

文章编号: 1674—8247(2022)01—0083—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.01.015

400 km/h 高速铁路 ZPW-2000 轨道电路器材 适应性研究

高俊明¹ 李明兵² 唐乾坤¹ 徐 越¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 北京和利时系统工程有限公司, 北京 100176)

摘 要: ZPW-2000 轨道电路作为铁路信号系统的基础关键设备之一, 轨道电路器材正常工作易受牵引电流及其谐波的影响。随着列车运行速度提升至 400 km/h 甚至更高时, 列车的牵引功率将不断增大, 钢轨中的牵引回流及其谐波对轨道电路设备的干扰也将随之增大。本文分析了 400 km/h 高速铁路不平衡牵引电流、牵引电流及其谐波对轨道电路器材设备的影响, 提出了轨道电路空芯线圈、扼流变压器适应性方案, 同时给出了 ZPW-2000 轨道电路可靠工作时对动车组牵引电流谐波限值的要求。

关键词: 400 km/h 高速铁路; ZPW-2000 轨道电路; 不平衡牵引电流; 谐波

中图分类号: U284.23⁺8 **文献标志码:** A

Study on Adaptability of ZPW-2000 Track Circuit Equipment for 400 km/h High-speed Railway

GAO Junming¹ LI Mingbing² TANG Qiankun¹ XU Yue¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Beijing Hollysys Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: ZPW-2000 track circuit is one of the key devices of railway signaling system, and its components are easily affected by the traction current and its harmonics during normal operation. When the train runs at 400 km/h or even higher, its traction power will continuously increase, which accordingly increases the interference of the traction current and its harmonics in the rails to the track circuit. This paper analyzes the influence of unbalanced traction current, traction current and harmonics of 400 km/h high-speed railway on track circuit, proposes the adaptability schemes for air-core coil and impedance transformer of the track circuit, and puts forward the requirements for harmonic limit of EMU traction current when ZPW-2000 track circuit works reliably.

Key words: 400 km/h high-speed railway; ZPW-2000 track circuit; unbalanced traction current; harmonics

ZPW-2000 系列轨道电路作为铁路信号自动闭塞系统的基础关键设备, 具有轨道占用检查、向列车连续传送行车信息的功能^[1]。目前, 350 km/h 及以下高速铁路区间和站内已广泛使用了 ZPW-2000 系列轨道电

路, ZPW-2000 系列轨道电路系统设备也表现出了较好的适应性, 轨道电路系统设备和配套扼流变压器、补偿电容等器材均工作性能良好。

随着高速铁路动车组运营速度的不断提高, 动车

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 高俊明(1980-), 男, 高级工程师。

引文格式: 高俊明, 李明兵, 唐乾坤, 等. 400 km/h 高速铁路 ZPW-2000 轨道电路器材适应性研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 83-88.

GAO Junming, LI Mingbing, TANG Qiankun, et al. Study on Adaptability of ZPW-2000 Track Circuit Equipment for 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 83-88.

组牵引电流越来越大,钢轨牵引回流也随之增大,而钢轨作为牵引回流的传输路径,其中通过的不平衡牵引电流及牵引回流谐波等会对轨道电路系统造成一定的影响。本文主要对钢轨中的不平衡牵引电流及牵引电流谐波对轨道电路的影响进行研究和分析,并根据分析结果对 400 km/h 铁路 ZPW-2000 系列轨道电路系统设备、配套器材和动车组牵引系统提出相关的要求及建议。

1 电气化铁路牵引供电方式和 ZPW-2000 轨道电路

1.1 电气化铁路牵引供电方式

电力机车普遍采用“交-直-交”传动系统^[2],动车组在铁路线路上运行时,是由牵引变电所通过接触网向动车组供电,牵引电流经列车轮对、钢轨回流至牵引变电所。

目前,我国电气化铁路牵引供电方式主要有直接供电方式(T-R)、带回流的直接供电方式(DN 或 T-R-NF)、吸流变压器供电方式(BT)和自耦变压器供电方

式(AT),以上几种供电方式的牵引电流均以钢轨作为回流通道^[3]。理想状态下,两条钢轨上牵引回流分布均匀且回流大小相等,但实际应用中钢轨牵引回流受牵引回路自身阻抗不平衡和邻近牵引回路牵引电流的磁场耦合^[4]等各种因素的影响导致电流大小不等,使得钢轨间存在不平衡牵引电流。

