

文章编号: 1001-5078 (2006) 10-0943-05

## 现代舰船红外辐射及其控制策略分析

袁江涛, 杨立, 陈翺, 张健  
(海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 分析了舰船红外辐射的来源及其物理特性, 估算了舰船各红外辐射源的相对强度, 研究了舰船红外辐射的控制策略, 探讨了舰船红外辐射控制的发展趋势。结果表明: 烟囱管壁、排气烟羽和舰船表面是舰船的三大红外辐射源, 是舰船红外辐射的主要控制对象; 针对舰船表面的红外辐射, 主动冷却技术则是较为理想的控制策略之一。分析结果对舰船红外隐身技术的研究具有参考价值。

**关键词:** 舰船; 红外辐射; 红外抑制; 红外隐身技术

**中图分类号:** TN976      **文献标识码:** A

## Analysis of Infrared Radiation on Modern Naval Ship and Its Control Strategies

YUAN Jiang-tao, YANG Li, CHEN Xuan, ZHANG Jian

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The IR radiation sources and their physical characters on naval ship were analyzed, the relative intensity of the IR radiation sources was evaluated, the control strategies for the IR radiation were studied, and the developing trend of the control for the IR radiation was discussed. The results show that the exhaust duct, the exhaust plume and the ship hull are the three main IR radiation sources on naval ship which are the main objects to be controlled, and that the control techniques for the ship hull, the active cooling technology is one of the ideal control strategies. These conclusions are very useful for the IR stealth technologies for naval ship.

**Key words:** naval ship; infrared radiation; infrared suppressing; infrared stealth technology

### 1 引言

一切温度高于绝对零度的物体无时无刻不在产生着红外辐射。活动在海天背景中的舰船存在高温部位, 能够产生较强的红外辐射, 形成反映其自身属性的红外特征, 极易被红外探测器发现与识别。随着现代光电技术的迅猛发展, 红外制导武器对现代舰船构成的威胁日益增大, 舰船红外辐射及其控制技术成为当今世界各国争相研究的热点领域之一。

从 20 世纪 60、70 年代开始, 美国、加拿大、荷兰等北约国家, 就对舰船红外辐射及其控制技术进行了大量研究。他们以其充足的经费和先进的技术, 从理论建模和实船试验两条途径同时着手, 取得了一系列代表国际先进水平的研究成果, 开发了一系

列功能强大的模拟软件, 其中最具有代表性的为加拿大 Davis 公司的 SHIPR/NTCS (Naval Threat/Countermeasures Simulator) 软件, 并发展了若干富有成效的红外辐射控制技术<sup>[1-9]</sup>。国内对舰船进行过红外热像研究, 取得了不少成果<sup>[10-14]</sup>。但在舰船红外辐射控制方面, 我国尚处于起步阶段, 有许多问题亟待解决。鉴于此, 本文详细分析并估算了舰船的红外辐射, 介绍了几种实用有效的红外辐射控制技术, 探讨了舰船红外辐射控制技术的发展趋势。

作者简介: 袁江涛 (1980 - ), 男, 海军工程大学博士生, 主要从事舰船红外隐身技术的研究。E-mail: 405jyuan@163.com

收稿日期: 2006-04-27; 修订日期: 2006-06-02

## 2 舰船的红外辐射

### 2.1 舰船红外辐射的来源

处于海洋环境中的舰船无时无刻不在产生着红外辐射。按照产生来源的不同,舰船红外辐射可分为内生红外辐射和外生红外辐射。

舰船的内生红外辐射产生于舰船内部,包括发动机和其它动力设备的散热、发动机的排放、通风设备的排气及舰船内部舱室的热损耗。其中属烟囱管壁和排气烟羽的红外辐射最为强烈,是不可忽视的红外辐射源。烟囱管壁的可见金属面积一般在 2~5m<sup>2</sup>,温度一般在 400~500,温度高,所处位置也高,是舰船最强的内生红外辐射源,最容易被敌方红外探测器发现。发动机排气烟羽与烟囱管壁的温度相当,由它产生的红外辐射同样强烈。另外,排气烟羽后面的桅杆、排气烟道附近表面的暖流区域、围阱和机舱区、主推进系统的热终端部件等也会不同程度地产生红外辐射。

