

军事伪装技术的发展现状与趋势

颜云辉 王 展 董德威

东北大学, 沈阳, 110819

摘要:介绍了伪装技术的含义,指出伪装技术在现代战争中的重要性。详细说明了现阶段应用于军事伪装领域的几种伪装技术的原理及其应用,其中包括遮障技术、示假技术和迷彩伪装技术,展示了当今世界军事伪装技术的发展现状。分析了军事伪装技术的发展趋势,指出伪装技术正向着多波段、多元化、智能化的方向发展;随着更多学科理论的应用,伪装技术会融入更多的新方法和新思路。

关键词:遮障伪装技术;示假伪装技术;迷彩伪装;发展现状;趋势

中图分类号:E951.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.17.024

Current Actuality and Development Tendency of Military Camouflage Technology

Yan Yunhui Wang Zhan Dong Dewei

Northeastern University, Shenyang, 110819

Abstract: Through introducing meaning of camouflage technology, the importance and significance could be understood in the modern war. Several technology of military camouflage areas and its principles and applications were illustrated in detail, including screen camouflage technology, decoy camouflage technology, color camouflage technology, etc. The current situation was discussed on the development of world military camouflage. With the development of technology, it is expounded that camouflage technology is developing towards multiband, pluralism, intelligence. With the applications of more discipline theory, camouflage technology will blend in new methods and new ideas.

Key words: screen camouflage technology; decoy camouflage technology; color camouflage; current actuality; development tendency

0 引言

在现代军事战争中,如何不被敌方获取军事情报信息已成为军事项目发展的一项重要课题,因此伪装技术的研究近年来倍受瞩目。所谓伪装技术,总的说来就是隐蔽本方军事设施和基地并且迷惑敌方军事侦察的技术,是现代战争的重要保障手段之一。伪装的目的在于妨碍敌人的侦察与攻击,保护本方的军事装备不被损害并且保障军事情报不被窃取^[1]。近年来,各国都非常重视伪装技术的发展,并且为相应的机动设施、战术导弹设施、固定阵地的大型设施设计了不同的伪装方案,并建立了相应的伪装体系。这些不同的伪装技术为不同的防御体系提供了有力的保障。

1 现代军事伪装技术的研究进展

1.1 遮障伪装技术

遮障伪装技术是利用设置在待伪装的军事目

标附近或者外加在目标上的防探测器材来实现伪装效果的。根据性质的不同又包括伪装网、变形遮障和伪装覆盖层等技术,这些不同的遮障伪装技术可以适用于针对可见光、红外线以及雷达侦察等不同的伪装要求^[2]。

1.1.1 伪装网

伪装网是军事上用来遮盖武器装备或固定目标以达到低可探测性的隐身织物。它的伪装原理就是利用伪装网组成拱起或者平面的遮障,以减弱装备的平面反射,消除装备的外形特征,以此来增加敌方的侦察识别难度^[3]。现代军事伪装网还具备如下特征:不仅能对抗可见光侦察,还能对抗热红外侦察^[4-6]和雷达侦察^[7-9]等;网面颜色和迷彩斑点的光学性能、网面的热红外辐射性能以及对雷达波的散射性能^[10]都可以适应不同目标环境背景的需要;现代伪装网还具有材质轻、涂层牢固性好、便于拼接和实现多种用途的伪装。

一些发达国家对伪装网的研究给予了高度的重视。瑞典的巴拉库达公司多波段超轻型伪装网(BMS-ULCAS)采用新型吸收原理和超轻型结

收稿日期:2011—09—28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目
(2008AA04Z135)

构,通过一种多功能涂料技术达到多频谱隐身兼容目的,具有防光学、防近红外、防中远红外、防雷达侦察的性能^[11-13]。美国的超轻型伪装网系统(ULCANS)外形包括六边形和菱形部分,用绳环相互连接,基础设计包括附有切割图案的强韧性聚合物防钩挂纤维,这种设计具有良好的雷达散射和抗热成像性能^[14]。另外,德国 OGUS 公司研制生产的标准伪装网结构、俄罗斯的 MKT-3JI 标准伪装网都具有非常良好的伪装效果^[15]。

