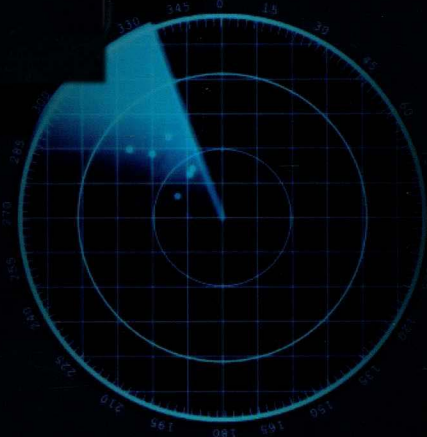


试验物理与计算数学重点实验室系列丛书



等离子体雷达 散射截面减缩技术

[印]赫玛·辛格 (Hema Singh)

[印]西玛·安东尼 (Simy Antony)

著

[印]拉凯什·莫汉·杰哈 (Rakesh Mohan Jha)

张生俊 莫锦军 薛晖 译

刘佳琪 审校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer

重点实验室系列丛书

等离子体雷达 散射截面减缩技术

Plasma - based Radar Cross Section Reduction

[印]赫玛·辛格 西玛·安东尼 著

拉凯什·莫汉·杰哈

张生俊 莫锦军 薛 晖 译

刘佳琪 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

等离子体雷达散射截面减缩技术 / (印) 赫玛·辛格 (Hema Singh), (印) 西玛·安东尼 (Simy Antony), (印) 拉凯什·莫汉·杰哈 (Rakesh Mohan Jha) 著; 张生俊, 莫锦军, 薛晖译. —北京: 国防工业出版社, 2018. 10

书名原文: Plasma - based Radar Cross Section Reduction

ISBN 978 - 7 - 118 - 11759 - 2

I. ①等… II. ①赫… ②西… ③拉… ④张… ⑤莫… ⑥薛… III. ①等离子体 - 雷达 - 散射截面 IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 233154 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京龙世杰印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 2 5/8

2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 26.00 元



(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

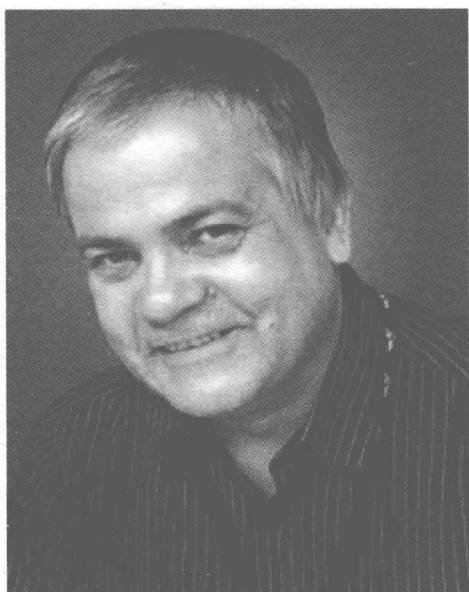
发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

本书献给 R. Narasimha 教授。

纪念 Rakesh Mohan Jha 博士,伟大的科学家,良师和杰出人物。



Rakesh Mohan Jha 博士是杰出的科学家、一位完美的人,也是我们所有与本书相关人员的伟大导师和朋友。我们以沉重的心情哀悼他的突然去世,并将本书献给他以作纪念。

译 者 序

翻译这本小册子,着实有些犹豫:一方面,等离子体隐身是近年来国内外研究的热点,理论与试验研究著述很多,但对应用效果的定量分析及试验验证等方面内容的文献较少,我们希望通过此书翻译可以使相关科研人员对国外的研究有一个了解和借鉴;另一方面,此书内容较少,能对读者起多大帮助,我们也不确定。最终,我们还是决定努力把它翻译出来,把作者关于等离子体隐身的认识和看法呈现给国内的研究者们,以供借鉴。本书对等离子体隐身的开创者俄罗斯(苏联)及等离子体天线的提出者美国的研究有所涉及,但不够深入,但是此书基本反映了等离子体隐身领域的发展动态,值得作为研究参考。书中也引用了不少中国学者的研究成果,说明中国学者在等离子研究方面走在世界的前列。本书由实验物理与计算数学国家重点实验室组织,张生俊、莫锦军、薛晖翻译,刘佳琪审校。本书翻译过程中得到了国家自然科学基金项目(批准号:61471368、61571031)的资助,还得到空军工程大学徐浩军教授、南京航空航天大学刘少斌教授的大力支持与帮助指导,在此一并感谢。本书虽经认真翻译和审校,仍难免有瑕疵,不当之处恳请批评指正。

