

# 基于 JADE 算法的钢轨接头病害 故障检测研究

秦文琪, 尧辉明

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘要:** 论文分析无缝铁路焊接接头对车辆安全行驶的影响; 基于运营车辆的振动响应进行轨道不平顺检测具有效率高, 成本低等优点; 提出将盲源分离算法应用于车辆振动响应信号的分析; 盲源分离算法在对振动响应信号直接进行处理, 无需源信号的先验知识和信道的参数, 降低了轨道接头特征信号提取的难度; 通过对南京至宁启线路的轨道接头不平顺进行现场测试, 并用 matlab 编程对测试结果进行分析; 分析结果表明文章所采用的盲源分离算法能够较好地提取出轨道接头不平顺的特征信息。

**关键词:** 轨面不平顺; 焊接接头; 振动信号; 盲源分离

## Application of JADE Algorithm in Track Rail Joint Irregularity Detection

Qin Wenqi, Yao Huiming

(School of Urban Mass Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** This paper analyzes the seamless railway welded joints' impact on vehicle safe driving. The track irregularity detection based on the vibration response of operating vehicles has the advantages of high efficiency and low cost. The blind source separation algorithm is applied to analyze the vehicle vibration response signals. The blind source separation algorithm directly processes the vibration response signals without the prior knowledge of the source signals and the parameters of the channels, which reduces the difficulty of extracting the characteristic signals of the track joints. Field test was carried out on the track joint irregularity of Nanjing to Ningqi line, and the test results were analyzed by Matlab programming. The analysis results show that the blind source separation algorithm used in this paper can extract the feature information of the track joint irregularity.

**Keywords:** track irregularity; vibration signal; blind source separation; track joint

### 0 引言

随着铁路现代化的建设, 以及高速铁路的不断发展, 无缝铁路成为轨道结构的重要研究对象之一。无缝轨道在具有平稳性良好、提高旅客乘坐舒适度等优点的同时, 也能够节省轨道维护保养经费和延长钢轨使用寿命<sup>[1]</sup>。在无缝铁路焊接接头区域的不平顺程度往往比非接头区域明显得多, 当钢轨的接头处出现不平顺时, 列车行驶过不平顺处会产生强迫振动, 形成外部激励。轨道上单个接头的不平顺相当于给列车加了一个瞬态激励, 列车会产生瞬态振动; 而当轨道上出现多处形成周期性的不平顺的时候, 此时对列车产生的激励可能会引起与列车自身的固有频率接

近的强迫振动, 从而引起车体结构的共振<sup>[2]</sup>。这种动作用力不仅会影响乘客乘坐的舒适性, 更会对列车的各个零件的动力学性能产生影响, 进而影响轨道的几何参数, 形成恶性循环。因此, 需要及时检测出轨道接头不平顺信息, 降低不平顺对于行车安全的影响。

轨道表面损伤的检测主要采用探伤小推车、手持检测装置、钢轨探伤车。目前国内外报道的轨面探伤相关技术有 18 种, 涵盖声、光、电、磁、力、辐射等 6 种物理检测方法<sup>[3]</sup>。利用小推车、手持检测装置等的人工检测方法耗时费力, 且无法动态检测出轨道不平顺状态, 采用轨检车检测效率和精确度大幅提升的同时成本过高。通过铺设传感器检测列车振动响应的方法间接检测钢轨不平顺状态, 设备安装简单, 虽然检测精度不及轨检车但是成本大大降低, 也达到了轨道不平顺的动态检测。史红梅<sup>[4]</sup>提出了一种将神经网络与车辆振动响应相结合的方式检测轨道不平顺, 该方法检测精度较高, 但是算法复杂。目前用于多路振动响应信号处理的方法有主成分分析法和独立分量分析的盲源分离算法, 然而主成分分析法只考虑二阶统计信息, 而包含很多重要信息的高阶统计量并未考虑在内, 本文采用基于独立分量的盲源分离算法, 对采集到的观测信

