DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.018

# 基于电机振动的动车组牵引逆变器故障诊断研究

施以旋[1,2]，毛庆洲[1]，戴焕云[2]，汪群生[2]，施翔宇[3]
（1.武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430070；
2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；
3.武汉大学 资源与环境科学学院，湖北 武汉 430070）

**摘　要：**牵引逆变器的安全性和可靠性对高速动车组车辆的稳定运行至关重要，为了对逆变器工作状态进行识别，文章结合车辆系统动力学，提出了一种基于电机振动信号分析的故障诊断方法。将电机振动信号作为监测对象，通过检测逆变器故障时电流畸变引起电机异常振动的特征信号来进行判断。以CRH2型动车组牵引传动系统为例，建立了基于空间矢量脉宽调制策略下的三电平牵引逆变器电路仿真模型，对逆变器结构故障模式进行仿真。仿真结果表明，逆变器故障会显著影响交流侧输出电流谐波含量，尤其是5倍频、7倍频、11倍频、13倍频电流谐波；而这些谐波电流输入到牵引电机后转化为$6P(1-s)$倍频、$12P(1-s)$倍频的脉动转矩，并作用于电机，使得其输出振动中含有相应频率的谐波成分。通过对高速动车组实际运行过程中的牵引电机振动信号进行分析可发现，在正常情况下振动信号不明显含有此类谐波频率成分，而当逆变器存在故障时，则会导致在振动信号中该频率信号含量非常明显。因此，文章所提出的基于振动信号分析法能够有效地监测并诊断牵引逆变器工作状态，并具有一定的工程应用价值。

**关键词：**高速动车组；牵引逆变器；电机振动；电流谐波；故障诊断；仿真

**中图分类号：**U266.2；U269.32+2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）02-0151-07

## 0　引言

轨道交通技术的发展不仅表现在车辆的运营速度、动力学性能的提高上，而且系统结构也越来越复杂、精细，这必然会增加系统故障的可能性，因此如何保证车辆运行安全就成了一个不可避免的重要难题。在高速动车组结构中牵引传动系统是极为复杂关键的，影响着车辆的运行状态，决定着各种性能[1]。牵引传动系统主要是完成电能的转换，包括幅值、频率等参数，通过控制和调节牵引逆变器输出的电压和电流，对牵引电机的电磁转矩和旋转速度进行控制，进而实现车辆的牵引、匀速运动和制动等工况。其中，牵引逆变器是交流传动系统中的关键设备，其主要功能是将直流电转换成三相交流电，并输送给交流电机，其工作状态直接关系着车辆的行驶性能，对其进行监测并做出相应的故障诊断必不可少。

轨道交通车辆的故障诊断技术主要是通过对系统中故障对象进行实时监测，在故障发生时进行状态判断，并提出解决方法，及时避免故障的发生与扩大。牵引逆变器故障是指逆变器的输出状态发生较大变化，超出正常工作的允许范围。据统计，轨道交通车辆牵引传动系统主电路失效的原因多为电力电子器件故障，对于三电平牵引逆变器而言，电路结构中的功率开关元件是牵引传动系统的薄弱环节[2]。功率开关元件发生短路与断路是常见的逆变器故障形式。当功率开关元件发生断路故障时，逆变器变流系统仍然能运行，只是该故障使牵引系统处在异常工作状态下，导致交流

**基金项目：**国家自然科学基金（U2268211，52102441）；中国博士后科学基金（2023TQ0253）
**通信作者：**施以旋，男，博士，从事车辆系统动力学、车辆故障诊断研究；E-mail: shiyixuan@my.swjtu.edu.cn
**引用格式：**施以旋, 毛庆洲, 戴焕云, 等. 基于电机振动的动车组牵引逆变器故障诊断研究[J]. 机车电传动, 2024(2): 151-157.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.018.
Citation：SHI Yixuan, MAO Qingzhou, DAI Huanyun, et al. Research on fault diagnosis of EMU traction inverter based on motor vibration[J]. Electric drive for locomotives,2024(2): 151-157.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.018.

