

# 轨道交通车辆转向架牵引电机滚动轴承可靠性研究<sup>\*</sup>

丁亚琦<sup>1</sup> 廖爱华<sup>2</sup>

(1. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200235, 上海;

2. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 为保障轨道交通车辆转向架牵引电机滚动轴承安全、平稳、可靠地运行,提出一种基于 IMF-PCA(本征模态分量-主成份分析)和 WPHM(威布尔比例故障模型)相结合的轨道交通车辆转向架牵引电机滚动轴承(以下简称“电机轴承”)可靠性评估方法。将实测采集的振动信号利用自相关系数对 IMF 中起主导的信息成分进行辨别,对于不同信息成分占主导的 IMF 分量,利用 PCA 将其分解为有用信息和虚假分量或噪声组成的一系列主分量。采取不同的筛选剔除方法对 IMF 进行筛选,将筛选保留的 IMF 进行重构,得到纯净、敏感的振动信号,并从中提取出能反映电机轴承状态的特征指标,将优选出的特征指标进行特征信息的加权融合。将这个融合后的特征指标作为 WPHM 的协变量,建立可靠性评估模型,从而实现电机轴承运行可靠性的有效评估。

**关键词** 车辆转向架;电机轴承;可靠性;集成经验模态分解;主成分分析;威布尔比例故障率模型

**中图分类号** U270.331

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.06.026

## Reliability Evaluation of Traction Motor Rolling Bearing in Rail Transit Vehicle Bogie

DING Yaqi, LIAO Aihua

**Abstract** In order to ensure the safe, smooth and reliable operation of bogie traction motor rolling bearings for rail vehicle, a reliability evaluation method of bogie traction motor rolling bearing(abbreviated as motor bearing) of rail vehicle is proposed, which combines the intrinsic modal functions (IMF), the principal component analysis (PCA) method with Weibull proportional hazard model (WPHM). The measured vibration signal is decomposed by ensemble empirical mode decomposition (EEMD) into a series of IMF. For the proportion of different dominant information components in IMF, PCA is used to decompose it into series of principle components including useful information, false components or noise. Different screening methods are taken to filter the IMF, the reserved IMF is reconstructed into pure, sensitive vibration sig-

nals, from which indexes that can reflect the characteristics of motor bearings are extracted, and a weighted fusion of feature information is performed for the preferred characteristics index. The integrated characteristic index are used as WPHM response covariates, a reliability evaluation model with the response covariates and reliability is established to realize the effective evaluation of the motor bearing operation.

**Key words** vehicle bogie; motor bearing; reliability; EEMD; principal component analysis; WPHM

**First-author's address** The Vehicle Branch of Shanghai Metro Maintenance Guarantee Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

牵引电机作为轨道交通车辆驱动装置的关键部件,其运行状况会直接对车辆性能和运输效率造成影响。滚动轴承又是牵引电机中应用最为广泛的部件之一,起着承受载荷、传递载荷的作用。有关研究表明,牵引电机中最容易发生失效的零部件是滚动轴承,轴承损坏约占牵引电机失效的 44%<sup>[1]</sup>。及时发现并更换低可靠性的滚动轴承是保障轨道车辆运行安全、平稳、舒适的关键<sup>[2]</sup>。为了减少设备故障率,需要对滚动轴承的状态和运行可靠性进行更为深入的研究。目前,振动测试分析法已经发展成一套比较完整的体系,成为电机轴承可靠性评估领域的主流方法。为了对电机轴承的可靠性进行有效、准确的评估,在做分析、处理之前,首先需要提取敏感、准确的特征信号,对原始信号进行提纯处理。原始信号在经经验模态分解(EMD)分解处理后会得到一系列由高频到低频依次排列的基于本征模态函数(IMF)分量<sup>[3]</sup>,但是由于分解、插值误差和背景噪声等多种因素的存在,会造成分解结果中包含一定量的虚假 IMF 分量或噪声。基于 EMD 的筛选降噪方法<sup>[4-5]</sup>,能够有效地去除 IMF 中的噪声,结果证明是一种有效的信号提纯方法,但 EMD 在分解过程中

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51605274);上海申通地铁集团有限公司科研计划项目(JS-KY15R024-4)