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2018-10-17。

基金项目: 十三五国家重点研发计划子课题(2016FYC0802500), 上海市科委地方院校能力建设项(15590501400); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(E3-0903-18-01338)。

作者简介: 秦文琪(1991-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事轨道车辆安全预警和故障诊断方向的研究。

尧辉明(1980-), 男, 江西黎川人, 副教授, 主要从事轨道车辆安全预警和故障诊断方向的研究。

号进行线性变化, 从而分离出源信号<sup>[5-6]</sup>。盲信号分离对多路信号直接处理, 无需传输通道参数的先验知识, 提取故障信号的特征信息, 也为轨道接头不平顺故障的检测提供了保障。

## 1 接头故障检测的方法

### 1.1 一般的故障信号分析方法

接头故障诊断能否成功取决于接头故障信号的检测, 目前对于故障信号的检测常采用: 时域分析, 功率谱分析等一系列信号处理的方法。信号的谱分析主要是针对单输入单输出系统, 对于列车轮轨耦合系统这种多输入多输出系统, 由于系统复杂, 在实际采集接头振动信号时, 采集到的信号包含有若干个振动源, 而在分析处理这类信号的时候, 仅仅通过简单的谱分析, 得到的结果并不能将各个振动源分离开来, 处理后的谱仍然是多个信号谱混合之后的结果。此时, 如果存在谐波成分很强的某个频率的时候, 在功率谱中会对附近的谐波成分造成影响, 形成频谱混叠。从多个混合振动信号分析得到的频谱数据中更好的提取出所包含的故障信息, 是一个长期以来久经讨论的问题。在上世纪末期科研人员提出从信号分离的角度深入研究, 盲源分离算法的发展为解决这一问题提供了研究工具和思路。

### 1.2 基于 JADE 的盲源分离方法

#### 1.2.1 盲源分离的数学模型

对于车辆振动响应信号而言, 尽管傅里叶变换分析、时频分析等一些传统的信号处理手段在处理多路信号混合的源信号的故障信号检测领域存在精确性和可靠性欠缺的问题, 但是随着盲源分离算法的发展和在机械故障信号诊断领域的深入, 对于这类多输入多输出的信号系统, 采用盲源分离算法可以将多路源信号分离开来单独进行分析, 降低各路源信号之间的相互干扰, 提高信号分离的准确性, 进一步为接头故障信息的分离和提取提供了一个基础。一定程度上降低了原有的直接处理的方法所带来的故障特征提取的难度。每段钢轨长度相同, 在区域路段钢轨接头出现故障, 钢轨接头所产生的故障振动可以看做是周期性的, 与一般的非周期性振动信号, 例如语音、锤击等相比有较为明显的区别, 在分离周期性故障振动信号时, 盲源分离算法也比较适合。盲信号分离的问题源自“鸡尾酒会”问题, “鸡尾酒会”问题是指, 在一个很多人说话的环境下, 使用多个麦克风采集语音信号, 这些多路的语音信号是多个说话者的声音的混合, 从这些采集到的语音信号中分离出每个说话者的声音。“鸡尾酒会”是盲源分离的一个典型的研究问题, 盲源分离系统的数学模型:

$$x(t) = As(t) + n(t) \quad (1)$$

式中,  $x(t)$  为  $M$  个传感器获得的  $M$  维观测测量,

$$x(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T \quad (2)$$

$s(t)$  为  $N$  个独立源信号。

$$s(t) = [s_1(t), \dots, s_n(t)]^T \quad (3)$$

$n(t)$  为  $M$  维噪声信号。

$$n(t) = [n_1(t), \dots, n_m(t)]^T \quad (4)$$

采用盲源分离的方法来分析信号的问题, 一般描述为: 在多输入多输出系统中测量得到的传感器信号  $x(t)$ , 寻求找到一个逆系统, 从而重构源信号  $s(t)$ 。盲源分离基本原理在于多个源信号输入系统的混合矩阵, 混合信号经由多个传感器检测到得到检测信号, 对检测信号进行盲源分离是为了从检测信号着手, 进而找到盲分离矩阵  $W$ , 对检测信号进行盲分离, 从分离结果中找到包含的故障信息<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.2 JADE 算法分离振动信号