侧输出电流波形畸变、直流侧电压不平衡，如未及时处理，会对牵引系统产生影响，甚至损坏车辆；而对于功率开关元件的短路故障，短路故障如未能得到及时处理，最终会转变为断路故障[3]。通过对牵引传动系统电路结构分析可以看出，逆变器发生断路故障不会导致过流状况的发生，因此不易被检测出，但是断路故障会导致逆变器不能输出相应的电压，最终导致交流侧输出的电流和电压在幅值和谐波上有较大变化[4]。目前，逆变器故障诊断目标主要集中在逆变器故障时电流和电压的变化上，通过对电压和电流信号提取故障特征来实现逆变器故障诊断。文献[5]通过提取逆变器输出的电流和电压，提出了一种基于贝叶斯网络的牵引逆变器开路故障多特征融合诊断方法。文献[6]结合共模电压分析，提出了基于鲁棒性开路开关定位的逆变器故障诊断方法。文献[7]通过零电压矢量重构三相电流作为故障特征量对逆变器进行故障诊断。文献[8]以逆变器故障输出的相电流相角的异变进行故障判定。文献[9]提出了一种基于三维坐标识别的逆变器开路故障诊断方法。文献[10]针对动车组牵引逆变器提出了一种基于小波包熵与双重优化神经网络的牵引逆变器开路故障诊断方法。文献[11]提出了一种基于相电流轨迹的逆变器开路故障诊断方法。文献[12]提出振动信号用于变流器故障诊断的可行性，通过理论分析，论证电流与发电机结构动态响应之间的关联关系和基于振动信号的故障诊断定位规律。文献[13]基于小波包变换的振动信号故障特征提取方法，将信号特征转化为数值特征，为电力系统变压器中出现的机械故障诊断提供了工具方法。文献[14]针对机电设备振动信号故障诊断问题，提出了基于频带方差的小波包分解与参数优化的支持向量机的故障诊断算法。

对于高速动车组车辆，牵引逆变器负载范围变化较大，直接对其进行实时故障诊断是很难达到的，基于系统控制信号的诊断故障方法不利于工程实践，但可以通过监测其输出的特征信号来实现，其中交流侧输出电流是较为理想的目标[15]。牵引逆变器与牵引电机通过电流联系在一起，逆变器输出电流信号变化会导致负载电机产生异常振动，在车辆运行中对电机振动信号实时监测简单易行，因而可以通过监测电机振动信号来实现对牵引逆变器进行故障诊断。

## 1 电机电磁振动分析

轨道车辆牵引电机内部从能量转换的角度出发可分为电气环节、磁耦合环节和机械环节3个部分，主要振动有基波磁通产生的电磁振动、高频磁通产生的槽振动和扭转振动产生的弯曲振动，其中基波磁通频率为电源频率2倍[16]。当电气环节输入电流发生变化时，电机磁耦合环节和机械环节也会发生相应的变化，产生异常的电磁振动，最终影响电机的振动输出。

当电机工作时，磁场沿转子周围的内部气隙呈正弦函数分布，其数学表达为

$$B = B_0 \sin(\theta P - \omega t) \tag{1}$$

式中：$B_0$, $B$ 分别为相应的磁通密度；$P$ 为电机磁极对数；$\theta$ 为初始相位角；$\omega$ 为转子角速度。

磁通密度 $B$ 与其产生的电磁作用力 $F$ 的关系为

$$F = \frac{B_0^2}{2\mu_0}\{1 - \cos[2(\theta P - \omega t)]\} \tag{2}$$

由式(2)可见，在电磁作用下电磁力频率为电源频率的2倍，并在电机内部呈正弦分布，随时间以角速度 $\omega$ 旋转，如图1所示，其中 $D$ 为回转直径。

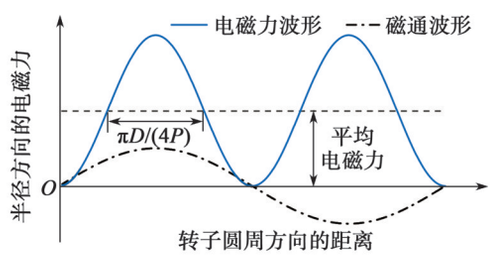



图1 基波电磁力分布

Fig. 1 Fundamental electromagnetic force distribution

当电机工作时，定子与转子产生的2个磁场相互作用，由于磁场作用，会对定子产生1个作用力，同时该作用力会传递到电机机座，使之表现为周期性的自振[17]。若此时电气环节输入电流的频率为 $f_0$，则电机定子三相绕组产生的旋转磁场转速为 $n_0 = 60f_0/P$，即同步转速。由此可知，作用在电机机座上的电磁力会随着转子的旋转而转动，电磁力的频率与磁场频率存在2倍关系，即 $2f_0$。输入的电源信号影响电机的电磁转换，使电机产生自振，由旋转磁场的转速可知，当电磁力旋转1周，电磁力交变 $P$ 次，因此电机振动频率为 $2Pf_0$。当牵引传动系统中逆变器故障导致交流侧输出电流频率变化时，电机输入电流含有的谐波成分会通过电磁作用产生的电磁力（或电磁转矩）影响电机振动[18]。当电机输入电流包含 $M$ 种谐波电流时，在电磁作用下与基波耦合，产生 $M$–1个电磁力，其中幅值较大、含量较高的谐波电磁转矩，主要有5次、7次、11次、13次谐波电流对应产生的电磁转矩。基波磁场与输入电流产生的5次、7次谐波磁场相互作用，从而导致脉动转矩频率为基波频率的6倍，而与11次、13次谐波磁场相互作用所产生的脉动转矩频率为基波频率的12倍，是电机振动的组成部分。