我国伪装网的研制开始于 20 世纪 60 年代,经过几十年的发展已经研制出不同类别多种型号的伪装网:81 伪装网是我国研制的第二代防雷达伪装网,它采用了散射原理将金属丝编入织物后,通过切花、拉伸使得入射雷达波在各个方向上相对均匀并通过伪装网面的二次透射衰减,使网面与应用背景的雷达波散射特性一致,从而实现防雷达特性;87 伪装网是 81 伪装网的技术改进版,它采用不锈钢短纤维混纺于织物的织线中,从而弥补了金属丝纺织工艺不完善的问题,而不锈钢短纤维中的随机取向也更合理;95 伪装网是我国研制的第三代伪装网,它由伪装网面和热隔绝层组成,可以有效解决防中远红外侦察的问题,并且 95 伪装网兼具防光学侦察和防雷达的特性^[16]。虽然我国的伪装网技术已经有了一定的发展,不过距世界发达水平仍有差距,具体表现在伪装网还存在便携性问题和波段不够宽的问题,所以伪装网技术的发展应该向着超轻量化、波段更宽的方向发展。

1.1.2 其他遮障伪装技术

(1)变形遮障伪装技术。导弹发射装置伪装的主要难点是装备的外形轮廓以及阴影特征不容易消除,容易被敌方侦察到,变形遮障技术研究的就是消除这些暴露特征的方法^[17]。变形伪装原理是在目标表示其特征的部位(暴露征候明显处)“附着”与背景相融合的变形器材,改变目标的外形及其固有的暴露征候,破坏人的正常间接判断所需的联系,一方面起到降低观察者对隐蔽目标的兴奋程度;另一方面,可以引起观察者对背景兴奋,使背景的记忆表象完善,这种错误的直觉信息会引起错误的判断,从而隐蔽真实目标,达到良好的伪装效果。变形遮障主要由伞状支撑架、连接结构、粘有反雷达材料的伪装饰片和弹簧夹等组成^[18]。变形伪装已广泛用于伪装大型机动设备和导弹发射装备。

(2)卷帘式遮障伪装技术。卷帘式遮障技术主要用于防范红外成像制导武器的攻击^[19]。卷

帘式动态伪装的构想来源于红外伪装遮障(即利用涂敷不同发射率材料的织物材料对目标进行遮蔽),但又不同于传统的热红外遮障。当目标处于战场当中,临时架设红外遮障困难较大,卷帘式遮障材料是将分离的伪装单元以卷曲的形式携带于目标上,当目标接收到红外制导武器攻击预警时,释放卷帘伪装网,在目标表面形成瞬时红外遮障,大幅度改变目标红外特征,使红外制导武器追踪系统丢失目标信息,以期提高目标的战场生存概率^[20-22]。

(3)丛状散射遮障伪装技术。丛状散射遮障伪装主要用于对抗雷达探测技术,以往的纯散射的防雷达遮障总是伴有无法兼具良好的遮蔽性和融合性的问题^[23]。而丛状散射遮障伪装技术通过借助遮障的材料和结构设计,实现遮障雷达回波在空间的弥散化,从而降低理想的遮蔽和融合性能对遮障吸收的要求^[24-25]。同时,含有大量随机分布的小散射体的丛状遮障可能具有弥散效果,从而大大减弱了敌方雷达的侦察效果,起到了比较好的伪装效果^[26]。这种技术已经在一些发达国家得到了广泛的应用。

1.2 示假伪装技术

示假伪装技术是指仿造各种武器装备来作为假目标,用假目标来迷惑敌人,吸引敌方的注意力及火力,从而有效地保护真目标的伪装技术。这种技术能有效降低武器装备被侦察和被命中的概率。示假伪装技术是国外军事机动装置和地面设备主要采用的伪装技术之一。作为一种欺骗效果良好的示假技术,所采用的假目标需要做到具备以下几个特点:①外形逼真,包括几何尺寸、颜色、光泽等都与真目标相似;②雷达、红外特征不小于真目标;③假目标还应能模拟真目标的闪光和音响效果;④体积小、质量轻、便于运输;⑤架设、撤收速度快,成本低,维修方便。只有具备了上述特点才会起到方便保护武器装备、防范敌方攻击的作用^[27]。

