

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205727

安装角度偏差及列车速度对应答器电磁 传输性能影响研究*

李建国^{1,2} 张鑫奎¹ 郑云水^{1,2}

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070; 2. 四电 BIM 工程与智能应用铁路行业重点实验室 兰州 730070)

摘要:作为高速铁路车地通信的关键设备,应答器信息传输的准确性直接影响列车安全高效运行,为研究列车速度与应答器倾斜、俯仰、偏转角度偏差对其传输性能的影响,针对应答器传输系统作用过程,分析其工作原理,建立 BTM 天线接收上行链路信号动态模型,应答器角度偏差理论模型,计算穿过 BTM 天线磁通量、BTM 接收天线感应电动势,仿真不同列车速度及应答器安装角度偏差下 BTM 接收线圈感应电动势幅值曲线,计算分析上述情况下应答器作用距离、BTM 作用时间、接收比特数等性能指标变化情况。研究表明,应答器作用距离随列车速度增大而减小,速度每增加 50 km/h 应答器作用区磁场强度减小 0.2 dB, BTM 作用时间、动态接收比特数、动态接收报文安全帧数与列车速度均呈反比关系;列车速度一定,BTM 动态接收比特数随应答器倾斜角、偏转角的增大呈线性减小,在现场施工维护过程中应重点对应答器倾斜偏转进行查验;满足 BTM 接收报文误比特率的条件下,现状应答器传输系统的适用性速度限值为 420 km/h。

关键词: 应答器; 传输性能; 列车速度; 角度偏差

中图分类号: U284.48 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3020

Research on influence of installation angular deviation and train speed on the electromagnetic transmission performance of balise

Li Jianguo^{1,2} Zhang Xinkui¹ Zheng Yunshui^{1,2}

(1. School of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Four Power BIM Engineering and Intelligent Application Railway Industry, Lanzhou 730070, China)

Abstract: As the key equipment of high-speed railway train ground communication, the accuracy of balise information transmission directly affects the safe and efficient running of trains. In order to study the influence of train speed and balise tilting, pitching and yawing angular deviation on its transmission performance, the working principle of balise transmission system is analyzed according to its working process, and a dynamic model of BTM antenna receiving up-link signal and a theoretical model of balise angular deviation are established. Calculate the magnetic flux passing through the BTM antenna and the induced electromotive force of the BTM receiving antenna, simulate the amplitude curve of the induced electromotive force of the BTM receiving coil under different train speeds and balise installation angular deviation, and calculate and analyze the changes of the balise contact length, BTM operating time, receiving bits and other performance indicators under the above conditions. The research shows that: The contact length of balise decreases with the increase of the train speed. For every 50 km/h increase in speed, the magnetic field intensity in the contact zone of balise decreases by 0.2 dB. The BTM operating time, the number of dynamic receiving bits, and the number of safe frames of dynamic receiving telegram are inversely proportional to the train speed. When the train speed is constant, the number of dynamic receiving bits of BTM decreases linearly with the increase of balise tilt angle and yaw angle. In the process of on-site construction and maintenance, we should focus on checking the transponder tilt deflection. Under the condition of meeting the bit error rate of BTM received message, the applicable speed limit of the current transponder transmission system is 420 km/h.

Keywords: balise; transmission performance; running speed; angular deviation

收稿日期: 2022-08-06 Received Date: 2022-08-06

* 基金项目: 中国高校产学研创新基金(2021LDA07002)、四电 BIM 工程与智能应用铁路行业重点实验室开放基金课题项目(BIMKF-2021-06)、教育部 2021 年产学研合作协同育人项目(202101023013)、甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA396)资助

0 引言

我国铁路列车运行控制系统 (Chinese Train Control System, CTCS) 在轨道电路^[1]基础上增加应答器向车载设备提供固定与可变信息, 采用连续加点式信息传送方式, 完成车地通信, 其中应答器向车载设备传输线路状况、临时限速、等级转换等信息, 其信息的可靠传输对列车安全高效运行有重要作用, 但应答器安装于室外开阔环境, 空间电磁干扰、自然灾害、列车运行过程中因震动等引起应答器位置发生倾斜、俯仰、偏转, 影响其传输性能。

学者对应答器传输系统从不同角度进行了研究, Geng 等^[2]采用数字孪生技术分析了车载天线与应答器之间的能量和数据传输过程; 赵会兵等^[3]分析了应答器传输模块 (balise transmission module, BTM) 的动态特性, 给出 BTM 设备关键参数的计算及测试方法; 李正交等^[4]提出基于马尔可夫过程的可靠性评估方法, 分析了列车运行速度对应答器传输系统可靠性影响; 许波等^[5]解释了应答器传输系统工作原理, 研究应答器输入输出随空间时间变化关系; 许庆阳等^[6]结合应答器动态检测数据采用方差与统计值分析了速度、轨道板类型等因素对动态性能指标的影响; 付连著^[7]、Zhao 等^[8]对高速运行条件下车地信息传输安全可靠技术进行了分析; 李雪等^[9]分析应答器 A 接口传输过程, 利用模型对应答器角度偏差进行了一致性评估; 王通等^[10]、Liang 等^[11]和梁迪等^[12]基于电磁感应原理, 分析了应答器系统数据传输过程与旁瓣感应电压幅值包络问题; Lü 等^[13]针对应答器信号噪声干扰, 提出基于认知控制的应答器上行链路信号处理方法; 张友鹏等^[14]提出基于熵权法和折扣证据理论的风险评估模型, 解决应答器系统风险评估过程中较大模糊性与主观性问题。

上述研究人员取得了一定研究成果, 但在不同列车速度与应答器安装角度偏差同时存在时对应答器信息传输影响的研究鲜有。本文建立动态条件下 BTM 收到上行链路信号幅度模型, 应答器角度偏差理论模型, 仿真分析不同列车速度及倾斜、俯仰、偏转角度偏差对应答器上行链路信号幅度、BTM 动态接收比特数等因素的影响程度, 为分析解决应答器工作故障及更高等级下应答器的适用性提供理论依据。

1 应答器传输系统作用原理

1.1 应答器系统作用过程

应答器设备是一种基于点式信息传输的安全传输系统, 实现轨旁设备或地面设备与车载设备之间的信息传

输。应答器传输系统采用电磁耦合射频识别方式工作, BTM 与地面应答器天线相互耦合完成数据报文的传递^[15-18], 我国采用的应答器天线辐射扇面大于 150° , 垂直作用距离大于 500 mm, 水平作用距离大于 900 mm, 天线间的耦合关系如图 1 所示。

