

# 金属物对应答器上行链路电磁传输性能的影响<sup>\*</sup>

李建国<sup>1,2</sup>, 张鑫奎<sup>1</sup>, 薛千树<sup>1</sup>

(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** 针对应答器周围存在大量金属物影响其电磁传输性能的问题,在电磁场仿真软件中建立应答器天线模型,从金属面面积、金属面到应答器垂直距离及金属面厚度 3 个方面进行仿真实验,得到不同参数下应答器上行链路信号幅度曲线,计算应答器传输性能指标值并分析其传输性能所受的影响。研究表明:金属面面积越大,应答器传输模块(balise transmission module, 简称 BTM)接收安全报文帧数等性能指标越小,且减小程度越明显,来自旁瓣区的干扰越大,当金属面积大于 320 mm×320 mm 时,不能满足应答器上行链路场强一致性要求;金属面到应答器距离绝对值越大,来自旁瓣区干扰越小,其值大于 123 mm 时才能满足场强一致性要求;金属面厚度越大,来自旁瓣区干扰越大,其厚度不应超过 1 mm。

**关键词** 应答器;金属物;上行链路;传输性能

**中图分类号** TH702

## 引言

我国列控系统(Chinese train control system, 简称 CTCS)在轨道电路基础上增加点式应答器,采用点连式完成车地间通信,其中应答器向车载设备提供线路速度、临时限速、线路基本参数、等级转换及特殊定位等信息<sup>[1-2]</sup>。我国铁路基础设备中,从 CTCS-1 级至 CTCS-4 级均用到应答器,但因其高灵敏度也易受到外界干扰,给现场维护带来不便,对铁路信号安全产生威胁。应答器周围存在大量金属物,当电磁波遇到金属良导体时,27 MHz 与 4 MHz 左右的电磁波几乎不能穿透金属良导体进行传播,故应答器在安装时其周围一定范围内要避免存在金属物,或对金属物的面积、厚度等做出限定。

应答器传输系统(balise transmission system, 简称 BTS)结构复杂,学者们从不同角度研究了该系统的传输性能。朱林富等<sup>[3]</sup>采用场分析法与等效电路网络法分析了系统天线周围放置混凝土道床和钢轨时系统天线的调谐频率、反射系数及磁场分布。罗丽燕等<sup>[4]</sup>仿真分析护轮轨对应答器的干扰,通过对护轨开槽尺寸进行优化,找出最合理开槽尺寸。赵会兵等<sup>[5]</sup>通过仿真各类损耗介质下电磁波的穿透

特性,得到各类损耗介质和金属介质影响下应答器天线的有效作用范围。文献[6-7]通过建立应答器天线空间磁场分布模型研究了应答器安装高度、角度偏差等对其电磁传输性能的影响。Geng 等<sup>[8]</sup>建立了应答器传输系统数字孪生模型,分析了 BTM 天线与地面应答器间下行能量传输和上行数据发送过程。李正交等<sup>[9]</sup>基于马尔可夫模型提出 BTS 的可靠性评估方法,研究了列车速度对 BTS 的可靠性影响。许波等<sup>[10]</sup>分析了应答器传输系统工作过程及原理,研究应答器输入输出随空间时间的变化关系。许庆阳等<sup>[11]</sup>结合应答器系统动态检测数据,采用数学方法分析了轨道板类型及速度等因素对应答器性能指标的影响。李雪等<sup>[12]</sup>通过分析应答器 A 接口的传输过程,建立仿真模型对应答器产生的角度偏差做出一致性评估。Lü 等<sup>[13]</sup>提出基于认知控制的应答器系统上行链路信号处理方法,解决应答器信号噪声干扰问题。文献[14-16]基于天线间电磁耦合原理,分析了 BTS 的数据传输过程及旁瓣区感应电压的幅值包络问题。陈小梅<sup>[17]</sup>研究了列车速度达到 400 km/h 及以上时应答器传输系统的适应性。

针对应答器周围金属物对其系统传输性能的影响,笔者研究了应答器传输系统的工作原理,在电磁

<sup>\*</sup> 教育部高校产学研创新基金资助项目(2023IT185);甘肃省科技厅省属科研院所创新能力专项资助项目(24CXTA005);甘肃省教育厅高等学校创新创业教育示范课程资助项目(202306);中国铁道科学研究院集团有限公司科研资助项目(2024YJ391);兰州交通大学实验教改重点资助项目(2024004)