由于发展的起点和技术水平不同,各个发达国家的示假伪装技术也有不同的发展状况。美国科研人员研制出霍克防空导弹假目标系统、假 M6 坦克、假 M114 装甲车、假 155mm 榴弹炮等,这些假目标都有很高的技术含量,具有相当高的水平。现在,美军的假目标研制向多谱段方向发展,代表性的假目标有 M1 假坦克,它具有与真目标完全一致的物性特征。瑞典的假目标主要由巴拉库达公司研制生产^[28]。巴拉库达公司生产的每种假目标都带有模拟真实装备雷达反射特征和

(或)热特征的组件,并且有准确的形状和颜色,有稳定的支撑结构及最少的架设、撤收人力和时间。

从示假伪装技术的发展情况来看,现阶段假目标还主要是对抗可见光、雷达侦察和近红外侦察,而在远红外示假和热红外成像方面的技术还不成熟,无法解决制作大型热红外成像假目标存在的问题,所以,远红外示假技术将是未来的主要研究方向。

1.3 迷彩伪装技术

1.3.1 保护迷彩

保护迷彩是接近于背景基本颜色的单色迷彩,用于伪装处于单调背景上的目标。保护迷彩的颜色是根据目标所处背景的颜色确定的。在单色背景上,目标保护迷彩色为该背景的颜色,如夏季草地背景,目标保护迷彩色为草绿色;裸露的土地背景,目标保护迷彩色为土黄色;冬季积雪背景,目标保护迷彩色为白色。在不太多斑点的多色背景上,活动目标的保护迷彩色一般为背景中面积最大部分的颜色。例如早期英国的土黄色军服、美国在菲律宾战争后穿着的土黄色军服、俄国 1905 年时期的土褐色军服,这些都是早期保护迷彩应用于军事伪装的典型范例^[29-30]。

保护迷彩伪装技术由于伪装方式和色彩比较单一,在很多场景已经不能适应复杂背景的作战需求,所以世界各国已经很少使用这种技术来部署军队。该技术也仅仅出现在早期的军事战场上,不过保护迷彩却为现在多种伪装技术奠定了发展的基础。

1.3.2 变形迷彩

所谓变形迷彩是指由几种形状不规则的大斑点所组成的多色迷彩。这种多色迷彩须符合目标活动地域背景的主要颜色^[31]。它主要用于伪装各种活动目标,能使活动目标的的外形轮廓在预定活动地域的各种背景上受到不同程度的歪曲。在多色斑驳的背景上,变形迷彩降低目标显著性的效果比保护迷彩要好得多,可使直瞄火器射击目标的命中概率降低 $1/3$ ^[32]。变形迷彩的涂料调配和迷彩图案设计,是确保伪装效果的两项关键技术。绿色和白色的调配,要求其色相和光谱反射能力接近植物绿和积雪白,以防被近红外观察与照像(能分辨植物绿与其他绿色)和紫外照像(能分辨积雪白与其他白色)发现;变形迷彩图案设计要合理确定迷彩斑点的颜色、尺寸、形状和配置,使其在符合作战区域主要背景斑点颜色的基础上,最大限度地歪曲目标轮廓^[33]。

国外研究者的实验表明,在同样背景、同样距

离、一辆未涂变形迷彩的坦克和一辆涂了变形迷彩的坦克,用主动式红外夜视仪观察,其识别概率分别是 96% 和 54%。对采用变形迷彩的坦克再加盖热涂层盖布与未涂变形迷彩的坦克作比较,用手持热像仪观察,其识别概率分别是 59% 和 98%。由此说明:变形迷彩伪装可降低识别概率,对制导而言,意味着增加了制导武器操纵人员的识别时间,随着时间的增加,就可能使制导武器失去发射机会。

在变形迷彩军事伪装方面,我国也建立了自己的一套标准。这套标准适用于林地、草原、荒漠和雪地背景上的陆军典型装备实施变形迷彩伪装,也适用于上述背景上的其他军事装备实施变形迷彩伪装,是陆军装备变形迷彩设计、维修的依据。该标准迷彩图案依据我国自然背景的分布状况分为林地南方型、林地北方型、草原型、荒漠型、雪地型五大类。这样根据不同的地域特点来设计不同的变形迷彩伪装方案才能达到更好的伪装效果。

