

基于SVM-MD的船用柴油机喷油器健康状态评估

报告人：朱腾飞

导 师：费红姿

电 话：18846136585

邮 箱：ztf950312@163.com

哈尔滨工程大学 能源与动力工程学院





文章结构

- 0 引言
- 1 柴油机燃油喷射系统健康状态评估方案
 - 1.1 仿真模型的建立
 - 1.1.1 仿真系统建模
 - 1.1.2 仿真模型验证
 - 1.2 健康状态评估方案
- 2 故障特征参数提取与识别
 - 2.1 信号采集与压力波动参数特征提取
 - 2.1.1 信号采集
 - 2.1.2 压力波动参数特征提取
 - 2.2 基于LIBSVM的喷油器工况模式识别
- 3. 喷油器健康状态评估
 - 3.1 喷油器健康状态评估体系
 - 3.1.1 健康状态等级划分
 - 3.1.2 健康状态等级划分标准
 - 3.2 基于MD的喷油器健康状态量化评估
 - 3.3 结果分析
- 4 结论
- 参考文献：





1 柴油机燃油喷射系统健康状态评估方案

1.1

仿真模型的建立

1.1.1

仿真系统建模

1.1.2

仿真模型验证

1.2

健康状态评估方案

§ 1.1 仿真模型的建立

1.1.1

仿真系统建模

文章采用AMESim软件对4缸船用柴油机高压共轨燃油喷射系统进行仿真建模，主要包括高压油泵、共轨管、喷油器及电子控制单元(ECU)等模块，具体仿真系统模型结构如下图1所示。