译者

2018.5

序

为减缩和控制目标雷达散射截面(RCS),人们尝试了各种技术手段,包括赋形、使用雷达吸收材料、频率选择表面和功能材料等。等离子体隐身技术也是一种有效的 RCS 减缩方法,该技术利用包覆在目标结构周围的等离子体层实现对入射电磁波的反射和吸收。本书回顾了迄今为止在公开文献中报道的基于等离子体的 RCS 减缩研究进展,从电磁波与等离子体相互作用的基础理论出发,简要讨论了用于分析等离子体传播特性的方法和等离子体的产生方式,对等离子体传输特性进行了参数化分析,并指出实现等离子体隐身面临的主要挑战。阅读本书可以深入理解电磁波在等离子体内传输时各种参数所起的作用,希望为在等离子体隐身领域工作的研究人员提供参数化理论依据。

Hema Singh

Simy Antony

Rakesh Mohan Jha

前 言

国家航空航天实验室(NAL)作为印度科学和工业研究理事会(CSIR)的成员单位,是印度唯一的民用航空航天研究所(下面简称为CSIR-NAL)。CSIR-NAL是一家专注于航空航天各个学科研究的高科技机构,其任务是发展航空航天技术的各学科内容,设计和制造中小型民用飞机原型,并为国家航空航天项目提供支持。CSIR-NAL有很多先进的测试设施,包括被认证为国家设施的3倍声速风洞。涉及的专业领域和能力包括计算流体力学,实验空气动力学,电磁学,飞行力学和控制,涡轮机械和燃烧,机身复合材料,航空电子学,航空航天材料,结构设计、分析和测试,等等。CSIR总部设在印度新德里,CSIR-NAL则位于印度班加罗尔。

CSIR-NAL和施普林格(Springer)出版社最近签署了一份合作协议,为CSIR-NAL的作者在施普林格出版一个专辑。该专辑书目力图反映CSIR-NAL在航空航天不同领域的最新研究成果,展现其出色的研究能力和对全球科学界的贡献。

专辑第一组的5本书全部来自CSIR-NAL电磁中心,并作为计算电磁学方面的施普林格综述(Springer Briefs)系列的组成部分,这也是电气和计算机工程领域施普林格综述系列的一个子系列。

CSIR - NAL 电磁中心主要研究航空航天工程背景下存在大型机身结构影响时的电磁设计和分析问题,与传统的自由空间环境电磁学研究有很大差别。电磁学中心在这些领域取得的一些先进成果已经成为有关研究的基础理论。例如,由该中心电磁科学家提出的测地线常数法(GCM)已被全世界的同行广泛采用,成为现代共形天线阵列理论的根基。

电磁中心的研究领域包括:①表面建模和射线追踪;②空间天线分析和选址(飞机、卫星和卫星运载火箭(SLV));③航空航天器雷达散射截面(RCS)研究,包括雷达吸波材料(RAM)和雷达吸波结构(RAS),RCS 减缩和有源 RCS 减缩;④相控阵天线,包括共形阵列和自适应共形阵列设计;⑤频率选择表面(FSS);⑥天基和地基雷达天线;⑦高达太赫(THz)频段的航空航天超材料;⑧材料的电磁特性。

希望此施普林格综述系列图书的出版发行有助于有关新研究的开展,并促进本实验室与世界各地学术和研究组织建立新的合作关系。

Shyam Chetty
CSIR - NAL

致 谢

感谢位于印度班加罗尔的 CSIR - NAL 实验室主任 Shyam Chetty 的支持,他推动了施普林格综述系列图书的撰写。感谢提出有益建议的 CSIR - NAL 电磁中心各位同仁,他们是 R. U. Nair 博士、Shiv Narayan 博士、Balamati Choudhury 博士和 K. S. Venu 先生。在本书撰写过程中,他们提供了很多无私帮助。感谢 Harish S. Rawatt 先生、P. S. Neethu 女士、Umesh V. Sharma 先生和 Bala Ankaiah 先生等电磁中心项目职员,感谢他们在书稿准备过程中的一贯支持。

本书能在如此短的时间内出版,离不开施普林格出版社有关人员的热心帮助和鼓励,特别是出版社副主任 Suvira Srivastav 和应用科学及工程高级编辑 Swati Mehershi 的努力。我们对施普林格出版社职员 Kamiya Khatter 女士和 Aparajita Singh 女士为这本小册子出版给予的帮助致以衷心的感谢。