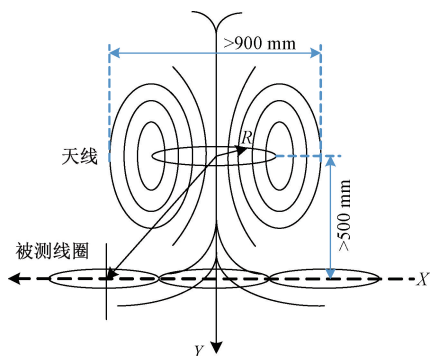


图1 天线间的耦合关系图

Fig. 1 Coupling diagram between antennas

列车运行经过应答器上方时, 车载天线发射 $27.095 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$ 的电磁能量激活应答器, 应答器发送线路数据、临时限速等报文信息, 频率 $4.23 \text{ MHz} \pm 175 \text{ kHz}$, 传输速率为 564.48 kbit/s , 直至能量消失。

1.2 应答器天线工作范围分析

根据观测点与天线间的距离将天线周围场划分为感应近场区、辐射近场区和辐射远场区, 辐射近场区与远场区分界线取 $R = 2L^2/\lambda$ (m), L 是天线最大尺寸 (m), λ 是波长 (m), 辐射近场区与远场区的分界点取 $\lambda/2\pi$, 如图 2 所示。

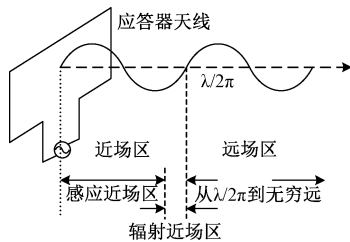


图2 天线场区划分

Fig. 2 Antenna field division

应答器传输系统射频能量信号磁场频率为 $27.095 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$, 上行链路调制信号频率为 $4.234 \text{ MHz} \pm 175 \text{ kHz}$, 波长分别为 11.072、70.855 m, 近场区与远场区分界点距离分别为 1.762、11.277 m, $l = 0.159155\lambda$, 为近场区与远场区分界点距离。应答器最大作用高度为 460 mm, 小于 1.762 m, 故应答器传输系统天线工作于感应近场区。

2 仿真模型建立与验证

2.1 BTM 天线接收上行链路信号动态模型

以应答器中心为原点,钢轨为参照物,与钢轨平行坐标轴为 x 轴,与钢轨呈直角且与轨面水平为 y 轴,垂直向上且与轨面垂直为 z 轴, x 、 y 、 z 轴旋转一定角度分别对应倾斜角、俯仰角、偏转角。列车沿钢轨运行,表示为沿 x 轴正向移动,应答器位置坐标轴如图 3 所示。

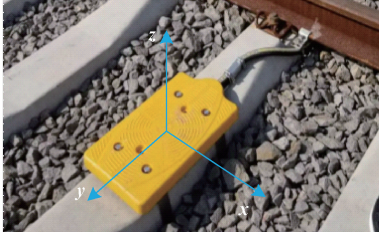


图 3 参考坐标轴

Fig. 3 Reference axis

$$B_z = \frac{\mu_0 I (l_2 + y)}{4\pi[(l_2 + y)^2 + z^2]} \times \left(\frac{l_1 - x}{\sqrt{(l_1 - x)^2 + z^2 + (l_2 + y)^2}} + \frac{l_1 + x}{\sqrt{(l_1 + x)^2 + z^2 + (l_2 + y)^2}} \right) + \frac{\mu_0 I (l_2 - y)}{4\pi[(l_2 - y)^2 + z^2]} \times \left(\frac{l_1 - x}{\sqrt{(l_1 - x)^2 + z^2 + (l_2 - y)^2}} + \frac{l_1 + x}{\sqrt{(l_1 + x)^2 + z^2 + (l_2 - y)^2}} \right) + \frac{\mu_0 I (l_1 - x)}{4\pi[(l_1 - x)^2 + z^2]} \times \left(\frac{l_2 - y}{\sqrt{(l_1 - x)^2 + z^2 + (l_2 - y)^2}} + \frac{l_2 + y}{\sqrt{(l_1 - x)^2 + z^2 + (l_2 - y)^2}} \right) + \frac{\mu_0 I (l_1 + x)}{4\pi[(l_1 + x)^2 + z^2]} \times \left(\frac{l_2 - y}{\sqrt{(l_1 + x)^2 + z^2 + (l_2 - y)^2}} + \frac{l_2 + y}{\sqrt{(l_1 + x)^2 + z^2 + (l_2 - y)^2}} \right) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, I 为通过应答器发送天线的电流。

BTM 天线在 z_0 平面从 $-x_0$ 平移到 x_0 , 基于列车速度 v 的 BTM 接收天线感应电动势幅值包络为:

$$U(x) = Q(-2\pi f_c) \int_{-l_4}^{l_4} \int_{-x_0-l_3}^{-x_0+l_3} B_z(x, y, z_0) dx dy \quad (2)$$

式中: Q 为 BTM 天线谐振电路品质因数, $f_c = 4.234$ MHz, 负号表示感应电动势方向总是阻碍磁通量变化(楞次定律)。

2.2 应答器角度偏差理论模型

1) 应答器倾斜

将应答器天线 ABCD 的 x 轴旋转 α° 得到 A'B'C'D' 如图 5 所示。应答器倾斜 α 角度后,在空间任一点处 z 方向产生的磁感应强度为:

$$\begin{aligned} B_z &= B_{A'B'Z} + B_{B'C'Z} + B_{C'D'Z} + B_{D'A'Z} \\ B_{A'B'Z} &= B_{ABZ}(x, y, z - l_2 \sin \alpha) \\ B_{B'C'Z} &= B_{BCZ} \\ B_{C'D'Z} &= B_{CDZ}(x, y, z + l_2 \sin \alpha) \\ B_{D'A'Z} &= B_{DAZ} \end{aligned} \quad (3)$$

地面应答器与 BTM 天线均为矩形天线,由第 1 节可知其工作于感应近场区,天线上电流呈均匀分布,各处电流等幅同相,在应答器传输系统天线电磁场模型的基础上^[19]上建立动态电磁场模型,如图 4 所示。