振动信号是故障特征识别的重要信息来源, 通过振动信号来进行故障诊断, 由于振动传感器采集到的信号数据往往由若干个信号混叠在一起, 采用传统的滤波方法, 在滤除噪声的同时也会过滤掉一些有用的特征信息。JADE (Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices) 算法是盲源分离算法的重要组成部分, 是由法国学者 Cardoso 提出的, 也叫做基于四阶积累量的特征矩阵近似联合对角化盲分离算法<sup>[8]</sup>。该算法拥有很高的分离性能, 重要的是分离性能与混合矩阵无关, 可以在不了解输入信息的混杂模式, 先验信息很少或者没有的情形下, 仅凭借着检测信号找到源信息信号。四阶积累量矩阵的定义如下:

$$F_{ij}(\mathbf{P}) = \sum_{h=1}^N \sum_{l=1}^N K_{ijhl}(\hat{x}) p_{hl} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{P}$  为任意的一个  $N \times N$  阶矩阵,  $F_{ij}$  表示在  $N \times N$  的空间中线性变换得到的矩阵,  $p_{hl}$  是矩阵  $\mathbf{P}$  中的第  $h$  行、第  $l$  列的元素, 混合信号  $X$  经过白化处理得到  $\tilde{X}$ ,  $K_{ijhl}(\tilde{X})$  是中的第  $i, j, h, l$  个分量的四阶积累量的线性组合。

定义白化矩阵  $\mathbf{Q}$  和混合矩阵的乘积为矩阵  $\mathbf{U} = \mathbf{Q}\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{U} = [u_1, \dots, u_m, u_N]$ , 式中,  $u_m = [u_{m1}, \dots, u_{mN}]^T$ ,  $m = 1, 2, \dots, N$ 。如果取矩阵  $\mathbf{P}$  满足  $\mathbf{P} = u_m u_m^T$ , 此时四阶积累量矩阵可以表示为:

$$F_{ij}(\mathbf{P}) = \sum_{h,l=1}^N u_{mh} u_{ml} \text{cum}(\tilde{X}_i, \tilde{X}_j, X_h, X_l) = \sum_{h,l,q,r=1}^N u_{mh} u_{ml} \cdot [u_{qi} u_{qj} u_{rl} u_{rl} \text{cum}(S_q, S_q, S_r, S_r)] \quad (6)$$

因为信号源所以当时对应的累积量有非零值, 此时四阶累积量可表示为:

$$F_{ij}(\mathbf{P}) = \sum_{q=1}^N u_{qi} u_{qj} \delta_{mq} \delta_{mq} k_4(s_q) = u_{mi} u_{mj} k_4(s_m) = p_{ij} k_4(s_m) \quad (7)$$

此时矩阵  $\mathbf{P}$  就是  $\mathbf{F}(\mathbf{P})$  的特征矩阵, 源信号的四阶累积量就是特征矩阵的特征值。对矩阵进行特征值分解, 特征矩阵与特征值一一对应, 每个源信号的四阶累积量不同, 其对应的特征矩阵  $\mathbf{P}$  也不相同, 进而  $u_m$  也不相同。混合矩阵可以由  $u_m$  构成的矩阵  $\mathbf{U}$  表示:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{A} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{U} \quad (8)$$