会导致模态混叠现象,使 IMF 分量丧失其具体的物理意义<sup>[6]</sup>;文献[7-9]在有效 IMF 分量提取过程中通过与阈值的比较直接对全部 IMF 进行剔除,忽视了其内部的部分有用信息,从而使结果的精确度降低。因此,本文提出一种基于 IMF 和主成分分析(PCA)相结合的电机轴承运行可靠性评估方法。首先,通过集成经验模态分解法(EEMD)将实测的原始振动信号分解成一系列的 IMF 分量,利用自相关系数对 IMF 中主导的信息成分进行辨别,再利用 PCA 将不同信息成分占主导的 IMF 分量分解为有用信息和虚假分量或者噪声组成的一系列主分量;其次,采取相对应的筛选剔除方法对虚假分量或者噪声进行剔除,并将筛选保留的有用信息进行 IMF 重构,得到纯净、敏感的振动信号,对重构后的振动信号分别提取得到时域、频域和时频域 3 种特征指标集;再次,运用 PCA 进行特征信息的加权融合,从而构建产生一个能有效表征电机轴承运行过程中性能状态的特征指标;最后,基于威布尔比例故障模型(WPHM)将融合后的特征指标作为响应协变量与可靠度建立数学关系模型,计算得到可靠度,从而实现电机轴承的可靠性评估。

## 1 基于 EEMD 原理的 IMF 筛选聚合

### 1.1 自相关函数

基于 EEMD 的信号筛选方法关键是寻找到不同信号成分起主导作用的 IMF 分量的分界点。随机信号的自相关函数是信号时域特性的一种平均度量,反映了信号在不同时刻  $t_0$  和  $t_1$  取值的相关程度<sup>[10]</sup>。假定  $x(t)$  随机信号,则其自相关函数定义为

$$R_x(t_0, t_1) = E[x(t_0)x(t_1)] \quad (1)$$

式中:

$R_x(0)$ ——信号与自身在同一时刻的相关函数值;

$E$ ——随机信号的均值。

使用归一化自相关函数  $\rho_x(\tau)$  来表示随机信号在不同时刻取值的相关程度,即

$$\rho_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)} \quad (2)$$

式中:

$$\tau = t_1 - t_0。$$

对于随机噪声信号  $x(t)$ ,由于其各个时刻的弱关联性及随机性,决定了其在零点处自相关函数值最大、在非零点处自相关函数值迅速衰减到很小的特点<sup>[11]</sup>。

### 1.2 IMF 的筛选聚合

为了进一步提高 IMF 中有用信息的筛选能力,本文基于 IMF-PCA 方法进行电机轴承性能退化指标的提取:

(1) 首先用 EEMD 对原始振动信号进行分解,得到所有的 IMF 分量。

(2) 根据自相关函数的特性判断不同信号成分起主导作用的 IMF 分量的分界点。

(3) 辨别每一个 IMF 分量是何种信息起主导作用后,将每一个 IMF 中的有用信息和虚假信息或者噪声分离。因此,对每一个 IMF 分量进行 PCA 分解,得到一系列的主分量  $p = [p_1^T, p_2^T, \dots, p_n^T]$ 。

(4) 对不同信息起主导作用的 IMF 分量应采取不同的筛选方法。这是因为,在从虚假分量或者噪声起主导作用的 IMF 变成有用信息起主导作用的 IMF 分量的过程中,如果继续使用虚假分量或者噪声起主导作用的 IMF 分量的筛选方法,会使相当多的有用信息成分被过滤掉。

对于虚假分量或者噪声起主导作用的 IMF 分量,采用阈值降噪法进行降噪。其基本思想是对虚假分量或者噪声起主导作用的 IMF 选取一个合适的阈值,并以此阈值对分解后的 IMF 分量截断为  $\hat{c}_i$ ,然后再进行 EEMD 重构<sup>[12]</sup>。

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^l \hat{c}_i + r \quad (3)$$

式中:

$\hat{x}_t$ ——降噪信号;

$\hat{c}_i$ ——第  $i$  个 IMF 分量;

$r$ ——残余分量。

$\tau_i$  为消除虚假分量或者噪声的阈值,计算公式为:

$$\tau_i = \hat{\sigma}_i \sqrt{2 \ln(N)} \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_i = D_i / 0.6745 \quad (5)$$

$$D_i = \text{Merdian}\{|c_i(t) - \text{Madian}\{c_i(t)\}|\} \quad (6)$$

式中:

$\hat{\sigma}_i$ ——第  $i$  个 IMF 的虚假信息或噪声水平;

$D_i$ ——第  $i$  个 IMF 的绝对中值偏差。

估计的  $\hat{c}_i$  为

$$\hat{c}_i(t) = \begin{cases} \text{sign}(c_i(t)(|c_i(t) - \tau_i|)) & \text{if } |c_i(t)| \geq \tau_i \\ 0 & \text{if } |c_i(t)| < \tau_i \end{cases} \quad (7)$$

对于有用信息起主导作用的 IMF 分量,利用相关系数计算 PCA 分解后的一系列 IMF 主分量与原始信号局部均值的相关性,评判其贡献率;并通过与贡献率阈值的比较来筛选有用信息的主分量,筛选后重构得到全新的 IMF。相关系数  $\delta$  计算如下:

$$\delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i - \bar{X}}{s_X} \right) \left( \frac{Y_i - \bar{Y}}{s_Y} \right) \quad (8)$$

式中:

$n$ ——样本数量;

$X_i, Y_i$ ——样本观测值;

$\bar{X}, \bar{Y}$ ——样本均值;

$s_X, s_Y$ ——样本标准差。

信号局部均值  $m(t)$  如下:

$$m(t) = 0.5 \times (a + b) \quad (9)$$

式中:

$a$ ——原始信号的下包络线序列;

$b$ ——原始信号的上包络线序列。

最后,将筛选保留的一系列 IMF 分量进行聚合重组,以达到原始信号提纯处理的目的。

## 2 牵引电机滚动轴承可靠性分析

### 2.1 电机轴承振动信号采集

对转向架牵引电机滚动轴承进行振动信号采集。电机轴承为牵引电机驱动端深沟球轴承,型号为 SKF 6016,传感器为三向振动加速度传感器。对两组同型号电机轴承的振动数据进行采集,每个电机轴承采集了 60 组数据,采样频率为 10 240 Hz,采集时间为 60 s,每组数据中的数据长度为 10 240 个采样点。采集到的原始振动加速度信号如图 1 所示。

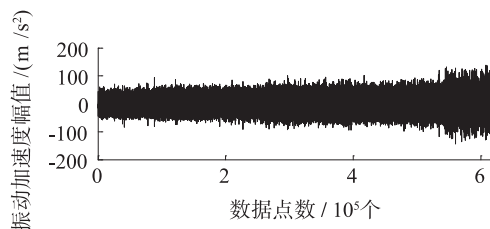


图 1 振动加速度原始信号时域图

### 2.2 基于振动信号的电机轴承可靠性评估

将经 PCA 融合后的特征指标作为响应协变量代入到 WPHM 中,可得

$$h(t, Z) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp(\alpha Z) \quad (10)$$

式中:

$h(t, Z)$ ——威布尔比例故障率函数;

$Z$ ——协变量,即 PCA 融合后的特征指标;

$\beta$ ——形状参数;

$\eta$ ——尺度参数;

$t$ ——时间变量;

$\alpha$ ——回归参数,表示  $Z$  对设备故障率的影响。

(1) 对原始信号用 EEMD 进行分解,得到 20 个 IMF 分量,用式(2)对这 20 个 IMF 分量计算归一化自相关函数,结果如图 2 所示。

(2) 依据自相关函数特点,判定前 11 个 IMF 分量为虚假信息或者噪声起主导作用,因此对这 11 个 IMF 分量选用阈值降噪法进行去噪处理;对剩余 9 个 IMF 分量,利用相关系数计算 PCA 分解后的一系列 IMF 主分量与原始信号局部均值的相关性,评判其贡献率,通过与贡献率阈值的比较来筛选、重构有用信息起主导的 IMF 分量。最后,将 20 个 IMF 分量一起重构成纯净、敏感的振动信号。

(3) 将筛选保留的 IMF 分量重新进行聚合,得到的数据信号如图 3 所示。

(4) 对重新聚合后的振动信号分别提取时域、频域和时频域内的特征指标,用 PCA 进行加权融合,从而得到一个能全面表征电机轴承状态的指标,结果如图 4 所示。图为电机轴承 1 在 60 组数据点所对应的时域、频域和时频域特征指标,以及 PCA 主成分的特征指标(篇幅所限,仅列出部分特征指标图)。

