

隐身技术和物理

徐文兰 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要 随着目标探测技术的不断提高, 隐身技术已成为现代战争中提高武器装备生存力和战斗力的关键技术. 介绍了隐身的概念, 重点讨论了雷达隐身和红外隐身领域的一些常用技术. 研究了不同电磁波段隐身手段的相互制约以及兼容的可能性. 虽然隐身技术起源于战争, 但毋庸置疑, 隐身技术和物理学的紧密联系, 以及它在国民经济非军事领域中的多方面应用必将会引起物理学家、工业企业界人士的密切关注.

关键词 隐身技术, 探测, 红外, 雷达

美猴王虽然被封了个齐天大圣, 却无缘参加王母娘娘的蟠桃大会, 一时兴起, 偷吃了瑶池的玉液琼浆、太上老君的金丹, 丹满酒醒, 唯恐警动了玉帝, 性命难保, 使了个隐身法, 逃回了花果山. 青年物理学家格里芬才华横溢, 发明了隐身技术, 使自己可以来无影, 去无踪, 为所欲为. 中国吴承恩的美妙神话, 英国威尔斯的科幻小说, 都把隐身这一概念与偷偷摸摸行为联系在了一起. 英文单词“隐身”就是“stealth”, 干脆与“偷”同属一个词根, 这更给隐身的理解涂上了一层神秘的色彩. 那么, “隐身”究竟是什么?

我们知道一个物体之所以被人看见, 是因为该物体反射了可见光. 孙悟空和格里芬的本事真是异乎寻常. 他们都有把人射的可见光吸收或穿透掉而不反射的本领. 当然这是神话, 是幻想. 现实中有没有可能使物体被人看见的可能性减小一点? 或者要很近了才看得清? 或者被人看见的不是庐山真面目呢? 回答是肯定的. 实际上, 上述三个问题用隐身行话来表达, 就是: 降低目标发现几率, 缩短目标探测距离以及改变目标识别特征. 这些就不再是神话、幻想了. 其实自然界一些动物, 例如模样和颜色都与树枝相近的尺蠖, 可随季节植物颜色变化的许多小昆虫就很有隐身的本领. 人类当然更聪明. 当年红军、八路军、新四军常常头扎树枝

圈, 隐蔽在绿色的丛林中; 反穿羊皮袄, 静卧在皑皑的雪地上. 现代的迷彩服更是把士兵们打扮得与周围环境几乎浑然一体, 从而极大地保护了自己. 以上所讲的其实都是可见光隐身. 随着科学技术的发展, 人们已大大扩展了自身的视觉功能, 或者再专业一点讲, 就是扩展了识别、探测目标的手段. 号称“千里眼”的雷达, 号称“夜视眼”的红外探测器就是这样一些新的探测手段. 人们把可见光波段(波长 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) 的视觉范围延伸到了红外波段(波长 $0.7 \sim 1000 \mu\text{m}$), 微波波段(波长 $1\text{mm} \sim 1\text{m}$). 这样, 人们就可以在茫茫的黑夜里, 沉沉的浓雾中, 远远地“看见”目标. 可见光的隐身手段已远远不足以保护自己了. 因此, 各种反探测的隐身手段也就应运而生. 隐身技术已成了 20 世纪继火箭技术、原子弹氢弹技术后的又一重大军事技术. 本文将介绍一些隐身手段, 并就复合隐身问题, 隐身与物理学的关系, 隐身在国民经济中的作用作一些探讨.

1 雷达和激光隐身

早在第二次世界大战后期, 德国潜艇的潜望镜上就涂敷了吸收材料, 这就是雷达隐身的初次尝试. 雷达探测的过程是这样的: 雷达工作站发出的电磁波向四面八方搜索, 遇到目标后会产生反射回波. 它们就在雷达荧屏上留下

了目标的踪迹。这就是所谓的主动探测。而目标隐身目的就是尽可能地减小回波强度——雷达截面 (radar cross section, 简称 RCS)。通常目标的 RCS 用定标体来进行标定,其量纲为平方米。计算各种目标的 RCS, 研究 RCS 和雷达接收功率的关系——雷达距离方程, 就是雷达隐身研究的一个重要内容。

