

模糊规则集在发动机故障诊断中的应用*

黄敏超 陈启智

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 基于模糊规则集度量,提出了一种故障诊断系统。提取模糊规则分两步实现:(1)由训练样本自适应形成超球子空间,可望解决高维空间的识别问题;(2)计算每个子空间上模糊规则的信任度。对模糊规则的概念进行了拓展,以便解决模糊规则之间的矛盾。仿真研究表明:模糊规则集度量可以用于液体火箭发动机的故障诊断。

关键词 液体推进剂火箭发动机,故障诊断,模糊集,模糊匹配

分类号 V434

Fuzzy Rule Sets Approach to Engine Fault Diagnosis

Huang Minchao Chen Qizhi

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Based on the fuzzy measuring of fuzzy rule sets, a scheme system used for fault diagnosis is proposed in this paper. The extraction of fuzzy rules involves two steps: (1) the whole space of the trained data is adaptively divided into subspaces in the form of hypersphere. It is probable to solve the problems of recognition in the high dimension space. (2) A fuzzy rule in each subspace is generated and confidence of each fuzzy rule calculated. We extend the conception of the traditional fuzzy rule for the purpose of resolving the contradictions among the generated fuzzy rules. The simulation research has shown that the fuzzy measuring of the fuzzy rule sets can be used for the fault diagnosis of the liquid rocket engine.

Key words liquid propellant rocket engine, fault diagnosis, fuzzy set, fuzzy matching

故障诊断是指故障状态的检测、故障模式的识别以及故障程度的预测的总称。文献

* 1996年9月23日收稿

[1] 在这方面做了一次很好的概念设计, 它应用航天飞机主发动机的故障数学模型产生残差序列, 然后基于神经网络分类器对残差序列进行识别处理, 以得到发动机的故障类型和故障程度。这篇文献分析了氧化剂预燃室氧化剂阀和燃料预燃室氧化剂阀未全打开故障, 获得了比较好的诊断结果。但文献对诊断逻辑描述不详, 考虑故障只有两种, 需要进一步验证所提故障检测与诊断结构的可实现性。文献 [2] 基于故障参数估计方法对传感器衰减和偏移故障、调节器泄漏和未全打开故障进行了仿真研究, 得到一定的诊断结果。但没有具体分析故障程度的预测问题, 而且假定只有一种传感器、调节器或自身部件故障发生, 因此这篇文献的故障诊断方法也有待进一步深入研究。可见, 国外故障诊断的研究局限于实验室范围, 离工程应用还有一定的距离。为了提高我国推进系统的可靠性, 本文在发动机故障诊断的研究方面做了一次尝试, 以期推动发动机健康监控的发展。

1 产生模糊规则集

1.1 样本空间

有一些研究者预先划分每维样本空间, 然后在每个子空间里确定一条模糊规则, 但这种划分方法形成的模糊规则数目太大。例如, 对于 7 维空间的诊断问题, 每维若等分为 6 份, 将形成 7^6 个子空间, 即产生 117649 条模糊规则。因此这种划分方法不适合于高维空间的识别问题, 并且有些子空间根本没有样本分布, 见图 1 (a) 中二维空间示意。有鉴于此, 本文根据每类样本空间的实际分布情况, 提出了一种样本空间的自适应分割方法, 采用由球心 $O_j^T = (O_{j1}, O_{j2}, \dots, O_{jm})$ 和半径 r_j 决定的可变超球代表子空间范围, 如图 1 (b) 所见, 可望有效地解决高维空间的诊断问题。

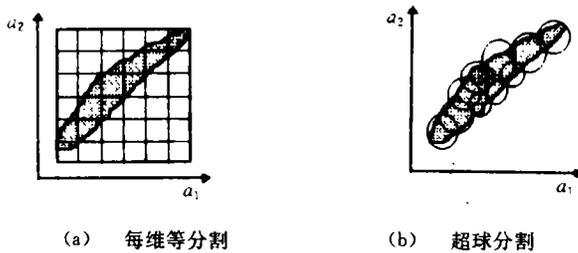


图 1 二维样本空间的分割举例

设训练集 D 由一系列样本对 $\{A_k, d_k, q_k\}$ 构成, 其中 A_k 是输入向量, $d_k \in \{1, 2, \dots, P\}$ 是故障模式索引, q_k 是领域专家评价映射 $f: A_k \rightarrow d_k$ 的强度指标。对于某一样本对 $\{A_k, d_k, q_k\} \in D$, 若要同类超球 H_j 扩张到包含 A_k , 必须满足以下条件限制。

$$\|A_k - O_j\| < \theta \text{ 且 } \|A_k - O_j\| > V_j$$

式中, θ 是超球扩张阈值, 由用户选定。若上式成立, 则超球 H_j 的球心和半径调整公式为

$$r_j^{\text{new}} = \frac{1}{2} (\|A_k - O_j^{\text{old}}\| + r_j^{\text{old}})$$

$$O_j^{\text{new}} = O_j^{\text{old}} + (r_j^{\text{new}} - r_j^{\text{old}}) (A_h - O_j^{\text{old}}) / \|A_h - O_j^{\text{old}}\|$$

