

基于 LMS 的机动车发动机异响故障诊断方法

薛华¹ 金莹瑛² 钱亮³

(1 嘉兴市正达汽车综合性能检测有限公司 浙江 嘉兴 314050; 2 绍兴市柯桥区车辆检测中心有限公司 浙江 绍兴 312000; 3 嵊州市剡城汽车检测有限公司 浙江 绍兴 312499)

摘要：传统的机动车发动机异响故障诊断方法的诊断结果容易有误差错误，为了实现对机动车发动机异响故障的高效准确诊断，设计基于 LMS 的机动车发动机异响故障诊断方法。先对机动车发动机声音信号进行采集分析，对发动机异响故障类型进行选取，再对采集到的声音信号进行预处理，再基于 LMS 对发动机的异响进行去噪，对表现发动机异响故障的图谱进行选取，实现发动机异响故障诊断。通过实验对比证明新的机动车发动机异响故障诊断方法比传统的机动车发动机故障诊断方法好，设计的机动车发动机异响故障诊断方法可以精准地找到发动机故障部位，并且耗时短。

关键词：LMS；机动车；发动机；故障诊断

0 引言

发动机的声音信号可以直接反应一个发动机的好坏，发动机面对不同的故障会产生不同的异响。如果能及时地对发动机的异响故障做出准确的诊断和分析，那么就会及时地预防发动机产生故障或及时减少发动机的损伤，更加提升了机动车的安全性能。机动车发动机故障的诊断方法有状态参数分析法、振动分析法、磨损特征分析法。状态参数分析法可以检测出发动机 200 多个性能，但是进行一次完整的测试需要几个小时，效率慢且操作复杂，还需要测验者自身的专业知识结构过硬。振动分析法是基于发动机振动来诊断的一种诊断方法，但是其需要操作者具有很高的专业性，并且有很强的主观性。磨损特征分析法在操作时需要把发动机进行解体，又耗时又费力，效率低^[1]。目前，机动车发动机异响故障的诊断方法大部分还是在使用传统的听诊诊断方法。机动车发动机检测人员一般是结合了自己多年的经验和多年的判断能力，来进行一定的主观判断，对发动机的部件问题进行相应定位，再使用一些辅助仪器来对机动车发动机的故障问题进行检验与排查。而这种传统的听诊诊断方法很大程度上会因为检测人员的主观判断不同而导致每一次检测产生不同的检测结果，就导致在一定程度上会出现错检漏检的错误，产生这种结果就会导致需要对机动车进行重新检修，从而使机动车发动机声响故障诊断效

率降低，不论是时间还是人力，甚至是经济方面都会产生一定的浪费。所以需要一种新的、功能性强的机动车发动机异响故障诊断方法来进行检验。

1 背景分析

随着汽车行业的不断发展，当前发动机噪声方面的研究已经取得一定成效，尤其是异响问题，受到广泛关注。大部分情况下发动机异响属于噪声问题中比较难以解决的，尤其在诊断方法和理论研究方面比较缺乏的情况下，要想更好地解决发动机问题比较困难。在这样的情况下，使用一些新的方法来分析这些异响，不仅可以归纳异响产生原因，而且可以采取针对性的解决措施。

随着汽车制造技术的不断发展，在发动机研发方面也取得了较好的成绩，尤其是一些关键技术方面，取得了长足的发展。国产的发动机，不仅在动力方面得到很大程度提升，在经济、噪声和震动方面也得到了改善，因此汽车性能和舒适性也得到了提升，所以相关部门制定的相关指标要求也更高了。在汽车排放要求不断严格的情况下，对汽车噪声的要求也越来越严格，不同的汽车排放限值降低，在这样的情况下汽车噪声水平降低，也充分地满足了消费者的实际需求。现行的噪声国家强制标准，规定了车外噪声不得超过 74dB (A)，因为车外噪声主要对城市环境产生影响，而车内噪声主要影响的是司乘人员和乘车体验，尽管相关的法律还不够完善，但

是消费者和企业对于车内地噪声要求不断提升,所以需要对此问题进行深入研究。目前,在发动机噪声研究方面,主要有以下几种类型:

(1) 机械噪声。也就是在发动机周期性气体压力还有运动惯性力作用下,发动机运转产生振动和冲击,这种情况就会产生一定噪声。通常情况下机械噪声主要包含了活塞敲击噪声,还有汽配机构噪声,以及步平衡惯性力引起的噪声。当前对于发动机各类机械噪声研究,主要集中在典型机械故障导致的震动噪声特征识别和监测。因此加强了活塞组、曲轴系、配气机构等方面研究。

(2) 燃烧噪声。发动机的燃烧噪声,主要是指发动机缸内周期性燃烧气体所爆发的压力,通过缸盖、缸壁、活塞、连杆、曲轴、主轴承路径,很大程度上造成了发动机结构震动,并传递到表面辐射出来的噪声。由于燃烧噪声的传递路径不同,可以分为直接燃烧噪声和间接燃烧噪声。其中直接燃烧噪声指的是燃烧气体所爆发的压力直接作用于缸盖和缸壁,这样就会导致发动机表面发生震动,从而引起辐射噪声。而间接噪声主要是指气体作用力通过活塞、连杆、曲轴、主轴承的传递,导致发动机表面振动,因此产生的辐射噪声。

2 声音信号的采集分析

2.1 发动机异响故障类型选取

先确定声音信号采集传感器,获取机动车发动机的声音信号数据。在确保没有其他状况的影响下,收集机动车发动机的异响情况,发现从机动车不同部位都出现声音异响情况。进而收集机动车的各部位声音信号,再根据采集的声音信号数据的清晰程度,辨认出发动机异响故障的类型。发现机动车发动机的异响类型可以分为发动机后部异响、发动机前部异响、发动机中部异响、发动机箱体异响、气门异响与机油底壳异响。所以就选取上述这几种发动机异响故障类型进行声音信号采集^[2]。

2.2 声音信号采集

根据上述的发动机异响故障类型的选取进行对这几种类型异响的声音信号采集。采集步骤如下:

(1) 按照机动车发动机声音信号采集系统,使用电脑和对应的数据线及声音信号传感器与系统连接。

(2) 对声音信号采集系统设置相应的参数,在对声音信号进行收集前,设定好采集的时间间隔、采

集频率、声音信号的类别及灵敏度。研究设定采集频率为 20480Hz,每次采集的时间间隔为 2s。

(3) 对机动车发动机在不同类型下进行声音信号数据采集,把进行测试的机动车发动机设置为空负荷状态,并且把发动机的运转速度控制在 1500 ~ 1600r/min,在固定的时间间隔内对声音信号进行采集,采集结束后关闭机动车发动机。在所有的声音信号采集完毕后,将所有设备放回相应位置。

2.3 发动机异响分析

汽车发动机如果出现了异常振动和异响情况,一般都是因为故障导致的,因此分析其产生机理是关键。由于发动机异响检查需要借助先进的信号处理方法,所以在实际工作中需要分析这些信号的异响特征。异响是发动机故障的表现形式,不同部位故障会发出不同的声调和噪声,通常情况下有以下几种情况:

(1) “突突”异响。发动机出现“突突”异响时,可能发动机缺缸或者是进入气缸的混合气空燃比较小,如果是缺缸导致的,发动机上部除了有“突突”异响以外,还会出现其他故障,最典型的的就是发动机抖动比较严重。当发动机一个或者是多个气缸无法工作时,自身工作平衡就会被打破,当故障气缸工作时没有能量输出,曲轴转动规律会发生改变。要想解决缺缸故障主要依靠的是诊断仪,先读取出工作气缸,然后检查是否存在电路故障,如果没有问题检查火线圈是否存在故障,如果仍然没有问题,需要检查喷油器本体。如果以上检查都正常,需要考虑缸压状况,以及各种机械的配合间隙状况。

(2) “铛铛”异响。发动机出现“铛铛”异响,可能是发动机敲缸,也可能是曲轴主轴承和连杆轴承处间隙出现损伤,还可能是发动机和车架发生撞击导致的。发动机出现敲缸时,使用听诊器能够听到问题气缸上方有清脆的“铛铛”声。这种异响声音大多和发动机温度有关,汽车刚启动时发动机的温度较低,这时异响声比较明显,尤其在怠速状态下,发动机温度上升后异响就会减弱或者消失。发动机敲缸原因很多,主要是活塞和汽缸壁间隙过大,产生这种情况可能是活塞装反了,也可能是气缸磨损比较严重。当发动机润滑条件较差时,无法有效地润滑,这时活塞和汽缸壁间就会发生撞击。这种情况先使用听诊器确定问题气缸,然后“断火”再听取异响,如果“铛铛”的声音消失,就可以证明该