电机输出转速 $n$ 与同步转速 $n_0$ 存在着一定的转差率 $s$，其转差率 $s$ 为

$$s = (n_0 - n)/n_0 \tag{3}$$

电机输出转速 $n$ 为

$$n = (1 - s)n_0 \tag{4}$$

电机实际输出频率 $f$ 为

$$f=2P(1-s)f_0 \tag{5}$$

当转差率$s$<10%时，电机输入电流中的5次、7次谐波和11次、13次谐波经电磁作用产生的6倍频和12倍频脉动转矩作用在电机上，使得电机的振动频率包含电流基频的$6P(1-s)$倍频和$12P(1-s)$倍频成分，其值由磁极对数$P$和转差率$s$决定。

## 2　牵引逆变器模型建立及仿真

### 2.1　建立仿真模型

三电平逆变器在高速动车组交流传动系统中运用较广泛，在减少输出信号中谐波含量方面有很好的效果，提高了系统的可靠性，但是由于结构中使用了较多的功率开关元件，增加了发生故障的概率[19]。图2为中点箝位型（Neutral Point Clamped，NPC）三电平牵引逆变器拓扑，表1和表2分别为牵引逆变器和三相异步交流电机的基本参数。基于牵引逆变系统电路拓扑结构，运用MATLAB/Simulink模块进行建模，分别为三电平牵引逆变器结构仿真模型、三相异步牵引交流电机模型和逆变系统主电路及空间矢量脉宽调制策略（Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM）控制电路仿真模型[20]。

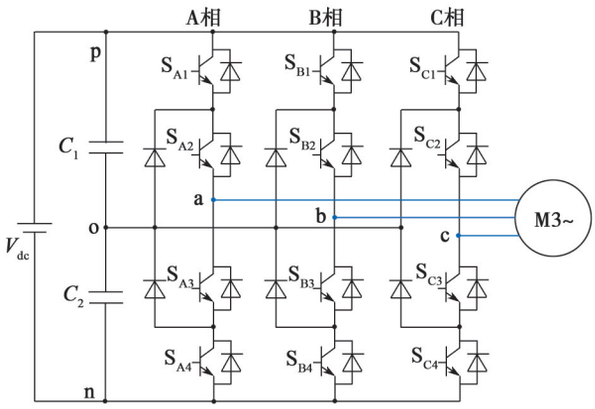



图2　三电平牵引逆变器主电路拓扑结构

Fig. 2　Main circuit topology of three-level traction inverter

表1　牵引逆变器主电路参数

Table 1　Main circuit parameters of traction inverter

| 参数名称 | 参数值 |
|---|---|
| 电压/V | 0~2 800 |
| 输出频率/Hz | 0~200 |
| 最大开关频率/Hz | 1 000 |
| 功率开关元件电压/kV | 3.3 |
| 功率开关元件电流/A | 1 200 |

表2　牵引电机基本参数

Table 2　Basic parameters of traction motor

| 参数名称 | 参数值 | 参数名称 | 参数值 |
|---|---|---|---|
| 额定输出功率$P_N$/kW | 300 | 额定效率$\eta$/% | 94 |
| 额定线电压$U_N$/V | 2 000 | 最高转速$n_m$/(r·min$^{-1}$) | 6 120 |
| 额定电流$I_N$/A | 106 | 磁极对数$P$ | 2 |
| 额定转速$n_N$/(r·min$^{-1}$) | 4 140 | 定子电阻$R_s$/Ω | 0.144 |
| 额定频率$f_N$/Hz | 140 | 定子自感$L_s$/mH | 1.417 |
| 额定转差率$s_N$ | 0.014 | 转子电阻$R_r$/Ω | 0.816 |
| 功率因数cos$\varphi$ | 0.87 | 转子自感$L_r$/mH | 1.294 |

在对三电平牵引逆变器进行SVPWM控制仿真的过程中，采用开环控制，并按照实际参数进行设置，在牵引逆变器输入端接入幅值为2 000 V、频率为50 Hz的交流电压源，设置SVPWM开关周期为0.001 s；为了使仿真结果更加真实有效，具有一般性，仿真时设置电机空载工作，即在三相异步牵引电机模型中，将电机负载转矩$T_L$设置为0；设置调制深度$k$=0.8；采用幅值1 000 V、频率50 Hz的三相电压作为辅助电源，为七段式SVPWM控制输入给定值。

