

# 三角形三面角反射器加工公差对其单站 RCS 影响研究

姜山，王国栋，王化深

(北京交通大学电子信息工程学院，北京 100044)

**摘要：**基于物理光学法(PO)研究了三角形三面角反射器(TTCR)加工公差对其单站雷达散射截面(RCS)的影响。验证了PO应用于本文中的角反射器RCS计算的可靠性。然后在存在角度公差和不平整度公差两种情况下,用PO分别得到了在一定频段内的单站RCS减缩量与公差量及计算频率的关系曲线,联系工程实际进行分析讨论,指出可以借助线性拟合来估算较高雷达工作频率下单站RCS的近似减缩量。研究表明,在实际工程中,角度公差对TTCR的RCS影响是比较小的,而不平整度公差对其影响则较大。

**关键词：**三角形三面角反射器；公差；RCS；物理光学法

**中图分类号：**TN957.52; TJ760 **文献标识码：**A **文章编号：**1673-5048(2006)04-0024-04

## Effects Analysis of Machining Tolerance on Monostatic RCS of Triangular Trihedral Corner Reflectors

JIANG Shan, WANG Guo-dong, WANG Hua-shen

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This paper focuses on the effects of machining tolerance on monostatic RCS of triangular trihedral corner reflectors (TTCR) by using Physical Optics (PO) method. The reliability of PO for calculations in this study is verified firstly. Then, in two typical cases of existing angle tolerance and roughness tolerance, the curves of RCS reduction versus tolerance quantities as well as calculation frequencies are provided based on PO in certain frequency bands. Further discussion is performed on them according to the facts in projects. It is pointed out that in higher radar frequencies, the approximate monostatic RCS reductions can be obtained with linear fit technique. The analysis indicates that, in practice, the effects on RCS of TTCR caused by angle tolerance are slighter than the effects caused by roughness tolerance.

**Keywords:** triangular trihedral corner reflector; tolerance; RCS; physical optics

## 0 引言

角反射器是由两块或三块金属平板构成的二面角或三面角结构，在飞机、导弹、舰船上经常出现。它是目标侧视方向的强散射源，特别是当各平板相互正交时，在一个很宽的角域范围内能够

产生很强的回波散射，即具有很大的RCS。利用这一特点，角反射器常被作为回波增强装置。

角反射中，三角形三面角反射器(TTCR, triangular trihedral corner reflector)由于具有良好的结构稳定性且节省材料，从而在增强雷达的探测能力方面得到了广泛应用，例如用于跟踪遥控无人驾驶飞机等。标准的TTCR是由三块相同的等腰直角三角形金属平板相互正交搭建而成，如图1所示。但是在TTCR的加工制作过程中，不可避免地存在公差，如三块板面的相互垂直度不准确、金属平板不平整，有凸凹等。这些公差的存在必将对标准

收稿日期：2006-05-13

作者简介：姜山(1982-)，女，河南洛阳人，硕士研究生，研究方向为电大尺寸目标的仿真及RCS计算、吸波材料的电磁参数自动测试系统。

TTCR 的 RCS 产生影响, 从而影响雷达探测。因此有必要对各种公差情形造成的 RCS 减缩进行相关研究, 这对于 TTCR 的生产方和使用方来说都很重要。然而, 关于这一方面, 目前国内外文献中很少有所涉及。本文对这一问题给予初步探讨, 采用适合本研究对象的物理光学法(PO)方法计算。

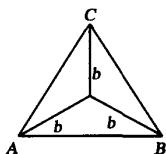


图 1 标准 TTCR

## 1 基本理论

高频区的散射具有局部效应, 而各散射单元间的相互作用明显降低, 物体每一单元上的感应场只取决于入射波, 与其他单元散射的能量无关。物理光学法(PO)正是依据这一原理, 仅根据入射场独立地近似确定表面感应电流, 从而求得散射场。而矩量法(MoM)求解表面感应电流时则计人了各部分感应电流相互之间的影响, 这使得 MoM 虽然精确, 但需要的计算资源较多, 只适于在低频区和谐振区计算。

