

四川大学

硕士学位论文

火车轮裂纹自动在线无损检测系统研究

姓名：李耀东

申请学位级别：硕士

专业：机械制造及其自动化

指导教师：黄成祥

20040408

火车轮裂纹自动在线无损检测系统研究

机械制造及自动化专业

研究生：李耀东

指导教师：黄成祥

火车轮是火车的关键部件，对火车轮内部的裂纹进行检测并准确地判断其位置一直是铁道运输部门非常重视的问题。目前国内外火车轮的检测基本上还是采用的静态的无损检测方法，如涡流、磁粉、超声波等，而国外已倾向于开发在线、在役的火车轮无损检测方法。本文根据火车轮裂纹在线无损检测的特点和要求，对检测系统各部分的功能要素做了深入的分析研究。

本文首先分析了火车轮内部的微观和宏观损伤对裂纹形成过程的影响，并根据断裂力学理论阐述了裂纹扩展过程所遵循的规律。在此基础上，根据损伤容限设计的思想，提出了根据火车轮的运行状态确定检测间隔的方法。对塑性变形过程、裂纹的萌生和扩展过程以及冲击过程的声发射特点及其内部成因也做了深入的分析。然后从弹性力学理论的应力、应变关系出发，导出了纵波、横波和瑞利表面波的波动方程，并且讨论了兰姆波的构成及其不同模式的传播特点，分析了频散效应形成的原因和特点。这些特点是检测系统进行波形识别的依据。

在硬件系统设计方面，考虑到瞬态声发射信号中包含着丰富的超声波模式，在到达 AE 换能器之前不仅要经过介质的传输，而且在传输过程中还要发生波的反射、衰减和色散，因此在信号的传感部分采用了宽带声发射换能器捕捉瞬态声发射信号，整个前向通道具有较宽的通频带和较高的信噪比，并且设计了 DSP 信号处理系统进行声发射信号的高速实时处理。

另外，由于声发射换能器的输出信号经过硬件滤波后还可能含有大量的噪声信号，而且其频谱可能和噪声信号的频谱重叠，为了提高检测系统的信噪比，设计了自适应噪声对消器，以消除环境噪声的干扰，再通过数字带通滤波以进一步抑制不需要的信号。在声发射信号的处理中使用了时频分析工具—小波包，

本文受四川省科技厅应用基础基金资助

将信号在不同尺度上分解，以便确定信号在奇异点处的时频特征信息。

各个信号处理单元的处理结果（信号奇异点处的时频特征和信号波形的各个特征参数）都要通过 CAN 现场总线进行传送，最后到达上位机的接收缓冲区，由上位机进行接收。这些数据将作为 BP 神经网络的输入，由神经网络进行非线性映射，以确定声发射信号所反应的断裂力学特征量—应力强度因子幅度 ΔK ，最后根据 Paris 公式确定裂纹的扩展速度及其尺寸。在整个数据处理过程中，所有数据，包括上位机接收的数据、神经网络的计算结果、火车轮的转速以及根据断裂力学理论确定的裂纹扩展速度和裂纹尺寸都存储在数据库中，以便分析和查询。

关键词：火车轮 裂纹 声发射 小波包 现场总线 神经网络

Study of the Online Automatic Non-destructive Detecting System of the Cracks in Track Wheels

Mechanical Manufacturing and Automation

Candidate: Li Yaodong Supervisor: Huang Chengxiang

The wheel plays a crucial role in track, so the railroad department always pays much attention to detect crack and determine its location in track wheel. Presently the methods used in home and overseas to detect crack in track wheels are basically static non-destructive test (NDT) techniques, such as vortex, magnetic powder and ultrasonic. But in recent years, it is a new trend in developed countries to develop in-service or on-line NDT techniques to dynamically detect the cracks in track wheels. According to the characteristics and requirements to realize on-line NDT of track wheels, the functions are thoroughly researched on of all parts that consist of a detecting crack system to be designed in this dissertation.

The effects of macro and micro damages that contribute to the growth of cracks in track wheel are first carefully analyzed, and according to the theory of fracture mechanics the law of crack growth is formulated, then a method to determine the intervals of detection is put forward based on the design theory of damage tolerance. In the process of plastic deformation, crack initiation and growth, and impact, the characteristics of acoustic emission (AE) signals and the factors that affect them are also elaborately discussed. And the propagating equations of P-wave, S-wave and R-wave are deduced mathematically from the correlation between stress and strain in elastics mechanics. The components and their propagating characteristics of Lamb wave are mainly dealt with, and the causes and features of dispersion effect are further expounded. All these features are very important in the crack detecting system to discriminate different waveforms.

Granted by applied fundamental research fellowship from science

A and technology bureau of SiChuan province. No. D302GY029-051

When to design the hardware, not only because transient AE signals have rich ultrasonic modes, but are transmitted by media and thus maybe reflected, attenuated and dispersed, the broad-band AE transducer is used to capture the transient signals, and the entire signal-collecting channel is designed to have wider band-pass and higher signal-to-noise ratio. The digital signal processor (DSP) is also used to process the signals with high-speed and real-time.

Furthermore, owing to possible great noise signals mixed with AE signals and the overlap of their spectrums after being filtered, an adaptive noise compensator is designed to eliminate the interference of the background noise and therefore improve signal-to-noise ratio of the designed system. A digital filter is also needed to further suppress unwanted signals. In processing the AE signal, the analysis tool of time and frequency-wavelet package is adopted, in order to confirm the characteristics of time and frequency in strange points of the signal.

All results from every DSP, such as time and frequency values of strange points and characteristic values presenting the AE signal, are carried by CAN field bus, and finally reach receiving buffer zone of industrial control computer. The data are subsequently inputted into BP neural network to nonlinearly calculated the stress intensity factor range, represented by AE signals. Then the crack propagation rate and its size are calculated according to Paris formula of fracture mechanics. In the meantime, all data, including received data, calculated results from neural network, dynamic rotational speed of the track wheel, crack propagation rate and its size, are all stored in database, to make analysis and inquiry efficient.

**Keywords: Track Wheel Crack Acoustic Emission Wavelet Package
Field Bus Neural Network**

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

火车工作环境恶劣，火车车轮作为火车的行走部件，常受到撞击、摩擦等作用，因此车轮的磨损、裂纹、剥离等损坏现象很常见。一般铁道客货车辆使用的是碾钢车轮，车轮在使用中受力情况较为复杂，碾钢车轮在碾制过程中形成的制造缺陷，易在使用过程中不断发展和扩大，最终发生车轮部分的开裂和脱落，造成行车事故。特别是当车辆运行速度提高以后，这种可能性会进一步增加。80年代末全国火车轮磨损报废达13万吨，还时而发生车辆裂纹损坏。1997年上海铁路局共计处理轮对故障1211件，其中车轮裂纹63件，比提速前高了许多^[1]。近年来，宝鸡机务段电力机车轮箍踏面剥离比较严重，特别是担当宝-广段客运任务的SS6B型机车，轮箍踏面剥离尤为严重。从1999年做一次中修开始，截止目前，共有29台机车发生轮箍剥离153台次，因剥离严重超限无法镀修消除或因配轮需要而更换轮对129根，更多的是轮箍剥离镟修轮对360个^[2]。车轮内部裂纹和车轮辐板裂纹与提速前相比也有了较大幅度的提高，若不能及时发现，会使车轮碎裂，直接造成车辆脱轨、列车颠覆等一系列恶性事故。1998年德国的TCE列车由于脱轨翻车造成德国二战以后最大的交通事故，据称就与车轮轮箍有关^[3]。由于轮轴疲劳裂纹引起的切轴事故，大多数是由于轮轴嵌入内部、外侧裂纹形成的^[4]。对于车轮产生的裂纹进行检测并准确地确定裂纹位置是铁道运输非常关注的问题。因此，为了能准确地检测车轮内部缺陷，克服人工外观检测和经验判断的随机性，减少车辆行车事故，火车轮车轮裂纹在线、在役检测方法的研究是十分必要的。

1.2 国内外的研究现状

火车轮是行车安全的重要部件，各个国家对车轮质量要求都十分严格。目前世界上不少发达国家已经开发出火车车轮的在线自动检测装置。美国早在80年代就开始研制火车轮缺陷的自动检测系统，近几年已研制成功EMAT检测装置。意大利也研制成适用于车轮检测的超声波检测装置。近年来俄罗斯、日本、德国、匈牙利等国家都各自开发出了各具特色的检测系统，分别用于车轮裂纹检测、断面检测及擦伤检测。英国、法国、丹麦也各自不同程度地开发出监测

火车运行状态的车载式检测系统。从国外机车行走部件自动化在线无损检测技术的发展充分说明了对火车轮实现自动化检测是大势所趋。

我国目前是对火车轮是在整个生命周期内（20年）的运行状况都要进行检测。对在运行中的火车轮用耳听、眼看、手摸或用锤子敲击听其声音有无变异对车轮进行简单的检测，这种检测不但效率低，而且容易漏检；在生产过程中是对火车轮进行100%的检测；在检修过程中则是将火车轮和轴作为一个整体从火车上拆下来进行静态检测，如图1-1所示。

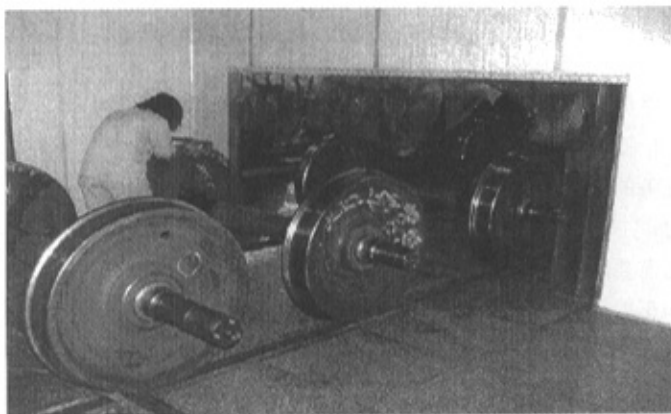


图 1-1 检测现场

目前火车轮无损检测依据的标准有以下几种，其中有的是国家标准（GB），有的是参照ISO的相关标准，并根据国内的实际情况制定的。

- 磁粉探伤机 标准 GB3721
- TB2047 铁路用探伤磁粉技术条件
- 《铁道机车车辆材料超声波验收标准》ISO5948-1994
- 《超声探伤用探头性能测试方法》ZBY231-84
- 《超声波探伤仪》JJG746-91
- 铁道机车车辆车轴磁粉探伤标准 TB/T1819-1998

使用的检测方法主要还是传统的超声波、涡流和磁粉等无损探伤方法。这几种检测方法的特点如表1-1所示。

表 1-1 超声波、涡流和磁粉等常规无损检测方法的主要特点

方法	探测项目	优点	缺点
涡流 (200~600Hz)	表面和次表面缺陷, 裂纹, 热处理偏析, 裂纹深度	设备自动化程度高, 不必清理试件表面, 省时, 不需耦合剂和探针	对零件几何形状突变引起的边缘效应敏感, 容易给出虚假的结果
超声波 (125Hz)	内表面缺陷及各种瑕疵, 缩孔, 夹杂, 分层厚度	对缺陷敏感, 获得结果迅速, 设备便于携带, 对缺陷定位方便	对小、薄及复杂的零件难以检测需特制的探头和仪器标定的参考标准
磁粉	表面及近表面缺陷, 裂纹, 夹杂, 对小的、非穿透裂纹敏感	显示近表面缺陷, 特别是夹杂, 省时, 成本低	磁场的对中要求苛刻, 实验后要退磁, 检验前后都要清理表面

现场使用的检测设备普遍效率低, 人员劳动强度大, 图 1-2 是一种比较先进的超声波探伤仪, 但对于裂纹特征的识别还需要检测人员较强的经验和技能。我国目前规定对火车零部件进行无损检测的技师每隔 4 年接受一次培训, 这种情况在其他行业里也是少见的。

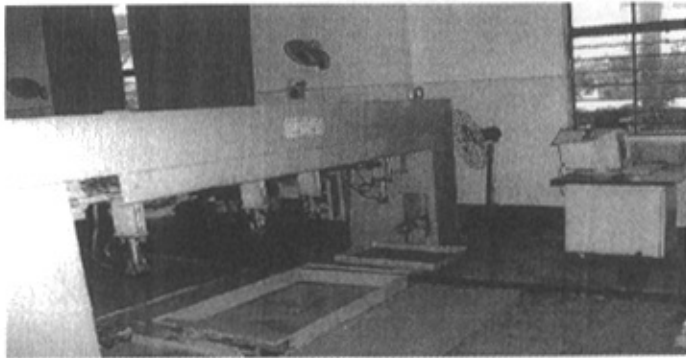


图 1-2 超声波探伤仪

由于我国国民经济的快速发展,铁道部决定从1997年4月1日起分阶段提速。提速后,列车故障增多,其中车轮故障最为明显^[5]。由于车轮的裂纹、磨损等破坏急剧增加,铁路的安全运输受到严峻考验,对列车运行的安全性要求也更加迫切。因此尽快开发火车轮的自动在线无损检测系统显得尤为迫切和需要,有重要的现实意义。

我国关于火车轮得在线自动检测还处于起步阶段,与国外相比还存在很大差距。目前只有北方交通大学、上海铁道学院、华中理工大学等在这方面作探索研究。他们的研究也只是涉及车轮踏面缺陷检测方面,对车轮裂纹检测尚未触及。中科院成都光电所在2002年研制成功车辆轮对动态检测装置,实现了轮对各关键面尺寸、形状以及位置的全自动检测,但对于车轮内部的裂纹也还没有涉及。

1.3 研究内容

本文根据火车轮在线无损检测的特点和要求,本文将研究的内容划分为以下几个部分分别进行研究:

- ① 裂纹产生的机理及其扩展规律;
- ② 声发射弹性波在构件内的传播规律;
- ③ 声发射信号的检测方法和提高系统信噪比的方法;
- ④ 声发射信号的分析 and 处理方法;
- ⑤ 火车轮结构状态信息的实时记录和查询分析方法;
- ⑥ 检测系统中各个组成部分的集成方法。

1.4 检测系统方案的拟定

要实现火车轮裂纹的动态在线检测,系统必须能实现对火车轮运行过程中的裂纹信息进行检测。近年来模态声发射技术得到迅速发展,其本质是根据结构内部发生状态改变时产生的弹性应力波来对结构的损伤程度和位置进行判断的一种无损检测方法,这种技术的发展为实现火车轮的实时在线检测提供了可能。

由于需要检测的火车轮较多,而且又呈分散状态,因此采用一种基于总线的分布式系统,其结构如图1-3所示。其中DSP部分完成声发射信号的实时检

测和信号处理，然后将处理结果送上总线；数据传输部分采用了现场总线技术，使用的是 CAN 总线，实现数据的高可靠性、高速、低成本传送；各个处理单元送上总线的数据由上位机进行接收、记录，最后由分析程序给出各个火车轮的评价结果。另外，由于计算中需要确定火车轮的加载频谱，转速测量部分采用了低功耗单片机系统进行转速的测量，实时测量的火车轮转速值也要经过总线送到上位机的相应数据缓冲区中。

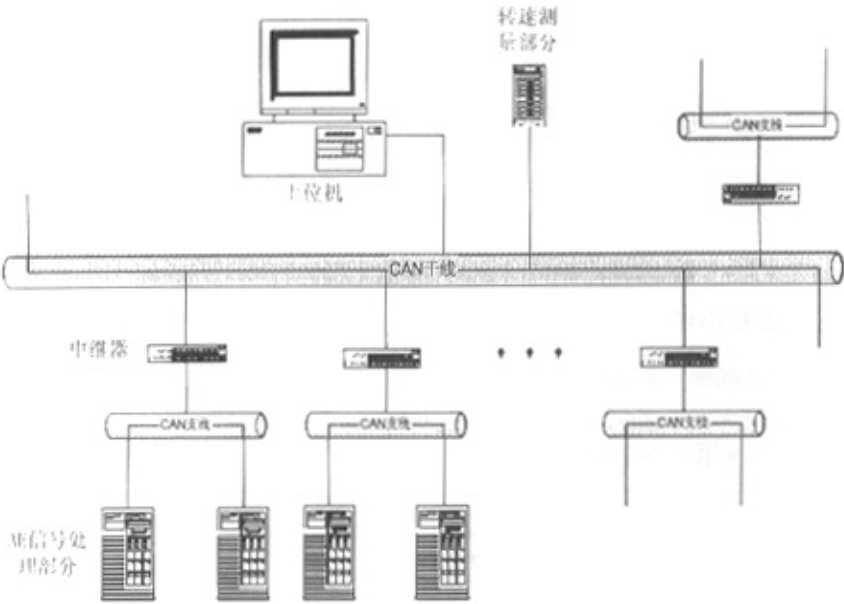


图 1-3 系统总体结构

声发射信号处理单元的信号处理软件主要完成信号的数字带通滤波、噪声对消、小波分析和特征提取，处理流程如图 1-4 所示。数字滤波后的信号频率范围为 100kHz~1MHz。但是这个范围的信号往往有高频噪声信号，而且高频噪声信号的频谱可能和 AE 信号的频谱重叠，因此要进行噪声的自适应对消处理，消除噪声后的信号基本上就可以看作是声发射信号了。在信号处理过程中，综合了参数声发射的技术和模态声发射理论的特点，进行信号波形的识别和特

征参数的提取;

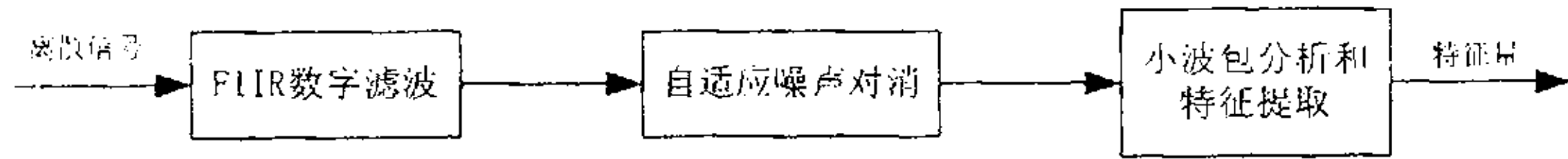


图 1-4 AE 信号处理流程

上位机的软件设计中使用了数据库技术,实现各个火车轮 AE 信号的特征值进行记录,以便分析和查询。在火车轮运行状态的评价算法中,运用了 BP 神经网络技术,将各个特征量进行非线性映射,得到火车轮的力学特征量,最后运用断裂力学的有关理论确定火车轮裂纹的大小。一旦确定了裂纹的大小,就可以根据火车轮的损伤容限,制定相应车轮的检测优先级,实现对危险零部件的重点监控。

1.5 本章小结

本章概述了论文的研究背景和现实意义,并对国内外在火车轮检测方面的现状和发展方向进行了对比。根据火车轮在线无损检测的特点和要求,将研究内容划分为若干个子部分,最后对检测系统的总体结构进行了规划。

第 2 章 火车轮裂纹的形成原因和损伤容限设计

2.1 形成因素

构件发生断裂的根源往往是在零件结构中早就存在微小的缺陷或其他形式的损伤，这些缺陷和损伤在服役过程中不断扩展，使结构在局部范围内不断劣化直至发生突然断裂。

在不同的载荷状况下，会产生不同类型、不同表现形式的损伤。根据产生损伤的加载过程来分，损伤可分为以下几种：

① 延性、塑性损伤

微小的孔洞和裂纹的扩展，使金属构件产生大塑性应变，最后导致塑性断裂。这类损伤的表现形式主要是微空洞、微裂纹的萌生、成长和聚合。

② 蠕变损伤

在长期载荷作用下，伴随着蠕变变形会发生蠕变损伤，其宏观表现形式为微裂纹、微空洞的扩展使得材料的耐久性下降。蠕变损伤使蠕变变形增加，最后导致蠕变断裂。

③ 疲劳损伤

在循环载荷作用下，材料性能逐渐恶化。在每一步载荷循环中的损伤将积累起来，使材料的寿命减少，导致疲劳破坏。金属构件疲劳损伤过程是首先在活动滑移带内形成微裂纹，然后裂纹沿着滑移带扩展，其方位大致和最大主应力方向成 45° （第一阶段），最后裂纹沿着垂直于最大主应力的方向扩展（第二阶段）直至断裂。火车轮在长期运行过程中，疲劳损伤过程主要表现为第一阶段，疲劳寿命的大部分消耗在形成初始裂纹的过程中。

④ 动态损伤

在动态载荷如冲击载荷作用下，材料内部会有大量的微裂纹形成并扩展。这些裂纹的数目非常多，但由于作用时间短，一般得不到很大扩展，可是当某个截面上的有效承载面积减少到一定程度，断裂就会发生。

2.2 裂纹的扩展规律

根据断裂力学的理论，当作用于带裂纹的结构上的载荷增大时，裂纹尖端的应力强度因子 K_I 也随之增大，当 K_I 增大到临界值时，裂纹将发生突然的失稳

扩展（脆性断裂）。这个应力强度因子的临界值，称为临界应力强度因子，也就是材料的断裂韧性，它是材料阻止宏观裂纹失稳扩展的抗力，是材料抵抗脆性破坏的韧性参数。一般随着零件厚度的增加，断裂韧性会降低但最低不会低于平面断裂韧性值 K_{Ic} 。

结构发生脆性断裂的判据为：

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (2.1)$$

材料的断裂韧性值 K_{Ic} 可通过试验确定。

裂纹扩展时的临界尺寸 a_c 可由下式确定：

$$K_{Ic} = \alpha \sigma \sqrt{\pi a_c} \quad (2.2)$$

式中： α —与裂纹的形状和位置、加载方式及构件的几何形状有关；

通过无损探伤的方法测定零件中的裂纹的大小 a_0 ，当满足条件

$$a_0 < a_c \quad (2.3)$$

时，根据脆断判据，表示零件在静载条件下是安全的。

在循环载荷作用下，裂纹可能由 a_0 逐渐扩展到临界尺寸 a_c ，再突然发生脆断。根据材料的等幅载荷试验，疲劳裂纹的扩展速度 da/dN 随应力强度因子幅度 ΔK 变化，在双对数坐标上可表示为图 2-1 所示的曲线^[1]。

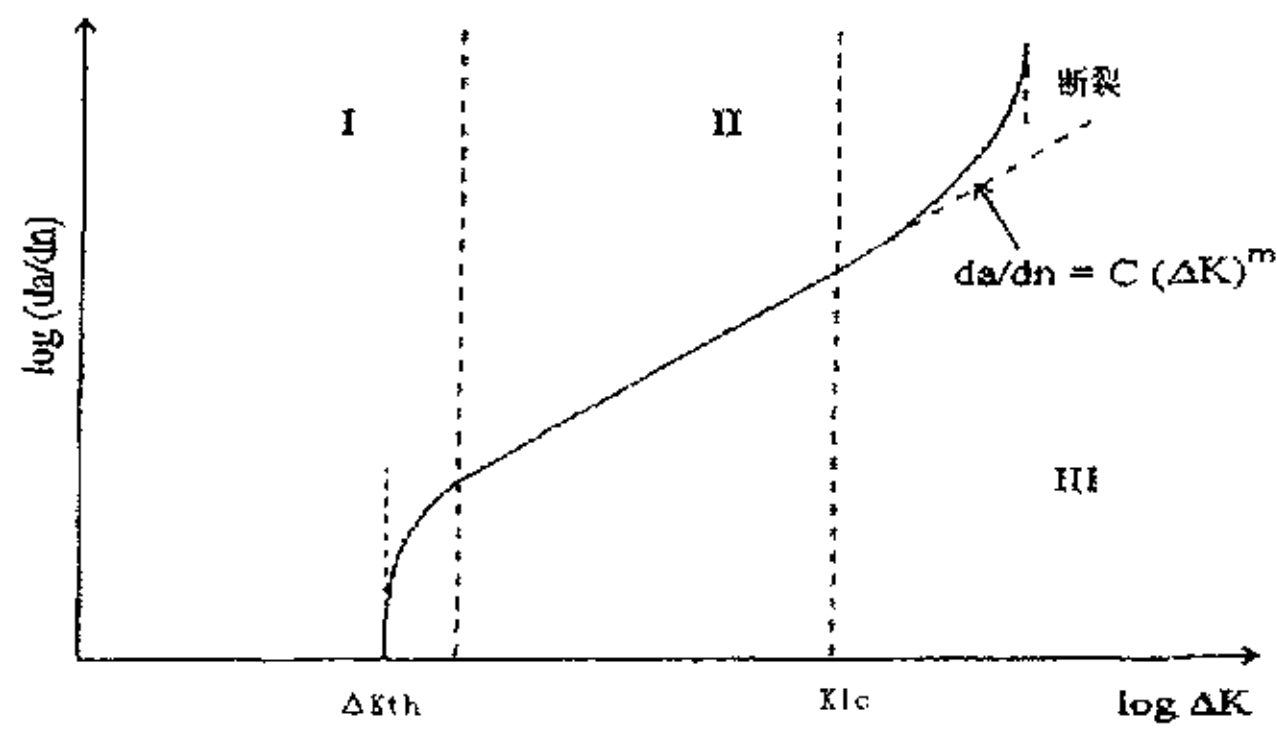


图 2-1 $da/dn-\Delta k$ 曲线

图 2-1 中 I 区为初始稳定扩展区，该区存在一个疲劳裂纹扩展应力强度因子的阈值 ΔK_{th} ，其值可由试验确定^[7]。III 区为裂纹快速扩展区，它以平面应变材料的断裂韧性值 K_{Ic} 为渐进线，在该区内 da/dn 急剧上升而产生瞬间断裂。II

区为裂纹稳定扩展区，是裂纹扩展的主要部分，在双对数坐标上可近视为直线，该直线满足帕恩斯（Paris-Erdogan）方程。根据 Paris-Erdogan 方程^[8]，疲劳裂纹的扩展速度可用以下公式表示：

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m \quad (2.4)$$

式中：a—裂缝长度；

n—疲劳循环的周期数；

ΔK —应力强度因子幅度；

C、m—随材料性质而定的常量。

影响裂纹扩展的因素很多，除了 ΔK 是影响裂纹亚临界扩展的关键物理量外，应力比、载荷顺序、环境和加载频率等对疲劳裂纹扩展均有较大影响。

当在裂纹尖端附近产生了大范围屈服甚至全面屈服时，其塑性区尺寸可能接近或超过裂纹尺寸，线弹性断裂力学的分析已不再适用，描述裂纹尖端应力应变场的参量也不能用 K_{Ic} 了，根据非线性断裂力学，应该用的力学参量是裂纹尖端的张开位移 COD 和裂纹尖端区域的能量线积分，相应的材料延性断裂韧性指标为 δ_c 和 J_{Ic} 。为了应用方便，工程上常将 J_{Ic} 转化为等效的 K_{Ic} 进行计算^[9]。

目前国内火车轮的材料是按照 TB/T2708—1996“铁路快速客车碾钢整体车轮技术条件”的规定选用的，其力学性能指标如表 2-1 所示。

表 2-1 车轮的力学性能指标

抗拉强度 σ_b /Mpa	延伸率 δ_4 /%	断面收缩率 ψ /%	踏面下30mm处 轮辋硬度/HB	表面硬度 /HB
≥ 910	≥ 10	≥ 14	265~320	277~341

2.3 损伤容限的设计

目前在火车轮和轴的设计中采用的仍然是安全寿命设计思想。安全寿命设计思想是建立在结构无初始缺陷的基础上的，认为在生产制造装配过程中通过严格的质量控制，已确保零部件没有损伤，同时要求零件在使用寿命期内不出现宏观可检裂纹，一旦出现宏观可检裂纹，就认为结构已经损坏。安全寿命设

设计思想从 50 年代起延续至今，已经发展成为一种比较成熟的设计方法。然而实践表明，完全采用安全寿命设计思想，仍然存在很多不安全的因素，而且成本也太高。因为无论采取什么样的质量控制手段，材料内部的初始缺陷、加工制造、装配过程造成的损伤以及使用中引入的损伤都是不可避免的。针对这种现状提出的损伤容限设计法有了较大的突破，在飞机设计上已经获得了极大的成功，可是目前还没有应用于火车零部件的设计中。

损伤容限设计的基本出发点是承认结构中存在着未被发现的初始缺陷、裂纹或其他损伤，使用过程中，在循环载荷作用下将不断扩展。通过测试分析和试验验证，对可检结构给出检修周期，对不可检结构提出严格的剩余强度要求和裂纹增长限制，以保证结构在给定使用寿命期内，不致因未被发现的初始缺陷的扩展造成严重事故。

损伤容限设计以断裂力学特别是线弹性断裂力学理论为基础，以断裂韧性试验和无损检测技术 (NDT) 为手段，承认结构在使用前就带有初始缺陷，但必须把这些缺陷和损伤在使用期内的增长控制在一定的范围内，在此期间，结构应满足规定的剩余强度要求，以保证结构的安全性和可靠性。

损伤容限的设计概念可由下图来描述：

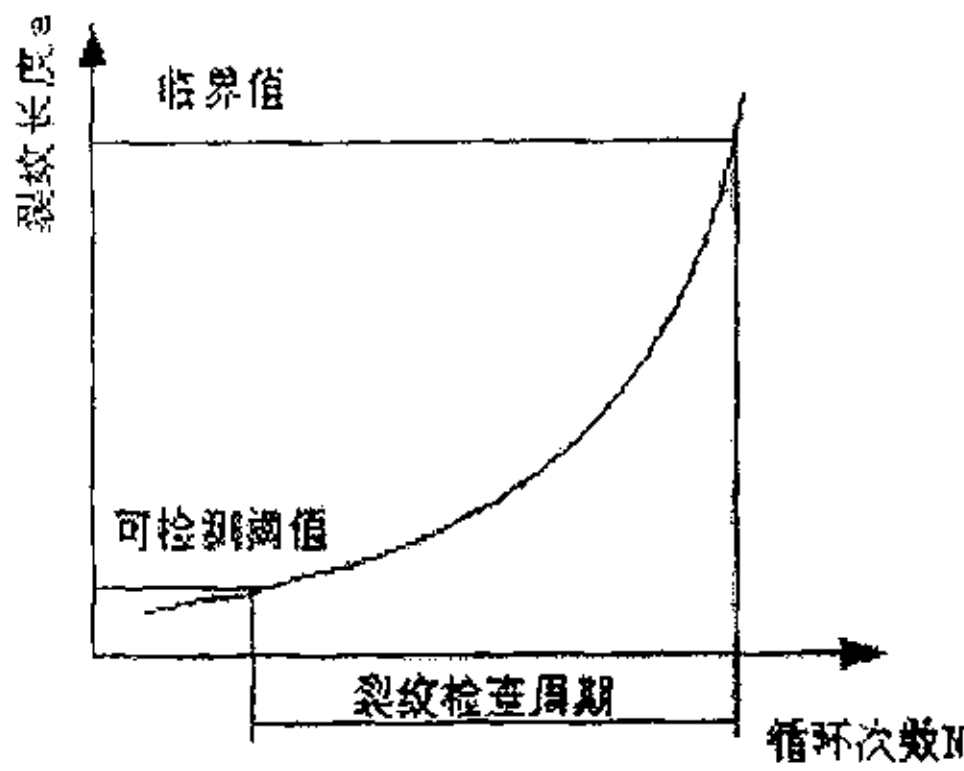


图 2-2 裂纹扩展曲线

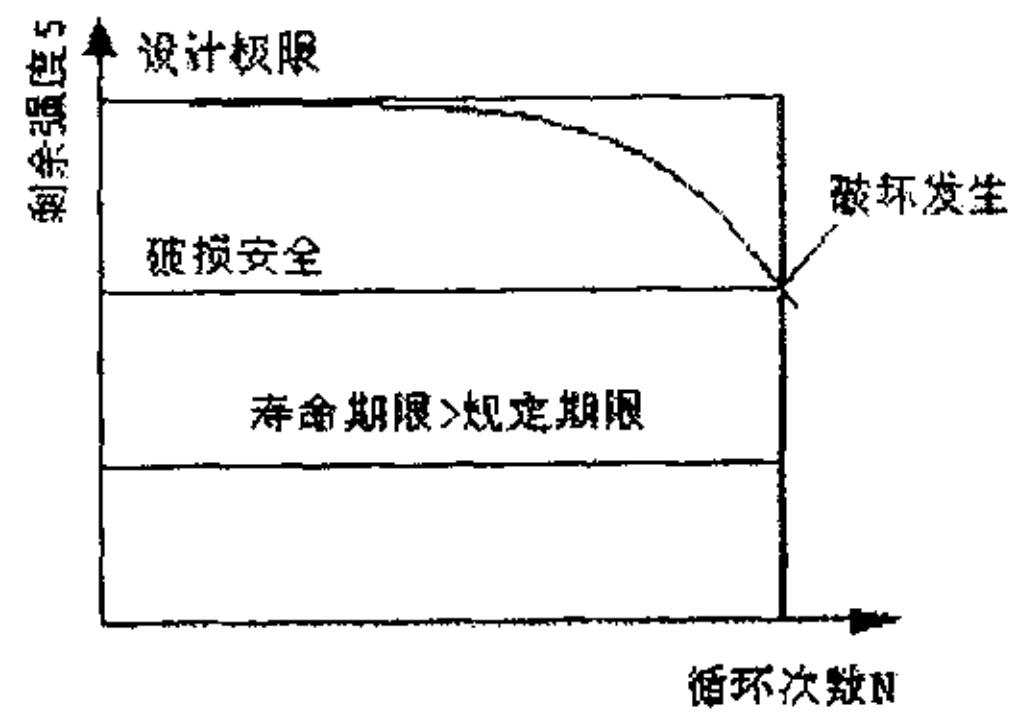


图 2-3 剩余强度曲线

图 2-2 为裂纹长度 a 与循环次数 N 的裂纹扩展 $a-N$ 曲线，应将裂纹长度限制在临界值以下；图 2-3 为强度 S 与循环次数 N 的剩余强度曲线，应将剩余强度限制在破损安全线以上。裂纹从可检测阈值开始到临界值为止是裂纹的检查

周期。因此损伤容限设计中必须考虑以下三个重要的因素，以使结构的安全性达到一个规定的水平：

① 临界裂纹尺寸或剩余强度

它表明在剩余强度要求的载荷作用下，改结构允许存在的最大损伤，或在某一规定的损伤情况下，该结构的剩余强度应大于要求的剩余强度值。结构中出现的裂纹会大大降低结构的强度，为了防止灾难性事故的发生，必须估计开裂构件在其整个寿命期内的承载能力。开裂构件的承载能力就是该结构的剩余强度，它随材料的韧性、裂纹几何形状和结构构型而变化。