从图 4 d)离散曲线可以看出,基于 PCA 加权融合得到的特征指标,对于电机轴承的早期退化趋势相较于各个域的特征指标较为敏感。在第 20 组数据点之前上下波动性不大,在第 20 组数据点之后有明显的向上波动趋势,这反映了电机轴承有明显的故障趋势。从拟合曲线可以看出,整个特征指标较为纯净,稳定性较高。

应用极大似然估计法,求得电机轴承的 3 个待估参数,如表 1 所示。

表 1 电机轴承 3 个待估参数的估计结果

轴承号	$\beta$	$\eta$	$Z$
轴承 1	0.35	20	0.451
轴承 2	2.25	85	0.348

图 5、6 分别为电机轴承 1、2 的可靠度曲线。其中:电机轴承 1 的可靠度由 0.45 降低到 0.34 左右,降幅较大,但整体可靠度基本维持在 0.34 ~ 0.45,这是因为对电机轴承性能状态检测的时间较短,如果能获取电机轴承的全寿命数据,则可得到一个全寿

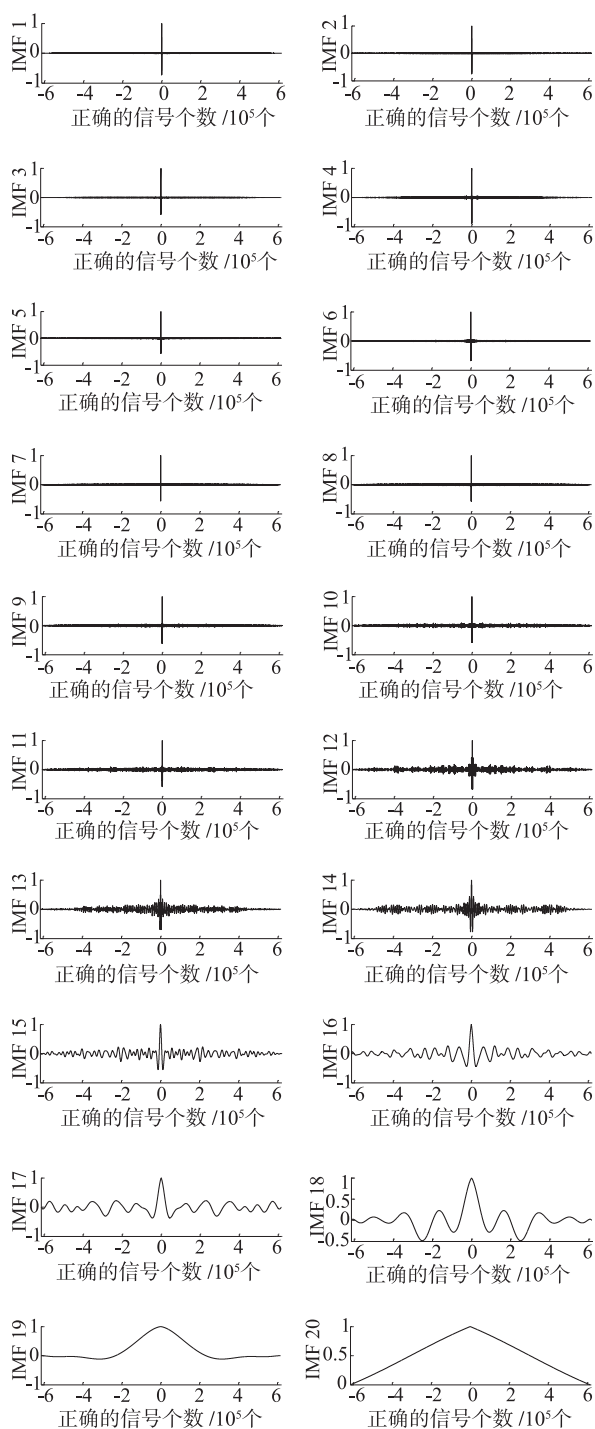


图2 IMF各分量归一化自相关函数

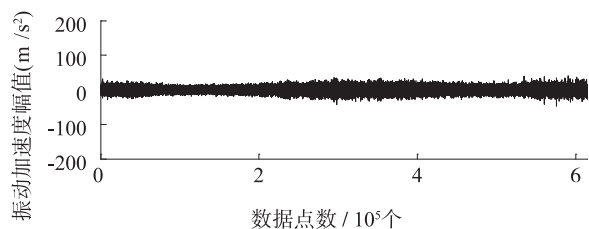
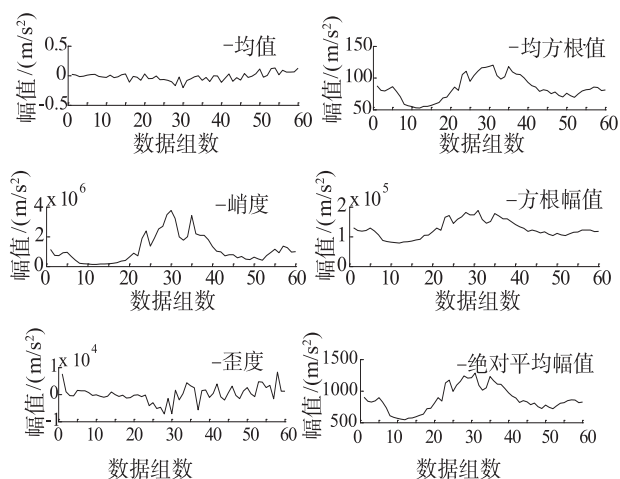
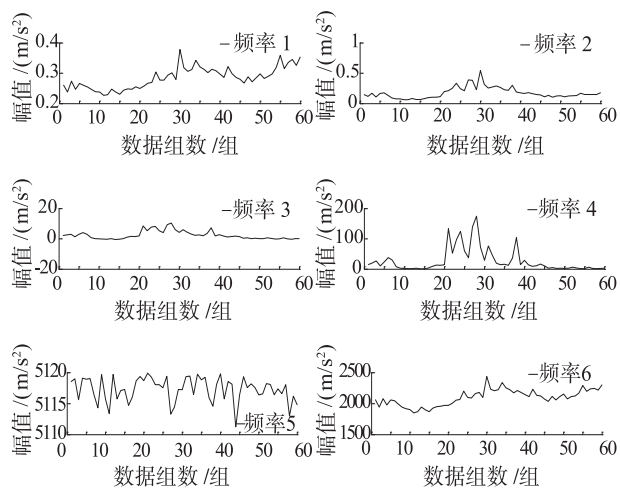