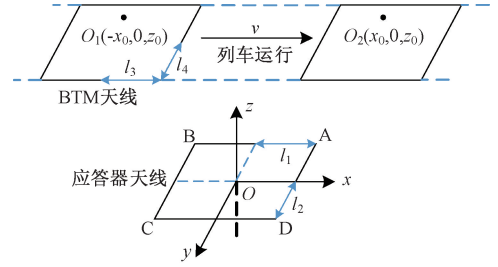


图 4 BTM 天线接收上行链路信号动态模型

Fig. 4 Dynamic model of BTM antenna receiving uplink signal

为建立对称坐标、方便仿真分析,将 BTM 天线的边长设为 $2l_3$ 和 $2l_4$, 应答器天线的边长设为 $2l_1$ 和 $2l_2$ 。

由毕奥·萨伐尔定律计算 AB, BC, CD, DA 4 个边在空间某一点 P 的磁感应强度竖直分量 B_z 如式(1)所示:

故通过 BTM 接收天线的磁通量为:

$$\Phi(x') = \iint_{\Sigma} B_z(x, y, z) dS = \int_{-l_4}^{l_4} \int_{-l_3}^{l_3} B_z dx dy \quad (4)$$

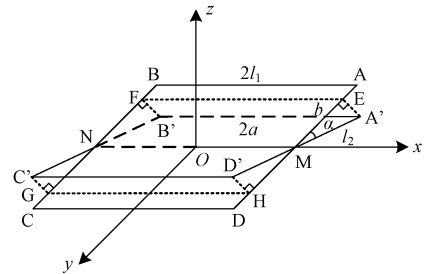


图 5 应答器倾斜示意图

Fig. 5 Schematic diagram of balise tilt

图 5 中: $a = l_1, b = l_2 \cos \alpha$ 。

2) 应答器俯仰

将应答器天线 ABCD 的 y 轴旋转 β 度得到 A'B'C'D' 如图 6 所示。应答器经过 β 角度的俯仰后,在空间任一点处 z 方向产生的磁感应强度为:

$$B_z = B_{A'B'Z} + B_{B'C'Z} + B_{C'D'Z} + B_{D'A'Z}$$

$$B_{A'B'Z} = B_{ABZ}$$

$$B_{B'C'Z} = B_{BCZ}(x, y, z + l_1 \sin \beta) \quad (5)$$

$$B_{C'D'Z} = B_{CDZ}$$

$$B_{D'A'Z} = B_{DAZ}(x, y, z - l_1 \sin \beta)$$

故通过上行链路接收天线的磁通量为:

$$\Phi(x'') = \iint_{\Sigma} B_z(x, y, z) dS = \int_{-l_4}^{l_4} \int_{x''-l_3}^{x''+l_3} B_z dx dy \quad (6)$$

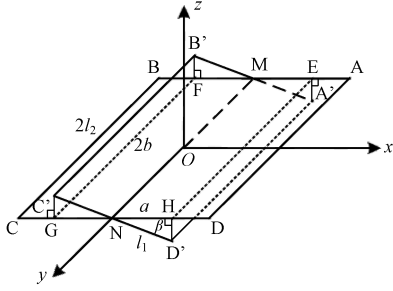


图 6 应答器俯仰示意图

Fig. 6 Schematic diagram of balise pitch

图 6 中: $a = l_1 \cos \beta$, $b = l_2$ 。

3) 应答器偏转

将应答器天线 ABCD 的 z 轴旋转 γ 角度得到 A'B'C'D' 如图 7 所示。俯视应答器, 二维直角坐标系中 1 点 (x, y) 顺时针旋转 γ 度后变为 2 点 (x', y') , 1 点与 2 点之间的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \begin{cases} x = \cos \gamma y' - \sin \gamma x' \\ y = \sin \gamma y' + \cos \gamma x' \end{cases} \quad (7)$$

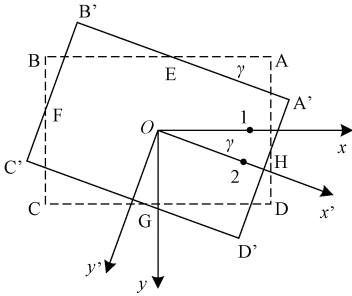


图 7 应答器偏转示意图

Fig. 7 Schematic diagram of balise yaw

应答器经过 γ 角度的偏转后, 在空间任一点处 z 方向产生的磁感应强度为:

$$B_z = B_{A'B'Z} + B_{B'C'Z} + B_{C'D'Z} + B_{D'A'Z}$$

$$B_{A'B'Z} = B_{ABZ}(\cos \gamma y' - \sin \gamma x', \sin \gamma y' + \cos \gamma x', z)$$

$$B_{B'C'Z} = B_{BCZ}(\cos \gamma y' - \sin \gamma x', \sin \gamma y' + \cos \gamma x', z)$$

$$B_{C'D'Z} = B_{CDZ}(\cos \gamma y' - \sin \gamma x', \sin \gamma y' + \cos \gamma x', z)$$

$$B_{D'A'Z} = B_{DAZ}(\cos \gamma y' - \sin \gamma x', \sin \gamma y' + \cos \gamma x', z) \quad (8)$$

故通过上行链路接收天线的磁通量为:

$$\Phi(x''') = \iint_{\Sigma} B_z(x, y, z) dS = \int_{-l_4}^{l_4} \int_{x'''-l_3}^{x''' + l_3} B_z dx' dy' \quad (9)$$

BTM 天线在 z_0 平面从 $-x_0$ 平移到 x_0 , BTM 接收天线感应电动势幅值包络为:

$$U(x) = Q(-2\pi f_c) \Phi(x) \quad (10)$$

2.3 应答器传输系统性能指标

应答器传输系统性能指标概念与计算公式如下。

1) 静态作用距离 L_J

$$L_J = x_2 - x_1 \quad (11)$$

$$x_1, x_2 \in [x: I_{th}(x) - I_{low}(x) = 0]$$

式中: I_{th} 为 BTM 在不同 x 坐标处对上行链路信号接收的阈值, I_{low} 为最弱应答器辐射模式曲线, 与 I_{th} 的交点为 x_1 和 x_2 , 如图 8 所示。

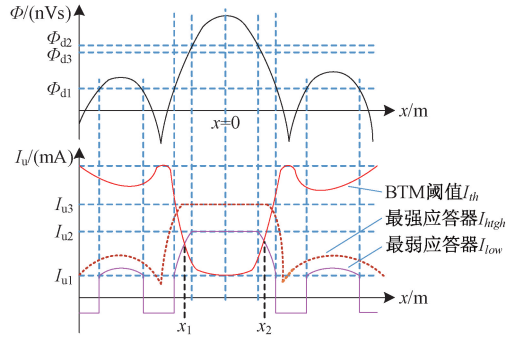


图 8 BTM 接收层静态曲线

Fig. 8 Static curve of BTM receiving layer

2) 动态作用距离 L_D

$$L_D = L_J - T \times v = (x_2 - x_1) - T \times v \quad (12)$$

$$T = T_{bal} + T_{btm} + T_{dis} + T_{deb} + T_{emd}$$

式中: T_{bal} 为地面应答器启动时间, T_{btm} 为 BTM 瞬态特性导致的延迟时间, T_{dis} 为 BTM 天线相对应答器随机位移导致的延迟时间, T_{deb} 为空间杂质变化导致的延迟时间, T_{emd} 为空间电磁环境变化导致的延迟时间, v 为列车速度。