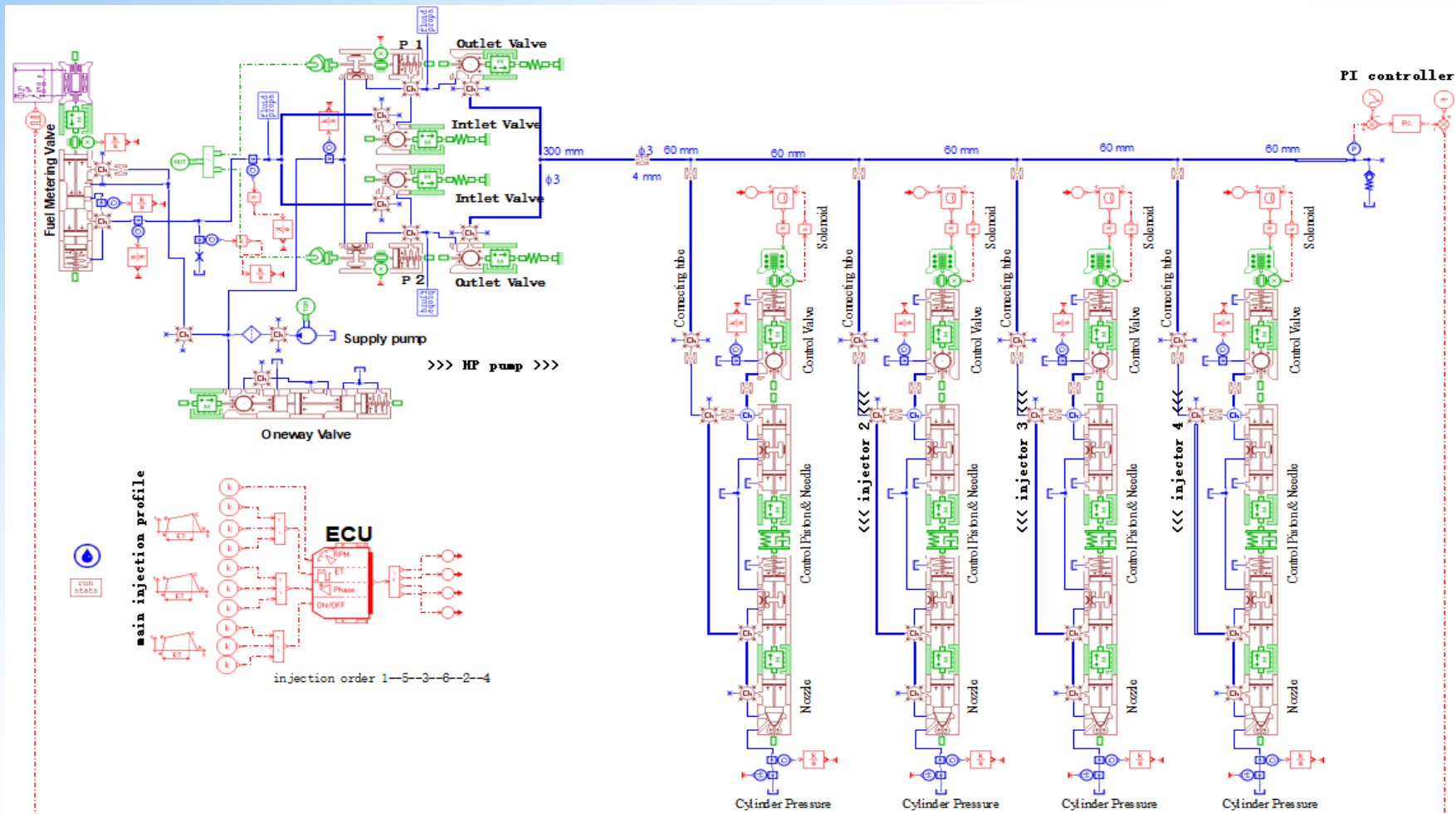


图1 柴油机高压共轨燃油喷射系统仿真系统模型

§ 1.1 仿真模型的建立

1.1.2

仿真模型验证

为了验证仿真模型的准确性和可靠性，文章在轨压为40MPa、60MPa、100MPa及喷油脉宽为0.18ms至2.48ms的区间按照一定的间隔选取一系列工况点进行实验与仿真，然后将实验数据与仿真数据进行对比分析，下图2为不同工况点的喷油量实验值与仿真值的对比曲线图。