通过模型仿真计算，可以得到牵引逆变器交流侧负载端电流仿真波形，如图3所示。由图3可知，输出波形基本满足正弦波形的要求，对其进行快速傅里叶变换（FFT）分析其负载电流的总谐波失真（THD），分析结果如图4所示。由图4可知，THD为7.68%，小于并网要求的10%，其中主要谐波成分为5次、7次、11次、13次谐波，含量均较小，最高的5倍频谐波含量也只有1.33%，符合实际情况，仿真模型具有一定的可靠性。

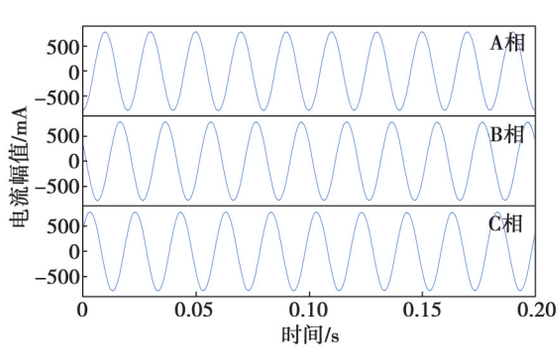



图3　交流侧牵引电机定子三相电流仿真波形

Fig. 3　Simulation waveform of three-phase current for stator of traction motor on AC side

### 2.2　故障工况仿真分析

在实际运用中，牵引逆变器发生故障一般是由功率开关元件失效造成的，而箝位二极管和续流二极管相对于功率开关元件具有较高的可靠性，故在建模时

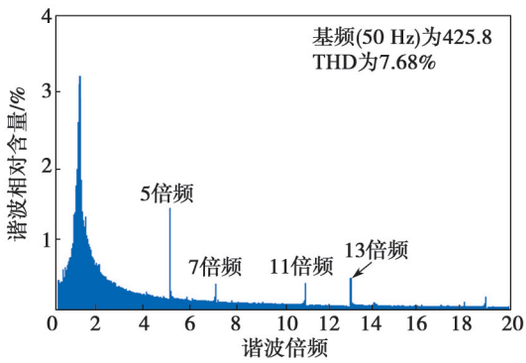



图4 交流侧牵引电机定子三相电流FFT分析

Fig. 4 FFT analysis of three-phase current for stator of traction motor on AC side

可以忽略这2种二极管发生故障的概率，仅考虑功率开关元件发生故障进行仿真分析[18-19]。由于三电平逆变器含有3个完全相同的桥臂，结合逆变器在实际工作状态下发生故障的模式，以及同一逆变器上出现多个（大于2个）功率开关元件发生故障的可能性相对较小，因此仿真时只需要考虑同一逆变器上有1个或2个功率开关元件发生故障的模式。

逆变器在结构上具有对称性，此处以A相或AB两相桥臂为例，其他各相桥臂之间的组合与此相同，则可以将主电路故障分为以下几类：①1个功率开关元件发生故障，共有2种模式；同一桥臂上2个功率开关元件发生故障，共有4种模式；②不同桥臂上2个功率开关元件发生故障，共有6种模式。开关元件发生短路故障最终会发展成断路故障，仿真过程中对各种故障模式的功率开关元件均进行断路处理。

图5为功率开关器件$S_{A1}$发生故障时逆变器交流侧输出电流波形。由图5可知，逆变器输出电流在幅值和波形上都有很大变化，不再是标准的正弦波。通过对输出电流信号进行FFT分析可知，三相电流THD分别为22.15%、9.73%、10.07%，故障桥臂A相电流THD最大，其中5倍频、7倍频谐波含量分别为2.49%、2.07%。同样，对其他故障模式进行对应的仿真分析，其谐波含量和总谐波失真如表3所示。对表3分析可知，在逆变器发生故障状态下，交流侧输出电流的波形和谐波含量均有不同程度的变化，并且对输出电流

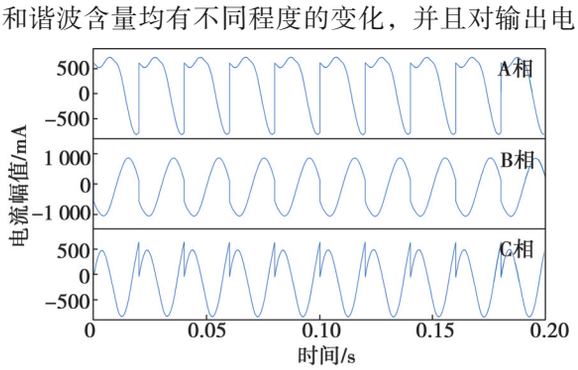



图5 功率开关器件$S_{A1}$故障交流侧电流仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of AC side current with $S_{A1}$ fault in power switching device