1.2 ZPW-2000 系列轨道电路

ZPW-2000 系列轨道电路是在法国 UM71 基础上研制的无绝缘轨道电路,目前高速铁路运用的 ZPW-2000 系列轨道电路主要包括 ZPW-2000A、ZPW-2000S、ZPW-2000R 等型号,其主要设备构成基本一致,系统特性和技术指标均符合 TB/T 3206 - 2017 《ZPW-2000 轨道电路技术条件》标准要求。

ZPW-2000 系列轨道电路主要由室内设备和室外设备两大部分组成,室内设备主要包括:发送设备、接收设备、衰耗设备、模拟网络设备、监测维护设备及通信接口设备;室外设备主要包括:匹配设备、调谐设备、空芯线圈、补偿电容、扼流变压器及钢轨等。系统结构如图 1 所示。

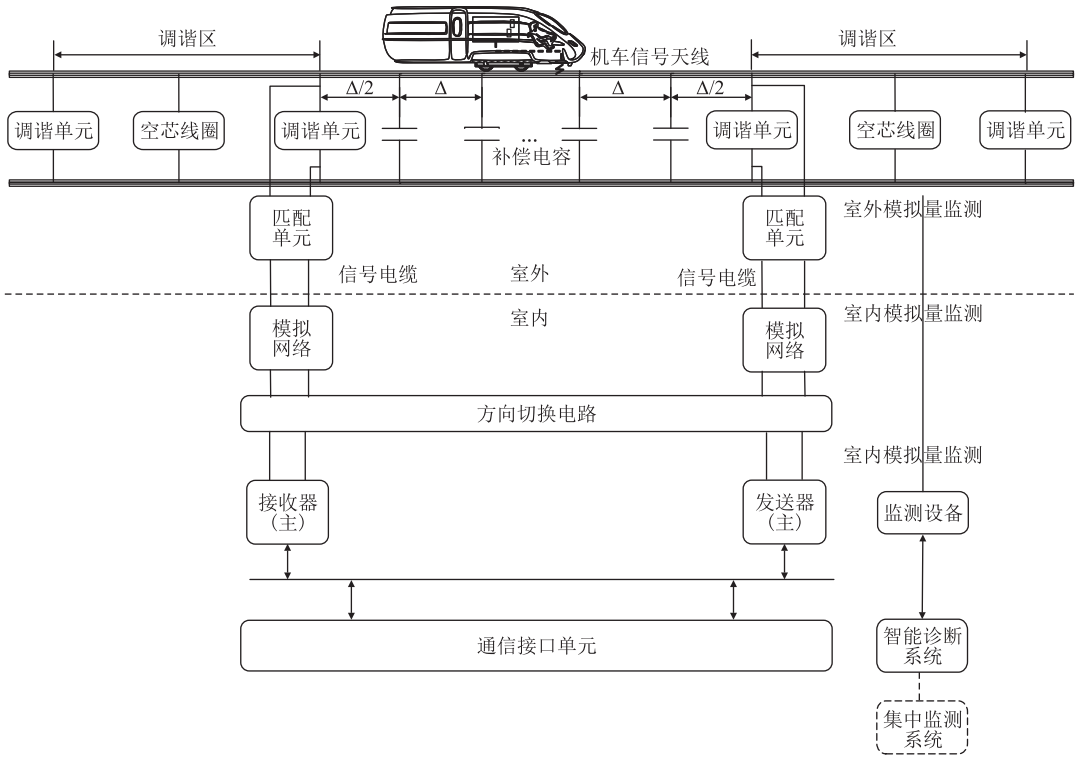


图 1 ZPW-2000 系列轨道电路系统构成示意图

1.3 轨道电路设备受牵引电流影响所采取的措施和技术要求

ZPW-2000 轨道电路属于无绝缘轨道电路系统,室外设置调谐区,通过调谐设备、空芯线圈及调谐区范

围内的钢轨形成两相邻轨道电路间的电气绝缘分割。其中,空芯线圈承担平衡相邻轨道电路区段两根钢轨间牵引回流的作用,由于空芯线圈对 50 Hz 牵引电流呈现很小的交流阻抗(约 10 mΩ),对钢轨不平衡牵引

