

# 基于隧道磁阻传感器的车辆探测器研究\*

高俊<sup>1,2</sup>, 王劲东<sup>1</sup>, 仇福伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**设计了一款基于隧道磁电阻传感器(TMR)的车辆探测器。通过理论分析与仿真,确定了车辆探测器的关键指标。对车辆所产生的磁异常信号进行了测量与分析,并根据磁异常信号的特征设计了专用检测电路。在此基础上,对车辆探测器的线性度、噪声、带宽、检测距离、有效探测率等性能指标进行了标定和测试。测试结果表明,该车辆探测器的最远探测距离可达4 m,在3.5 m的探测距离内有效探测率达100%。该车辆探测器拥有精度高、线性度好、体积小、功耗低等优势,适用于高灵敏度的运动车辆目标检测和探测。

**关键词:** 车辆探测; 磁场探测; 隧道磁阻传感器; TMR2103

**中图分类号:** TP212.9 TH866 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Magnetic sensitive automobile detector based on TMR sensor

Gao Jun<sup>1,2</sup>, Wang Jingdong<sup>1</sup>, Qiu Fuwei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An automobile detector is designed based on tunneling magnetoresistance (TMR) sensor. Key specifications of the automobile detector are determined by theoretical analysis and simulation. The characteristics of the magnetic anomaly signals caused by automobiles are measured and analyzed, and the circuit is developed to detect the signals. Performance of the detector is calibrated and tested, including linearity, noise level, bandwidth, detecting distance, and detection rate. Test results show that the farthest response distance of the detector is up to 4 m, and the detection rate is 100% within 3.5 m. The automobile detector has advantages in precision, linearity, dimensions and power consumption, which can be applied into highly sensitive automobile measurement and detection.

**Keywords:** automobile detection; magnetic field measurement; tunneling magnetoresistance (TMR) sensor; TMR2103

## 0 引言

随着交通道路行业的迅速发展以及社会需求的不断扩大,运动车辆信息采集已大范围的覆盖停车场、街道和公路。目前常用的车辆探测的方法主要有环形线圈、视频、微波和磁阻传感器等。环形线圈监测精度高、设计简单,但安装维护比较繁琐。视频探测设计成本高,并且在夜间与恶劣天气状况下检测精度低。微波探测大多应用于高速路段,安装方便,但其容易受环境影响。磁阻传感器具有体积小、环境适应能力强、检测不受天气状况影响、安装维护方便等优势,已经有越来越多的应用<sup>[1-5]</sup>。

地球具有稳定的本底磁场,磁场强度在30 000 ~ 65 000 nT范围内,在一个相对广阔的区域磁场强度基本是恒定的<sup>[6]</sup>。车辆结构通常采用钢材制成,有很强的铁磁性,因此行驶的车辆会对周围的环境磁场产生影响<sup>[7]</sup>。磁阻传感器可以通过测量环境周围磁场的变化来实现运动车辆检测<sup>[8]</sup>。

磁阻传感器的主要类型包括各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)传感器、巨磁阻(giant magnetoresistance, GMR)传感器、隧道磁阻(tunneling magnetoresistance, TMR)传感器<sup>[9]</sup>。

AMR传感器可靠性高、抗干扰能力强、尺寸小,但检测磁场动态范围较窄且灵敏度不高;GMR传感器拥有高

灵敏度和宽测量范围,但价格偏高、尺寸较大。相比于AMR和GMR传感器,TMR传感器技术作为第4代磁传感器应用技术,其具有较高灵敏度,且功耗低、尺寸小、温度稳定性好、工作温度范围宽<sup>[10-12]</sup>。因此TMR传感器更适用于地磁信号的检测,本文将利用TMR传感器设计运动车辆目标探测器。

## 1 TMR磁阻传感器的工作原理

图1所示为磁隧道结(magnetic tunnel junction, MJTs)的结构示意图。磁隧道结的结构主要为自由层/隧穿层/被钉扎层,类似于“三明治”结构。自由层的极化方向受外加磁场的大小和方向影响;隧穿层为一层薄的非铁磁性绝缘层;被钉扎层的极化方向由被钉扎层和反铁磁层之间的耦合作用固定。通过改变外加磁场的大小方向,可以改变自由层与被钉扎层极化方向之间的夹角,使隧穿电阻的阻值发生变化,对应的电阻称之为隧道磁电阻。电阻值发生变化,即TMR效应<sup>[9,13]</sup>。