火车轮和轴可视为缓慢裂纹增长结构，在使用中，结构缺陷或裂纹不允许达到不稳定扩展规定的临界尺寸。这种结构不同与多途径传力结构，主传力结构损坏后将没有由剩余结构的裂纹缓慢扩展来保证安全。其剩余强度的计算相对简单。

应力强度因子关系式：

$$K = \alpha\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

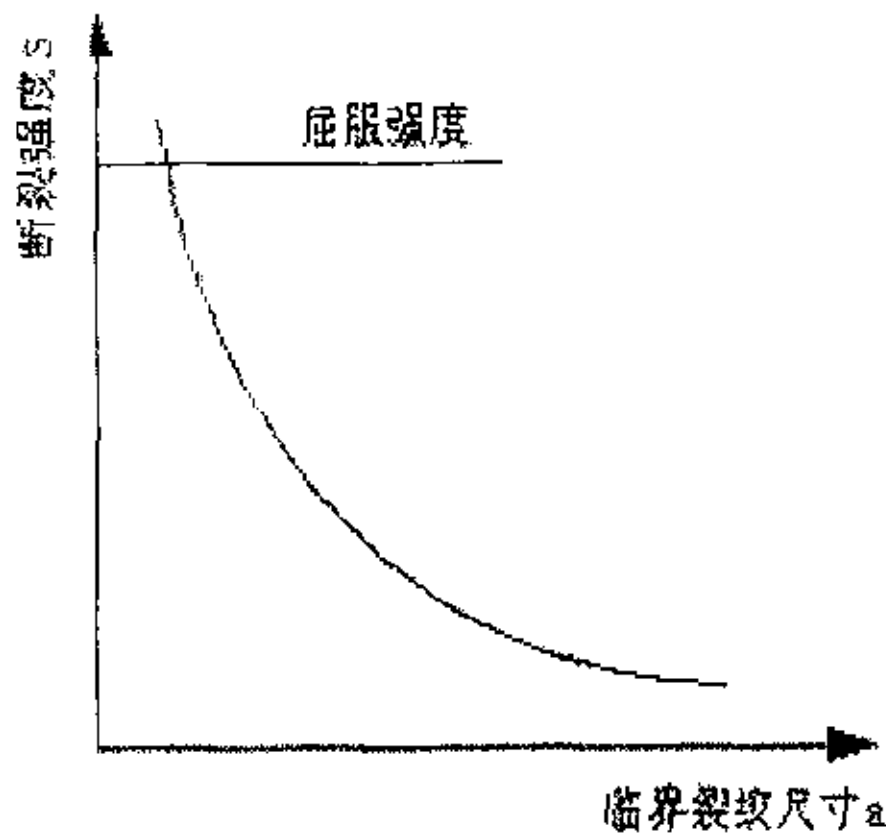


图 2-4 断裂强度与临界裂纹尺寸的关系

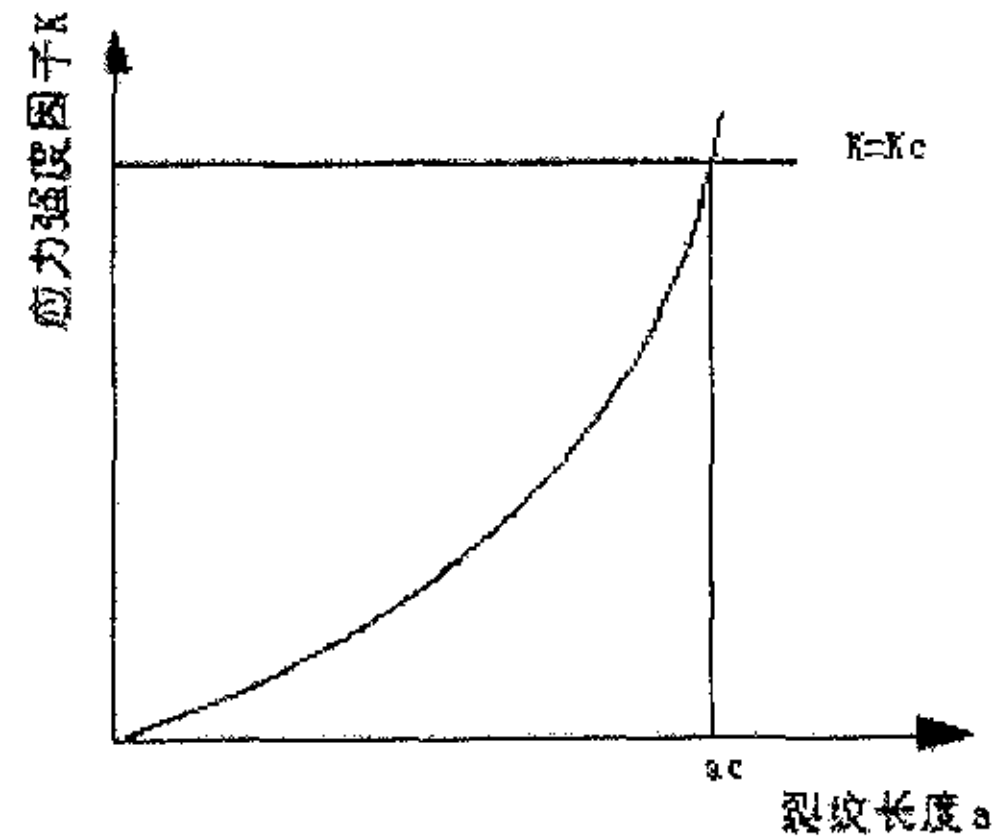


图 2-5 应力强度因子与裂纹长度的关系

破坏准则：

$$K = K_c \quad (2.6)$$

利用前两步的结果导出断裂强度与临界裂纹尺寸之间的关系，得到足够的数值，就可以做出剩余强度图了。

② 裂纹扩展

在该结构部位的载荷谱和环境谱作用下，裂纹长度从可检裂纹尺寸至临界裂纹尺寸值之间的裂纹扩展期。

③ 损伤检查

损伤检查是获得结构损伤容限特性的一个重要方面，它是保证结构在整个使用寿命期间满足结构完整性要求所必须的。目前工程上常用步进法确定检查间隔。确定方法如图 2-6 所示：

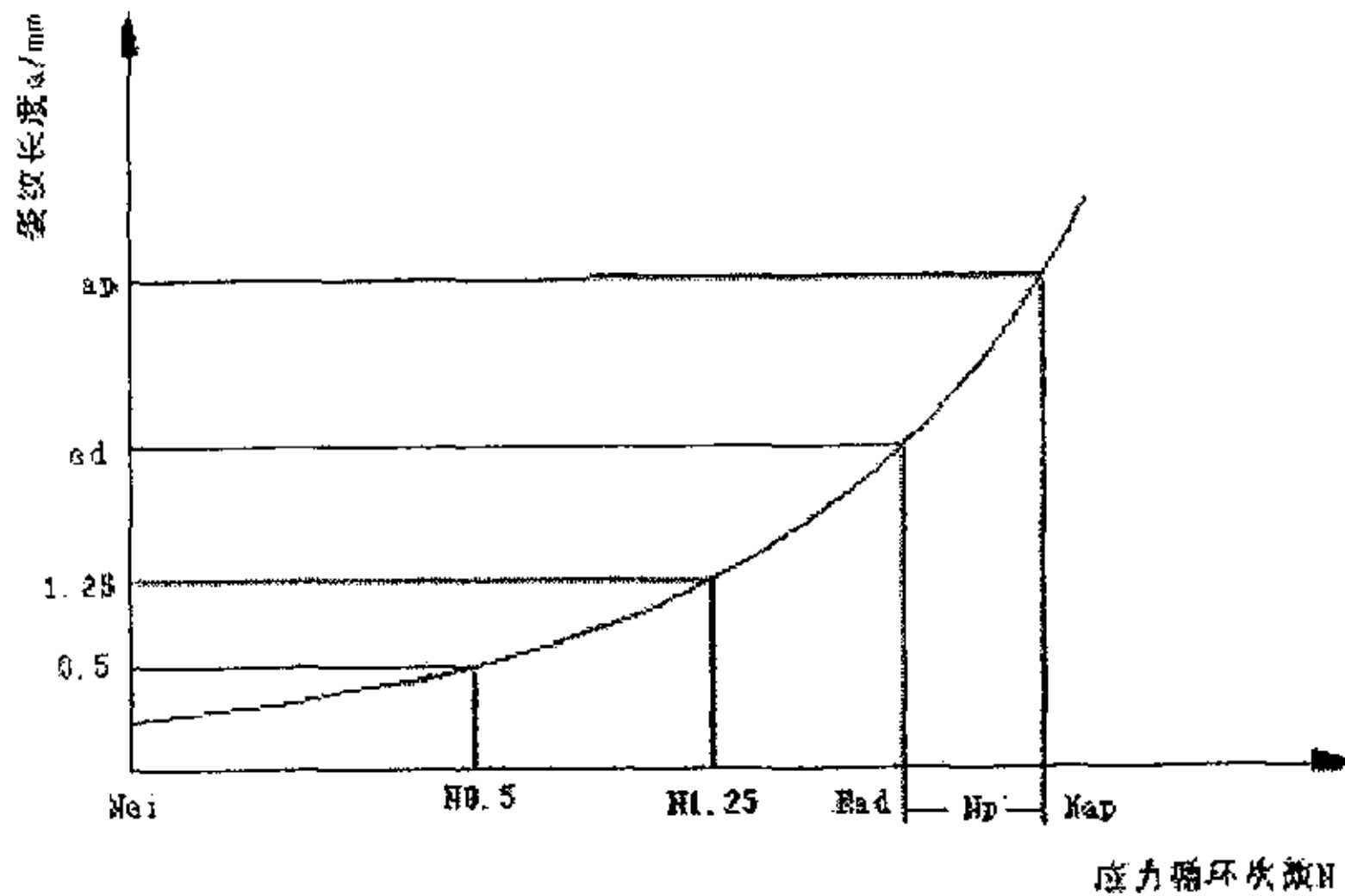


图 2-6 确定检查间隔的步进法

首先在裂纹扩展曲线上找出 $a=1.25\text{mm}$ 和 a_p 的点，如果 $N(a_p)-N(1.25) > 2$ 个寿命周期，不需要检查即可认为结构为缓慢裂纹扩展的不可检结构。如果 $N_p=N(a_p)-N(a_d) > 0.5$ 个寿命周期，检查间隔为 0.25 个寿命周期，该结构为可检结构。应使用无损检测方法进行进一步的检查。

由此可见，正确估计裂纹的大小是关键，如果确定了构件内部裂纹的长度，那么结构的剩余强度就可以确定，构件使用过程中的检查周期亦可以确定。

确定火车轮的检查间隔，是基于这样的考虑：目前国内火车轮的设计、制造和检测过程都遵循着严格的行业标准（TB），火车轮在整个生命周期的早期阶段可认为是不会出现宏观裂纹的，只是在后期或接近检修周期的时候才需要

进行检测。在制定检测计划时，上次检测的结果将作为确定下次检测时间的依据。只有在检测阶段，才需要启动检测系统进行连续在线动态检测。另一方面，各个火车轮的检查周期也是确定检测系统中各个通道的信号的优先级的依据。具有较小检查周期的火车轮，其相应通道的 AE 信号将具有较高的优先级，能引起 CAN 总线的优先响应，从而得到上位机软件的优先处理，从而避免总线“多主竞争”时可能引起的信号处理滞后。

2.4 本章小结

构件中存在的微观和宏观损伤对裂纹形成过程有重要的影响，裂纹的扩展过程遵循着断裂力学理论描述的规律。在此基础上，根据损伤容限设计的思想，提出了根据火车轮的运行状态确定检测间隔的方法。检测间隔较小的火车轮产生的声发射信号将具有较高的优先级，在总线“多主竞争”的情况下将优先得到处理，实现重点部位的重点监控。

第 3 章 声发射信号的产生机理

构件在外部条件作用下，内部的变形或缺陷由“相对静止”进入“相对运动”状态，或者由一种状态运动到另一种状态，这种状态的变化改变了材料中的能量分布，使一部分能量以弹性波的形式释放出来。声发射可以看作是材料在动态过程中产生的一种弹性波。所以，由构件发射出来的每一个声信号都包含着反映结构声发射源的缺陷性质或状态变化的丰富信息。声发射技术就是通过对检测到的声发射信号加以处理、分析和研究，从而推断出构件内部的状态变化情况的一种无损检测技术。

声发射检测得到的是一些电信号，根据这些特定的电信号可以判断构件内部缺陷的性质及其变化、发展和预测缺陷未来的可能状态。因此为了对缺陷的动态特征作出正确的分析和判断，需要深入了解构件的声发射特性。

3.1 塑性变形过程中的声发射^[10,11]

根据现代塑性力学的理论，在塑性变形过程中位错的滑移起着决定性作用。在理想情况下，金属中的原子以一定的次序有规则地排列，但实际金属中都存在着各种各样的缺陷，其中位错就是由于原子排错了位置而形成的一种缺陷。在外部应力作用下，位错在滑移面上运动使金属塑性变形。一个位错从低能的点阵位置运动到另一个位置，在新的点阵位置振动。计算表明，高速运动的位错发射高频率低幅度的声发射信号，而慢运动的位错则发射低频率高幅度的信号。一个位错发出的信号能量太小，以至不能为高灵敏度的声发射仪检测到。因此，设想许多位错同时运动，据估计大约 100~1000 个位错同时运动时声发射仪可收到连续型信号，几百到几千个位错同时运动，声发射仪可收到突发型信号。位错运动产生声发射的另一种情况是位错的淹没和塞积位错的解脱。一个位错移至金属表面，产生一个原子间距的滑移台阶，位错消失；在同一个滑移面上正位错和负位错相遇而抵消，这两个过程均称为位错的淹没，位错淹没产生声发射。在同一个滑移面上，许多位错移至金属表面形成滑移带，可产生突发型声发射信号。在滑移面上运动的位错碰到障碍物，如硬的第二相质点和晶粒边界等，位错可能被塞积。几个位错塞积在一起又可能冲破障碍而继续相前运动，这个过程产生突发型声发射。一个位错获得能量后又可能产生新的

位错，这种位错增殖过程也会出现声发射。孪生变形是金属变形的一种特殊方式，它以滑移面为镜面，以原子排列成镜面对称的方式变形。这种变形速度极高，成为强烈的声发射源。

Dunegan 等人以 7075-T6 铝进行拉伸试验，得出声发射计数率与应变的关系，如图 3-1 所示。

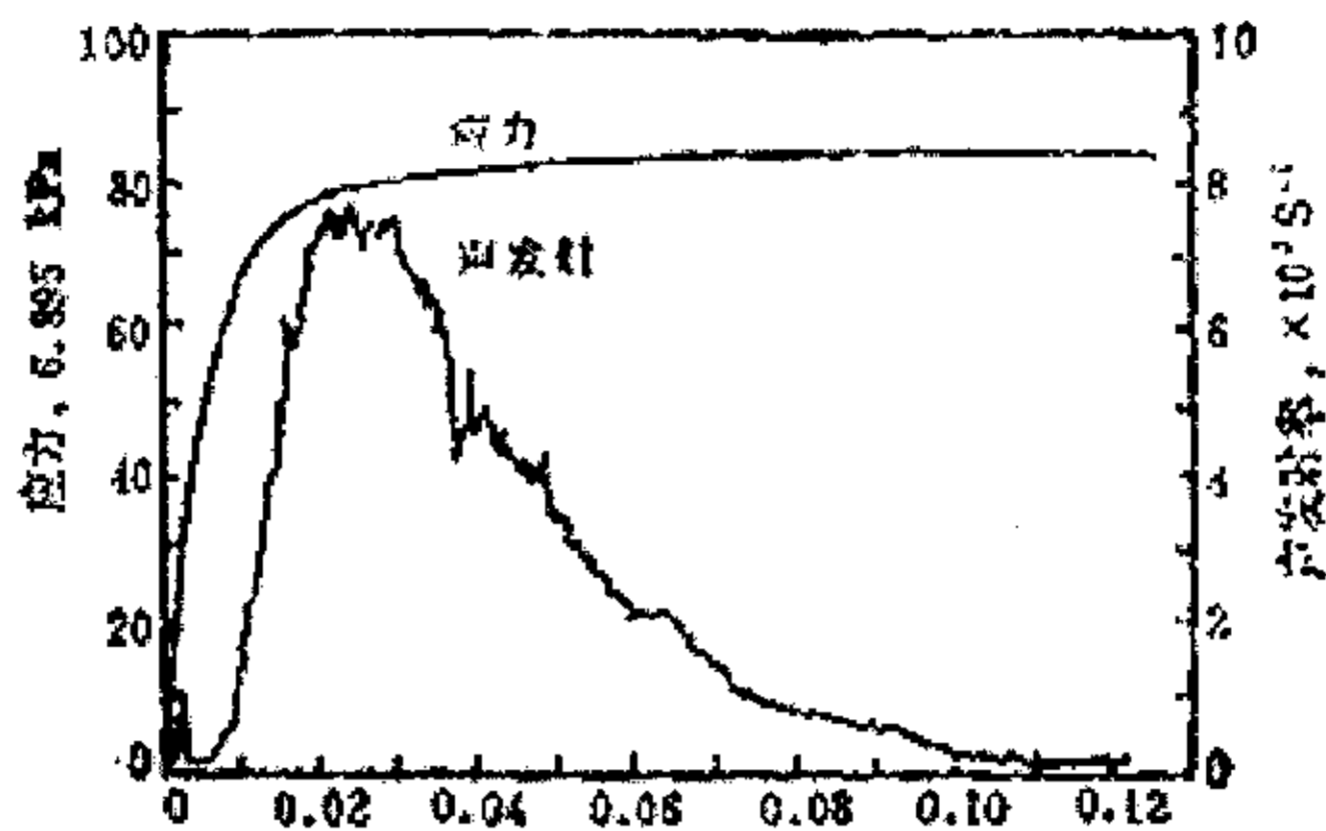


图 3-1 7570-T6 声发射特点

Dunegan 等以软钢进行试验，也得出类似的关系，如图 3-2 所示。

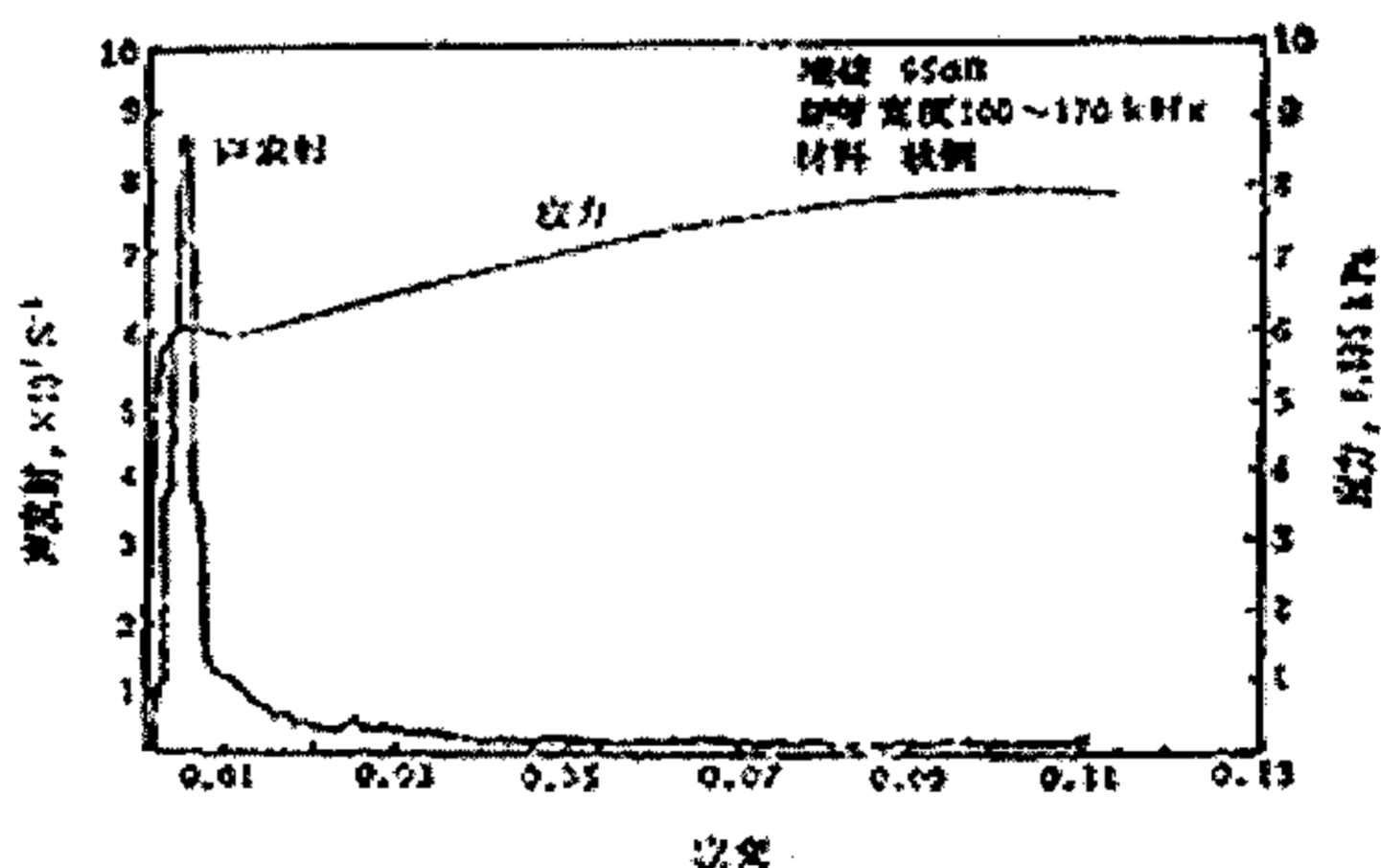


图 3-2 软钢的声发射特点

K. yoshida 等人以 SPCC 钢进行拉伸试验，发现在屈服和断裂过程都伴随有

有强烈的声发，如图 3-3 所示。

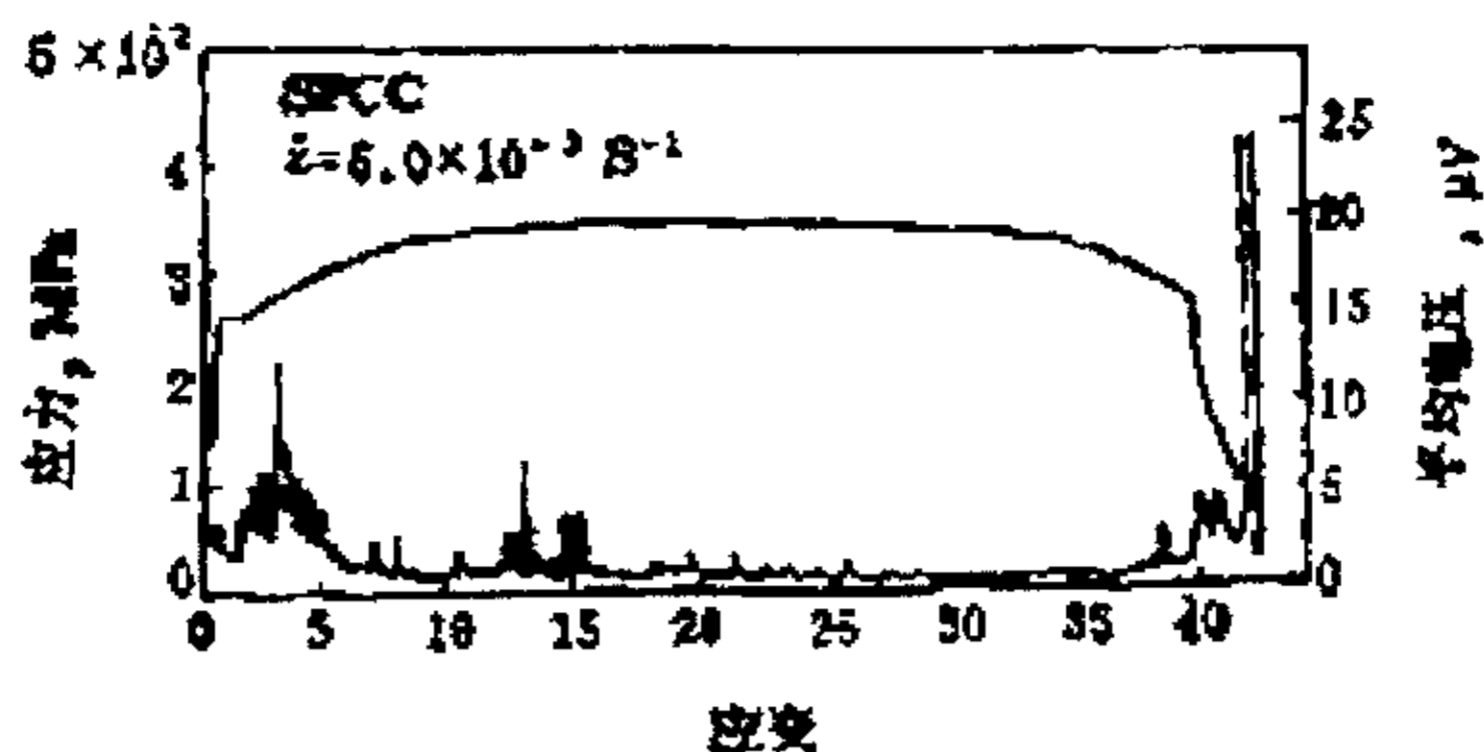


图 3-3 SPCC 的声发射特点

可见材料在屈服阶段将会产生明显的高幅声发射信号，使用声发射技术可以实现构件屈服阶段的实时预报。

3.2 裂纹形成和扩展过程中的声发射

在塑性变形过程中形成的显微裂纹 (micro crack) 虽不致显著影响构件的健全性 (Integrity)，但是在外力作用下有可能发展成为宏观裂纹 (macro crack)。各种形式的裂纹的萌生和扩展是结构件破坏的基本原因。裂纹产生声发射的过程主要有裂纹的形成、裂纹尖端的塑性变形和裂纹扩展三个阶段。这三个阶段往往互相联系交替进行。塑性材料受到应力作用时，由于材料中第二相硬质点与基体材料变形的不匹配，往往在第二相硬质点与基体的界面上形成微孔，当外加应力增大时，微孔长大，相邻微孔连接在一起形成裂纹和裂纹扩展。脆性材料则是以位错塞积的方式形成微裂纹，一旦微裂纹形成，裂纹尖端的塑性变形较小，裂纹扩展较快，裂纹每向前扩展一步，便有突发型信号出现。

塑性材料和脆性材料裂纹扩展时的声发射信号是不同的。塑性材料发射的次数多，每次发射的强度小；脆性材料发射的频率低，每次发射的强度大。随着应力增大，塑性材料的声发射以小台阶缓慢上升，脆性材料则以大台阶迅速上升，如图 3-4 和图 3-5 所示。与塑性变形不同，裂纹的萌生和不连续扩展产生的是突发型声波，而塑性变形产生的是连续型声波。

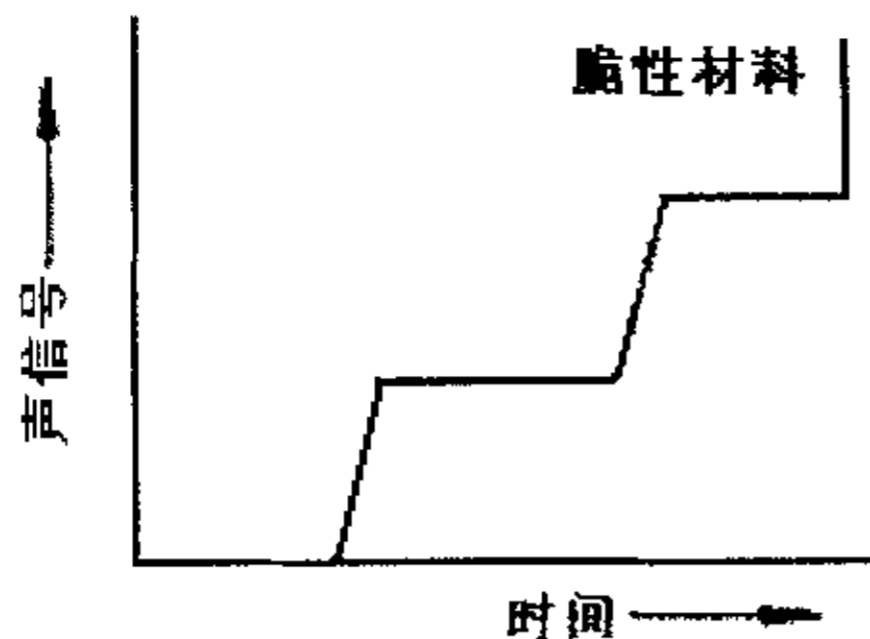


图 3-4 脆性材料的声发射特点

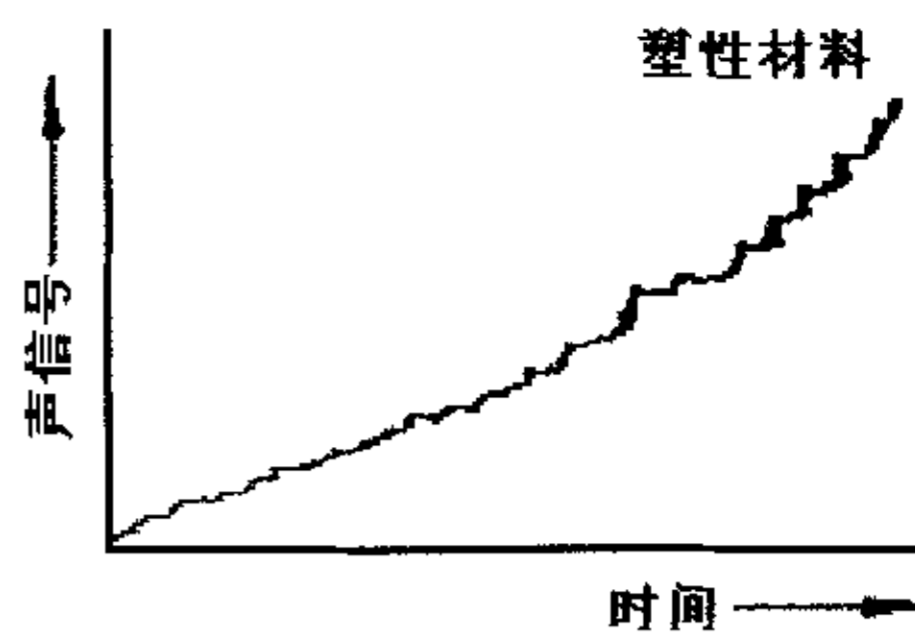


图 3-5 塑性材料的声发射特点

3.3 冲击过程中的声发射

构件在冲击过程中的情况比较复杂。在冲击载荷作用下，有可能出现塑性变形，也有可能产生裂纹，而且裂纹可能还要进行不稳定扩展。

H.Richter 等^[12]对带有初始裂纹的试件（材料为德国的 10CrMo9-10）按照 ASTM 规范进行了冲击试验。试件在中速率冲击载荷作用下的加载曲线和产生的声发射信号波形曲线如图 3-6 所示。

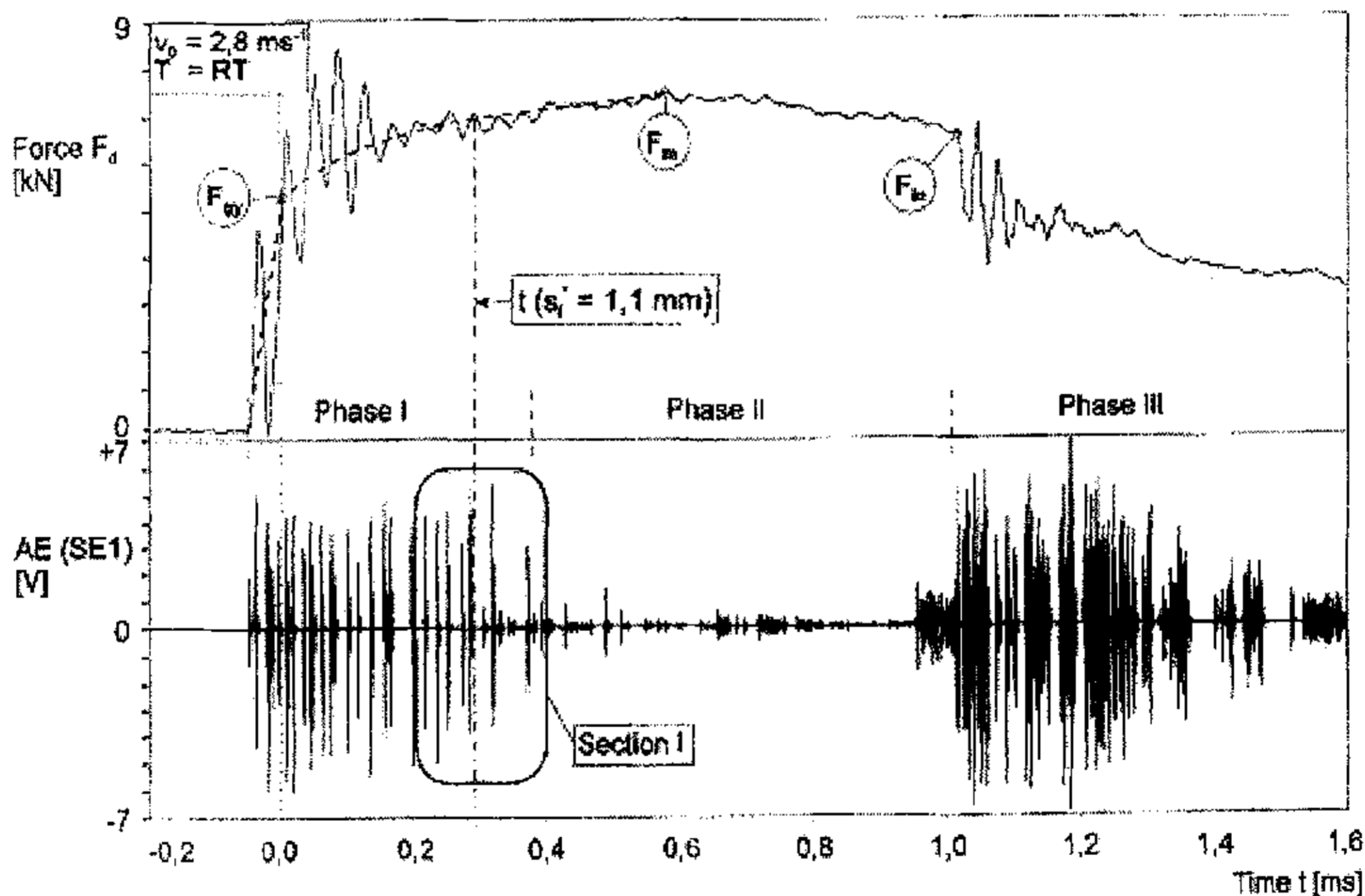


图 3-6 冲击载荷作用下的过渡区做的载荷和声发射曲线

在第一阶段冲击力有较强的振荡，对应的声发射信号也有较强的振荡，但并未出现裂纹。在第二阶段出现了裂纹，且由于发生了较大的塑性变形，冲击力的振荡幅度有所减少，对应的声发射信号可看作是连续型声波上叠加有低幅突发型声波。这个阶段声发射信号的减弱也有可能是由于试件内部的某种裂纹抑制造成的^[13]。在第三阶段，处于不稳定状态的裂纹开始扩展，冲击载荷有明显的下降，产生的是大量的突发型声发射信号。从图中还可以看到裂纹的扩展是不连续的，L.Manes 等人^[13]的实验也证明了这一点。