电流电动势起到短路的作用,可有效平衡、分流两根钢轨间的牵引回流(如图 2 所示, $I_1 \neq I_2$),减少不平衡牵引电流和牵引回流谐波干扰对轨道电路的影响^[5]。

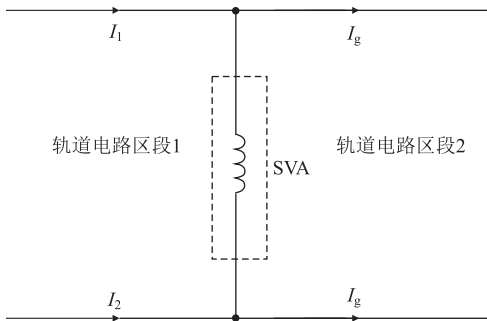


图 2 SVA 平衡牵引回流示意图

ZPW-2000 轨道电路设置空扼流变压器,通过空扼流变压器或空芯线圈横向连接沟通上、下行牵引回流,实现上、下行线路间的等电位连接,此外还通过综合接地系统及贯通地线进行牵引回流多点、多重冗余、网状方式接地以引导牵引回流返回大地和牵引变电所。

轨道电路两钢轨中的牵引电流与不平衡系数满足:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_{\text{总}} \\ I_2 - I_1 = I_{\text{总}} \times K \end{cases} \quad (1)$$

为保证 ZPW-2000 轨道电路可靠工作,根据 TB/T 3206-2017《ZPW-2000 轨道电路技术条件》,ZPW-2000 轨道电路所适用的交流电力牵引区段,钢轨电流不平衡系数 $K = \frac{|I_2 - I_1|}{I_1 + I_2}$ 不应大于 10%,不平衡牵引电流 $\Delta I = |I_2 - I_1|$ 不应大于 200 A。轨道电路室外设备能够适应不平衡牵引电流,同时需保证设备本身参数在最大不平衡牵引电流工况下满足系统性能指标要求^[6]。

1.4 轨道电路对机车牵引电流谐波的技术要求

为保障机车车辆与轨道电路之间的兼容性,GB/T 28807.2-2017标准规定了轨道机车车辆产生的干扰电流的限值要求以及验证机车车辆满足这些限值要求的测量方法。该标准对机车车辆的牵引谐波电流的限值要求做出了具体规定,其中 ZPW-2000 系列轨道电路工作载频的谐波干扰电流限制要求如表 1 所示^[7]。

由表 1 可以看出,对于牵引谐波频率在 ZPW-2000 轨道电路信号频带内的干扰电流,限值 I_{ORMS} 为 0.3 A,持续时间 T 不超过 0.3 s。

表 1 ZPW-2000 系列轨道电路工作载频的谐波干扰电流限制要求表

系统/类型	f_0 /Hz	Δf /Hz	I_{ORMS} /A	T /s
UM71、ZPW-2000	1 700	90	0.3	0.3
UM71、ZPW-2000	2 000	90	0.3	0.3
UM71、ZPW-2000	2 300	90	0.3	0.3
UM71、ZPW-2000	2 600	90	0.3	0.3

注: f_0 ——轨道电路工作频率或者移频键控(FSK)条件下工作频道的中心频率;
 Δf ——FSK 带宽;
 I_{ORMS} ——频率为 f_0 (或 Δf 范围内)的干扰电流限值(均方根值);
 T ——干扰电流可能超出限值的最长时间

此外,GB/T 28807.2-2017 标准中也规定了在 1 500~3 000 Hz工作带宽范围内且不在 ZPW-2000 轨道电路工作频带内的牵引电流谐波限值为 3 A。

2 400 km/h 牵引电流对 ZPW-2000 系列轨道电路器材的影响分析

2.1 牵引电流基波对轨道电路的影响分析

TB/T 3073-2003《铁路信号电气设备电磁兼容性试验及其限值》规定的牵引电流基波及各次谐波分布,如表 2 所示^[8]。

根据对表 2 中牵引电流基波及各次谐波分布情况分析可知,牵引电流产生的谐波主要分布在以 50 Hz 工频基波为主要能量的低频频段上,总体上频率越高,谐波能量越小,且奇次谐波相比偶次谐波所占比值更高。ZPW-2000 轨道电路中心载频为 1 700 Hz、2 000 Hz、2 300 Hz、2 600 Hz,分别为 50 Hz 工频的 34 次、40 次、46 次、52 次偶数谐波,轨道电路工作频率范围存在谐波信号。

