

· 红外技术 ·

高速公路红外引导系统透雾特性的试验研究

丁利伟, 王宗俐, 程明阳

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为了分析高速公路红外引导系统在不同能见度条件下的观察距离, 根据红外大气传输理论模型和计算方法, 分析了大雾条件下大气衰减对红外辐射的各种影响。在此基础上, 提出了红外引导系统透雾特性研究方法。通过实验室模拟自然界的大雾气象条件, 测得目标红外辐射的相关参数, 并通过理论分析和实际验证, 来评估热像仪在自然环境下的透雾能力。实验表明, 高速公路红外引导系统具有较强的透雾能力。

关键词: 高速公路; 红外引导; 雾; 红外辐射; 大气传输

中图分类号: TN219; U491.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0004-06

Test Research on Detection Ability of Infrared Guidance System for Freeway Traffic in Fog

DING Li-wei, WANG Zong-li, CHENG Ming-yang

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to analyze the detection ranges of infrared guidance systems for freeway traffic under different visibility conditions, various influence factors from atmospheric attenuation on infrared radiation in heavy fog are analyzed according to theory models and calculation methods of infrared atmospheric transmission. Based on it, a research method of detection ability of infrared guidance system in fog is proposed. The infrared radiation parameters of objects can be measured through simulating the meteorological conditions in natural fog in a laboratory. And the detection ability of the system in natural fog is evaluated through theoretical analyzing and practical validating. Experimental results show that the infrared guidance system for freeway traffic has better ability to detect objects in fog.

Key words: freeway; infrared guidance; fog; infrared radiation; atmospheric transmission

根据调查统计, 大雾天气对交通安全影响极大, 是最易发生重大交通事故的恶劣天气^[1]。大雾导致交通事故的直接原因是能见度下降, 因此, 提高雾天驾驶员的观察距离是减少交通事故的有效方法, 也是交通领域的一个重要研究课题^[2]。人眼及可见光观察设备是利用物体所发出或反射的可见光来实现对物体的观察, 而红外热像仪则是利用物体辐射出的人眼不可见的红外线对物体进行探测和识别, 与人眼及可见光观察设备相比, 热像仪在目标探测方面具有诸多优势, 如能够在完全黑暗无光条件下探

测目标, 并且具备较强的烟、雨、雾穿透能力。由于热像仪具有良好的夜视和雨雾穿透能力, 近年来, 成本较低的非制冷热像仪开始在交通领域得到应用。如高速公路管理部门装备的车载式红外热像仪, 作为红外辅助引导系统, 可用于雨、雾等低能见度天气条件下的车辆领航, 提高车辆行驶的安全性。

由于大雾对高速公路的通行情况有着极大的影响。因此, 交通管理部门在使用热像仪时, 对热像仪在有雾条件下的观察距离极为关注。而自然界中的雾无法人为控制, 难以在自然界中根据不同的能见

收稿日期: 2013-12-18

基金项目: 河南省洛阳市科技发展计划资助项目(1301008A)

作者简介: 丁利伟(1981-), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事光电系统的设计开发及应用研究。

度进行实际测试,往往只能测试到热像仪在少数大雾条件下的作用距离,难以对其透雾能力进行全面评估。目前,国内相关研究机构在这方面进行的研究还比较少,可供参阅的相关资料很有限,没有比较成熟的相关试验和计算方法。

主要是通过实验室模拟自然界的大雾气象条件,测得红外引导系统(热像仪)透雾能力的相关参数,并通过理论分析和实际验证,来评估红外引导系统在自然环境中不同能见度下的透雾能力。

1 红外引导系统组成

高速公路红外引导系统由热像仪、线缆、显示器和操控装置组成,其中热像仪主要包括红外光学镜头和红外探测器组件,是红外引导系统的核心部分。使用过程中,热像仪安装在车辆顶部,显示器和操控装置安装在车内,如图1所示。



图1 高速公路红外引导系统

2 红外透雾模拟试验

2.1 试验原理与方法

热像仪观察目标时,目标的红外辐射在到达热像仪的光学系统之前必须通过大气传输,并被衰减。如果大气中有烟雾,目标的红外辐射会被更大幅度的衰减。大气对红外辐射的衰减是一个极为复杂的过程,主要包括红外辐射的吸收和散射,涉及的相关理论包括朗伯-比尔定律、瑞利散射、米氏散射、分子散射等,其中的部分理论还不太完善。

大气对红外辐射的衰减主要与四种现象有关^[3]:

(1)水蒸气的吸收;(2)CO₂的吸收;(3)大气中分子、气溶胶和微粒的散射。(4)气象条件(雨、雪)的衰减。相应地,红外辐射对大气的透过率也由四部分构成,如式(1)所示^[3-6]。

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda)\tau_{CO_2}(\lambda)\tau_p(\lambda)\tau_r(\lambda) \quad (1)$$

式中, $\tau_{H_2O}(\lambda)$ 、 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 为水蒸气和CO₂吸收后红外辐射透过率; $\tau_p(\lambda)$ 为经散射后红外辐射透过率; $\tau_r(\lambda)$ 为雨、雪等衰减后红外辐射透过率。

在试验中,由于不存在雨、雪等天气现象,因此不考虑 $\tau_r(\lambda)$ 。

(1)水汽衰减的计算

$\tau_{H_2O}(\lambda)$ 的确定需要引用“沉积水量” ω 的概念,它是由底面为 S_a 和长度为 D (热像仪与目标之间的距离)的圆柱容积内大气所含水蒸气凝结的水层厚度 l (mm)来量度的^[1]。 ω 的值按下式计算^[1]

$$\omega = \omega_0 f_B D \quad (2)$$

式中, ω_0 是大气相对湿度; f_B 为100%时每公里的含水量。它可以从表1中查出,单位为mm/km。根据 ω 计算结果和红外热像仪的探测波段,可以在相关资料中查出某一红外波段的水汽透过率^[5]。

(2)CO₂衰减的计算

有关研究试验表明,CO₂的密度在大气近表层中实际保持不变^[2]。因此, $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 只与辐射通过距离有关。相关资料列出了海平面水平路程0.1~20 km时的 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 值,可以直接查取^[1]。

(3)大气中分子和微粒散射的计算

当红外辐射在大气中传播时,由于大气中介质的光学性质不均匀性,将产生散射,主要包括大气分子、灰尘、烟雾、水滴等不同的悬浮微粒散射。这些散射主要是瑞利散射和米氏散射。其中,当微粒线度小于1/10波长时,主要产生瑞利散射,当微粒线度接近或大于波长时,主要产生米氏散射。因此,大气中分子和微粒的散射与大气的具体状态有关。利用散射理论计算散射引起的大气衰减时,需要知道大气中悬浮粒子的材料、大小以及密度等详细资料^[8],而这些资料又是很难确定和测量的,因此在实际计算中,分子和微粒散射通常依据标准气象能见度所确定的试验数据来计算光谱透过率。

根据相关研究的实测结果,在0.3~14 μm 区间,红外辐射经大气分子和微粒散射的衰减系数 $\alpha_p(\lambda)$ 可由下式得到^[3,9]

$$\alpha_p(\lambda) = \frac{3.91}{D_V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3} \quad (3)$$

式中, λ 为红外辐射波长(单位为 μm); D_V 为气象能见度(单位为km)。

表1 100%湿度的饱和空气在不同温度下的沉积水量($\text{mm}\cdot\text{km}^{-1}$)

温度/($^{\circ}\text{C}$)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-20	0.89	0.81	0.74	0.67	0.61	0.56				
-10	2.15	1.98	1.81	1.66	1.52	1.40	1.28	1.18	1.08	0.98
-0	4.84	4.47	4.13	3.81	3.52	3.24	2.99	2.75	2.54	2.34
0	4.84	5.18	5.54	5.92	6.83	6.76	7.22	7.70	8.22	8.76
10	9.33	9.94	10.57	11.25	11.96	12.71	13.50	14.34	15.22	16.44
20	17.3	18.14	19.22	20.36	21.55	22.80	24.11	25.49	27.00	28.45
30	30.04	31.7	33.45	35.28	37.19	39.19				

由衰减系数 $\alpha_p(\lambda)$, 可以根据朗伯-比尔定律得出相应波段的大气透过率^[3]为

$$\tau_p(\lambda) = \exp[-\alpha_p(\lambda)D] \quad (4)$$

式中, $\tau_p(\lambda)$ 为大气透过率; D 为目标与热像仪之间的距离, 单位为 km。

根据现有的理论和试验手段, 要对红外热像仪透雾能力进行十分准确的定量试验是比较困难的。只能根据相关理论, 测取某些参数后对透雾能力进行估算。

由于目标本身的红外辐射不随外界条件变化, 因此, 可以先计算某一能见度下, 被测目标与热像仪之间的红外透过率, 然后在保证相同透过率的情况下, 改变能见度和目标距离这两个参数, 就可以估算热像仪在其他能见度条件下的探测距离。