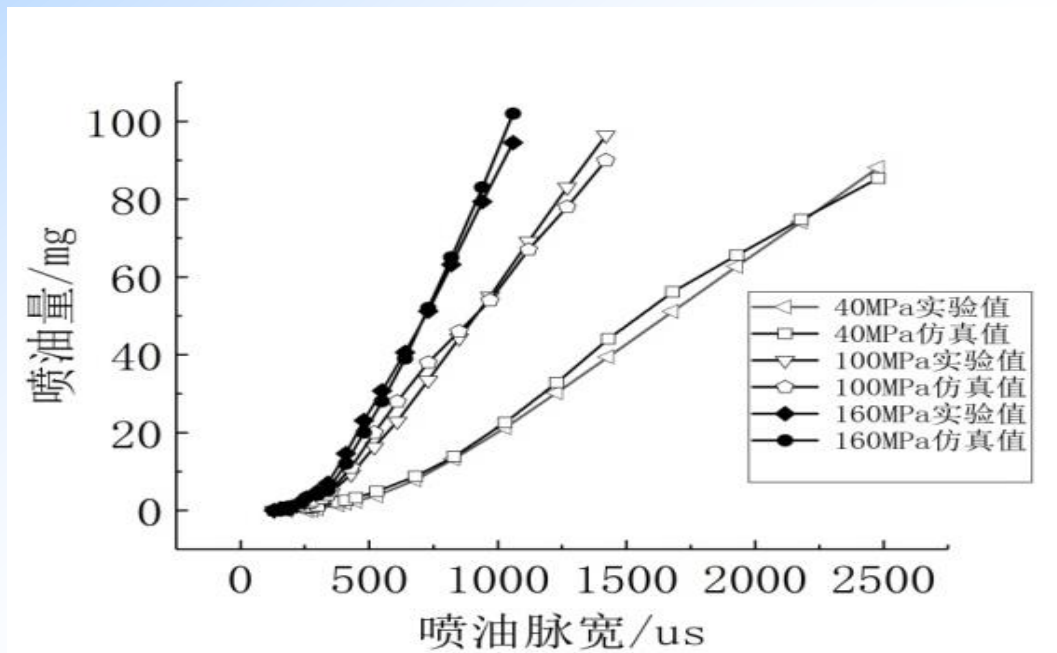


图2 仿真与实验的喷油量对比

可以看出仿真值与实验值**总体变化趋势一致**，仿真数据与实验数据**吻合度较高且最大偏差为9%**，在可接受范围之内。

§ 1.2 健康状态评估方案

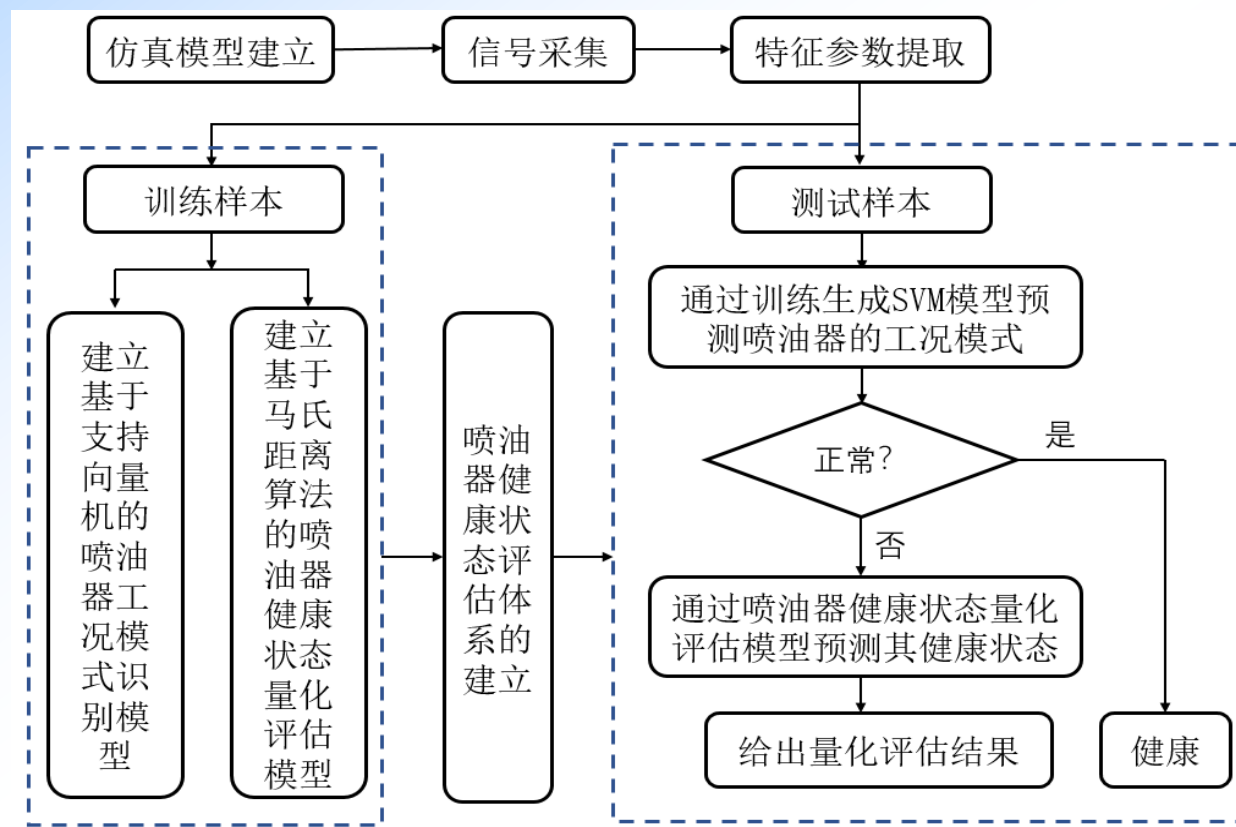


图3 基于SVM-MD的柴油机燃油喷射系统健康状态评估方案

2

故障特征参数提取与识别

2.1

信号采集与压力波动参数特征提取

2.1.1

信号采集

2.1.2

压力波动参数特征提取

2.2

基于LIBSVM的喷油器工况模式识别

§ 2.1 信号采集与压力波动参数特征提取

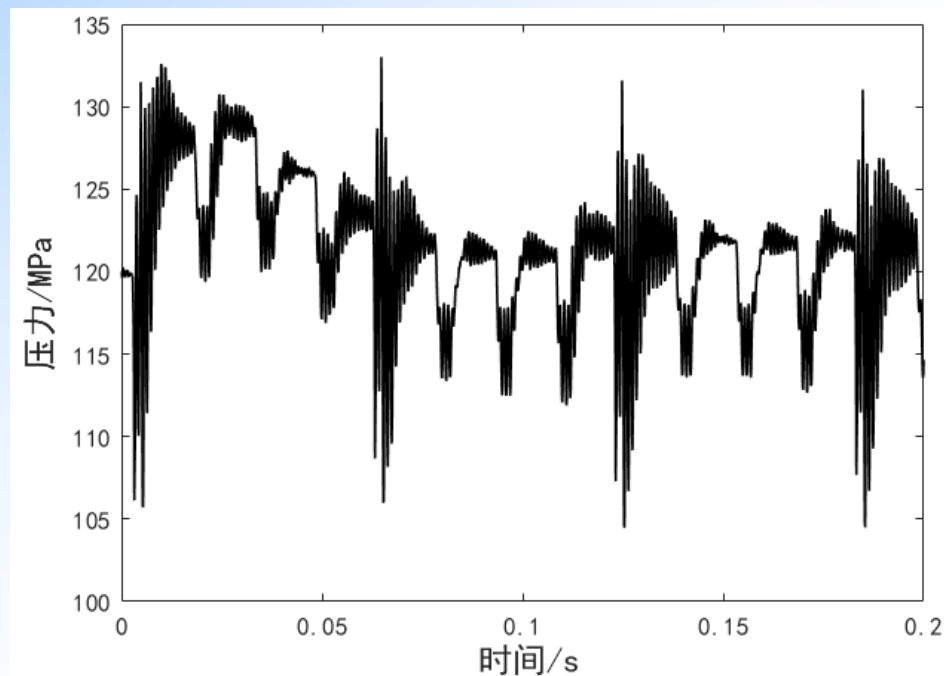
2.1.1

信号采集

分别采集喷油器正常、喷孔堵塞异常以及针阀与针阀孔导向面磨损异常工况对应的不同轨压下的高压油管压力信号，采样频率10000HZ, 采样时长0.2s，共采集170组数据，将140组作为训练样本，30组作为测试样本。

2.1.1

信号采集



左图为轨压120MPa时采集的的喷油器正常工况下的高压油管压力信号。

图4 正常高压油管压力信号

§ 2.1 信号采集与压力波动参数特征提取

2.1.2

压力波动参数特征提取

文章采用时域分析常用5个无量纲统计参数作为提取的特征参数：波形因子、脉冲因子、峰值因子、裕度因子以及峭度因子。

表 1 高压油管压力信号特征提取数据

工况	轨压/MPa	峰值	均方根	波形因子	脉冲因子	峰值因子	裕度因子	峭度因子
正常	101	1058.5	1037.6	1.0008	1.0209	1.0201	1.0213	1.0060