由于 BTM 内部阈值电压 U_{BTM} 存在, 在仿真时 BTM 动态作用距离可以表示为:

$$L_D = |X_2 - X_1| \quad (13)$$

式中: X_1, X_2 为 BTM 收到上行链路信号达到 U_{BTM} 时的交点。

3) BTM 动态作用时间 T_D

$$T_D = \frac{L_D}{v} \quad (14)$$

4) 报文安全接收因子 R

应答器报文分为长格式($n=1\ 023$ bit)与短格式($n=341$ bit)两种,标准接收器保证安全译码需要一定的附加位 r 没有错误,要求长格式为 77 bit,短格式为 121 bit。

$$R = 1 + \frac{r}{n} \quad (15)$$

长报文、短报文安全接收因子分别为 1.075, 1.355。

5) BTM 动态接收比特数 n_D

$$n_D = T_D \times v_{cs} \quad (16)$$

式中: $v_{cs}=564.48$ kbit/s, 为应答器上行链路信息传输速率。

6) BTM 动态接收安全报文帧数 N_D

$$N_D = \frac{n_D}{n+r} \quad (17)$$

2.4 模型验证

SUBSET-036 规定上行链路应答器的磁场强度垂直分量应与参考磁场一致,应答器输出的信号强度与参考磁场的差值构成上行链路的一致性偏差,用 dB 表示,上行链路参考磁场和限定如图 9 所示。

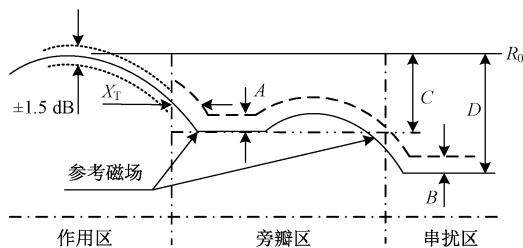


图 9 上行链路参考磁场与限定

Fig. 9 Reference field and limits, Up-link

其中: $A=5$ dB; $B=5$ dB; $C=35$ dB; $D=60$ dB; $X_T=5$ cm; R_0 为 $z_0=220$ mm 时作用区的最大磁场强度。

为防止相邻应答器和邻线应答器对其产生干扰,应答器天线波瓣图需满足场强一致性要求。作用区定义为应答器正上方 220~460 mm 之间 16 角柱状有限体积区域,应答器产生的磁场与参考磁场场强差值在 ± 1.5 dB 内,旁瓣区定义为 $-1\ 300\text{ mm} < x < +1\ 300\text{ mm}$, $-1\ 400\text{ mm} < y < +1\ 400\text{ mm}$, $+220\text{ mm} < z < +460\text{ mm}$ (包含作用区),场强差值在 $5 \sim -\infty$ dB 间,其参考磁场相比 $z_0=220$ mm 时作用区磁场限制为 C ,不大于 35 dB,串扰区不允许产生能量和信息传输,场强差值限制在 $5 \sim -\infty$ dB 间,其参考磁场相比 $z_0=220$ mm 时作用区磁场限制为 D ,不大于 60 dB。

结合式(1)、(2),代入相关参数: μ_0 为真空磁导率, $f_c=4.234$ MHz (上行链路数据调制中心频率),通过应答器环路电流 $I=180$ mA (标准尺寸最弱应答器电流 $I=59$ mA,最强应答器电流 $I=186$ mA), $l_1=195$ mm, $l_2=100$ mm (标准尺寸应答器), $l_3=100$ mm, $l_4=100$ mm

(BTM 接收天线尺寸), $z_0=220$ mm, $x_0=1\ 300$ mm (BTM 天线在 $z=z_0$ 平面内沿 x 轴从 $-x_0$ 移动到 x_0), $Q=40$, t 为列车运行时间, v 为列车运行速度,仿真得到 BTM 接收上行链路信号幅度曲线,如图 10 所示。

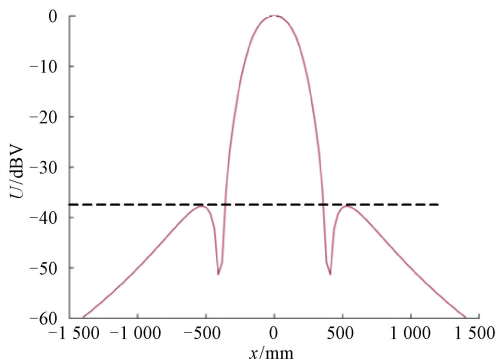


图 10 BTM 接收线圈感应电动势幅值曲线

Fig. 10 Amplitude curve of induced electromotive force of BTM receiving coil

由图 10 看出旁瓣区波峰与作用区波峰相差超过 35 dB,串扰区场强与作用区波峰相差超过 60 dB,符合场强一致性要求,模型的正确性与适用性得到验证。

3 仿真分析

3.1 列车速度对应答器传输性能影响分析

应答器作为现行铁路 CTCS-2 (适用于列车速度为 200~250 km/h 的区段)、CTCS-3 (适用于列车速度为 300~350 km/h 的区段)级线路关键设备,CTCS-1 级线路辅助设备,考虑到列车进出站低速运行接收链接报文、临时限速报文、停车报文等信息及列车时速达到 400 km/h 及以上时应答器的适用性,为方便仿真分析选取列车时速 120、160、200、250、300、350、400、420、500 km/h 进行分析。结合式(1)、(2),代入相关参数,为了仿真波瓣图不失真将 x_0 调为 1 800 mm,此部分只看作用区与旁瓣区,仿真得到不同运行速度下的 BTM 接收上行链路信号幅度曲线,如图 11 所示。

图 1 中 U_{BTM} 为 BTM 阈值电压 (由设备厂商设定),当 U_{BTM} 一定时 (以北信公司为例, U_{BTM} 对应电流 $I_{BTM}=51$ mA),计算不同速度下应答器作用距离如表 1 所示。

