

# 基于VQ的高速列车闸片温度状态监测方法

邓小军<sup>1a,2</sup>, 阚佳钰<sup>1b,1c</sup>, 曹源<sup>1b,1c</sup>, 李强<sup>1a</sup>

(1.北京交通大学 a.机械与电子控制工程学院,b.轨道交通运行控制系统国家工程研究中心,  
c.电子信息工程学院,北京 100044;2.南车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111)

**摘要:**提出了一种利用矢量量化(VQ)算法对列车闸片温度进行状态监测的新方法.根据不同闸片温度序列设置模式库中的参考样本,进行数据训练和闸片温度数据识别与预处理,对高速列车闸片温度数据与各个参考样本进行相似性度量,最终根据VQ的思想求出欧氏距离,从而得到检测结果.结果表明:该方法误报漏报率低,响应时间快,有效消除列车闸片温度跳变的影响,能够满足高速列车闸片温度状态监测的实时性和准确度要求.

**关键词:**车辆工程;高速列车;闸片温度;矢量量化;状态监测

**中图分类号:**U270.35 **文献标志码:**A

## Condition monitoring method of high-speed train brake pad temperature based on vector quantization

DENG Xiaojun<sup>1a,2</sup>, KAN Jiayu<sup>1b,1c</sup>, CAO Yuan<sup>1b,1c</sup>, LI Qiang<sup>1a</sup>

(1a. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering,

1b. National Engineering Research Center of Rail Transportation Operation and Control System,

1c. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 10044, China;

2. CSR Qingdao Sifang Co., LTD., Qingdao Shandong 266111, China)

**Abstract:** A method of condition monitoring of train brake pad temperature based on vector quantization (VQ) is presented. The data training was based on different temperature sequences of brake pad, the reference samples in pattern library is set up, and then the data of brake pad temperature are identified and preprocessed, the high-speed train brake pad temperature data are compared with reference samples by similarity measurement. The Euclidean distance according to vector quantization programming is calculated, and the diagnosis results are obtained. Results show that the method has a low rate of false alarm and a fast response time. It also can eliminate the influence of noise and jump. The method can meet the requirements of high-speed train brake pad temperature monitoring in real-time and accuracy.

**Key words:** vehicle engineering; high-speed train; brake pad temperature; vector quantization; condition monitoring

随着列车速度的提高,对保证高速列车安全行驶至关重要的基础制动装置的安全保障措施提出了

更加苛刻的要求<sup>[1]</sup>. 尤其高速列车进行制动时,会产生大量热能,较大的温度梯度会产生热应力<sup>[2]</sup>;

收稿日期:2015-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305021, U1334211, U1234205);国家高新技术研究发展计划项目资助(2015BAG12B01)

作者简介:邓小军(1971—),男,重庆人,教授级高工,博士生.研究方向为高速列车故障监测与诊断. email: sf-dengxiaojun@cqsf.com.

通讯作者:曹源(1982—),男,河南开封人,副教授,博士生导师.研究方向为高速列车故障监测与诊断. email: ycao@bjtu.edu.cn.

而制动盘摩擦副内部常常不可避免存在一定的缺陷,不均匀温度和应力的循环作用会产生微裂纹,在热疲劳<sup>[3-4]</sup>等因素的作用下扩展到一定程度,制动盘及闸片就会发生疲劳断裂,这会影响到车辆的安全,甚至造成巨大的人身伤害和财产损失.因此,通过比较分析状态监测关键参数,提前发现高速列车制动装置的异常状态,对保证列车行车安全提供参考.

由于闸片温度探测<sup>[5]</sup>设备受空气介质、周围环境、车型,以及行驶中车体晃动等因素的影响,使得检测与监控难度增加,检测误报漏报率高,严重影响行车效率.因此需要寻找一种有效的方法来处理高速列车运行中可能出现的异常闸片温度数据.