变形迷彩是一种实用、有效的降低活动目标被识别概率的方法,并且不会给处理过的机动装备带来任何不便影响,使运动中的各种车辆、坦克等能很好地融合于背景之中,造成敌方侦察和识别的困难。其发展趋势正朝着具有多频谱综合伪装性能方向发展,目前变形迷彩伪装技术已经在世界各国广泛应用。

1.3.3 数码迷彩

数码迷彩是新型迷彩伪装技术,它将背景图像中的颜色、纹理及其分布等信息密码进行像素化表达,并在装备表面上进行复制和再现,克服了传统迷彩只在特定侦察距离上才具有伪装效果的不足,在不同的侦察距离上均具有良好的背景融合性,可对付高分辨率航空与航天光学成像侦察,伪装效果更佳^[34]。根据目标的特点和所处的背景特征,数码迷彩既可设计成武器装备的变形迷彩,也可设计成固定军事设施的仿造迷彩。

对数码迷彩的研究,国外从 20 世纪 70 年代开始进行初步的探索。由于当时数字成像侦察还没有进入实际军事应用,国外学者主要是从视觉心理的角度研究迷彩设计与图案组合问题,提出了“双重纹理伪装”概念,这是数码迷彩技术的前身。从 20 世纪 90 年代开始,随着计算机技术、信息技术的快速发展,特别是数字成像侦察的广泛应用,“双重纹理伪装”的研究成果开始在加拿大、美国、芬兰等欧美国家的伪装服设计上得到应用。但是,长期以来,由于在大型复杂目标的数码迷彩

精细涂装和批量涂装方面始终没有找到很好的解决方法,因而数码迷彩在武器装备上的应用被限制。

我国于 20 世纪 80 年代开始探索数码迷彩的前身“双重纹理伪装”迷彩设计技术,并率先在防雷达伪装网上进行了应用。2006 年,经过改进的“双重纹理伪装”迷彩又成功应用于某型多波段伪装网上,显著提高了迷彩伪装效果。近年来,我军从适应武器装备信息化建设的新形势、新要求的角度出发,针对目前陆军和通用装备表面颜色陈旧,与新一代武器装备总体性能提升、发展不匹配的问题,提出研究和解决数码迷彩、陆军装备基本色的技术和应用问题^[35]。2009 年,在建国 60 周年的国庆阅兵式上,可以看到有 13 个陆军装备主站方队采用了数码迷彩,这种类似于马赛克形状的迷彩图案具有强烈的视觉冲击力和震撼力。

随着侦察水平以及相关学科水平的发展,数码迷彩伪装技术作为军队伪装装备在现代化建设中的新技术,必将对迷彩伪装技术的设计及涂装理念、方法,对武器装备的伪装性能和外观产生巨大影响。

1.3.4 其他迷彩伪装技术

(1)仿造迷彩。仿造迷彩是仿制周围目标背景图案的多色迷彩。它能使目标融合于背景中,成为自然背景的一部分^[36]。主要用于伪装各种建筑物、面积较大的人工遮障等固定目标和长期停留的活动目标,如修理工程车、移动式电站、雷达、帐篷等。仿造迷彩的斑点图案设计,除了要合理解决迷彩斑点的颜色、尺寸、形状和配置等问题外,还要根据目标周围背景和特点,对背景进行适当的伪装处理(即实施改变地形背景颜色的迷彩伪装),使目标上的斑点与周围背景图案更好地融合^[37-38]。

(2)仿生迷彩。仿生迷彩顾名思义就是指依照背景生物的体态和斑点,并且仿照背景生物的形态来设计迷彩图案的一种伪装技术。这项技术借鉴了生物伪装的特殊本领、性能、机制及物质,以人工的方法进行模拟、仿造,形成具有特效功能的军事伪装迷彩设计原则、方法和图案,简单地说,仿生迷彩是指融入生物伪装特征的军用迷彩方案^[39-40]。例如,美军在朝鲜战争中树叶型迷彩^[41]和在越南战争中使用的虎纹迷彩^[42]等都具有适用于环境的鲜明的地域和气候特色。仿生迷彩的优点是可以根据活动区域不同的生物特点有针对性地进行迷彩设计,不过该种技术由于局限性较强未能在大部分军队进行部署。