由表 1 可以看出,当列车运行速度 v 每增加 50 km/h 应答器作用区磁场强度减小 0.2 dB,应答器作用距离随速度增加而减小且速度越大减小程度越明显, v 从 0 增加到 120 km/h, 应答器作用距离减小 2.957 mm, v 从 120 增加到 250 km/h, 其作用距离减小 2.720 mm, v 从 250 增加到 350 km/h, 其作用距离减小 4.241 mm, 当列车运行速度超过 350 km/h 时,应答器作用距离急速减小,传

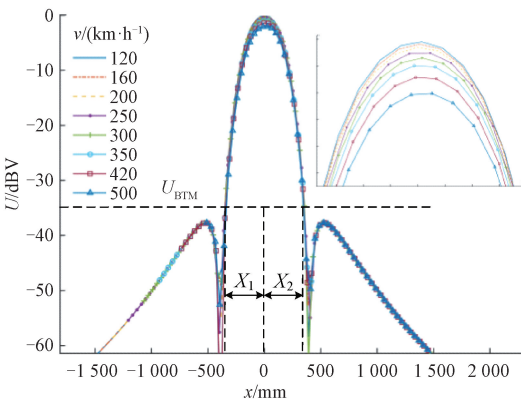


表 1 不同速度下应答器作用距离

Table 1 Contact length of Balise at different speeds

速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	应答器作用距离 L_D/mm	
	X_1	X_2
0	-354.592	354.592
120	-351.144	355.083
160	-350.534	354.041
200	-350.452	353.401
250	-349.535	353.972
300	-346.641	354.803
350	-347.625	351.641
420	-344.771	350.404
500	-338.787	348.295

图 11 不同速度下的 BTM 接收线圈感应电动势幅值

Fig. 11 Amplitude of induced electromotive force of BTM receiving coil at different speeds

结合式(1)~(2)、(11)~(17),代入相关参数,进一步分析列车速度对 BTM 作用时间、动态接收比特数及接收安全报文帧数的影响,得到其关系曲线如图 12 所示。

输的报文信息将出现丢失等情况,导致车载设备误判风险增大影响行车安全。

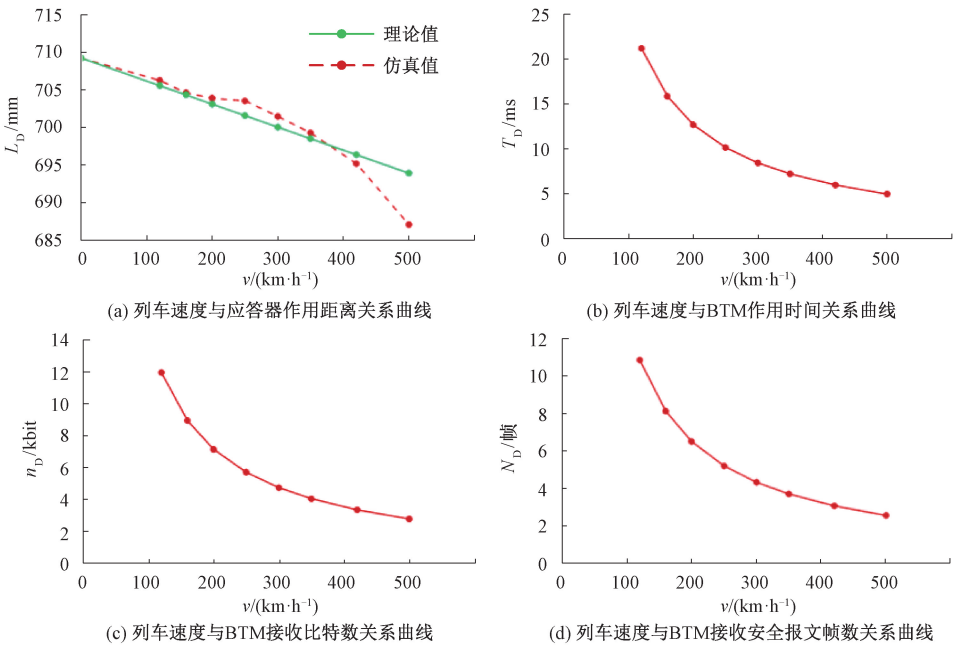


图 12 不同速度下 BTM 动态特性

Fig. 12 Dynamic characteristics of BTM at different speeds

不同速度等级下各性能指标数据如表 2 所示。

应答器位置正常没有发生角度偏差,由图 12 与表 2 可得,BTM 动态作用时间、动态接收比特数及接收安全报文帧数与列车运行速度呈反比关系,拟合曲线公式分别为: $T_D = 2\,759.1v^{-1.016}$, $n_D = 2 \times 10^6 v^{-1.016}$, $N_D = 1\,415.9v^{-1.016}$, 当 v 从 120 km/h 增加到 350 km/h, BTM 动态作用时间从 21.186 8 ms 减小到 7.192 4 ms, 动态接收比特数从 11 959.525 bit 减小到 4 059.966 bit, 动态

表 2 不同速度下 BTM 动态特性数据

Table 2 BTM dynamic characteristic data at different v

速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	T_D/ms	n_D/bit	$N_D/\text{帧}$
120	21.186 8	11 959.525	10.872 3
160	15.852 9	8 948.645	8.135 1
200	12.669 3	7 151.566	6.501 4
250	10.130 5	5 718.465	5.198 6
300	8.417 3	4 751.398	4.319 5
350	7.192 4	4 059.966	3.690 9

接收安全报文帧数从 10.872 3 帧减小到 3.690 9 帧。

3.2 考虑角度偏差的应答器动态特性分析

列车在高速行驶过程中,震动易造成应答器发生随机相对位移,出现位置偏差。SUBSET-036 中规定,应答器安装角度误差倾斜角为 $\pm 2^\circ$,俯仰角为 $\pm 5^\circ$,偏转角为 $\pm 10^\circ$,但是并未给出当发生角度偏差或超过这个范围时应答器信息传输受到怎样影响、传输性能指标有怎样变化、对列车的安全运行有怎样影响,以致现场维护时存在

效率低等问题,本文将分析在速度相同情况下不同偏转、俯仰、倾斜角度及不超过这个范围达到临界值时不同速度下应答器的信息传输指标变化。

结合式(1)~(17),代入相关参数(以纵向安装为例)仿真 $v=300\text{ km/h}$ 时不同角度偏差下、角度偏差一定不同速度等级下的 BTM 感应电动势幅值包络曲线如图 13 所示,计算不同条件下应答器系统动态特性数据,如表 3 所示。