	105	1096.5	1074.8	1.0007	1.0209	1.0202	1.0213	1.0058
	110	1144.5	1121.4	1.0007	1.0213	1.0206	1.0217	1.0055
	115	1192.8	1168.2	1.0007	1.0217	1.0210	1.0221	1.0053
	120	1239.8	1215.1	1.0007	1.0210	1.0204	1.0214	1.0051
喷孔堵塞异常	101	1062.4	1045.9	1.0007	1.0164	1.0157	1.0167	1.0052
	105	1100.5	1083.2	1.0006	1.0166	1.0160	1.0169	1.0051
	110	1147.0	1129.7	1.0006	1.0160	1.0154	1.0163	1.0048
	115	1194.4	1176.2	1.0006	1.0160	1.0154	1.0163	1.0046
	120	1242.6	1223.0	1.0006	1.0166	1.0160	1.0169	1.0045
针阀与针阀孔 导向面磨损异常	101	1055.7	1040.3	1.0007	1.0154	1.0148	1.0158	1.0053
	105	1092.8	1077.1	1.0007	1.0152	1.0146	1.0156	1.0052
	110	1141.7	1123.5	1.0006	1.0169	1.0162	1.0172	1.0050
	115	1190.3	1170.1	1.0006	1.0179	1.0173	1.0182	1.0049
	120	1238.3	1216.8	1.0006	1.0183	1.0177	1.0186	1.0048