Hema Singh
Simy Antony
Rakesh Mohan Jha

作者简介

Hema Singh 博士现任位于印度班加罗尔的 CSIR - NAL 电磁中心高级科学家。在 2001—2004 年间,她曾任位于印度彼拉尼(Pilani)的 BITS 大学讲师。她 2000 年毕业于印度 IIT - BHU 大学,获电子工程博士学位。她的研究领域是航空航天应用中的计算电磁学。她在 GTD/UTD 方法、室内环境下的电磁传播分析、相控阵天线、共形天线和有源 RCS 减缩等方面做出了贡献。她因在相控阵天线、自适应阵列和有源 RCS 减缩方面的杰出贡献获得 2007—2008 年度 CSIR - NAL 最佳女科学家奖。Singh 博士与他人合著了一本专著并撰写了另一本专著中的一章内容,发表了 120 篇研究论文和技术报告。

Simy Antony 获印度卡利卡特大学本科学位和柯钦科技大学硕士学位,均为电子专业。她是 CSIR - NAL 电磁中心的项目科学家,主要从事空天飞行器 RCS 特性研究。

Rakesh Mohan Jha 博士曾任 CSIR - NAL 电磁中心首席科学家和主任。Jha 博士于 1982 年获得印度 BITS 大学的电子学本科和科学硕士双学位,于 1989 年获得印度工程科学研究所(Engineering of Indian Institute of Science)航空航天系的计算电磁学工学博士学位。Jha 博士曾于 1991 年在牛津大学的工程科学系作 SERC(英)访学博士后研究员。他分别于

1992—1993 年和 1997 年在德国卡尔斯鲁厄大学的高频技术和电气研究所作洪堡研究员。他于 1999 年被授予 Sir C. V. Raman 航天工程奖。Jha 博士于 2010 年因在航天工程中的电磁应用贡献被选举为 INAE 院士,他同时也是 IETE 会员和 ICCES 杰出会员。Jha 博士出版了多本专著,发表 500 余篇研究论文和技术报告。他在本书的撰写过程中因心脏骤停而不幸去世。

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	等离子体物理基本概念	4
1.2	等离子体性能影响机理	7
1.3	等离子体隐身	13
第 2 章	电磁波在等离子体中的传播	15
2.1	磁化等离子体中的电波传播	15
2.1.1	静止的等离子体平板	16
2.1.2	运动的等离子体平板	27
2.2	非磁化等离子体中的电波传播	30
第 3 章	基于等离子体的 RCS 减缩	39
3.1	等离子体生成机理	39
3.2	等离子体包覆目标的 RCS 计算	41
3.3	等离子体与雷达吸波材料的结合	52
第 4 章	等离子体隐身面临的挑战	55
第 5 章	结论	57
参考文献		62

第 1 章 引 言

隐身或低可探测性并不意味着目标从雷达中完全消失,而是指目标具有较低的雷达回波,只有在更近的距离上才会被雷达探测和跟踪。这和地面战斗中的士兵伪装类似,除非士兵距离敌军很近,否则敌军无法发现。通常,隐身技术是指降低目标散射特性,防止被探测和识别的一切手段(Vass, 2003)。

简而言之,RCS(雷达散射截面)的重要性体现在它直接影响雷达的探测距离上,从雷达距离方程(Skolnik, 2003)可以很明显看出这一点:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}}} \quad (1-1)$$

式中: $R_{\max}$ 为最大探测距离; P_t 为雷达发射功率; G, A_e 分别为发射天线增益和接收天线有效面积(单站时与发射天线相等); σ 为目标 RCS; $S_{\min}$ 为最小可探测信号。

人们已经用赋形设计、雷达吸波涂层、工程材料和等离子体等方法切实实现了飞行器对雷达探测源的隐匿或隐身。特别地,等离子体隐身技术是仍然在研究的内容。根据推测,俄罗斯和美国已经在航空航天领域实现了基于等离子体的雷达目标低可探测(<http://www.rense.com/general168/>

newrussianstealth)。但由于保密原因,详细内容和数据并未公开。

通常,隐身飞行器应该在 6 个方面实现低可探测,即雷达、红外、可见光、声学、烟雾和尾迹(如等离子体尾焰)等。等离子体隐身,也认为是一种有源隐身技术,首先由俄罗斯提出。他们(指美、俄)通过在飞机前端放置等离子体炬实现隐身。等离子体炬在飞机周围产生电离云团,吸收入射雷达波(图 1-1)。据 2002 年《电子防御杂志》报道,采用该方式产生等离子体云团,其隐身效果可使歼击轰炸机(Su-27IB)的 RCS 减缩 20dB。