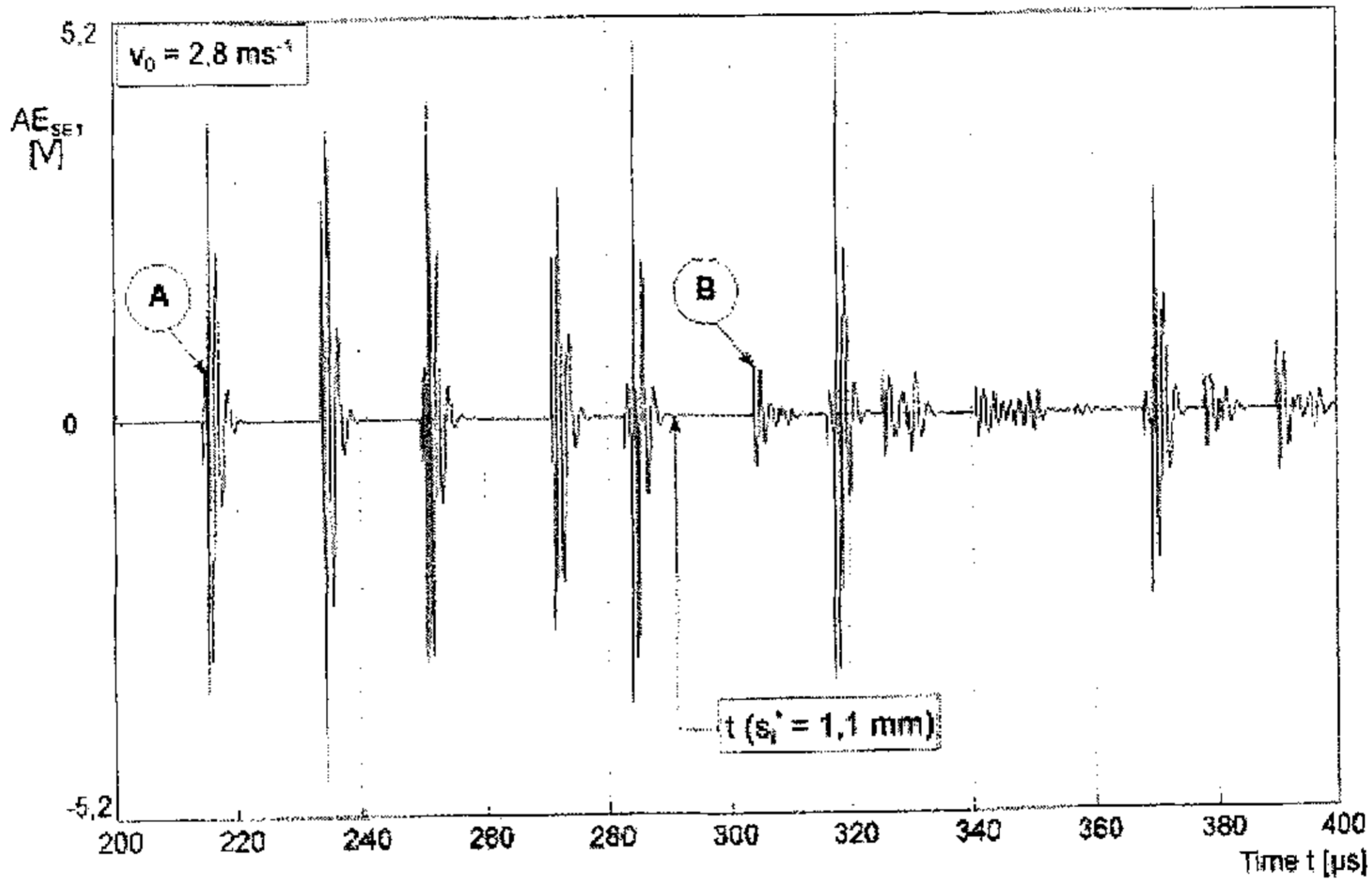


图 3-7 放大后的 I 区中的波形曲线

在裂纹出现的两侧出现了两种类型的声发射信号：A 型和 B 型，如图 3-7 所示。A 型声发射信号具有较短的持续时间和较高的幅值，在第一阶段中一直存在，之后又和 B 型声发射信号叠加在一起，这种信号是由于试件和冲锤的不稳定接触和声波的反射造成的；B 型信号则出现在产生裂纹的时刻，标志着试件中的延性裂纹开始扩展。因此在信号处理中，只要确定 B 型声发射信号出现的时刻就可以知道裂纹出现的时间。

3.4 声波在各向同性介质中的传播规律

根据弹性力学理论，弹性体的应变和位移有如下关系：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}) \quad (3.1)$$

式中： ε_{ij} —应变分量；

u_i —位移分量；

$$u_{ij} = \partial u_i / \partial x_j ;$$

又已知弹性体的平衡方程为：

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

式中： σ_{ij} —应力分量；

$$\sigma_{ij,j} = \partial \sigma_{ij} / \partial x_j ;$$

F_i —体力分量；

对于各向同性弹性体，根据广义虎克定律有：

$$\sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3.3)$$

式中： $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ —拉梅 (Lame) 常数

E —弹性模量；

ν —泊松比；

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{—剪切弹性模量；}$$

$e = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \varepsilon_{jj}$ —体积应变；

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \text{—}\delta \text{函数；}$$

将方程 (3.1)、(3.3) 代入方程 (3.2) 得各向同性弹性体的运动方程：

$$\rho \ddot{u}_i = (\lambda + G) u_{i,jj} + G u_{i,yy} + F_i \quad (3.4)$$

相应的矢量形式为：

$$\rho \ddot{\vec{u}} = (\lambda + G) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + G \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (3.5)$$

式中： $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3}$ —哈密顿算子；

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \text{—拉普拉斯算子；}$$

忽略方程 (3.5) 中的体力分量 F ，根据矢量恒等式

$$\nabla^2 u = \nabla(\nabla \cdot u) - \nabla \times (\nabla \times u) \quad (3.6)$$

可以得到：

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u} &= (\lambda + G)\nabla(\nabla \cdot u) + G[\nabla(\nabla \cdot u) - \nabla \times (\nabla \times u)] \\ &= (\lambda + 2G)\nabla(\nabla \cdot u) - G\nabla \times (\nabla \times u) \end{aligned} \quad (3.7)$$

将运动方程分为两种情况，第一种情况：

$$\nabla \times u = 0, \quad \nabla \cdot u = \partial u_i / \partial x_i = \varepsilon_{ii} = e \neq 0$$

即运动是无旋的且来源于弹性体微元的体积变化，包括伸长和切变，于是方程 (3.7) 简化为：

$$\rho \ddot{u} = (\lambda + 2G)\nabla(\nabla \cdot u) \quad (3.8)$$

这就是膨胀波（又称无旋波、纵波、P波）的波动方程。其波速是：

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (3.9)$$

第二种情况是：

$$\nabla \cdot u = 0, \quad \nabla \times u \neq 0$$

即弹性体微元无体积变化，只有形状的变化，方程 (3.7) 简化为：

$$\rho \ddot{u} = -G \nabla \times (\nabla \times u) \quad (3.10)$$

这是剪切波（又称切变波、横波、S波）的波动方程。其波速是：

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.11)$$

S波又分为SH波和SV波，它们的偏振方向互相垂直，它们都垂直于波的传播方向。

膨胀波和剪切波都是无限介质中传播的波，统称为体波，其特点是传播速

度只与传播介质的力学性质有关，对一定介质而言，波速为一常数。表 3-1 列出了不同材料中的纵波和横波的传播速度^{[15], [16]}。

表 3-1 各种材料中的纵波和横波的传播速度

材料	ρ (千克/米 ³)	c_p (米/秒)	c_s (米/秒)
空气	1.29	332	
水	1000	1480 (20℃)	
钢	7800	5850	3230
铜	8900	4700	2260
铝	2700	6260	3080
玻璃	2500	5800	3400
橡胶	930	1040	27

在许多实际情况下，介质所占据的空间是有限的，因此波的传播还应考虑介质边界的影响。在介质的内部，声波仍然是膨胀波和剪切波的组合，但由于介质边界的影响，组合的或单类的声波会表现出特殊的形式和性质。在介质的表面，也可以产生沿表面传播的声波。

瑞利 (L. Rayleigh) 于 1882 年从理论上指出二维波在半无限大介质表面上传播的可能性，详细论证了瑞利波 (R 波) 的传播特点。瑞利波的质点位移局限在弧矢平面内。弧矢平面是指垂直于介质自由表面而包含传播方向的竖直平面。质点位移由一个平行于表面的纵波分量和一个垂直于表面的横波分量组成，质点运动的轨迹为椭圆行，椭圆平面在弧矢平面内，椭圆的主轴垂直于介质的表面。随着深度的增加，这两个分量迅速减少，大部分能量集中在距表面为一个波长的深度范围内。瑞利波的传播特点如图 3-8 所示。

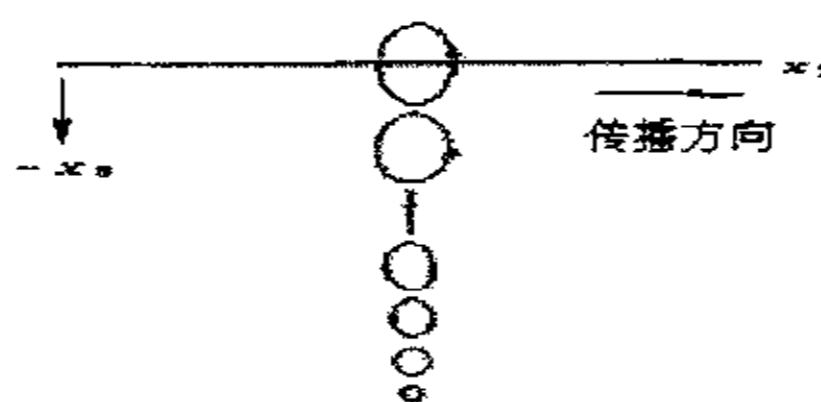


图 3-8 瑞利波的传播特点

设半无限大弹性固体的表面上覆盖有半无限大的流体介质，如空气，水等，表面瑞利波的波速满足方程 (3.12)：

$$\left[2 - \left(\frac{c_R}{c_s}\right)^2\right]^2 - 4\left[1 - \left(\frac{c_R}{c_s}\right)^2\right]^{1/2}\left[1 - \left(\frac{c_R}{c_p}\right)^2\right]^{1/2} = -\frac{\rho_L}{\rho}\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^4\left[\frac{1 - (c_R/c_H)^2}{1 - (c_R/c_L)^2}\right]^{1/2} \quad (3.12)$$

式中： c_R —瑞利波的波度；

ρ_L —流体密度；

$$c_L = \sqrt{\frac{B_L}{\rho_L}};$$

$B_L = \lambda_L + \frac{2}{3}G_L$ —流体的体积弹性模量；

λ_L —流体的拉梅常数；

G_L —剪切模量；

不同泊松比下的瑞利波的传播速度如表 3-1 所示^[17]。

表 3-2 各种泊松比下的瑞利波速度

ν	c_R / c_S
0	0.862
0.25	0.919
0.333	0.932
0.5	0.955

由于材料泊松比的可能取值范围为 0~0.5，可以证明，在此范围内纵波、横波和瑞利波的波速存在以下关系：

$$0 < c_R < c_s < c_p$$

当弹性波在横向尺寸很大的薄板中传播时，由于板厚往往比波长小得多，则不能再将介质视为无限或半无限的，必须考虑两个板面的影响。

在板的表面，有垂直于弧矢平面传播的弹性波，即 Love 波，它实际上是半无限大介质表面薄层内的 SH 模式波。Love 波的幅度随界面以下的深度的增加以指数规律减少，直到振幅为零，它是多次和频散的。由于 Love 波的实用意义

远不如 Lamb 波，所以狭义的板波往往仅指 Lamb 波。

Lamb 波的质点位移方向包含 P 波和 SV 波两种成分。按照质点位移分布的不同，可将 Lamb 波分为对称型（S 型）和反对称型两种，如图 3-8 所示。各型又分为若干阶，分别以 S_0 、 S_1 、 S_2 ……， A_0 、 A_1 、 A_2 ……表示。



图 3-9 Love 波的传播特点

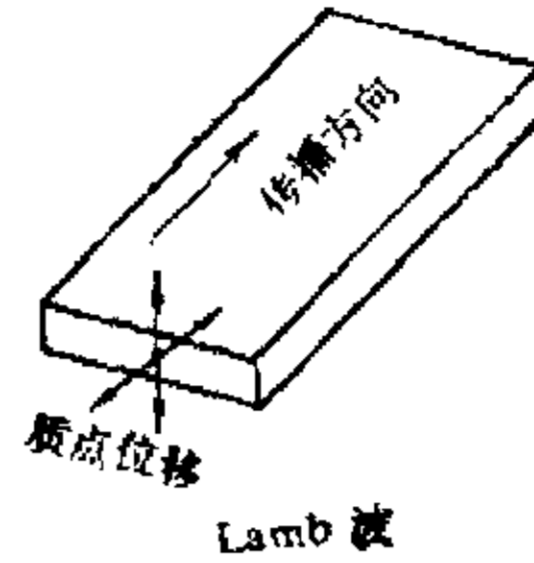


图 3-10 兰姆波的传播特点

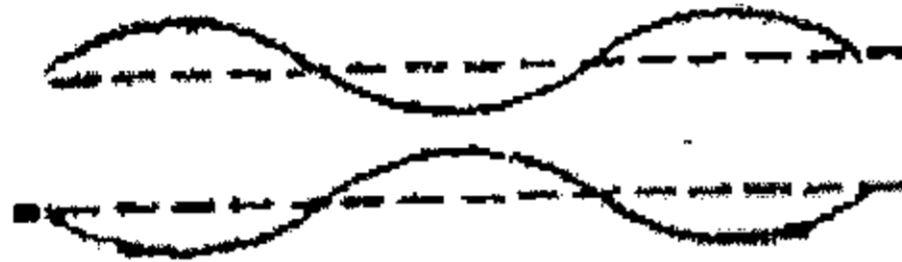


图 3-11 对称型兰姆波的传播特点

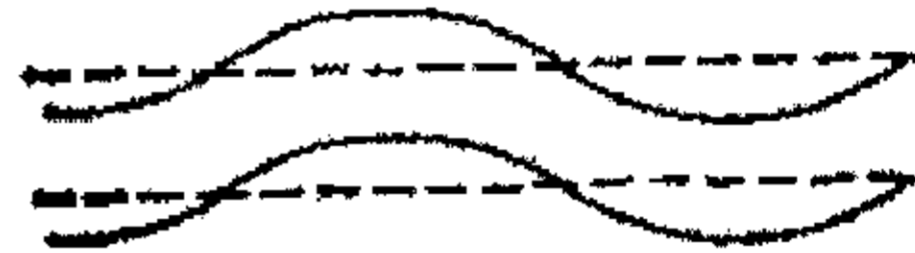


图 3-12 反对称型兰姆波的传播特点

对称型 Lamb 波通常称作纵向波型（扩展波或 E 波），因为质点位移方向是沿着板的纵向，它的频率方程为：

$$\Delta p q \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f d}{c} q\right) + (p^2 - 1)^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f d}{c} p\right) = 0 \quad (3.13)$$

式中： $p^2 = \left(\frac{c}{c_s}\right)^2 - 1$

$$q^2 = \left(\frac{c}{c_p}\right)^2 - 1;$$

c —Lamb 波的传播速度；

d —板厚；

f —频率；

反对称型 Lamb 波则由于质点在沿厚度方向上位移是横向的，故称作弯曲波（F 波）。它的频率方程为：

$$(p^2 - 1)^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f d}{c} q\right) + 4 p q \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f d}{c} p\right) = 0 \quad (3.14)$$

方程 (3.13)、(3.14) 称为 Rayleigh-Lamb 频率方程。可见，Lamb 波的传播速度 c 与频率 f 有关。板厚一定时，频率越高则速度越低，于是在波的传播过程中各频率成分逐渐分开，这种现象称为频散 (Dispersion)。在管、棒状弹性介质中传播的波也会由于介质界面的限制而产生频散现象。一般将传播受到限制的波通称为循轨波。

根据经典板波理论，扩展波（E 波）的声速可表示为：

$$C_e = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\gamma^2)}} \quad (3.15)$$

式中： ρ —被测材料的密度；

E —杨氏弹性模量；

γ —泊松比。

而弯曲波（F 波）的声速可表示为：

$$C_f = \left(\frac{D}{\rho h}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega} \quad (3.16)$$

式中： $\omega = 2\pi f$ ；

f —为超声波频率；

$D = Eh^3/12(1-\gamma^2)$ ；

h —板厚。

由式 (3.16) 知，F 波的传播速度与频率有关，即 F 波存在频散现象，另一方面 F 波模式中最大位移成分与板平面垂直，因此，随着声发射波的传播，其波形将会发生剧烈的变化。尽管式 (3.15) 中没有频率成分，但根据高阶板波理论，E 波也存在频散现象，只是当频率较低时，这种现象不太明显而已。扩展波和弯曲波的传播速度与频率的关系如图 3-13 所示。

Gorman 等利用扩展波和弯曲波的不同特点，成功地将飞机结构件搭接接头

处的裂纹声发射信号与其它噪声源的信号区分开来^[18]。

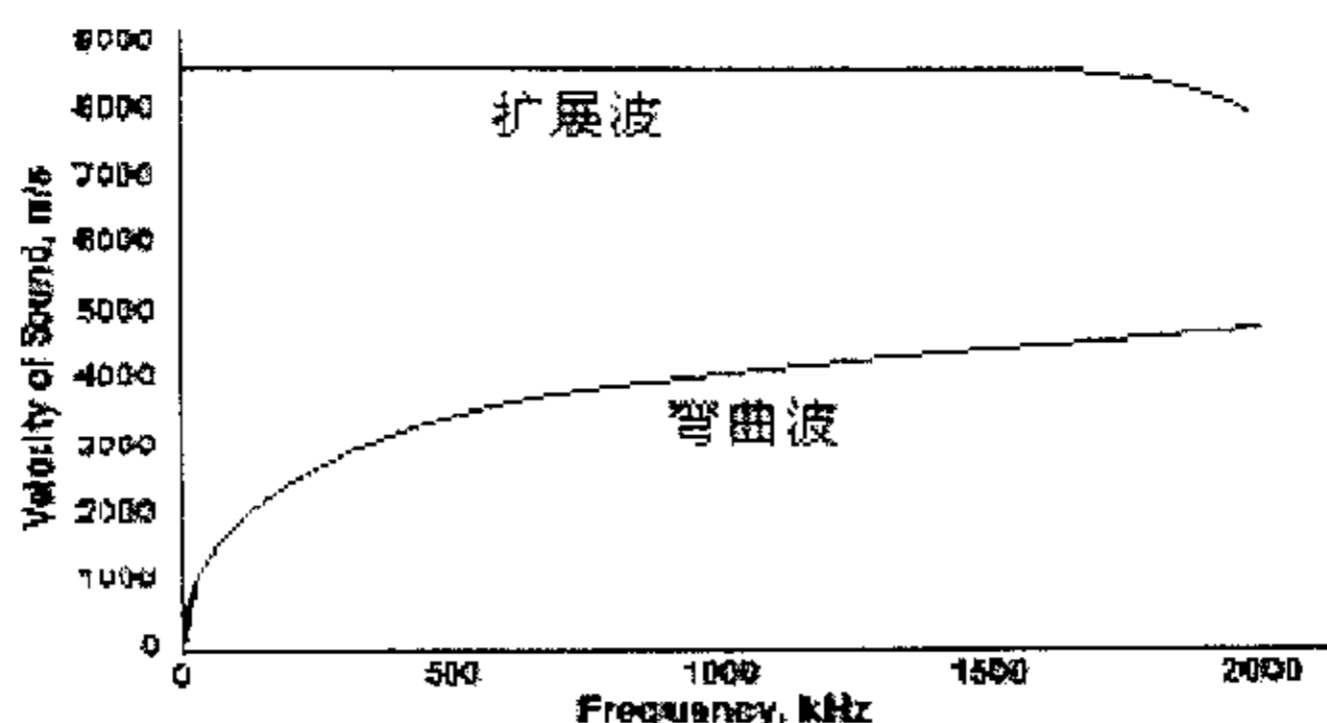


图 3-13 兰姆波的声速和频率的关系

在板平面内的声发射源主要产生扩展波，而板平面外的声发射源则主要产生弯曲波^[19]，因此疲劳裂纹产生的是具有较大高频分量的扩展波分量，而背景噪声信号和零件塑性变形产生的是频率相对较低的弯曲波分量。由于这两种波的频率范围不同，波速不同，波形特征亦存在明显差别，因而可以通过分离 AE 信号的不同模态成分，提取信号波形中表征疲劳裂纹萌生和扩展的扩展波，同时有效抑制弯曲波的影响。提取出信号中的扩展波后，根据波速和扩展波信号到达传感器的时间以及零件结构特征便可以计算出零件中疲劳裂纹的距离、方位。

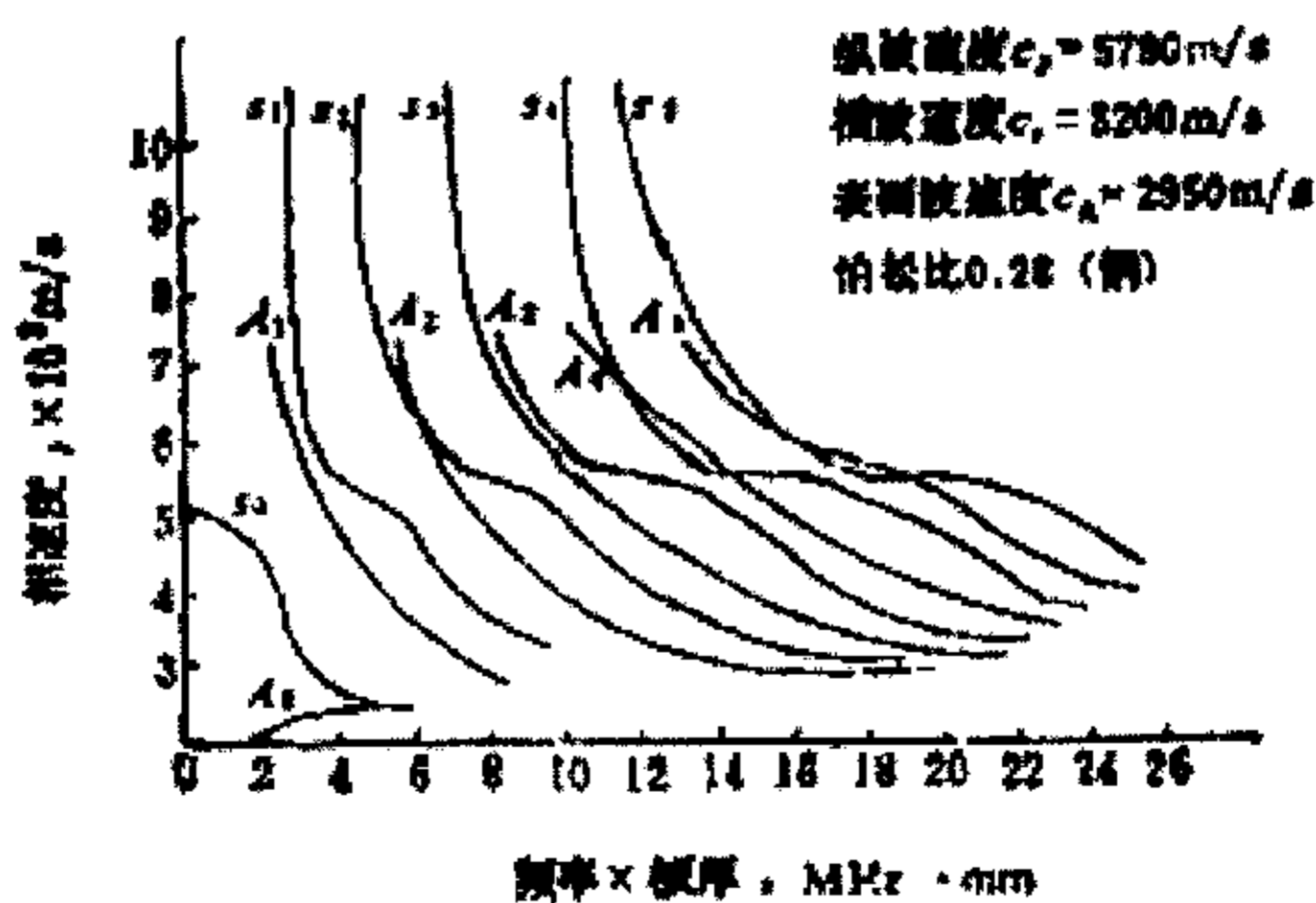


图 3-14 钢材中兰姆波的传播速度

图 3-14 中给出了钢材中兰姆波的传播速度。当板厚趋于无限时, S_0 、 A_0 阶速度趋于瑞利表面波速 C_R , 其余则趋于横波波速 C_s 。就压力容器来说, 一般认为声发射波以 Lamb 波的形式传播; 但是在壁厚较大时, 可视为以瑞利波的传播。

另一方面, 声波会随传播距离的增加而减弱, 而对于较高频段的声波尤其明显。声波衰减的原因是很复杂的。一种原因是在传播中声波的作用面可能扩大而能量并未得到补充, 它的幅度便相应减小; 另一种情况是声波穿过障碍物或不均匀介质时, 部分声波被零星地、陆续地散开, 声波的总能量虽然没有减少, 但是从指定的方向看, 声波越传越弱; 还有的情况是发生了能量转换, 如声能转换成热能等, 即发生声波的吸收。表面声波除了这些情况外, 声的散射, 以及声波向周围气体的幅射, 都导致了传播过程中的声波的减弱。

声波在传播过程中还会发生波型的转换。如体波在介质表面上的反射可形成表面波、板波 (在介质分界面上发生的波型转换); 晶界、微裂纹、夹杂等会造成波的反射与折射并发生波型转换; 在传播方向上波速的差异以及介质的非均匀性, 使波阵面发生变形; 结构的非线性弹性状态所造成的频散与阻尼也会使声波发生波型转换。

3.5 本章小结

本文论述了不同条件下 (塑性变形过程、裂纹的形成和扩展过程) 声发射信号的产生机理及其特点。这些特点是进一步波形识别的依据。

从弹性力学理论的应力、应变关系出发, 导出了纵波、横波和瑞利表面波的波动方程。在此基础上讨论了兰姆波的构成及其不同模式的传播特点。兰姆波理论是本检测系统设计的声学依据。

第4章 声发射信号的检测方法

声发射检测是一种动态的检测方法。构件只有在受力达到一定应变或在使用过程中缺陷有变化时才会有声发射出现,也只有在这种条件下才能进行声发射检测。声发射本质上是一种弹性波,其发射过程是一种以瞬态弹性波的形式迅速释放其内部积累的应变能的过程。声发射监控技术不需发射探测信号,而只是“被动”监听由于零件结构变化而发射出来的声波信号,通过分析所接收的信号,对声发射源的位置、物理状态做出判断,因此利用声发射检测可以获得缺陷的动态信息,进而评价缺陷的严重性和危险性,既可以根据缺陷的严重程度进行实时报警,还可以连续长期监视构件在使用过程中的安全性。声发射检测也不需要移动探头,而且几乎不受材料的限制,除少数材料外,黑色金属、有色金属、复合材料、塑料、木材、岩石等各种材料都有声发射现象产生。

美国于1964年研制成功实用的声发射监测系统,并用于固体燃料火箭发动机壳体的水压试验。这一成功的例子被认为是声发射研究从物理过程研究进入技术应用研究的开端。美国在声发射应用领域做了大量的工作,先后研制成功飞行中结构监控系统(FSMS)和裂纹探测系统(IFCDS)等^[20]。几十年来,声发射技术从理论到实践都有了巨大的发展,已成功地应用于压力容器检测、管道泄漏检查,以及桥梁、隧道和混凝土结构的监控等领域^[21, 22]。但是目前是适合在复杂的高背景噪声条件下进行声发射检测的系统为数还不多。从国外的进展来看,在声发射检测领域有较大影响的两大公司PAC公司和Digital Wave公司都声称美国军方解决了不少问题,可是要操作这些复杂的设备还需要检测人员具有较高的素质,在一些复杂情况下往往是根据操作人员的经验进行判断。

4.1 检测系统设计的依据

构件发出的声发射信号是一个不规则的复杂信号,选取一些特种参数,正确地记录和描述这些信号,是声发射检测中必须解决的第一个问题。可是至今尚不能直接测到从声发射源发出的原始波形,声发射信号的测量还只能以换能器的输出为基础。在本系统中,测量和记录的声发射参数主要有记数和记数率、能量、频谱、幅值等参数,并结合模态分析的方法进行声发射信号的分析 and 特征参数的提取。

4.1.1 声发射信号的特点

产生声发射的单个事件的持续时间很短，通常在 10^{-4} 到 10^{-8} 。声发射事件持续的时间愈短，其频率分量愈高。由于发声的微观过程不同，产生每一个声发射事件的阶跃时间也不同。因此，一般说来，声发射信号具有很宽的频谱。声发射信号在材料和工件中传播时，高频成分衰减比较大，其幅度也会随着传播距离增大而下降，而低频成分又与机械噪声重叠在一起，不易分离。声发射信号是十分复杂的，通常的声发射检测都选择某一频率范围进行。频率范围的选择取决于检测对象材料的声发射信号频谱和背景噪声的频谱比较，找出它们相差大的频段作为检测的窗口。图 4-1 所示为不同材料和研究领域常用的声发射检测的频率范围。

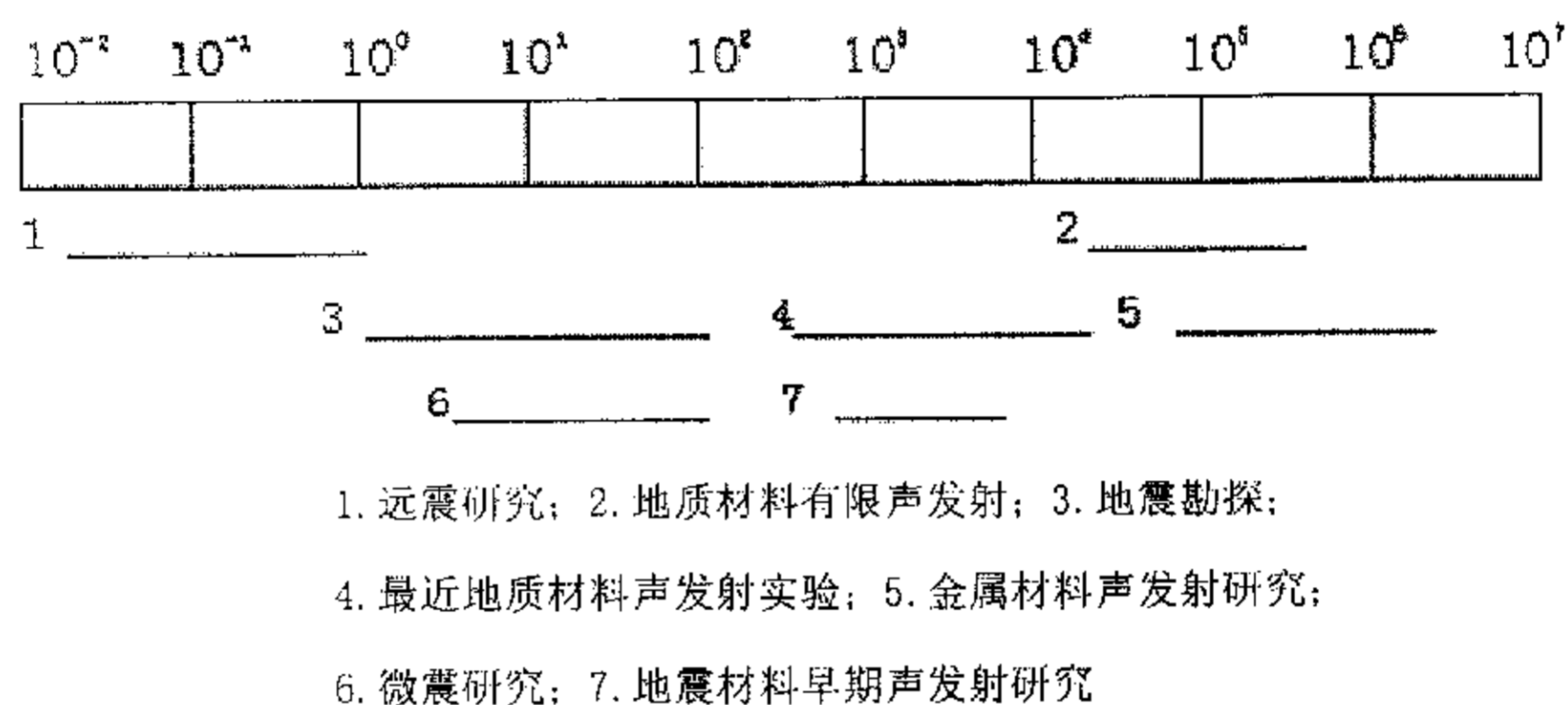


图 4-1 不同领域声发射检测使用的频率范围

由上图可见，在研究金属材料的声发射时，所选择的频率范围一般是 20KHz~1.2MHz。频率下限的选择主要是考虑到背景噪声，如振动和冲击噪声的影响，为了将其区分出来，可选取较高的下限频率以排除较低频机械噪声的影响。在强机械噪声干扰下，声发射检测仪常用的频率范围为 100K~1MHz。

