 A 、 B 、 C 分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} a & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

其余系数分别为 $n_1(x) = [x_1^2 \ 0 \ x_3^2 \ 0 \ x_5^2]^T$, $n_{fj}(x, \lambda) = [0 \ \lambda_1 \sqrt{x_2} \ 0 \ \lambda_2 \sqrt{x_4} \ 0]^T$

2 残差生成及泄漏定位方法

λ_i 为未知参数,需在线估计,状态方程中的非线性项又可表达为

$$\begin{cases} n_{fj}(x, \lambda) = E_i \bar{R}_i + K_i \bar{\lambda}_i & (i=1, 2) \\ \bar{\lambda}_i = \lambda_i \cdot \sqrt{x_{2 \times i}} \end{cases} \quad (4)$$

$K_1 = E_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $K_2 = E_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$. 式(3)在融入式(4)后,其泄漏特性必然与 $i=1$ 或 2 中的一种相关连。但从状态方程中

看,每一状态在实际操作过程中均有可能既与 λ_1 又与 λ_2 有关,这种耦合现象对于确定的泄漏区间及位置判定带来一定难度。有鉴于此,本文提出通过线性变换方法来消除部分或全部耦合现象,该方法的核心技术是引入新的状态 $Q_1 + Q_1$ 和 $Q_i - Q_n$, 从而实现线性部分的 λ_i 进行子空间解耦,使新状态独立于泄漏数量,只对 λ_i 系数中的一个有关。这也意味着某位置处的泄漏对系统输出(流量 Q_1 及 Q_n) 产生的增减作用,在子空间集成解耦过程中发挥着十分重要的作用。下面给出针对式(3)、(4)所确定模型的线性解耦方法^[4-5]

1) 在 $i=1$ 的情况下,把泄漏 $\bar{\lambda}_1$ 看作是噪声干扰时,其大小及其变化对 $x_2 = P_2$ 有直接的影响,而对 x 状态向量中的其它变量无直接的影响,间接的影响是通过变量间的相互耦合而形成。

2) 从系统输出方程 $y = Cx$ 中提取出 $y_1 = Q_1$, 由于 $\bar{\lambda}_1$ 泄漏而引起的流量增减变化作为新的状态: $z_1 = Q_1 + Q_2 = x_1 + x_3$, 及 $z_2 = Q_1 - Q_2 = x_1 - x_3$ 基于新的状态变量,管路非线性模型见式(5)。

3) 提取状态参数 (z_1, x_4, x_5) , 可以发现这三个参数成功地实现了从 $\bar{\lambda}_1$ 中解耦,而且它们对参数 $\bar{R}_1 = \bar{\lambda}_2$ 敏感。鉴于此,不妨建立式(6)子空间状态方程。以 (u_1, u_2, y_1) 为输入, $y_n = x_5$ 为输出,该模型可用来集成仅对 $\bar{\lambda}_2$ 敏感而对 $\bar{\lambda}_1$ 鲁棒的残差。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\mu z_1^2 + 2\mu y_1 z_1 + a_1(u_1 - x_4) - 2\mu y_1^2 \\ \dot{z}_2 = -\mu z_1 z_2 + a_1(u_1 + x_4) - 2a_1 x_2 \\ \dot{x}_2 = a_2 z_2 - a_2 \bar{\lambda}_1 \\ \dot{x}_4 = a_2(z_1 - y_1) - a_2 x_5 - a_2 \bar{R}_1 \\ \dot{x}_5 = -\mu x_5^2 + a_1(x_4 - u_2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\mu z_1^2 + 2\mu y_1 z_1 + a_1(u_1 - x_4) - 2\mu y_1^2 \\ \dot{x}_4 = a_2(z_1 - y_1) - a_2 x_5 - a_2 \bar{R}_1 \\ \dot{x}_5 = -\mu x_5^2 + a_1(x_4 - u_2) \end{cases} \quad (6)$$

4) 上述子空间显然具备可检测性,同样也是可观的,利用该可观子空间来设计状态观测器,以计算对 $\bar{\lambda}_2$ 灵敏的残差值。此处,类似于固定增益、自适应观测器和高增益方法可供使用。

5) 采用与上同样的方法对 $i=2$ 时的第二个泄漏 $\bar{\lambda}_2$, 流量的增加与减少与第二段相应位置上的边界泄漏有关,新状态记为 $z_1 = Q_2 + Q_3 = x_3 + x_5$ 及 $z_2 = Q_2 - Q_3 = x_3 - x_5$, 其解耦子空间状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\mu x_1^2 + a_1(u_1 - x_2) \\ \dot{x}_2 = a_2(x_1 + y_2) - a_2 z_1 - a_2 \bar{\lambda}_2 \\ \dot{z}_1 = -\mu z_1^2 + 2\mu z_2 z_1 + a_1(x_2 - u_2) - 2 - \mu y_2^2 \end{cases} \quad (7)$$

(u_1, u_2, y_2) 为输入, $y_n = x_1$ 为输出,该模型可用来集成仅对 $\bar{\lambda}_1$ 敏感而对 $\bar{\lambda}_2$ 鲁棒的残差。