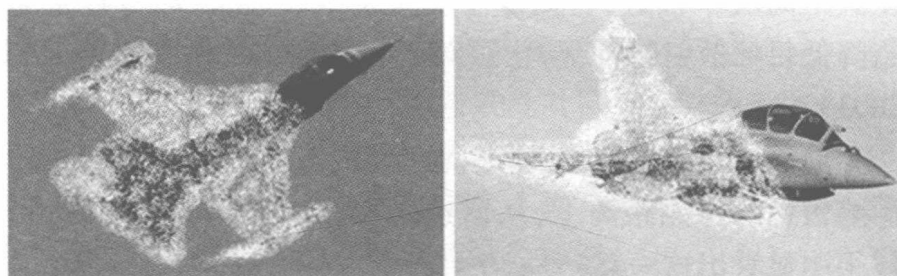


图 1-1 覆盖等离子体云团的飞行器

然而,这种等离子体发生器十分笨重(约 100kg)。所产生的等离子体防护层消耗掉部分入射雷达波能量,并使部分雷达波绕飞行器偏折,从而将目标 RCS 降低两个数量级。俄罗斯主要使用冷等离子体技术对飞行器进行隐身。

根据电离度可以把等离子体分为冷等离子体和热等离子体。热等离子体中工质是完全电离的(Dinklage, 2005),冷等离子体中只有部分气体分子电离。冷等离子体中电离的电子没有足够的能量从其相应的离子逸出(不具有随机特性),因此,温度对冷等离子体参数的影响可以忽略不计。

等离子体隐身防护是基于入射电磁波在被目标散射前可以被等离子体吸收这一事实。而且,相比于对入射波形成锐利不连续界面的目标表面来说,等离子体—空气界面,从电尺寸角度来说是连续的,可降低反射的雷达特征信号。

覆盖飞行器的等离子体云团可能会产生其他特性,如热、声、红外或可见光等,从而导致在利用等离子体减缩 RCS 的同时可能会因为这些特性的产生而增大目标的可探测性。因此,需要对等离子体的产生方法和它与电磁波的相互作用进行深入研究。此外,还需要选取和优化那些能够通过控制来达到降低目标的雷达可探测性的等离子体参数进行。

本书对基于等离子体的 RCS 减缩方法进行综述。1.1 节是等离子体的理论基础;1.2 节描述了影响等离子体性能的等离子体参数;1.3 节对等离子体隐身进展进行了简单论述。

第2章分析等离子体与入射电磁波的相互作用。2.1 节和 2.2 节分别介绍磁化等离子体和非磁化等离子体的基本特性。

第3章给出等离子体覆盖简单目标的 RCS 结果;3.1 节讨论了等离子体产生的机理和维持等离子体的功率要求;3.2 节讨论了预估和减缩等离子体覆盖目标 RCS 的近似和方法;3.3 节介绍了等离子体与雷达吸波材料组合应用时的性能。

第4章讨论等离子体隐身技术实用化所面临的挑战。

第5章对等离子体 RCS 减缩现状进行了总结。

1.1 等离子体物理基本概念

等离子体被认为是物质的第四态。据报道,宇宙中 99% 的物质都处于等离子体态 (Chen, 1974)。等离子体的例子包括闪电、荧光管内的导电气体、北极光、火箭尾焰等。

等离子体是一种含有带电粒子的气团。具体地说,它是由带正电荷的离子、带负电荷的电子和中性粒子共同组成的电中性、高度电离的气体。从稳定的原子中电离电子需要能量。并不是所有电离气体都能称为等离子体。等离子体应该有一定的电离度。因此,等离子体定义为包含荷电粒子和中性粒子的准中性气体。

气体电离生成等离子体的机理有 3 种,即热致电离、电致电离和辐射电离。

(1) 热致电离。由热激发产生的电子—离子对是不稳定的。当温度和电子密度足够高时,每一个复合过程都能伴随有电离过程,此时,等离子体就能够保持自持。然而,这一过程所需的温度至少为 10000°C , 远高于任何金属能承受的温度。

(2) 电致电离。通过对气体施加高强度电场实现。此时,电子被激发并脱离原子,这些加速的电子又与中性原子碰撞,产生进一步的电离。雷暴就源于这种类型的电离。

(3) 辐射电离。通过电磁辐射实现。此时入射光子要具有比电离阈值更高的能量。例如,电离层中由太阳的紫外辐射所致的电离。

注意,隐身用的等离子体应以这样的方式产生:其应容