缸敲缸。

(3) “嗒嗒”异响。当发动机出现“嗒嗒”异响时,可能是汽车保养时更换的机油粘度高,所以循环内阻增大,这时就会听到“嗒嗒”声,如果噪声较小,一般情况下车内无法察觉,这时不会对发动机造成什么影响。如果是其他情况,就需要进行排查,找到具体原因,采取针对性措施解决。如果“嗒嗒”声较大,为了排除故障需要先拆解发动机,然后使用塞尺检查气门间隙,如果发现间隙超出标准就要及时处理。

3 机动车发动机声音信号的预处理

对机动车发动机异响声音信号采集后,要对声音信号进行预处理,其中包含了预加重、加窗和分帧等。

预加重就是在声音信号采集时,在传输过程中,信号会发生衰减,而衰减最严重的部分是声音信号数据中高频的部分,而低频的部分衰减较轻。所以在传输之前,先经过一个预加重处理,增加高频部分,使高频部分的衰减程度降低,使高频部分的频谱趋于平坦。

要把声音信号分成多份一定长度的数据,进行分段处理。把发动机声音信号进行分段处理就相当于对信号进行了加矩形窗的处理,增大对高频部分的衰减,对采集的声音信号进行处理,以保证声音信号能顺利通过系统以防因为采集的信号无限长这一特点导致在进行实际分析和计算时无意义^[3]。

分帧主要是将采集的声音信号上的若干个样点分为一帧,在每一帧里面的声音可以看作是稳定的,通常情况下,一帧可以设定为10~30ms,根据不同的发动机声音信号数据可以进行调整。

4 基于LMS对发动机故障异响去噪

利用LMS对机动车发动机故障异响去噪。

在机动车发动机异响中带噪声的机动车异响信号公式如下:

$$y(n)=s(n)+d(n) \quad (1)$$

式中: $s(n)$ —发动机纯异响信号;

$d(n)$ —机动车异响中的噪声信号。

基于数字滤波器 $h(n)$ 对输入信号 $y(n)$ 进行表达,相应的公式为:

$$\hat{S}(n)=y(n) \times h(n)=\sum_{m=-\infty}^{\infty} y(n-m) h(m) \quad (2)$$

基于正交原则,当 $h(n)$ 为最佳传递函数时,对于 m 的取值需要式(3)始终成立:

$$E[(s(n)-S(n))] \times y(n-m)=0 \quad (3)$$

结合公式(2)和公式(3)可以推导出式(4):

$$H(k)=\frac{P_y(k)}{P_s(k)} \quad (4)$$

声音信号 $s(n)$ 与噪声信号 $d(n)$ 互不相关,将 $P_{sd}(k)$ 设置为0,可以得到式(5)、式(6):

$$P_{sy}(k)=P_s(k) \quad (5)$$

$$P_y(k)=P_s(k)+P_d(k) \quad (6)$$

将式(5)、式(6)结合得到功率谱估算器 $H(k)$,如式(7)所示:

$$H(k)=\frac{P_s(k)}{P_s(k)+P_d(k)} \quad (7)$$

根据公式(2)可以计算 $\hat{s}(n)$ 在第 k 个点的声音频谱估算值 $t(k)$,如式(8)所示:

$$t(k)=H(k) \times Y(k) \quad (8)$$

式中: $Y(k)$ —带噪声信号在相应的频点上面的频谱数值。

$H(k)$ 还可以表示成式(9):

$$H(k)=\frac{\lambda_s(k)}{\lambda_s(k)+\lambda_d(k)} \quad (9)$$

式中: $\lambda_s(k)$ —声音信号在第 k 个频点上面的功率谱;