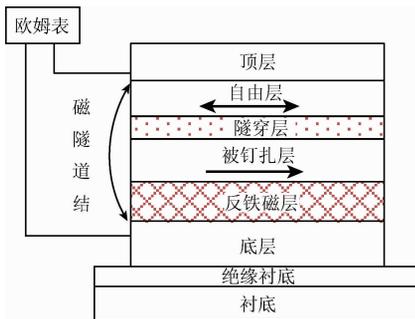


图1 磁隧道结结构示意图

Fig. 1 Diagram of magnetic tunnel junction

为减小电路的温度零点漂移,抑制共模信号,降低电路噪声,TMR磁阻传感器通常会设计成惠斯通桥结构。惠斯通桥<sup>[14]</sup>通常是由4个磁阻元件组成,如图2所示。

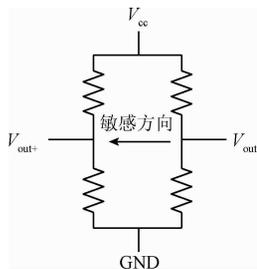


图2 惠斯通桥结构

Fig. 2 Wheatstone bridge structure

根据车辆探测器的设计要求,本文选用了满足设计指标的磁阻传感器:TMR2013芯片。TMR2013具有高灵敏度、宽动态范围、较宽的工作电压范围、低功耗等优点。其

内部结构为一个独立的推挽式惠斯通桥结构,包含4个非屏蔽高灵敏度的TMR传感器元件。当外加磁场沿平行于磁阻传感器的敏感方向变化时,惠斯通桥将会输出差分电压。

## 2 运动车辆探测器的设计

### 2.1 理论分析

车辆的主要结构由钢铁等具有剩磁与感磁的铁磁性材料构成,其在周围空间内会产生一定强度的磁场,使周围的地磁场产生扰动和偏移<sup>[7,15-16]</sup>。因此车辆在其周围空间产生的磁场具有一定的空间分布,这种空间分布近似于磁偶极子磁场的分布规律。在本设计中,探测点的磁场强度为运动车辆产生的磁场 $B_i$ 与均匀地磁场 $B_0$ 的叠加,其中 $B_0$ 为恒定场, $B_i$ 为变化场。

磁偶极子是磁理论研究的最基本单元,自然界的磁现象均可等效于若干个磁偶极子磁场的叠加,在特定情况下也可以等效为一个磁偶极子。磁偶极子产生的磁场空间分布方程如式(1)、(2)所示<sup>[17]</sup>。式(1)为原点位于磁偶极子中心,磁矩为 $M$ 的磁偶极子, $z$ 轴与磁矩 $M$ 方向相同。在空间一点 $P(x, y, z)$ 处的磁感应强度三分量表达式:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\mu}{4\pi} \frac{3xz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} M \\ B_y = \frac{\mu}{4\pi} \frac{3yz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} M \\ B_z = \frac{\mu}{4\pi} \frac{2z^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} M \end{cases} \quad (1)$$

$$B = B_x + B_y + B_z \quad (2)$$

式中: $x, y, z$ 为 $P$ 的空间坐标, $\mu$ 为空间磁导率。

利用式(1)、(2)绘制磁矩大小为 $100 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 的磁偶极子,方向与 $z$ 轴相同的单个磁偶极子,其中心位于空间坐标 $(0, 0, 0)$ 处,图3是在 $Z = 2 \text{ m}$ 的平面内磁场矢量三分量及标量仿真效果图。从图3可以清晰地看出磁偶极子磁场空间分布情况。将目标车辆视为磁偶极子,车辆探测器通过检测磁异常,即可有效探测车辆是否出现。

### 2.2 仿真分析

#### 2.2.1 物理模型

实际车辆的剩磁分布较为复杂,并不能用简单的偶极子模型来表示。为提高分析的有效性,本文利用有限元仿真软件COMSOL Multiphysics对车辆磁场进行仿真分析。仿真设计的物理模型是将车辆简化为具有一定导磁率的壳体,其厚度为 $3 \text{ cm}$ 。

控制方程为 $-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_i + B_0) = 0$ ,其中, $\mu_0$ 是真空磁导率; $\mu_r$ 是相对磁导率,此模型中 $\mu_r = 100$ ;  $V_i$ 为车辆所产生 $B_i$ 的磁场的磁标势,满足 $H = -\nabla V_i$ ;  $B_0$ 为车辆所处地磁场矢量。