2 军事伪装技术的发展趋势和发展方向

2.1 军事伪装技术的发展趋势

2.1.1 全波段迷彩伪装

军事伪装技术应注重提高伪装涂料的性能,即光学伪装涂料应具有反射紫外光^[43]、可见光及近红外特性;热涂料能以亮暗不匀和不规则斑点来破坏和歪曲目标的热图像轮廓,使之与周围背景的热图像相吻合,使热成像侦察器材难以发现和识别目标;防激光探测涂料可吸收激光,大大减弱目标对激光的反射。广泛应用新型吸收材料,可使迷彩伪装器材随环境的物理特性变化,针对敌方侦察、制导光谱波段,自动或人工控制改变器材吸收波段,从而提高迷彩伪装器材的智能化。突出提高机具作业效能,以实施大面积、大规模迷彩伪装^[44]。例如俄罗斯正在大力发展的具有光学、红外与雷达吸波和散射隐蔽伪装效能的“斗篷”全波段伪装系统,就是一种可以在各个波段都能起到比较好的伪装效果的技术。

2.1.2 多元化遮障伪装

高技术的应用提高了伪装材料的多谱性能,大大提高了遮障器材对付紫外、可见光、近红外、热红外探测的能力。研制、发展多谱段、宽频段和综合功能全的伪装遮障器材,可使器材的功能向多、全、好的方向发展。为降低目标被敌方发现的概率,将研制“内装式”、“外加式”伪装遮障系统以及标准组件式伪装网系统,其轻巧、简捷和方便的特点,可适应各类目标在高技术战场上的高度机动性要求。

2.1.3 智能化模拟伪装

假目标功能智能化,即运用高技术,促进假目标向智能化和信息化的方向发展。未来应研制能够随环境物理特征变化,针对敌方侦察制导光谱波段,通过自动或人工控制来改变假目标特征的伪装器材,从而不仅可模拟真目标的外形和颜色,欺骗目视侦察,而且可辅以雷达反射器和热能模拟装置模拟真目标的雷达、红外特征,或主动发出某种目标信号,吸引敌人注意,成为制导武器的诱饵。如仿真假导弹、雷达特征模拟器等。英国最新研制的用于首脑工程防激光制导武器打击的“壁垒”电子对抗系统就是集遮蔽与空中预留障碍物等为一体的多功能无源智能防护系统。当来袭导弹距离目标 15km 时,该系统可紧急启动各种防御措施的任意组合来对付激光制导武器的打击。

2.1.4 伪装技术与装备一体化

现有的伪装方法大多是将器材与武器装备等要伪装的目标分开来单独设计和使用,未来伪装技术将与各种高价值目标融为一体,将伪装技术纳入武器装备的研制之中,使其本身就具有伪装能力。将伪装技术与装备进行一体化设计会使伪装及战备工序大大简化,提高了战时的作战效率。

2.2 军事伪装的发展方向

2.2.1 实现实时的自适应的伪装

为对付敌方高技术侦察与监视,外军着力发展能够使目标全天候、全过程、全时段与其周围的自然背景相融合的自适应伪装技术。目前,外军在自适应伪装材料(如变色多光谱伪装材料、温控和可变发射率伪装材料、宽频轻型雷达吸波材料)的研究方面已取得一些进展,但要真正推出多波段兼容的自适应伪装系统尚需时日。相比较而言,外军在可见光波段的自适应伪装器材方面发展较快,主要体现在发展采用热致变色、电致变色和光致变色材料的伪装服与伪装遮障,以及发展“景像”伪装技术,实现“透明式”可见光隐身两个方面。例如,美国研制的电子模拟变色伪装服采用“有源”系统,以近似迷彩图案的金属涂层覆盖伪装服的织物表面,通过电控方式调节金属涂层的迷彩颜色与图案、表面温度和热辐射强度,使之与所处的环境背景相一致。美国还把光导纤维和变色染料相结合,研制出具备自适应变色功能的伪装服。

2.2.2 开发新材料和新技术

新材料和新技术的开发利用是伪装和伪装装备发展的重要动力和技术支撑。信息、电磁、仿生、生物工程、等离子等高新技术的发展和纳米材料、变色材料、吸波材料等新兴材料的运用为军事伪装提供了全新的技术基础和发展动力,有助于实现伪装装备的防护波段宽频化、结构轻型化、功能复合化、成本低廉化和效果理想化。