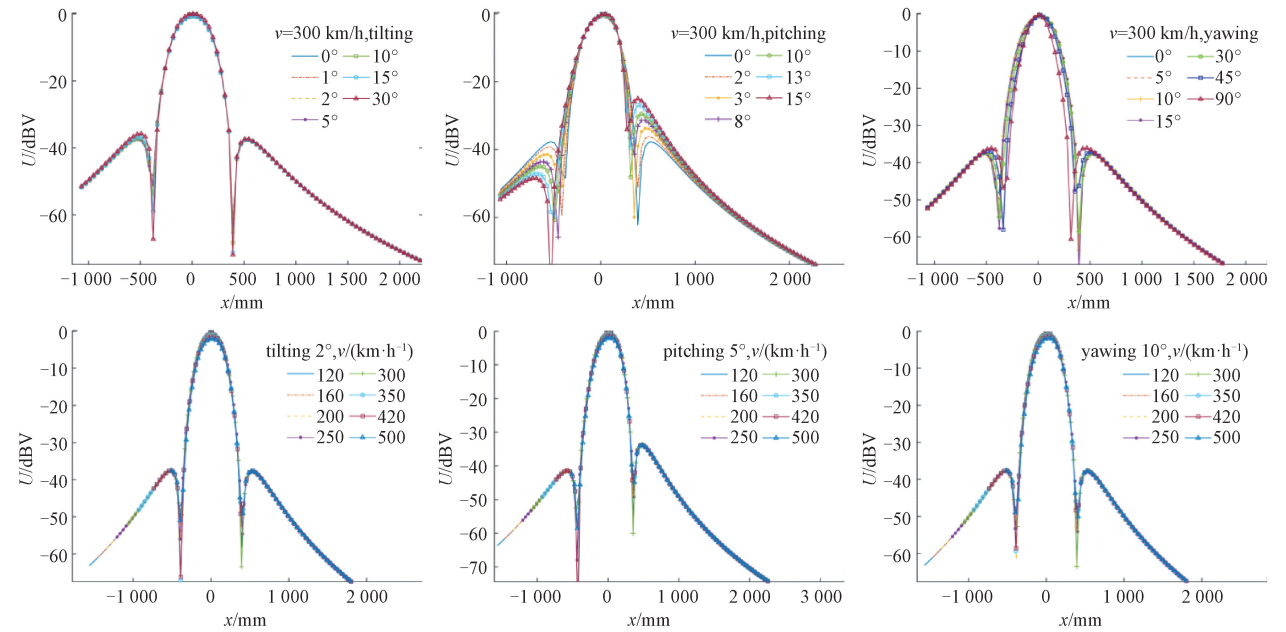


图 13 不同条件下 BTM 感应电动势幅值曲线

Fig. 13 Amplitude curve of BTM induced electromotive force under different conditions

表 3 不同条件下动态作用距离与作用时间数据

Table 3 Dynamic contact length and action time data under different conditions

特性指标	$v=300\text{ km/h}$				$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$		$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$		$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$		$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	
	倾斜角/ $(^\circ)$		俯仰角/ $(^\circ)$		偏转角/ $(^\circ)$		倾斜 2°		俯仰 5°		偏转 10°	
	1	2	2	5	5	10	250	350	250	350	250	350
L_D/mm	700.85	700.31	700.75	698.47	699.83	697.19	702.19	697.38	705.23	696.65	697.74	692.91
T_D/ms	8.410 2	8.403 7	8.409 0	8.381 6	8.397 9	8.366 3	10.111 5	7.173 1	10.155 3	7.165 5	10.047 4	7.127 1

由图 13 与表 3 可知,当列车运行速度一定,应答器发生角度偏差时,其作用距离均减小,影响程度由大到小依次为偏转、俯仰、倾斜,应答器发生倾斜,其作用距离变化范围在 3 mm 以内,应答器发生俯仰,其作用距离变化范围在 5 mm 以内,应答器发生偏转,其作用距离变化范围在 10 mm 以内。当速度 $v=300\text{ km/h}$ 时,应答器倾斜 2° ,俯仰 5° ,偏转 10° 相比应答器没有发生角度偏差时作用距离分别减小 1.134、2.974、4.254 mm, BTM 作用时间分别减小 0.013 6、0.035 7、0.051 0 ms。当应答器倾斜 2° ,俯仰 5° ,偏转 10° , v 从 250 km/h 增加到

350 km/h 时,应答器作用距离分别减小 4.81、8.58、4.83 mm。

仿真计算不同条件下 BTM 接收到的比特数变化趋势如图 14、表 4 所示。

由图 14 表 4 可以看出当列车高速运行时(以 $v=300\text{ km/h}$ 为例),应答器发生倾斜与偏转,BTM 接收比特数随角度增大而减小,应答器倾斜角度每增加 1° ,BTM 接收比特数减少 2.941 8 bit,应答器偏转角每增加 1° ,BTM 接收比特数减少 3.622 5 bit,应答器发生俯仰时,俯仰角为正一边旁瓣区磁场强度增强,有效作用距离减小,