收稿日期:2023-05-08;修回日期:2023-11-28

场仿真软件中建立应答器天线模型,仿真不同金属面面积、金属面到应答器垂直距离及不同金属面厚度下应答器上行链路信号幅度曲线,分析了电磁穿透特性与传输性能。

## 1 应答器系统作用原理

应答器主要由壳体、灌封材料及电路板组成。电路板安装于壳体内,包含用于发送上行信号与接收射频能量的电磁感应耦合线圈,在特定点实现车地间高速点式信息传输。应答器电路板原理图如图1所示,整个电路的核心是应答器控制模块。应答器被激活后,其首先判断C接口传来的数据是否有效,若有效则将该接口传来的数据连续发送;若无效或没有数据,将储存在应答器中的固定报文发送。不论是有效数据还是默认信息,对其进行频移键控(frequency shift keying, 简称FSK)调制,将调制后的信息传给数据收发模块,进行功率放大,然后通过耦合线圈发行发送过程。本研究以无源应答器为例进行仿真。

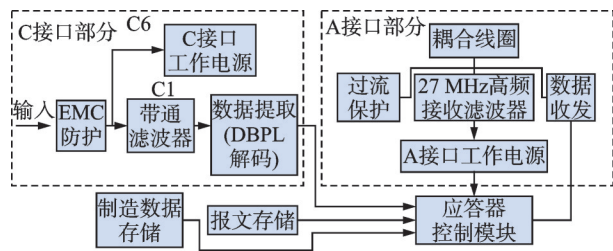


图1 应答器电路板原理图

Fig.1 Schematic diagram of balise circuit board

高速铁路车地信息传输过程包括下行激励和上行发送。列车运行经过应答器上方时,BTM发射天线向地面连续发送  $27.095\text{ MHz} \pm 5\text{ kHz}$  的高频电磁能量,通过电磁耦合激活地面应答器,将存储在在地面应答器中的线路数据、临时限速等报文信息发给BTM接收天线,频率为  $4.234\text{ MHz} \pm 175\text{ kHz}$  (频偏为  $282.24\text{ kHz}$ ,上下边频分别为  $4.516\text{ MHz}$  和  $3.951\text{ MHz}$ ),传输速率为  $564.48\text{ kbit/s}$ ,通过BTM解码后将信息传给车载计算机,该传输过程持续进行直至能量消失。BTS传输过程如图2所示。

## 2 应答器天线建模与验证

### 2.1 模型建立

参考环线是围绕有效参考区域的环状导体,用来模拟测试应答器特性,大尺寸参考环为

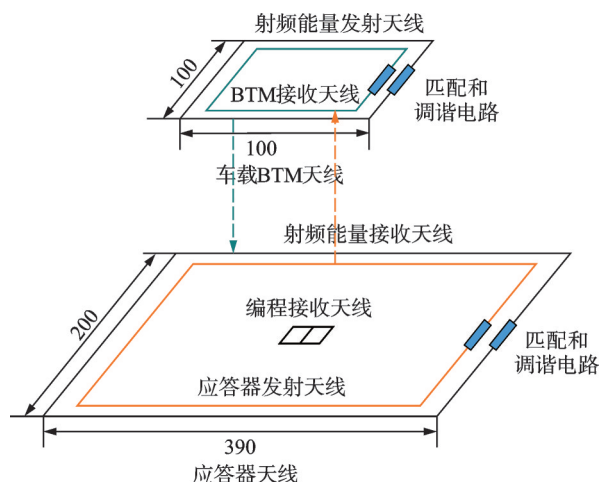


图2 BTS传输过程(单位:mm)

Fig.2 BTS transmission process (unit:mm)

$358\text{ mm} \times 488\text{ mm}$ 。笔者选取标准参考环进行建模仿真应答器电磁特性,其尺寸为  $390\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,由4节横截面为  $20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的实心铜条、印制电路板(printed circuit board,简称PCB)、绝缘连接板和螺纹连接器(thread neill-concelman connector,简称TNC)组成。4段铜条通过绝缘板与PCB板连接形成一个矩形环,TNC主要向参考环供电。标准尺寸参考环结构如图3所示。

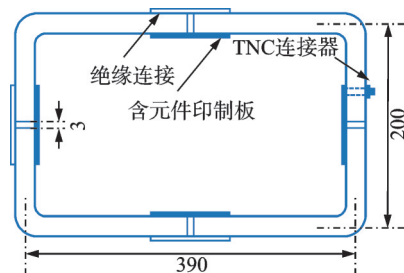


图3 标准尺寸参考环结构(单位:mm)