表3 逆变器故障模式下电流谐波含量

Table 3 Current harmonic content under inverter fault mode %

| 逆变器故障模式 | 电流谐波含量 | | | | THD |
|---|---|---|---|---|---|
| | 5次 | 7次 | 11次 | 13次 | |
| $S_{A1}$ | 2.49 | 2.07 | | | 22.15 |
| $S_{A2}$ | 11.50 | 9.60 | | | 55.36 |
| $S_{A1_A2}$ | 11.50 | 9.60 | | | 55.36 |
| $S_{A1_A3}$ | 4.48 | 3.33 | | | 66.95 |
| $S_{A1_A4}$ | 2.85 | 3.01 | | | 23.05 |
| $S_{A2_A3}$ | | | | | A相断开 |
| $S_{A1_B1}$ | 4.07 | 3.91 | | | 28.03 |
| $S_{A1_B2}$ | 10.60 | 3.39 | | | 50.15 |
| $S_{A1_B3}$ | 13.29 | 7.79 | | | 45.03 |
| $S_{A1_B4}$ | 8.44 | 6.94 | | | 29.03 |
| $S_{A2_B2}$ | 17.25 | 12.94 | 9.97 | 8.57 | 75.43 |
| $S_{A2_B3}$ | 20.15 | 16.85 | 14.13 | 12.08 | 61.08 |

谐波的影响主要集中在5倍频、7倍频、11倍频、13倍频各谐波上，各阶次的电流谐波含量远大于正常工况下的最大值1.33%，电流THD也均远大于并网要求的10%。由此可见，不同状态的逆变器故障都会使得输出电流产生5次、7次、11次、13次谐波，在电机中经电磁作用产生6倍频和12倍频的脉动转矩，使振动频率含有电流基频的$6P(1-s)$和$12P(1-s)$倍频成分。

## 3 线路试验验证

由于牵引逆变器发生故障会使输入到牵引电机的电流含有谐波成分，通过电磁作用转换成电磁转矩作用在电机上，使得电机振动含该谐波对应的特征频率，因而可以通过对电机振动信号进行监测，来确定对应牵引逆变器的故障状态。为此，对高速动车组进行动力学线路试验[20-22]，选取车辆电机作为监测对象，布置加速度传感器，如图6所示，分别对牵引逆变器处于正常状态和故障状态时的振动信号进行采集分析。

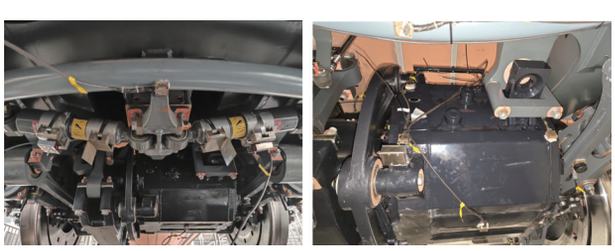
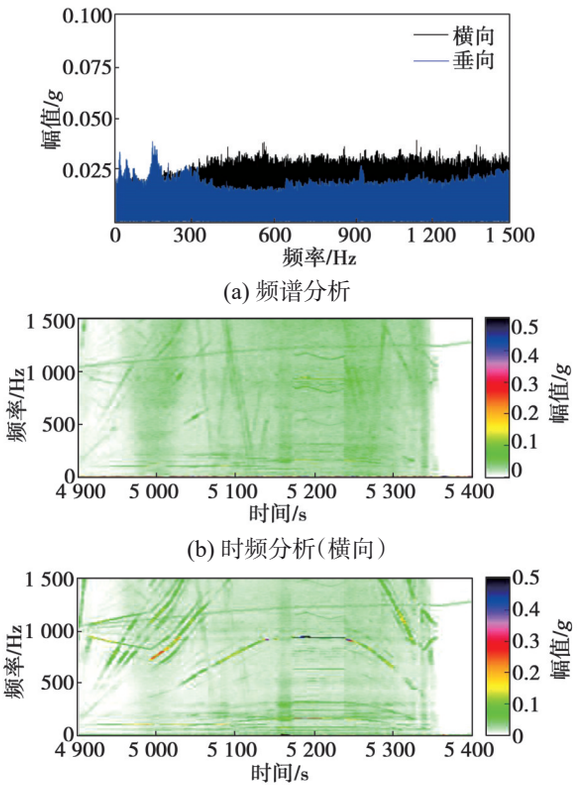