目前国内外关于闸片温度状态检测方法的研究较少,文献[6]提出了一套机车闸片性能检测装置设计方法,对监测装置进行惯性飞轮组的设计,通过工控机与PLC之间通信,实现对PLC软元件的直接访问,从而实现对闸片性能的检测.文献[7]提出了一种机车制动盘温度采集的系统方法,就是将采集的数据与建立的有限元模型仿真结果比对,但是温度传感器端面到制动盘表面存在一定距离,测量数据存在干扰,并且由于传感器的滞后,测量数据也存在延时,使得一般的智能检测方法无法很好的适用于这套系统.

矢量量化(VQ)技术<sup>[8-9]</sup>是20世纪70年代后期发展起来的一种数据压缩和编码技术,它不仅可以压缩表示语音参数所需的数码率,而且在减少运算量方面也是非常高效的.作为一种聚类工具同时也在模式识别和机器学习领域得到了广泛应用.文献[10]针对当前钢水连铸下渣检测系统成本高、困难安装等问题,提出了一种基于VQ技术的钢水下渣检测方法,把振动信号作为基本检测信号,通过VQ技术对经过预处理的实时信号进行特征提取、码本训练,实现了钢水状态检测.文献[11]将有限状态VQ应用于语音端点检测,改善了信噪比较低及判别门限不稳定的情况.根据语音帧间相关性,所提出VQ的改进算法能够有效得到准确的语音起止点.文献[12]提出一种基于学习VQ的运动目标检测算法,通过训练样本,算法自适应地确定区分运动目标和背景的阈值向量,有效抑制了背景亮度变化对运动目标检测的干扰,能够准确检测出运动目标.文献[13]设计了一套适合实车不解体的发动机故障诊断新系统,通过采集发动机排气噪声,对发动机不同状态下排气噪声信号进行VQ分析,为发动机故障诊断系统设计提供了一条新途径.

目前,VQ技术并未在铁路相关领域得到广泛

应用,由于闸片温度监测与诊断是一个典型的模式识别问题,因此本文作者提出了一种基于VQ的监测与故障诊断方法,将经典的VQ技术应用于高速列车闸片温度状态监测上.

## 1 VQ原理

VQ的设计可以表述为给定一个已知向量集合、失真测度和码本的大小,对应找到一个码本使得已知向量集合的平均失真最小.

假设有 $M$ 个 $K$ 维特征矢量 $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ ( $\mathbf{X}$ 在 $K$ 维欧几里得空间 $\mathbf{R}^K$ 中),其中第 $i$ 个矢量可记为 $\mathbf{X}_i = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ , $i = 1, 2, \dots, M$ .假定 $N$ 为码本大小,即码本中码字的数量,码本为 $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\}$ ,第 $i$ 个码字为 $\mathbf{Y}_i = \{y_1, y_2, \dots, y_K\}$ , $i = 1, 2, \dots, N$ .

令 $S_n$ 为码字 $\mathbf{Y}_n$ 对应的子空间,且满足:

$$\begin{cases} \bigcup_{n=1}^N S_n = \mathbf{R}^K \\ S_i \cap S_j = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

上述过程即组成了一个矢量量化器 $Q$ ,若 $\mathbf{X}_m$ 在子空间 $S_n$ 中,则量化矢量即为 $C_n$ ,即

$$Q(\mathbf{X}_m) = \mathbf{Y}_n, \quad \mathbf{X}_m \in S_n \quad (2)$$

从而确定平均失真为

$$D_{\text{ave}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M d(\mathbf{X}_m, Q(\mathbf{X}_m)) \quad (3)$$

式中 $d(\mathbf{X}_m, Q(\mathbf{X}_m))$ 为待测矢量 $\mathbf{X}_m$ 和对应码字 $Q(\mathbf{X}_m)$ 之间的距离.本文中,距离测度采用欧氏距离,即对于两个 $n$ 维向量 $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和 $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,其距离为 $d(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2$ .