Fig.3 Standard size reference loop overall configuration (unit:mm)

PCB板上安装电容  $C_1$ 、 $C_2$  和电感  $L_2$ ,并与电感  $L_1$  相连。PCB板电路元件如图4所示。其中: $L_1$  为1节铜条的电感值,其大小等于标准尺寸参考环电感的  $1/4$ ;  $L_2$  为空心线圈,其感抗值与  $L_1$  相当;  $C_1$ 、 $C_2$  的温度系数接近0。

当列车经过应答器上方时,BTM发射天线向地

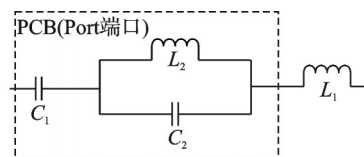


图4 PCB板电路元件

Fig.4 PCB board circuit components

面连续发送 27.095 MHz 的高频电磁能量,激活应答器后,应答器发送中心频率为 4.234 MHz 的 FSK 信号用于传输报文。BTM 接收到的上行链路信号电压不仅与流经应答器发射天线的电流强度呈正比关系,而且用于模拟应答器天线的参考环必须调谐到 27.095 MHz 和 4.234 MHz 处,即必须得到合适的  $L_2$ 、 $C_1$  和  $C_2$ 。 $L_2$  与  $L_1$  近似相等。 $C_1$  和  $C_2$  的选取原则如下:在 4.234 MHz 时  $C_2$  的阻抗可以忽略;在 27.095 MHz 时  $C_1$  的阻抗可以忽略。

$f_c=4.234$  MHz 时,谐振频率公式为

$$\omega_1 = 2\pi f_c = \sqrt{1/(L_1 + L_2)C_1} \quad (1)$$

$f_c=27.095$  MHz 时,谐振频率公式为

$$\omega_2 = 2\pi f_c = \sqrt{(L_1 + L_2)/L_1 L_2 C_2} \quad (2)$$

首先,将 PCB 板短路确定电感  $L_1$  的值,再确定  $L_2$  的值,并根据式(1)、式(2)计算  $C_1$  和  $C_2$  的值。在 FEKO 软件中通过计算 27.095 MHz 时参考环的电抗来调整  $C_2$ ,通过计算 4.234 MHz 时参考环的电抗来调整  $C_1$ 。经过反复调整后确定  $L_2=30$  nH,  $C_1=7.036$  nF,  $C_2=1.299$  3 nF。为减少 FEKO 软件对应答器参考环模型的计算量,在参考环每个 Port 端口加入图 4 所示电路代替 PCB 板。应答器参考环模型如图 5 所示。

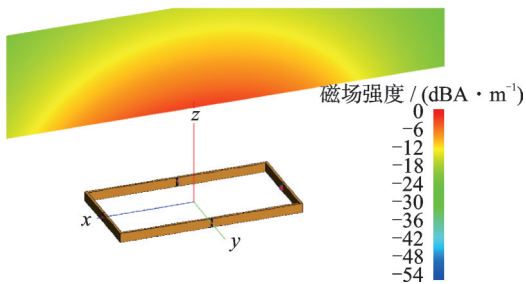


图5 应答器参考环模型

Fig.5 Balise reference loop model

## 2.2 模型仿真结果与验证

铁道行业标准<sup>[18]</sup>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,应答器输出信号强度与参考磁场差值构成上行链路的一致性偏差,其单位为 dB。上行链路参考磁场与限定见图 6。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

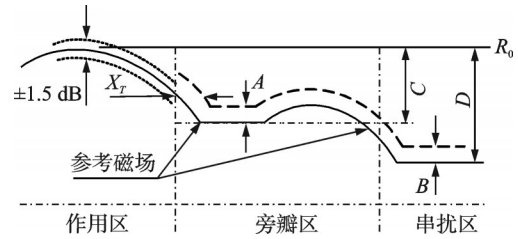


图6 上行链路参考磁场与限定

Fig.6 Reference field and limits of up-link

强差值在  $\pm 1.5$  dB 内,旁瓣区定义为  $-1\ 300$  mm  $< x < +1\ 300$  mm,  $-1\ 400$  mm  $< y < +1\ 400$  mm,  $+220$  mm  $< z < +460$  mm (包含作用区),场强差值在  $5 \sim -\infty$  dB 之间,其参考磁场相比  $z_0=220$  mm 时作用区磁场限制为  $C$ ,不小于 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 之间,其参考磁场相比  $z_0=220$  mm 时作用区磁场限制为  $D$ ,不小于 60 dB。在调谐后的应答器参考环模型中加入频率为 1 MHz~60 MHz、电压为 1 V 的电源,通过矩量法计算参考环线阻抗,仿真 3.951 MHz、4.234 MHz 及 4.516 MHz 时应答器上行信号幅度曲线。参考环模型仿真结果如图 7 所示。