牵引电流在钢轨中以共模方式传输,轨道电路信号电流是以差模方式进行传输,调谐区牵引电流与信号电流通路示意图如图 3 所示,其中 I_g 和 I_c 分别为共模的牵引电流和差模的信号电流。当牵引电流在

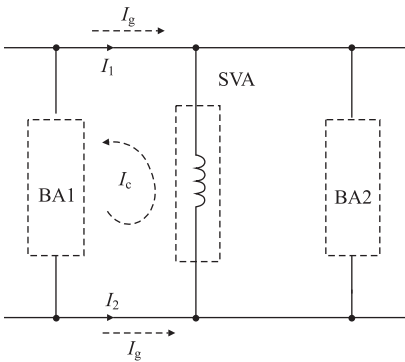


图 3 调谐区牵引电流与信号电流通路示意图

表 2 牵引电流各次谐波比例表

牵引电流 谐波次数/次	谐波频率 /Hz	占百分比 /%	牵引电流 谐波次数/次	谐波频率 /Hz	占百分比 /%	牵引电流 谐波次数/次	谐波频率 /Hz	占百分比 /%
1	50	97.3	22	1 100	0.113	43	2 150	0.076
2	100	0.45	23	1 150	0.56	44	2 200	0.047
3	150	19.88	24	1 200	0.1	45	2 250	0.068
4	200	0.53	25	1 250	0.46	46	2 300	0.050
5	250	9.74	26	1 300	0.086	47	2 350	0.078
6	300	0.41	27	1 350	0.385	48	2 400	0.054
7	350	5.11	28	1 400	0.08	49	2 450	0.087
8	400	0.36	29	1 450	0.346	50	2 500	0.058
9	450	2.76	30	1 500	0.09	51	2 550	0.076
10	500	0.34	31	1 550	0.34	52	2 600	0.070
11	550	1.64	32	1 600	0.094	53	2 650	0.093
12	600	0.34	33	1 650	0.308	54	2 700	0.065
13	650	0.99	34	1 700	0.09	55	2 750	0.104
14	700	0.32	35	1 750	0.249	56	2 800	0.068
15	750	0.74	36	1 800	0.075	57	2 850	0.098
16	800	0.32	37	1 850	0.175	58	2 900	0.057
17	850	0.70	38	1 900	0.050	59	2 950	0.098
18	900	0.27	39	1 950	0.13	60	3 000	0.050
19	950	0.72	40	2 000	0.04	61	3 050	0.087
20	1 000	0.24	41	2 050	0.096	62	3 100	0.045
21	1 050	0.63	42	2 100	0.043	63	3 150	0.080

钢轨中传输平衡时,即 $I_1 = I_2$ 时,牵引电流不会对轨道电路造成影响;当钢轨牵引电流不平衡时,即 $I_1 \neq I_2$ 时,钢轨间形成的不平衡电流对轨道电路移频信号 I_c 的传输造成影响。不平衡牵引电流主要通过对轨道电路设备及其配套扼流变压器等器材产生的热效应降低设备工作可靠性及性能指标参数。此外,由于调谐单元 BA 内有电容存在,在空芯线圈平衡牵引电流不畅时,较大的牵引回流涌入可能会导致电容击穿后使轨道电路产生故障。

钢轨中的牵引电流不平衡是其固有属性,由于钢轨自身的不对称、钢轨长度不同及施工质量问题(焊接面积不同、引接线不符合规格要求等)、机车车轮与轨道的接触面积及压力不同等因素会导致牵引回路自身阻抗的不平衡。列车运行速度的提高,列车牵引功率增大,牵引电流和钢轨中的牵引回流随之增大,在相同的不平衡系数条件下,不平衡牵引电流也随之增大。