$\lambda_d(k)$ —噪声数据信号在第 k 个频点的功率谱。

如果将非平稳的声音数据信号近似看成一个平稳瞬时的数据信号,另外非平稳声音数据信号的功率谱是没有特别合适的方法获取到的,所以需要公式(9)改写,得到式(10):

$$H(k)=\frac{E[|s(k)|^2]}{E[|s(k)|^2]+\lambda_d(k)} \quad (10)$$

由式(9)可以进一步得到先验信噪比 $\varepsilon(k)$ 及后验信噪比 $\gamma(k)$,如式(11)、式(12)所示:

$$\varepsilon(k)=\frac{E[|s(k)|^2]}{\lambda_d(k)} \quad (11)$$

$$\gamma(k)=\frac{|Y(k)|^2}{\lambda_d(k)}\tag{12}$$

因为机动车发动机的声音信号周期性很强，在环境中的背景噪声具有随机性和不固定性，所以基于 LMS 对机动车发动机故障异响信号进行去噪，可以非常有效地去除这种因为环境和其他因素所带来的干扰噪声，以防这些噪声对实验的影响，可以提高声音信号的频率，完美地还原实验所需的机动车发动机声音信号数据。

5 选取发动机异响故障图谱类型

选用卷积神经网络模型对机动车发动机异响故障进行分类，共 16 层，一般选择 5 个卷积段，每层的数量一般保持在 2 ~ 3 个，但是卷积层的层数越来越大时，就会增加卷积核的数量，一般情况下，5 个卷积段的卷积核数为 64、125、256 及 512。选取 VGG-16，将卷积层进行重复堆叠^[4]，减少层数，选取在信号图、频谱图、语谱图中效果最好、准确率最高的语谱图。

6 对比实验

6.1 实验准备

准备实验的设备包括发动机测试台架、测功机、PCB 传声器、LMS（SCRO1）数据采集前端、转速传感器和 LMS Test Lab 测试软件^[5]。设定采集频率为 20480Hz，数据采集的时间间隔为 2s。

在上述的发动机异响故障类型选取中选取了发动机后部异响、发动机前部异响、发动机中部异响、发动机箱体异响、气门异响与机油底壳异响。选择某种车型的四辆机动车为例，分为序号 1、2、3、4，先对这四辆车进行发动机异响设置。机动车发动机故障设置如表 1 所示。

对这四辆机动车的各部位进行异响故障检测，按

表 1 机动车发动机异响设置

机动车故障类型	设置措施
挺柱异响	更换尺寸不同的气门挺杆
气门异响	将机动车气门间隙增大 1mm
气缸前部异响	拧松皮带罩
气缸前部异响	调整张紧轮位置
机油底壳异响	将连杆轴承间隙增大 0.45mm
机油底壳异响	将曲轴轴承间隙增大 0.45mm

照机动车的发动机不同部位的故障异常异响进行分类，可以将发动机产生异响时的不同故障情况进行统计，如表 2 所示。

表 2 发动机异响故障情况统计

异响类型	机动车 1	机动车 2	机动车 3	机动车 4
发动机后部异响	有异响	无异响	无异响	有异响
发动机前部异响	无异响	有异响	有异响	无异响
发动机中部异响	有异响	无异响	有异响	无异响
发动机箱体异响	无异响	有异响	无异响	无异响
气门异响	有异响	无异响	有异响	无异响
机油底壳异响	无异响	有异响	无异响	有异响

6.2 发动机故障 LMS 诊断方法与传统方法对比

将实验数据随机分为四组，用新的机动车发动机异响故障诊断方法进行实验，实验结果如表 3 所示。

用传统的听诊诊断方法对同样的四组进行实验，实验结果如表 4 所示。

表 3 新的诊断方法实验诊断结果

组数	有无漏检部位	检测时间 /s
车 1	无	30.25
车 2	无	29.56
车 3	无	28.44
车 4	无	29.81

表 4 传统诊断方法实验诊断结果

组数	有无漏检部位	检测时间 /h
车 1	有	3
车 2	无	3.2
车 3	有	3.5
车 4	无	3.1

对比表 3 和表 4 可以看出，对同样的数量、同样机动车做实验，机动车发动机故障的传统诊断方法的漏检情况明显比新的机动车发动机异响故障诊断方法多。而且检测的准确率也远远低于新的机动车发动机异响故障诊断方法，其检测时间更是远超于新的机动车发动机异响故障诊断方法。所以实验表明基于 LMS 的机动车发动机异响故障诊断方法比机动车发动机传统的诊断方法要好用，更便于机动车发动机异响故障的检测。既节省了检测机动车发动机的时间，又提高了检测数据的准确率，也使漏检的数量减少了，达到了省时省力等效果的同时还避免了不必要的人力、经济等方面的浪费。