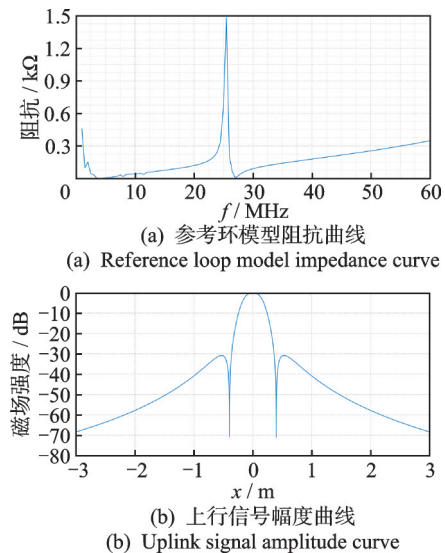


图7 参考环模型仿真结果

Fig.7 Reference loop model simulation diagram

由图 7 可知,应答器发送 4.234 MHz 时的信号最强,旁瓣区峰值与作用区峰值相差大于 30 dB,串扰区峰值与作用区峰值相差大于 60 dB,符合应答器上行链路场强一致性要求。应答器参考环模型阻抗模值几乎为 0,说明模型可以很好地调谐到上行信号传输频率与下行射频能量发送频率。在实验室设定参考环测试条件,通过环线电阻特性验证模型。信号发生器用来给参考环加上不同频率,使用



功率计测量参考环输入端口电压。在功放输出功率不变的情况下,该端口电压越小表示参考环阻抗越小,该端口电压越大表示参考环阻抗越大。测试连接与测试结果如图8所示。由图可以看出,当所加信号为4 MHz和27 MHz左右信号时,电路呈调谐状态,输入电压最小。经分析,参考环模型仿真数据与实测数据相符,验证了模型的正确性与适用性。

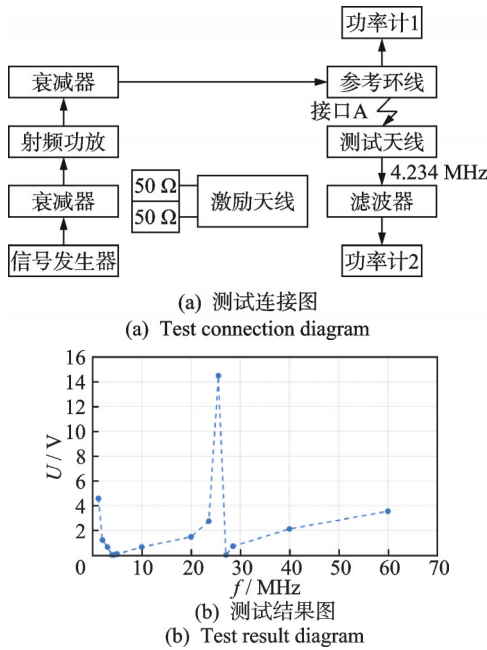


图8 测试连接与测试结果

Fig.8 Test connection and test result

### 3 仿真分析

#### 3.1 应答器周围无金属空间分析

当电磁波遇到金属良导体时仅集中在良导体的表面,27 MHz与4 MHz左右的电磁波几乎不能穿透金属良导体进行传播。为避免金属导体对电磁波的衰耗,应答器在安装时其周围一定范围内应避免存在金属物。根据铁道行业标准规定,应答器无金属空间与安装位置见图9。其中, $z$ 轴正向无金属空间高于应答器的轨面,若应答器横向安装,将图9中的应答器 $z$ 轴旋转 $90^\circ$ , $y$ 方向的无金属距离变为410 mm, $x$ 方向无金属距离变为315 mm,在无金属空间范围内不能存在电气闭合回路。设金属物面至应答器中心点距离为 $d_{\text{object}}$ ,金属物长度为 $l_{\text{object}}$ 。