VQ的问题即可以归结为给定 $\mathbf{X}$ 和 $N$ ,找到码本 $\mathbf{Y}$ ,使得 $D_{\text{ave}}$ 最小.换言之,当给矢量量化器输入一个任意矢量 $\mathbf{X}_m \in \mathbf{R}^K$ 进行矢量量化时,矢量量化器首先判断它属于哪个子空间 $S_n$ ,然后输出该子空间 $S_n$ 的代表矢量(码字) $\mathbf{Y}_n$ .VQ的过程就是用码字代表训练向量的过程,从而完成一个 $K$ 维欧几里得空间 $\mathbf{R}^K$ 中的矢量 $\mathbf{X}_m$ 到 $K$ 维有限子集 $Y$ 的映射

$$Q: \mathbf{R}^K \supset \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\} \quad (4)$$

LBG(矢量量化器的最佳码本设计)由Linde, Buzo, Gray(LBG)三人于1980年提出的,算法由于其理论上的严密性、应用上的简便性以及较好的性能得到了广泛的应用,并常被作为各种改进算法的基础,其从一个最初选定的初始码本开始迭代.把训练序列进行分组,找到每组的初始码书,计算初始码

本与训练序列的失真度,根据最小失真度来确定新的码本,产生的新码本作为第二次迭代的初始码本.重复上述过程,直到系统满足性能要求或不在有明显改进时结束迭代.本文按照经典 LBG 算法的具体步骤以欧氏距离计算两个矢量畸变<sup>[9]</sup>.

## 2 基于 VQ 的闸片状态监测方法

本文作者通过在 Matlab 中实现 VQ 算法,模拟仿真高速列车闸片温度在不同故障模式下和正常运行过程中的数据,并与故障模式库中的参考样本进行比对,以验证 VQ 算法对闸片温度实现状态监测和故障诊断的有效性和准确度.基于 VQ 的状态监测方法主要由预处理阶段、状态库的建立和监测及分析组成,其流程如图 1 所示.

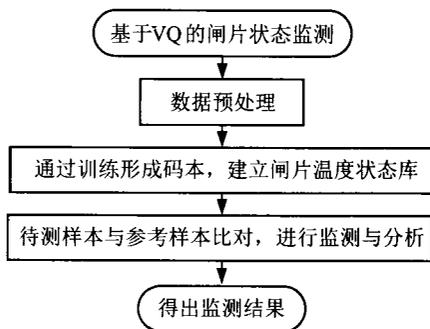


图 1 状态监测方法流程图

Fig. 1 Flow chart of condition monitoring method

### 2.1 数据预处理

由于高速列车闸片温度数据存在干扰、噪声和数据冗余等情况,因而在使用 VQ 方法之前,需要对数据进行数据预处理,包括数据选择、异常与缺失数据填补,文献[14]给出了随机回归填补法、趋势得分法等经典方法,本文在此不再赘述.

### 2.2 闸片状态库的建立

状态库的建立即通过训练形成码本的过程<sup>[15]</sup>.为了实现列车闸片温度的状态监测和故障诊断,将闸片不正常发热、温度跳变及正常制动情况等闸片温度数据作为参考样本,存入模式库.参考样本通常由试验数据或列车闸片温度的数学模型得到.同时,列车受外界因素影响,在不同季节、地域或以不同的制动初速度,其闸片温度会随之变化,当列车运行情况不同时,要实时调整模式库,保证算法实际应用的有效性.

列车在不同运行工况时,VQ 方法误报漏报率较低、响应时间较快,可以有效消除列车闸片温度跳变影响的特点.因此在本文中,仅使用一组模式库进行举例,即根据已有的某个制动盘数据,模拟在干燥

工况下,当环境温度不超过 40 ℃,制动初速度 380 km/h 时的闸片温度数据,5 种模式如表 1 所示:一种安全模式,两种危险模式,两种故障模式.