2.2 试验件

高速公路红外引导系统透雾能力试验所用试验件是 1 套车载式非制冷红外热像仪, 探测器像元数为 384×288 , 像元尺寸为 $35 \mu\text{m}$, 材料为氧化碲, 敏感波长为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 。热像仪红外镜头焦距为 18 mm 。试验前, 经测试该热像仪工作正常。

2.3 试验设备

根据以上试验原理, 要评估热像仪透雾能力, 需要明确大气的温度、湿度、能见度、雾的粒子谱、目标距离等参数。粒子谱为附加测试项目, 以确定试验中所产生烟雾的颗粒分布与自然界中雾的粒子谱是否接近。透雾试验在专用烟雾实验室进行, 试验中以人体作为被测目标, 主要试验设备有:

(1) 超声波烟雾机一台, 用于产生浓雾; (2) 风机一台, 用于保证浓雾在实验室内均匀分布; (3) 图像

采集系统, 用于实时记录热像仪对目标的探测情况; (4) 能见度测试仪一套, 用于实时测量试验过程中实验室内的能见度; (5) 温度计一个, 用于实时测量试验时烟雾室内的温度; (6) 粒子谱仪一套, 用于测量试验中所产生雾的粒子谱; (7) 卷尺一个, 测量试验中热像仪与被测目标之间的距离; (8) 强光手电筒, 用于实验室内照明。

在试验中, 需要产生较浓的雾, 实验室内的试验设备和电缆上会凝结大量水滴, 为保证试验人员安全, 在通电设备断电之前, 不得用手直接接触试验设备, 做好绝缘保护。所有电线连接器用防水塑料胶带密封。此外, 试验中实验室内的能见度会极低, 试验人员在实验室内活动时应避免撞坏试验设备或撞伤身体, 进出实验室需携带强光手电筒。

2.4 试验环境

实验室长 7 m , 宽 5 m , 高 3 m , 四周可完全封闭。根据烟雾实验室的条件和所需的试验设备, 试验布置如图 2 所示。经过测量, 目标和热像仪之间的距离为 8 m 。

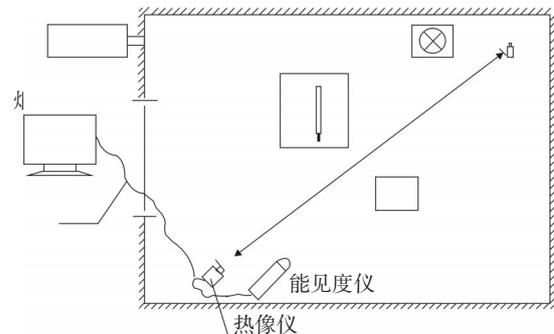


图2 热像仪透雾试验中试验设备布置示意图

试验中, 利用烟雾机产生雾, 使实验室内的能见度

不断下降。在能见度下降过程中,每隔2 min测取并采集热像仪对目标的探测图像和其他试验参数。

3 试验数据

图3是所用烟雾机产生雾的粒子谱,图4是在室外测试的陆地上自然界雾的粒子谱。从图3、图4和相关资料可知^[10],试验中所产生的雾与自然界中雾的粒子谱比较接近,粒子直径主要集中在1 μm以下。

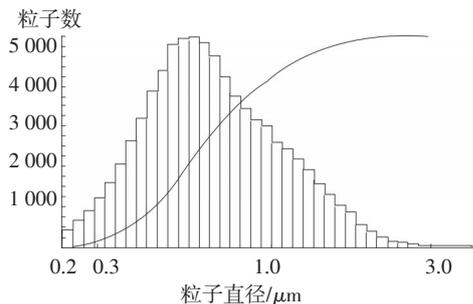


图3 超声波烟雾机所产生雾的粒子谱

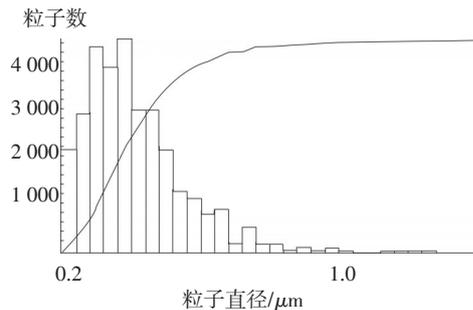


图4 陆地上自然界雾的粒子谱

表2为试验中所记录的其他试验数据。从第15 min开始测试各项数据,此时实验室内开始有凝结水滴出现,相对湿度按100%记录,试验进行到第40 min时,实验室内的能见度测量值为2.5 m,此时