图6 电机振动加速度测点

Fig. 6 Acceleration measurement point for motor vibration

图7为牵引逆变器正常状态下动车组电机远联轴器端振动的频域图和时频图，振动分析信号包括垂向信号和横向信号，车辆运行速度为270 km/h，车轮转频为26.1 Hz，电机转频为65.7 Hz，磁极对数$P$为2。由图7可以看出，电机远联轴器端横向和垂向的振动输出频率幅值均较低，都在0.005$g$以下，不含有明显

的12(1–$s$)和24(1–$s$)倍频成分，以及附近的频率成分。




(a) 频谱分析

(b) 时频分析(横向)

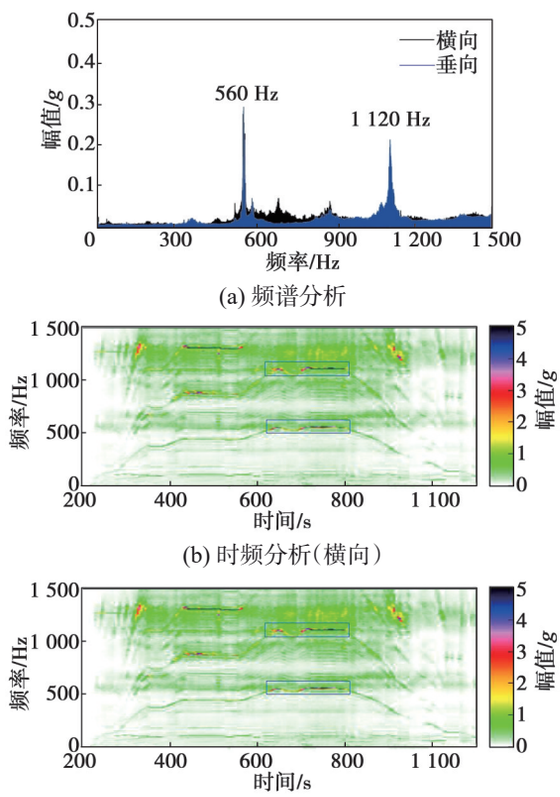
(c) 时频分析(垂向)

图7　逆变器正常状态下电机振动加速度分析结果

Fig. 7　Analysis results of motor vibration acceleration under normal inverter condition

逆变器发生故障状态下动车组电机横向和垂向振动的频谱分析和时频分析结果如图8所示。此时的车辆运行速度为280 km/h，车轮转频为27.42 Hz，电机转频为69 Hz，电机磁极对数$P$为2。由图8可知，电机振动存在明显的560 Hz和1 120 Hz附近的振动峰值，幅值接近0.3$g$；同样，在时频分析结果中也可以看出这2个振动频率附近的含量很明显，分别对应着电机振动输出基波的12(1–$s$)和24(1–$s$)倍频，这与前文分析结论一致。在电机振动加速度的时频分析中，振动除了来自电机本体的电磁振动外，还有来自轮对、车体的振动，以及需要提及的线路对振动的影响。轮对、车体的振动确实会对电机振动产生影响，但轮对和轨道之间相互作用频率主要集中在20~1 500 Hz内[23-26]，该频率范围内的轮轨振动会因为一系悬挂的隔振作用很难向转向架构架和车体上传递；车体的自振频率较低，一般在30 Hz以下，其他共振频率范围虽然较大，但能量较低，因而轮对和车体对电机振动的影响有限，不会在电机振动中形成明显的频率峰值。同时，根据电机振动频谱分析可知，逆变器发生故障状态下产生的异常振动峰值的频率较高，而且存在倍频关系，这与车体、线路等引起的异常振动不符，因而可以认定该状态下的电机异常振动是由牵引逆变器发生故障引起的。

综上所述，在牵引逆变器主电路发生功率开关元件故障状态下，交流侧输出电流含有谐波，谐波电流主要成分为5次、7次、11次、13次谐波电流，谐波电流作用在电机上，导致电机输出的振动频率中含有6$P$(1–$s$) 倍频和12$P$(1–$s$)倍频，从而会引起电机异常振动。因此，可以通过对牵引电机振动信号的检测实现对牵引逆变器工作状态的监测，达到牵引逆变器故障诊断的目的。




(a) 频谱分析

(b) 时频分析(横向)

(c) 时频分析(垂向)

图8　逆变器故障状态下电机振动加速度分析结果

Fig. 8　Analysis results of motor vibration acceleration under inverter fault condition

## 4　结论

本文通过建立高速动车组逆变器电路模型进行了故障仿真分析，结合线路试验验证提出了基于电机振动信号分析的故障诊断方法，可以得出以下结论：

①牵引逆变器主电路发生功率开关元件故障会导致交流侧输出电流异常，使输出电流中的5倍频、7倍频、11倍频、13倍频谐波含量大幅增加，THD显著增大。

②谐波电流输入到牵引电机后，其中的5倍频、7倍频和11倍频、13倍频谐波经过电磁作用分别转变成6倍频和12倍频脉动转矩，并作用在电机上，使得电机输出振动频率中含有6$P$(1–$s$) 倍频和12$P$(1–$s$)倍频。