声发射检测到的信号，实际上是发射源发出的纵波、横波以及在界面上产生波型转换后的一系列波的总和。真实记录声发射信号的波形还比较困难。目前所采用的检测手段，测得的声发射信号基本上有两种类型，即连续型声波和突发型声波，如图 4-2 和图 4-3 所示。连续型声发射信号幅度低而持续时间长，而突发型的声发射信号幅度大而持续时间短。在实际应用检测中有时还会出现

两种类型信号同时存在的情况。位错运动产生的声发射信号的相对幅值约为1~10，而裂纹形成时的声发射信号的相对幅值约为20~1000^[23]。

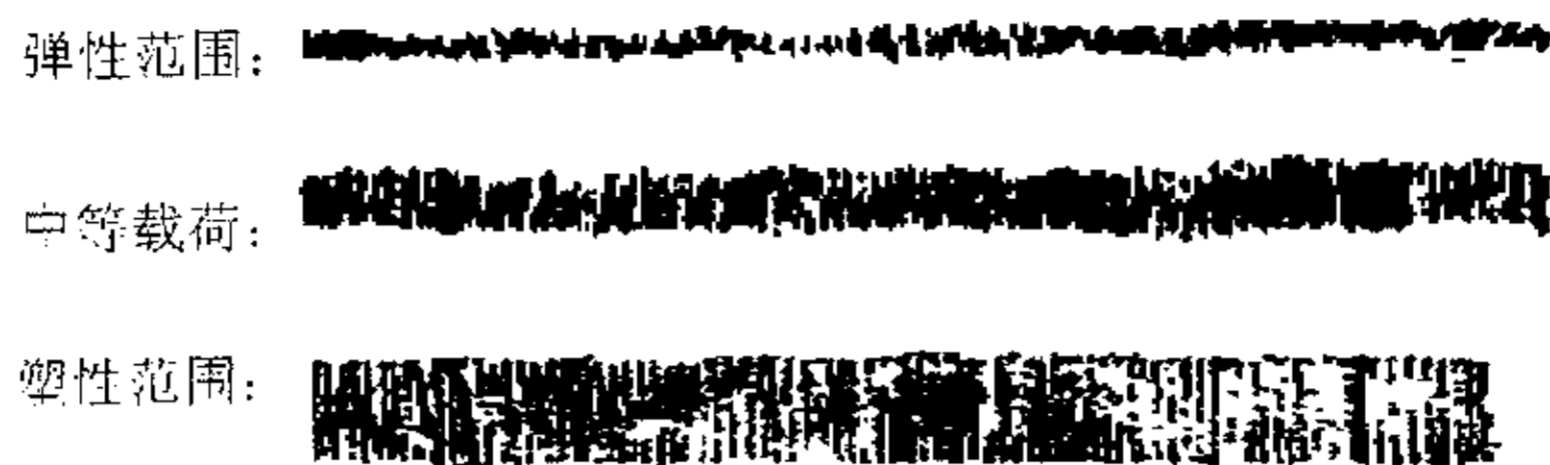


图 4-2 连续型声发射信号



图 4-3 突发型声发射信号

声发射的机理各式各样，且频率范围很宽，不同的材料声发射特性也有很大差异。通常影响声发射信号强度的因素主要来自两个方面：一方面是外部因素，如构件形状、变形速度、工作环境、载荷历史和加载方式等因素；另一方面是内部因素，主要是指构件内部的晶粒结构和组织结构均匀性等因素。

表 4-1 影响声发射信号幅值的因素^[10]

产生高幅值信号	产生低幅值信号
高强度材料	低强度材料
高应变速率	低应变速率
粗晶	细晶
低温	高温
各向异性	各向同性
不均质性	均质性
铸件	锻件
张开型裂纹	剪切变形

构件的塑性变形和裂纹的萌生和扩展均产生声发射。由于塑性变形和裂纹扩展是不可逆的，因此声发射也具有不可逆的特点。声发射信号的不可逆性，也就是说声发射具有不可重复性，亦称凯塞效应，是指在同一试件在同一条件下产生的声发射只有一次。凯塞效应是 Wilhelm Kaiser 在五十年代早期研究材料在加载情况下的声发射特性的过程中发现的。

凯塞效应描述的规律如图 4-4 所示：如果在第一次加载过程中产生了声发射信号，则在第二次加载过程中，只有在超过第一次加载的最大载荷值的情况下才有明显的声发射信号出现，在未超过第一次加载的最大载荷值的过程中只能观察到很微弱的声发射信号。构件内部产生裂纹后，裂纹的进一步萌生和扩展导致构件的有效承载面积不断减少，相当于载荷不断加大，因此这个过程是不断有声发射信号出现的。

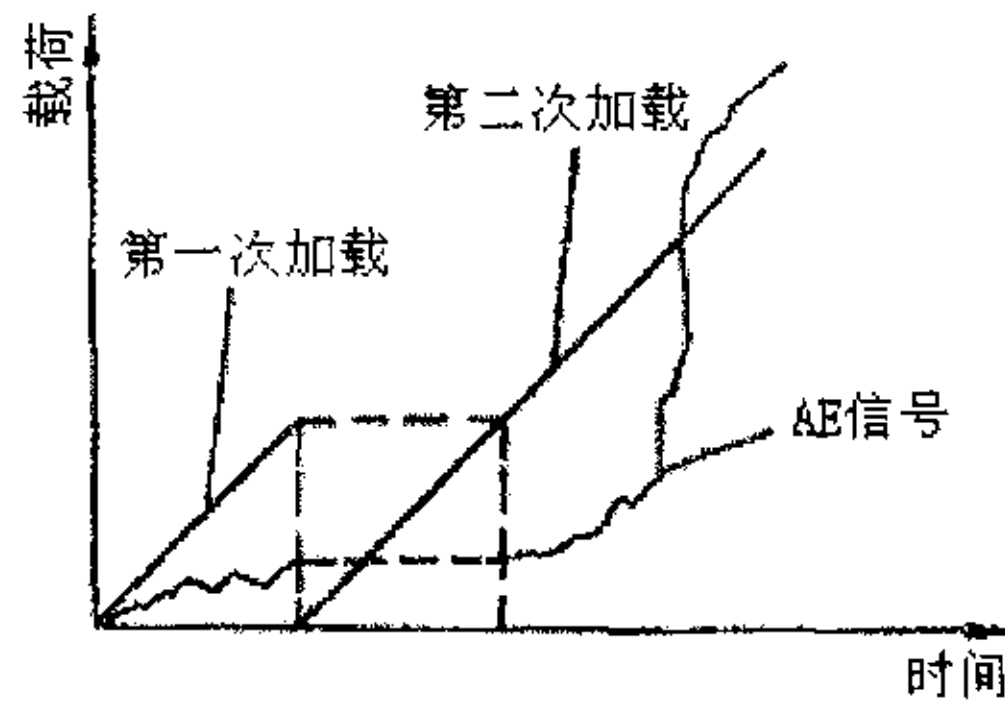


图 4-4 kaiser 效应

但是，新近研究表明，记忆合金相变过程的声发射是可逆的。

另一方面，一个试件的加载和卸载应力—应变曲线两者通常是不一致的，这两条曲线之间所夹的区域叫做滞后回线，该区域表示在一个循环周期内能量的消散。如果该周期完成的足够快的话，就会有一部分能量以声应力波的形式消耗掉。这一特性是任何塑性材料都具有的特性。按照 Kaiser 效应理论，再一次重复施加相等幅值应力，并不能再一次产生声发射，也就意味着不会出现更多的回线。然而实践表明回线区域会随着不断的循环变化而减少，直到达到稳定状态为止^[16]。图 4-5 反映的是相对回线宽带随循环次数变化的规律，由图可见，相对回线宽带随着循环次数的增加不断减少，直至达到稳定状态。加载曲

线和卸载曲线一般是不重合的,在循加载的情况下会出现循环硬化或循环软化,在加载初期表现的比较强烈,随着循环次数的增加逐渐达到稳定^[24]。

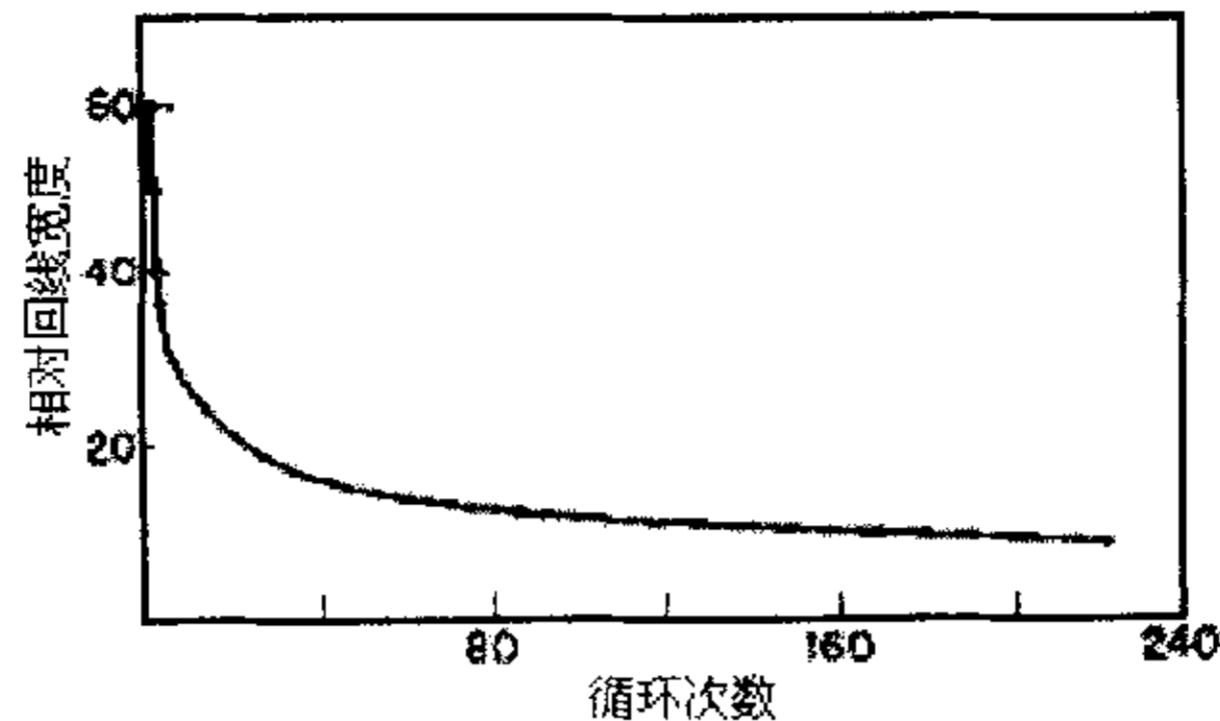


图 4-5 回线宽度和载荷循环次数的关系

4.1.2 参数分析的特点

基于参数分析的系统使用的声发射换能器主要是传统谐振式换能器,如沈阳计算机技术研究院最新研制的 AE-04 声发射检测系统。这种谐振式换能器的输出可看作是一有阻尼正弦波。基于参数分析的检测系统测量的声发射参数主要是以下几项^[25]:

记数和记数率: 材料每释放一次能量,产生一个声发射信号,称为一个声发射事件。记数事件数,是取一个声发射脉冲经过包络,超过预选阈值电压的持续时间并加以适当延长作为一个事件。事件计数表示了声发射发生的次数。除了计数事件数之外,还可以进行振铃计数,它是取超过阈值电压的包络内有多少个振铃为计数的。振铃计数在一定程度上反映了声发射信号的幅度。振铃计数特别是对连续型信号的测量更为有利,而事件计数主要用来测量突发型信号。有的时候采用总计数和计数率来描述一个实验过程的声发射特性。总计数有振铃总计数和事件总计数;计数率定义为单位时间内的振铃数或事件数,分别称为振铃计数率和事件计数率。

幅度和幅度分布: 声发射信号的幅度通常取信号的峰值或有效值,测试这两个参数特别对连续型声发射是十分重要的。幅度分布是按信号峰值幅度大小

不同的范围，分别对声发射信号进行事件计数。可以是事件计数分级幅度分布也可以是事件累计幅度分布。

能量和能量率：声发射信号的幅度和幅度分布实际上是与能量有关的参数。此外还可用事件包络、时间长短和事件包络面积作为声发射事件与能量有关的参数。能量测量也分能量率和总能量两种。能量率表示单位时间内的声发射信号的能量，总能量表示从开始测试到某一特定时间的声发射的总能量。

根据参数声发射技术，一个声发射事件的主要参数有：上升时间(Rise time)、持续时间(Duration)、峰值幅度(Amplitude)、振铃计数(Counts)和能量(Energy)等，如图 4-6 所示。这些参数的取得还要依据声发射事件阈值的设置。由于在一个采样长度中可能有几个声发射事件出现，因此还需要有个事件间隔将两个事件区分开来，如美国 PAC 公司的 8000SPARTAN AT 声发射检测系统就设定了一个声发射事件认定时间，认为在此时间段内只可能有一个声源出现，从而避免了一个声源被多次认定的情况^[25]。

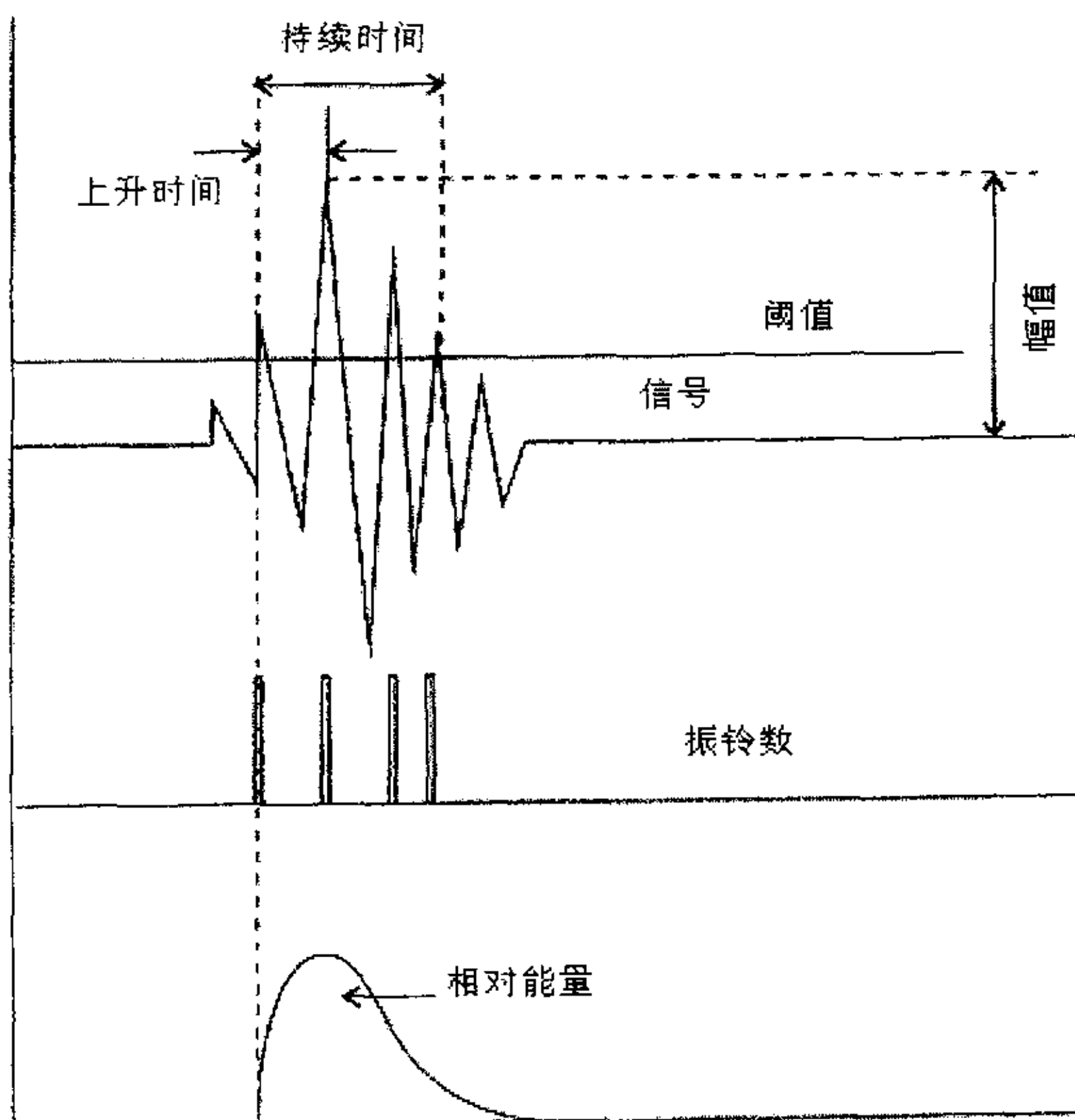


图 4-6 声发射信号参数

基于声发射参数分析的检测系统主要是考虑到声发射信号的持续时间短，一般只有几十到数百微秒，数据量大，依靠硬件记录、存储声发射信号的瞬态波形比较困难，不仅硬件投入较大，而且很难保证实时性，于是在前向通道中设置较高的阈值电平，用带通滤波器选取出声发射信号中要分析的信号范围，然后用软硬件的方法，根据参数分析的原理提取声发射波形的特征参数，最后再对裂纹的扩展过程进行评价和预测。

T. M. Roberts 等^[6]认为由于传感器每振荡一次就输出一个振铃脉冲，它随载荷循环次数的变化情况集中反应了疲劳裂纹信号的主要特征，于是根据声发射信号的振铃数的变化率来预测裂纹的扩展速度。依据的数学模型主要是以下两个方程：

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m \quad (4.1)$$

$$\frac{d\eta}{dn} = B(\Delta K)^p \quad (4.2)$$

其中：a—裂纹长度；

n—载荷循环次数；

C、m—与材料有关的常数；

ΔK —应力强度因子幅度；

η —声发射信号的振铃数

B、p—声发射常数，与特定的材料有关；

于是将式(4.2)代入式(4.1)就建立了声发射信号参数和疲劳裂纹扩展速度的关系：

$$\frac{da}{dn} = C \left(\frac{1}{B} \frac{d\eta}{dn} \right)^{\frac{m}{p}} \quad (4.3)$$

然后对标准的 ASTM 拉伸试件和 T 形截面梁进行了疲劳裂纹扩展过程的声发射监控，试验表明 AE 测试结果和实际情况较为吻合。

M. V. Lysak^[27]和 Olexandr Ye 等^[28]也在建立声发射参数和构件内部裂纹之间的相互关系方面做了大量的工作。

然而受传统的声发射检测设备的限制，表征声发射源特征的许多重要信号被忽略，导致声发射源定位误差较大，且不能区别不同的波形模式和反射波的

模式，使判断结果和实际情况相比往往有较大的出入，特别是在较复杂背景噪声环境下更是如此。正如波音公司负责结构的主管 Dr. Goranson 指出^[29]：“传统的声发射数据由许多代表声发射信号波形的参数组成，这些参数并不一定唯一地表征了特定信号地波形特征，其它声源产生的声发射信号波形也可能具有相同的特征参数。”

4.1.3 模态分析的特点

1990年 Dr. Michael Gorman 在其著作“Acoustic Emission Orientation by Plate Wave Analysis”^[30]中第一次将声发射波的模式与声发射源的位置联系起来。这篇文章的发表标志着模态声发射 (Modal Acoustic Emission, MAE) 技术的出现。

与参数声发射本质的区别就是模态声发射理论认为被测材料结构中的源或声发射事件在负载作用下，产生的弹性波是频率和模式丰富的导波信号，可以利用导波理论和弹性力学的理论将一直困扰声发射应用中面临的问题，即源定位不准确、信号解释困难和噪声问题等，从理论上得到了较好的解释和表述^[30]。模态声发射本质上是一种基于波形分析的声发射信号处理技术。它基于导波原理，秉承了人们最为熟悉的超声传播中的许多易解释和接受的物理模型方面的优点，通过建立简单明确的物理数学模型表征诸如源定位、非源引起的噪声与源产生的信号的有效区别等人们最为关心的问题，对工程应用中占大多数的板材、壳体、棒材和管材结构的检测更是其所长。实际上宽带声发射信号是包含许多不同频率成分和波型的声波信号。因此，总存在某一合适的声发射波型，其波长大于被测结构的特征尺寸(如厚度)，从而产生并传播导波，只要通过宽带传感器实时真实地获取被测材料结构中产生的宽带声发射信号，通过分析研究源产生的超声波模式，找出对应模式波的内在特征，即可进行缺陷识别和声发射源位置的估计。正是由于这些特征，模态声发射自 90 年代初期在美国问世以来，便迅速得到较好的应用^[31, 32, 33, 34]。

模态声发射的基本点是：源产生超声能量；能量的传播在薄壁构件(导波几何形状)内作为频散波传播，在大块体积介质内作为非频散波传播；波的模式是作为物理变量来检测的，即位移、速度或加速度，采用的是宽带传感器；分析是确定的，基于牛顿力学波形模式与源特征之间的明确关系，这些特征可以从

理论上建模，并且不因仪器设置(如增益)的改变而改变；源定位所用的滤波与门限阈值无关，不因阈值的设置而丢失有用的信号。

模态声发射检测要求采用宽带技术，因此包括声发射传感器、抗混叠滤波、高速 A/D 转换、高速信号分析处理乃至计算机数据传输速度等软硬件都应满足宽带模态声发射检测信号要求。

由于很多实际零件具有板状结构，因此可以利用基于板波理论的模态声发射技术分析来自此类构件内部的声发射信号。使用模态声发射技术可以在对声发射信号波形进行分析的基础上，提取声发射源的有关特征，如裂纹的大小、损伤程度和声发射源的方位等。

根据模态声发射理论，声发射波(亦是一种机械波)在板平面内按三种模式传播：①在板平面内沿传播方向运动的扩展波；②垂直于板平面运动的弯曲波；③在板平面内垂直于传播方向运动的剪切波。一般在板状结构中只能检测到扩展波和弯曲波，剪切波是很难检测到的，并且其影响可以忽略不计。它们都是最低阶兰姆波。扩展波的传播速度最快，且无色散效应，且具有不同频率分量的扩展波按照相同的速度运动；弯曲波的传播速度较慢，有色散效应，其传播速度与频率的平方根成正比。具有较高频率的弯曲波会先到达传感器，由于衰减严重，幅值较低；具有较低频率的弯曲波会较晚到达传感器，同时由于不同频率分量的分离，弯曲波随着时间的推移，幅度会逐渐衰减，如图 4-7 所示。

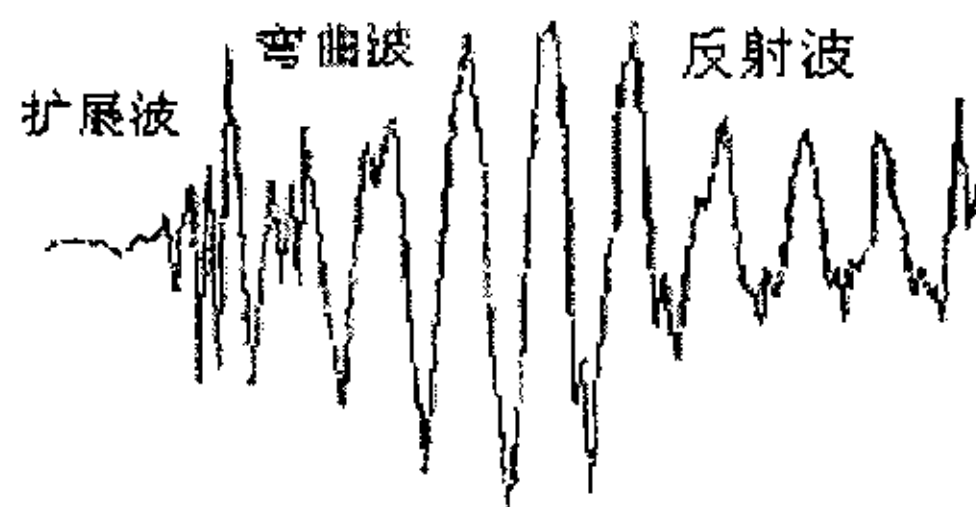


图 4-7 声发射信号波形

对于工程上大量使用的板状结构，由于板厚远小于声波的波长，AE 源在板中主要激励起扩展波(最低阶对称波 S_0)、弯曲波(最低阶反对称波 A_0)和水平切变(SH)波三种模式的波。板平面内声源主要产生扩展波，而平面外声源主要产生弯曲波，两种波都有可能产生 SH 波，大量的非 AE 源或噪声没有这种特

征^[36]。Gorman 曾详细分析了疲劳裂纹扩展的 AE 信号的特点，它主要是板内力源，因而能产生以扩展波为主的声波，而大多数干扰噪声源都是板外声源，尽管在非衰减介质中可能有很高的频率分量，但主要能量基本都集中在 100kHz 以下，根据这种理论，利用由高通滤波器（低频截止频率 100kHz）获得的扩展波分量 HF 与由低频带通滤波器（带通范围 20~70kHz）获得的低频弯曲波分量 LF 之比作为判据的专用仪器已由 Dunegan 工程咨询公司研制出，据称这种仪器能在高背景噪声下检测疲劳裂纹扩展的声发射信号^[37]。

声发射信号还有一个重要特点是，就是背景噪声复杂，信号本身很弱，如何排除噪声干扰测量这些较弱的声发射信号，是声发射技术遇到的另一个突出的重要问题。

典型噪声信号主要有电磁噪声、高频机械振动和摩擦噪声等。机械振动、车轮的磨损、摩擦等形成的机械源干扰波形通常幅度较大，具有较大的幅度和较低的频率，持续时间也较长，如图 4-8 所示^[37]。这些噪声能使数据采集过量，以至失去损伤信号点，而且，实际操作中要在数据分析时从如此庞大的数据组中寻找出相对来说显得很少的损伤信号数据，无疑是十分繁琐和耗时的。典型的电磁噪声和现场高频振动的幅度通常都比较低，持续时间短，声发射检测系统会灵敏地接收这些低幅度信号，这两类“事件”中并不包含任何损伤波的信息，所以必须设法消除。这两类噪声可以通过选择合适的硬件系统参数，如滤波器频率等，从频带上加以剔除^[38]。

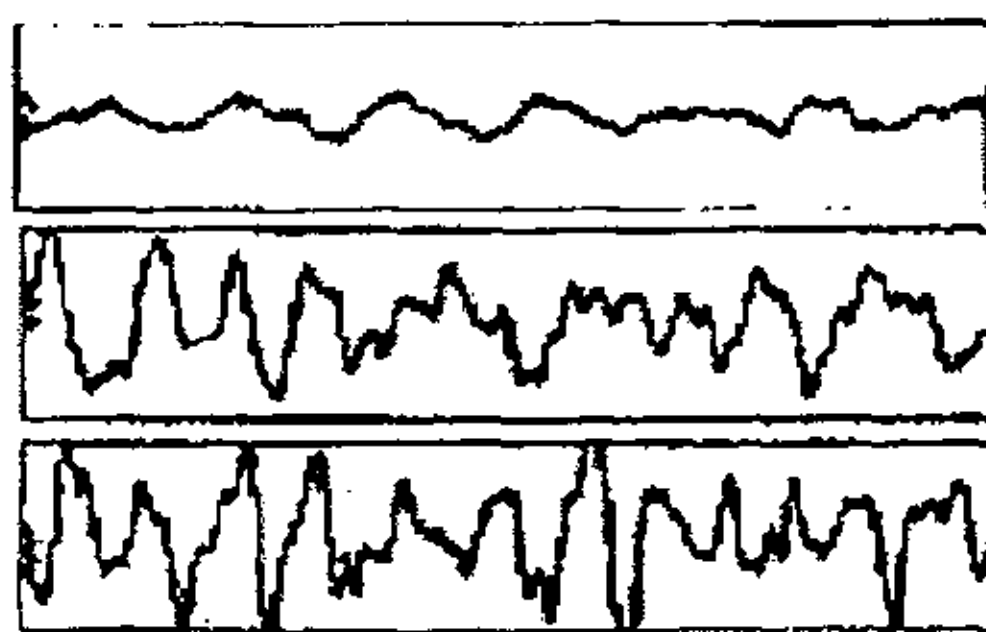


图 4-8 声发射中的噪声信号

电磁干扰是具有很多频率、形状和大小的波形，在整个检测过程中可能是很普遍的。常见的空间电磁波干扰是高频微波，电源干扰是高频及其低次谐波，

它们的频率往往不与损伤事件重叠，且为周期性的平稳波，明显不同于损伤事件的非平稳波。

在声发射检测中，一旦对检测系统作了正确调整和检测参数设置，裂纹损伤所产生的应力波将不会使已设置好的 AE 门栏出现典型的饱和现象。如果出现饱和，这类波形多半属于摩擦和振动干扰，对声发射检测没有什么价值。还有，在仪器一开始工作就立即出现的端前带有“污秽”的波形多半是噪声波形，实际的损伤信号首先以频率、脉冲波期和幅度进行判断，剔除现场大量存在而又容易剔除的机械源和电磁干扰。摩擦或磨损形成的机械源干扰具有较大的幅度和较低的频率。电子与电磁干扰又都在常见声发射事件频率以外，故均不难借助于硬件判断、剔除。

噪声信号与裂纹扩展产生的声发射信号除了在波形、频率和幅度上有明显区别外，裂纹的声发射信号到达不同位置传感器的时间存在显著差别。所以，采用模态声发射技术能有效地识别噪声和裂纹扩展产生的声发射信号^[9]。由于噪声在幅度上是随机的，所以不能用传统的共振参数声发射方法简单地略去低幅度，较精确的方法是根据损伤与噪声的波形特征，在波形采集前便以硬件为主将大部分的噪声剔除；在处理损伤信号数据以前再以分析软件实施进一步的更完善的去噪。模态声发射分析的主要特点是根据不同模式的波形和相应的频率成分的特征，确定是材料内裂纹产生的声发射波信号还是其它因素引起的噪声信号。但是，要剔除裂纹闭合时产生的噪声信号还要做深入的研究^[10,11]。

本文综合幅度鉴别、频率鉴别、空间滤波和小波去噪和模态分析等几种方法，从软硬件方面进行噪声的去除。幅度鉴别是在选取的频率窗口内排除一些较声发射信号弱的一切干扰噪声。频率鉴别是通过选取的频率窗口测量，排除不在这个频段内的一切干扰噪声。在硬件设计方面，可通过设定阈值的办法，选取信号的幅度范围和频率范围，同时在软件方面，根据小波分析的特点，可同时在时频窗内进行滤波。

4.2 检测系统硬件部分的构成

硬件系统的功能应能满足处理瞬态声发射信号的要求，前向通道具有较高的信噪比和较宽的通频带，具有一定的实时性。传统的声发射检测仪器主要是根据参数声发射的理论设计的，如，这类声发射仪主要用于压力容器、管道的

的泄漏检测以及其它一些背景噪声不太复杂的场合；具有较高分析精度的、可在高背景噪声条件下使用的声发射检测仪器，如著名的美国 Digital Wave 公司的声发射检测系统，都是基于模态声发射理论设计的。火车轮运行状态复杂，背景噪声干扰严重，因此用于火车轮 AE 信号检测的系统也应该是基于 MAE 理论的。

4.2.1 声发射换能器

声发射是一种常见的物理现象，大多数金属材料在塑性变形或断裂时都有声发射发生。金属材料塑性变形和断裂时所释放的能量分布在很宽的范围内，而且声发射信号强度很弱，在传播过程中，随距离增加声波幅值(能量)还要逐步衰减，不同介质、不同传播条件衰减规律也不同，且频率越高衰减越严重，需要借助灵敏的声发射仪器才能检测出来。所以，为了捕获到真实的声发射信号，必须采用高灵敏度的具有较宽频率范围的传感器。同时火车轮在运行过程中产生的裂纹声发射信号是一个模式丰富的宽带声波信号，只有采用宽带声发射传感器才能有效地采集到这些具有不同模式的弹性波信号。另一方面声发射波碰到界面时会被反射，反射时会产生波形变换，因此实际上到达传感器的声发射波实际上是经过多次发射和不同模态的波叠加的复杂波形，如图 4-9 所示。声发射检测技术的关键是首先要准确地识别表征裂纹特征的声发射信号。

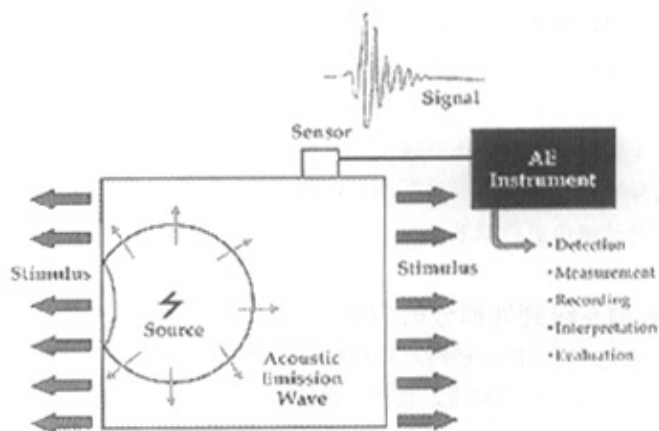
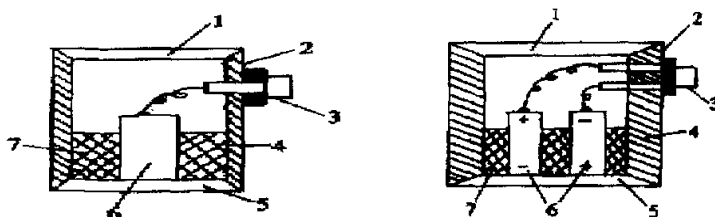


图 4-9 声发射检测过程

单个声发射事件的持续时间很短，频带很宽，高频成分穿过物体时衰减严重，而低频成分又与机械噪声重叠，不易分离，因此要用较高的通频带检测声发射信号，并进一步提取出表征疲劳裂纹特征的频率较高的扩展波分量。我们在参考国外同类声发射检测仪的基础上，最后确定声发射传感器的频带范围为100kHz~1MHz。