减少 RCS 通常有三种途径: (1) 外形技术, (2) 材料技术, (3) 阻抗加载技术。例如对一架飞机而言,人们可以通过遮盖进气道,改变尾喷管位置,采用大圆弧均匀过渡的机身、机翼等等手段来减小 RCS。但出于空气动力学、机械力学以及其他多方面的考虑,飞机设计师当然不可能一味地用改变外形的办法来减小 RCS。对于已定型的飞机,材料技术就更为重要了。为减少目标对电磁波的反射,雷达吸波材料 (RAM) 的应用就是获得隐身效果的重要途径。对 RAM 的基本要求是阻抗匹配。吸波材料的反射系数 R 由下式给出:

$$R = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \quad (1)$$

Z 和 Z_0 为材料和自由空间的波阻抗。 $Z/Z_0 = \sqrt{\mu/\epsilon}$, 这里 μ 和 ϵ 分别为材料的导磁率和介电常数。例如有一种材料, $\mu = \epsilon$, 则 $Z = Z_0$, 那么它就是最理想的 RAM。目前普遍看好铁氧体材料或以树脂为基料,以高介质损耗、高磁损耗的材料为填料的各种混合材料。经过适当设计和加工之后,这些材料具有 $\mu \sim \epsilon$ 的特性。另外,还使用一种谐振型吸波材料。当这种材料的厚度满足一定的关系式时,也可降低雷达波在目标表面的反射。只是因厚度上的要求,这种涂层的隐身波段是很窄的。阻抗加载技术就是人为地在目标表面刻槽留缝,甚至加一些装置。阻抗加载可以是有源的,不发射任何电磁波;也可以是有源的、激励的。目的都在于使产生的附加电场与原来未加载时的电磁场相消,以减小 RCS。在有源阻抗加载技术中,如能自动地根据目标接收到的雷达波方向、强度、频率来调整自身发射的电磁波,这就是自适应技术。这是一种十分理想、先进然而也是十分

艰难的技术了。

根据国内报道,由于采用了隐身技术,十万吨级新型核动力航空母舰队“尼米兹”这个庞然大物,它的 RCS 只相当于一艘巡洋舰。而一架远程轰炸机也可以在荧光屏上表现为一架小战斗机。海湾战争中, F117A 隐身攻击机的运用便是雷达隐身的一个辉煌成果。F117A 靠着它的“改头换面”,“乔装打扮”出动了 1271 架次,击中了预定目标的 40%,居然无一受到伤害。其攻击力和生存力足以使研制它的美国科学家们感到自豪!

70 年代起,激光雷达的应用促进了激光隐身研究。激光雷达与普通雷达工作原理相似,只是激光波长比微波短(通常在 $1.06\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 这两个波长),因此有更高的分辨率和测距的精度。因为没有大型的发射、接收天线,易于自身隐蔽,又不怕电子干扰,对于目标的生存带来了极大的威胁。激光隐身也是试图减少目标对激光的反射。这方面的研究工作刚刚起步。

2 红外隐身

前面讲过,雷达探测是一种主动探测。由于雷达工作站需要不断地向外发射电磁波,搜索敌方目标,其本身也就成了敌方识别、攻击的目标。近十多年来,红外技术在军事上的应用越来越广。由于红外探测是借助于目标自身的红外发射特征来感知目标存在的,因此它是被动探测。针对红外探测,必须发展红外隐身技术。目标的红外隐身较之雷达隐身更为艰难。

由斯蒂芬-玻耳兹曼定律以及发射率的定义,一个物体在全波长范围内发射的总功率为

$$W = \epsilon M = \epsilon \sigma T^4. \quad (2)$$

在这个公式里,假设了发射率 ϵ 是与温度、波长无关的量, M 是与物体等温的黑体发射总功率, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, T 是温度。为了减少目标的发射,达到隐身效果,降低温度 T 和发射率 ϵ 是显而易见的。目标敷以高温隔热材料。飞机遮挡高温尾喷口,降低排气温度等就是基于降低温度,达到隐身的考虑。对于