隶属函数 $u_j(A_h)$ 用于度量输入样本 A_h 与超球 H_j 之间的相似关系。当输入样本 A_h 的空间位置远离超球 H_j 时, 隶属函数 $u_j(A_h)$ 接近等于 0; 当 A_h 的空间位置靠近超球 H_j 时, $u_j(A_h)$ 约等于 1; 当超球 H_j 包含这点时, $u_j(A_h) = 1$ 。因此超球隶属函数可以定义为

$$u_j(A_h) = \exp(\min(0, r(r_j - \|A_h - O_j\|)))$$

式中, 灵敏参数 r 反映输入样本 A_h 远离超球 H_j 时, 它们之间的隶属度降低速率。

1.2 拓展规则概念

超球 H_j 采用集合方式可表示为

$$H_j = \{X \mid \|X - O_j\| \leq r_j\}$$

在以往的理论研究和工程应用中, 一个子空间只代表一种模式, 即

$$R_j^i: \text{如果 } A_h \in H_j, \text{ 则 } A_h \text{ 属于类 } i$$

或考虑到规则的最大信任度, 可以产生一条模糊规则。

$$R_j^i: \text{如果 } A_h \in H_j, \text{ 则 } A_h \text{ 以最大隶属度 } \beta \text{ 属于类 } i$$

在此拓展了规则概念——虽然规则前提相同, 但推理结果可能是任何一种模式, 只是每种结果成立的信任度不同而已。采用规则形式语言描述为

$$\beta_{j1} \text{ 属于类 } 1$$

$$R_j: \text{如果 } A_h \in H_j, \text{ 则 } A_h \text{ 以隶属度 } \quad \quad \quad :$$

$$\beta_{jp} \text{ 属于类 } p$$

式中, β_{ji} ($j=1, 2, \dots, m, i=1, 2, \dots, p$) 是模糊规则 R_j 推出模式 i 的信任度。

1.3 模糊参考规则集

每个模糊参考规则集由 m 个超球子空间上的 m 条规则元素构成, 用规则信任度表示为

$$S_i = \frac{\beta_{1i}}{R_1} + \frac{\beta_{2i}}{R_2} + \dots + \frac{\beta_{mi}}{R_m}, i = 1, 2, \dots, P$$

式中, β_{ji} 是模糊参考规则集 S_i 的规则元素 R_j 的信任度, 也就是模糊规则 R_j 推出模式 i 的信任度, 其计算公式为

$$\beta_{ji} = \text{mean}_{h \in \text{class } i} \mu_j(A_h) q_h, j = 1, 2, \dots, m$$

其中, q_h 是领域专家对第 h 个样本对的评价指标。对于好的数据分配高的隶属度, 对于比较坏的数据分配比较低的隶属度。如果只想强调客观性, 设置评价指标恒等于 1 即可。

1.4 模糊待检规则集

模糊待检规则集是由模糊规则提取子块在线学习获得, 用于代表当前的工作状态。模糊待检规则集也是由 m 个超球子空间上的 m 条规则元素构成, 其规则信任度的表示形式为

$$S = \frac{\beta_1}{R_1} + \frac{\beta_2}{R_2} + \dots + \frac{\beta_m}{R_m}$$

其中, β_j 是模糊待检规则集 S 的规则元素 R_j 的信任度。在学习时, 预先开了大小为 dn 的滑动数据窗。 β_j 等于滑动数据窗中所有数据点与超球 H_j 之间的隶属度的平均值, 即

$$\beta_j = \text{mean}_{h=1}^{dn} \mu_j(A_h), j = 1, 2, \dots, m$$

2 模糊故障诊断

模糊故障诊断系统包括模糊规则提取子块、模糊参考规则集、模糊待检规则集、模糊规则集度量子块及诊断逻辑子块五个部分。模糊规则提取子块利用系统工作参数抽取模糊规则，以便在离线学习过程形成模糊参考规则集和在线学习过程形成模糊待检规则集。系统工作正常或发生某种故障的可能性由模糊待检规则集与模糊参考规则集的度量结果确定。诊断逻辑子块进一步对模糊规则集度量过程输出的确信度进行处理，以便自动判断发动机的工作状态。