在 350 km/h 速度等级及以下的高速铁路系统中,ZPW-2000 轨道电路设备在不平衡牵引电流限值内(不大于 200 A)可以可靠工作,而在 400 km/h 高速铁路系统中,牵引系统最大电流值暂按最高增加 40% 进行评估考虑,ZPW-2000 系列轨道电路系统需适应牵引电流最大到 2 800 A、不平衡牵引电流 280 A 的工作条件。因此,为降低 400 km/h 速度等级的高速铁路不平衡牵引电流对轨道电路的影响,需要提高 ZPW-2000 轨道电路的抗不平衡牵引电流能力。

2.2 轨道电路抗不平衡牵引电流性能分析

根据 ZPW-2000 无绝缘轨道电路系统原理和设备特性,轨道电路系统抗不平衡牵引电流主要通过空芯线圈平衡牵引回流,并通过空扼流变压器进行横向连接,平衡并为牵引回流返回变电所提供良好路径。

目前,轨道电路空芯线圈设备电感为 32.5 ~ 34.5 uH,电阻为 13 ~ 24 mΩ,同时需满足短时间不平衡电流通流要求,中心点通流量 60 min 内 300 A,最大通流量 4 min 内 1 000 A,设备温升在环境 10 ℃ ~ 35 ℃ 时,空芯线圈中心点 300 A 时不超过 90 K。在 400 km/h 高速铁路系统应用时,为满足牵引电流最大增大 40% 的要求,空芯线圈需在保持设备基本技术指标参数不变的情况下提高不平衡电流通流能力,中心点通流 60 min 内需达到 420 A,最大通流量 4 min 内需达到 1 400 A。

ZPW-2000 轨道电路系统在区间设置 BE(K)-1000/ZPW 型空扼流变压器,为平衡钢轨牵引回流,50 Hz 工频阻抗应不大于 0.01 Ω;为保证轨道电路系统设备可正常工作,空扼流变压器移频阻抗应大于 17 Ω。随着牵引电流增大,钢轨中牵引回流也随之增大,为避免扼流变压器在大牵引回流工况下产生磁饱和,影响扼流变压器性能,需要使用通流能力 1 400 A 或以上的扼流变压器。

2.3 牵引电流谐波分析

根据前期测试数据可知,350 km/h 速度等级的高

速铁路牵引电流谐波在各载频工作频带附近谐波和 1 500 ~ 3 000 Hz 工作带宽范围内且不在 ZPW-2000 轨道电路工作频带内的牵引电流谐波限值均符合 GB/T 28807.2-2017 标准限值要求。运用过程中动车组牵引电流谐波在轨道电路载频工作频带 (1 700 Hz、2 000 Hz、2 300 Hz、2 600 Hz) 附近谐波值均未超过 0.3 A, 在 1 500 ~ 3 000 Hz 工作带宽范围内的电流均方根值也未超过 3 A, ZPW-2000 系列轨道电路能够稳定可靠工作, 轨道电路接收器对标准限值规定内的谐波兼容适应性良好。

考虑到 400 km/h 的动车组牵引功率增大, 在 400 km/h 高速铁路动车组各工作条件下的牵引谐波电流各载频频带和 1 500 ~ 3 000 Hz 工作带宽范围内的最大值均符合 GB/T 28807.2-2017 标准限值要求的条件下, ZPW-2000 轨道电路系统设备可在 400 km/h 速度等级高速铁路系统中可靠工作。

3 解决措施及建议

3.1 牵引电流影响解决措施

通过上述分析, 牵引电流对 ZPW-2000 轨道电路的影响主要是不平衡牵引电流, 可通过以下措施提高轨道电路设备抗不平衡电流干扰能力。

(1) 提高空芯线圈抗不平衡牵引电流能力

提高空芯线圈通流能力主要是在避免大牵引回流工况下产生磁饱和, 在保持设备基本技术指标参数不变的情况下, 通过增大空芯线圈的线圈直径, 提高设备散热抗温升能力, 以满足中心点通流 60 min 内 420 A, 最大通流量 4 min 内 1 400 A 的要求。

(2) 提高空扼流变压器牵引电流平衡和通流能力

目前 1 600 A 空扼流变压器已经研制成功, 并在重载铁路等场景进行应用, 在 400 km/h 高速铁路系统中可采用, 或者进一步改进 1 600 A 空扼流变压器, 满足 ZPW-2000 轨道电路抗不平衡牵引电流能力要求, 并使牵引回流顺畅返回大地和牵引变电所。