表2 热像仪大雾穿透能力试验数据

序号	时间/min	目标	距离/m	温度/(℃)	湿度/(%)	能见度/m
1	15	人	8	20	100	57
2	17	人	8	20	100	34
3	19	人	8	20	100	18
4	21	人	8	20	100	8
5	23	人	8	20	100	6
6	25	人	8	20	100	6
7	27	人	8	20	100	5
8	29	人	8	20	100	4
9	31	人	8	20	100	3.5
10	34	人	8	20	100	3
11	40	人	8	20	100	2.5

实验室内的能见度已经处于极低水平,人眼直接观察的能见度几乎为0。

图5是能见度为57 m时所采集到的目标图像,此时人的图像非常清楚。随着大雾浓度不断增加,能见度随之下降,热像仪所探测到的目标图像逐渐变得模糊。图6为能见度最终降为2.5 m时,所采集到的目标图像,与之前相比,人的图像质量变得比较模糊,但依然可以识别。



图5 能见度为57 m时的目标图像



图6 能见度为2.5 m时的目标图像

4 试验数据分析与验证

4.1 试验数据分析

根据试验原理对试验数据进行处理,首先计算能见度最终降为2.5 m时,探测目标与热像仪之间的大气透过率。然后,在保证相同透过率的情况下,改变能见度和目标距离这两个参数,计算不同能见度条件下热像仪的最小探测距离。

(1) 红外透过率的计算

由表1可知,温度为20℃,相对湿度为100%,此时沉积水量为 $17.3 \text{ mm} \cdot \text{km}^{-1}$ 。则

$$\omega = \omega_0 f_B D = 17.3 \times 0.008 = 0.1384 \text{ mm}$$

然后利用相关资料^[1],通过插值法计算出不同波长的红外大气透过率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 和 $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 。

$\lambda = 8 \mu\text{m}$ 时,

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(8 \mu\text{m}) = 0.990 + \frac{0.990 - 0.975}{0.5 - 0.2} \times (0.2 - 0.1384) = 0.993$$

$$\tau_{\text{CO}_2}(8 \mu\text{m}) = 1$$

再根据式(3)和式(4)可以计算出粒子散射后的红外大气透过率。

$$\alpha_p(8 \mu\text{m}) = \frac{3.91}{0.0025} \times \left(\frac{0.55}{8}\right)^{1.3} = 48.1$$

$$\tau_p(8 \mu\text{m}) = \exp[-\alpha_p(8 \mu\text{m})D] = \exp[-48.1 \times 0.008] = 0.680$$

根据式(1)计算出总的大气透过率。

$$\tau_a(8 \mu\text{m}) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(8 \mu\text{m})\tau_{\text{CO}_2}(8 \mu\text{m})\tau_p(8 \mu\text{m}) = 0.993 \times 1 \times 0.680 = 0.675$$

利用同样方法计算能见度为2.5 m时不同波长辐射的大气透过率,如表3所示。

表3 能见度为2.5 m时不同波长辐射的大气透过率

$\lambda / \mu\text{m}$	$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$	$\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$	$\tau_p(\lambda)$	$\tau_a(\lambda)$
8	0.993	1	0.680	0.675
8.4	0.997	1	0.696	0.694
8.8	0.998	1	0.711	0.709
9.6	0.998	1	0.738	0.736
10.0	0.999	1	0.749	0.748
10.4	0.999	1	0.760	0.759
10.6	0.999	1	0.765	0.764
11.0	0.999	1	0.775	0.774
11.8	0.998	1	0.792	0.790
12.6	0.998	1	0.807	0.805
13.0	0.998	1	0.814	0.812
13.6	0.997	1	0.824	0.821
13.8	0.997	1	0.827	0.824

(2)不同能见度下热像仪探测距离的计算

由表3可以看出,大雾下能见度为2.5 m时,波长在8~14 μm 之间的红外透过率主要在0.7~0.8之间。因此,在不同的能见度和不同的目标距离下,只要8~14 μm 波长的红外透过率在0.7~0.8左右,热像仪都可以较清晰地探测到目标。以10.6 μm 为典型波长,可以计算出不同能见度下,其大气透过率为0.764时的目标距离,由此可以计算出不同能见度下,热像仪的探测距离。在目标距离小于1 km时,长波红外辐射经 CO_2 衰减后的透过率接近1,因此,计算过程中不考虑 CO_2 对红外辐射的衰减。