由于角反射器的表面为平面, 利用 PO 可以方便地以闭合形式给出散射场的解答; 同时考虑到在高频区, 计算机存储量和速度对 MoM 计算能力的限制, 采用 PO 计算 TTCR 的 RCS(可用  $\sigma$  表示)。

RCS 平方根的物理光学表达式为<sup>[1]</sup>:

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_{S_1} \hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) e^{jkr \cdot (\hat{i} - \hat{s})} dS \quad (1)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为自由空间波数, 积分表面  $S_1$  仅是物体的照明部分,  $\hat{n}$  为平板法向单位矢量,  $\hat{e}_r$  表示接收装置电极化方向单位矢量,  $\hat{h}_i$  为磁场极化方向单位矢量,  $\hat{s}$  为指向散射方向的单位矢量,  $\hat{i}$  为入射波传播方向单位矢量。

对于任意形状的散射体, 其表面可以用许多平板来模拟。对于任意的多边形平板, 上式的积分可以变换为围线积分, 并得到如下表达式<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_B} = & -\frac{\hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i)}{\sqrt{\pi} T} e^{jkr_0 \cdot w} \sum_{m=1}^M (\hat{p} \cdot \mathbf{a}_m) e^{jk r_m \cdot w} \cdot \\ & \frac{\sin(\frac{1}{2} k a_m \cdot w)}{\frac{1}{2} k a_m \cdot w} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\sigma_B$  为平板的双站 RCS,  $\hat{n}$  为平板法向单位矢量,  $r_0$  是在平板上或平板附近一源点的位置矢量,  $w = \hat{i} - \hat{s}$ ,  $\mathbf{a}_m$  是描述平板第  $m$  个边缘中点的位置矢量,  $T$  是  $w$  在平板平面上的投影长度,  $\hat{p} = \hat{n} \times w / |\hat{n} \times w|$  是平板平面上垂直于  $w$  的单位矢量,  $M$  为平板边缘的数目。

计算单站 RCS 时, 有  $w = \hat{i} - \hat{s} = 2\hat{i}$ , 当接收装置极化方向趋向于入射波极化方向时, 极化项  $\hat{e}_r \times \hat{h}_i$  总得出最大值, 即  $\hat{e}_r \times \hat{h}_i = \hat{s}$ 。综上得到:

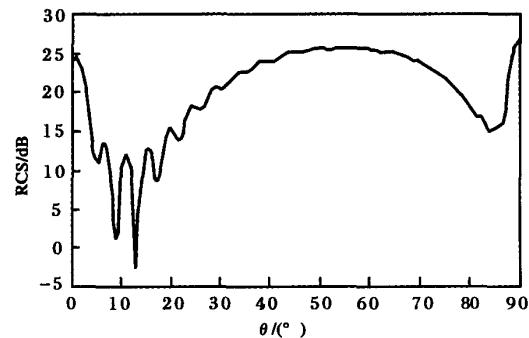
$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_M} = & \frac{\hat{n} \cdot \hat{s}}{2\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - (\hat{n} \cdot \hat{s})^2}} \cdot e^{-jkr_0 \cdot \hat{s}} \sum_{m=1}^M \frac{\hat{n} \times \hat{s}}{|\hat{n} \times \hat{s}|} \\ & a_m e^{-jkr_m \cdot \hat{s}} \frac{\sin(-ka_m \cdot \hat{s})}{-ka_m \cdot \hat{s}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_M$  为平板的单站 RCS。