§ 2.2 基于LIBSVM的喷油器工况模式识别

文章采用台湾大学林智仁教授等开发的LIBSVM算法工具箱，选取的分类SVM类型为C-SVC，选取的核函数为径向基函数(RBF)。并采取Grid-Search交叉验证的方法寻找最佳参数(C, g)，设定的误差允许值 $\text{eps}=10^{-4}$ 。

表 2 SVM 模型输出结果

工况模式	输出结果/k
正常	1
喷孔堵塞异常	2
针阀与针阀孔导向面磨损异常	3

3

喷油器健康状态评估

3.1

喷油器健康状态评估体系

3.1.1

健康状态等级划分

3.1.2

健康状态等级划分标准

3.2

基于MD的喷油器健康状态量化评估

3.3

结果分析



§ 3.1 喷油器健康状态评估体系

3.1.1

健康状态等级划分

当喷油器发生喷油异常故障时，文章用喷孔的堵塞及针阀与针阀孔导向面的磨损来评价喷油器的健康状况，将喷油器的健康状况分成健康、亚健康、劣化、恶化与病态五个健康状态等级，并根据不同的健康状态提出不同的调整或维修意见。

表 3 喷油器健康等级划分

等级	健康状态	健康状况描述
I	健康	性能完好，无须进行维护
II	亚健康	性能受损，不影响正常使用，长期运行须加强监控
III	劣化	性能损坏加重，影响正常使用，应及时考虑采取调整维护措施
IV	恶化	性能损坏严重，严重影响正常使用，应尽快采取调整维护措施
V	病态	不能运行，应立即停机检修或更换

3.1.1

健康状态等级划分标准

喷油器喷孔堵塞时，文章以以堵塞面积比，即堵塞面积占整个喷油器喷孔总面积的比例，作为喷油器健康状态等级划分依据；针阀与针阀孔导向面磨损时，以针阀导向面磨损厚度作为喷油器健康状态等级划分的依据。具体划分标准见下表4。

表 4 各健康状态等级划分标准

健康状态	堵塞面积比	导向面磨损厚度/mm
正常	0%	0
良好	0%~15%	0~0.1
注意	15%~30%	0.1~0.2
恶化	30%~50%	0.2~0.3
病态	>50%	>0.3