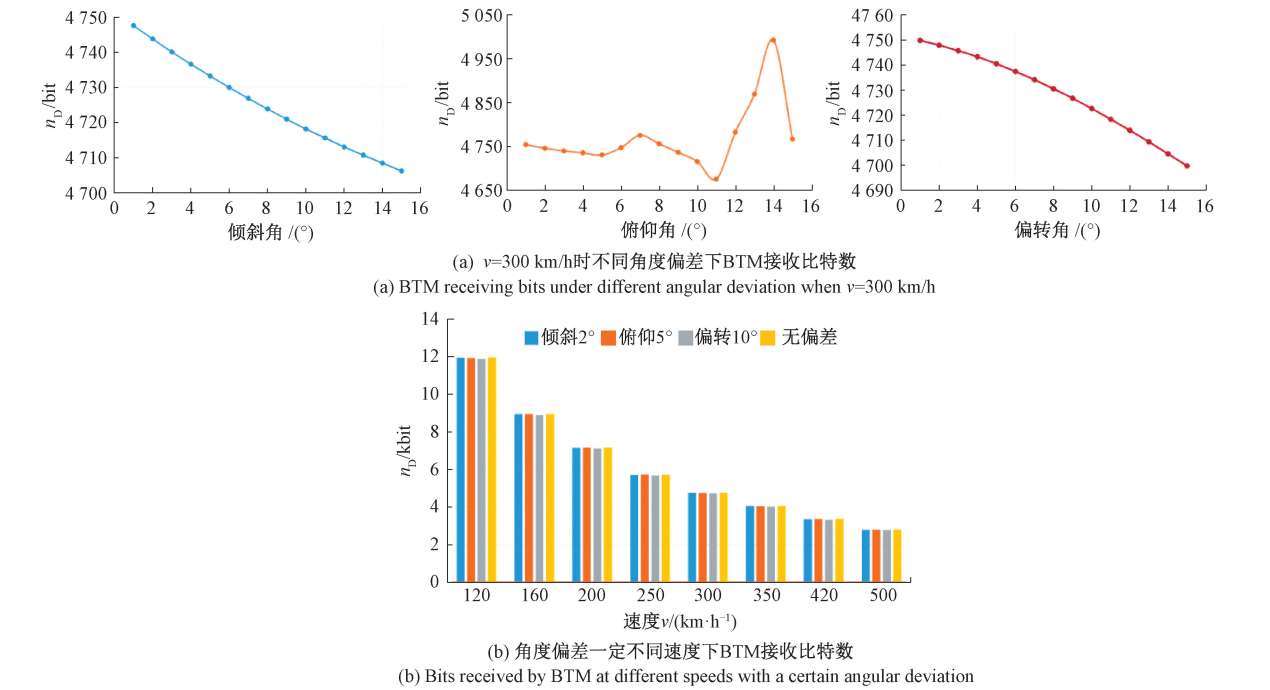


图 14 BTM 接收比特数与速度、角度偏差关系

Fig. 14 Relationship between BTM received bits and speed and angular deviation

表 4 不同条件下 BTM 动态接收比特数数据

Table 4 BTM dynamically receives bit data under different conditions

动态特性	$v=300\text{ km/h}$			$v_{\text{倾斜 } 2^{\circ}}$		$v_{\text{俯仰 } 5^{\circ}}$		$v_{\text{偏转 } 10^{\circ}}$	
	倾斜 2°	俯仰 5°	偏转 10°	250	350	250	350	250	350
n_D/kbit	4.743 7	4.731 3	4.722 6	5.707 8	4.049 1	5.732 6	4.044 8	5.671 5	4.023 1

俯仰角为负一边旁瓣区磁场强度减弱,有效作用距离增加,俯仰角小于 6° 时,应答器作用距离随角度增加而减小,俯仰角在 $6^{\circ}\sim 11^{\circ}$ 之间其作用距离随角度增大先增大后减小,俯仰角超过 11° 不超过 14° 时,其作用距离逐渐增加且在 14° 处达到最大。应答器倾斜 2° ,俯仰 5° ,偏转 10° 比无角度偏差时在不同速度下 BTM 接收比特数平均减少量分别为:9.281 6、8.894 1、40.556 6 bit。

3.3 时速 400 km 以上应答器传输系统适应性分析

时速 350 km 是目前我国高速铁路最高设计标准,近日,在济郑高铁濮阳至郑州段,我国新型复兴号高速综合检测列车成功实现明线上单列时速 435 km,相对交会时速 870 km,创造了高铁动车组列车明线交会速度世界纪录,中国科学院院士翟婉明教授用“翟模型”对时速 400 km 线路设计参数进行仿真验算,得出“设计时速 400 km,曲线参数可行”的结论^[20],本节对列车时速 400 km 及以上时应答器适用性进行分析。

仿真计算列车时速 400 km 及以上且应答器位置在自然灾害等因素下发生严重偏移(倾斜 2° ,偏转 10°)时应答器传输系统动态特性参数如表 5 所示。

表 5 时速 400 km 及以上 BTM 动态特性数据

Table 5 Dynamic characteristic data of BTM with speed of 400 km/h and above

速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	T_D/ms	n_D/bit	$N_D/\text{帧}$
400	6.194 3	3 496.5	3.178 7
420	5.876 1	3 316.9	3.015 4
440	5.626 5	3 176.0	2.887 3
460	5.334 1	3 011.0	2.737 3
480	5.147 8	2 905.8	2.641 6
500	4.883 7	2 756.7	2.506 1

铁道技术标准规定应答器传输系统 BTM 接收报文比特误码率应小于 10^{-6} ,当报文类型为长报文(1 023 bit),BTM 译码时间窗为 1 100 bit,时间窗滑动间隔为 100 bit 时,在无外界电磁干扰时,认为 BTM 动态接收到的比特数被其连续无错解调出,根据数理统计理论,仿真计算应答器位置产生偏差时不同运行速度下 BTM 失败译码的概率与接收到的比特数关系如图 15 所示。

列车时速达到 400 km 以上不超过 500 km 时,BTM 接收到的报文比特数大于 2 500 bit,接收报文安全帧数大于 2.5 帧,失败译码的概率小于 10^{-6} 。满足误比特率

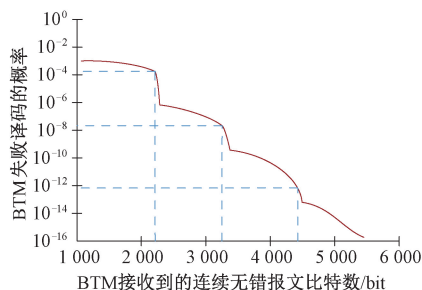


图 15 BTM 接收报文比特数与失败译码概率间的关系

Fig. 15 Relationship between bit number of BTM received message and decoding failure probability

的条件下, BTM 接收报文安全帧数应大于 3 帧^[21], 现场使用的应答器会因车体震动自然灾害等原因发生随机位置偏差, 在此环境下现状应答器传输系统可适用的高速限值应为 420 km/h。

4 结 论

通过建立 BTM 接收上行链路信号动态模型, 仿真计算在不同列车运行速度和角度偏差(倾斜、俯仰、偏转)下应答器传输性能指标参数, 分析对其传输性能的影响, 研究得出:

1) 应答器位置正常没有发生角度偏差时, 列车运行速度越大, 应答器作用距离越小, 当速度 v 超过 250 km/h 时其作用距离减小越明显, 速度 v 每增加 50 km/h 应答器作用区磁场强度减小 0.2 dB。BTM 动态作用时间、动态接收比特数、动态接收安全报文帧数与列车速度成反比。

2) 列车运行速度一定, BTM 动态接收比特数随应答器倾斜角、偏转角的增大呈线性减小, 应答器发生俯仰其性能指标呈现波动变化, 在现场施工维护过程中应重点对应答器倾斜偏转进行查验。

3) 当列车时速超过 400 km 不超过 500 km, 因震动应答器发生随机位置偏差, BTM 动态接收比特数均大于 2 700 bit, 安全报文帧数大于 2.5 帧, 满足 BTM 接收报文误比特率的条件下现状应答器传输系统的可适用速度限值为 420 km/h。

本文结合不同列车运行速度和应答器位置角度偏差, 对应答器信息传输性能所受影响进行分析, 为现场施工维护和更高速度等级下应答器的适用性提供了理论依据。论文没有考虑电磁干扰情况, 后续需对干扰存在时的工作情况进一步讨论。

参考文献

[1] 李建国, 康耀军, 马尚鹏. ZPW2000 系列移频信号谐波干扰处理方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 184-193.
LI J G, KANG Y J, MA SH P. Research on harmonic

interference processing method of ZPW2000 series frequency shift signals. [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (3): 184-193.