降低发射率 ϵ , 情况就要复杂得多了。这是因为目标除了自身发射能量外, 还对周围环境发射过来的能量进行反射。一味地降低 ϵ 有时不能达到隐身目的。下面稍稍展开一些讨论。粗糙地说, 红外探测器从目标捕捉到的能量 E_t 可以写为

$$E_t = (\epsilon M + \rho_d E_0) \frac{r^2}{l^2} + \rho_m E_0, \quad (3)$$

式中的 E_0 就是周围环境给予目标表面的能量。对于太空中的目标, E_0 包括太阳、地球等发射的能量。 ρ_d 和 ρ_m 分别为目标表面的漫反射率和镜反射率。公式中假设的目标自身发射部分也是以漫辐射方式传播的, 因此与漫反射一样, 都随距离 l 的增加而衰减。 r 是目标的线度。由能量守恒定律, 对于不透明的物体,

$$\alpha + \rho_d + \rho_m = 1, \quad (4)$$

α 为吸收系数。在平衡态中, 根据克希霍夫定律, $\epsilon = \alpha$, 因此,

$$\epsilon + \rho_d + \rho_m = 1, \quad (5)$$

这样, 由(3)式可见, 为降低 E_t , 不但要降低目标自身发射、镜反射, 而且要考虑目标周围的环境造成的 $\rho_d E_0$, 偏偏 ϵ , ρ_d 和 ρ_m 又受到(5)式的约束, 看来, 一味地降低 ϵ , 确实不是红外隐身追求的全部。加上发射率 ϵ 所涉及的多种因素, 使红外隐身的研究更加扑朔迷离了。

目前正在研究的红外隐身技术, 除了上面提到的一些外, 研制低发射率涂料和红外迷彩涂料, 改变燃烧室的结构和燃烧剂的成分等等都在摸索之中。与雷达隐身一样, 有源的红外隐身, 如使用红外曳光弹和红外干扰机产生欺骗信号也是红外隐身中的重要内容。与已有半个世纪研究历史的雷达隐身相比, 红外隐身的研究实在是年轻得很, 迄今未见应用上十分成功的例子报道。

3 隐身的兼容问题

虽然单一的隐身问题还远没有研究好, 可是军事科学家们已面临着隐身的兼容问题了。这是因为现代战争中多种探测手段的同时应用。可见光隐身、雷达隐身和红外隐身都是电

磁波隐身, 因此, 隐身的兼容其实就是研制能在宽广的电磁波段达到全面隐身的技术和材料。

由于物质对电磁波的吸收、反射、散射等特性都随电磁波的频率不同而不同, 又由于雷达、红外探测方式不同, 因而不同隐身波段对目标的电磁特性要求是不同的, 甚至是矛盾的。原则上可以说, 企求用一种物质在所有波段达到最佳隐身效果其实是不可能的。即使在雷达的不同波段, 要达到最佳隐身效果也是十分困难的, 例如前面提到的阻抗匹配型 RAM, 就不能在所有雷达波段都有 $\epsilon = \mu$ 。至于对厚度有要求的谐振型材料, 则更是十分窄波的隐身材料了。从雷达隐身角度看, 材料的吸波能力越强, 隐身效果就越好。但不论什么样的雷达隐身材料, 其吸收的电磁波最终变成了热能。这对于尽可能减少红外辐射的红外隐身又是十分不利的。尽管隐身的兼容问题似乎面临着山重水复、无路可走的境地, 但人们的智慧还是会给它一点柳暗花明的希望。文献[1]分析了不同波段隐身之间的相互牵制, 矛盾所在, 也讨论了红外、雷达隐身兼容的可能性, 提出了四种可能的兼容设想: (1) 金属颗粒型混合涂料或金属薄膜型多层膜, (2) 表面结构的考虑, (3) 迷彩式伪装, (4) 放射性同位素。由于激光波段中的 $10.6\mu\text{m}$ 正好在红外波段, 它的隐身和红外隐身的矛盾更为明显。因此, 研究一种在 $10.6\mu\text{m}$ 有高吸收, 而在红外的其他波段有低吸收, 从而产生低发射的所谓“打洞”材料也是科学家孜孜以求的目标。