应答器极端靠近金属面安装时,应根据金属量来调整安装高度,金属面位于轨面以下,距离 $D$ 在186~233 mm之间,标准尺寸应答器与轨面距离 $z_b$ 在-93~-150 mm之间。极端靠近金属面安装时

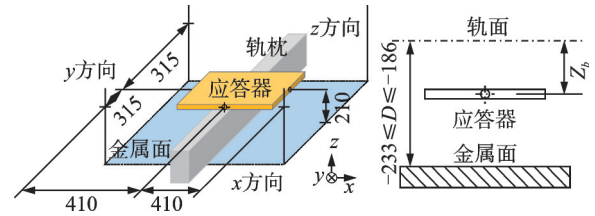


图9 应答器无金属空间与安装位置(单位:mm)

Fig.9 No metal space and installation position for balise (unit:mm)

$z_b$ 取决于 $D$ ,当 $-233 \leq D \leq -193$ 时, $z_b$ 在-93~-103 mm之间;当 $-193 \leq D \leq -186$ 时, $z_b$ 需满足 $d+90 \leq z_b \leq d+100$ 。此时,金属物面至应答器中心点距离 $d_{\text{object}}$ 明显不能满足无金属空间纵向210 mm的要求。笔者研究极端靠近金属面时的情形,分析金属面面积 $S$ 、金属面到应答器距离 $d_{\text{object}}$ 及金属面本身厚度 $d$ 对系统传输性能的影响。由于钢轨为金属体,建模时加入钢轨模型,在 $z_0=220$  mm平面有钢轨时应答器上行信号磁场分布见图10。

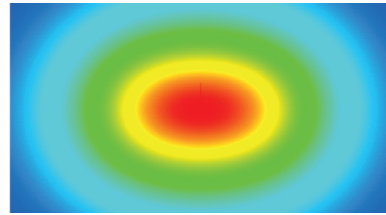


图10 有钢轨时应答器上行信号磁场分布

Fig.10 Magnetic field distribution of balise uplink signal with rails

选取 $z_b=-103$  mm,钢轨类型为50 kg/m,金属面仿真测试模型如图11所示。

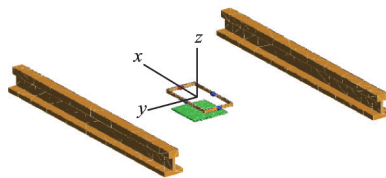


图11 金属面仿真测试模型

Fig.11 Model for metal surface simulation testing

#### 3.2 周围金属面对应答器传输性能影响分析

##### 3.2.1 金属面面积

设金属面与轨面最大距离 $D=-186$  mm, $z_b=-103$  mm,金属面厚度 $d=5$  mm,选取金属面面积 $S=80$  mm $\times$ 80 mm、160 mm $\times$ 160 mm、240 mm $\times$ 240 mm和320 mm $\times$ 320 mm,仿真不同金属面积下上行信号幅度曲线,如图12所示。

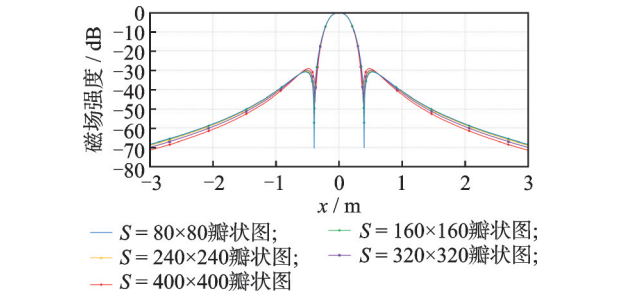


图 12 不同金属面积下上行信号幅度曲线

Fig.12 Upward signal amplitude curve under different metal areas

设列车速度为 300 km/h,计算不同金属面积  $S$  下应答器性能指标数据值,如表 1 所示。

表 1 不同金属面积  $S$  下应答器性能指标数据值

Tab.1 Performance index data values of balise under different metal areas  $S$

$S/\text{mm}^2$	应答器作用距离/ mm	BTM 动态作用时间/ ms	BTM 动态接收比特数/bit	BTM 动态接收安全报文帧数
0	702.16	8.425 9	4 756.3	4.323 9
80×80	702.15	8.425 8	4 756.2	4.323 8
160×160	701.59	8.419 1	4 752.4	4.320 4
240×240	698.41	8.380 9	4 730.9	4.300 8
320×320	688.52	8.262 2	4 663.9	4.239 9
400×400	671.16	8.053 9	4 546.3	4.133 0