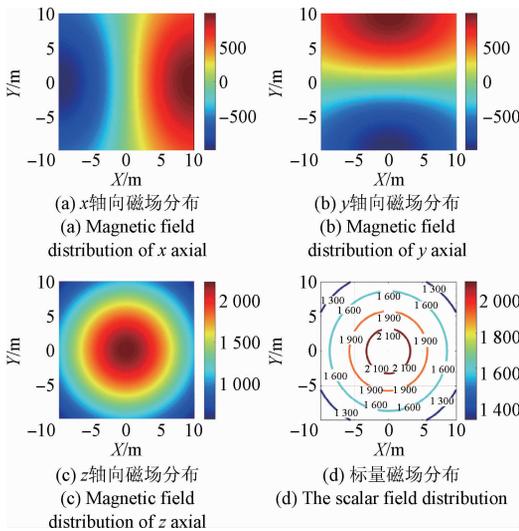


图 3 磁偶极子的磁场空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of magnetic dipole

### 2.2.2 边界条件

计算域的边界条件为  $-n \cdot B_i = 0$ , 其中  $n$  为计算域边界的法向量, 计算域为  $100 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$  的长方体, 车辆位于长方体中心。

车辆与外界介质之间的边界处边界条件为  $n \cdot (B_1 - B_2) = -\nabla_i \cdot d_s (\mu_0 \mu_r \nabla_i V_i)$ , 其中  $d_s$  为车辆外壳厚度  $3 \text{ cm}$ ,  $B_1$ 、 $B_2$  为车辆上下表面磁场。

### 2.2.3 仿真结果

图 4 所示为仿真得到的车辆磁场分布情况图。从图 4 中可以看出车辆的磁场分布与磁偶极子模型存在一定的差异。

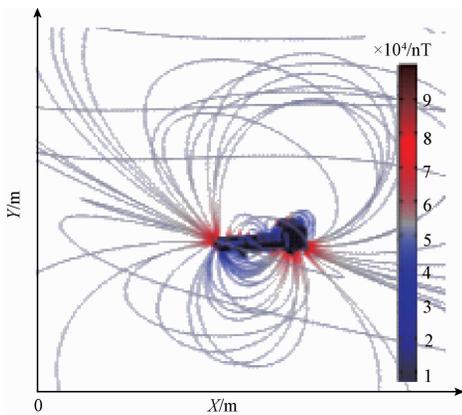
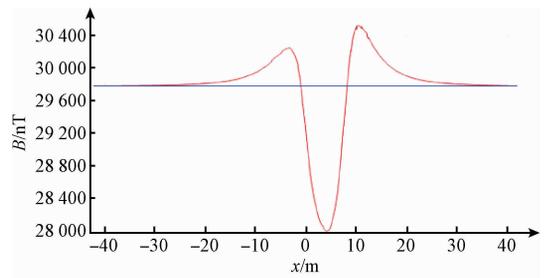


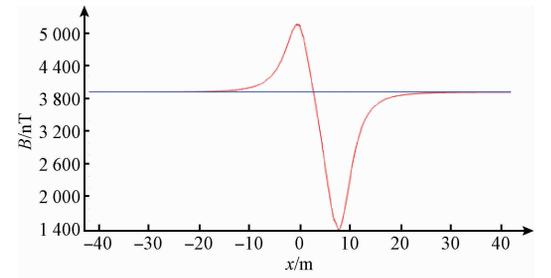
图 4 车辆磁场分布仿真

Fig. 4 The simulated magnetic field of vehicles

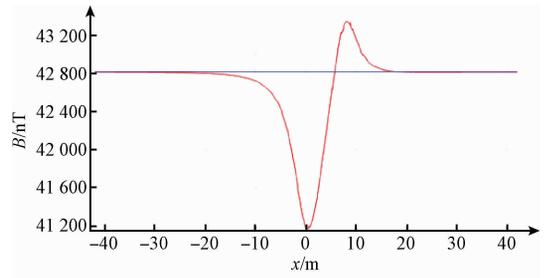
图 5 所示为车辆与探测器的距离为  $3 \text{ m}$ , 于南北方向行驶, 经过车辆探测器时, 仿真得到的探测器周围磁场变化。其中  $X$  轴为车辆运动的方向,  $Y$  轴垂直于车辆运动方向,  $Z$  轴为垂直地面方向。



(a) 磁异常  
(a) Magnetic anomaly of x component



(b) 磁异常  
(b) Magnetic anomaly of y component



(c) 磁异常  
(c) Magnetic anomaly of z component

图 5  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的磁场变化仿真

Fig. 5 The simulated  $x$ ,  $y$ , and  $z$  axis magnetic variations

从图 5 可以看出, 随着车辆靠近探测点, 磁场扰动逐渐变大。在车辆经过的同一时间段内, 3 个方向的磁场都有扰动, 但  $Y$  轴方向的磁场扰动最大。因此车辆探测器设计为单轴磁场信号探测, 且为动态磁场信号检测设计, 车辆探测器的敏感方向与  $Y$  轴平行。