## 2 TTCR 的 RCS 计算及减缩量分析

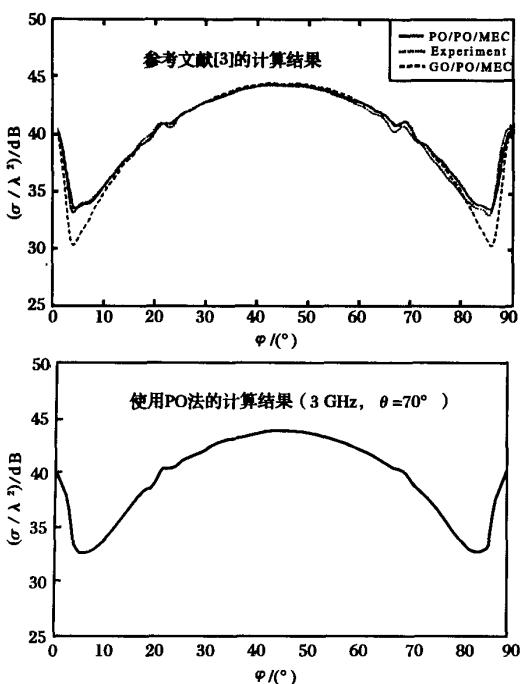
### 2.1 计算可靠性的验证

本文对棱长  $b = 100$  cm 的 TTCR 进行分析。利用 PO 对这一电大尺寸目标进行计算。首先在 3 GHz 频率上建模计算了方位角  $\varphi = 45^\circ$ , 俯仰角  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  时标准 TTCR 的 RCS, 如图 2 所示,  $\theta = 57^\circ$  时, RCS 的最大值  $\sigma_{max,0} = 25.82$  dB, 该值与文献[2]提供的计算 TTCR 的 RCS 最大值公式的计算结果  $\sigma_{Tmax} = 4\pi a^4 / (3\lambda^2) = 26.22$  dB 相差很小。该结果约在  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\theta = 54.74^\circ$  处出现<sup>[2]</sup>。

图 2 标准 TTCR 的 RCS 计算结果(3 GHz,  $\varphi = 45^\circ$ )

为了进一步验证使用 PO 计算 TTCR 的 RCS 的可靠性, 又计算了 3 GHz 时,  $\theta = 70^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ \sim 90^\circ$ ,  $E_\theta$  极化下, 该标准 TTCR 的 RCS, 与文献[3]中提供的相同条件下的测量和计算结果吻合得很好, 见图 3。这说明所使用的方法的计算结果与测量值及前人的计算值都相当接近。

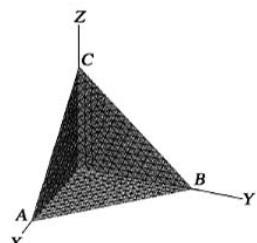
下面选取 TTCR 加工制作中出现的一些典型公差情况来分析其对 RCS 的影响。

图 3  $\theta = 70^\circ$ ,  $E_\theta$  极化, 标准 TTCR 的 RCS

## 2.2 角度公差的影响

### 2.2.1 频率一定时, 角度公差对 RCS 的影响

在频率为 2 GHz 时, 分析图 1 标准 TTCR 模型中,  $A, B$  两点向外偏离  $n^\circ$  (每点各向外偏离  $n^\circ/2$ ) 的情况 ( $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ), 此时  $A, B$  两点仍在  $XOY$  平面内, 保持  $OA = OB = b = 100$  cm, 分别建模、计算其在方位角  $\varphi = 45^\circ$ , 倾仰角  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  时的 RCS, 并得到其最大值。图 4 给出了  $n = 2$  时的 TTCR 网格模型。

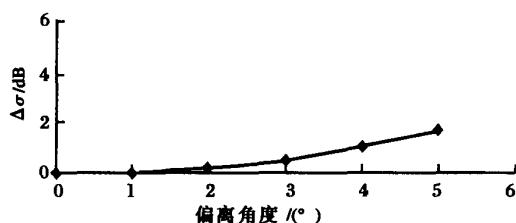
图 4  $n = 2$  时的 TTCR 网格模型

这里, 定义  $\Delta\sigma$  为 TTCR 的 RCS 减缩量, 且有:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max 0} - \sigma_{\max} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{\max 0}$  为计算得到的标准 TTCR 的 RCS 最大值,  $\sigma_{\max}$  为存在某公差时计算得到的 RCS 最大值。故  $\Delta\sigma$  总为正值。可以绘出此时的 RCS 减缩量曲线, 如图 5 所示。