③对高速动车组实际运行中牵引电机的振动信号进行分析，结果表明逆变器故障模式下电机振动频率含有明显的电流谐波频率。

④在高速动车组运行过程中，可以通过对电机振动信号特征值监测分析实现对牵引逆变器状态故障诊断。

## 参考文献：


[1] 宋可荐, 吴命利, 杨少兵, 等. 我国电气化铁路高次谐波谐振问题研究综述[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 64-76.
SONG Kejian, WU Mingli, YANG Shaobing, et al. Review of high-order harmonic resonances of electric railways in China [J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(1): 64-76.

[2] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
FENG Xiaoyun. Electric traction AC transmission and its control system[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

[3] 葛兴来, 谢东, 邓清丽. 车载牵引变流系统故障诊断与容错控制综述[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 28-44.
GE Xinglai, XIE Dong, DENG Qingli. Overview of fault diagnosis and fault-tolerant control methods for vehicular traction converter system[J]. Journal of power supply, 2020, 18 (1): 28-44.

[4] 赵峰, 李渊琴, 陈鲜. 动车组牵引传动系统健康状态评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1391-1398.
ZHAO Feng, LI Yuanqin, CHEN Xian. Health assessment of EMU traction drive system[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(6): 1391-1398.

[5] 张国恒, 高锋阳, 石岩, 等. 基于贝叶斯网络的牵引逆变器开路故障多特征融合诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 732-740.
ZHANG Guoheng, GAO Fengyang, SHI Yan, et al. Multi-feature fusion diagnosis method of open circuit fault for traction inverter based on Bayesian network[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(3): 732-740.

[6] CHENG Yitao, SUN Yao, LI Xing, et al. Active common-mode voltage-based open-switch fault diagnosis of inverters in IM-drive systems[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2021, 68(1): 103-115.

[7] YAN Hao, XU Yongxiang, ZOU Jibin, et al. A novel open-circuit fault diagnosis method for voltage source inverters with a single current sensor[J]. IEEE transactions on power electronics, 2018, 33(10): 8775-8786.

[8] ZHANG Jianghan, ZHAO Jin, ZHOU Dehong, et al. High-performance fault diagnosis in PWM voltage-source inverters for vector-controlled induction motor drives[J]. IEEE transactions on power electronics, 2014, 29(11): 6087-6099.

[9] 罗屿, 李凯迪, 石英春. 一种基于三维坐标识别的逆变器开路故障诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 1092-1100.
LUO Yu, LI Kaidi, SHI Yingchun. An open circuit fault diagnosis method for inverters based on spatial trajectory recognition[J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(4): 1092-1100.

[10] 赵苗苗, 陈小强, 王英, 等. 基于小波包熵及双重优化神经网络的牵引逆变器开路故障诊断[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 1101-1110.
ZHAO Miaomiao, CHEN Xiaoqiang, WANG Ying, et al. Open-circuit fault diagnosis of traction inverter based on wavelet packet entropy and double-optimized neural network[J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(4): 1101-1110.

[11] 成庶, 赵俊栋, 李凯迪, 等. 一种基于相电流轨迹的逆变器开路故障诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16 (10): 2584-2593.
CHENG Shu, ZHAO Jundong, LI Kaidi, et al. An open-circuit fault diagnosis method for inverter based on phase current trajectory[J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(10): 2584-2593.

[12] 施耀华, 冯延晖, 任铭, 等. 融合电流和振动信号的永磁同步风电系统变流器故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7750-7759.
SHI Yaohua, FENG Yanhui, REN Ming, et al. Study on fault diagnosis method of converter in permanent magnet synchronous wind power system by fusion of current and vibration signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7750-7759.

[13] 赵乐. 基于BIM振动信号的变压器机械故障诊断方法研究[J]. 环境技术, 2022, 40(1): 103-108.
ZHAO Le. Research on diagnosis method of transformer mechanical fault based on vibration signal[J]. Environmental technology, 2022, 40(1): 103-108.

[14] 王宇, 罗倩, 纪厚业. 机电设备振动信号故障诊断算法研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(5): 414-419.
WANG Yu, LUO Qian, JI Houye. Research on fault diagnosis algorithm for vibration signals of electromechanical equipment[J]. Computer simulation, 2017, 34(5): 414-419.

[15] SHI Yixuan, DAI Huanyun. The research of traction inverter fault diagnosis based on the analysis of motor vibration signals[C]//Springer International Publishing. The IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. Gothenburg: Springer International Publishing, 2020: 915-921.