接触型声发射传感器，利用固体作为声波传播介质，由于固体密度大，声波衰减较小，传感器的敏感元件可以得到较强的激励，产生较强的输出信号。

声发射换能器种类很多，有光学外差换能器和电容式换能器等，非压电材料制成的传感器灵敏度低，效果差，一般都采用压电材料，以压电式换能器的应用最为广泛。它们多为欠阻尼的，在谐振时具有很高的灵敏度。压电材料可以是石英、铌酸锂等单晶体，其频率特性较好，但灵敏度低，且随温度变化大；用得最多的是锆钛酸铅（PZT）一类二元系的压电陶瓷，由其制成的传感器灵敏度高，价格低廉，制作工艺简单而被广泛应用到各个领域^[42]。

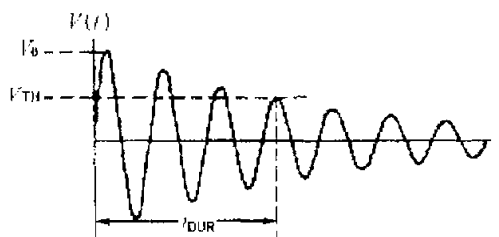


1. 上盖 2. 铝壳 3. 插座 4. 导电胶
5. 底座 6. PZT-5 7. 阻尼剂

图 4-10 单端输出式声发射传感器结构图 图 4-11 差动输出式声发射传感器结构图

单端式（如图 4-10 所示）制作容易，应用较广泛。差动式换能器（如图 4-11 所示）增益高，输出对称，有利于抑制强噪声电平的干扰。为了避免外界干扰以保持足够的信噪比，一般将前置放大器置于换能器内部。在希望得到较大的输出而不要求进行频率分析时就可以使用这种谐振式换能器对声波进行检测。

这种换能器主要基于谐振传感器的参数进行测量，测量信号为阻尼正弦波，并认为声发射信号是一个衰减的正弦波且以不变速度传播，如图4-12所示^[31]。



V_{TH} 阈值电压 V_0 峰值电压

超越阈值计数 $N = f \cdot t_{DUR}$ 能量 $E = \int V^2 dt$

图4-12 谐振式声发射测量信号与参数

测量的特征参数主要是幅值的均方根 (RSM)、超越阈值计数 (N) 上升沿、周期、能量、幅度等参数。

显然这种换能器是有缺陷的。最大的缺点是有关AE源的本质的信息往往被谐振式传感器自身的特点所掩盖或被模糊掉，这就给源特征的识别和信号处理带来困难；另一方面，对于突发型并具有非稳态随机信号特征的声发射信号，参数分析的结果往往随所用传感器谐振频率和测试系统（放大倍数、阈值的不同）而变化，重复性很差。

而实际上声发射产生的是纵波、横波、瑞利表面波以及 Lamb 波和它们的组合波型，所以声发射信号往往是比较复杂的。目前由于电子技术和信号处理技术的发展，模态声发射技术在声发射检测中逐渐得到应用。为了捕捉瞬态声发射信号，国内外已普遍转向宽带换能器的开发和利用。

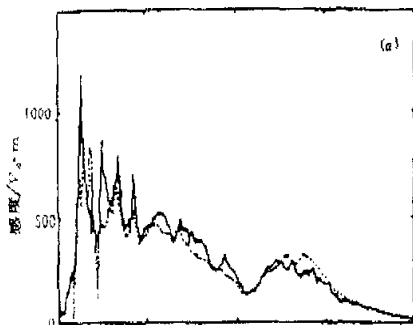


图 4-13 宽频型换能器的响应特性

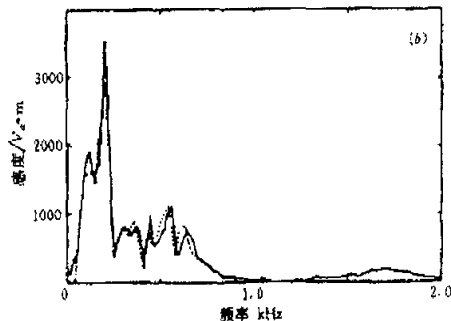
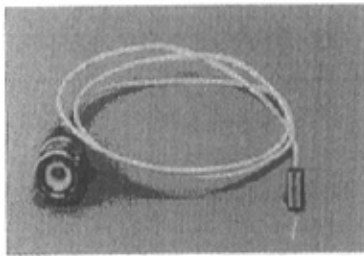


图 4-14 谐振型换能器的响应特性

图 4-13 和图 4-14 分别是宽频型换能器和谐振型换能器的响应特性,可见宽频型换能器可以捕捉较多的 AE 信号。

声发射换能器的前置放大器可以为高阻抗传感器与低阻抗传输之间提供阻抗匹配,以防止信号衰减,通过放大微弱的输入信号,以改善与电缆噪声有关的信噪比,提供频率滤波器。由于声发射信号的频率高,频带宽,所以要求采用宽带前置放大器。由于从压电晶体元件输出的信号很微弱,并且,裂纹产生和扩展时的信号频率很高,因此,对前置放大器提出了较高增益的要求,如输入阻抗高、频带宽、放大系数高、抗高频信号干扰能力强、有一定的线驱动能力等。为了避免外界的干扰,以保证足够的信噪比,常将前置放大器集成在换能器内部。

基于不同声发射换能器的检测系统,由于设计思想不同,系统硬件结构存在着较大的差别。在本系统中采用的是美国 Digital Wave 公司的宽带声发射换能器 B1080LD,其外形结构和技术参数 如图所示。B1080LD 是专门为模态声发射检测领域设计的压电换能器,具有较高灵敏度的、极低的噪声,内部集成有线性放大器。其主要技术参数和特征如图 4-15 所示。



B1080 Specifications

- Frequency Bandwidth: 50 kHz - 2 MHz
- Temperature Range: -50°C - 100°C
- Connector: Attached 2 foot cable
- Dimensions: 0.20" OD x 0.36" H
- Piezoelectric Crystal: 0.125" dia.

Also available:
B1080LD with an integral line driver

Common uses of the B1080

- . metal fatigue
- . aircraft inspection
- . modal acoustic emission
- . computer peripherals-hard disk monitoring

Key Attributes

- . low mass-small
- . broadband response

图 4-15 B1080LD 声发射换能器及其技术参数

图 4-16 是该换能器的标定曲线。由图可见,该换能器对较宽频率范围的信号具有较平的响应,能满足 MAE 对较宽频率范围信号检测的要求。

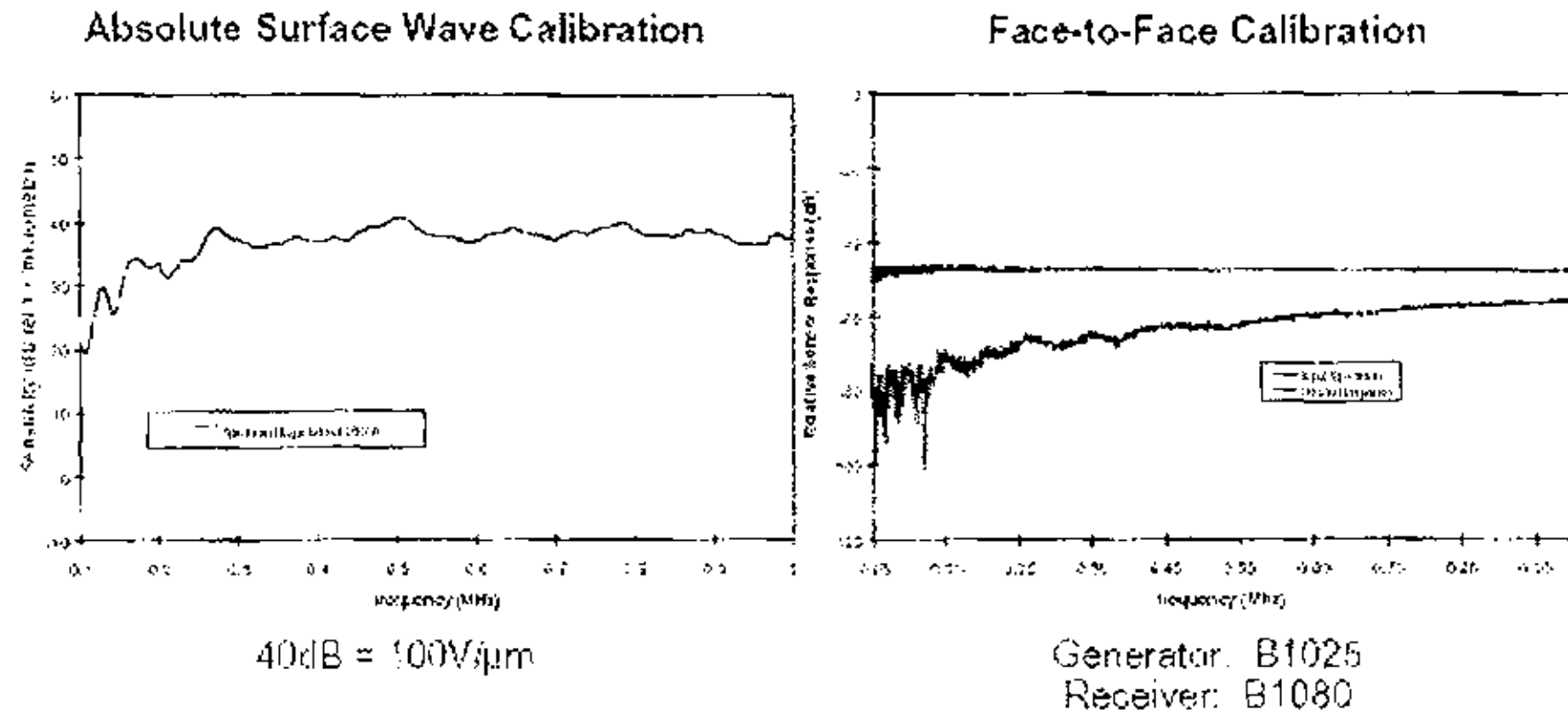


图 4-16 换能器的标定曲线

4.2.2 四通道声发射仪的构成

声发射信号的检测和初步处理部分为一个具有 4 个输入通道的 DSP 信号采集、处理系统，如图 4-17 所示，图中只列出了两个通道，每个通道的硬件结构都是相同的。

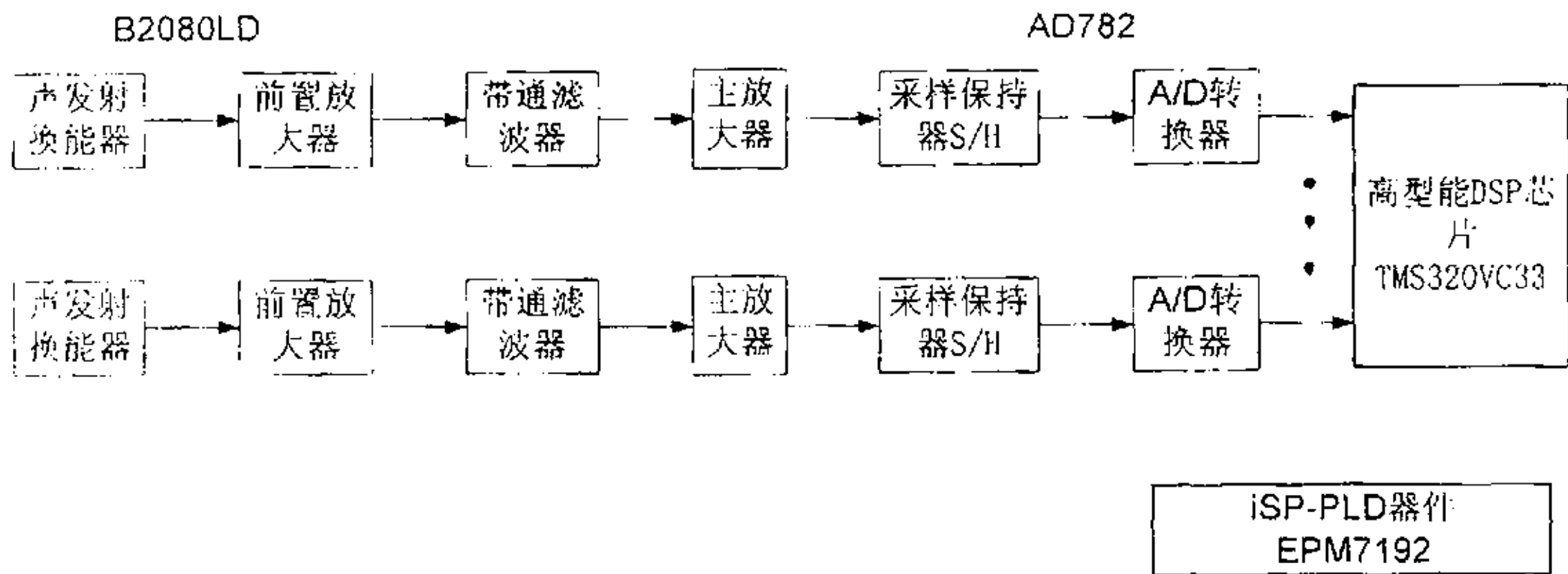


图 4-17 四通道声发射检测仪

换能器采用上述的 B2080LD。模数转换器采用 AD872，它是一个单片 12 位 10MHz 的模数转换器芯片，片内还带有高性能的跟踪/保持放大器和基准电源。AD872 具有多级差分流水线型结构,输出还有误差校正，以保证在全部工作温度范围内具有 10MHz 取样率和 12 位精度。数字信号处理单元采用 TI 公司的高性能浮点运算芯片 TMS320VC33，该 DSP 芯片具有 120MHz 的主频，并且

16M 字（每字 32 位）的总存储器寻址空间，可满足大数据量的复杂运算要求。

4.2.3 基于 CAN 总线的信号采集系统

1991 年 9 月德国 Bosch 公司制定并发布了 CAN 技术规范 2.0，分 A、B 两部分。2.0A 给出了在 CAN 技术规范版本 1.2 中定义的 CAN 报文格式，而 2.0B 则给出了标准的和扩展的两种报文格式，并完全兼容 2.0A。ISO 随后于 1993 年 11 月正式颁布了道路交通运载工具—数字交换—高速通信控制器局域网（CAN）的国际标准，即 ISO11898 规范。

系统采用三层体系结构，即操作站（上位机）—CAN 总线网络（双绞线）—现场信号采集、处理单元。操作站由工业控制机加网卡组成；网卡的功能是完成 ISA 总线跟 CAN 总线之间的协议转换，实现工业 PC 机与 CAN 总线的连接。操作站采用 Windows 32000 操作系统，工控软件自己编写，实现系统监控和管理功能。总线通信标准采用 CAN 2.0B。CAN 总线的短帧结构、CRC 校验以及错误节点自动关闭功能，保证了信号传输的可靠性，系统具有较强的抗干扰能力^[43]。在该系统中，现场 DSP 单元作为信号采集的核心，完成信号的特征提取功能；通过 CAN 总线可以实现设备之间的信息共享，以及现场和上位机之间的通信，包括控制信息、设备状态和实时数据的传送等。

CAN 总线系统任意两节点之间的最大距离与位速率有如下关系^[44]：

表 4-2 CAN 总线传输距离与位速率的关系

最大传输距离/m	位速率/kbps
40	1000
130	500
270	250
530	125
620	100
1300	50
3300	20
6700	10
10000	5

由表 4-2 可见，CAN 总线的传输速率会随着传输距离的增加而下降。为了提高信号传输的速率，减少导线电阻的增加引起的时间延迟，可在各个节点间隔一定距离布置一个中继器。采用中继器后，信号的传输速率受传输距离的影响会极大地减弱，但会产生信号的传输延迟。最后确定的总线结构如下图所示，在两个节点间增加一个中继器，即每节车厢都有一个中继器，这样做虽然会增加成本，但提高了系统的数据传输速度。

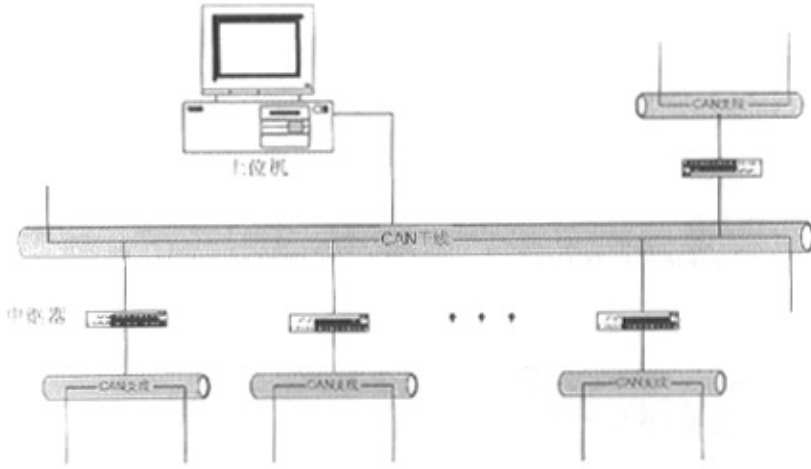


图 4-18 分布式 AE 数据采集系统

4.2.4 载荷循环次数的检测

在帕里斯公式中， a （裂纹长度）、 n （载荷循环次数）和 ΔK （应力强度因子幅度）都可看作是时间 t 的函数，于是帕里斯公式可写为：

$$\frac{da/dt}{dn/dt} = C(\Delta K(t))^m \quad (4.4)$$

上式即：

$$\frac{da}{dt} = C(\Delta K(t))^m \left(\frac{dn}{dt} \right) \quad (4.5)$$

其中： dn/dt —火车轮的加载频率，也就是火车轮的转速

由式(4.5)可知,在计算裂纹长度时需要确定载荷循环次数,因此还需要对火车轮的转速进行检测。火车在运行时其速度并不是匀速的,而是动态变化的。运行速度越高,循环次数增加也就越快。

为了实时确定加载频率以及某一时间段内的载荷循环次数,在本系统中采用了以下方案以实现火车轮转速的实时检测:

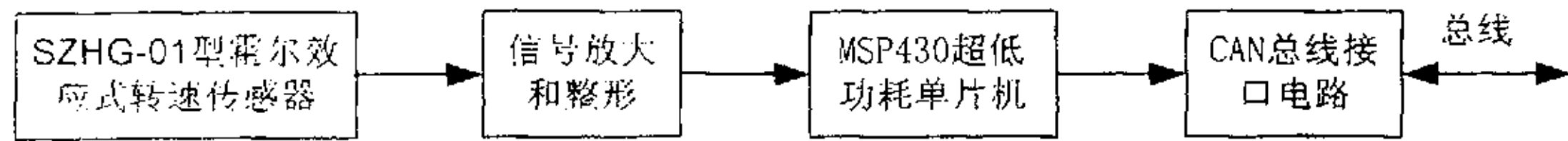


图 4-19 转速测量系统

SZHG-01 霍尔效应式转速传感器是小型封闭式转速传感器。通过联轴节与被测轴相连接。当转轴旋转时,将转角转换成电脉冲信号,该脉冲信号经过放大和整形后输入单片机。该传感器具有体积小,结构简单,无触点,启动力矩小等特点,使用寿命长,可靠性高,频率特性好,还可进行连续测量。

MSP430F148IPM 是 TI 公司新近推出的 16 位单片机,具有极低的功耗,可用电池供电,在超长时间连续信号采集领域有较好的表现。单片机主要实现对输入脉冲的计数,进而计算出火车轮的转速,最后将火车轮的转速值送上总线,由上位计算机进行接收。在该单片机的基础上扩展大功率直流电机的控制部分,以在紧急情况下进行火车减速和制动处理。

4.2.5 CAN 总线的接口电路

系统中的 DSP 芯片和单片机要和 CAN 总线进行通信还必须扩展和总线的接口电路。接口电路采用了两个集成电路模块,一个是 SJA1000,另一个是 TJA1050。

SJA1000 是独立 CAN 总线控制器,通信位速率可达 1Mbps,有 64 字节的扩展缓冲器,按先进先出(FIFO)的方式读取数据。支持 11 位和 29 位的标识吗,对传输过程中产生的错误进行中断处理,可以对错误数进行计数,并且增强了验收滤波器的功能。

CAN 总线驱动器/收发器 TJA1050 的最高传输速率可达 1Mbps,总线至少可连接 110 个节点,在较强电磁干扰下仍然具有宽共模范围的差动接收能力。有

短路保护、过热保护和超时检测功能，未上电的节点不会干扰总线。输入电平与 3.3V 系统兼容。

CAN 总线控制器和收发器的连接线路图见图 4-20。从图中可以看出，CAN 控制器 SJA1000 的双向 8 位地址/数据总线 AD0~AD7 分别与 DSP 或单片机的 IO 口连接。ALE 是地址锁存信号，在下降沿锁存地址信号。RESET 为芯片复位引脚，可由单片机或 DSP 提高复位信号。片选信号始终接地，芯片始终处于选通状态。数据的读写通过对 RD 引脚和 WR 引脚发出控制进行，在数据读或写周期内，RD 和 WR 应分别有效。

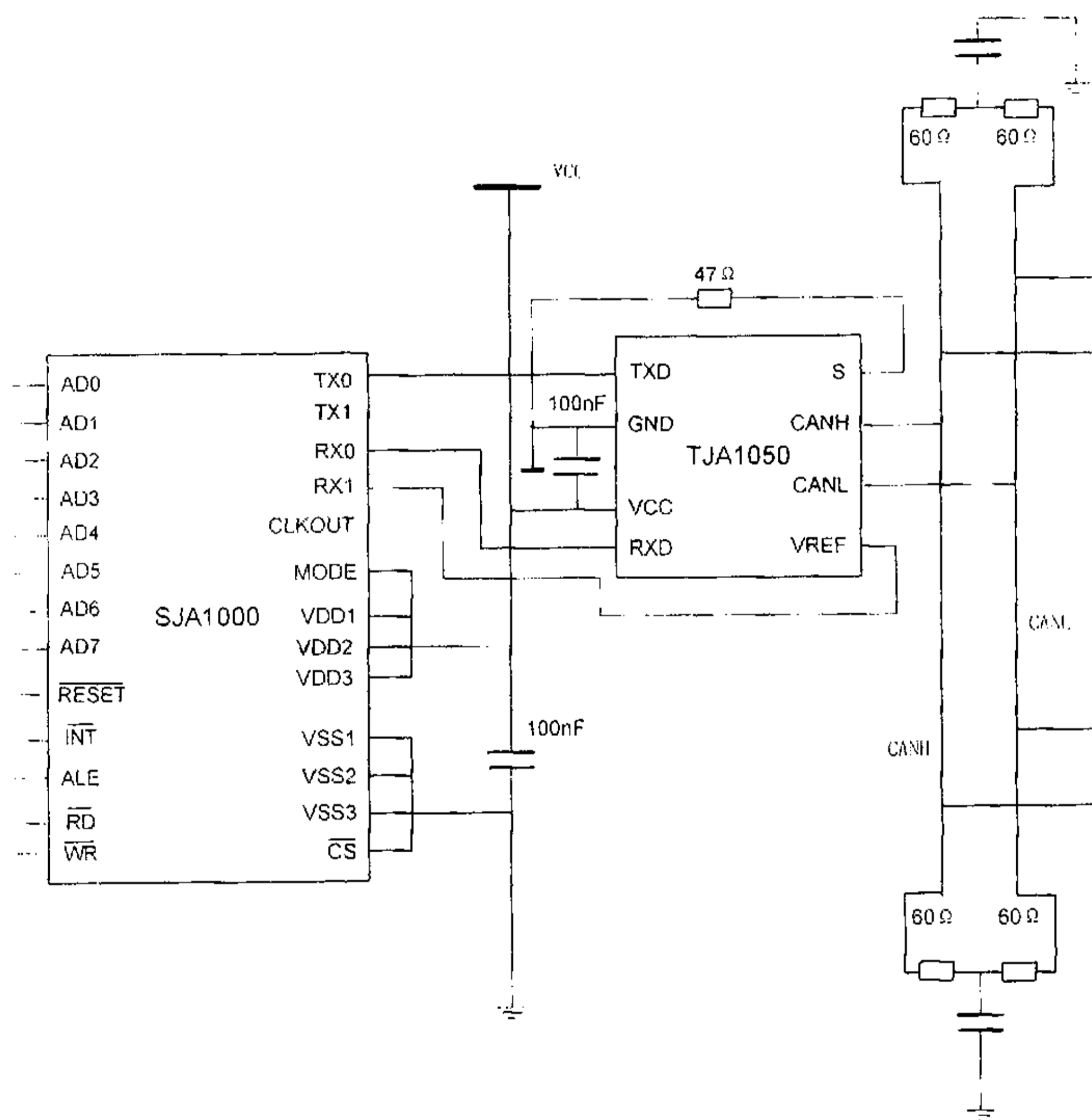


图 4-20 CAN 总线的接口电路图

4.2.6 CAN 总线和上位机的接口电路

上位机和 CAN 总线接口的适配卡结构图如图 4-21 所示。CAN 总线网络的通信功能由嵌入式微处理器和控制器 SJA1000 共同完成。80C188 主要承担节点与 PC 机之间的数据通信和协调管理工作；SJA1000 完成报文的发送和接收控制任务。双口 RAM 是一种快速通信器件，适用于多 CPU 的分布式系统及高速数字系统中。采用集成双口 RAM 实现微处理器与主机之间的数据交换，还可大量减少数据交换的次数。电路带有光电隔离，能避免 PC 机由于地环流造成的损坏，增强了系统在现场环境中使用的可靠性，提高了抗干扰能力。

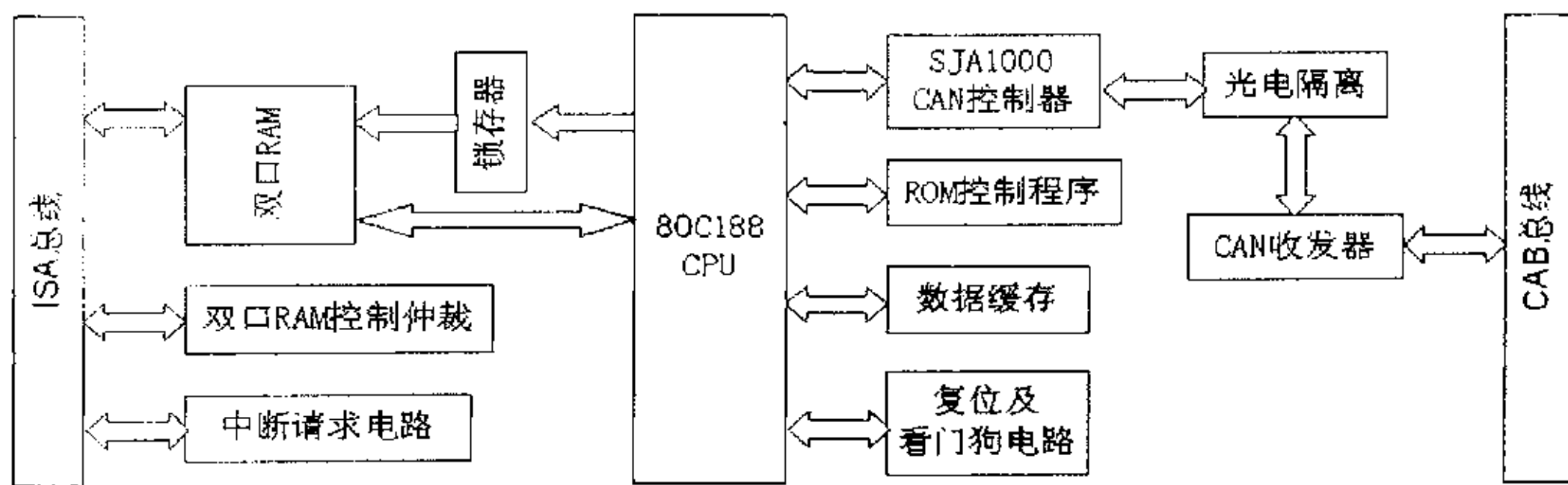


图 4-21 CAN 总线与上位机的接口硬件结构

4.3 本章小结

构件在载荷作用下，局部应力状态发生快速改变时就会有瞬态机械波，即声发射波出现。这种瞬态声发射信号包含着丰富的超声波模式，在到达 AE 换能器之前还要经过介质的传输，在传输过程中要发生波的反射、衰减和色散，因此实际上到达换能器的 AE 信号是一个由不同模式的波和发生波型转换后的波叠加而成的信号。根据模态声发射理论，要对这样的信号进行检测和分析要求采用宽带 AE 换能器，而且检测系统要有较高的处理速度，而且在前向通道具有较宽的通频带和较高的信噪比。

在本文中设计了一种基于 DSP 的高速 4 个通道 AE 信号处理系统。信号的传感部分采用了宽带 AE 换能器，其频率范围为 50kHz~2MHz，前向通道带宽 100kHz~1MHz，每个 DSP 单元要对一对火车轮的声发射过程进行监控。DSP 的处理结果还要通过 CAN 总线进行传送，最后到达上位机的接收缓冲区。

第 5 章 声发射信号的处理方法

声发射信号中包含着模式丰富的扩展波、弯曲波以及经过多次反射、衍射后产生的波型发生变化的各种成分的波，而且这些波往往和高频机械振动、冲击噪声和电磁噪声叠加在一起。因此，为了提取有用信号、有效抑制干扰需要采用多种信号处理方法。

5.1 自适应噪声对消器的设计

信号处理的第一步就是要有效地拾取要分析的信号，然而火车轮的运行状况比较复杂，背景噪声较强，产生的声发射信号又很微弱，而且可能“淹没”在噪声信号中，这种情况下不能再把有用信号和希望去掉的信号看作是处于不同频带范围的信号，使用普通的滤波技术（低通滤波、带通滤波、高通滤波）无法得到要分析的信号。

图 5-1 和图 5-2 分别是是要分析的原始信号及其谱结构。没有噪声时可以运用常规的滤波技术在拾取一定频率范围的信号进行分析。

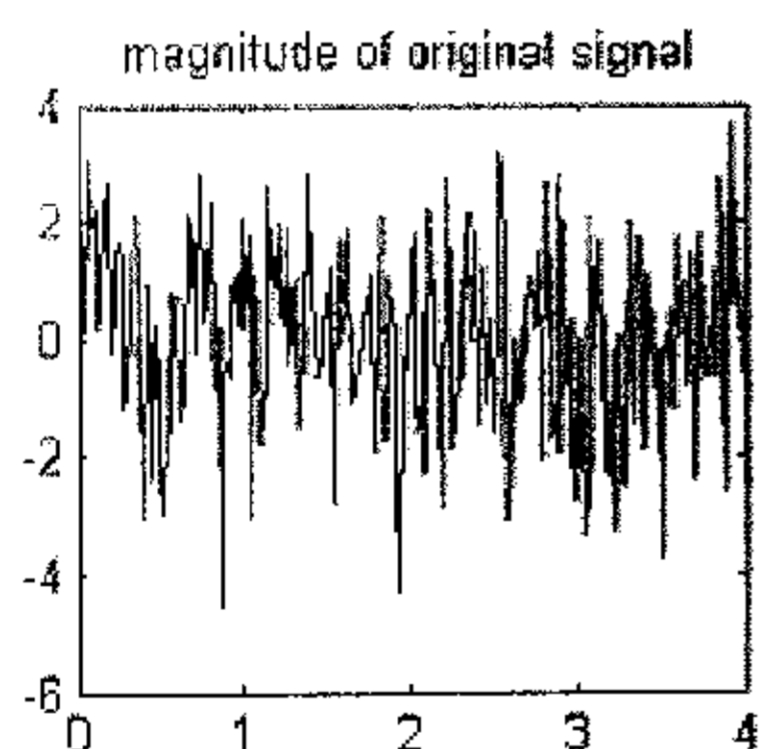


图 5-1 原始信号

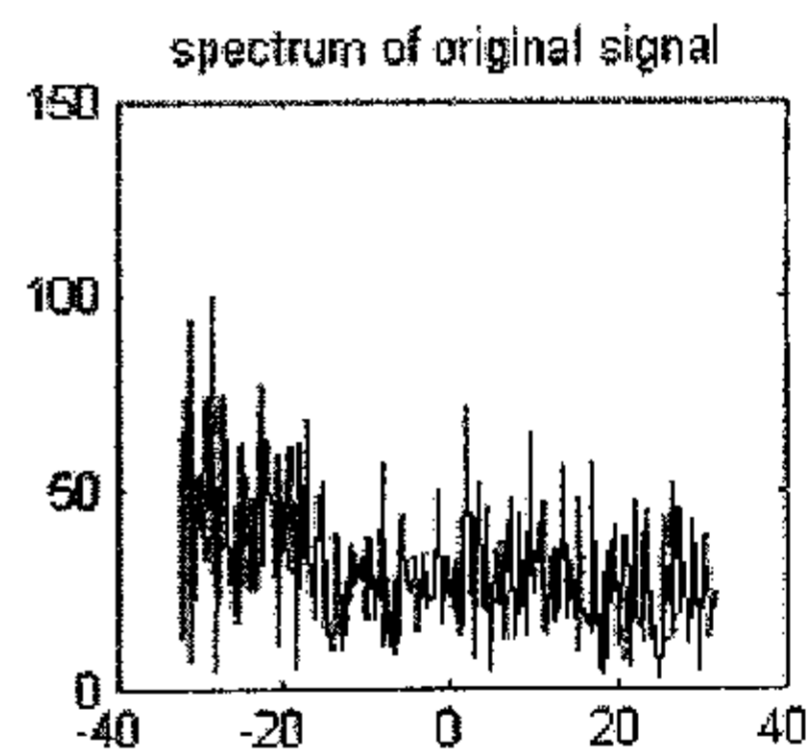


图 5-2 信号的谱结构

叠加噪声后，由于噪声信号幅度较高，原始信号被噪声淹没，如图 5-3 所示，信号的频谱和噪声的频谱也重叠在一起，如图 5-4 所示。这种情况下用常规的滤波方法处理后的信号中仍然含有信号和噪声，而且在没有有用信号时，系统也会产生响应。