7 结语

本文基于 LMS 提出了一种新的机动车发动机异响故障诊断方法，并通过实验的方式与之前传统的检测方法进行对比，表明了新的诊断方法比之前的传统诊断方法的使用效果更好。本文设计的诊断方法可以减少主观性，其数据都具有客观性，能精准检测到故障部位，具有针对性，并且检测不会耗费不必要的人力和时间，其检测时间快且准确率高。但是实验的环境条件有限，所以在工作中还存在着一些不足的地方，还需进一步完善工作。

参考文献：

[1] 陈财森, 胡海荣, 程志炜, 等. 基于 BA-RVM 算法的发动机故障诊断技术研究 [J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(02): 332-337.

[2] 任帅. 深度学习下汽车发动机故障诊断系统研究 [J]. 专用汽车, 2023(02): 66-69.

[3] 张政. 汽车发动机故障诊断方法研究 [J]. 时代汽车, 2022(22): 162-164.

[4] 解淑英. 基于 LMS 算法及 BP 神经网络的汽车发动机故障诊断模型研究 [J]. 微型电脑应用, 2021, 37(12): 44-47.

[5] 杨诚, 李爽, 冯焘, 等. 基于 LMS 和 SDP 的发动机异响诊断方法研究 [J]. 汽车工程, 2014, 36(11): 1410-1414.

(上接第 59 页)

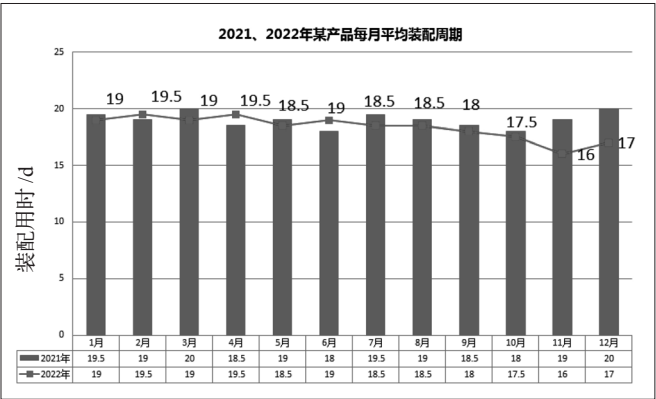


图 6 装配周期对比

量 6.6，较 2021 年增长 15.8%，装配周期由 2021 年的 19d/ 台缩短至 16d/ 台（图 6），用工资源平均降至 89 人日 / 台（图 7），随着精益管理的不断深入，2023 年将继续逼近既定指标。2022 年整机计划装配分解 68 台次，实际完成整机装配分解 60 台次，基本满足该发动机年度装配任务需求，圆满完成了该型号年度装配生产任务，提高了装配效率，降低了用工成本，减少了过程浪费，其精益管理理念值得在其他型号产品中推广应用。

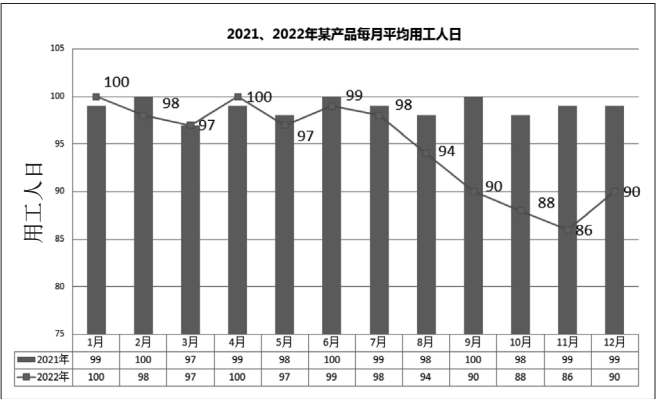


图 7 用工人数对比

参考文献：

[1] 王波. 精益单元化生产在多品种小批量装配生产中的实践 [J]. 现代制造工程, 2019(10): 21-27+39.

[2] 王晶. 基于精益生产的生产线效率提升方法研究 [J]. 装备机械, 2017(03): 25-29.

[3] 徐煜丹. 厂房精益化布局方法及其在某企业应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.

[4] 曹文东. 发动机装配线生产瓶颈工序的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.