表 1 某型高速列车闸片温度模式库参考样本

Tab.1 References samples of some type high-speed train brake pad temperature patter library

模式	安全状态	模式描述	报警状态
1	安全	闸片温度在 93 s 左右上升至最高温 680 ℃,随后降低(正常)	不报警
2	危险	闸片温度在 93 s 左右上升至最高温 850 ℃,随后降低(绝对温度过高)	红灯报警
3	危险	闸片温度在 45 s 左右上升至最高温 680 ℃,随后降低(温升过快)	红灯报警
4	故障	闸片温度在 93 s 左右上升至最高温 760 ℃,随后降低(绝对温度较高)	黄灯报警
5	故障	闸片温度在 70 s 左右上升至最高温 680 ℃,随后降低(温升较快)	黄灯报警

### 2.3 识别与监测

识别阶段,用于待识别的实时闸片温度同样要经过预处理过程得到原始特征矢量.之后再高速列车实时监测的闸片温度数据序列与模式库中的不同参考样本进行比对分析,通过运用 VQ 算法,得到实时闸片温度序列与不同参考样本之间的欧氏距离,该距离为待测序列与码本中码字最小距离的平均值即平均量化误差,则总平均量化误差最小的码本所对应的模式即为识别结果.

## 3 实例分析

### 3.1 闸片温度状态库建立结果

高速列车受环境因素影响,在不同季节和地域行驶,其闸片温度会随之变化,本文作者将夏季的实际闸片温度数据设定为基准,依照某型高速列车闸片温度故障处置方法,以及列车实际运行闸片温度数据,列车闸片最高温度超过 850 ℃或达到最高温的时间低于 45 s,将红灯报警,提醒司机和机械师及时检查,如果确认列车闸片出现问题,需要立即减速至车站进行检修;列车闸片最高温超过 760 ℃或达到最高温的时间低于 70 s,将黄灯报警,提醒司机重点监视记录车辆闸片温度变化并进行相应处理.

本文的高速列车闸片温度模式库即表 1 所示的模式库,其数据经过 VQ 方法训练的结果见图 2.

### 3.2 状态监测的有效性分析

为了验证 VQ 对高速列车闸片温度实现状态监测的有效性,本文选取了 8 组测试样本,如图 3 所示.其中:样本 1 为故障样本,闸片温度在 50 s 左右上升至最高温 680 ℃,随后降低,高速列车应当红灯报警;样本 2 为故障样本,闸片温度在 70 s 左右上

