

# 红外与毫米波复合天线光能传输效率计算方法的研究

刘敬海 林幼娜 徐荣甫 王茜倩 崔小虹 徐丽 张静

邹立建 李松明 李凯

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

文摘: 本文研究红外与毫米波复合天线光能传输效率的计算方法, 在一种比较好的复合结构下, 推导出了光能传输效率的计算公式。实际计算和实际测量结果相符, 说明计算方法正确可用。该计算方法为选择合适的复合参数提供了理论分析根据。

关键词: 复合制导 红外辐射 光学系统 传输效率

## 1 引言

复合制导是当前制导技术发展的趋势, 受到各国的普遍重视, 如美国的 stinger post 地空导弹采用紫外/红外复合制导, 美、德和丹麦联合研究的 PAM 航空导弹采用了雷达/红外复合制导, 北约的 ASP155mm 末制导炮弹采用毫米波/红外复合制导, 美国的 SADARM 传感器引爆炸药采用毫米波/红外成象复合制导, 美国的铜斑蛇Ⅰ末制导炮弹采用激光半主动/红外成象复合制导, 法国的 TACED 反坦克导弹采用毫米波/双色红外复合制导等等。

由于毫米波具有穿透烟雾能力强但分辨率低的特点, 红外波具有分辨率高但穿透烟雾能力弱的特点, 二者结合能发挥各自的优点, 克服各自的缺点, 大大提高抗干扰、反隐身和命中率的能力。因此红外与毫米波复合制导倍受人们关注。

红外与毫米波复合制导的关键技术之一是复合天线(或复合集能器)技术。要求复合天线既能高效传输毫米波又能高效传输红外光能, 但二者的要求往往矛盾, 只有统筹兼顾才能设计出比较好的复合天线。本文就红外与毫米波复合的具体结构找出红外光能传输效率的公式, 从理论上研究红外与毫米波复合天线最佳兼容的结构和尺寸。

## 2 红外与毫米波复合天线的结构型式

### 2.1 共口径和分口径

红外与毫米波复合制导的复合天线可采用分口径和共口径两种方式。

分口径是毫米波和红外线各走各的路, 这种方式的优点是不必考虑红外与毫米波能兼容的问题, 二者互不影响, 结构也易制作。但它存在严重缺点: 红外与毫米波各需一套集能结构, 结构复杂, 体积大; 在测量同一目标时红外和毫米波各有一套坐标系统, 需要校准, 存在校准误差。

共口径是红外和毫米波共用一个集能器, 它发射毫米波, 同时兼收毫米波和红外能量, 并能把红外和毫米波分离开来, 分别传输到红外探测器和毫米波接收机。这种方法的优点是: 其光轴和电轴重合, 探测同一目标时, 两坐标系统一致, 减小校准误差, 可提高探测精度; 体积小, 重量轻, 有利减小复合导引头的体积和重量。这种方法的缺点是: 要考虑红外与毫米波兼容的问题, 在材料选择、结构设计和制作上有一定难度。但这一难度是可以解决的。

