

天线罩测量与修磨中位置安装误差分析与控制 *

魏宏 王庆霞 杨建国 雷显武

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

The installation errors research on measuring and grinding process for missile radome

WEI Hong, WANG Qing-xia, YANG Jiang-guo, LEI Xian-wu

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

【摘要】天线罩优良的电气性能是提高导弹瞄准精度的关键所在。天线罩属于硬脆材料制成的大型薄壁复杂回转体零件,随着对其性能要求的不断提高,传统的加工安装方法,已很难保证加工出高质量的合格产品。分析了单喇叭反射测量,并详细分析了工件在多工序转换过程中,天线罩安装误差的产生过程及其对插入相位延迟参数的影响,然后针对现有安装技术中存在的问题,提出了基于主动寻位的天线罩安装方法。该方法使此类大型工件的精确定位变得方便、快捷。为导弹天线罩的电性能检测提供了一种新的安装手段。

关键词:IPD 测量; 安装误差; 修磨补偿; 主动寻位安装

[Abstract] The electric performance of radome directly affects the Boresight Accuracy of missiles. Radome is a large complicated shell solid of revolution made of hard and brittle material. With the enhancement of radome performance requirement, it is very hard to manufacture high quality product by the traditional fixing method. Analyzed the reflection measurement based on single horn, and then the occurrence of radome installation errors and the influence of errors on Insertion Phase Delay (IPD) is analyzed as well. Therefore in order to solve the problems of installation technology available, a new method is proposed to increase the fixing precision and efficiency of this large-sized work-piece.

Key words: IPD measurement; Installation errors; Grinding compensation; Initiative locating

中图分类号: TH16, TP202+.2, TN820.8+1 文献标识码:A

1 引言

天线罩是导弹天线的外层保护设施,它既要适应导弹气动力、气动热和飞行过程中的恶劣环境,避免外界环境对天线等电子设备的影响,又要保证目标回波在透过罩壁时信息不失真或畸变很小。因此,天线罩不仅需要具有合适的气动外形,还要有优良的电磁波传输特性^[1-2]。在陶瓷材料天线罩制造过程中,由于天线罩外形结构和成型工艺复杂性,使得机械加工后的天线罩很难满足电气性能要求,进而对导弹的瞄准精度和工作可靠性造成很大影响。因此,在积极探索新材料新工艺的同时,对已成型天线罩通过精密修磨的加工方法来进行电气性能补偿是一个行之有效的途径^[3]。因此天线罩在测量仪、修磨机床等多个工位上的精确定位与不同工位之间的位置转换,成为能否进行精密修磨的关键。

目前,主要采用调整法对天线罩进行安装,此方法在线调整时间长、效率低下,而且有时可能会因定位精度不高而使工件报废。针对现有的天线罩安装方法中存在的问题,提出了基于主动寻位的天线罩安装方法。该方法使天线罩的精确定位变得方便、快捷,减轻了天线罩安装定位的工作量和难度,有效的保证了产品的加工质量。

2 天线罩 IPD 的意义

对于导弹天线而言,由于天线罩的存在,使得电磁波在透过

一定介质的罩壁后,将引起一定的相位滞后。对于平面波,仅一次通过两种不同的无损耗、一定厚度的介质层的相移量之差,称为介质层的插入相位延迟(Insertion Phase Delay, IPD)^[4]。对于天线罩而言,其插入相位延迟可表示为^[1,5]:

$$\phi = \frac{2\pi h}{\lambda} (\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - \cos \theta_i) \quad (1)$$

式中:h—天线罩法向几何厚度(mm);λ—电磁波的波长(mm);θ_i—电磁波的入射角(°);ε_r—天线罩材料的相对介电常数。

由式(1)可知,插入相位延迟 IPD 作为衡量天线罩电气性能的重要指标,描述了天线罩几何厚度、介电常数、入射角等参数对电磁波传输的综合影响。

3 天线罩位置安装误差的形成机理

3.1 天线罩在机床上的安装

陶瓷天线罩属脆硬性材料,其内外型线是一条复杂形状曲线。目前,天线罩在 IPD 测量仪或者修磨机上进行安装时,通过其大端面处的内短锥孔,与机床主轴上专用夹具的短心轴外圆锥面进行贴合,以限制天线罩空间运动的五个自由度,即确立了天线罩与机床间的相互位置关系。如图 1 所示。