对混合矩阵  $\mathbf{A}$  进行逆运算得到源信号的分离,  $s = \mathbf{A}^{-1}\tilde{\mathbf{X}}$ , 当四阶累积量矩阵  $\mathbf{F}(\mathbf{P})$  的所有特征值都不相同的时候可以实现源信号的分离, 如果不满足特征值各异, 则无法进行分离。JADE 算法解决了这一问题。因为  $\mathbf{F}(\mathbf{P})$  是对称矩阵,  $\mathbf{P} = u_m u_m^T$  是其特征矩阵,  $\mathbf{F}(\mathbf{P})$  可以表示为  $\mathbf{U}\mathbf{\Lambda}(\mathbf{P})\mathbf{U}^T$  的形式:

$$\mathbf{\Lambda}(\mathbf{P}) = \text{diag}(k_4(s_1)u_1\mathbf{P}u_1^T, \dots, k_4(s_N)u_N\mathbf{P}u_N^T) \quad (9)$$

通过矩阵  $\mathbf{U}$  对  $\mathbf{F}(\mathbf{P})$  进行变换得到对角阵, 利用对角化特性可以找到矩阵  $\mathbf{U}$ 。定义一个目标函数:

$$J_{\text{JADE}}(\mathbf{U}) = \sum_{i=1}^K \|\text{diag}(\mathbf{U}^T\mathbf{F}(\mathbf{P}_i)\mathbf{U})\|^2 \quad (10)$$

式中,  $\|\text{diag}(\mathbf{U}^T\mathbf{F}(\mathbf{P}_i)\mathbf{U})\|^2$  为对角矩阵  $\mathbf{\Lambda}(\mathbf{P})$  的对角元素的平方和, 在对角化过程中这个值是不会改变的, 极大化目标函数就可以找到理想的矩阵  $\mathbf{U}$ , 从而可以对源信号进行分离, 估计分离矩阵为  $\mathbf{W}=\mathbf{U}^T\mathbf{Q}$ , 因而源信号的估计为  $y(t) = \mathbf{W}x(t)$  [9]。

## 2 轨道接头不平顺信号的采集

由动力学理论可知, 轨道不平顺信息经过钢轮、构架向车体传递, 因而可以从列车的构架、车体等振动数据中反向得到轨道的不平顺信息。振动信号夹带着大量的运行状态信息, 振动信号的特征值和故障信息密不可分, 通过对车体振动数据的收集、结果处理、分析来对不平顺信息进行监测和诊断。在南京至南通的启宁线路段, 和谐号 CRH2 型列车的司机明显能够感受到列车进入启宁线后有多次‘异响’振动, 该振动在司机室较大, 但在旅客列车车厢基本很难感受到。为了获取完整的‘异响’振动的实测数据, 分析成因, 本实验在和谐号 CRH2 型列车车头司机室的前部, 垂向位置位于前转向架的正上方设置测点。为了获得振动数据, 多次在南京至南通区段进行了测量, 图 1 所示为测点在 CRH2 司机室地板上放置的位置。

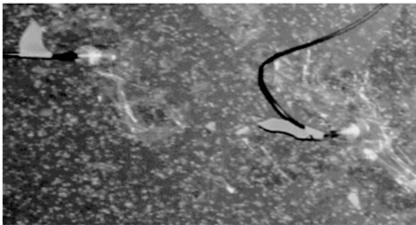


图 1 放置在地板上的传感器

在测点处放置振动加速度传感器, 采用朗斯贴片式振动加速度传感器来对车头部位的垂向振动进行检测, 传感器具体参数见表 1。在具体实验采集数据时, 数据是在 K88-K89 间的一个区段采集的, 测量时列车速度在 90~120 km/h 左右, 数据采样频率 10 240 Hz, 连续采样 22.6 s, 数据长度为 231424。三处测点位置振动信息的时域记录曲线