4 隐身和物理学科的关系

从上面对隐身技术的介绍中可以看到隐身技术涉及到电磁学、光学、热学、材料学等多种学科, 与物理学有着千丝万缕的联系。下面举一些例子来说明这种联系。

在雷达隐身中, 我们提到了 RCS 这个概念。要研究目标的 RCS 特性, 就必须应用电磁散射理论来求解目标的散射电磁场。原则上可以从麦克斯韦方程组及边界条件求出电磁波的散射场。但在实际计算中, 由于目标边界条件

的复杂性, 求解方程往往是不可能的。考虑到目标线度和波长的关系, 人们把电磁场的散射分为不同区域, 分别用不同的方法加以解决。图 1 是一张导电球 RCS 图。图中 a 为球半径, λ 为波长。横坐标自左至右, 频率从低到高, 分为瑞利区、谐振区和光学区。其实一般形状的物体都可按其线度和波长的关系划分为三个区。对于复杂形体的目标, 目标上各个部位可能处于不同的区。如一架飞机, 它的机翼前沿处于光学区, 而炮口处则处于瑞利区。在不同的区用不同的方法求解散射场: 瑞利区用静电学方法, 谐振区用矩量法, 光学区用几何光学、物理光学、几何光学绕射理论等。这些都是物理工作者熟知的方法。

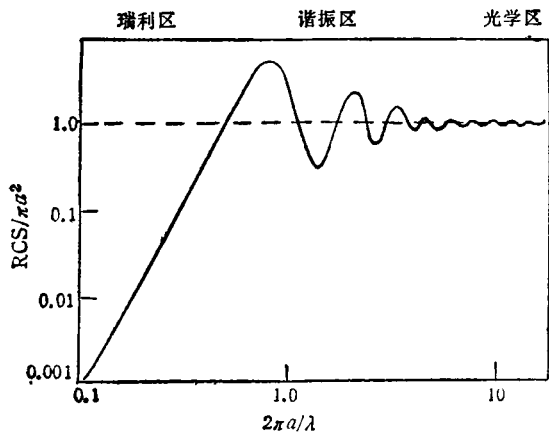


图 1

包含许多小颗粒的非均匀涂层, 可以改善物体的辐射性能。因此, 研究非均匀涂层的电磁波特性是一个既有典型物理内容, 又有很强隐身应用背景的问题。近年来, 作者采用一些物理手段对这个问题作了研究。文献 [2] 和文献 [3] 是这方面工作的结果, 下面作一简单介绍。考虑到涂层系统的所有辐射来源 (涂层自身辐射、涂层对外来辐射的反射、衬底透过涂层的辐射), 就可以建立起辐射能流的传输方程。这是一个一阶线性非齐次微分方程组。解这个方程组, 便可以得到涂层系统的表现反射率和发射率。这正是红外隐身研究中所关注的两个物理量。研究表明, 只有计算出涂层内颗粒的

吸收系数和散射系数后, 才能最后把反射率、发射率与涂层的组成、颗粒的粒径、体积比等量联系起来, 才能进行改善涂层性能及设计隐身材料方面的讨论。与上面提到的 RCS 随波长和目标线度关系变化的讨论一样, 根据涂层内颗粒粒径与红外波长相比较的大小, 用不同的方法计算了不同粒径颗粒的吸收系数和散射系数。

顺便指出, 前面提到的能量守恒、吸收和发射的关系等都限于平衡态理论, 而实际物体的吸收、发射、反射等都处于非平衡态, 因此如何发展非平衡态理论去研究隐身问题, 则是一个难度更高的物理问题了。

在研究隐身机理时, 我们发现所使用的一些方法和编制的一些程序可以用来推求混合物的介电常数^[4]。这是一个相当古老然而至今尚未完善的物理问题。

总之, 用物理学的方法去研究隐身, 在研究隐身时又解决了其他物理问题。这两个方面构成了隐身和物理学的联系。下一节还会补充这第二方面的内容。

5 隐身技术在国民经济中的作用

在一般人心目中, 隐身技术总是与军事相联系的, 前面介绍也侧重了这一点。其实, 隐身技术已在民用中初试锋芒。

随着计算机技术深入到各个领域, 保密问题也提到日程上来了。计算机的信息可以通过缝隙、接口、接插件向外泄漏。在一定距离内, 可以截取这些信息。如果用 RAM 微波吸收材料去堵塞这些泄漏渠道, 就可使计算机“隐密”。