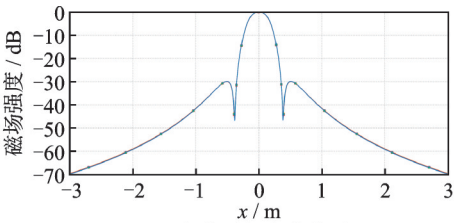
由图 12 与表 1 可知,金属面面积  $S$  越大,应答器作用距离、BTM 接收安全报文帧数等性能指标越小,且减小程度越明显,来自旁瓣区干扰越大。当  $S \leq 240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ ,波瓣图旁瓣区峰值与作用区峰值相差大于 30 dB;当  $S \geq 320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ ,其差值小于 30 dB,不满足上行链路场强一致性要求。当  $S$  从 0 增加到  $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ ,BTM 接收安全报文帧数减小 0.023 1 帧;当  $S$  从  $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$  增加到  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,BTM 接收安全报文帧数减小 0.167 8 帧。

3.2.2 金属面与应答器垂直距离

设  $z_b = -103 \text{ mm}$ ,金属面厚度  $d = 5 \text{ mm}$ ,金属面积  $S = 320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ ,选取  $d_{\text{object}}$  为  $-83$ 、 $-93$ 、 $-103$ 、 $-113$  和  $-123 \text{ mm}$ ,仿真不同  $d_{\text{object}}$  下的上行链路信号幅度曲线,如图 13 所示。

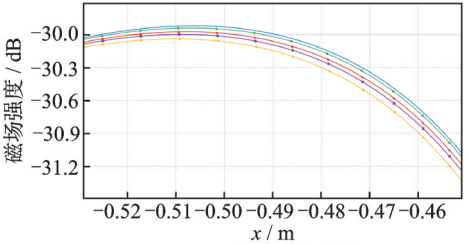
设列车速度为 300 km/h,计算不同  $d_{\text{object}}$  下应答器性能指标数据值,如表 2 所示。

由图 13 与表 2 可知,当  $-233 \text{ mm} \leq D \leq -186 \text{ mm}$  时,金属面到应答器距离  $d_{\text{object}}$  的变化对应



(a) 上行信号幅度曲线对比图

(a) Uplink signal amplitude curve comparison diagram



(b) 旁瓣区放大图

(b) Side lobe area enlarged diagram

—  $d_{\text{object}} = 8$  瓣状图; —  $d_{\text{object}} = 93$  瓣状图;  
—  $d_{\text{object}} = 103$  瓣状图; —  $d_{\text{object}} = 113$  瓣状图;  
—  $d_{\text{object}} = 123$  瓣状图

图 13 不同  $d_{\text{object}}$  下的上行链路信号幅度曲线

Fig.13 Upward signal amplitude curve under different  $d_{\text{object}}$

表 2 不同  $d_{\text{object}}$  下应答器性能指标数据值

Tab.2 Performance index data values of balise under different  $d_{\text{object}}$

$d_{\text{object}}/\text{mm}$	应答器作用距离/ mm	BTM 动态作用时间/ ms	BTM 动态接收比特数/bit	BTM 动态接收安全报文帧数
-83	688.52	8.262 2	4 663.9	4.239 9
-93	688.36	8.260 3	4 662.8	4.238 9
-103	688.32	8.259 8	4 662.5	4.238 6
-113	688.63	8.263 6	4 664.6	4.240 6
-123	689.34	8.272 1	4 669.4	4.244 9

容器传输性能指标几乎无影响,  $d_{\text{object}}$  绝对值从 83 mm 增加到 123 mm,应答器作用距离变化在 1 mm 之内, BTM 接收安全报文帧数变化在 0.005 帧之内。由图 13(b) 可知,  $d_{\text{object}}$  绝对值越大,来自旁瓣区干扰越小,当  $d_{\text{object}}$  绝对值为 83、93 和 103 mm 时,旁瓣区峰值与作用区峰值相差小于 30 dB,不满足上行链路场强一致性要求。当  $d_{\text{object}}$  绝对值为 123 mm 时,其差值大于 30 dB。

3.2.3 金属面厚度

设金属面与轨面最大距离  $D = -186 \text{ mm}$ ,  $z_b = -103 \text{ mm}$ ,金属面积  $S = 320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ ,选取金属面厚度  $d$  为 1、3、5、7 和 9 mm,仿真不同金属面厚度下的上行信号幅度曲线,如图 14 所示。