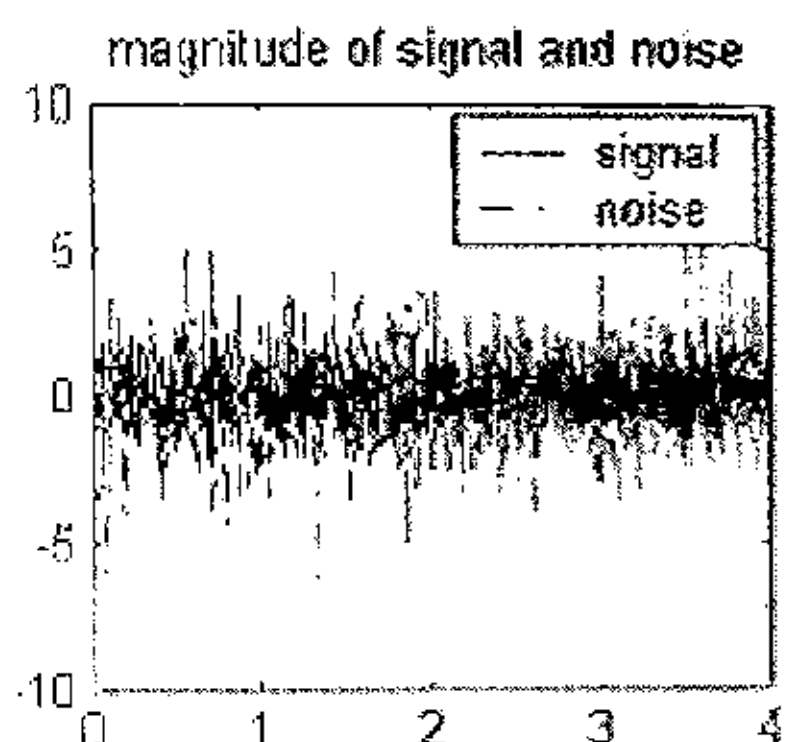


图 5-3 信号被噪声淹没

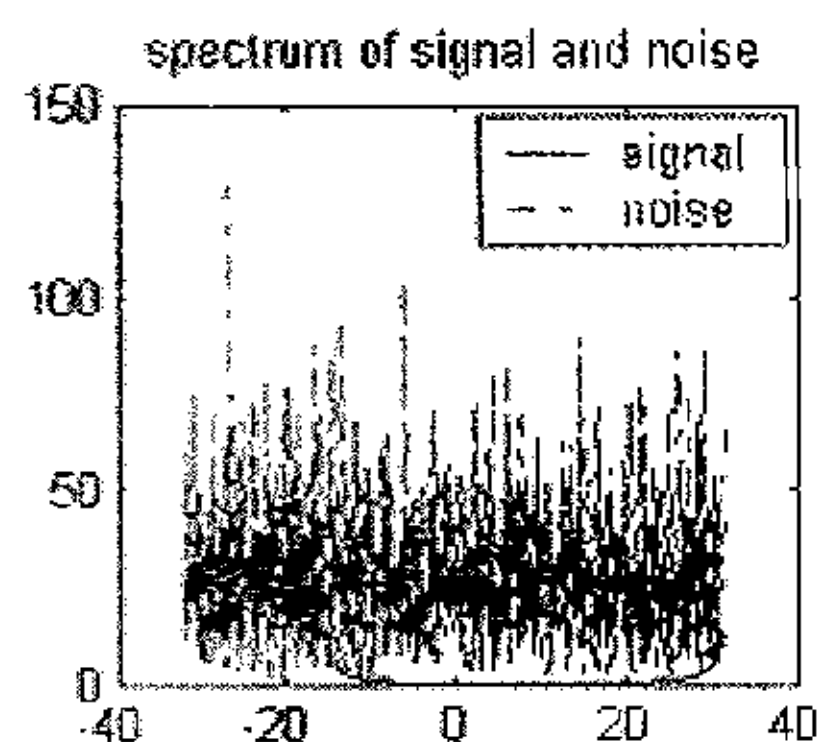


图 5-4 信号和噪声的频谱重叠

为了从强噪声背景中提取有用信号，必须将强噪声信号过滤或对消掉。利用自适应滤波器构成的自适应噪声对消器，可以实现这一目的^[45]。这种可编程滤波器的频率响应或传递函数是变化的或自适应的，其作用是无失真地通过信号中所需要的分量，衰减掉不需要的或干扰的响应分量，或者减少输入信号中的畸变分量，如图 5-5 所示。

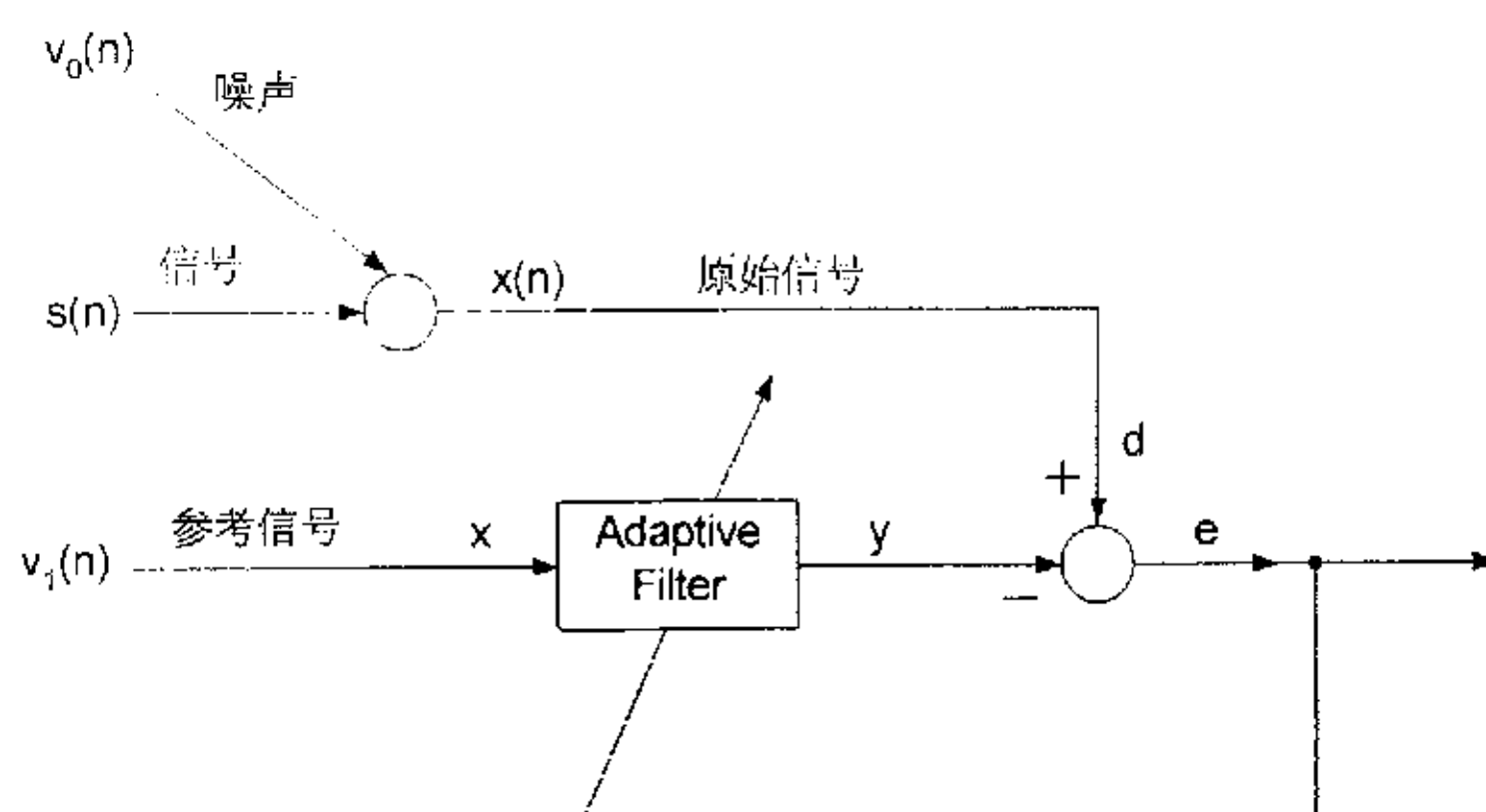


图 5-5 自适应噪声对消原理

自适应噪声对消系统有两个输入：原始信号输入和参考信号输入。原始输入信号 $X(n)$ 为有用信号 $S(n)$ 和噪声信号 $V_0(n)$ 的叠加，即

$$X(n) = S(n) + V_0(n) \quad (5.1)$$

而参考输入信号是干扰信号 $V_1(n)$ ，它与原始输入中需要去除的噪声相关。原

始输入信号加到自适应滤波器的 d 端, 参考输入加到自适应滤波器的 x 输入端。自适应滤波器 (Adaptive Filter) 在误差信号 e 的控制下不断调整滤波器系统参数, 使它的输出 y 趋于 d 端输入中的噪声信号 $V_0(n)$, 于是 e 端输出作为 d 与 y 之差就非常接近输入的有用信号 $S(n)$ 。

证明如下:

$$e = d - y = S + V_0 - y \quad (5.2)$$

将上式平方得:

$$e^2 = s^2 + (v_0 - y)^2 + 2s(v_0 - y) \quad (5.3)$$

于是有

$$E[e^2] = E[s^2] + E[(v_0 - y)^2] + 2E[s(v_0 - y)] \quad (5.4)$$

其中: $E[s^2]$ — 信号功率,

$$E[s(v_0 - y)] \approx 0。$$

由于 s 与 v_0 和 v_1 都不相关, 所以有以下关系

$$E[e^2]_{\min} \Leftrightarrow E[(v_0 - y)^2]_{\min} \quad (5.5)$$

$$\text{由于 } v_0 - y = e - s \quad (5.6)$$

所以有

$$E[(v_0 - y)^2]_{\min} \Leftrightarrow E[(e - s)^2]_{\min} \quad (5.7)$$

即 e 以最小均方误差趋于 s。在最好的情况下有 $e=s$ 。

可见这种自适应滤波器可以在强噪声背景下提取信号。当噪声或信号的统计特性变化时, 这种自适应滤波器也能自适应地调节它的响应特性来适应新的变化。

5.2 采样信号的带通滤波

经过自适应噪声滤波器进来的信号已经可以看作是有用的声发射信号了。但这种信号还不能直接进行分析和处理, 因为信号经过 DSP 外部的模拟滤波器后, 可能有部分高频分量衰减不充分, 越靠近截止频率附近越是如此, 更为重

要的是信号经过 A/D 转换后，由于 A/D 转换器的转换速率有限，当部分信号的频率大于系统的折叠频率（奈奎斯特频率）时，将有频谱泄漏的情况产生，如果直接就进行信号的分析 and 处理就会产生频率混叠现象，导致错误的分析结果。频率越高，越容易产生混叠现象。因此，为了更有效地过滤掉分析频率范围以外的信号，还必须进行数字滤波。

数字滤波器的功能是把输入序列通过一定的运算变换成输出序列，输入、输出的都是离散的数字信号，具有一定的传输特性。借助于一定的数值计算方法可以去掉输入的数字信号中的无用成分而保持有用信号不变。数字滤波器的功能可通过软件的方式实现，也可用硬件结合的方式在通用的数字信号处理器上实现，以提高运算速度。

工程上常用的数字滤波器有两类：无限长单位冲激响应（IIR）数字滤波器和有限长单位冲激响应（FIR）数字滤波器。FIR 滤波器可以设计成具有严格的线性相位，同时又可以具有任意的幅频特性，而 IIR 滤波器如果不用全通网络进行校正，就无法做到这点。同时由于 FIR 滤波器的单位冲激响应是有限长的，因而具有较好的稳定性，而且可以用快速傅里叶变换（FFT）来过滤信号，从而可以极大地提高运算效率，只不过要取得较好的衰减特性，FIR 滤波器的阶次要比 IIR 滤波器的高些^[46]。

FIR 滤波器的单位冲击响应 $h(n)$ 是有限长的，即 $h(n)$ 仅在 $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 的有限个点上有值，其 z 变换为：

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (5.8)$$

这就是 FIR 滤波器的系统函数。这是 z^{-1} 的 $N-1$ 阶多项式，在有限 z 平面 ($0 < |z| < \infty$) 有 $N-1$ 个零点，而位于 z 平面的原点 $z=0$ 处，有 $N-1$ 阶极点。

确定滤波器的系统函数后，FIR 滤波器的输出和输入的关系可用差分方程表达为：

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m)x(n-m) \quad (5.9)$$

这是线性移不变系统的卷积和公式，也是 $x(n)$ 的延时链的直接型结构，如图 5-6 所示。

在此基础上还可以扩展成格型结构，便于 DSP 的高速并行处理。

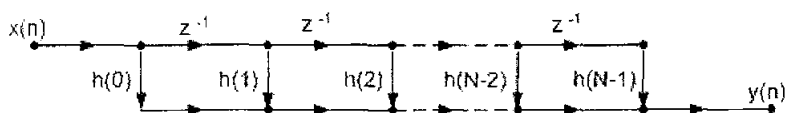


图 5-6 FIR 滤波器的直接型结构

通常设计的滤波器在通频带内应具有较平的响应，而在过渡带内又具有较快的衰减，以有效地拾取要分析的信号。

在本系统中由于传感器的频率范围为 50kHz~2MHz, 要分析的 AE 信号频率范围 100kHz~1MHz, 因此可保留要分析的信号频率范围, 将 50kHz~100kHz 和 1MHz~1.05MHz 范围的信号进行衰减。滤波器应具有图 5-7 所示的特点。

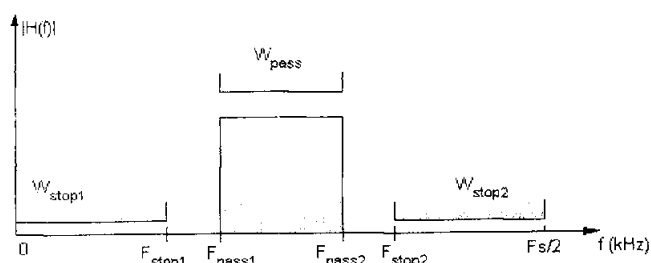


图 5-7 带通滤波器的通频特性

按图 5-8 所示的参数进行带通滤波器的设计：

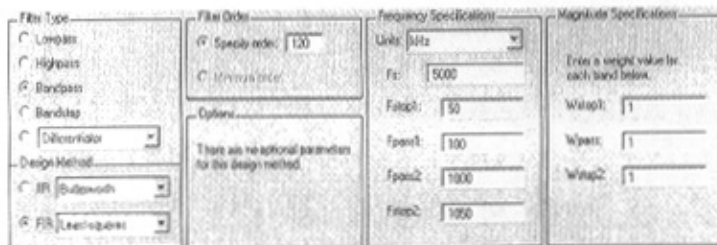


图 5-8 滤波器的设计参数

设计出的滤波器的幅频特性如图 5-9 所示。由图可见，滤波器具有较好的

带通特性，在通频带内具有一致的响应，在分析频率范围外，信号会得到较快的衰减。在整个通带频率范围内，相频特性还具有较好的线性关系。

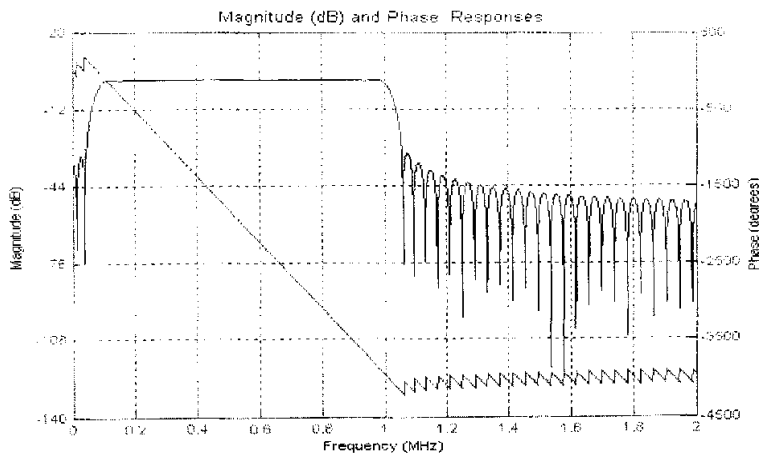


图 5-9 滤波器的幅频特性

图 5-10 是该滤波器的脉冲响应。由图可见，滤波器有时间延迟，经过大约 12 μ s 可完全跟踪输入信号。从响应特性来看，设计的滤波器是满足 AE 信号分析的时间要求的。

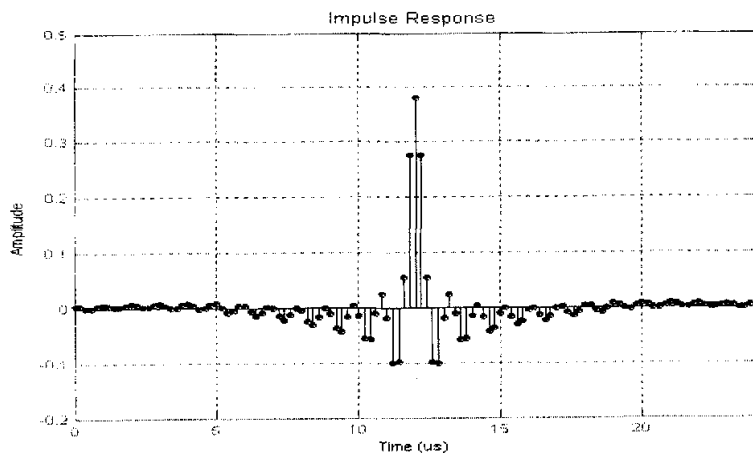


图 5-10 滤波器的脉冲响应

5.3 声发射信号的小波包分析

由检测到的声发射信号推断结构内部的状态是一种弹性波反演技术，即由接收的弹性波场信息来反推介质的物理、力学参数、散射体的几何参数及发射源的位置等。理论上以弹性动力学为基础，属反问题研究范畴，是地球物理勘探、油气田开发、岩土工程、材料无损检测等工程应用的基础。在研究方法中采用的高阶谱分析是近年来发展起来的一种非线性信号处理技术，和传统的功率谱相比，它含有更加丰富的信息，如信号与系统的相位信息、高斯偏移量、系统的非线性等。高阶谱分析中常将时变谱估计函数中用得最多的维格纳（Wigner）分布扩展为高阶谱域，得到高阶维格纳分布理论（简记为 WHOMS）。这种方法可以在其它信号存在的情况下，不论该过程平稳与否，抑制一些重要的高斯噪声^[45]。时频分析技术是另一种分析非平稳信号的有力工具，它是在时间—频率二维坐标构成的平面上分析信号的时变特性。

声发射信号是一种非平稳信号或时变信号，其统计特性随时间而变化，采用传统的傅里叶分析方法并不能获得满意的结果。目前针对非平稳信号的特点，主要的分析方法可分为两类：线性时频分布和双线性时频分布。线性时频分布有盖博（Gabor）变换、短时傅里叶（Fourier）变换（加窗傅里叶变换）和小波（Wavelet）变换等方法。双线性时频分布有维格纳分布和广义双线性时频分布等。短时傅里叶变换是在 Gabor 变换的基础上发展起来的，其基本思想是在傅里叶变换的基础上实现时域的局部化，它采用某一滑动窗函数截取信号，然后再分别对其进行傅里叶变换，从而构成时变信号的时变谱。由于傅里叶变换在时域和频域上的对偶关系，所以短时傅里叶变换可以从时域、频域来描述信号。但其主要的问题是它的窗函数的大小和形状与时域和频域无关而保持固定不变，对于时变信号的分析来说是不利的。因为高频信号一般持续时间很短，而低频信号持续时间较长，对于高频信号应采用小时间窗，对于低频信号则应采用大的时间窗进行分析。维格纳分布基于统一的 Cohen 双线性时频分布理论，但是要设计一个比较适合核函数，并非易事。

近十多年来迅速发展起来的小波分析，是傅里叶分析划时代的发展成果，是目前公认的最新的时频分析工具。小波分析优于傅里叶分析的地方是在时域和频域同时具有良好的局部化性质，对于高频成分可采用逐渐求精的时域和频域取样步长，从而可以聚焦到对象的任意细节。但是小波分析对突变信号

的分析是非常有效的，但对渐变信号却不如短时傅里叶分析有效。针对这种情况，Coifman 等人在 1992 年提出利用小波包构造正交的小波包库的方法，以方便选择最合适的小波基。对信号进行采样后得到一个有限频带中的信号。对这个信号进行小波包分解，把信号分解成两部分，即高频部分和低频部分。根据分析的需要可以继续对所得到的高频部分和低频部分进行分解，如此又得到了更低频率部分的信号和频率相对较高部分的信号。这即是二进多尺度小波分解方法。这种方法把一个混频信号分解成若干互不重叠的频带中的信号，这样就可以达到提取信号特征的目的^[18]。

本文采用了 Daubechies 小波进行信号的分解和特征提取。

Daubechies 小波的尺度函数：

$$\phi(t) = \sum_{n=0}^N h_n \phi(2t - n) \quad (5.10)$$

小波函数（母小波，小波窗函数）：

$$\psi(t) = \sum_{n=0}^N (-1)^n h_{1-n} \phi(2t - n) \quad (5.11)$$

其中 $\{\phi(t - n)\}$ 是标准正交的 Riesz 基

N=5 时的 Daubechies 小波的双尺度系数 h_n 如表 5-1 所示^[49]。

表 5-1 Daubechies 小波的双尺度系数 (N=5)

n	0	1	2	3	4	5
h_n	0.4705	1.1411	0.6504	-0.1909	-0.1208	-0.0498

N=5 时的尺度函数和小波函数的波形图如下：

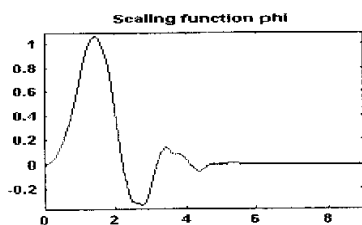


图 5-11 db 小波的尺度函数

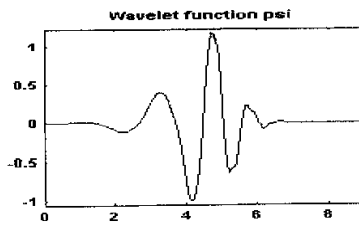


图 5-12 db 小波函数

将尺度函数和小波函数（母小波）按二进伸缩和整节点平移后不同尺度 j 和平移 k 下的离散尺度函数和小波函数：

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k), \quad j, k \in Z \quad (5.12)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad j, k \in Z \quad (5.13)$$

其中： $\{\phi_{j,k}(t)\}$ —函数线性空间 V_j 的基函数，关于平移指标 k 是标准正交的；
 $\{\psi_{j,k}(t)\}$ —线性空间 W_j 的基函数，关于尺度指标 j 和平移指标 k 是标准正交的。

V_j 和 W_j 都是线性空间 $L^2(R)$ 的子空间，且互相正交，即有以下关系：
 $V_j \oplus W_j = V_{j+1}, V_j \perp W_j, j \in Z \quad (5.14)$

所有 W_j 子空间的直和构成线性空间 $L^2(R)$ ，于是根据线性空间的直和关系有

$$\forall f(t) \in L^2(R)$$

于是信号函数 $f(t)$ 可展开为正交小波级数：

$$f(t) = \sum_{j \in Z} w_j(t) = \sum_{j,k \in Z} d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (5.15)$$

其中： $w_j(t)$ —相应于尺度 j 的小波分量； $d_k^j = \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi_{j,k}(t) dt$

可见信号经小波变换后表现为不同子频带的时域分量之和。

Daubechies 小波 ($N=5$) 在不同尺度上的部分小波分量如图 5-13 所示。

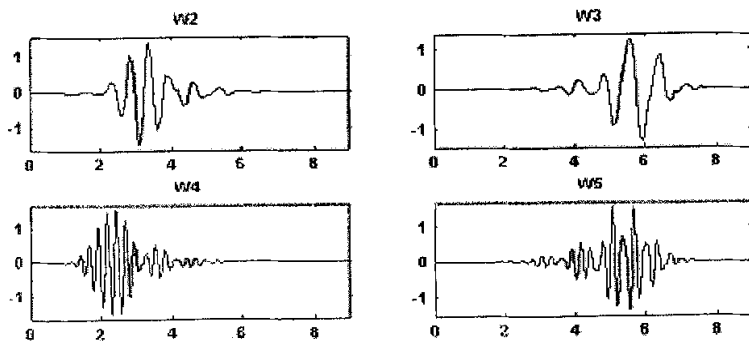


图 5-13 尺度函数和不同尺度上的小波函数

小波函数相当于一种带通函数，它的小波变换在频域方面的局部化作用由 j 调节，在时域方面的局部化作用由 k 调节。

离散小波函数的傅里叶变换后为：

$$\mathcal{F}[\psi_{j,k}(t)] = \hat{\psi}_{j,k}(\omega) \quad (5.16)$$

由该小波函数确定的时窗中心 t^* 、时窗半径 Δ_t 、频窗中心 ω^* 、频窗半径 Δ_ω 分别为：

$$t^* = \frac{1}{\|\psi_{j,k}(t)\|_0^2} \int_R t |\psi_{j,k}(t)|^2 dt \quad (5.17)$$

$$\Delta_t = \frac{1}{\|\psi_{j,k}(t)\|_0} \left\{ \int_R (t - t^*)^2 |\psi_{j,k}(t)|^2 dt \right\}^{1/2} \quad (5.18)$$

$$\omega^* = \frac{1}{\|\hat{\psi}_{j,k}(\omega)\|_0^2} \int_R \omega |\hat{\psi}_{j,k}(\omega)|^2 d\omega \quad (5.19)$$

$$\Delta_\omega = \frac{1}{\|\hat{\psi}_{j,k}(\omega)\|_0} \left\{ \int_R (\omega - \omega^*)^2 |\hat{\psi}_{j,k}(\omega)|^2 d\omega \right\}^{1/2} \quad (5.20)$$

可根据需要分辨的最高频率和最低频率来决定数据分解的层次。

例如对 U_3 空间进行 3 个尺度上的正交小波包分解，如图 5-14 所示，其中下标表示分解层次，上标表示子空间的顺序。对 U_3 空间的第一层分解有 2 个子空间，第二层分解有 4 个子空间，第三层分解有 8 个子空间。

在第一层分解中有

$$U_3 = U_2^1 \oplus U_2^2, \quad U_2^1 \perp U_2^2 \quad (5.21)$$

以此类推，在第三层中有

$$U_1^n = U_0^{2n-1} \oplus U_0^{2n}, \quad U_0^{2n-1} \perp U_0^{2n}, \quad n=1,2,3,4 \quad (5.22)$$

另外，在同一尺度上的所有子空间都是正交的，每次分解，频宽减半，且各子空间对应的频带也互相不重叠，但对于不同的尺度，小波窗函数的时宽和频宽之积为一定值。

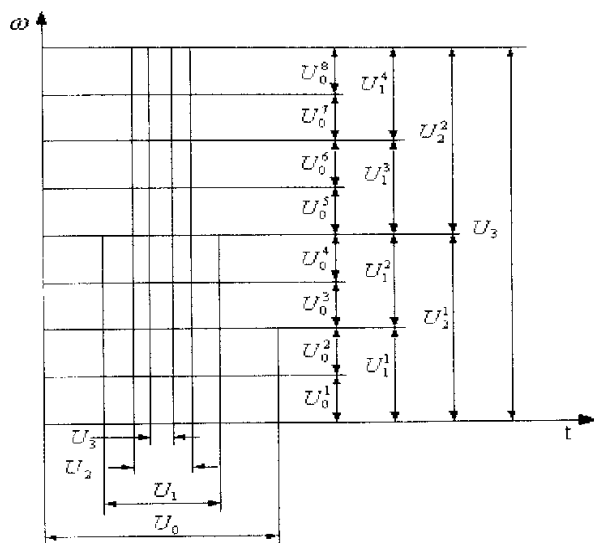


图 5-14 正交小波包分解时各子空间所对应的时-频窗示意图

由上图可见，小波包分解具有自适应的时-频窗。信号经小波包分解后表现为不同子频带的分量之和，对原信号的局部时频分析就表现为对各个子频带内的时频分量的分析。

下面对一信号进行多尺度的时频分析，将信号置于不同的时-频窗内对其波形特征进行分析。

原始信号的波形及其功率谱如图 5-15 和图 5-16 所示：

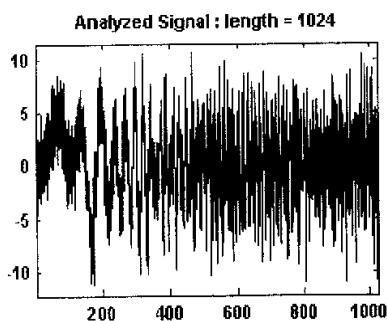


图 5-15 信号

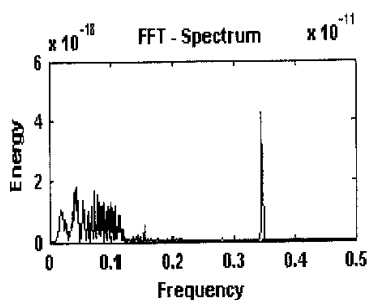


图 5-16 信号的功率谱

信号的统计特性如图 5-17 所示；

Mean	0.2043	Maximum	10.65	Standard deviation	4.158
Median	0.198	Minimum	-11.16	Median absolute deviation	2.685
Mode	-0.6195	Range	21.82	Mean absolute deviation	3.378

图 5-17 信号的统计特性

对该信号用 Daubechies (db) 小波对信号进行 3 个尺度上的分解。

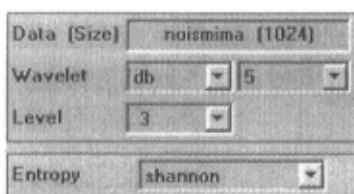


图 5-18 信号的分解方式

信号的分解层次结构和每一层的数据量如图 5-19 和图 5-20 所示。

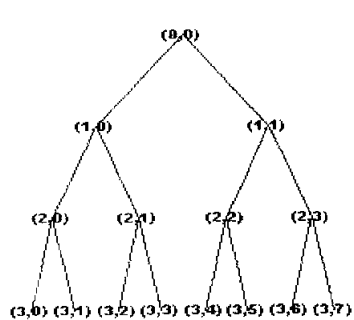


图 5-19 信号分解的层次结构

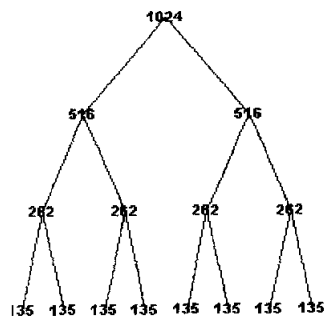


图 5-20 每层中的数据量

在用 Daubechies 小波包将信号进行分解过程中，首先将原始信号分解为两部分：第一层近似 (Approximation)，即节点 (1, 0) 所代表的信号，如图所

示 5-21 所示；细节部分 (Details)，即节点 (1, 1) 所代表的信号，如图所示 5-22。近似部分主要表现信号的粗尺度、低频的成分，而细节部分往往是信号的细尺度、高频成分。

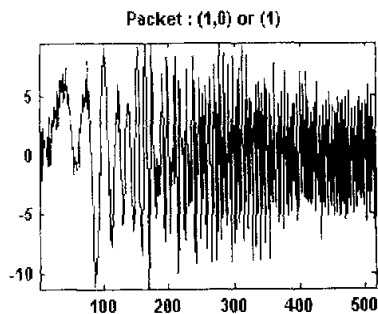


图 5-21 节点 (1, 0) 的信号

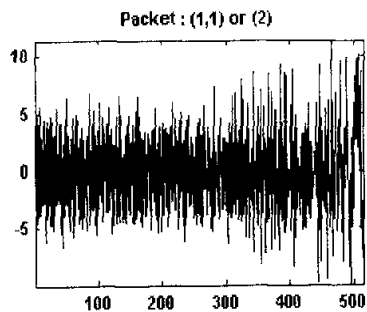


图 5-22 节点 (1, 1) 的信号

第一层近似与细节部分又可以分解成第二层近似 (2, 0)、(2, 2) 与细节 (2, 1)、(2, 3)。

第二尺度上节点 (2, 1) 的信号，如图 5-23 所示，可以分解成近似部分，即 (3, 2) 节点所代表的信号 (如图 5-24 所示) 和细节部分 (3, 3) 的信号 (如图 5-25 所示)。

尽管可以继续分解下去，但是这个分解过程并不是无限的，受信号长度的限制，最多只能分解到第 $\log_2 N$ 层 (N 为信号的长度)。

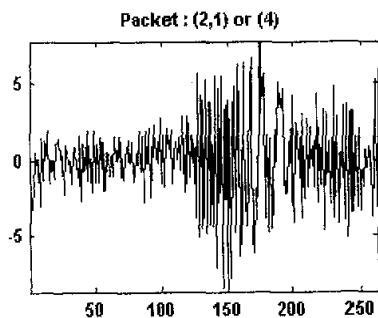


图 5-23 节点 (2, 1) 的信号

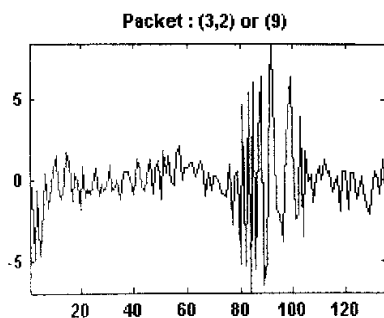


图 5-24 节点 (3, 2) 的信号

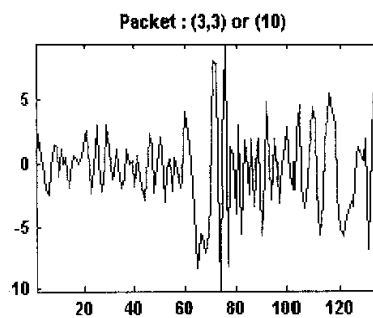


图 5-25 节点 (3, 3) 的信号

整个小波包的分解过程是会产生误差的，其误差曲线如图 5-26 所示。只要分解过程中的误差不超过指定的分析精度即可。

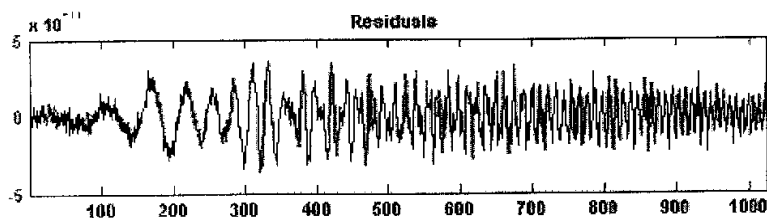


图 5-26 误差曲线

在进行信号分析时，如何提取信号中反映裂纹信息的特征参数是一个关键的技术难点。信号的频谱和幅值等表征了信号的许多特征，此外信号中不规则的突变部分和奇异点也往往包含有比较重要的信息，它是信号中表征异常状况的重要特征之一。火车轮产生裂纹时，声发射波形会有急剧的变化，检测信号的突变点就可以对裂纹出现的时刻及其对应的频率成分做出判断，确定裂纹对应的信号的特征频率也是故障诊断科学中一个极为重要的应用^[50, 51]。由于小波包分析具有时空局部化的性质，因此，通过对出原始 AE 信号分解产生的不同时频范围内的信号进行分析，可以发现信号的局部奇异性及其位置和大小及其特征频率成分。