3.2 天线罩 IPD 测量与修磨工艺流程

由于成型后天线罩的介电常数无法修正,且罩体各部分的

* 来稿日期:2011-05-24 * 基金项目:上海市重点学科建设项目资助(B602),航天“十一五”先进制造预研课题

介电常数呈不规则变化,使得罩体的 IPD 也呈随机分布。因此,依据天线罩的测量结果,可以通过机械修磨的方式,按需改变天线罩局部的几何厚度,用以补偿修正其 IPD 误差,从而提高导弹瞄准精度。天线罩 IPD 测量与修磨的工艺流程图(图略)。

其工艺过程描述如下:

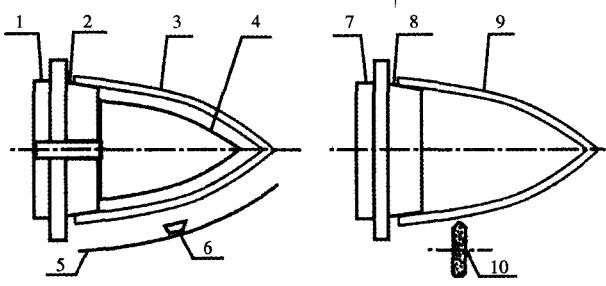
- (1)利用三坐标测量机对天线罩进行法向壁厚的测量;
- (2)天线罩外形面的网格划分;
- (3)利用专用夹具,将天线罩安装到 IPD 测量机上,测量每个网格的 IPD 参数;

(4)误差判断:若指定区域内的 IPD 参数不符合要求,则取下天线罩;

(5)利用磨床上的专用夹具,将天线罩安装到磨床上,进行指定区域的法向几何厚度修磨;

(6)取下天线罩。

重复上述步骤(3)~(6),直至满足 IPD 设计要求,则测量与修磨工作结束。



(a)天线罩在 IPD 上的安装 (b)天线罩在专用修磨机床上的安装
图 1 天线罩安装原理图

Fig.1 Pictorial diagram of Radome Installation

1 IPD 测量机主轴 2.定位短锥 3.工件 4.反射内胎 5 测量轨迹
6.发射接收器 7.修磨机床主轴 8.定位短锥 9.工件 10.修磨砂轮

4 天线罩安装位置偏移对修磨补偿过程的影响

4.1 天线罩位置安装误差的产生

从天线罩测量和修磨工艺过程来看,其 IPD 参数、几何修磨量的正确性最终将依赖于天线罩相对于单喇叭或者砂轮的正确位置。那么,为了获得这个正确位置,必须正确限制天线罩的所有自由度。与“长鼻式”天线罩结构外形相比,目前采用的短锥与锥孔的组合定位方式,实际上仅仅约束了工件的三个自由度。因此,天线罩初始定位变得很不可靠。另一方面,专用夹具与天线罩在制造、安装等过程中均存在误差,使得短定位心轴外表面作为记忆工件安装位姿的参考基准变得更不可靠,从而无法保证天线罩与机床之间既定关系的正确性。

为了描述方便,假设用 $O_0(X_0, Z_0, C_0)$ 表示天线罩在机床上的理想位置,如图 2 中的虚线所示。实际上,由于夹具及天线罩制造及安装误差的综合影响,导致天线罩偏离了其理想参考位置,表现为 $O_1(X_1, Z_1, C_1)$ 点相对于 O_0 的移动和绕坐标轴的转动,并分别表示为 ε_x 、 ε_z 和 δ_c 。根据天线罩工序转换需要,其实际安装位姿可能对应多个,图 2 中实线表示的 $O_1(X_1, Z_1, C_1)$ 仅仅为天线罩的一种安装姿态。