比较两种方式, 以共口径性能最佳, 因此人们集中力量进行研制, 不断攻破技术难关。

### 2.2 共口径复合天线型式

红外与毫米波复合共口径形式有多种, 毫米波可采用前馈方式也可采用后馈方式。

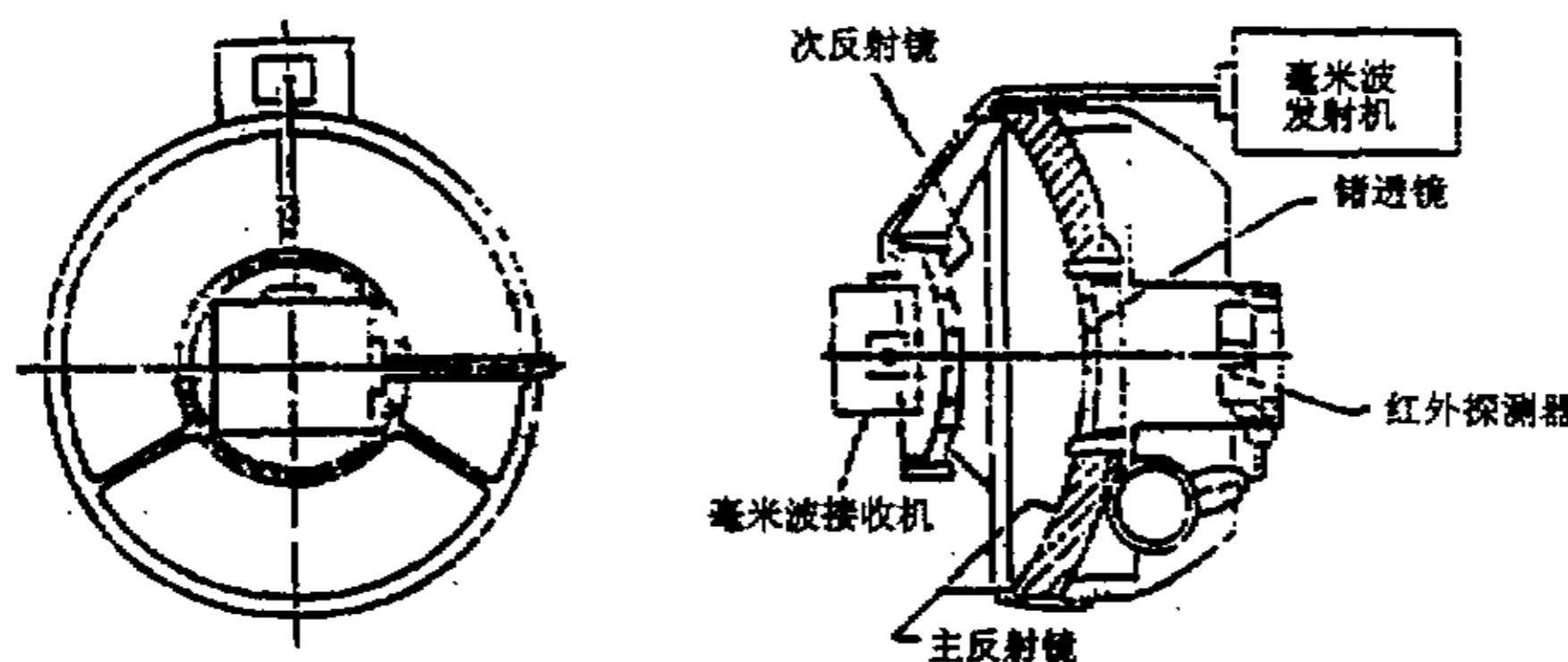


图 1 毫米波前馈式结构

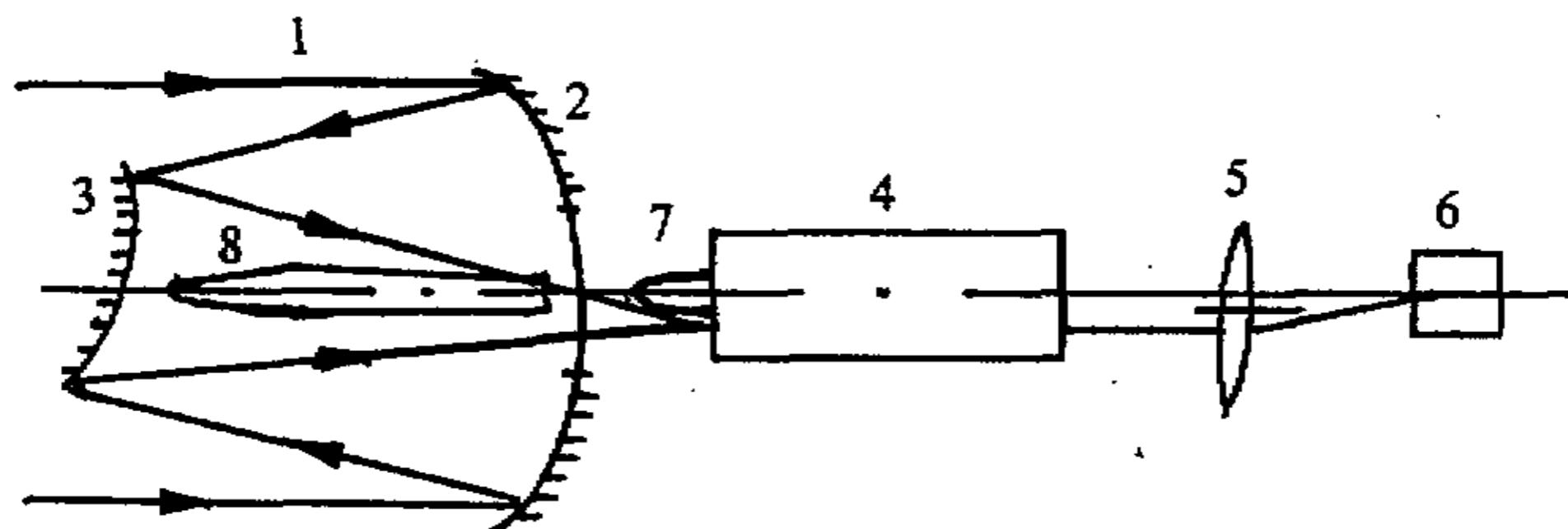


图 2 毫米波后馈结构

图 1 是毫米波前馈方式的一种结构, 主镜和次镜组成卡塞格林系统, 主镜做成抛物面型, 可反射红外和毫米波。次镜用石英材料, 镜对红外有高反射率对毫米波有高透过率的膜。馈透镜镜对红外高透而对毫米波高反的膜。毫米波的馈源喇叭放在次镜前面并位于主镜的焦点上。毫米波发射机发射的毫米波透过次镜由主镜发射出去。由目标反射回的毫米波经主镜反射透过次镜传到毫米波接收机。红外辐射经主、次镜反馈, 透过校正透镜会聚到红外探测器上。这种结构的缺点是, 当主镜和次镜需要稳定时, 毫米波发射和接收部分会增加陀螺的负担。

图 2 是毫米波后馈方式的一种共口径结构型式。1 为红外辐射和毫米波回波信号, 2 为主反射镜, 3 为次镜, 4 为红外光纤, 5 为偏心透镜, 6 为红外探测器, 7 为毫米波发射和接收机, 8 为毫米波发射和接收的介质杆, 2 和 3 组成卡塞格林系统, 放到陀螺上, 由陀螺稳定。红外辐射经 2、3、4、5 后会聚到探测器 6 上。2、3、8、7 发射和接收毫米波。这种结构型式的主要优点是除主、次镜外, 探测器和毫米波发射器等都不在陀螺上, 大大减轻了陀螺的负担, 有利实验结构的小型化。这是一种优选的方案。