如图 2 所示。三路原始观测信号都包含有接头故障信息, 观察原始信号的时域图, 发现故障信息混杂, 并无明显的特征, 需要进一步对数据进行处理分析。

表 1 振动加速度传感器的主要参数

传感器名称	灵敏度	量程	安装谐振点	分辨率
LC0106(T)	1000mV/g	5g	6kHz	0.00002g

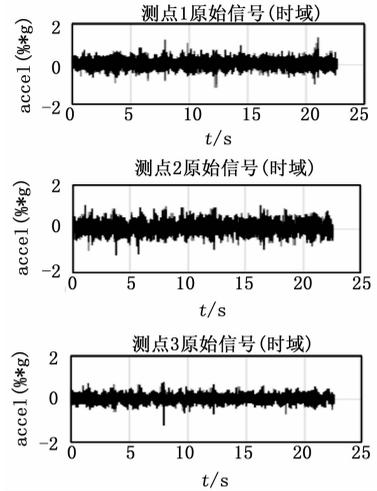


图 2 3 路观测信号的时域记录曲线

## 3 不平顺信息的分离与分析

多个包含接头故障信息的源信号经过多输入多输出系统, 由多路振动加速度传感器采集到成为观测信号。直接对观测信号进行时频分析, 由于频谱混叠, 包含的故障信息无法准确的分离出来。为了使分离后的各个源信号之间相互独立, 采用四阶累积量作为独立性约束准则的 JADE 算法来进行分离。分离步骤如下:

- 1) 将三路观测信号  $x(t)$  做预白化处理, 求出白化矩阵  $\mathbf{Q}$ ;
- 2) 得到白化后的观测信号, 并计算这个信号的四阶累积矩阵;
- 3) 为了各个  $\mathbf{F}(\mathbf{P}_i)$ , 找到使目标函数取得极值的得矩阵  $\mathbf{U}$ , 从而源信号的估计分离矩阵为  $\mathbf{W}=\mathbf{U}^T\mathbf{Q}$ ;
- 4) 源信号的估计  $y(t) = \mathbf{W}x(t)$ 。

分离后得到 3 个特征比较明显的独立分量, 计算过程中表现出算法较好的收敛性和分离性能。

根据分离后得到的时域图 (图 3) 可以看出, 从观测信号中分离出了 3 个独立的源信号, 图 3 的源信号 c 图很好地显示出钢轨接头不平顺产生的激励成周期出现。与图 2 观测信号的时域图做对比, 观测信号各分量的时域特征模糊不清, 而分离后源信号的独立分量之间的混叠得到减小, 时域特征清晰。

对分离出的源信号进行进一步分析, 尖峰的位置呈周

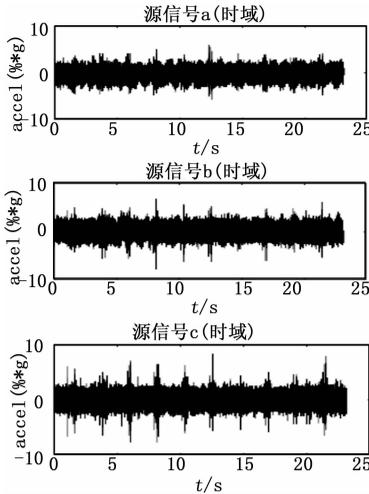


图3 分离后各个源信号的时域图

周期性出现, 周期大约为 2 s, 根据当时的车速计算出每次间隔的行程为 100 m, 一般钢轨的长度 100 m, 表明尖峰位置与轨道接头在钢轨表面的空间位置比较吻合, 所以可以初步认为振动数据出现周期性波动是钢轨接头周期性振动所导致的。图 4 是分离出的独立分量的部分尖峰区域的细化和谱分析。