通过提高空芯线圈抗不平衡牵引电流能力和提高空扼流变压器牵引电流平衡和通流能力, 可满足 400 km/h 等更高等级的高速铁路运用 ZPW-2000 轨道电路的抗不平衡牵引电流的能力。

3.2 牵引电流谐波要求及建议

为保证 ZPW-2000 轨道电路系统设备在 400 km/h 速度等级下可靠工作, 在各工况条件下的牵引谐波电流各载频频带内电流均需满足 GB/T 28807.2-2017 标准限值要求。

GB/T 28807.2-2017 标准给出了验证机车车辆

是否满足机车车辆产生干扰电流的限值要求的方法, 因此可对 400 km/h 高速铁路使用的动车组产生的牵引电流谐波进行测试, 以保证动车组产生的谐波满足 ZPW-2000 轨道电路系统设备的限制要求和适应性。

3.2.1 测试条件

测试频率范围: 1 500 ~ 3 000 Hz;

采样频率: 大于 16 KHz;

ZPW-2000 轨道电路工作频带: 1 700 Hz \pm 45 Hz、2 000 Hz \pm 45 Hz、2 300 Hz \pm 45 Hz、2 600 Hz \pm 45 Hz;

测试周期: 每个测试工况连续采集牵引电流回流信号, 每个有效数据采样周期不小于 1 s。

3.2.2 建议动车组牵引谐波测试工况

(1) 动车组静置工况测试

① 动车组处于静置状态, 断主断、降弓, 测试并记录各牵引单元回流信号。

② 动车组处于静置状态, 升弓、合主断, 仅辅助机组启动, 测试记录各牵引单元回流信号。

(2) 动车组动态工况测试

① 运营工况 1: 列车以 100% 动力牵引到 200 km/h, 通过分合主断路器模拟过分相, 再次加速至 200 km/h 后恒速运行, 之后分别采用 7 级常用制动和 EB 停车, 记录过程牵引谐波数据, 分析记录谐波电流最大值。

② 运营工况 2: 列车以 100% 牵引动力运行至 300 km/h, 通过分合主断路器模拟过分相, 再次加速至 300 km/h 后恒速运行, 之后分别采用 7 级常用制动和 EB 停车, 记录过程牵引谐波数据, 分析记录谐波电流最大值。

③ 运营工况 3: 列车以 100% 牵引动力运行至 400 km/h, 动车组手柄牵引满级加速至 400 km/h, 通过分合主断路器模拟过分相, 再次加速至 400 km/h 后恒速运行, 之后分别采用 7 级常用制动和 EB 停车, 记录过程牵引谐波数据, 分析记录谐波电流最大值。

需对测试结果与 GB/T 28807.2-2017 标准要求进行对比, 在动车组产生的谐波满足标准要求时, 轨道电路能够保证可靠工作。

4 结论

本文通过对比现有 350 km/h 高速铁路轨道电路相关标准, 对 400 km/h 运行环境下牵引电流、不平衡牵引电流和牵引电流谐波对 ZPW-2000 轨道电路器材的适应性进行了深入研究, 为保证在 400 km/h 高速铁路系统中 ZPW-2000 系列轨道电路系统设备可靠运用, 需采取的措施和满足的条件为:

(1)需提高 ZPW-2000 轨道电路系统设备抗不平衡牵引电流干扰能力。主要通过提高室外空芯线圈设备性能参数和采用具备 1 600 A 通流能力的大电流空扼流变压器等方案来保证 ZPW-2000 系统稳定可靠工作。

(2) 400 km/h 高速铁路动车组需满足 GB/T 28807.2-2017 标准限值要求。在各工况条件下动车组各载频频带及 1 500 ~ 3 000 Hz 工作带宽范围内牵引电流谐波满足 GB/T 28807.2-2017 标准限值要求时,ZPW-2000 轨道电路系统设备能够保证在 400 km/h 速度等级下可靠工作。

参考文献:

[1] 唐涛. 列车运行控制系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012: 54-55.
TANG Tao. Train Control System [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012: 54-55.