### 3 红外光能传输效率的计算

图 2 所示的共口径红外与毫米波复合天线的结构是一种小型化的理想方案。为了便于分析这种方案, 我们就红外光能传输效率进行了计算。由图 2 可见, 红外光在传输过程中, 主要受 2、3、8、7、4、5 影响, 整个光学系统的传输效率可用系统的透过率  $\tau_0$  表示。

$$\tau_0 = R_2 R_3 \tau_4 \tau_5 (1 - F) \quad (1)$$

式中  $R_2$  为主镜的反射系数;  $R_3$  为次镜的反射系数;  $\tau_4$  为光纤的透射系数;  $\tau_5$  为偏心透镜的透射系数;  $F$  为介质杆 7 和 8 的挡光系数。 $R_2, R_3, \tau_4, \tau_5$  可以测量给出, 不受毫米波影响, 不必计算。 $F$  受介质杆 7、8 的影响, 7 和 8 粗且靠得近对毫米波传输有利, 但挡红外光多, 为了二者兼顾要合理选择 7 和 8 的直径以及它们之间的距离。下面分析  $F$  的计算方法。

当搜索角为  $\alpha$  时, 由次镜 3 反射到主、次镜组合焦点  $O_2$  的光路如图 3 所示。图中  $B'O_2$  为次镜, 绕  $O_1$  转动了  $\alpha$  角, 其半径用  $R_\alpha$  表示; 7 为传导毫米波的介质杆露出光纤的部分; 8 是传导毫米波且与次镜一起动的介质杆, 上粗下细, 杆最下端半径为  $r_8$ , 杆上端最粗处  $D$  的半径为  $r'_8$ ;  $O_1O_2$  为整个光学系统的机械轴;  $O_2$  为主、次镜的组合焦点,  $O_1$  和  $O_2$  之间距离用  $h$  表示;  $l_1$  为  $O_1$  至次镜的距离;  $l_2$  为介质杆 8 上端最粗处到  $O_1$  的距离;  $l_3$  为介质杆 8 下端到  $O_1$  的距离。