大气温度按20 $^{\circ}\text{C}$ 计算,大雾下空气湿度按100%计算。计算方法如下:

由相关资料可知^[3], $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m})$ 可以进行如下计算

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m}) = 0.994 + \frac{0.998 - 0.994}{0.5 - 0.2} \times (0.5 - 17.3D) \quad D \leq 28.9 \text{ m}$$

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m}) = 0.988 + \frac{0.994 - 0.998}{1 - 0.5} \times (1 - 17.3D) \quad 28.9 \text{ m} \leq D \leq 57.8$$

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m}) = 0.976 + \frac{0.988 - 0.976}{2 - 1} \times (2 - 17.3D) \quad 57.8 \text{ m} \leq D \leq 115.6 \text{ m}$$

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m}) = 0.942 + \frac{0.976 - 0.942}{5 - 2} \times (5 - 17.3D) \quad 115.6 \text{ m} \leq D \leq 289.0 \text{ m}$$

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m}) = 0.887 + \frac{0.942 - 0.887}{10 - 5} \times (10 - 17.3D) \quad 289.0 \text{ m} \leq D \leq 578.0 \text{ m} \quad (5)$$

由式(3)和式(4)得

$$\tau_p(10.6 \mu\text{m}) = \exp\left[-\frac{3.91D}{D_v} \left(\frac{0.55}{10.6 \mu\text{m}}\right)^{1.3}\right] = \exp\left(-\frac{0.0835D}{D_v}\right) \quad (6)$$

由式(1)可得

$$\tau_a(10.6 \mu\text{m}) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(10.6 \mu\text{m})\tau_p(10.6 \mu\text{m}) = 0.764 \quad (7)$$

若保持最终红外透过率为0.764不变,则利用式(5)、式(6)和式(7)可以计算出不同能见度(D_v)条件下的红外探测距离(D),结果如表4所示。

由表4可以看出,热像仪的探测距离能够达到能见度的2.5倍左右,并且能见度较低时,热像仪对视野的扩展更加明显,可以超过能见度的3倍。热像仪的具体探测和识别距离还会受热像仪的性能(空间分辨率、热灵敏度等)、目标尺寸、目标辐射的影响。此外,以上分析过程中,把大气湿度都假定为100%,而实际上大雾下空气的湿度在90%左右,再加上能见度为2.5 m时热像仪对测试目标的观察还比较清晰。因此,在实际大雾环境中,热像仪的观察距离一般会大于表4中的计算结果。综上所述,在大雾条件下,试验所用红外引导系统(热像仪)完全能够把目标观察距离扩展到能见度的2.5倍左右。以上分析是以试验所用热像仪的测试参数为基础进行分析计算的,如果采用更大口径、更长焦距的红外光学镜头,热像仪在大雾中对视野的

扩展会更加明显。

表4 不同能见度下大气红外透过率为0.764时的热像仪探测距离

目标	波长/ μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/(%)	透过率	能见度/m	探测距离/m
常温目标	10.6	20	100	0.764	10	31
常温目标	10.6	20	100	0.764	30	88
常温目标	10.6	20	100	0.764	50	143
常温目标	10.6	20	100	0.764	80	215
常温目标	10.6	20	100	0.764	100	258
常温目标	10.6	20	100	0.764	120	298
常温目标	10.6	20	100	0.764	150	353
常温目标	10.6	20	100	0.764	180	402
常温目标	10.6	20	100	0.764	200	431

4.2 试验验证

由于在室外实际环境中很难模拟各种能见度条件,只能在部分天气条件下,实际验证红外引导系统的透雾特性。图7和图8是利用可见光摄像机和红外热像仪在公路上拍摄的图像,大气能见度为113 m,目标为小型轿车,可见光摄像机和红外热像仪均安装在试验车辆顶部。由图7可知,当目标距离载车90 m时,可见光摄像机和热像仪均能探测到目标,但目标的可见光图像非常模糊。由图8可知,当目标距离载车300 m时,可见光摄像机完全无法探测到目标,而热像仪仍然能够探测到目标,此时目标距离已经达到能见度的2.6倍。