设列车速度为 300 km/h,计算不同金属面厚度  $d$  下应答器性能指标数据值,如表 3 所示。

由图 14 与表 3 可知,当  $-233 \text{ mm} \leq D \leq$

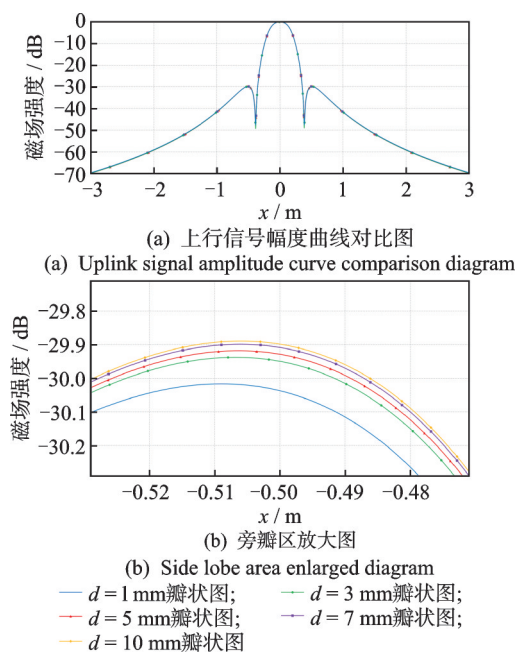


图14 不同金属面厚度下的上行信号幅度曲线

Fig.14 Upward signal amplitude curve under different metal surface thicknesses

表3 不同金属面厚度 $d$ 下应答器性能指标数据值Tab.3 Performance index data values of balise under different metal surface thicknesses  $d$ 

$d/\text{mm}$	应答器作用距离/ mm	BTM 动态作用时间/ ms	BTM 动态接收比特数/bit	BTM 动态接收安全报文帧数
1	690.10	8.281 2	4 674.6	4.249 6
3	688.19	8.258 3	4 661.6	4.237 8
5	688.51	8.262 1	4 663.8	4.239 8
7	688.81	8.265 7	4 665.8	4.241 7
10	689.23	8.270 8	4 668.7	4.244 3

—186 mm时,金属面厚度 $d$ 的变化对应答器传输性能指标几乎无影响。 $d$ 从1 mm增加到5 mm,应答器作用距离变化在2 mm之内,BTM接收安全报文帧数变化在0.006帧之内。由图14(b)可知, $d$ 越大,来自旁瓣区干扰越大,只有 $d=1$  mm时,旁瓣区峰值与作用区峰值相差大于30 dB。

综上所述,得到极端靠近金属面安全区与非安全区划分,如图15所示。

通过仿真实验可知,当应答器周围存在金属面且为极端靠近金属面安装时,在图15所示安全区电磁波几乎无衰耗,应答器信息传输稳定可靠;越过临界值进入非安全区时,应答器周围金属面将影响应答器信息传输,带来旁瓣干扰。

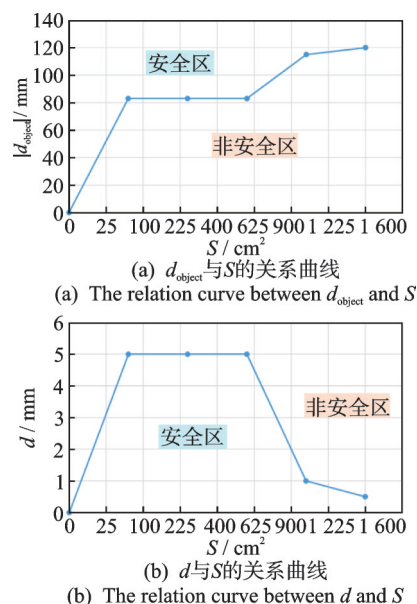


图15 极端靠近金属面安全区与非安全区划分

Fig.15 Division of safety and non safety zones in extreme proximity to metal surfaces

## 4 结 论

1) 金属面积越大,应答器作用距离、BTM接收安全报文帧数等性能指标越小,且减小程度越明显,来自旁瓣区干扰越大。当金属面积 $S \geq 320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ 时,旁瓣区峰值与作用区峰值相差小于30 dB,不能满足上行链路场强一致性要求。