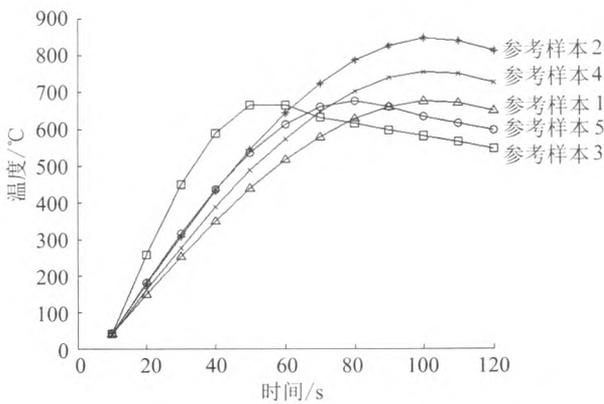


图2 训练结果

Fig.2 Training results

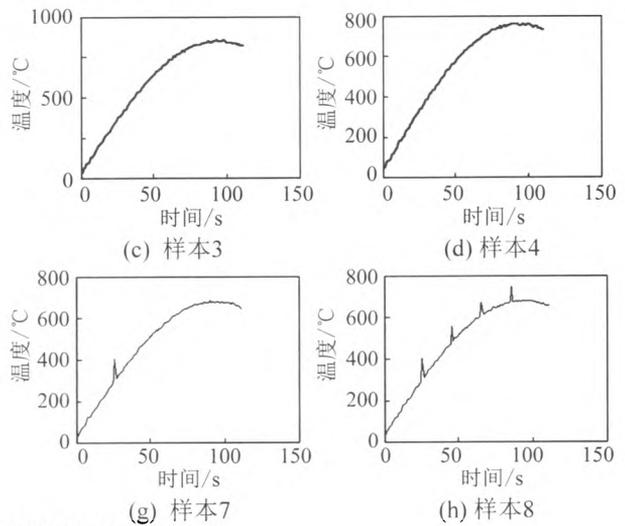
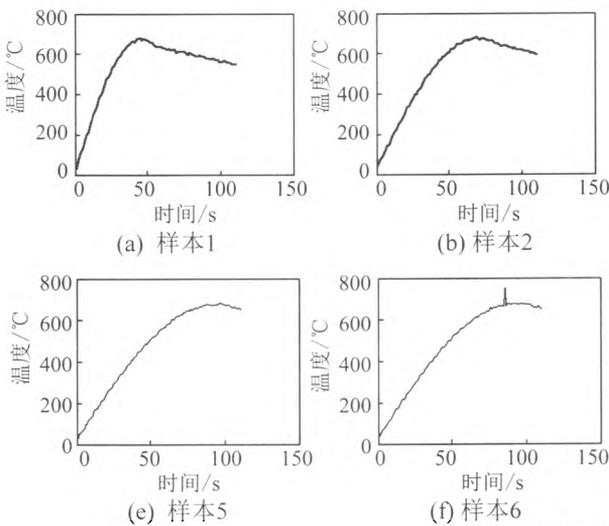


图3 高速列车闸片温度待测试样本

Fig.3 Test samples of high-speed train brake pad temperature

根据VQ算法可知,两个序列的欧氏距离越小,相似度越高.通过运用VQ算法将8个测试样本与故障模式库中的参考样本比对,求出欧氏距离如表2所示.例如,测试样本1与5个参考样本相比对后,其最小的欧氏距离为21.3003,对应参考样本3,因而高速列车应当红灯报警.同理,测试样本2~样本5的最小欧氏距离分别为38.1248、11.6095、10.3056和11.2094,分别对应于参考样本5、2、4

和1,测试结果与预期相符.

对于测试样本6~8,分别为高速列车闸片温度存在不同跳变的情况,其测试结果对应于参考样本1即正常行车模式,测试结果与预期相符.

以上测试结果验证了VQ算法对高速列车闸片温度实现状态监测的有效性,同时也验证了此方法能有效消除列车闸片温度跳变的影响.

表2 测试样本与参考样本的欧氏距离

Tab.2 Euclidean distance between test samples and reference samples

测试样本	正常行车		红灯报警		黄灯报警	
	参考样本1	参考样本2	参考样本3	参考样本4	参考样本5	
1	473.212 1	606.583 6	21.300 3	494.036 7	285.802 4	
2	225.012 8	430.659 5	289.332 2	257.318 6	38.124 8	
3	441.904 2	11.609 5	615.481 9	234.465 8	435.762 3	
4	209.425 6	233.073 1	494.630 4	10.305 6	257.100 0	
5	11.209 4	444.344 9	467.907 4	213.528 2	218.430 7	
6	13.505 9	438.576 6	473.372 4	207.706 6	221.070 3	
7	10.835 1	448.602 4	471.448 2	214.179 2	221.627 9	
8	9.606 8	439.143 7	468.052 6	204.876 3	217.319 6	

### 3.3 状态监测的性能分析

为考察状态监测的响应时间和准确度,输入1 000个测试序列,其处理时间的频数分布直方图见图4.其平均处理时间在1.5 ms左右,最长不超过2 ms,算法的计算时间能满足实时状态监测的要求.

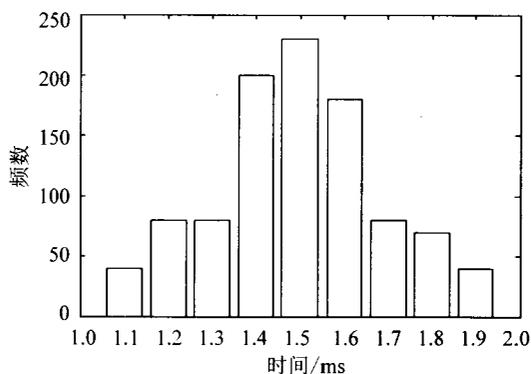


图4 运行时间频数分布直方图

Fig.4 Frequency distribution histogram of running time

在1 000个测试序列中,分别有200个序列对应模式库中5种参考样本,表3是通过VQ算法进行状态监测的正确匹配样本数目.在1 000个测试样本中共出现7次错误匹配,误报率不到1%.结果表明:基于VQ算法的状态监测响应时间短,抗干扰能力强,误报率低,闸片温度故障诊断效率高.