### 2.3 电路设计

#### 2.3.1 设计要求

车辆探测器用于常规道路上行驶的通用载重机动车辆的探测, 探测目标车辆的运动速度区间为  $35 \sim 120 \text{ km/h}$ , 探测距离不小于  $3 \text{ m}$ 。

##### 1) 分辨率要求

结合式(1)和仿真结果可得出车辆磁感应强度  $B$  与距离  $S$ , 如图 6 所示。由图 6 可知探测距离为  $3 \text{ m}$  时, 车辆的磁感应强度为  $2600 \text{ nT}$ , 随着探测距离减小, 磁感应强度增大。由此可确定磁阻传感器的最小分辨率为

2 600 nT。但在设计中为满足实际需要,磁阻传感器分辨率要比理论分辨率高一个数量级。

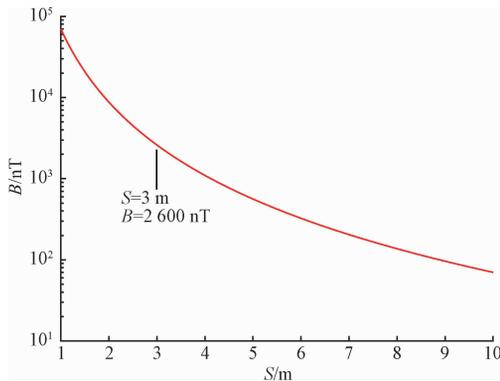


图6 车辆磁感应强度( $B$ )与探测距离( $R$ )的关系

Fig. 6 The relationship between the vehicle's magnetic field ( $B$ ) and the detection distance ( $R$ )

## 2) 频率响应要求

运动车辆检测过程中,车辆探测器测得的车辆磁异常信号始终处于变化过程中。磁场传感器需要测量变化的外磁场。车辆运动速度越快,信号变化的速度也越快。为了满足探测快速运动车辆的要求,车辆探测器需要响应快速变化的磁场。将车辆剩磁简化为一个固定在车身上的单一偶极子,车辆驶过探测器时,探测器可以测量得到一个完整的周期信号。由此可确定车辆行驶速度与磁异常信号频率的关系,如图7所示。常规车辆车身长度  $L$  范围在 4 ~ 12 m,当车辆行驶速度  $V$  处于 10 ~ 33.3 m/s (35 ~ 120 km/h) 时,对应的磁异常信号频率为 0.83 ~ 8.325 Hz。即车辆探测器要求带宽为 0.83 ~ 8.325 Hz。

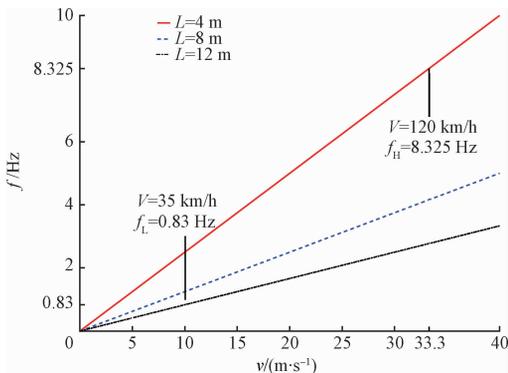


图7 行驶速度( $v$ )与磁异常信号频率( $f$ )的关系

Fig. 7 The relationship between vehicle speed ( $v$ ) and frequency of magnetic anomaly signal ( $f$ )

## 3) 灵敏度要求

为了避免环境干扰产生虚假信号,车辆探测器必须有一个阈值电压。探测过程中,将检测到的电信号与该阈值电压进行比较,高于阈值电压,车辆探测器产生触发

信号,低于阈值电压则无触发信号产生。为避免车辆探测器判断失误,阈值电压需大于环境噪声所产生的电信号值,且小于目标车辆产生的电信号。这个阈值电压就是车辆探测器的灵敏度。

根据分析可知,车辆探测器需满足探测分辨率为 2 600 nT,但在设计中为满足实际需要,磁阻传感器分辨率要比理论分辨率高一个数量级。车辆探测器带宽需满足 0.83 ~ 8.325 Hz,同时需要具备对抗外界磁场干扰的能力,本文中针对上述要求设计了阈值电压调整电路,避免了环境干扰产生虚假信号的问题。根据分辨率和带宽可进行磁阻传感器的选择,本设计所选 TMR2103 满足指标。