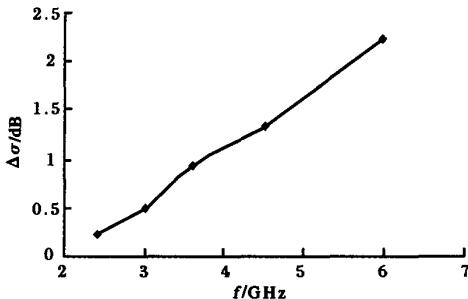
由图 5 可知, 角度公差对 RCS 的影响并不大, 存在  $2^\circ$  偏差时,  $\Delta\sigma$  仅为  $0.2$  dB; 另一方面, 偏差角度增大时,  $\Delta\sigma$  的增加速度也比较缓慢。由于在该

图 5  $\Delta\sigma$  与  $A, B$  两点偏离角度的关系曲线 (2 GHz)

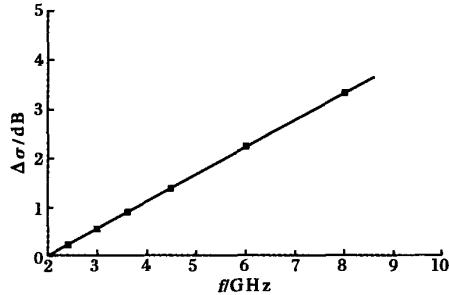
尺寸的 TTCR 加工中, 把偏差角度控制在  $2^\circ$  甚至  $1^\circ$  是容易做到的, 因此, 在实际中, 由于角度公差造成的 RCS 减缩是比较小的。

### 2.2.2 角度公差一定时, 频率对 RCS 的影响

计算 TTCR 的  $A, B$  两点向外偏离  $2^\circ$ , 即  $\angle AOB = 92^\circ$  时, 一些频率下的 RCS, 并计算相应频率下标准 TTCR 的 RCS(由于计算资源所限, 只计算了 6 GHz 以下一些频点的结果)。可以得到此时  $\Delta\sigma$  与频率的关系曲线, 如图 6 所示。

图 6  $\Delta\sigma$  与频率的关系曲线 ( $\angle AOB = 92^\circ$ )

由于计算资源的限制, 很难计算更高的频率下, 该 TTCR 的 RCS, 然而, 由图 6 可以发现, 随频率升高,  $\Delta\sigma$  基本呈线性增加。因此, 在工程上, 可以通过对图 6 中的数据进行线性拟合来大致估计更高的雷达工作频率下, 偏差造成的 RCS 减缩量。如工作频率 8 GHz 时,  $\Delta\sigma$  约为  $3.3$  dB, 见图 7。

图 7 拟合估计较高频段的  $\Delta\sigma$  ( $\angle AOB = 92^\circ$ )

## 2.3 不平整度对 RCS 的影响

就 TTCR 加工制作中可能导致的表面不平整(凸凹)对其 RCS 产生的影响进行分析。主要研究了标准 TTCR 的三块金属板都向外凸出, 且各板

面的最大凸出高度出现在各自斜边中点的情况，此时 TTCR 的外凸程度从各斜边到中心角逐渐减缓。在建模中，定义了不平整度因子  $h$ ， $h$  表示标准 TTCR 的一条斜边变成弧线的最大凸出高度  $H$ （出现在斜边中点  $M$  处）与 TTCR 棱长  $b$  的比值， $h$  越大则 TTCR 板面的外凸程度越大，如图 8 所示。例如图 9 所示为  $H = 5\text{cm}$ ，即  $h = 5\%$  的 TTCR 模型。

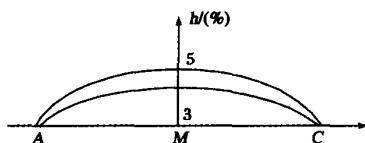
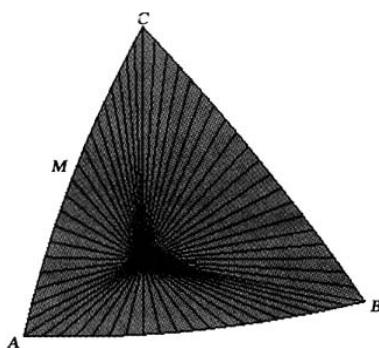
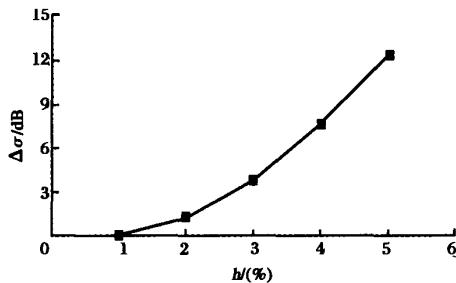