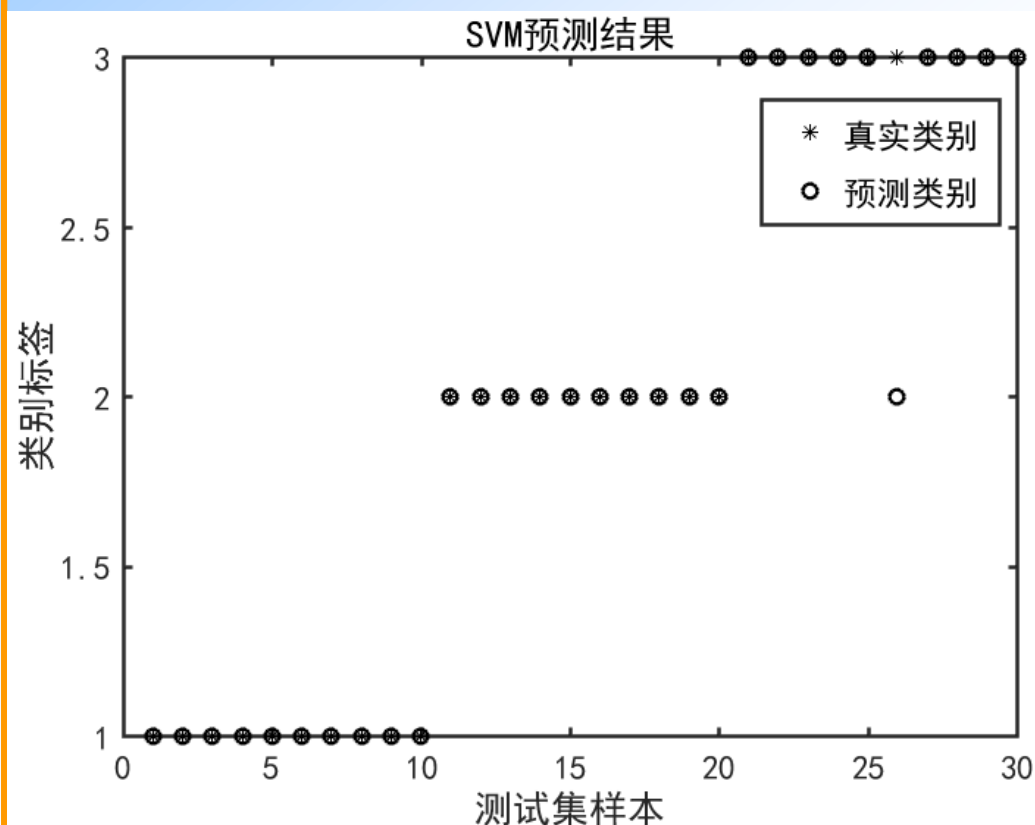
§ 3.2 基于MD的喷油器健康状态量化评估

当SVM分类模型输出喷油器的工况模式为异常时，文章通过求测试样本与正常样本集之间的马氏距离并归一化为健康指数进而量化表示出喷油器的健康状态

$$H_{MD} = 1 - \frac{\arctan(MD + b) - \arctan b}{\pi / 2 - \arctan b}$$

式中， H_{MD} 为健康指数， MD 为测试样本与正常样本集之间的马氏距离， b 为调节参数，不同工况有不同的取值

§ 3.3 结果分析



由图可知，对喷油器工况模式的预测结果与真实情况基本相符，预测准确率达到了96.7%。

图5 测试样本预测结果

§ 3.3 结果分析

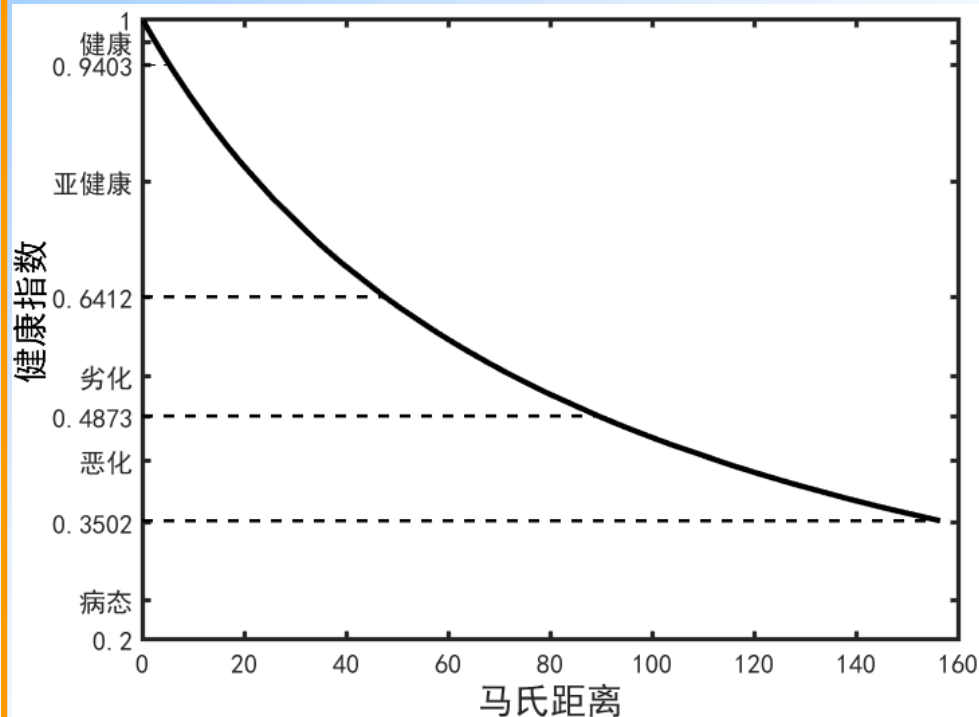


图6 (a) 喷油器喷孔堵塞异常

当SVM输出喷油器工况模式为喷孔堵塞异常时，依据图6 (a) 可对喷油器健康状态做量化评估。

表5 喷孔堵塞异常时喷油器健康指数范围

喷孔健康状态	健康指数范围
健康	$0.9403 < H_{MD} < 1$
亚健康	$0.6412 < H_{MD} < 0.9403$
劣化	$0.4873 < H_{MD} < 0.6412$
恶化	$0.3502 < H_{MD} < 0.4873$
病态	$H_{MD} < 0.3502$