## 2.3.2 电路设计

车辆探测器利用 TMR 传感器检测运动车辆信号,TMR 传感器将测量到的磁场信号转换为电信号,传输给信号处理电路。信号处理电路将电信号经过放大、滤波等处理后,传输给比较电路,比较电路将接收到的电信号与阈值电压进行比较,最终实现车辆探测,并将探测到的结果输出。阈值电压值可根据系统最小分辨率的大小、目标车辆产生的磁异常信号强弱而设定,同时需考虑环境噪声的影响。

## 3 车辆探测器实验室参数标定测试

### 3.1 测试环境

测试所用设备包括屏蔽筒、标准线圈、信号发生器,其中线圈的中心轴与屏蔽筒的中心轴重合。将测试板放置于线圈中心处,通过信号发生器给线圈供电,产生不同磁场,可以测量车辆探测器的灵敏度、线性度及频率响应。断开信号发生器,不给线圈供电,屏蔽筒内磁场近似为零磁空间,记录车辆探测器的输出,可以测量探测器的噪声性能。

图8所示为测量时电路板在磁屏蔽桶内的放置状态,图9所示为待测试车辆探测器电路板。

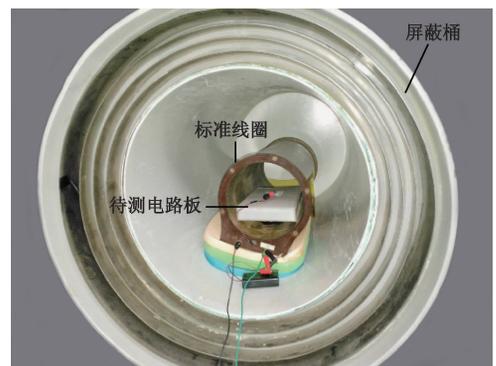


图8 测量环境

Fig. 8 Measuring environment



图 9 测试电路板  
Fig. 9 The test circuit board

### 3.2 系统线性度、灵敏度及频率响应测试

在不同的外加磁场强度情况下,测量放大电路输出端的电压值。如图 10 所示,对不同测试点的数据进行最小二乘法线性拟合,可以得到拟合直线图,图 11 所示为线性度拟合直线误差,并可以计算得到系统最大非线性误差为 0.458 3%。

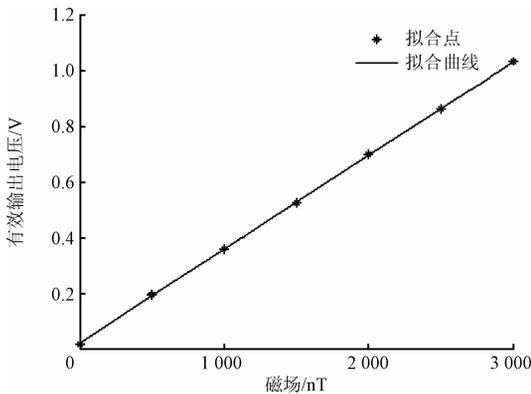


图 10 线性度拟合直线图  
Fig. 10 Linearity fitting line

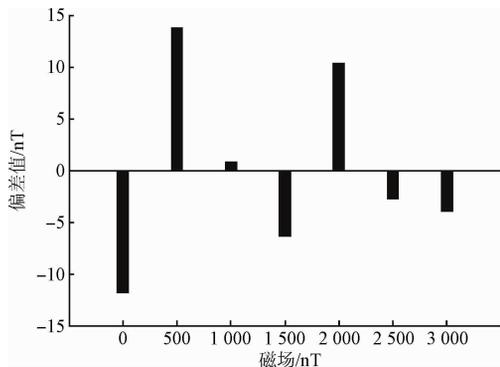


图 11 线性度拟合直线误差  
Fig. 11 Linearity fitting line error

根据图 10 所示线性度拟合直线的斜率可以得到探测器的转换系数为 0.34 mV/nT。

改变外加磁场的频率,测量放大电路输出端的电压

值。图 12 所示为车辆探测器的频率响应曲线,从图中可以看出车辆探测器的下限频率为 0.5 Hz,上限频率为 450 Hz,该频带宽度理论上可以满足 20 ~ 600 km/h 运动车辆的探测,远大于车辆探测器的要求。

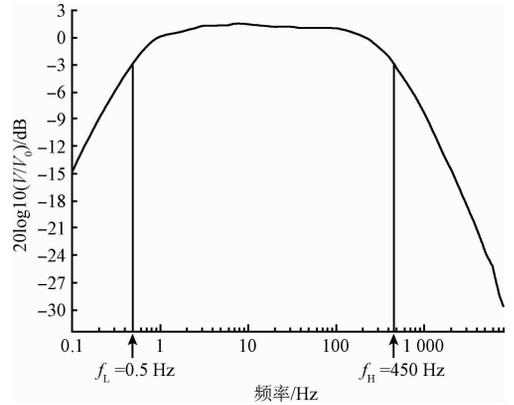


图 12 频率响应曲线  
Fig. 12 Frequency response curve

### 3.3 系统噪声测试

通过记录探测器在零磁空间下的输出得到探测器的噪声性能。输出信号通过数据采集卡采集,并存储于计算机中,对噪声时域数据进行傅里叶变换得到噪声功率谱密度。图 13 所示为电路功率谱密度曲线。