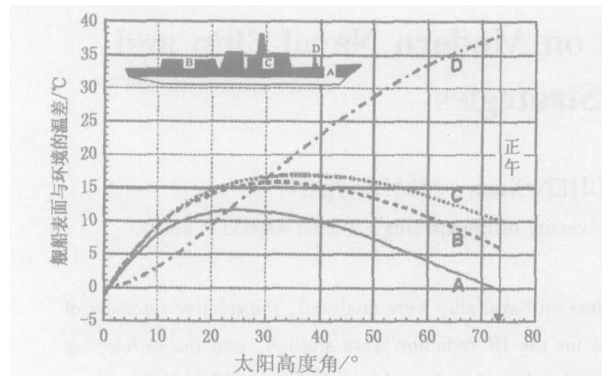


图 1 舰船表面与环境的温差随太阳高度的变化

舰船的外生红外辐射源于舰船表面对外部环境辐射的吸收和反射,比如太阳、天空、海面、大气等,且属太阳的影响最为关键。当烟囱管壁和排气烟羽等小范围高强度的红外辐射源被有效控制后,舰船红外辐射就来源于舰体表面的热辐射,包括船体、甲板和上层建筑。通常,舰船表面的温度比烟囱管壁和排气烟羽的温度低得多,与所处背景的温差小,但它的有效辐射面积大,仍会产生明显的红外辐射特征,在太阳加热条件良好的情况下尤其如此,极易成为红外制导武器攻击的目标。图 1 所示为加拿大 Davis 公司用 NTCS 软件计算出的某护卫舰船体不同表面与环境的温差随太阳高度的变化情况<sup>[8]</sup>。可见,当太阳逐渐升起时,舰船表面与环境的温差迅速增大,10 的太阳高度角将引起 10 温差,舰船甲板的温度变化尤为剧烈,即使在冬天也是如此。因此,舰船表面也是舰船重要的红外辐射

源之一。

### 2.2 舰船红外辐射的估算

上述表明,舰船主要有三大红外辐射源:烟囱管壁、排气烟羽、舰船表面。实际舰船结构复杂,辐射情况受环境影响很大,对其进行精确的红外辐射计算是个相当复杂的课题。由于我们所关心的只是舰船主要红外辐射源强度的相对大小,因此可以对实际舰船的辐射情况进行合理简化,基于以下假设对各辐射源进行估算:

- (1) 舰船表面、排气烟羽、烟囱管壁的有效辐射面积分别为: 1700m<sup>2</sup>, 30m<sup>2</sup>, 5m<sup>2</sup>;
- (2) 舰船表面、排气烟羽、烟囱管壁的平均有效辐射温度分别为: 25, 450, 450 ;
- (3) 舰船表面和烟囱管壁可视为灰体,有效发射率均取为 0.96;
- (4) 烟羽的主要成分为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,辐射具有选择性,处于 3~5μm 中红外窗口,该部分辐射等效于相同温度下发射率为 0.5 的灰体在 4.3~4.55μm 内的辐射<sup>[6]</sup>;
- (5) 背景温度均匀一致,取为 20 。

由红外物理学可知<sup>[15]</sup>,目标在 λ<sub>1</sub>~λ<sub>2</sub> 波段内的辐射亮度 L 可按式计算:

$$L = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{c_1}{e^{c_2/(T \lambda)} - 1} d \quad (1)$$

式中, ε 为目标表面发射率; c<sub>1</sub> 为第一辐射常数; c<sub>2</sub> 为第二辐射常数; λ 为波长; T 为绝对温度。

目标的辐射强度 I 为:

$$I = LA \quad (2)$$

式中, A 为目标的有效辐射面积。

根据以上假设条件和计算公式,可得舰船的主要红外辐射源分别在中、远红外窗口的辐射亮度、辐射强度及每个辐射源的红外辐射在整舰中所占的比

表 1 舰船主要辐射源的红外辐射估算结果

辐射源	面积 /m <sup>2</sup>	温度 /	辐射亮度 /Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>		辐射强度 /Wsr <sup>-1</sup>		比例份额 /%	
			3~5μm	8~14μm	3~5μm	8~14μm	3~5μm	8~14μm
舰船表面	1700	25	0.28	3.86	476	6562	4	60
排气烟羽	30	450	98.68	0	2960	0	28	0
烟囱管壁	5	450	1473	890	7365	4450	68	40