[2] 张路. 一种牵引供电系统高次谐波滤除的新方法[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 67-70.
ZHANG Lu. A New Method of Filtering Higher Harmonic in Traction Power Supply System[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 67-70.

[3] 杨世武. 铁路信号电磁兼容技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,

2010.
YANG Shiwu. Electromagnetic Compatibility Technology of Railway Signaling [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.

[4] 李新坡. 不平衡牵引电流对轨道电路干扰的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
LI Xinpo. Research on Interference of Unbalanced Traction Current on Track Circuit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[5] 中国铁路总公司. ZPW-2000A 型无绝缘移频自动闭塞系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
China Railway. ZPW-2000A Type of Jointless Frequency Shifting Automatic Block System [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013.

[6] TB/T 3206-2017 ZPW-2000 轨道电路技术条件[S].
TB/T 3206-2017 Technical Specification of ZPW-2000 Track Circuit [S].

[7] GB/T 28807.2-2017 轨道交通 机车车辆和列车检测系统的兼容性 第 2 部分: 与轨道电路的兼容性[S].
GB/T 28807.2-2017 Railway Applications-Compatibility Between Rolling Stock and Train Detection Systems-Part 2: Compatibility With Track Circuits [S].

[8] TB/T 3073-2003 铁道信号电气设备电磁兼容性试验及其限值[S].
TB/T 3073-2003 EMC Tests and Limits for Railway Electrical Signaling Apparatus [S].

(上接第 82 页)

[3] 金学松, 郭俊, 肖新标, 等. 高速列车安全运行研究的关键科学问题[J]. 工程力学, 2009, 26(S2): 8-22.
JIN Xuesong, GUO Jun, XIAO Xinbiao, et al. Key Scientific Problems in the Study on Running Safety of High Speed Trains[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 8-22.

[4] 郑继平. 南疆铁路大风区桥梁挡风结构研究与设计[J]. 铁道标准设计, 2008, 52(11): 27-29.
ZHENG Jiping. Research and Design of Bridge Windshield Structure in Windy Area of South Xinjiang Railway [J]. Railway Standard Design, 2008, 52(11): 27-29.

[5] 李波, 张剑, 杨庆山. 桥梁风障挡风性能的试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 78-82.
LI Bo, ZHANG Jian, YANG Qingshan. Experimental Study on Windbreak Performance of Wind Barriers on Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 78-82.

[6] 郭薇薇, 夏禾, 张田. 桥梁风屏障的气动效应及其对高速列车运行安全的影响分析[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 112-119.
GUO Weiwei, XIA He, ZHANG Tian. Analysis on Aerodynamic Effects of Bridge Wind Barrier and Its Influence on Running Safety of a high-speed Train [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 112-119.

[7] 邢烨炜, 戴龙钦. 350 km/h 高速铁路缓和曲线与旅客乘车舒适度分析[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(6): 8-14.
XING Yewei, DAI Longqin. Analysis on the Transition Curve and

Ride Comfort of 350 km/h High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 8-14.

[8] 张洁, 高广军, 李靓娟. 高速铁路桥梁上透风式挡风墙高度优化[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 28-35.
ZHANG Jie, GAO Guangjun, LI Liangjuan. Height Optimization of Windbreak Wall with Holes on High-speed Railway Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 28-35.

[9] 姜翠香, 梁习锋. 挡风墙高度和设置位置对车辆气动性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 66-70.
JIANG Cuixiang, LIANG Xifeng. Effect of the Vehicle Aerodynamic Performance Caused by the Height and Position of Wind-Break Wall [J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 66-70.

[10] 何玮, 郭向荣, 邹云峰, 等. 风屏障透风率对车-桥系统气动特性影响的风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24): 93-97.
HE Wei, GUO Xiangrong, ZOU Yunfeng, et al. Wind Tunnel Test on the Effect of Wind Barrier Porosity on Train-Bridge System [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(24): 93-97.

[11] 陈列, 徐锡江, 谢海清, 等. 沪昆高铁北盘江特大桥导风栏杆防风效果风洞试验研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(10): 76-80.
CHEN Lie, XU Xijiang, XIE Haiqing, et al. Wind Tunnel Test of Wind Guide Railing Effect of Beipanjiang Major Bridge on Shanghai-Kunming High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(10): 76-80.