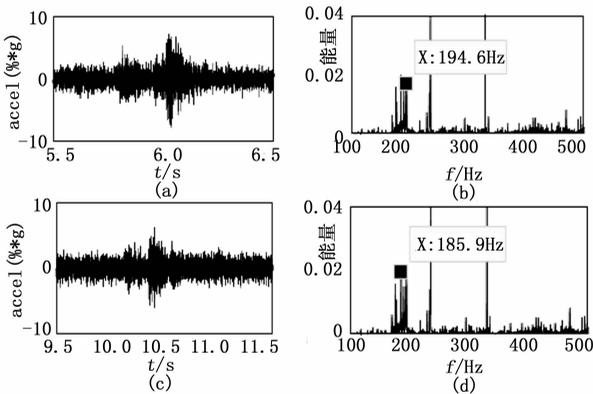


图4 部分尖峰区域细化和谱分析

图 4 中, (a) 图为 5.5~6.5 s 尖峰区域源信号的细化; (b) 图为 5.5~6.5 s 尖峰区域源信号对应的频谱分析; (c) 图 9.5~11.5 s 尖峰区域源信号的细化; (d) 图为 9.5~11.5 s 尖峰区域源信号对应的频谱分析。可见振动的主要频率成分在 150~200 Hz, 当列车行驶过钢轨接头区域时, 由于钢轨接头不平顺引起车头部位结构的共振, 则表明车钩结构共振的频率在 150~200 Hz, 确定了引起‘异响’振动的钢轨接头不平顺的分布区域。盲源分离不可能实现源信号的完全恢复, 分离算法可以将源信号分离, 但是不能知道它们的排列顺序以及分离出的源信号的幅值存在不确定性<sup>[10]</sup>。

#### 4 结束语

本文尝试从车辆动态响应中间接识别出轨面的廓形特

征。而在多种轨面廓形特征相互叠加的情况下, 想要分离出具体的轨面特征难度极大, 因此选取最具代表性的钢轨焊接接头的轨面特征。运用 JADE 盲源分离算法对 CRH2 车头振动实测信号进行了处理, 得到 3 个主要的源信号分量。并发现通过分离可以看出能够将钢轨接头的特征较好地分离出来。分离实验和结果表明: 对于钢轨接头不平顺这种周期性的振动信号, JADE 算法具有较好的分离效果, 达到将车辆振动响应信号中的接头故障的特征信息较好地提取出来的目的, 也降低了直接分析车辆振动响应信号所带来的误差, 提高了故障信息的识别度, 简化了故障信息提取的难度。但也存在一定的问题, 即源信号独立分量与混合信号独立分量间的顺序并不是一一对应的, 且源信号的振幅与混合信号的振幅并不相同, 但波形相似, 信号的特征并未受到影响, JADE 算法是一种离线算法, 不具备实时性, 通过对采集到的数据进行批处理, 最后对处理后的数据进行单独分析, 虽然有较快的收敛性, 但是无法实现在采集数据的同时对故障信息进行提取。如果在得到源信号的某些先验知识前提下, 源信号的分离效果会更加显著, 或者采用其他的自适应盲源分离算法, 可实现接头故障信息在检测过程中的同步提取, 是接下来需要研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] 周世恒, 刘拥军. 钢轨焊接接头平直度研究 [J]. 电焊机, 2010, 40 (12): 11-14.
- [2] 徐磊, 陈宪麦, 张晴, 等. 基于不平顺谱的轨道不平顺状态评价与识别探讨 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2012, 25 (3): 62-67.
- [3] 许文达. 基于机器视觉的钢轨表面缺陷识别研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 史红梅. 基于车辆动态响应的轨道不平顺智能感知算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [5] 柴晓冬, 尧辉明, 柴靛. 采用基于独立分量分析的盲信号分离方法分离出 FSK 信号中的干扰信号 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30 (4): 96-101.
- [6] 孙继堂. 基于高阶累积量的盲源分离的理论研究及其在旋转机械中的应用 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.
- [7] 王晓伟, 石林锁. 盲源分离在振动机械故障诊断中的应用 [J]. 电子测量技术, 2008 (3): 138-140.
- [8] 骆鹿, 王庆. JADE 算法在盲信号分离中的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2010 (4): 25-26.
- [9] 李舜韶. 振动信号的盲源分离技术及应用 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [10] Tong L, Liu R, Soon V C, et al. Indeterminacy and identifiability of blind identification [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38 (5): 499-509.