例份额,计算结果列于表 1。

由计算结果可见,在 3~5μm 波段内,排气烟羽和烟囱管壁占全船红外辐射的 96%,而它们的投影面积只占主船体和上层建筑的 2%,这是由于这两个辐射源温度很高的缘故;在 8~14μm 波段内,舰船表面的红外辐射最为突出,占全船辐射的 60%,

这是由舰船表面积庞大而引起的,其次为烟囱管壁,占 40%。

以上结果只是对舰船红外辐射的估算,实际舰船的红外辐射还应考虑到观测的视角,所处环境和太阳光的影响,舰船表面及排气烟羽温度分布的不均匀性等,但估算结果足以表明:排气烟羽和烟囱管壁的有效辐射面积很小,但温度很高,是导致舰船在中红外波段红外特征显著的决定因素;舰船表面与背景温差虽然不大,但有效辐射面积庞大,导致舰船在远红外波段红外特征明显。因此,为了提高舰船的生存能力与防御能力,就必须严格控制舰船表面、排气烟羽和烟囱管壁的红外辐射。

### 3 舰船红外辐射控制策略

对舰船进行红外辐射控制就是利用技术手段,改变舰船原来的红外辐射特性,降低甚至消除舰船在敌方红外探测设备方向上的红外信号,从而降低舰船被发现和跟踪的概率,达到红外隐身的目的。舰船红外辐射控制策略一般有三种:降温、屏蔽和涂敷红外隐身涂料,其中降温是最直接和最有效的控制策略。

#### 3.1 内生红外辐射控制策略

舰船相当比例的内生红外辐射来自烟囱管壁和排气烟羽,对它们进行控制的有效措施是在排气系统终端安装红外抑制器(RSS)来降低烟囱管壁和排气烟羽的温度,从而降低它们的红外辐射。20世纪70年代初,美国和加拿大就开始了控制舰船排气系统红外辐射的研究,到目前为止已经历了海水喷射-简单喷射混合-全气膜冷却三代技术。现在的红外抑制器均以全气膜冷却为关键技术进行设计,尤以加拿大的引射/扩压式(Eductor/Diffuser)红外抑制器和球障(DRES Ball)红外抑制器最为典型。据称该技术可使舰船烟囱管壁和排气烟羽的红外辐射降低60~95%。美国、加拿大、日本、以色列等国的舰船都采用了这一技术。鉴于目前这一技术较为成熟,这里不再赘述,具体可参见相关文献[6~8, 13~14]。

舰船内生红外辐射还有其它一些控制策略,如改变舰船上烟囱的布置,用机舱水冷的办法降低机舱的温度,小型舰船可采用水下排气技术,在高温表面涂敷绝热层等等。

#### 3.2 外生红外辐射控制策略

舰船最主要的外生红外辐射来自舰船表面,即船体、甲板及上层建筑。高强度的舰船内生红外辐射被有效控制后,舰船红外特性由高强度局部点源

转变成分布均匀的弱辐射面源。在红外诱饵的配合下,传统的红外点源制导武器将难以达到攻击舰船的目的。然而新型的红外图像制导武器,以热对比度较低的目标的红外图像为捕捉对象,传统的红外诱饵失去作用。因此,必须把舰船表面的红外辐射控制在一个足够低的水平,使舰船与所处环境的红外图像浑然一体,进而使红外图像制导武器也失去作用,才能进一步提高舰船的生存能力。目前有效的方法有三种:红外隐身涂料、水雾遮蔽技术及主动冷却技术。