2) 金属面到应答器距离绝对值越大,来自旁瓣区干扰越小,其值大于123 mm时才能满足场强一致性要求。

3) 金属面厚度越大,来自旁瓣区干扰越大,实际应用中其厚度不能超过1 mm,以确保旁瓣区峰值与作用区峰值相差大于30 dB。

## 参 考 文 献

- [1] Union Industry of Signaling. SUBSET-036-V3.1.0 Form fit interface specification for Eurobalise[S]. [S.l.]: Alstom Ansaldo AZD Bombardier CAF Siemens Thales, 2015.
  - [2] 国家铁路局. TB/T 3484—2017 列控系统应答器应用原则[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
  - [3] 朱林富, 李鹏, 王俊飞, 等. 高速铁路应答器传输系统复杂环境适应性研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(12): 62-69.
- ZHU Linfu, LI Kun, WANG Junfei, et al. Study on adaptability of high-speed railway balise transmission system in complex environment[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(12): 62-69.(in Chinese)

- [4] 罗丽燕, 刘中田, 周果. 护轨对应答器干扰的仿真研究[J]. 铁道学报, 2014(10): 59-64.  
LUO Liyan, LIU Zhongtian, ZHOU Guo. Simulation of interference of guardrail in balise[J]. Journal of the China Railway Society, 2014(10): 59-64.(in Chinese)
- [5] 赵会兵, 孟亚松, 梁迪. 空间环境介质对应答器“A”接口性能的影响研究[J]. 铁道学报, 2015(3): 54-58.  
ZHAO Huibing, MENG Yasong, LIANG Di. Study on influence of environmental mediums on performance of interface 'A' of balise system[J]. Journal of the China Railway Society, 2015(3): 54-58.(in Chinese)
- [6] 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): 153-159.  
ZHANG Xinkui, LI Jianguo, XUE Qianshu. Research on the influence of installation height and angular deviation on the contact length of balise[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(3): 153-159.(in Chinese)
- [7] 李建国, 张鑫奎, 郑云水. 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[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 212-221.  
LI Jianguo, ZHANG Xinkui, ZHENG Yunshui. Research on influence of installation angular deviation and train speed on the electromagnetic transmission performance of balise[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 212-221.(in Chinese)
- [8] 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(13): 6002.
- [9] 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 Zhengjiao, CAI Bogen, DAI Shenghua, et al. Reliability evaluation of balise transmission system considering train velocity[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(12): 86-93.(in Chinese)
- [10] 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 Bo, WANG Junfei, LI Kun, et al. Analysis of action process of balise transmission system[J]. Railway Quality Control, 2018, 46(8): 32-35.(in Chinese)
- [11] 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): 166-172.  
XU Qingyang, YANG Ji, MENG Jinghui, et al. Analysis of factors influencing balise dynamic transmission performance based on dynamic detection data[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 166-172.(in Chinese)
- [12] 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]. 铁道学报, 2017, 39(1): 83-89.  
LI Xue, LIU Zhongtian. Study on influence of balise installation angular deflection on transmission performance[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1): 83-89.(in Chinese)
- [13] LÜ C J, ZHAO H B. Research on balise up-link signal processing method based on cognitive control [C] // 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Auckland, New Zealand: IEEE, 2015: 405-409.
- [14] 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 Tong, ZHAO Linhai. 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.(in Chinese)
- [15] LIANG D, ZHAO H B, ZHU L F, et al. The dual-channel balise transmission system for Chinese existing railway [C] // 2016 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC). Shanghai, China: IEEE, 2016: 421-426.
- [16] 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(5): 64-70.  
LIANG Di, ZHAO Huibing, QUAN Hongyu, et al. Research on electromagnetic coupling mechanism and mounting parameter optimization of balise transmission system[J]. Journal of the China Railway Society, 2014(5): 64-70.(in Chinese)
- [17] 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): 159-163.  
CHEN Xiaomei. Research on adaptability of balise transmission system of high-speed railway with speed above 400 km/h[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(4): 159-163.(in Chinese)
- [18] 国家铁路局. TB/T 3485—2017 应答器传输系统技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.



**第一作者简介:**李建国,男,1974年10月生,博士、副教授。主要研究方向为交通信息控制工程和智能交通。曾发表《基于顾客到达拟合的立体车库搬运器待命位设计策略》(《交通运输系统工程与信息》2021年第21卷第6期)等论文。  
E-mail:lijianguo@mail.lzjtu.cn