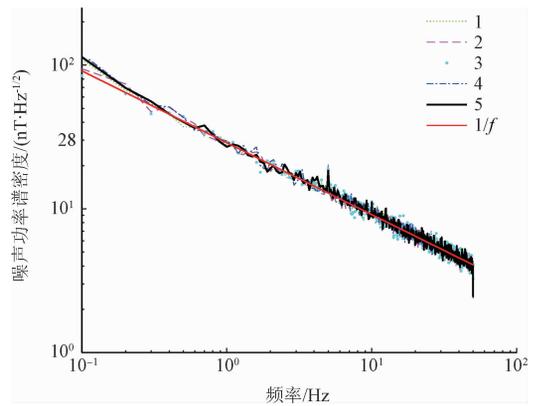


图 13 功率谱密度曲线  
Fig. 13 Power spectral density curve

噪声测量时间为 30 min,分成 5 段进行噪声计算(见图 13 中 1~5 曲线),图中的实线为根据 1/f 噪声 Hooge 模型计算所得的趋势线,可见探测器低频段噪声主要为 1/f 噪声。在 1 Hz 点处,探测器噪声的功率谱密度为 28 nT/Hz<sup>1/2</sup>@1Hz。

## 4 实际应用测试

通过车辆探测器的实际应用测试可以得到探测器的实际响应、探测距离以及探测精度。测试目标车辆是质量约为 6 t 的卡车,车辆在南北方向行驶,当车辆经过时,车辆探测器响应并产生触发信号。

为测量车辆探测器的响应性能,额外设置了两只红外传感器以检测车辆的位置信息。图 14 所示为两个红外传感器与运动车辆目标探测器在测试中的放置示意图。实际测试过程中,两个红外传感器与车辆探测器的距离均为 1 m,分别放置在探测器的左右两边,探测距离是变化的,目标车辆行驶速度为 35 km/h。

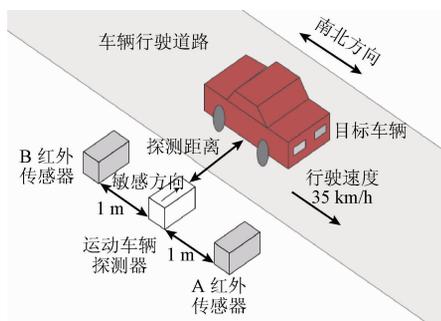


图 14 探测器应用测试示意图

Fig. 14 Schematic diagram of detector in application test

## 5 实验结果与分析

### 5.1 辅助设备探测结果

6 t 重的卡车在南北方向行驶,用磁通门传感器测得卡车经过时的磁场变化,磁通门传感器距离卡车为 3 m,测得的地磁场三分量值如图 15 所示;磁通门传感器 X 轴指向车辆前进方向,Y 轴垂直于车辆运动方向,Z 轴为垂直地面方向。

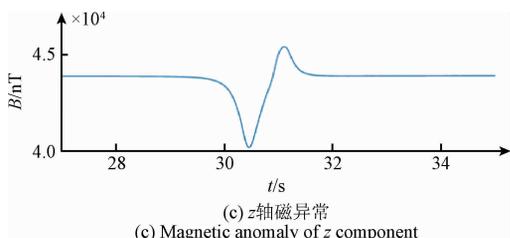
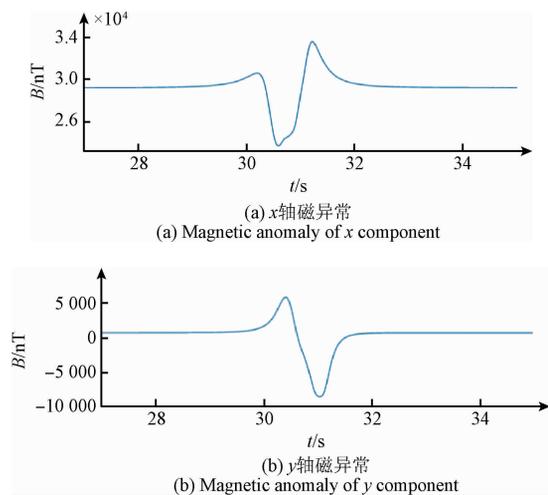