##### 3.2.1 红外隐身涂料

在目标表面涂敷一层低红外发射率的涂料,能显著降低目标的红外辐射,因此可以用红外隐身涂料来控制舰船表面的红外辐射。由于太阳98%的辐射能量处于 $0.15 \sim 3\mu\text{m}$ 的短波范围内,因此,红外隐身涂料一般应具有较低的短波吸收率和一定的隔热能力,以避免舰船表面吸热升温,产生过多的红外辐射;另外还应具有较低的发射率,以降低舰船在红外波段的辐射能量。目前的隐身涂料主要有两类:一类是吸收型,涂料本身吸收能量并在涂层内部消耗或转换而不引起明显的温升,减少了目标的红外辐射;另一类是转换型,涂料在吸收红外辐射后可以改变辐射的方向,或使吸收后释放出来的辐射偏离红外探测器的工作波段,达到隐身目的。红外隐身涂料在红外辐射控制和红外隐身技术研究中占有重要的地位,历来受到各国军方的重视。美国对红外隐身涂料的研究始于1967年,是最早对这一技术进行研究的国家<sup>[16]</sup>。上世纪80年代中叶,德、英、法、日、加、澳等西方各国纷纷介入红外隐身涂料的研究。西德专利DE3606691A1报道其红外反射率高达0.9,红外发射率为0.1<sup>[16]</sup>。

尽管红外隐身涂料在红外辐射控制上的效果显著,但由于大多数涂料树脂在红外波段内不透明,即透射率低,涂料的低发射率会导致较高的反射率,从而会增强舰船在可见光波段的辐射特征。此外,涂敷在舰船表面的低发射率涂料,在海洋环境下很容易降解成高发射率的表层,耐久性差。迄今为止,这一技术在舰船上尚未得到广泛应用。

##### 3.2.2 水雾遮蔽技术

水雾是由大量细小的悬浮水粒子和空气组成的具有一定浓度的气溶胶体系,对红外辐射有很强的吸收和散射作用,因此可用来控制舰船表面的红外辐射。在舰船周围安装一系列可自动控制的喷头,需要时立即启动喷洒水雾,数秒内将整个舰船笼罩

在水雾之中,舰船发出的红外辐射在水雾强烈的吸收和散射作用下,使得敌方探测器接收到的红外信号将大大衰减,以至于难以探测到我方舰船目标。同时,附着在舰船高温表面上的水雾,由于汽化作用会使该部分的温度降低,这也有助于降低舰船表面的红外辐射。水雾遮蔽技术的关键,在于确定水雾粒子的粒径大小和分布、水雾的浓度与厚度以及水雾的持续时间、空间尺寸等等。该技术可以直接利用海水形成水雾,具有原料取之不尽、设备成本低、便于随时使用等优点,是一种高效费比的红外控制技术。英国的海幽灵护卫舰成功地采用了这一技术,国内相关单位也对这一技术做过理论研究和实验研究,取得了不错的效果<sup>[18-20]</sup>。

然而,水雾遮蔽技术有其内在的缺点,使其在舰船上的使用受到限制。水雾一旦形成,就会增强舰船在可见光波段的辐射,增加了舰船在该波段的可探测性;舰船被水雾笼罩起来后会影响到舰上光学仪器和电子设备的正常工作;为保证水雾对舰船红外辐射的有效抑制,舰船必须在无风的天气下低速航行,因为强度中等的风就会强烈影响水雾的遮蔽效果。可见,采用水雾遮蔽技术对舰船表面的红外辐射进行控制并非最佳选择。

### 3.2.3 主动冷却技术

液体薄膜传热系数高、结构简单且动力消耗小,是目前传统工业和高新技术领域中广泛应用的高效传热技术<sup>[21]</sup>。舰船主动冷却技术即利用液膜换热的这一独特优点,用喷淋的方式在舰船高温表面布一层连续流动的海水液膜,并根据舰船表面与背景的温度对比对冷却液膜进行主动控制,使舰船表面与背景温差始终保持在要求范围内,是目前最实用的舰船表面红外辐射控制策略。

舰船主动冷却系统主要由喷头网络、海水泵、管路、反馈控制系统组成。海水泵把较舰船表面温度低的海水通过管路输送到合理布置的喷头网络,以一定压力喷淋到需要冷却的舰船表面上,形成连续流动的海水液膜。冷却液膜与舰船表面发生强烈的换热,舰船与背景的红外辐射对比随着舰船表面温度的降低而逐渐减小,直至舰船表面与背景温差减小到某一定值,舰船与背景的红外辐射图像浑然一体,停止海水喷淋(否则,舰船表面温度继续降低,舰船与背景的正红外对比度反而会超过预定值)。停止喷淋后,在环境辐射作用下,舰船表面温度又会逐渐升高,升至某一定值时,喷淋系统又开始自动在舰船表面上喷淋布膜(否则,舰船表面温度继续升高,舰船与背景的正红外对比度会超过预定值)。舰