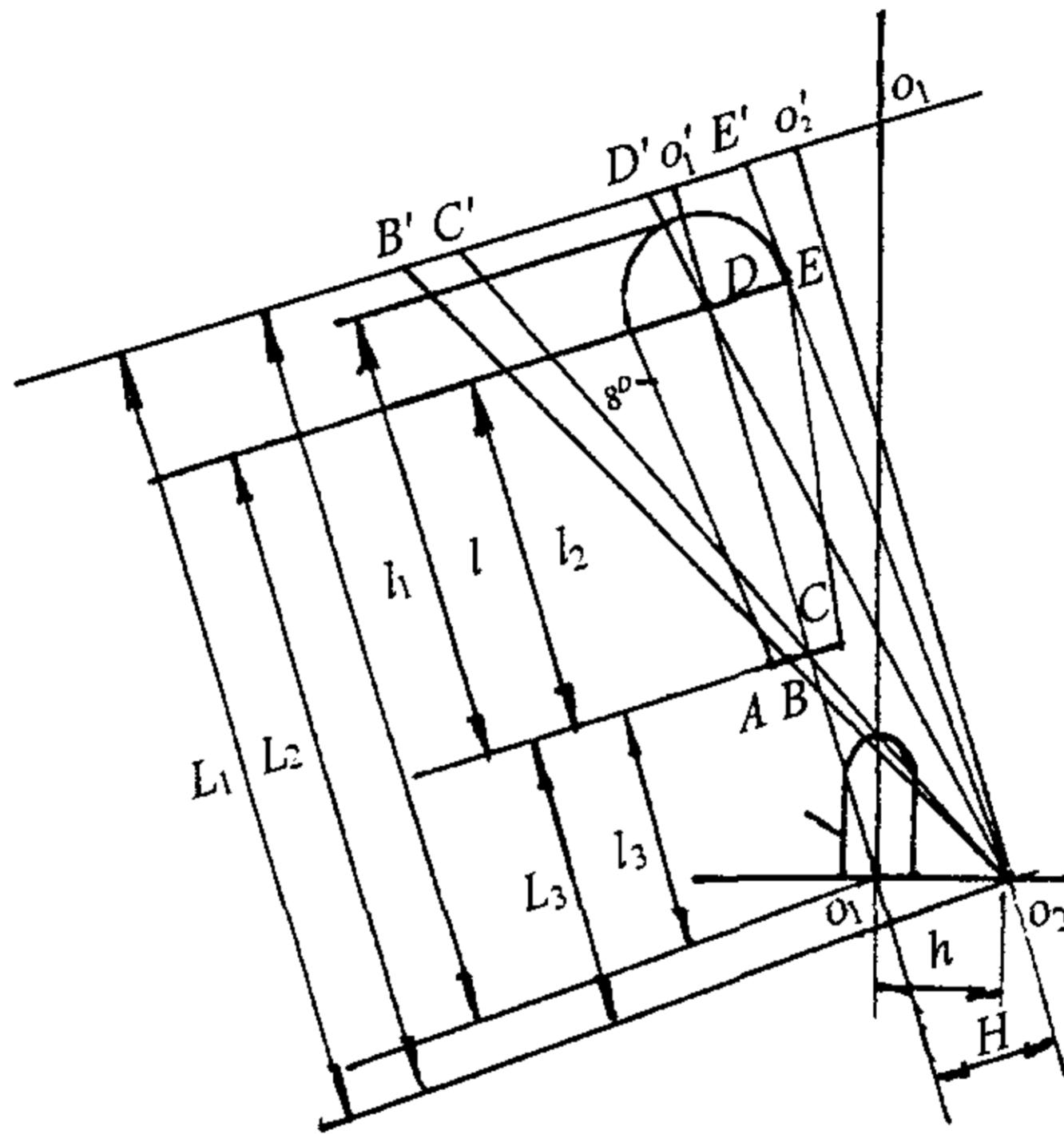


图 3 由次镜反射到主次镜组合焦点的光路图

根据光的可逆性, 由次镜反射到组合焦点  $O_2$  的光线被介质杆 7 和 8 的挡光情况, 可以用从焦点  $O_2$  发出的光被介质杆挡光后在次镜上的投影表示, 投影情况如图 4 所示。根据实际情况由计算机仿真模拟可以发现, 介质杆 8 在  $AC$  ( $C$  为 8 下端面的圆心) 之间的挡光大小取决于介质杆 8 下端面  $AC$  之间的弦长;  $CD$  之间挡光大小取决于光线与介质杆轴线相交处的直径;  $DE$  之间的挡光情况下取决于介质杆最粗处圆截面  $DE$  之间的弦长。

由图 3 可见,

$$H = h \cos \alpha \quad (2)$$

$$L_1 = l_1 + h \sin \alpha \quad (3)$$

$$L_2 = l_2 + l_3 + h \sin \alpha \quad (4)$$

$$L_3 = l_3 + h \sin \alpha \quad (5)$$

在  $BC$  之间任取一点  $x_1$ , 在次镜上投影点为  $x'_1$ ,  $x'_1$  至  $O'_2$  之距  $x'_1O'_2$  和  $x'$  的投影宽度