§ 3.3 结果分析

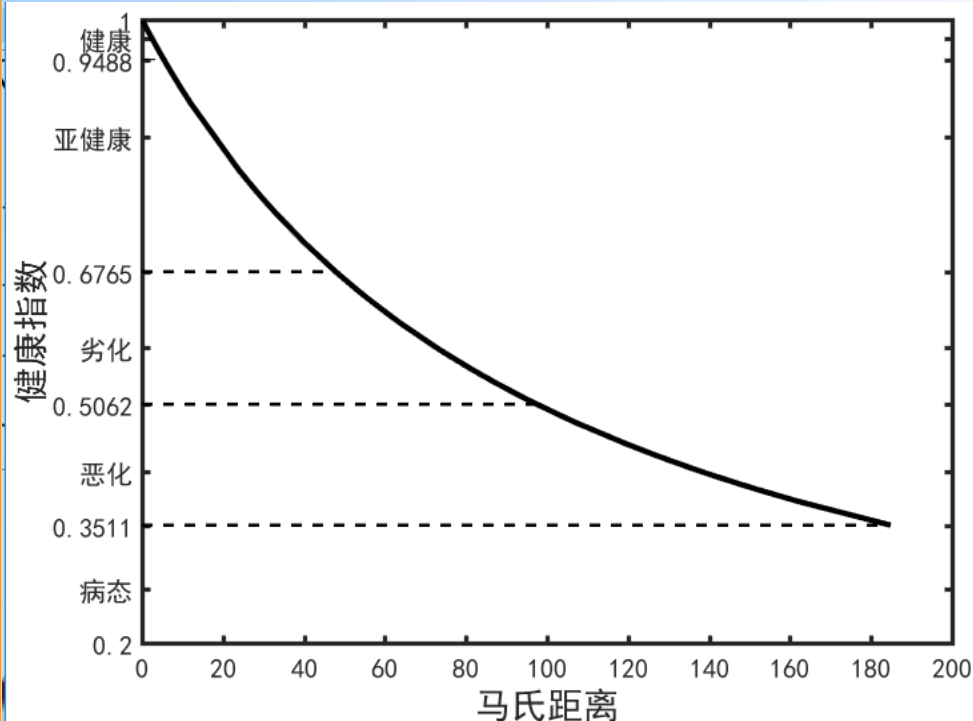


图6 (b) 喷油器针阀与针阀孔导向面磨损异常

当SVM输出喷油器工况模式为针阀与针阀孔导向面磨损异常时，依据图6 (b) 可对喷油器健康状态做量化评估。

表6 针阀与针阀孔导向面磨损异常时喷油器健康指数范围

喷孔健康状态	健康指数范围
健康	$0.9488 < H_{MD} < 1$
亚健康	$0.6765 < H_{MD} < 0.9488$
劣化	$0.5062 < H_{MD} < 0.6765$
恶化	$0.3511 < H_{MD} < 0.5062$
病态	$H_{MD} < 0.3511$

4

结论

- 依据提取的5个常用无量纲特征参数，并用Grid-Search交叉验证的方法寻找最佳参数(C, g)，根据此方法训练生成的LIBSVM分类机模型能对喷油器的工况模式做出比较精准的预测，准确度可达到96.7%，能满足实际工程需求；
- 利用马氏距离算法，能在LIBSVM分类机模型判断出喷油器异常工况的前提下，还能判断其偏离正常工况的程度，并根据训练生成的喷油器健康状态量化评估模型，以健康指数的方式表示出喷油器健康状态，给出量化评估结果。



THANK YOU