表3 样本匹配结果

Tab.3 Sample matching results

模式序号	总样本数	正确样本数	匹配度/%
1	200	200	100.00
2	200	197	98.50
3	200	198	99.00
4	200	200	100.00
5	200	198	99.00

## 4 结论

1) 提出了一种基于VQ的高速列车闸片温度状态监测方法,系统易于实现,具有较低的误报率,抗干扰性强,实时性高等特点.

2) 将语音识别领域中的经典VQ方法应用于铁路闸片系统的监测与故障诊断,并取得了良好的效果,为其在铁路其他系统检测、监测与故障诊断的研究提供借鉴和参考.

### 参考文献(References):

[1] 张曙光. 铁路高速列车应用基础理论与工程技术[M]. 北京:科学出版社,2007.  
ZHANG Shuguang. Fundamental application theory and engineering technology for railway high-speed trains[M]. Beijing: Science Press,2007. (in Chinese)

[2] 夏毅敏,吴元,顾健健,等. 高速动车组制动闸片温度与应力分布规律研究[J]. 机械科学与技术,2012,31(9):1377-1383.  
XIA Yimin, WU Yuan, GU Jianjian, et al. Temperature and stress distribution for the high-speed multiple units brake pad[J]. Mechanical Science and Technology, 2012, 31(9):1377-1383. (in Chinese)

[3] Yang Xun, Wang Jixin. Simulation study of temperature field and stress field of disc brake based on direct coupling method[J]. Materials Science Forum, 2009, 628(8):287-292.

[4] 农万华,符蓉,韩晓明. 优化结构闸片对制动盘温度及热应力的影响[J]. 大连交通大学学报,2012,33(4):62-65.  
NONG Wanhua, FU Rong, HAN Xiaoming. Influence of optimizing brake pads structure on brake disc temperature and thermal stress[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(4):62-65. (in Chinese)

[5] 陈德玲,张建武,周平. 高速轮轨列车制动盘热应力有限元研究[J]. 铁道学报,2006,28(2):39-43.  
CHEN Deling, ZHANG Jianwu, ZHOU Ping. FEM thermal stress analysis of high-speed locomotive braking discs[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2):39-43. (in Chinese)

[6] 娄旭红,原进凯,姜成武,等. 机车闸片性能检测装置设计[J]. 湖北工业大学学报,2007,22(4):29-31.  
LOU Xuhong, YUAN Jinkai, JIANG Chengwu, et al. The design for test equipment of the locomotive breaking pads[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(4):29-31. (in Chinese)

[7] 许艳峰,庄国军,宋阳,等. 制动盘温度采集系统的研制[J]. 铁道车辆,2014,52(7):36-38.  
XU Yanfeng, ZHUANG Guojun, SONG Yang, et al. Development of brake disc temperature acquisition system[J]. Rolling Stock, 2014, 52(7):36-38. (in Chinese)

[8] Yang Z, Bai Z, Li D. A high fidelity VQ coding algorithm with region adaptive sub-banding[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2005, 6(1):43-48.

[9] 孙圣和. 矢量量化技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2002.  
SUN Shenghe. Technology and application of vector quantization[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)

[10] 李培玉,谭大鹏,邹福星,等. 矢量量化在钢水连铸下渣检测方面的应用[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(4):556-559.  
LI Peiyu, TAN Dapeng, ZOU Fuxing, et al. Application of vector quantization theory in steel slag detection of continuous casting[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(4):556-559. (in Chinese)