2.2.3 革新伪装设计、检测和评估的方法

伪装是用于对抗敌方侦察和精确打击的,伪装的设计、检测和评估自然应尽可能贴近实战条件。但这些工作常常受到经费多寡、器材选用、装备调用、场地征用、配属保障等条件的限制,如伪装检测器材与作战使用的卫星高光谱遥感、合成孔径雷达、先进前视红外系统相比在性能上还存在较大差距;缺少空中伪装勘测平台;伪装评价依靠人员主观评价,缺少科学评价体系等。针对上述问题,军事科研人员积极利用计算机图形处理技术和仿真技术来改进伪装设计、检测和评估的

方法,在一定程度上替代了伪装试验的现场测试,大大降低了研发试验成本,缩短了伪装装备的研制周期,起到了较好的效果。

3 结语

本文介绍了现代军事伪装防御技术主要采用的伪装方法,以及伪装技术的发展趋势和发展方向。经过多年的发展,军事伪装技术已经成为了一门独立的科研技术,并形成了跨越机械制造、材料合成及图像处理等多学科门类的技术科学。这门技术学科已经形成了区域化、多样化、规范化的发展模式,各国都建立了自己的伪装技术科研体系。但在不断发展的侦察技术的背景下,现有的伪装技术会逐渐不能满足需求,所以进一步研究新的伪装技术将是科研人员的一项重要课题。

参考文献:

- [1] 张建春. 迷彩伪装技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2002.
- [2] 吕晓红. 国外伪装技术发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 1996, 26(3): 1-14.
- [3] 肖冰, 李军念, 陈秦, 等. 国外军用伪装网技术的现状及发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2003, 24(5): 64-66.
- [4] 袁洪, 马润赓. 从幼畜空地导弹看红外成像制导技术发展[J]. 飞航导弹, 2007, 37(3): 6-8.
- [5] 付伟. 红外制导武器的现状及发展趋势[J]. 红外技术, 1999, 21(5): 8-13.
- [6] Foss C F. UK Armoured Vehicles Get Thermal Imaging[J]. Jane's Defence Weekly, 2005, 42(1): 11.
- [7] Cannata R, Clifton W, Blask S. Obscuration Measurements of Tree Canopy Structure Using a 3D Imaging Laser System[J]. Proc. of SPIE(S0277-786X), 2004, 5412: 131-143.
- [8] Brian K, Philip G, Carl E, et al. High-resolution 3D Coherent Laser Radar[J]. Proc. of SPIE(S0277-786X), 2006, 6214: 121-129.
- [9] Buck J, Malm A, Zakel A, et al. High-resolution 3D Coherent Laser Radar Imaging[J]. Proc. of SPIE(S0277-786X), 2007, 6550: 277-283.
- [10] 康青, 姜双斌. 合成孔径雷达成像及工程伪装发展趋势[J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(4): 87-91.
- [11] 葛强胜. 外军机动装备伪装技术研究与发展现状[J]. 国防交通工程与技术, 2004, 2(2): 1-4.
- [12] Mark H. Hide and Seek - camouflage, Concealment and Deception: You Can't Attack What You Can't Find[J]. Jane's International Defense Re-

view, 1997(4): 26-29.

[13] Brian W. Camouflage and Other Passive Aids to Denfense[J]. Asian Defense Review, 1996(11): 37-39.

[14] Military Standard of U. S. A. PRF—53134—2005. Ultra Light—weight Camouflage Net System(UL-CANS)[S]. 2005-04-28.

[15] 周宗潼. 外军伪装装备技术新发展[J]. 工兵装备研究, 1995, 14(3): 48-54.

[16] 石叔祥. 现代国产伪装网[J]. 兵器知识, 2004(3): 29-30.

[17] 刘凯龙. 国外伪装器材及性能测试的新进展[J]. 装备环境工程, 2009, 3(5): 92-95.

[18] 孟宪浩, 吕绪良. 动态变形遮障设计与实现[J]. 光电技术应用, 2009, 24(6): 1-4.

[19] 严晨, 张卫平, 李积辉, 等. 卷帘式遮障对抗红外成像制导武器[J]. 光电技术应用, 2007, 22(4): 14-17.