图 15  $x, y, z$  轴的磁场变化测量值

Fig. 15 The measured values of  $x, y,$  and  $z$  axis magnetic variations

对比图 15 和 5, 磁场变化曲线的实测图与仿真曲线走势基本相似,随着车辆靠近探测点,探测器周围的磁场扰动变大。在目标车辆经过的同一时间段内,3 个方向的磁场都有扰动,但  $y$  轴方向的磁场扰动最大。

### 5.2 运动车辆目标探测器探测结果

目标车辆与车辆探测器的距离为 3 m,并以 35 km/h 的速度行驶时,利用示波器显示车辆探测器探测结果。

图 16 所示为示波器测得的一组数据。图中,A、B 信号分别为 A、B 红外传感器测得的车辆经过信号,C 为运动车辆目标探测器探测到的车辆信号。对比 3 个信号可以看出,当车辆出现时,车辆探测器可以精准地探测到目标车辆;无目标车辆时,车辆探测器无触发信号。

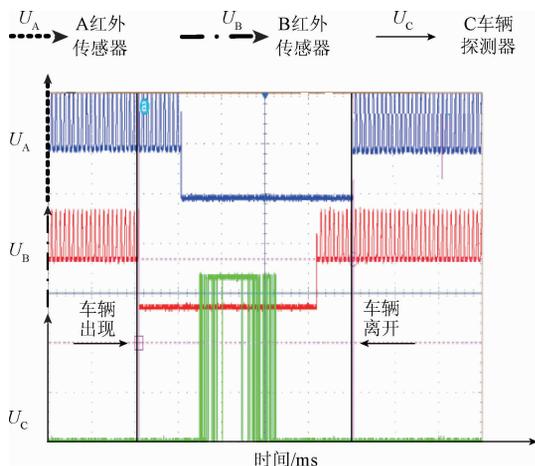


图 16 车辆探测信号

Fig. 16 Signal of vehicle detection

对比 A、B 红外传感器与探测器测得的数据,车辆到达中间位置时探测器才会发出触发信号。这是由于比较电路的阈值电压设置的较高(为防止车辆探测器误检)所导致,并且由仿真分析中可知,车辆经过中间位置时磁场变化较大。

与上述方法相同,改变探测距离,多次测量,测量结果如表 1 所示,在 3.5 m 以内,测试车辆总共经过 40 次,探测器探测到 40 次,有效探测率为 100%;超过 3.5 m 探

测距离的漏检次数为4次,有效探测率开始下降。

表1 车辆探测结果

Table 1 Vehicle detection results

探测距离/m	测试次数	探测结果	有效率/%
1	10	10	100
2	10	10	100
3	10	10	100
3.5	10	10	100
3.8	10	9	90
4	10	7	70

对比探测数据,探测距离小于3.5 m时有效探测率为100%,可以精确探测车辆。大于3.5 m时,探测器周围磁场扰动变小,探测器检测误差较大。

本文与现有文献的运动车辆探测器(探测距离为2 m,探测精度97.3%)<sup>[8]</sup>相比,具有更远的探测距离,最远探测距离内具有更高的有效探测率。利用新型磁阻传感器(TMR传感器)设计的车辆探测器,电路最终输出数字信号,与现有文献<sup>[6,8]</sup>相比,适用性更强。

## 6 结 论

本文结合理论与仿真分析,基于隧道磁电阻(TMR)传感器研制了运动车辆目标探测器,探测器实测噪声功率谱密度为 $28\text{nT}/\text{Hz}^{1/2}$ @1Hz、最大非线性误差为0.458 3%、带宽为0.5~450 Hz、探测器尺寸为2 cm×3 cm、系统功耗仅0.4 mW,最远探测距离达4米,在探测距离3.5 m内有效探测率为100%。

该车辆探测器采用电池供电,功耗极低、线性度较好、检测距离远、体积小,方便携带易安装,适用于高灵敏度的运动车辆目标检测和探测。

## 参考文献

[1] 张楚金,王耀南,卢笑,等.基于假设验证和改进HOG特征的前车检测算法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(2):165-171.  
ZHANG CH J, WANG Y N, LU X, et al. Based on hypothesis testing and improved HOG features for forward vehicle detection [J]. Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(2):165-171.

[2] 曹成涛.基于磁阻传感器的无线交通信息采集系统设计与实现[J].测控技术,2016,35(1):21-25.  
CAO CH T. Design and implementation of wireless traffic information collection system based on magnetoresistive sensors[J]. Measurement & Control technology, 2016, 35(1):21-25.