图 8 不平整度因子

图 9  $h = 5\%$  的 TTCR

### 2.3.1 频率一定时， $h$ 对 RCS 的影响

固定频率为 3 GHz，分别计算了  $h = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%, 5\%$  时的 RCS，并与标准情形 ( $h = 0$ ) 的结果进行对比，得到  $\Delta\sigma$  与  $h$  的关系曲线，如图 10 所示。

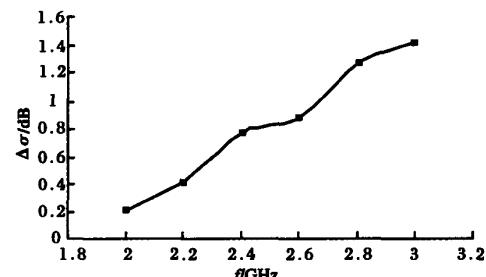
图 10  $\Delta\sigma$  与  $h$  的关系曲线 (3 GHz)

显然，频率一定时，表面不平整度对 TTCR 的 RCS 影响是比较大的。当  $h = 2\%$  时， $\Delta\sigma$  就已达到 1.4 dB。同时，在  $h$  增加时， $\Delta\sigma$  的增长速度也较快。由于在工程上，该尺寸的 TTCR 在加工中很难做到平整，故 TTCR 的不平整度将造成较大的 RCS 减缩。

### 2.3.2 $h$ 一定时，频率对 RCS 的影响

固定  $h = 2\%$ ，计算一系列频点下的 RCS，并

参考对应频率时标准 TTCR 的结果，得到此频段  $\Delta\sigma$  与频率的关系曲线，如图 11 所示。

图 11  $\Delta\sigma$  与频率的关系曲线 ( $h = 2\%$ )

可以通过线性拟合来估计难以计算的更高雷达工作频率下的  $\Delta\sigma$ 。

观察图 6 和图 11 可以发现，随着频率的升高， $h = 2\%$  的公差情况下，RCS 减缩速度明显高于角度有  $2^\circ$  偏差的情况。

综上所述，不论是在频率固定还是在公差量固定的条件下，不平整度公差给 TTCR 的 RCS 带来的影响在减缩量和减缩速度方面，总是大于角度公差的影响。

## 3 结 论

本文探讨 TTCR 加工公差对其 RCS 的影响。由于研究的 TTCR 具有电大尺寸且表面是平面，宜采用 PO 方法计算。文中给出了多边形平板单站 RCS 的物理光学表达式，并基于此进行计算，其应用于本文研究对象的可靠性也得到了验证。针对存在某些角度公差和不平整度公差的具体情形，分别得到了在一定频段内的单站 RCS 减缩量与公差量以及计算频率的关系曲线，联系 TTCR 加工中的实际情况对其进行展开讨论，并说明可以通过线性拟合来估算更高的雷达工作频率下两种公差造成的 RCS 减缩量。研究结果表明，实际工程中，相对于角度公差来说，不平整度公差造成的 TTCR 的 RCS 减缩量是比较大的，其减缩速度也更高。

## 参 考 文 献：

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京：国防工业出版社，1998：101–104.
- [2] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京：电子工业出版社，2005：54–55.
- [3] Polycarpou A C, Balanis C A. A New Approach to Improve RCS Patterns of Trihedral Corner Reflectors [J]. IEEE 1994, 0-7803-2009-3: 2299–2301.

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

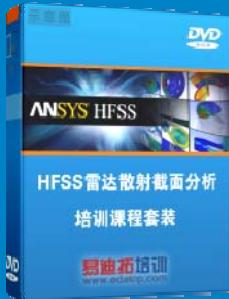
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>