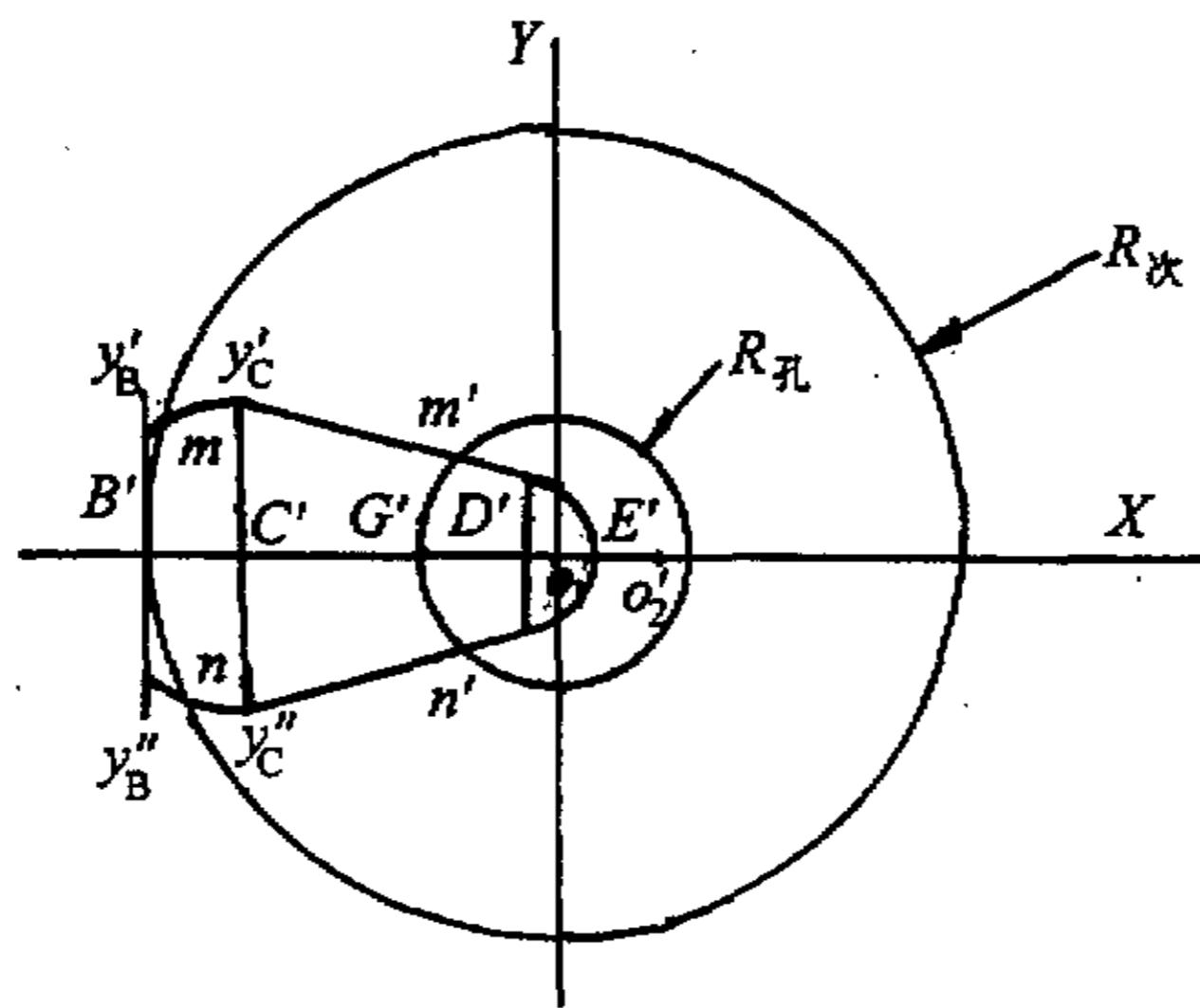


图 4

$y'_1, y''_1$  分别为

$$x'_1 O'_1 = (H + K r_1) L_1 / L_3 \quad (6)$$

$$y'_{1_1} y''_{1_1} = 2r_1 \sqrt{1 - K^2 L_1 / L_3} \quad (7)$$

式中  $K$  为位置系数, 从  $C$  到  $A$ ,  $K = 0 \sim 1$ , 中心  $C$  处,  $K = 0$ , 由(6)和(7)式得