[16] 何正友, 胡海涛, 方雷, 等. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 55-62.
HE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 55-62.

[17] 李宗垒, 刘明光, 屈志坚, 等. 交直交机车谐波特性及其诱发过电压的治理[J]. 铁道学报, 2015, 37(10): 26-34.
LI Zonglei, LIU Mingguang, QU Zhijian, et al. Harmonics characteristic of AC-DC-AC locomotive and the disposal of resonance overvoltage[J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(10): 26-34.

[18] ASSEFA S A, KEBEDE A B, LEGESE D. Harmonic analysis of traction power supply system: case study of Addis Ababa light rail transit[J]. IET electrical systems in transportation, 2021, 11(4): 391-404.

[19] MORAIS V A, MARTINS A P. Traction power substation balance and losses estimation in AC railways using a power transfer device through Monte Carlo analysis[J]. Railway engineering science, 2022, 30(1): 71-95.

[20] 施以旋. 基于电机振动信号分析的牵引逆变器故障诊断研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
SHI Yixuan. The research of traction inverter fault diagnosis based on the analysis of motor vibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[21] 张卫丰, 余岳辉, 刘璐. 三电平逆变器空间电压矢量控制算法仿真研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(1): 3-5.
ZHANG Weifeng, YU Yuehui, LIU Lu. A SVPWM control algorism for three-level inverter and its simulation[J]. Power electronics, 2006, 40(1): 3-5.

[22] 张磊, 王思明, 梁运华. NPC三电平容错逆变器异步电机驱动系统FCS-MPTC[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 207-214.
ZHANG Lei, WANG Siming, LIANG Yunhua. Finite control set model predictive torque control for IM systems driven by three-phase eight-switch fault-tolerant inverter[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(1): 207-214.

[23] 施以旋, 戴焕云, 毛庆洲, 等. 基于车轨耦合的地铁车轮多边形形成机理研究[J/OL]. 西南交通大学学报: 1-10. (2023-03-17) [2023-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230316.1133.008.html.
SHI Yixuan, DAI Huanyun, MAO Qingzhou, et al. Study on formation mechanism of metro wheel polygonal based on vehicle-track coupling[J]. Journal of southwest jiaotong university: 1-10. (2023-03-17) [2023-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230316.1133.008.html.

[24] WANG Qunsheng, ZENG Jing, WEI Lai, et al. Carbody vibrations of high-speed train caused by dynamic unbalance of underframe suspended equipment[J]. Advances in mechanical engineering, 2018, 10(12): 1-13.

[25] SHI Yixuan, WANG Qunsheng, DAI Huanyun, et al. Research about carbody abnormal vibration of light rail transit based on suspension failure[J]. Engineering failure analysis, 2021, 127: 105513.

[26] QI Yayun, DAI Huanyun, GAN Feng, et al. Optimization of rail profile design for high-speed lines based on Gaussian function correction method[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2023, 237(9): 1119-1129.

# Research on fault diagnosis of EMU traction inverter based on motor vibration

**SHI Yixuan[1,2], MAO Qingzhou[1], DAI Huanyun[2], WANG Qunsheng[2], SHI Xiangyu[3]**

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430070, China;
2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
3. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract:** The safety and reliability of traction inverters are critical for the stable operation of high-speed EMU vehicles. To identify the operating status of the inverter, this paper proposed a fault diagnosis method based on the analysis of motor vibration signals combined with the vehicle system dynamics. In this method, the motor vibration signal is taken as the monitoring object, and the characteristic signal of abnormal motor vibration caused by current distortion during inverter failure is detected for judgement. Taking the traction transmission system of CRH2 EMU as an example, a simulation model of a three-level traction inverter circuit based on space vector pulse width modulation strategy was established to simulate the structural fault modes of the inverter. The simulation results indicate that inverter faults significantly affect the harmonic content of the output current on the AC side, especially the 5th, 7th, 11th, and 13th harmonic currents. These harmonics currents are converted into pulsating torques at frequencies of $6P(1-s)$ and $12P(1-s)$ after input to the traction motor, acting on the motor and causing corresponding harmonic components in its output vibration. Analysis of vibration signals of the traction motor during the actual operation of high-speed EMU reveals that under normal circumstances, the vibration signals do not contain obvious harmonic frequency components, while the presence of inverter faults leads to a very significant content of this frequency in vibration signals. Therefore, the vibration signal analysis method proposed in this paper can effectively monitor and diagnose the operating status of the traction inverter and has a certain engineering application value.

**Keywords:** high-speed EMUs; traction inverter; motor vibration; current harmonics; fault diagnosis; simulation

收稿日期：2023-09-27；修回日期：2024-01-04