电子技术的广泛应用同时也导致了有害人类健康的电磁辐射的增加, 也对正常运行的其他电子设备产生干扰。显然, 用 RAM 可以对发射电磁波的设备进行有效屏蔽。日本的 TDK 和 Nippon 公司已研制出 RAM 涂料和瓷砖等材料。这些材料用于厨房, 可防止微波污染; 用于高层建筑外墙, 可防止电磁波反射引起电视图象的重影; 用于桥梁, 可消除重叠信号, 以利于船只在多雾气候中航行。

由于 RAM 在吸波后产生了热量, 因此在

医学上可将小块 RAM 植入人体,用体外的辐射源使其吸收发热达到理疗效果。RAM 在生物发酵、制药、酿造工业上也是有用的。

不同红外发射率的材料可以在卫星的温度控制、住宅的保暖、加热烘烤技术方面找到用武之地。例如低发射率的 In_2O_3 掺杂膜目前已用于照明灯具的隔热和太阳能集热器上。为住宅窗户专门设计的热镜在冬天可以透过太阳光,并将室内红外线反射回室内;在夏天则能将太阳光的红外辐射部分反射掉,同时又可透过可见光。而热镜技术与红外隐身技术是十分相关的。

笔者本意为了研究隐身机理而对非均匀涂层进行的研究^[3],不料被法国一家研究所告知,我们的工作对他们研究植物种子透过薄层在土壤中吸水的问题很有帮助。这样,隐身的研究无心地在这一领域中插了一棵柳!我们相信,随着科学的发展,隐身技术与其他军用技术一样,会在民用行业中体现出它的价值。

6 结语

由于隐身技术涉及到多个学科的交叉,隐

身技术的研究确实有相当的难度。前面提到的在海湾战争中大显神威的 F117A 隐型飞机,其隐身性能却极大地损害了它的气动性能。飞机最快只能以亚音速飞行,在试飞阶段还掉下来三架。更为严重的是它居然也没能逃过“猎鹰号”雷达的追踪,幸好这种雷达是沙特阿拉伯的!道高一尺,魔高一丈。探测技术的发展引出了隐身技术;而隐身技术刚刚起步,反隐身技术又初露端倪。隐身技术正面临着“路漫漫其修远兮”!但是如果物理学家能与化学家,与军事科学家联袂合作;如果工业、企业界人士能意识到隐身技术在国民经济中的地位,那么这一领域的工作在我们国家的前途也是辉煌的。

参 考 文 献

- [1] 徐文兰、沈学础,隐身技术, No. 16(1992), 1.
- [2] 徐文兰等,红外研究, 9-5(1990), 384.
- [3] Wenlan Xu, S. C. Shen, *Applied Optics*, 31-22 (1992), 4484.
- [4] 徐文兰、褚君浩, 红外和毫米波学报, 13-5(1994), 391.

物理学在酿酒工业中的应用

许福运 胡宁 张明勤 崔元明

(山东建筑工程学院, 济南 250014)

王公堂

(山东师范大学物理系, 济南 250014)

摘要 介绍了在酿酒工业陈化过程中所用到的八种物理学方法。它们是静电、磁场、红外线、微波、 α 射线、 γ 射线、光学和电子综合催陈方法,并对每种方法的工作原理、使用条件设备和效果简单地作了介绍。

关键词 物理学, 光学, 酿酒

众所周知,新酿制的酒简称新酒,生性暴辣,缺乏风味,但在容器中贮存一定时间后(称陈化或老熟),则辣味减少,刺激性变小,同时香

味增加,酒味醇和,回味绵长,口味协调。因此,陈化是提高酒质的重要工艺过程,酒的品种不同,陈化时间也不同,短则数月,长则数年。例