(a)可见光图像



(b)红外图像

图7 90 m距离的目标图像



(a)可见光图像



(b)红外图像

图8 300 m距离的目标图像

5 结论

理论分析和试验结果表明,高速公路红外引导系统具有较强的透雾观察能力,在有雾条件下可以明显的扩展使用者的视野,一般情况下至少可以扩展到大气能见度距离的2.5倍左右。因此,在人眼或其他可见光设备观察受限时,红外引导系统能有效提高雾中驾驶的安全性。例如,在能见度低于200 m的大雾下,为了保证安全,高速公路上的车辆会被要求限速,而此时如果使用热像仪作为辅助驾驶设备,司机的视野至少可以扩展400 m以上,将能够更好的保证车辆和人员的安全。通过改变热像仪设计、被测目标、目标距离、雾的颗粒大小等参

(下转第21页)

号强度对探测的影响。对声源处于固定深度时的四种不同频率以及声源设定固定频率时处于四种不同深度所得到的实验结果进行时频变换处理。此外,对无水下声信号的水表面自然波动进行了探测,并与理论分析相结合,验证了探测结果的准确性、有效性。实验结果表明,激光相干探测技术可有效地探测水下声信号,并且在声信号的频率较低、信号强度较高时,探测效果较好。本实验系统采用光纤光路代替以往的传统光路,大大降低了实验系统的调节难度,提高了系统的抗干扰能力,取得了较好的实验效果。

参考文献

- [1] 段海鹏. 基于激光干涉原理的水下声信号频率测试技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [2] 林玉池,崔彦平,黄银国.复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):509.
- [3] 现代潜艇技术及发展[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1999.
- [4] 李汉清,戴修亮.美国海军正在发展的水下探测系统[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2004(4):37-38.
- [5] 张晓琳,唐文彦,孙和义.水下声信号的激光干涉测量[J]. 光学精密工程,2010,18(4):809-815.
- [6] 刘伟,张骏.水下声场激光相干探测的实验研究[J]. 光电技术,2013,33(2):141-144.
- [7] 伊厚会,孙金祚.利用激光探测水下声场的理论研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版),2003,16(4):252-255.
- [8] 戴振宏,孙金祚,隋鹏飞.水下声源引起的水表面横向微波的理论研究[J]. 国防科技大学学报,2004,26(1):95-98.
- [9] 贺岩,王文奎,夏文兵,等.激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. 中国激光,2007,34(5):703-706.
- [10] Antonelli L, Kirsteins I. Empirical acousto-optic sonar performance versus water surface condition[C]//OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. IEEE, 2001, 3: 1546-1552.
- [11] 臧立本.两角和与差的余弦公式教学实录与反思[J]. 中学数学月刊,2010(4):5-7.
- [12] Barik T K, Roy A, Kar S. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves [J]. American journal of physics, 2005, 73(8): 725-729.
- [13] Blackmon F A, Antonelli L T. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acousto-optic sensor [J]. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 2006, 31(1): 179-187.
- [14] 张晓琳.基于激光干涉的水表面声波探测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

(上接第9页)

数,可以利用相同的试验方法评估不同热像仪在不同条件下的透雾探测能力。目前,由于红外热成像引导系统的成本高昂,除了少数高端和特种车辆,其在民用车辆上的应用还比较少,但近几年,随着红外热像仪核心组件国产化能力的提高,成本已经开始逐渐下降,由于其具有良好的透雾特性,因此车载红外引导系统将逐渐在智能交通领域得到更多应用。

参考文献

- [1] 张利,汪林.不利气象条件对公路交通安全的影响及对策[J]. 公路交通科技,2011,28(S1):120-123.
- [2] 邢素霞,陈天华,李婧娴.基于图像融合的驾驶员视觉增强技术[J]. 公路交通科技,2010,27(8):131-135.
- [3] 科洛勃罗多夫·B·T,舒斯特·N.红外热成像[M]. 航天工业总公司第三研究院三部、八三五八所联合翻译出版,1994.
- [4] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [5] 彭德权,周成平,丁明跃. 海空背景长波红外大气透过率的仿真计算方法[J]. 红外与激光工程,2001,32(2):112-117.
- [6] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学精密工程,1998,6(4):35-42.
- [7] Richard D, Hudson JR. Infrared System Engineering [M]. New York: John Wiley&Sons, INC, 1969.
- [8] 陈兵,李澄俊. 水雾的红外衰减性能实验与分析[J]. 光电工程,2008,35(3):48-52.
- [9] 毛峡,董旭阳,刁伟鹤. 巡航导弹红外辐射及大气衰减计算模型[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(8):952-955.
- [10] 尚倩,李子华. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学,2011,32(9):2750-2760.