$$C' O'_1 = H L_1 / L_3 \quad (8)$$

$$y'_{1_1} y''_{1_1} = 2r_1 L_1 / L_3 \quad (9)$$

在杆  $CD$  之间任取一点  $Z$ ,  $Z$  至杆下端面之距为  $l_2$ , 半径为  $r_2$ ,  $Z$  在次镜上投影点为  $Z'$ ,  $Z'$  至  $O'_1$  之距  $Z' O'_1$  和  $Z'$  处的投影宽度  $y'_2 y''_2$  分别为

$$Z' O'_1 = H L_2 / L_2 \quad (10)$$

$$y'_2 y''_2 = 2r_2 L_1 / L_2 \quad (11)$$

式中

$$L_2 = l_2 + l_3 + h \sin \alpha \quad (12)$$

在  $C$  点,  $L_2 = 0$ , 由(12)式得  $L_2 = l_3 + h \sin \alpha = L_2$ ,  $r_2 = r_1$ , 代入(10)、(11)得,  $C' O'_1 = H L_1 / L_3$ ,  $y'_{1_1} y''_{1_1} = 2r_1 L_1 / L_3$ , 与(8)、(9)相同. 在  $D$  点,  $L_2 = L_2$ ,  $r_2 = r'_1$ , 由(10)、(11)式得

$$D' O'_1 = H L_1 / L_2 \quad (13)$$

$$y'_{1_2} y''_{1_2} = 2r'_1 L_1 / L_2 \quad (14)$$

在杆  $DE$  之间取点  $x_1$ , 投影点为  $x'_1, x''_1$ , 至  $O'_1$  之距及其投影宽度分别为

$$x'_1 O'_1 = (H - K r'_1) L_1 / L_2 \quad (15)$$

$$y'_{1_3} y''_{1_3} = 2r'_1 \sqrt{1 - K^2 L_1 / L_2} \quad (16)$$

式中, 从  $D$  至  $E$ ,  $K = 0 \sim 1$ . 在  $D$  点  $K = 0$ , 由(15)、(16)得  $D' O'_1 = H L_1 / L_2$ ,  $y'_{1_2} y''_{1_2} = 2r'_1 L_1 / L_2$ , 与(13)、(14)相同. 在  $E$  点  $K = 1$ , 由(15)、(16)式得

$$E' O'_1 = (H - r'_1) L_1 / L_2 \quad (17)$$

$$y'_{1_4} y''_{1_4} = 0 \quad (18)$$

下面讨论介质杆 7 的挡光情况, 当次镜和介质杆 8 转动  $\alpha$  角, 介质杆 7 不动. 设介质杆 7 上任一点至底面的距离为  $l_2$ , 对应的半径为  $r_2$ , 则由图 3 可见, 杆的横截面上的点  $Z$  到  $O_2$  之

距为

$$L_z = l_z \cos \alpha + (h - Kr_z) \sin \alpha \quad (19)$$

$Z$  至  $O_2O'_2$  之距

$$H_z = H - l_z \sin \alpha - Kr_z \cos \alpha \quad (20)$$

$Z$  在次镜上投影点  $Z'$  至  $O'_2$  之距及  $Z'$  的投影宽度分别为

$$Z' O'_2 = H_z L_1 / L_2 \quad (21)$$

$$y'_z y''_z = 2r_z \sqrt{1 - K^2} L_1 / L_2 \quad (22)$$

已知  $l_z$  和对应的  $r_z$ , 由(21) 和(22) 式可计算介质杆 7 的挡光情况。

由上面计算做出图 4。由图 4 可见, 被介质杆挡光范围为  $mB'nn'E'm'$  的面积, 设其面积为  $S_{\text{挡}}$ , 则挡光系数  $F$  为

$$F = \frac{S_{\text{挡}}}{\pi(R_{\text{挡}}^2 - R_{\text{杆}}^2)} \quad (23)$$

#### 4 结果与结论

用上述公式对不同尺寸介质杆进行了计算, 并进行了实际测量, 计算结果和测量结果相符, 说明计算方法可行。此计算方法, 对这种特殊结构的尺寸选取起了很好作用。上面推导出的公式只适于这种结构, 对于其他结构型号可用类似方法导出相应公式。

#### 参考文献

- 1 刘永昌. 复合寻的制导技术分析. 红外与激光工程. 1996, 25. (2)
- 2 刘敬海. 双色红外制导技术. 红外与激光工程. 1995
- 3 Richar D, Hudson JR. Infrared system Engineering. 1969

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>