船主动冷却系统就这样根据舰船表面与背景温度的对比在温度反馈控制系统作用下反复开启与关闭,使舰船表面与背景温差始终保持在要求范围内。由于舰船表面温度分布不均,可以根据实际情况把舰船表面分成若干区域,分别独立控制,仅对需要冷却的区域表面实施主动冷却。

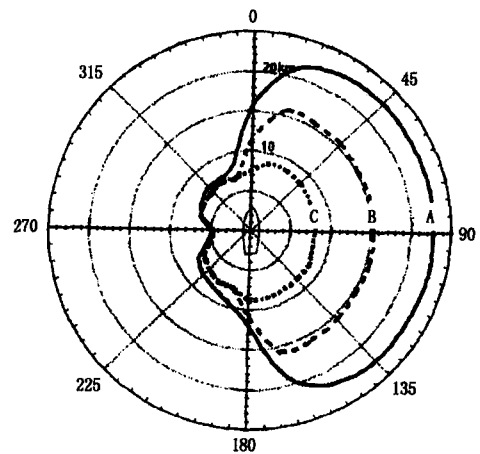
有观点认为主动冷却技术采用的海水会加快舰船的腐蚀。其实,事实并非如此,原因如下:

(1)仅当外界环境对舰船表面的红外辐射造成很大影响时,冷却系统才启用,而且只在需要冷却的高温表面上喷淋布膜,并非一刻不停地工作;

(2)系统工作时,海水的喷淋是时断时续的,并非持续不断地喷淋;

(3)由于液膜是流动的,它会把从海水中的盐物质,连同舰船上的其它来源的盐物质一起冲刷掉,而不会在舰船表面上集结。

显然,主动冷却技术是目前最实用的舰船表面红外辐射控制技术,已受到西方国家的极大重视。加拿大和荷兰正在对这一技术进行理论和实验研究<sup>[8-9]</sup>。图 2 所示为加拿大 Davis 公司基于实船试验数据用 NTCS 软件计算出的某护卫舰实施主动冷却技术前后红外图像制导导弹对舰船锁定距离的变化<sup>[8]</sup>。冷却前,舰船表面的温度变化如图 1 所示,冷却后,舰船与周围环境的温差可保持在  $\pm 2$ , 导弹对舰船的锁定距离可降低 60~70%,效果相当明显。



A 不对舰船表面冷却  
B 冷却除船体外的所有表面  
C 冷却舰船所有表面

图 2 舰船表面冷却前后导弹对其锁定距离的变化

### 3.3 舰船红外辐射控制发展趋势

我国相关标准把舰船红外辐射控制分为三级:一级应能有效控制舰船近红外窗口的红外点源、面源及远红外窗口的红外面源;二级应能有效控制舰船近红外窗口的红外点源及任一个红外窗口的红外面源;三级要有效控制舰船近红外窗口的红外点

源<sup>[22]</sup>。国外也有类似的标准。对舰船实施的红外辐射控制等级越高,敌方探测器发现舰船的概率就越低,舰船的生存能力就越强。随着红外成像制导武器的迅速发展,国外对舰船表面等弱对比度扩展面源红外辐射控制的研究力度日益加大。因此,舰船红外辐射控制的发展趋势之一是提升红外辐射控制等级,扩大红外辐射控制范围,进一步提高舰船的生存能力。

随着舰船红外辐射控制要求的提高,单靠某一种红外控制技术已难以达到相应的要求,综合运用多种红外控制技术势必成为舰船红外辐射控制的发展趋势。英国的海幽灵护卫舰即综合采用了红外隐身涂料与水雾遮蔽技术,大大降低了舰船自身的红外辐射。

加拿大的 OSM (Onboard Signature Manager) 系统具有预测舰船自身红外特征,分析敌红外制导导弹对本舰锁定距离,评估各种红外隐身效果等功能,目前很多北约国家的舰船都装有这一系统,该系统的核心内容 SHIPR/NTCS自 1992年发布 1.0版本至今已经发展到 3.0版本<sup>[5]</sup>。随着现代舰船智能化水平的不断提高,未来舰船能够通过红外特征管理系统对舰船自身与背景的红外辐射对比进行实时监测,对红外制导武器的威胁程度和锁定距离进行预报,并根据预报结果对舰船实施相应的红外控制策略及红外对抗手段。可见,未来舰船的红外特征管理系统功能相当强大,而舰船红外辐射控制系统将成为它的一个内嵌子系统。