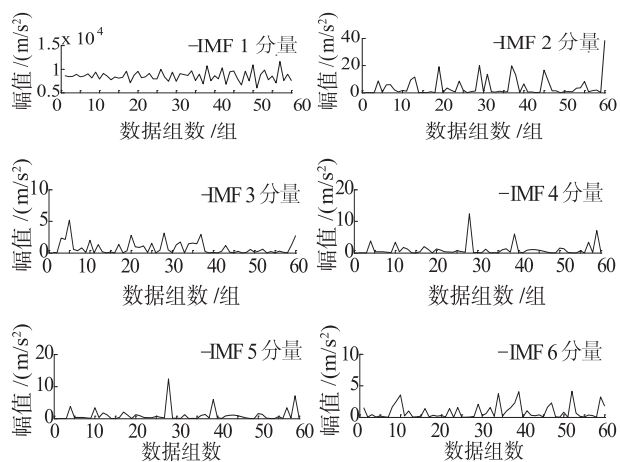
图3 重构后的振动加速度信号时域图



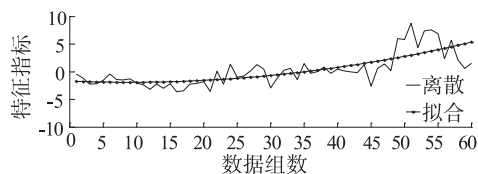
a) 时域的6个特征指标



b) 频域的6个特征指标



c) 时频域的6个特征指标



d) PCA 加权融合后的特征指标

图4 电机轴承1的特征指标图



命的可靠度曲线;电机轴承2的可靠度为0.90~0.94,可靠度降低得较少。

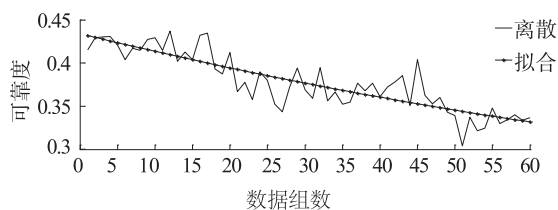


图5 电机轴承1的可靠度曲线

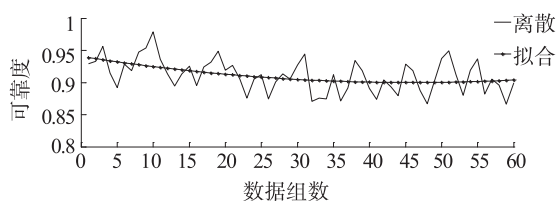


图6 电机轴承2的可靠度曲线

拆卸转向架牵引电机滚动轴承后发现,电机轴承1的外圈出现了严重烧伤擦伤现象(如图7所示),与本文可靠性评估方法所求的结果大致吻合。



图7 电机轴承1损伤图

### 3 结语

(1) 基于IMF筛选聚合和PCA相结合的轨道交通车辆转向架牵引电机滚动轴承可靠性评估方法针对不同信息起主导作用的IMF分量进行筛选重

构,得到了纯净、敏感的振动信号。

(2) 以轨道交通车辆转向架牵引电机滚动轴承的实测振动信号作为研究对象,选取加权融合后的指标作为WPHM的协变量,计算获得电机轴承的可靠度,并通过实际数据证实了可靠性评估的有效性,为电机轴承的实际维修提供了理论参考。

### 参考文献

- [1] 杨江天,赵明元,张志强,等.基于定子电流小波包分析的牵引电机轴承故障诊断[J].铁道学报,2013,2(15):32.
- [2] 云婷.城轨列车走行部滚动轴承运行可靠性分析方法的研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [3] HUANG N E,ZHENG S, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903.
- [4] 张超,陈建军.基于EMD降噪和谱峭度的轴承故障诊断方法[J].机械科学与技术. 2015,34(2):252.
- [5] 陈骏杰,师蔚,胡定玉.基于IMF聚合与SVD的城轨车辆牵引电机轴承故障诊断[J].测控技术,2017,36(1):14.
- [6] 胡爱军,孙敬敬,向玲.经验模态分解中的模态混叠问题[J].振动、测试与诊断,2011,31(4):429.
- [7] 王文波,张晓东,汪祥莉,等.基于主成分分析的经验模态分解降噪方法[J].电子学报,2013,7(28):1425.
- [8] 曹冲锋,杨世锡,杨将新.大型旋转机械非平稳振动信号的EEMD降噪方法[J].振动与冲击,2009,28(9):33.
- [9] 陈隽,李想.运用总体经验模式分解的疲劳信号降噪方法[J].振动、测试与诊断,2011,31(1):15.
- [10] 王婷.EMD算法研究及其在信号去噪中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [11] 陈仁祥,汤宝平,吕中亮.基于相关系数的EEMD转子信号降噪方法[J].振动、测试与诊断,2012,32(4):553.
- [12] 宋立新,王祁,王玉静,等.基于Hilbert-Huang变换的ECG信号降噪方法[J].传感技术学报,2006,6(19):2578.

(收稿日期:2018-09-06)

## 澳大利亚首条无人驾驶地铁线路开通 全自动运行监控系统“上海制造”

5月26日,悉尼最大轨道交通枢纽工程——全长36 km的悉尼西北线项目开通载客试运营,这是澳大利亚首条无人驾驶地铁线。总部位于上海的中法合资企业卡斯柯,参与该建设项目的信号工程,为其提供公司自主研发的、安全等级达SIL2级、自动化程度达GoA4级的全自动无人驾驶列车自动监控系统FAOTS。这是继香港南岛线之后,卡斯柯无人驾驶产品在发达地区的又一次成功应用。这条线路搭载的FAOTS系统,由卡斯柯专门针对海外市场特点而研发,特点是以中心控制为主,不再设置车站设备,更便于维护和处理故障。搭载这套系统后,悉尼西北线的列车可以实现自动唤醒、自检、自动出库回库、正线运行、自动洗车以及存车休眠等功能。一旦有人入侵区间,系统即可通过门控或摄像头监控识别,自动驱动列车鸣笛、降速和打开车灯等;一旦遭遇区间失电,系统也会立刻反应,将影响降到最低。卡斯柯还全面负责该系统的全生命周期管理,为安全运行提供长期、可靠的保障。

(摘自2019年5月27日《新民晚报》,首席记者曹刚报道)