3 仿真研究

模糊参考规则集考虑了6种发动机工作状态——正常状态、氧化剂主活门未全打开、燃料主活门未全打开、氧化剂泵汽蚀、燃料泵汽蚀和副系统氧化剂管路阻塞。输入向量由燃烧室压力、燃气发生器压力、泵的转速、燃烧室氧化剂喷前压力、燃料主导管分支处压力、氧化剂泵入口压力和燃料泵入口压力7个发动机工作参数构成。选用了30组随机模拟数据来训练模糊参考规则集。扩张阈值 θ 选为0.025，灵敏参数 γ 选为8.0，发动机专家的强度评价指标恒等于0.99。经过学习共形成209个超球子空间，即每个模糊规则集由209条规则元素构成。

表1中第2行是发动机正常工作状态的检测结果。仿真结果表明，检测阈值曲线紧靠在正常确信度曲线下，故障检测结果是发动机工作正常。

氧化剂和燃料主活门不同打开度数的随机模拟数据的故障诊断结果参见第3~6行。故障诊断系统对每组模拟数据都预报了故障且分离出故障类型。随着主活门打开度数越来越小，故障程度值也越来越小。主活门打开度数越低（完全打开为 90° ），敏感度越高，说明故障诊断系统对严重故障更加敏感。

氧化剂泵汽蚀的模拟数据的诊断结果位于行7、8。故障程度值很小，说明泵汽蚀故障引起的发动机故障特征非常明显：氧化剂泵汽蚀故障比主活门未全打开故障的敏感度大。

燃料泵汽蚀的模拟数据的故障诊断结果位于行9、10。故障程度值仍然很小，敏感度同样较大，说明燃料泵汽蚀的发动机故障特征同样明显。

第11、12行是副系统氧化剂管路阻塞的诊断结果。流阻系数越大，故障程度值越小，敏感度越大。副系统氧化剂管路阻塞故障引起的故障特征相对泵汽蚀故障弱一些。

第13行是氧化剂喷注器阻塞的模拟数据的诊断结果。这是一种故障诊断系统事先不认识的发动机故障类型，但故障诊断系统仍然能预报故障存在，并把它归为未被认识的发动机故障类型。因此本文提出的故障诊断方法对环境有一定的弹性应变能力。

表1 模拟故障的诊断结果

数据代号	工作模式设置 (1s 时刻加故障)	检测时间	故障程度	分离时间	故障模式序号*	敏感度
out3	正常				0	

outda3	氧化剂主活门打开 68. 5°	1. 16	0. 4531	1. 20	1	1. 7291
outdall	氧化剂主活门打开 51. 5°	1. 08	0. 3334	1. 20	1	1. 9776
outfa5	燃料主活门打开 46. 5°	1. 17	0. 6253	1. 20	2	1. 5223
outfa9	燃料主活门打开 36. 5°	1. 07	0. 4703	1. 31	2	1. 6124
outgal	氧化剂泵汽蚀修正系数为 0. 85	1. 02	0. 0187	1. 19	3	2. 8991
outga3	氧化剂泵汽蚀修正系数为 0. 65	1. 02	0. 0123	1. 23	3	3. 0386
outhal	燃料泵汽蚀修正系数为 0. 875	1. 03	0. 0224	1. 20	4	3. 3151
outha3	燃料泵汽蚀修正系数为 0. 830	1. 02	0. 0180	1. 26	4	3. 6710
outj4	30 倍流阻系数	1. 14	0. 4670	1. 20	5	1. 6519
outj12	110 倍流阻系数	1. 11	0. 3798	1. 20	5	1. 8350
outl5	50 倍流阻系数	1. 04	0. 1159	1. 20	不认识	3. 9136

* 序号 0, 1, 2, 3, 4, 5 分别代表正常情况、氧化剂主活门未全打开、燃料主活门未全打开、氧化剂泵汽蚀、燃料泵汽蚀和副系统氧化剂管路阻塞。

4 结论

(1) 根据训练样本实际分布自适应划分样本空间, 可能是解决高维空间识别问题的有效途径之一。样本空间自适应划分可以粗略形成故障分离的非线性边界, 相对固定划分能节省大量的计算机内存。

(2) 对模糊规则概念的拓展, 可以很好解决模糊规则之间的矛盾。拓展的模糊规则不仅适合于故障诊断领域, 而且可以应用于自动控制、信号处理、语音识别和图像处理等领域。

(3) 模糊规则集可以有效代表发动机工作状态的征兆, 并能方便融合发动机传感器测量所得的数值信息和发动机专家的经验知识。

(4) 模糊规则集度量方法的编程实现比较复杂、计算费用相对较高, 但其输出结果非常稳定。因此模糊规则集度量方法适合于发动机故障离线诊断。

参 考 文 献

- 1 Duyar A and Merrill W. Fault Diagnosis for the Space Shuttle Main Engine. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1992, 15 (2): 384~389
- 2 Duyar A et al. Fault Detection and Diagnosis in Propulsion System: A Fault Parameter Estimation Approach. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17 (1): 104~108

(责任编辑 石少平)