#### 4 结 论

(1)舰船红外辐射的估算表明:排气烟羽和烟囱管壁的有效辐射面积很小,但温度很高,导致舰船在中红外波段红外特征显著;舰船表面与背景温差虽然不大,但有效辐射面积庞大,导致舰船在远红外波段红外特征明显。舰船表面、排气烟羽和烟囱管壁是舰船红外辐射控制的主要对象;

(2)针对烟囱管壁和排气烟羽的红外控制技术已日趋成熟;而对舰船表面的红外辐射而言,受环境影响很大,是红外辐射控制的难点,主动冷却技术则是较为理想的控制策略之一;

(3)舰船红外辐射控制的发展趋势是:综合运用多种红外控制技术,扩大红外辐射控制范围,提升红外辐射控制等级。未来的舰船红外辐射控制系统将成为舰船红外特征管理系统的一个内嵌子系统。

#### 参考文献:

- [1] D A Vaitekunas, K Alexan, et al Naval threat and countemeasures simulator[A]. Proc SPIE, 1994, 2269: 172 - 185.
- [2] J Morin, F Reid, et al SHIPR: a model for simulating infrared images of ships at sea [A]. Proc SPIE, 1994, 2223: 367 - 378.
- [3] D A Vaitekunas, K Alexan, et al SHIPR/NTCS: a naval ship infrared signature countemeasure and threat engagement simulator[A]. Proc SPIE, 1996, 2744: 411 - 424.
- [4] D A Vaitekunas, D S Fraedrich Validation of the NATO-standard ship signature model (SHIPR) [A]. Proc SPIE, 1999, 3699: 103 - 113.
- [5] D Fraedrich, E Stark, et al Ship R model validation using NATO SMVEX experiment results[A]. Proc SPIE, 2003, 5075: 49 - 59.
- [6] A M Birk, W R Davis Suppressing the infrared signature of marine gas turbines [J]. J. Eng for Gas Turbines and Power, 1989, 111: 123 - 129.
- [7] H M A Schleipen, F P Neele Ship exhaust gas plume cooling [A]. Proc SPIE, 2004, 5431: 66 - 76.
- [8] J Thompson, D Vaitekunas, et al IR Signature Suppression of Modern Naval Ships[Z]. ASNE 21st Century Combatant Technology Symposium, 1998, 1: 27 - 30.
- [9] F P Neele, W Jong Prewetting systems as an IR signature control tool [A]. Proc SPIE, 2002, 4718: 156 - 163.
- [10] 寇蔚, 杨立. 一种舰船红外特征的动态模拟方法研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(2): 148 - 152.
- [11] 朱文勇, 高景. 舰船红外热像模拟 [J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(2): 129 - 134.
- [12] 杨宝成, 沈国土. 舰船热像理论模拟中的物理模型和数学模型 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2001, (2): 58 - 64.
- [13] 吴国明. 排气系统引射器理论计算方法及试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 1989, 5.
- [14] 周邵荣. 舰船排气红外抑制多级引射及烟羽辐射研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2001, 11.
- [15] 张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [16] 黄永勤, 胡志毅. 国外防中远红外侦视伪装涂料的研究进展 [J]. 涂料工业, 1997, (4): 35 - 38.
- [17] 宋兴华, 於定华. 涂料型红外隐身材料研究进展 [J]. 红外技术, 2004, (2): 9 - 12.
- [18] 王甲寅, 吕相银. 水雾在舰艇防御光学制导导弹中的应用 [J]. 舰船电子对抗, 2004, 27(2): 15 - 17.
- [19] 高凯, 沈卫东, 等. 水雾多光谱隐身实验研究 [J]. 光电技术应用, 2004, (1): 35 - 38.
- [20] 许波, 时家明. 水雾遮蔽性能的计算和分析 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 38 - 41.
- [21] Yih S M. Modeling heat and mass transport in falling liquid films Handbood of Heat and Mass Transfer[M]. Texas: Gulf Publishing Company, 1986, 2: 111 - 201.
- [22] GJB 4179 - 2001, 舰船红外辐射控制要求 [S].