- [2] GENG Q, WEN Y H, ZHANG D, et al. Analysis of electromagnetic coupling characteristics of balise transmission system based on digital twin [J]. Applied Science, 2021, 11(6002): 1-24.
- [3] 赵会兵, 唐抗尼, 李伟, 等. 应答器传输模块的动态特性及高速条件下的适用性评价[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 93-98.
ZHAO H B, TANG K N, LI W, et al. The dynamic characteristics of balise transmission module and the assessment on its adaptability under high speed condition[J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 93-98.
- [4] 李正交, 蔡伯根, 戴胜华, 等. 考虑列车运行速度的应答器传输系统可靠性评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 86-93.
LI ZH J, CAI B G, DAI SH H, et al. Reliability evaluation of balise transmission system considering train velocity [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(12): 86-93.
- [5] 许波, 王俊飞, 李鹏, 等. 应答器传输系统作用过程分析[J]. 铁道技术监督, 2018, 46(8): 32-35.
XU B, WANG J F, LI K, et al. Analysis of action process of Balise transmission system [J]. Railway Quality Control, 2018, 46(8): 32-35.
- [6] 许庆阳, 杨吉, 孟景辉, 等. 基于检测数据的应答器动态特性影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 1-7.
XU Q Y, YANG J, MENG J H, et al. Analysis of factors influencing balise dynamic transmission performance based on dynamic detection data [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 1-7.
- [7] 付连著. 350 km/h 以上速度条件下信号系统适应性及关键技术研究[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(4): 1-6.
FU L ZH. Research on adaptability and key technologies of signal system at speeds above 350 km/h [J]. Railway Signaling & Communication, 2020, 56(4): 1-6.
- [8] ZHAO L H, JIANG Y. Modeling and optimization research for dynamic transmission process of balise telepowering signal in high-speed railways [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 140(4): 563-588.
- [9] 李雪, 刘中田. 应答器安装角度偏差对传输性能的影响研究[J]. 铁道通信信号, 2017, 39(1): 83-89.
LI X, LIU ZH T. Study on influence of balise installation angular deflection on transmission performance [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1): 83-

- 89.
- [10] 王通, 赵林海. 基于电磁感应原理的应答器系统旁瓣成因分析及应用[J]. 铁道学报, 2019, 41(4): 111-117.
WANG T, ZHAO L H. Cause analysis and application of balise system side-lobe based on electromagnetic induction[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 111-117.
- [11] LIANG D, ZHAO H B, ZHU L F, et al. The dual-channel balise transmission system for chinese existing railway[C]. International Conference on Progress in Informatics and Computing, IEEE, 2016: 421-426.
- [12] 梁迪, 赵会兵, 全宏宇, 等. 应答器传输系统的电磁耦合机理及工程安装优化研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 64-70.
LIANG D, ZHAO H B, QUAN H Y, et al. Research on electromagnetic coupling mechanism and mounting parameter optimization of balise transmission system[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(5): 64-70.
- [13] LÜ C J, ZHAO H B. Research on balise up-link signal processing method based on cognitive control[C]. Industrial Electronics & Applications. Auckland: IEEE, 2015: 405-409.
- [14] 张友鹏, 王亚惠, 杨妮. 基于折扣证据理论的应答器系统风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(9): 1990-1997.
ZHANG Y P, WANG Y H, YANG N. Risk assessment of balise system based on discount evidence theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1990-1997.
- [15] 国家铁路局. 应答器传输系统技术条件: TB/T 3485-2017, [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
State Railway Administration. Technical specification of balise transmission system: TB/T 3485-2017, [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [16] Union Industry of Signaling. SUBSET-036-V3.1.0 Form Fit Interface Specification for Euro-balise[S]. Alstom Ansaldo AZD Bombardier CAF Siemens Thales, 2015.
- [17] Union Industry of Signaling. SUBSET-085-V222 Test Specification for Eurobalise Form Fit Function Interface Specification[S]. Brussels: Alstom Ansaldo Signal Bombardier Invensys Rail Siemens, 2007.
- [18] EN-50126 Railway Application-The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)[S]. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2017.
- [19] 张鑫奎, 李建国, 薛千树. 安装高度及角度偏差对应答器作用距离影响研究. [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(3): 1-8.
ZHANG X K, LI J G, XUE Q SH. Research on the influence of installation height and angular deviation on the contact length of balise [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(3): 1-8.
- [20] 翟婉明, 姚力, 孙立, 等. 基于车辆-轨道动力学的400 km/h 高速铁路线路平面参数设计研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 1-10.
ZHAI W M, YAO L, SUN L, et al. Research on route plan design parameters of 400 km/h high-speed railway based on vehicle-track coupling dynamics [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 1-10.
- [21] 陈小梅. 时速400 km以上高速铁路应答器传输系统适应性研究. [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(4): 1-5.
CHEN X M. Research on adaptability of balise transmission system of high-speed railway with speed above 400 km/h [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(4): 1-5.

作者简介



E-mail: lijanguo@mail.ljztu.cn

Li Jianguo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1998, M. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2005 and Ph. D. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2011. He is now an associate professor of Lanzhou Jiaotong University. His main research interests are traffic information control engineering and intelligent transportation.



Zhang Xinkui received his B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2018. He is now a M. Sc. candidate in traffic information engineering and control at the school of automation and electrical engineering, Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include traffic information control engineering and transmission performance of high-speed railway balise system.

李建国 (通信作者), 1998 年于电子科技大学获得学士学位, 2005 年于兰州交通大学获得硕士学位, 2011 年于兰州交通大学获得博士学位, 现为兰州交通大学副教授, 主要研究方向为交通信息控制工程和智能交通。

张鑫奎, 2018 年于兰州交通大学获得学士学位, 现为兰州交通大学自动化与电气工程学院交通信息工程及控制专业硕士研究生, 主要研究方向为交通信息控制工程和高速铁路应答器系统传输性能。
E-mail: 2870318869@qq.com