当小波函数看作是一平滑函数的一阶倒数时，信号小波变换的模的局部极值点对应于信号的突变点（或边缘）；当小波函数看作是一平滑函数的二阶倒数

时, 模的过零点也对应于信号的突变点 (或边缘)。因此, 采用检索小波变换系数模的过零点和局部极值点的方法可以检测信号的突变点 (或边缘) 的位置及性质。

通常情况下, 信号的奇异性可分为两种情况: 一种是信号在某一时刻起幅值发生突变, 引起信号的不连续, 此即信号中的第一类间断点; 另一种是信号的幅值虽然没有突变, 但是一阶微分上有突变产生, 即信号的一阶微分是不连续的, 此即信号中的第二类间断点。为了度量信号在局部位置的突变程度, 可使用 Lipschitz 指数 α 。对应于不同尺度 j 的小波变换系数的模值的局部表现为:

$$|W_j f(t)| = \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi_{j,s}(t) dt = O(2^{-\alpha}), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5.23)$$

这表明对于具有不同局部奇异性的函数 $f(t)$, 小波变换系数的极大值将随尺度 j 的改变而改变且不同类型的突变信号的小波变换模极大值的表现是不同的。当 $\alpha > 0$ 时, 如在折线突变点处, 随着 j 的增大, 小波变换系数的模值会越来越小; 当 $\alpha = 0$ 时, 如在阶跃突变点处, 模值不随尺度的改变而改变; 当 $\alpha < 0$ 时, 如在尖峰形式的突变点处, 随着 j 的增大, 小波变换系数的模值会越来越大。

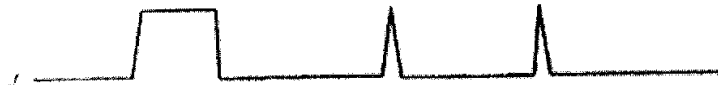


图 5-27 信号

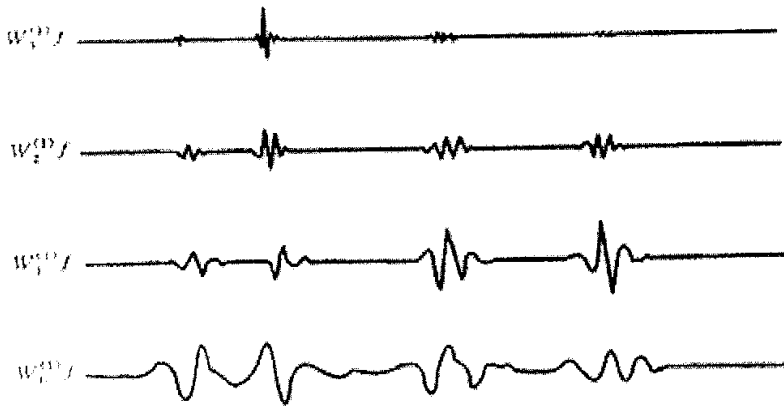


图 5-28 信号小波分解后在不同尺度上的模极大值曲线

由图 5-28 可见，信号突变点处的小波变换在各个尺度层上有一致的表现，小波的对称性保证了小波变换的模的极大值在反映突变点时是位置整齐对应的，在不同的尺度层上有移位现象。

将原始信号进行小波包分解后，可得信号在不同尺度上的小波系数的模值曲线，如图 5-29 所示。由于原始信号是谐波信号叠加高斯白噪声后形成的，分解后的信号在不同尺度下在原始信号的峰值点上都产生了模极大值曲线。用这种方法可以有效地检测出声发射信号中的突变点和奇异点。

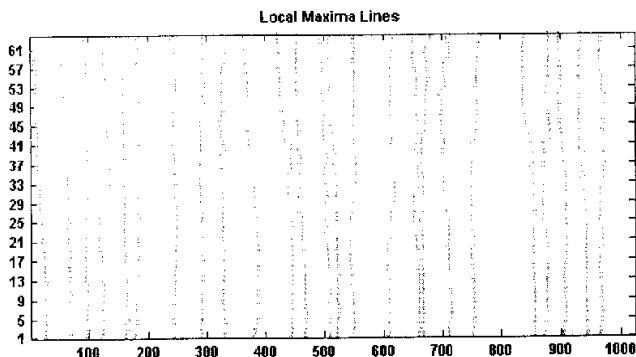


图 5-29 原始信号用 db 小波分解后的模极大值曲线

一般认为，仅在一个尺度上判断信号的突变点的位置是不够的，应该在多个尺度上进行综合判断。因为在较多尺度下的小波变换才能减少频率混叠现象，才能较准确地判断突变点的位置；噪声信号会干扰检索点的准确位置，比较多尺度上的检索点才能提高抗干扰能力；为了提高判断的可靠性，需要在多尺度下进行分析，以提高检测的准确性。

5.4 基于神经网络的分析方法

轮、轴的运行状态（正常或故障）组成状态空间 S ，其可测量的全体声发射信号的特征构成特征空间 Y 。一定的声发射信号特征 $y \in Y$ 对应着相应的运行状态 $s \in S$ ，即存在映射关系 $g: Y \rightarrow S$ 。这种映射关系往往是相当复杂的，而且很难用确切的数学模型加以描述。

为了建立信号特征空间到状态空间的映射关系，可利用人工神经网络

(Artificial Neural Network) 具有的较强的非线性映射能力^[52, 53]。另外人工神经网络的自学习能力、并行计算能力、容错能力和鲁棒性也为实现轮、轴的运行状态监控提供了实现途径。

多层前馈网络误差反向传播 (Backpropagation, BP) 算法自 1986 年山 Rumelhart 等人提出以来, 得到了广泛的应用。目前在人工神经网络的应用领域, 约有 80% 都采用了该网络^[54]。BP 神经网络存在的问题主要是训练误差在快速减少时并不总是收敛于全局的最小值。

本文采用的是一个具有 6 输入 1 输出的 BP 网络。输入参数分别为 AE 信号的振铃数、上升时间、持续时间、能量、幅值和模极大值点的特征频率, 输出参数为表征裂纹特征的应力强度因子幅度 ΔK 。BP 网络的结构如图 5-30 所示。

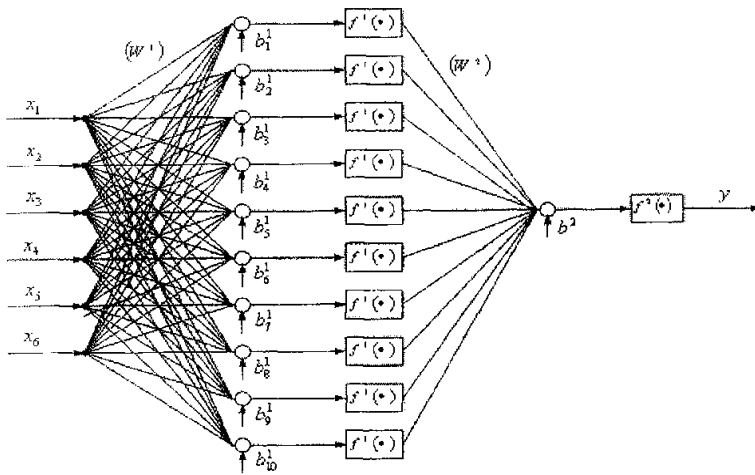


图 5-30 BP 神经网络结构图

$$\text{设 } X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T \quad (5.24)$$

其各个分量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别对应信号的各个特征量, 所有输入量构成一个 6×1 的输入矩阵:

设 Y 为相应的输出矢量, 其分量对应于表征裂纹的特征参数 ΔK , 由输出量构成的输出矩阵为:

$$Y = [y]^T \quad (5.25)$$

设第一层和第二层的阈值矢量分别为：

$$B_1 = [b_1^1 \quad b_2^1 \quad b_3^1 \quad b_4^1 \quad b_5^1 \quad b_6^1 \quad b_7^1 \quad b_8^1 \quad b_9^1 \quad b_{10}^1]^T \quad (5.26)$$

$$B_2 = [b^2]^T \quad (5.27)$$

再设第一层和第二层的权值矩阵分别为：

$$W_1 = [\alpha_{ij}]_{10 \times 6} \quad (5.28)$$

$$W_2 = [\beta_{ij}]_{1 \times 10} \quad (5.29)$$

则神经网络的输入和输出的关系为：

$$Y = f_2(W_2 f_1(W_1 X + B_1) + B_2) \quad (5.30)$$

有学者已经证明，在隐层具有 S 形传递函数的 2 层神经网络可以逼近任何函数，也可以处理任意的分类问题，不过在隐层应具有足够多的神经元^[53]。

本文中网络隐层的传递函数选用双极性的双曲正切函数，即：

$$f^1(s) = \frac{1 - e^{-2s}}{1 + e^{2s}} \quad (5.31)$$

图 5-31 是该传递函数在区间[-5 5]的输入、输出相应。

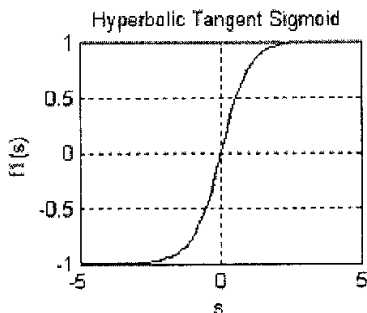


图 5-31 S 形传递函数

输出层的传递函数选用线性函数：

$$f^2(s) = s \quad (5.32)$$

图 5-32 绘出了 S 形函数和线性函数在输入变量 s 在区间 $[-5,5]$ 变动时对应的输入、输出响应曲线。

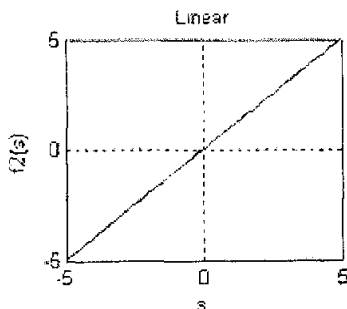


图 5-32 线性传递函数

最后确定的 BP 神经网络仿真模型的结构如图 5-33 所示：

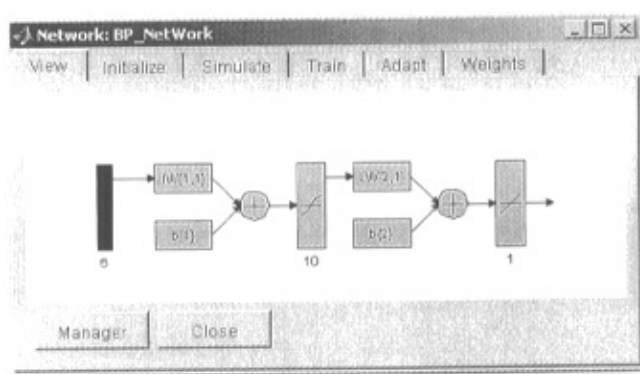


图 5-33 BP 神经网络的仿真模型

为了使 BP 网络具有较强的处理问题的能力，必须对设计好的网络进行训练。训练好 BP 神经网络可将表征故障特征的信息（知识库）分散存储在网络的权值和阈值中，对某一特征信号进行正向传播计算（推理）后，就可以获得输入模式（故障征兆）下的输出模式（故障），从而可以实现运行状态监控和故障识别。BP 网络的训练流程如图 5-34 所示。

为了使设计的 BP 网络具有较佳的性能，还应考虑以下因素：

① 网络信息容量与训练样本数的关系：

神经网络是靠已有的丰富经验来训练的，样本数据越全面，网络训练的性能就越好。因此样本的选择应确保样本之间不能有冲突（相容性），同时样本应具有代表性（遍历性）。

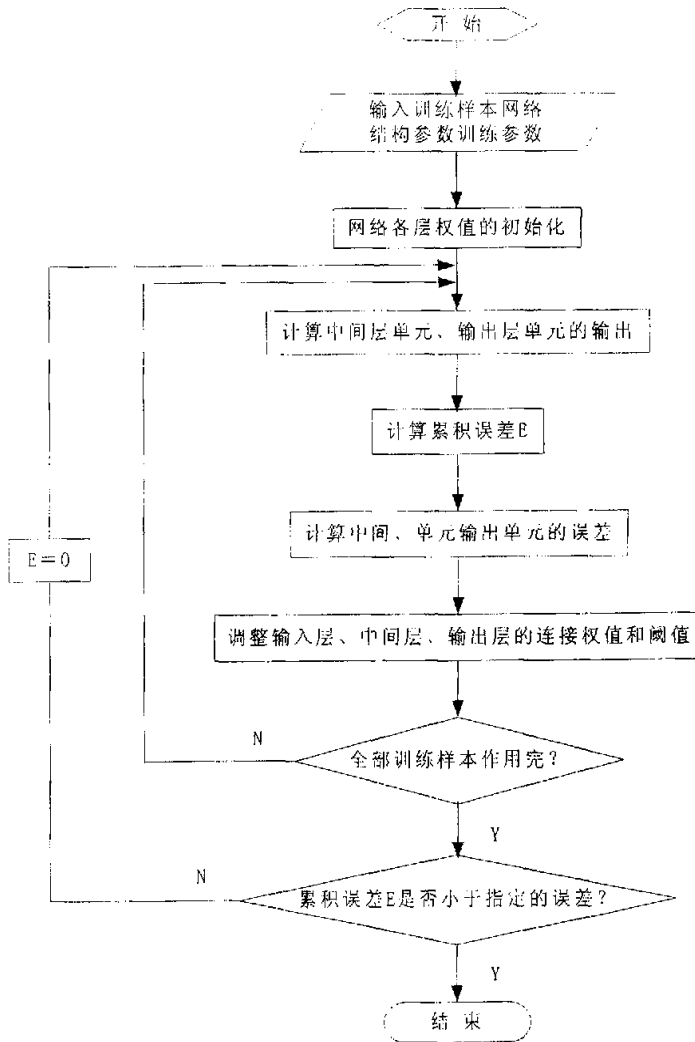


图 5-34 BP 神经网络训练流程图

样本分成训练集和测试集，训练好神经网络后，再用测试集检验网络的泛化能力。多隐层的泛化能力是指对于未经学习过的输入，也能映射出正确的输出，这个能力是衡量神经网络性能的一个重要方面。

训练样本数量往往难于确定。对于确定的样本数，网络参数太少，则网络不足以表现样本中蕴涵的全部规律；网络参数太多，则会由于样本信息少而得不到充分的训练。一般训练的样本数与网络参数应满足以下关系：

$$P \approx \frac{n_w}{\varepsilon} \quad (5.33)$$

式中：P—训练样本数；

n_w —网络的权值和阈值总数；

ε —训练误差；

② 网络隐层数的确定：

尽管增加隐层数可增加人工神经网络的处理能力，但隐层数过多会使训练样本数和训练时间增加。由于两个隐层的网络可以获得输出是输入的任意连续函数，本文采用 2 个隐层的 BP 神经网络。

③ 隐层结点数的确定：

建立多层神经网络模型时，隐层结点数对网络性能的影响是很关键的。隐层结点数太少，网络所能获取的信息太少，难以处理较复杂的问题；若隐层结点数过多，则会使网络训练时间急剧增加，而且过多的隐层神经元容易使网络训练过度，也就是说网络具有过多的信息处理能力，甚至会将训练样本中没有意义的信息也记住了，这样神经网络就难以分辨样本中的真正模式。本文中选择的隐层结点数为 10，构成一个 $6 \times 10 \times 1$ 的 BP 神经网络，即该网络具有 6 个输入、1 个输出、1 个隐层，且隐层具有 10 个神经元。

④ 网络训练次数的确定

开始对网络训练时，随着训练次数的增加，训练误差会不断下降，表明网络开始不断地学习输入数据中的普通类型，可是当超过某个训练次数后，训练误差则会开始上升，也就是说网络已开始记住输入中不重要的细节了，因此，对于一个确定的网络存在最佳的训练次数，在此之前停止训练会造成网络训练不足，此后又会出现训练过度。

⑤ 初始权值的确定

神经元的传递函数是与零点对称的，如果每一个结点的净输入均在零点附近，则其输出在传递函数的中点，这个位置远离传递函数的两个饱和区，是变化最灵敏的区域，必然会使网络学习速度较快。因此为了使各结点的初始净输入在零点附近，可使初始权值和阈值都比较小。

⑥ BP 算法的改进

BP 算法是根据梯度下降来调整权值的，无法辨别局部极小值点与全局最小值点，在训练时网络有可能落入局部极小值点（图 5-35）后就停止训练。为了确保落入全局最小值点（图 5-36），还需采用遗传算法（Genetic Algorithm）。

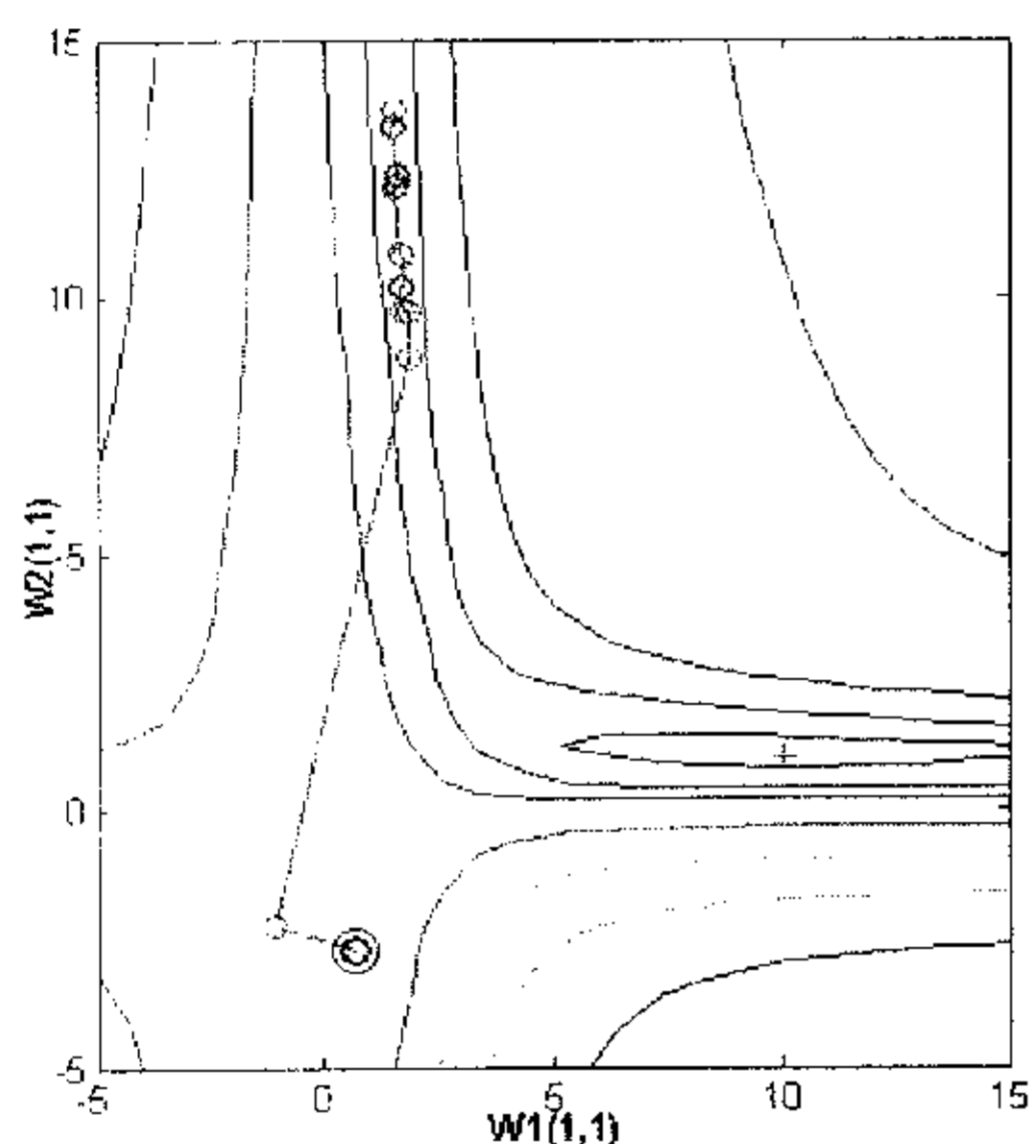


图 5-35 收敛于局部极小值

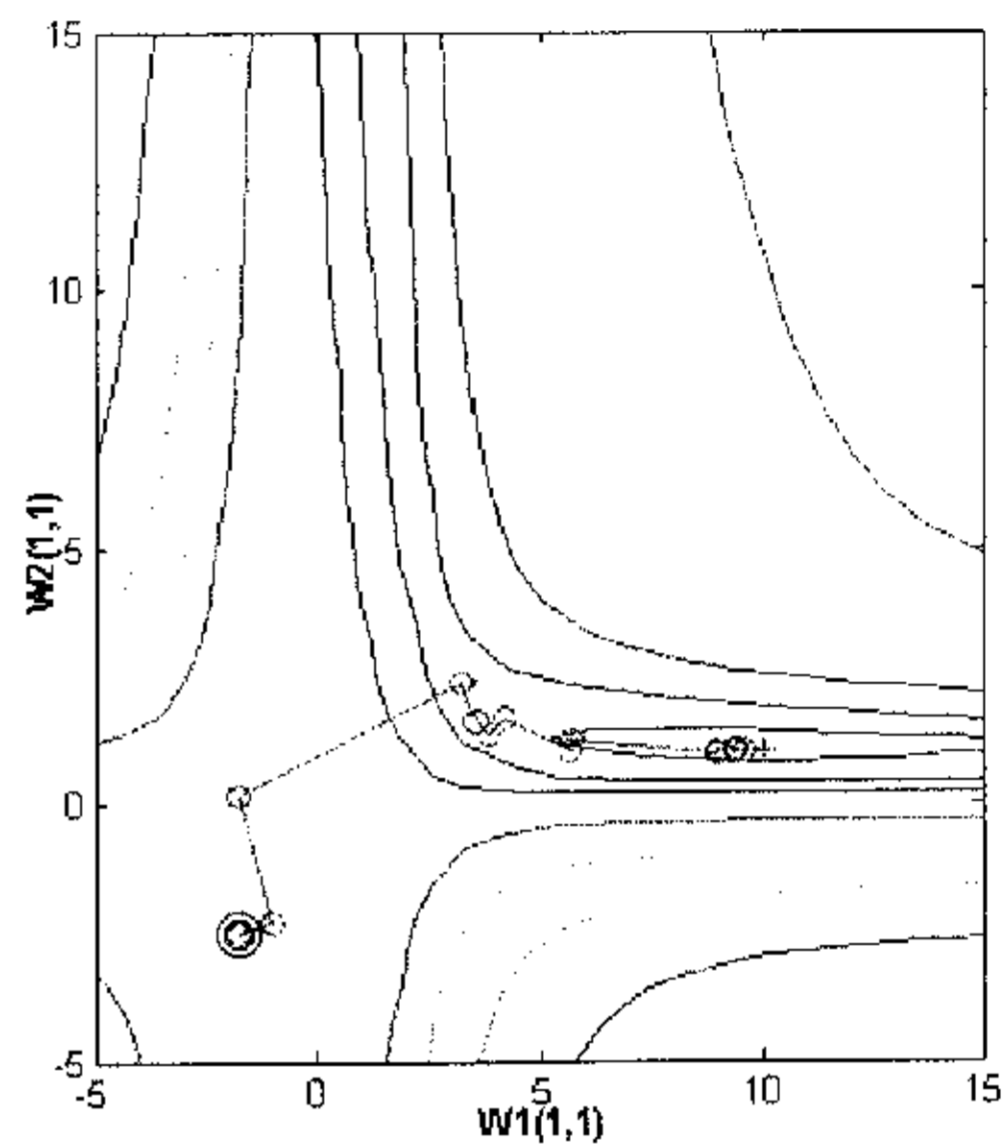


图 5-36 收敛于全局极小值

另一方面，为了加快网络的学习速率，避免梯度下降时出现的来回振荡致使收敛速度减慢，本文采用了共扼梯度法（Conjugate Gradient Algorithm）对权值矩阵进行调整。

5.5 声发射源的定位方法

根据导波理论，弹性波在介质中传播时，其能量随传播距离的增加而逐渐减弱，衰减过程符合下面的规律^[56]：

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (5.34)$$

式中：X—测量点相对于波源的距离；

A—X 处的信号振幅；

A_0 —X=0 处的信号振幅；

α —弹性波在介质中的衰减系数；

测量点位置 X 的确定原则是：在 X 处的弹性波能量衰减到传感器的最低灵敏度。 A_0 的大小可由理论计算得出，A 的大小可由传感器敏度计算，则 α 是决定 X 大小的主要因素， α 与弹性波的频率、传播媒介的性质及媒介间的耦合特性等因素有关，由于传播媒介对弹性波中的不同频率有不同程度的吸收和散射作用，因此到达测量点的弹性波在幅值、相位及频率成份上均有一定的失真，从某种意义上讲，弹性波在介质中的传播是经过了一个非线性滤波器。一般情况下、 α 的衰减服从下述变化规律：

$$\alpha = D_0 f + (D_1 + G_1) f^2 + (D_2 + G_2) f^4 + \alpha_0 \quad (5.35)$$

式中： D_0 、 D_1 、 D_2 为弹性波在固体中的衰减常数； G_1 、 G_2 为弹性波在流体中的衰减常数；f 为弹性波的频率； α_0 为工况环境引起的衰减量。

由上式可知，频率越高， α 越大；频率不同， α 不同。因此，在测量点处的弹性波成份中，衰减最多的是高频成份，这说明，X 不能取得太大，否则，频率失真太严重，高频成份衰减太多。

火车的轮和轴是采用过盈联结固定在一起的，其结构对称，于是换能器的安装在如图 5-37 所示的位置，其中换能器 2 和 3 可分别看作是自适应噪声对消器的参考输入。

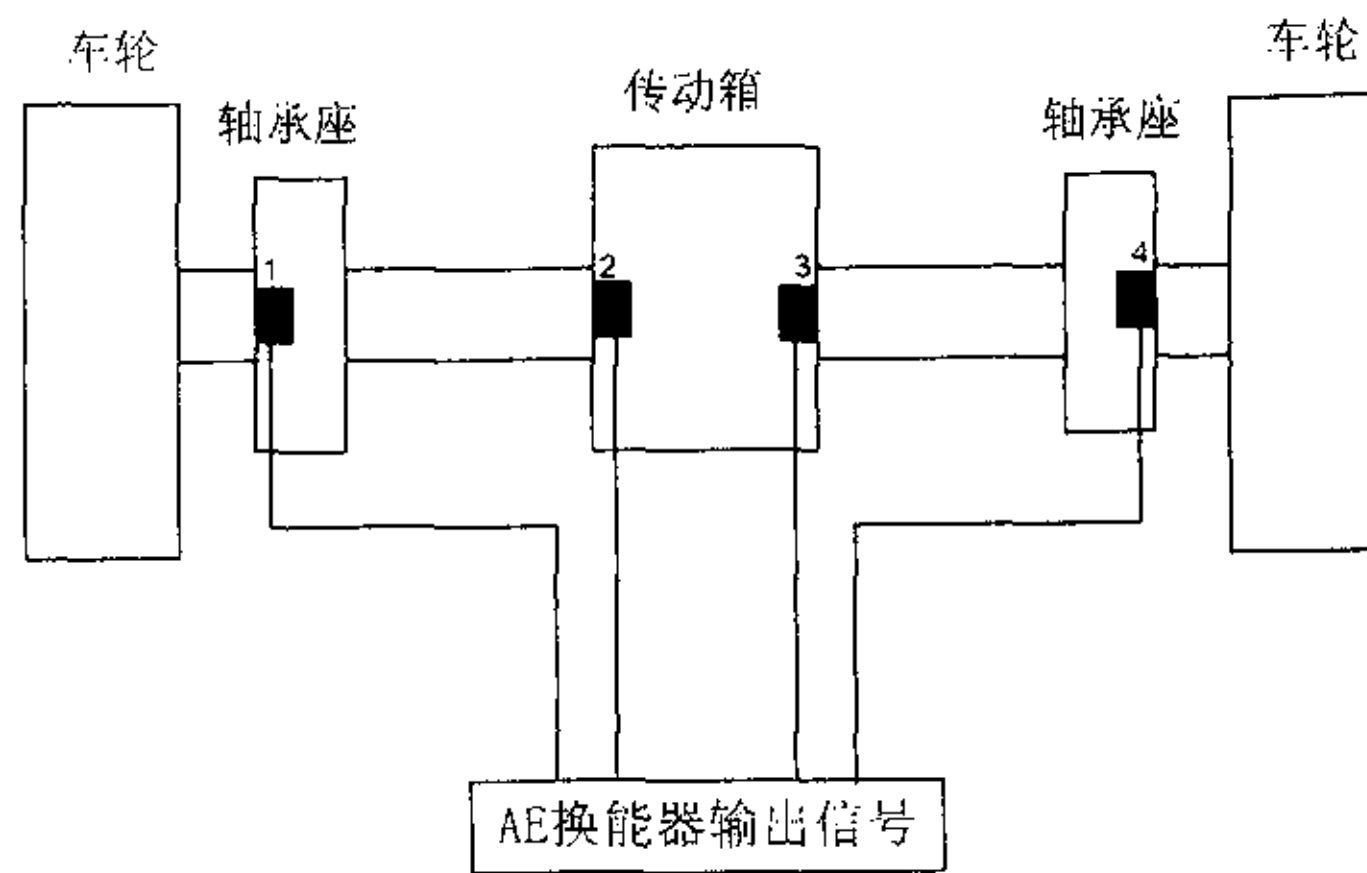


图 5-37 声发射换能器的安装图

高保真宽带传感器可以实时、真实地获取被测材料结构中产生的宽带声发射信号，但是 AE 信号的波形在进行 A/D 转换前需先用硬件的方法剔除大部分的噪声，这可通过硬件滤波和自适应噪声对消来实现；在处理信号数据时再以软件的方法进一步去噪（主要是带通滤波），以实现提取真实的声发射信号。通过分析和研究源产生的超声波模式，找出对应模式波的内在特征，即可进行声发射源的定位。

目前声发射检测系统常用的源定位方法主要有时差定位、区域定位和模式识别等方法，其特点如下^[47, 58]：

时差定位是根据同一声发射源所发出的声发射信号到达不同换能器的时间上的差异以及换能器在空间的布置位置，根据波速不变的条件进行计算。这种定位方法在传统的声发射检测系统中应用比较广泛。但这样做的前提是必须知道构件中声波的传播速度 c 。对于超声检测，根据所用声波的种类（纵波、横波和表面声波），很容易确定声速。但对于声发射检测，情况就比较复杂了。受板厚、声源性质、声源与换能器距离等因素的影响，到达换能器的声波可以是纵波横波表面波扩展波和弯曲波等不同形式的波及其组合。考虑到介质中的声波的能量的衰减以及不同的换能器与声源的距离，对于同一阈值，有的换能器通道是被扩展波触发，而其它的换能器通道则有可能被弯曲波触发。如不加区分地用同一声速来求时差，无疑会产生很大的定位误差。因此必须根据不同模态的声发射波进行定位，这样才可以有效地减小定位误差。在实际的声发射中，变声速的情况也是常有的。例如一个探头收到的是纵波，而另一个探头收到的是瑞利波分量；另一种情况是色散，即波速为声波频率的函数。可见时差定位法在原理上是有误差的，根据波速不变的条件计算得到的结果具有较大的误差。

区域定位是根据接收到声发射源信号的换能器个数和时差次序来判断声发射源所在的区域。区域定位法简洁、不易误定，但定位精度低。

信号相关法是根据同一声发射源信号的相关特性来进行定位，主要用于连续声发射源信号的定位，如泄漏源的定位等。

声发射源的位置还可通过模式识别的算法来实现，即将不同声发射源位置认为是不同模式，对应声发射波形信号为相对应数据（可为一个传感器或多个传感器），应用模式识别的方法建立数据与模式（声发射源定位）的对应映射关系。模式识别定位法特别适用于材料各向异性、结构复杂的情况。模式识别定位法

通过对结构中已知的声发射信号从声源到传感器的传播规律进行统计, 建立一个经验模型。建立模型包括两个步骤, 首先, 任意布置传感器的位置, 把待检测的结构划分为很多小区域, 采用已知的声发射源信号在各区域对传感器进行标定, 在模型中记录传感器中的信息。然后, 在检测的过程中, 模型把检测到的信号与“记忆”中的信息(合成的位移—时间信息)按预先规定的标准比较, 可以确定声发射源的位置信息。

由于不同模式的波的频率成分不同, 也可以通过选取不同频率段的信号进行分析和计算。有资料报道^[35], 经高通滤波器(低频截止频率 100kHz)或高频带通滤波器(带通范围 100~1000kHz), 可主要获得扩展波和 SH 波成分, 而经低频带通滤波器(带通范围 20~70kHz), 主要获得低频弯曲波分量, 并称 Duzegan 在三种不同厚度的钢板上进行了模拟板内和板外声发射, 并使信号分别通过高、低通滤波器, 实验结果表明这种设想是正确的。

在本系统中采取的方法是根据板波理论, 首先采用高频带通滤波器(带通范围 100~1000kHz), 主要获得扩展波和 SH 波成分, 然后采用时差定位和区域定位相结合的方法法进行声发射源的粗略定位。这种方法可以在换能器较少的情况下取得较高的定位精度^[59]。

5.6 本章小结

由于声发射换能器的输出信号经过硬件滤波后还可能含有大量的噪声信号, 因此 AE 信号在进行 A/D 转换之前还要自适应噪声对消, 之后还要进行数字带通滤波以进一步抑制不需要的信号。这样处理后的信号才能看作是真正的声发射信号。在信号的分解中使用了时频分析工具—小波包分析, 将信号在不同尺度上分解, 以确定信号在奇异点处的时频信息。信号奇异点处的时频特征和波形的各个参数将作为 BP 神经网络的输入, 由神经网络进行非线性映射, 确定声发射信号对应的构件力学参数—应力强度因子幅度 ΔK 。