[3] 赵东亮,李凤,郑毅,等.基于HMC5983磁阻传感器的乘用车底部地磁场分布特性的实验研究[J].电子测量技术,2016,39(12):193-199.  
ZHAO D L, LI F, ZHENG Y, et al. Bottom of the passenger car distribution features of the geomagnetic field experimental study based on magneto-resistive sensor of HMC5983 [J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(12):193-199.

[4] 李勃,陈启妹.基于监控视频的运动车辆行为分析算法[J].仪器仪表学报,2006,27(6):2118-2120.  
LI B, CHEN Q M. Vehicle activity analysis from freeway traffic video [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006,27(6):2118-2120.

[5] 张玉华,贾利民.新型智能车辆检测仪灵敏度自修复与自校准技术研究[J].仪器仪表学报,2011,32(5):1177-1182.  
ZHANG Y H, JIA L M. Research on self-healing and self-calibration for a new intelligent vehicle detector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(5):1177-1182.

[6] 高天龙,章伟.基于AMR传感器和ZigBee技术的车辆检测器设计[J].传感器与微系统,2016,35(3):96-101.  
GAO T L, ZHANG W. Design of vehicle detector based on AMR sensor and ZigBee technology [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016,35(3):96-101.

[7] YOSHIDA K. Development of custom IC for EPS torque sensor [J]. KOYO Engineering Journal: English Edition,2002,160E:48-51.

[8] 杨波,尼文斌.基于各向异性磁阻传感器的车辆检测与车型分类[J].仪器仪表学报,2013,34(3):538-544.  
YANG B, NI W B. Vehicle detection and classification algorithm based on anisotropic magnetoresistive sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(3):538-544.

[9] 吕华,刘明峰,曹江伟,等.隧道磁电阻(TMR)磁传感器的特性与应用[J].磁性材料及器件,2012,43(3):1-15.  
LV H, LIU M F, CAO J W, et al. Performance and applications of magnetic sensors based on TMR effect[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2012,43(3):1-15.

[10] 谢作孟.基于TMR传感器的车辆检测与识别技术研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2015:1-42.  
XIE Z M. Vehicle Detection and Recognition Technology Research Based on TMR Sensor [D]. Hangzhou: Hangzhou DianZi University, 2015:1-42.

[11] FEI X, ROLAND W, ROBERT W. Hysteresis

- Compensation Based on Controlled Current Pulses for Magnetoresistive Sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7804-7809.
- [12] 潘仲明, 周晗, 张大厦, 等. 国外巨磁阻传感器检测电路技术的发展动态[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 781-790.  
PAN ZH M, ZHOU H, ZHANG D SH, et al. Advances in detection circuit of magnetic sensors based on giant magneto-impedance at abroad [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 781-790.
- [13] GEN ZH, JUN H, YONG O, et al. Novel method for magnetic field vector measurement based on dual-axial tunneling magnetoresistive sensors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(8): 4400306.
- [14] 王婧怡, 钱政, 王现伟. 巨磁阻传感器动态特性测量方法的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(1): 38-42.  
WANG J Y, QIAN ZH, WANG X W. Research on measurement method applied on the dynamic characteristics of giant magneto-resistance sensor [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(1): 38-42.
- [15] 齐永龙, 文波. 一种无线车辆检测传感器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(1): 50-53.  
QI Y L, WEN B. Design of kind of wireless vehicle detection sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(1): 50-53.
- [16] XU Y Z, YU G Z, WU X K, et al. An enhanced violajones vehicle detection method from unmanned aerial vehicles imagery[J]. IEEE Transactions On Intelligent

Transportation Systems, 2017, 18(7): 1845-1856.

- [17] 张朝阳, 虞伟乔. 基于磁偶极子等效的潜艇空间磁场分布[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(1): 31-34.  
ZHANG CH Y, YU W Q. Research on spatial field distributing of submarine based on magnetic dipole equivalent [J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(1): 31-34.

### 作者简介



**高俊**, 2015 年于北京工商大学获得学士学位, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为电子与通信工程。

E-mail: 18810578125@163.com

**Gao Jun** received her B. Sc. degree from Beijing Technology and Business University in 2015. Now she is a master student in National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences (CAS). Her main research interests include electronics and communication engineering.



**王劲东**, 2006 年于清华大学精密仪器系获得博士学位, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为高精度磁场探测。

E-mail: wjd@nssc.ac.cn

**Wang Jindong** received his Ph. D. degree from Department of Precision Instrument of Tsinghua University in 2006. Now he is a researcher and doctoral candidates in National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences (CAS). His main research interests include precision magnetic field measurement and vector magnetometers.