[20] Inagaki Terumi, Okamoto Yoshizo. Surface Temperature Measurement Near Ambient Conditions Using Infrared Radiometers with Different Detection Wave Length Bands By Applying a Grey—body Approximation Estimation of Radiative Properties for Non—metal Surfaces[J]. NDT&E International, 1996, 29(6): 363-369.

[21] 高君芳, 南秀华, 何军. 红外伪装遮障技术的物理基础[J]. 大学物理, 1997, 16(1):37-39.

[22] 周刚. 红外成像系统对目标的发现和识别概率[J]. 红外技术, 2001, 23(3):16-18.

[23] 谢卫, 曾朝阳, 王晓勇, 等. 丛状遮障的雷达散射特性分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(5):508-511.

[24] Crispin W J, Moffet L A. Radar Cross—section Estimation of Complex Shapes[J]. IEEE Radar Technology, 2004(53): 972-982.

[25] Crispin W J, Siegel M K. Methods of Radar Cross Section Analysis [M]. New York: Academic Press,1968.

[26] 曾朝阳, 李炎, 吕绪良, 等. 吸收散射型伪装遮障新模型理论分析[J]. 防护工程, 2009, 31(1): 20-25.

[27] 李源, 杨建军, 韩晓明. 防空武器系统伪装技术及其发展趋势[J]. 国防技术基础, 2008(2): 49-51.

[28] 陶小涛, 丁庆康. 现代假目标[J]. 工兵装备研究, 1990,9(1): 81-90.

[29] Behrens R R. The Role of Artists in Ship Camouflage During World War I[J]. Leonardo, 1999, 32(1): 53R R59.

[30] Behrens R R. On Visual Art and Camouflage[J]. Leonardo, 1978, 11(3): 203-204.

[31] 朱超, 胡江华, 吕绪良, 等. 一种基于图像处理的变形迷彩设计方法[J]. 光电技术应用, 2006, 21(4): 71-74.

[32] 曹义, 才鸿年, 程海峰, 等. 变形迷彩伪装的技术指标分析[J]. 红外技术, 2008, 30(2): 118-122.

[33] 姚永平. 车辆变形迷彩伪装浅说[J]. 汽车运用, 2003, 130(8): 33-34.

[34] 喻钧, 杨武侠, 胡志毅, 等. 数码迷彩的生成算法研究[J]. 光电工程, 2011, 37(11): 110-114.

[35] 田启祥, 蒋晓军, 卢新才, 等. 数字的密码从国庆阅兵谈数码迷彩[J]. 兵器知识, 2010(1): 49-51.

[36] 秦建飞, 胡江华, 杨高峰. 仿造迷彩颜色确定的一种新方法[J]. 解放军理工大学学报, 2011, 12(1): 75-78.

[37] 刘尊洋, 王自荣, 王积成, 等. 一种基于主色聚类的仿造迷彩设计方法[J]. 激光和红外, 2009, 39(7): 793-796.

[38] Levkowsky Z H, Herman G T. A Generalized Lightness, Hue, and Saturation Color Model[J]. CVGIP, 1993, 55(4): 271-285.

[39] Marc T, Jerom C. Predator and Prey Views of Spider Camouflage[J]. Nature, 2002, 415(10): 133-134.

[40] 吴文健, 王建方. 军事生物技术概论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.

[41] Kateher P. The American Soldier: US Armies in Uniform,1755 to the Present[M]. Oxford: Osprey Publishing, 1990.

[42] Shelb S. US Army Uniforms of the Vietnam War [M]. Mechanicsburg: StackPole Books, 1989.

[43] 徐英, 李晓霞, 马超杰. 迷彩伪装方案的动态实时研究[J]. 电子工程学院学报, 2005, 24(4) : 40-43.

[44] 张建春. 浅谈雪地防紫外伪装的奥秘[J]. 现代兵器, 1993, 15(4): 34-35.

(编辑 卢湘帆)

作者简介: 颜云辉,男,1960年生。东北大学机械工程与自动化学院教授、博士研究生导师。研究方向为产品表面质量监控技术与方法、机械装备可视化设计理论与方法等。发表论文百余篇。
王 展,男,1980年生。东北大学机械工程与自动化学院博士研究生。
董德威,男,1983年生。东北大学机械工程与自动化学院博士研究生。