第 6 章 火车轮声发射数据的记录和查询

声发射源发出的信号被宽带压电传感器检测到以后，经过噪声对消和滤波得到的 AE 信号可看作是“纯净”的 AE 信号。根据参数声发射的理论，由信号波形可以提取反映信号特征的一些参数，如振铃数、幅值、上升时间、信号持续时间、能量等，这些特征量主要是基于统计的方法得到的。AE 信号再经过小波包分解后，在时频空间得到一些反映裂纹特征的一些参数，如模极大值点、奇异点、突变点和间断点的时频参数。由这些参数组成的集合可看作是唯一对应于裂纹特征的向量。每一个被检测到的 AE 信号经过处理后都表现为一个行向量。这些数据最后都要通过 DSP 的输出接口送上总线，由处于 CAN 总线的末端的进行实时监控的上位机通过串行口接收。

在系统运行过程中产生大量的声发射数据需要保存，而且 BP 神经网络的计算结果也要保存，这些保存下来的数据一方面用于事后的分析和查询，另一方面也是做进一步处理的需要。可以建立数据文件来保存大量的 AE 数据，但是数据量增大到一定程度后，这些数据文件将很难维护，而且进行分析和查询时，要在应用程序中设置较大的动态数组，不仅会占用较多的系统资源，甚至会导致程序的崩溃。本文中用 Visual C++6.0 开发了客户端的应用程序，应用程序主要实现数据的接收和储存，在服务器端选用了 SQL Server 2000 数据库管理系统 (DBMS) 进行数据的管理，充分利用了数据库在数据管理方面的优越性。

6.1 状态数据的接收

CAN 总线送来的数据都存储在上位机的接收缓冲区中，上位机要不断将数据取出进行分析和处理，并将接收的数据和处理结果记录在数据库中的相应数据表中。

上位机可以两种方式进行接收：查询方式和中断的方式。在查询方式下，上位机要隔一定时间就去检查接收缓冲区中是否有数据输入，如果有数据则取出，并改变相应的缓冲区标志，可见查询方式要占用较多的系统资源；而在中断方式下，缓冲区中一有数据输入，则向上位机的 CPU 发出中断请求，要求 CPU 读取缓冲区中的数据，这种方式也称作事件驱动的方式，CPU 在未接到中

断请求时，则可以处理别的任务。

在本系统中由于有大量的数据需要处理，而且需要处理的时间比较集中，因此采用了中断方式进行数据的接收。接收流程如图 6-1 所示。

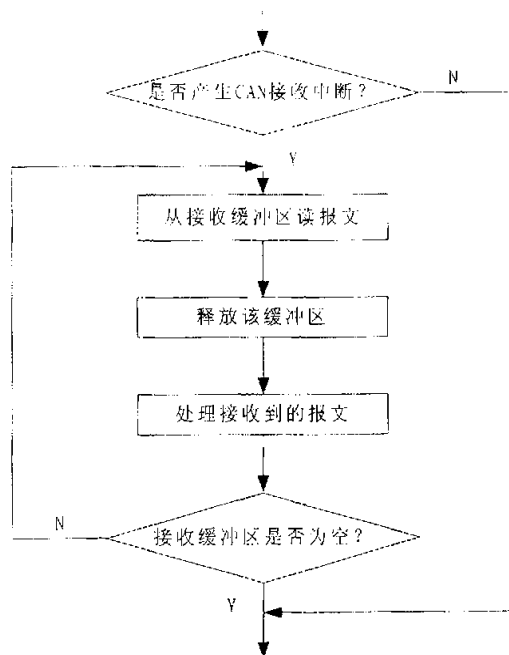


图 6-1 中断控制的报文接收流程

6.2 数据的存储

客户端程序要将数据写进数据库首先要建立与数据库的连接。Microsoft 开放数据库连接 (Open Database Connectivity, ODBC) 技术开发较早，得到多种数据库系统的支持，它不但定义了 SQL 的语法规则，而且还定义了 C 语言同 SQL 数据库之间的编程接口，其实现过程如图 6-2 所示。与不同数据源连接的驱动程序管理器在 ODBC32.dll 中执行。当应用程序与一个数据源连接时，驱动程序会装如合适的驱动程序。为了建立连接只需在操作系统中创建 ODBC 数据源 AE_DATABASE，客户端应用程序就可以通过该数据源访问数据库中的数据。

在 SQL Server 2000 的运行环境下创建数据库，并命名为 AE_DATABASE。在

该数据库中规划数据表的结构，每个火车轮对应于一个数据表，表的命名中应该反映火车轮所在的车厢和所处的位置。数据表的各个字段及其属性如图 6-3 所示：

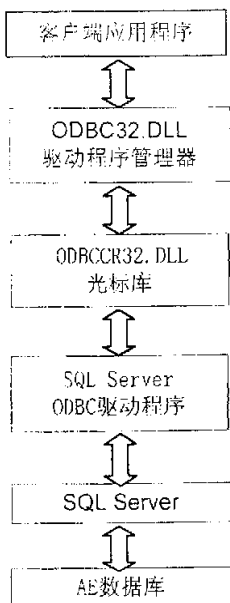


图 6-2 ODBC 调用结构

列名	数据类型	长度	允许空
裂纹长度	float	8	
转速	float	8	
应力强度因子幅度	float	8	
裂纹扩展速度	float	8	
备注	text	16	✓
螺栓数	float	8	
幅值	float	8	
上升时间	float	8	
持续时间	float	8	
能量	float	8	
突变频率1	float	8	✓
突变频率2	float	8	✓
突变频率3	float	8	✓

列	属性
描述	
默认值	0
精度	0
小数位数	0
标识	否
标识种子	
标识递增量	

图 6-3 数据表的各个字段及其属性

为了将数据写入数据库，在应用程序中还需加入 ODBC 功能以实现对数据的操纵。实现的功能主要有表的动态连接和在数据表中增加记录。表的动态连接是为了将来自 CAN 总线的不同的数据以及上位机的计算结果储存在不同的表中，因此程序应能动态选择数据表的功能；在数据表中增加记录可以通过执行 SQL 语句来实现的。

由于数据的存储在某些情况下可能变得很频繁，为了提高存储效率，在软件设计中使用了数据库的“存储过程”技术。存储过程是一组可以重复使用的 Transact_SQL 代码的组合，存储过程经过编译后就一直存在于服务器端的

AE_DATABASE 数据库中，执行时也在服务器端进行。存储过程实际上是作为一个函数被调用的，只不过需要存储的数据必须作为参数传递给该过程。对客户端程序来说，存储过程是作为 SQL 语句被执行的。存储过程独立于客户端应用程序进行设计，这就封装用户对数据库的插入操作，另一方面也减轻了客户端程序的负担。

实现存储过程的 Transact_SQL 代码如下：

```
use AE_DATABASE
go
create procedure Insert_AEData
@Crack_Length float =0,@Rotate_Velocity float =0,@DeltaK float
=0,@Crack_GrowthRate float =0,@Counts float =0,@RiseTime float =0,@Duration
float=0,@Energy float =0,@Magnitude float=0,@Frequency1 float=0,
@Frequency2 float=0, @Frequency3 float=0
as
insert into table1 (裂纹长度, 转速, 应力强度因子幅度, 裂纹扩展速度, 振
铃数, 上升时间, 持续时间, 能量, 幅值, 突变频率 1, 突变频率 2, 突变频率
3)
values(@Crack_Length,@Rotate_Velocity,@DeltaK,@Crack_GrowthRate,
@Counts,@RiseTime,@Duration,@Energy,@Magnitude,@Frequency1,@Freque
ncy2, @Frequency3)
go
```

为了实现数据存储，应在客户端执行调用存储过程的 SQL 语句：

```
Execute Insert_AEData Value1, Value2, ... Value12
```

其中，Value1, Value2, ... Value12 必须和存储过程中的相应变量一一对应。

6.3 数据的查询分析方法

数据表中的每个记录相应于每个火车轮的声发射数据。为了判断火车轮的运行状态，实现提前预报、预防为主，需要不断地查询数据表中相应于裂纹特征的字段。可将不同表中的相同字段提取到视图表中以加快数据的检索速度，每次检索只检查视图表即可判断出火车轮的运行状态并对其剩余寿命做出估

计。

Microsoft SQL Server 2000 系统提供了强大的查询和分析工具—查询分析器，但主要是用于离线查询，要实现客户端程序的自动查询还需要编制相应的数据查询程序。

图 6-4 是查询时的关键词选择对话框，通过选择特定的关键词，可以实现对数据库表中的指定字段进行查询。

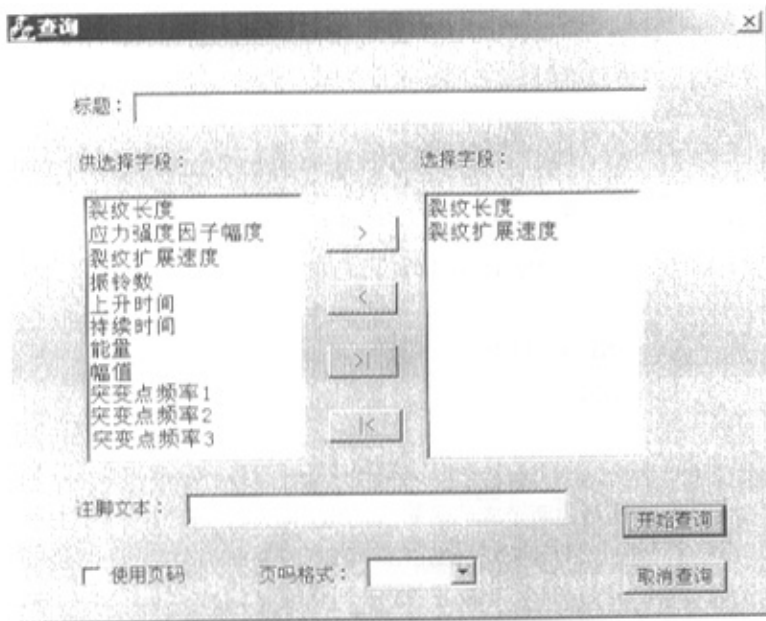


图 6-4 查询字段选择对话框

程序代码中用到了 3 个 ODBC 数据库类，分别是：Cdataqbase 类、CRecordSet 类和 CrecordView 类。Cdataqbase 类用来封装应用程序对一个数据库连接的处理，建立与数据源的连接关系；CRecordSet 类用来封装对数据库的查询，在其对象中创建有各个字段的数据成员；CrecordView 类是从 CFormView 派生出来的类，是一个窗体视图，通过它可以显示从 CrecordSet 对象得到的数据。

在查询过程中可以使用 ODBC 函数进行条件查询，同时还可以对结果数据进

行排序。可以通过 CrecordSet 类完成大多数的查询操作，也可在 CrecordSet 类的 Open（）函数中使用 SQL 语句，还可以通过直接执行 SQL 语句进行查询。

直接执行 SQL 语句的程序代码如下：

```

BOOL CMyDB::ExecuteSQLAndReport(const CString& strSQL)
{
    TRY
    {
        m_pdb->ExecuteSQL(strSQL);//执行 SQL 语句
    }
    CATCH(CDBException,e)
    {
        CString strMsg;
        StrMsg.LoadString(IDS_EXECUTE_SQL_FAILED);
        StrMsg+=strSQL;
        Return FALSE;
    }
    END_CATCH
    return TRUE;
}

```

如果将查询目标设为变量,通过参数传递还可以实现参数化查询。程序中主要用到 CrecordSet 类的两个成员变量：m_strFilter 和 m_strSort。m_strFilter 为过滤字符串，存放着 SQL 语句中 WHERE 后的条件字符串；m_strSort 为过排序字符串，存放着 SQL 语句中 ORDER BY 后的字符串。

查询过程以及查询结果的显示都在 ShowResults（）函数中实现。该函数首先检测 m_pdb 对象的状态，如果该对象处于打开状态，则关闭这个对象。接下来 m_pdb 对象打开 strSQL 所包含的 SQL 语句结果集，并将结果集游标移动到头部。ShowResults()函数需要取得结果集的字信息，作为结果集显示的标题信息，m_pdb 对象的 GetODBCFieldInfo()能够实现这个功能。最后函数读取结果集中的数据，并显示在视图里。实现的程序代码如下：

首先在 CAETestView 类的声明里添加该函数的声明：

```

public:
    BOOL ShowResults(CString strSQL);

```

然后在 CAETestView 类的实现文件里添加该函数的实现代码:

```

BOOL CAETestView::ShowResults(CString strSQL)
{
    CRect rect;
    CListCtrl& ctrlList = (CListCtrl&) GetListCtrl();
    ctrlList.GetWindowRect(rect);
    try{
        BeginWaitCursor();
// 如果结果集已被打开, 则关闭它
        if(m_pdb ->IsOpen())m_pdb ->Close();
// 打开结果集
        m_pdb ->Open(CRecordset::dynaset, strSQL);
        if(!m_pdb ->IsEOF()){
            m_pdb ->MoveLast();
            m_pdb ->MoveFirst();
        }
// 取得结果集的字段个数
        int nFieldCount = m_pdb ->GetODBCFieldCount();
        CODBCFieldInfo fieldinfo;
// 读取字段信息
        for(int n=0;n<nFieldCount;n++){
            m_pdb ->GetODBCFieldInfo(n, fieldinfo);
            int nWidth = ctrlList.GetStringWidth(fieldinfo.m_strName)
ctrlList.InsertColumn(n, fieldinfo.m_strName,
                        LVCFMT_LEFT, nWidth);
        }
// 读取记录信息
        CString strValue;
        m_pCommonRS->MoveFirst();
        int nCount = 0;
        while(!m_pdb ->IsEOF()){
            ctrlList.InsertItem(nCount, strValue);
            for(int j=0;j<nFieldCount;j++){
                m_pdb ->GetFieldValue(j, strValue);
                ctrlList.SetItemText(nCount, j, strValue);
            }
            m_pCommonRS->MoveNext();
            nCount ++;
        }
        EndWaitCursor();
    }
}

```

```
    }  
    catch(CDBException *e){  
        e->ReportError();  
        EndWaitCursor();  
        return FALSE;  
    }  
    return TRUE;  
}
```

6.4 本章小结

各个信号处理单元的处理结果最后都要由上位机进行接收。在上位机的软件设计中采用了中断（事件驱动）方式接收缓冲区中的数据，然后进行分析和处理。接收的数据和处理结果最后都要储存在数据库中。火车轮状态信息的查询是通过在软件中执行 SQL 语句来实现的。要查询的各个字段可以任意选择，查询结果显示在单文档视图中，还可以在后台进行打印操作。

第 7 章 总结

火车轮是火车的关键部件，对于火车轮内部的裂纹进行检测并准确地判断裂纹的位置是铁道运输部门非常关注的问题。本文根据火车轮在线无损检测的特点和要求，对检测系统的功能要素做了深入的研究。

本文所做的主要工作和取得的成果有：

(1) 详细分析了构件内部的微观和宏观损伤对裂纹形成过程的影响，并根据断裂力学理论阐述了裂纹扩展过程所遵循的规律。

(2) 研究了声发射信号产生的内部机理。对塑性变形过程、裂纹的萌生和扩展过程以及冲击过程的声发射特点及其内部成因做了深入的研究。从弹性力学理论的应力、应变关系出发，导出了纵波、横波和瑞利表面波的波动方程。在此基础上讨论了兰姆波的构成及其不同模式的传播特点，并且分析了频散效应形成的原因和特点。

(3) 提出了火车轮在线检测系统的总体结构，并对各个组成部分的做了详细的设计。在信号的传感部分采用了宽带声发射换能器，设计的整个前向通道具有较宽的通频带，具有较高的信噪比，并且设计了 DSP 信号处理系统进行 AE 信号的高速实时处理，处理结果最后通过 CAN 总线送往上位计算机，上位机部分再对信号进行进一步的处理。

(4) 设计了信号处理的流程及算法。由于声发射换能器的输出信号经过硬件滤波后还可能含有大量的噪声信号，而且其频谱可能和噪声信号的频谱重叠，因此 AE 信号在进行 A/D 转换之前要进行自适应噪声对消，然后再进行数字带通滤波以进一步抑制不需要的信号。这样处理后的信号才能看作是真正的声发射信号。在信号的处理中还使用了时频分析工具—小波包分析，将信号在不同尺度上分解，以确定信号在奇异点处的时频信息。信号奇异点处的时频特征和波形的各个参数将作为 BP 神经网络的输入，由神经网络进行非线性映射，最终确定了声发射信号所反应的力学参数—应力强度因子幅度 ΔK 。

(5) 对上位计算机的软件系统做了初步的规划。各个信号处理单元的处理结果由上位机进行接收。在上位机的软件设计中采用了中断方式接收缓冲区中的数据，然后进行神经网络的分析 and 处理。接收的数据和处理结果最后都要储存在数据库中。火车轮状态信息的查询是通过在软件中执行 SQL 语句来实现的。

第 8 章 进一步的研究方向

本文根据声发射的理论和火车轮在线无损检测的要求，提出了适合火车轮在线检测的一种分布式检测系统，但要投入工程应用、解决问题，还需要深入研究以下几个方面的问题：

(1) 高频振动、冲击噪声、摩擦噪声和较高频率的电磁噪声对系统的影响
火车运行过程中，车轮在动载荷的作用下也能够产生在其内部传播的弹性波。这种弹性波穿过内部的几何不连续点时也会发生衍射，引起波型的转换^[60]。摩擦噪声和冲击噪声可能会与 AE 信号处于同一位置，其幅度一般还较大，如何有效地识别这些因素的影响还需要作深入的研究。

一般认为，裂纹的萌生和扩展产生能量的迅速释放，因此，同裂纹有关的 AE 信号频率较高，上升和持续时间都很短。而机械噪声的频率一般较低，且持续时间较长；电磁干扰噪声的频率较高，但其持续时间很短；另外，这两种噪声的幅度分布曲线比较陡，出现的时机也有较大的随意性。对这两类噪声可以通过正确的系统设计，如滤波和噪声抵消加以剔除。可是目前的各种声发射检测系统在复杂背景噪声下进行检测时还需要较多的经验判断。

(2) 多普勒效应的影响

在火车运行过程中，火车轮是运动的，而检测声发射信号的换能器却是固定的，因此系统检测到的声发射信号频率与实际的 AE 信号的频率是有差异的，这种差异再和 AE 信号的色散效应结合在一起就会产生复杂的情况。在信号分析中提取模极大值点对应的频率成分时应考虑多普勒效应的影响。

(3) 波形模式的识别

不同的波形具有不同的特征，但是同一个声发射波经过频散、反射和衰减和亦有可能产生具有不同特征的一系列波，而且这些波往往又叠加在一起，难以区分。信号分析系统应能有效地识别出这类“变异”后的波型，否则不仅会导致源定位误差较大，而且信号处理结果和实际的裂纹大小也会有较大的差异。

参考文献

- [1] 潘建壮,原毅,刘继,陈建龙. 铁道车辆车轮轮辋裂纹检测系统. 上海铁道科技, 1998, (3): 19-21.
- [2] 胥治成. SS6B 型机车轮箍踏面剥离问题初探与防止措施. 西铁科技, 2003(2): 24-25.
- [3] 孙国平,沈志坚. 国外机车车辆走行部件无损检测的现状和发展. 国外机车车辆工艺, 1998(6): 1-5.
- [4] 李辉. 铁道车辆轮轴裂纹检测及计算. 电子科技大学学报, 1993, 22(2): 199-202.
- [5] 徐罗平. 提速列车车轮失效分析. 机车车辆工艺, 2002, 4: 32-34.
- [6] T.M. Roberts, M. Talebzadeh. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003,59(6): 695-712.
- [7] 宋之敏,涂海燕,樊庆文. “过载”在 $da/dn-\Delta K$ 曲线与 ΔK_{th} 降载法测量中的影响及其对策. 机械强度, 2002, 24(1): 89-92.
- [8] Maddox SJ. *Fatigue strength of welded structures*. Cambridge: Abington Publishing, 1991.
- [9] 徐灏主编. 机械设计手册第二版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [10] 王祖荫. 声发射技术基础. 济南: 山东科学技术出版社, 1990.
- [11] 刘国光,程青蟾. 声发射技术及其在金属材料领域的应用. 上海金属, 2001, 23(6): 35-41.
- [12] H.Richter, J.Bohmert, H.-W.Viehrig. The use of acoustic emission to determine characteristic dynamic strength and toughness properties of steel. *Nuclear Engineering and Design*, 1999, 188(2): 241-254.
- [13] Doraiswami Ravi, A.Sethuramiah. Acoustic emission in dynamic compression and its relevance to tribology. *Tribology International*, 1995,28(5):301-306.
- [14] L.Manes,J.M.De Monicault,R.Gras. Monitoring damage by acoustic emission in bearing steels in cryogenic environment. *Tribology International*, 2001,34(4): 247-253.
- [15] 应崇福. 超声学. 北京: 科学出版社, 1990.
- [16] [英]J.西拉德著,陈积懋,余南廷译. 超声检测新技术. 北京: 科学出版社, 1991.
- [17] [美]阿肯巴赫.徐植信,洪如锦. 弹性固体中波的传播. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [18] 耿荣生,沈功田,刘时分. 基于波形分析的声发射信号处理技术. 无损检测, 2002,24(6): 257-261.

- [19] 耿荣生, 沈功田, 刘时分. 模态声发射基本理论. 无损检测, 2002, 24(72): 302-306.
- [20] 张凤林, 韩微, 胡国才, 李子尚. 声发射技术在航空领域的应用研究. 无损检测, 2000, 22(4): 157-161.
- [21] B.R.A.Wood, R.W.Harris. Structural integrity and remnant life evaluation of pressure equipment from acoustic emission. Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(2-3): 125-132.
- [22] M.Shigeishi, S. Colombo, K. J. Broughton, H.Rutledge, A. J. Batchelor, M.C.Forde. Acoustic emission to assess and monitor the integrity of bridges. Construction and Building Materials, 2001, 15(1): 35-49.
- [23] T.T.Broch. Mechanical Vibration and shock Measurement. Bruel & kjaer, 1984.
- [24] 王德俊, 何雪滢. 现代机械强度理论及应用. 北京: 科学出版社, 2003.
- [25] 纪洪广, 张天森, 张志勇, 蔡美峰. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价. 无损检测, 2001, 23(3): 289-291.
- [26] 李路明, 张家骏, 刘英山. 声发射源三角网络定位方法的研究. 无损检测, 1996, 18(8): 213-215.
- [27] M.V.Lysak. Development of the theory of Acoustic Emission by propagating cracks in terms of fracture mechanics. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(3): 443-452.
- [28] Olexaner Ye, Andreykiv, Mykola V.Lysak, Oleh M.Serhiyenko, Valentyn R.Skalsky. Analysis of acoustic emission caused by internal cracks. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(11): 1317-1333.
- [29] Dr.Goranson. Jet Transport Structures Performance Monitoring, Structural Health Monitoring, Current Status and Perspectives, Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, CA, September 18-20, 1997.
- [30] Dr.Michael.Gorman. Acoustic Emission Orientation by Plate Wave Analysis, Journal of Acoustic Emission, 1990, 9.
- [31] 刘松平, Michael Gorman, 陈积懋. 模态声发射检测技术. 无损检测, 2002, 22(1): 38-41.
- [32] Gregory N. Morscher. Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite. Composites Science and Technology, 1999, 59(5): 687-687.
- [33] 陈建萍, 黄崑, 陈积懋. 模态声发射——飞机结构无损检测新方法. 航空制造技术, 2003, (4): 74-77, 91.
- [34] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates

NDT & E International, 1999,32(6): 311-322.

[35] 耿荣生, 沈功田, 刘时分. 模态声发射一声发射信号处理的得力工具. 无损检测, 2002, 24(8): 341-345.

[36] Dunegan HL. Modal analysis of acoustic emission signals. Journal of Acoustic Emission, 1998, 15(1): 1-4.

[37] 张颖等. 模态声发射的噪声剔除技术. 新工艺新技术新设备, 2002, 12: 55-58.

[38] 耿荣生, 景鹏, 雷洪. 飞机主承力构件疲劳裂纹萌生和扩展的声发射评价. 无损检测, 1999, 21(4): 145-148.

[39] 刘松平, Steve Ziola, 刘晶. 疲劳裂纹的模态声发射检测. 无损检测, 2000, 22(3): 122-130.

[40] 曲义坤, 刘志明, 缪龙秀, 袁祖贻, 袁振明. 多疲劳裂纹扩展的声发射特性研究. 无损检测, 1997, 19(4): 102-104.

[41] C.S.Lee, Y.M.Rhyim, D.Kwon, K.Ono. Acoustic Emission Measurement of Fatigue Crack Close. Scripta Metallurgica et Materiala. 1995, 32(5): 701-706.

[42] 时书丽, 赵国兴. 声发射传感器技术与应用. 仪表技术与传感器, 1998, 2: 34-37.

[43] 唐明新, 李原, 袁爱进, 乔毅, 陈晓侠. 现场总线控制系统在牵引电机试验台的应用. 自动化技术与应用, 2002, 21(4).

[44] 饶运涛, 邹继军, 郑勇芸. 现场总线CAN原理与应用技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

[45] 李家林, 马羽宽, 董云朝. 声发射检测中用人工神经网络剔噪的分析与研究. 无损检测, 1999, 21(9): 399-401.

[46] 程佩青. 数字信号处理教程. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[47] 马兴瑞, 陶良, 黄文虎等. 弹性波反演方法及其应用. 北京: 科学出版社, 1999.

[48] 文成林, 周东华. 多尺度估计理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[49] 徐长发, 李国宽. 实用小波方法. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

[50] D.Ravi, K.M.Liew. A study of the effect of microcrack on the vibration mode shape. Engineering Structure, 2000, 22(9): 1097-1102.

[51] Quan Wang, Xiaomin Deng. Damage detection with spatial wavelets. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(23): 3443-3468.

[52] E. Susic, I. Grabec. Application of a Neural Network to the Estimation of Surface Roughness from AE Signals Generated by Friction Process. International Journal of March Tools

- Manufact, 1995,35(8): 1077-1086.
- [53] Hironobu Yuki,Kyoji Homma. Estimation of acoustic emission source waveform of fracture using a neural network. NDT & E Internation, 1996,29(1): 21-25.
- [54] 谢庆生,尹健,罗延科. 机械工程中的神经网络方法. 北京:机械工业出版社,2003.
- [55] (美) Martin.Hagan, Howard B.Demuth, Mark Beale. 神经网络设计. 北京:机械工业出版社,2002.
- [56] 徐春广等,王信义气,肖定国. 材料动态裂纹在线监测的声发射传感新方法. 北京理工大学学报,1994,14(2): 120-124.
- [57] 金钟山,刘时风,耿荣生,沈功田. 曲面和三维结构的声发射源定位方法. 无损检测,2002,24(5): 205-211.
- [58] 沈功田,耿荣生,刘时风,声发射源定位技术. 无损检测,2002,24(3): 114-117,125.
- [59] M.Surgeon,M.Wevers. One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave throoes. Materials Science & Engineering. 1999,265(1-2): 254-261.
- [60][美]鲍亦兴,毛昭宙著,刘殿魁,苏先樾译. 弹性波的衍射与动应力集中. 北京:科学出版社,1993.

在读期间发表的论文

1. 李耀东, 黄成祥, 陆云龙, 侯力. 基于 CAD 模型的自由曲面检测方法. 四川大学学报(工程科学版). 2004, 36(1).
2. 李耀东, 黄成祥, 侯力, 王小龙. 疲劳裂纹的声发射信号检测技术. 计算机测量与控制. 2004, 12(6).
3. 李耀东, 黄成祥, 侯力. 模态声发射技术在构件疲劳裂纹检测中的应用. 振动与冲击. 2005, 24(1).
4. 陆云龙, 黄成祥, 侯力, 李耀东. 曲面测量方法研究. 四川大学学报(工程科学版). 2003, 35(4).
5. 黄成祥, 侯力, 李耀东, 衡小红. 机械产品虚拟设计建模方法的研究. 机电产品开发与创新. 2004, 17(1).
6. 参与编写教材《机电一体化系统设计》(侯力主编, 殷国富主审). 2004.

声 明

本人所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得四川大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本学位论文成果是本人在四川大学读书期间在导师指导下取得的，论文成果归四川大学所有，特此声明。

学位论文作者签名：李耀东

导师签名：苏成华

签字日期：2004年 5 月 10 日

致 谢

本文研究方向的选择、系统的规划是在导师黄成祥教授的悉心指导下完成的。侯力副教授详细审核了论文的细节部分，提出了许多良好的建议和意见。两位老师渊博的学识、严谨的治学态度，求实的工作作风激励着我不断进取。两年来，两位老师在思想和科研工作上给了我极大的关心和帮助，值此论文完成之际，向两位导师表示诚挚的谢意和深深的敬意！

在作者的研究过程中还得到了资阳四三一厂的黄振威工程师、姚兴忠工程师和成铁分局车辆段关小波的支持和帮助，在此向他们表示诚挚的谢意！

在论文写作阶段，邓建清同学、杜寿兵同学、王俊同学、戴培山同学、张永红同学和周自波同学给予了作者较多的支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

非常感谢我的父母亲！在我三年的学习期间，父母亲在生活上一直对我无微不至地关怀，在精神上则鼓励我不断地进取。在此对父母亲表示深深的敬意！

最后，感谢所有帮助过我的老师和同学！

作者：李耀东
学位授予单位：四川大学

相似文献(4条)

1. 期刊论文 王炳炎, 侯力, 牟贇, 孙明明, 郭春华, WANG Bing-yan, HOU Li, MU Yun, SUN Ming-ming, GUO Chun-hua 火车轮裂纹声发射源定位技术研究 -机械2007, 34(2)

针对火车轮运行过程中受变载荷作用产生的裂纹具有的特征,对现有的裂纹声发射定位技术进行了优化,在硬件上采用更适用于车轮运行环境的安装方式,并确定了前向通道的各项参数,根据模态声发射理论,即AE信号在传播过程中具有的频散现象和多模态特性,通过对同一模式波到达各传感器的时差信号的精确分析,采用时差法和面域定位相结合的方法进行源位置的计算,由于采用多种技术进行分析,结果将更为精确。

2. 学位论文 初明 轨道车辆轮轴故障在线检测 2006

轨道机车工作环境恶劣,做为其主要的行走部件轮对与轴承的运行状态,直接影响到机车的运行安全。长期以来,我国铁路一直处于低装备率、高使用率、高强度运输状态。另外,由于国民经济快速发展的需要,我国铁路多次提速,导致火车轮、轴磨损严重、寿命缩短,各类事故显著增加,轨道车辆轮、轴关系到整列车的安全,可见对火车轮实行在线检测是非常必要的。因此开发轨道机车轮轴故障在线无损检测系统将是一项十分必要和紧迫的任务。

本文在分析了声发射信号特征的基础上,概述了声发射检测技术应用与轨道机车轮轴在线检测的一些主要问题。首先,明确了声发射信号是一种含有高背景噪声的非平稳随机信号,为信号检测与处理奠定了基础;其次,根据声发射信号特征,选取了具有时频分析功能的小波变换作为信号处理工具;最后,通过对轨道机车轮轴运行过程的分析,明确了基于声发射技术的轨道车辆轮轴故障检测方法,并且指出了声发射检测在故障预测方面的优势所在——声发射检测可以发现设备的早期裂纹及裂纹增长过程,所以能够预测故障的产生,是故障的行为前检测方法,因此对于其它设备的故障诊断(如振动法)来讲有着完全不同的意义。

本文设计了以DSP+FPGA为架构的轨道车辆轮轴故障在线检测仪硬件结构,整个硬件结构紧密结合了被测对象的某些特点,从减少DSP监控A/D芯片的时间、从声发射信号的不可重复性和快速衰减等特性以及将低层的信号预处理从DSP中分离等方面入手,突出了具有换体FIFO的实时数据采集单元,具有大容量缓冲RAM的准实时数据处理单元的设计,尽可能的提高硬件的运行效率以提高系统的实时性。并简要介绍了声发射传感器选择,以及A/D转换器工作频率的确定、可疑数据的E盘数据存储和其它传感器信号测量等内容。

对淹没在噪声中声发射信号的有效提取(去噪)是声发射信号处理技术的第一步,也是声发射信号处理的关键所在。本文基于以上硬件平台,从小波基选取、小波分解层数确定入手,从试验数据角度详细研究了基于小波分析的多种声发射信号去噪方法:小波分解与重构法去噪、小波变换阈值法去噪、平移不变量法去噪。通过试验数据验证了它们在DSP+FPGA架构下的可行性。

3. 期刊论文 周自波, 黄成祥, 侯力, 李耀东 火车轮裂纹检测传感器的研究 -机电产品开发与创新2004, 17(2)

火车的车轮在高速行驶的过程中,由于受到各方面力的作用,可能会产生裂纹,需要对其进行检测。本文从声发射的机理出发,一步步阐述了一种新型的声发射传感器——火车轮裂纹检测传感器设计的原理,同时给出了其中内置的前置放大器的设计原理及结构图。传感器使用固体材料作为传感器的传播介质,用新型的压电材料作为敏感元件,提高了灵敏度。

4. 学位论文 徐振佩 铁路轮对荧光磁粉探伤缺陷识别系统研究 2007

磁粉探伤是无损检测的一种常规方法,是检验铁磁性材料表面或近表面缺陷的一种常用的手段。荧光磁粉探伤由于其检测灵敏度高,检测工艺简单、可靠,而被广泛采用。本文分析了火车轮对图像的特点,研究了火车轮对表面缺陷的特征,并对缺陷进行了分类。讨论了基于边缘和边缘之间空间结构的分割算法——自适应动态阈值分割法,基于火车轮对表面缺陷的特征分析,对分割后的图像进行了特征提取和缺陷识别,提出了基于梯度和像素空间相关度的伪裂纹的检测方法。最后,针对火车轮对缺陷检测流水线的工作特点,设计了荧光磁粉探伤缺陷识别系统,合理的安排了系统工作流程,使系统的各个模块协调工作,实现了荧光磁粉探伤缺陷识别系统。

引证文献(1条)

1. 温立民 发动机叶片裂纹检测自适应图像处理算法研究[学位论文]硕士 2007

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y654465.aspx

下载时间: 2010年5月27日