以上介绍的线性变换残差生成方法成功与否,关键取决于状态参数对 (A, C) 是否可观^[3]。基于此方法的残差生成器应用到模型基观测器,得到对 $\bar{\lambda}_i$ 的估计 $r_i = y_n - \lambda_n$ 。

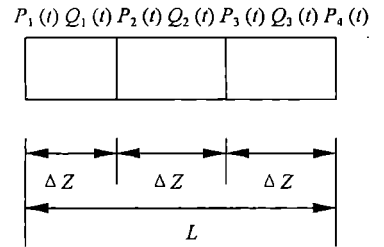


图1 管路参数分布原理图

3 试验仿真和结论

选取飞机5号油箱地面加装压力加油管道为研究对象,从加油接头到油箱入口的管道总长为28 m,其管道内径为42 cm,由于受到飞机上结构改装有效空间的限制,管路走向多处出现折弯现象,在该段管路上有多达8个胶连及5个法兰盘,相应对密封的要求较高。加油接头处设置有压力传感器和涡轮流量传感器,油箱入口处也设置有动压传感器和加油控制活门,可以在线监测管路始末端的状态。管路系统的工作条件为入口压力不高于0.345 MPa,各管道内油液流速不高于1.034 m/s^[6],结合管路及控制系统机上改装前的地面模拟试验,对本文提出的泄漏检测方法进行实验研究,将研究管段分成与原理图1相应的三段来考虑,模拟设置两处泄漏点分别位于管路的7 m和15 m处,并分别在加油压力流量正常进行过程中的2 min 30 s和4 min 30 s分别打开开关1和2模拟泄漏发生,

实验管路稳态流量为520 L/min,泄漏处流量从5 L/min开始由小到大每次增加1 L/min逐步变化,油液传播波速为1200 m/s,油液密度为870 kg/m³,采用上节提出的残差生成方法,通过现场采集总线和计算机终端处理,当泄漏量达到8 L/min(即不到2%)时即可得到如图2所示的残差变化曲线,从图中看出 λ_1 与 λ_2 分别对第二处和第一处泄漏敏感,而对其本身所对应的泄漏具有强鲁棒性,这与线性变换解耦分析的结论是相吻合的,且泄漏检测效率相对较高,适用于本文提出的加油系统。

本文采用状态空间线性转换方法,提出针对飞机燃油管道泄漏检测及故障定位的策略,通过对管路入口及出口处的压力流量在线采集处理,运用状态解耦技术,选择适当的坐标变换方式,有效地分离出反映管路中间节点状态的残差数值,并从中定位出相应的泄漏管段,模拟泄漏故障试验验证了分析结论的正确性。

参考文献:

- [1] Zhang Jun. Designing a Cost-effective and Reliable Pipeline Leak-detection System[J]. Pipes&Pipelines International, 1997, (1-2):26-31.
- [2] Billman L. Leak Detection Methods for Pipelines[A]. 9th IFAC World Congress[C]. Singapore, 1984.
- [3] Wang Guizeng. Leak Detection for Transport Pipelines Based on Autoregressive Modeling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42:68-70.
- [4] 涂亚庆,陈华波. 输油管道的泄漏检测与参数采集系统[A]. Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Hefei P R China, 2000.
- [5] 何永森,刘邵英. 机械管内流体数值预测[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [6] GJB716. 1986飞机燃油系统通用规范[S].

(编辑:姚树峰)

Study of Pipeline Leak Detection of Aircraft Ground Pressure Fueling System

ZHOU Rui-xiang, SU Xin-bing

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: A new design approach based on the minimal order nonlinear observer is presented to detect and locate leaks in complicated pipelines, since the measurements of pressure and flow are realizable only at the two extremes of the ducts, the state decoupling technology is utilized in generating the residual values and an appropriate method of linear coordinate transformation is selected. Then the residual sets are attained according to a series of state equations, which are sensitive to the leak set. Finally the performance of the approach is demonstrated by using the experimental data taken from the airplane refueling pipelines with leaks, and satisfactory results are obtained.

Key Words: pressure and flow; leak detection and location; residual set; state decoupling

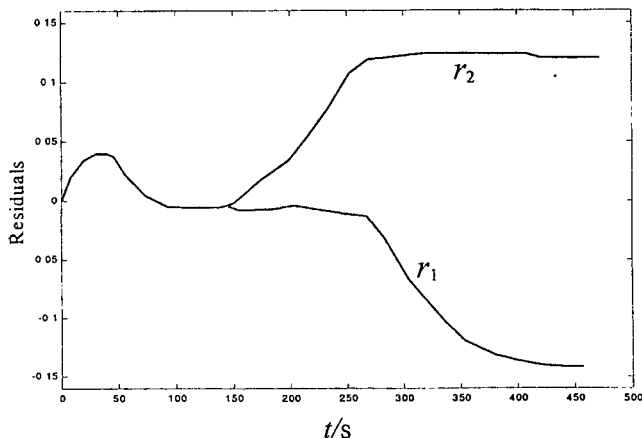


图2 残差估计值随时间变换的曲线