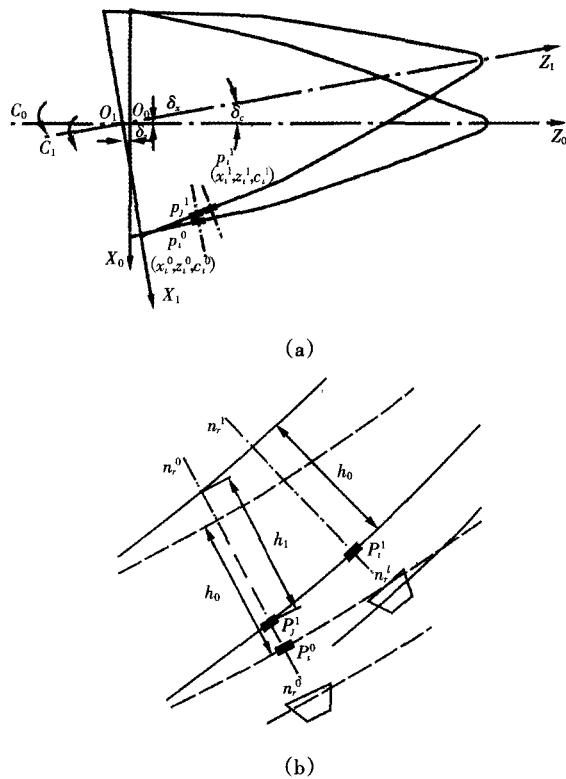


图 2 天线罩安装误差示意图

Fig.2 Pictorial diagram of Radome Installation Errors

4.2 天线罩位置偏移对 IPD 测量的影响

假设天线罩外形面上有 n 个小表面。第 i 个小表面可通过其表面法向矢量 $n_i = [n_{ix}, n_{iz}, n_{ie}]$ 和定位矢量 $p_i = [x_i, z_i, c_i]$ 表示。由图 3(a)可知,由于天线罩安装误差的存在,使得被测点 p_i 从理想位置 p_i^0 运动到实际位置 p_i^1 。因此,微波在天线罩上的实际入射点为第 j 个小表面 p_j^1 。根据图 3(b)所示,那么,由此产生的天线罩几何壁厚误差 Δh 和介电常数误差 $\Delta \epsilon$ 分别为 $\Delta h = h_0 - h_1$, $\Delta \epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_1$ 。

根据公式(1),若仅考虑天线罩几何壁厚误差 Δh ,则引起 IPD 的偏差 $\Delta \phi_h$ 为: $\Delta \phi_h = k_1 \cdot \Delta h$ (2)

同样,若仅考虑介电常数误差 $\Delta \epsilon$ 时,引起 IPD 的偏差 $\Delta \phi_\epsilon$ 为: $\Delta \phi_\epsilon = k_2 \cdot \Delta \epsilon$ (3)

因此,由于天线罩安装误差的存在,使得被测点 p_i 处的 IPD 偏差为:

$$\Delta \phi_i = \Delta \phi_h + \Delta \phi_\epsilon \quad (4)$$

实验测试结果表明,仅壁厚偏差 $\Delta h = \pm 0.03\text{mm}$ 引起的 IPD 偏差就大于 1° ,仅介电常数偏差 $\Delta \epsilon = \pm 0.05$ 引起的 IPD 偏差也大于 1° 。二者同时作用时,其最大误差往往大于 3° 。因此很难满足天线罩的使用要求。

由 3.2 修磨工艺可知,天线罩的测量与修磨过程往往需要反复多次。因此,天线罩在两个工位之间重复安装,其累积安装误差将变得越来越大,不仅容易导致电厚度测量误差超差,而且安装时在线调整时间长、效率低下。所以找到一种方便、快捷的方法来解决此类大型工件的精确定位问题就显得尤为重要,成为减轻工件安装定位的工作量和难度、保证加工出合格产品的重要环节。

5 天线罩主动寻位安装方法

天线罩的主动寻位安装方法包含两个步骤，首先是天线罩在夹具上的初始寻位安装；其次是初始安装后形成的工件/夹具子系统在机床上的快速寻位安装。

5.1 天线罩的初始寻位安装

“主动寻位”的含义就是主动找寻天线罩在夹具中的初始安装位置，并确定其姿态^[6]。这一控制策略包括两方面的内容：一是利用坐标位置传感测量装置快速获取天线罩的表面信息；二是根据这些信息精确求解出天线罩在夹具中的实际状态。

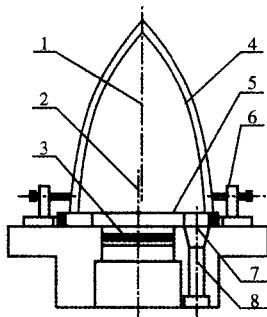


图 3 天线罩初始寻位原理图

Fig.3 Pictorial diagram of Initial locating

- 1.工件轴线 2.转台轴线 3.数控转台 4.工件
- 5.圆盘 6.调整机构 7.环形光源 8.拍照系统

天线罩的初始主动寻位原理，如图 3 所示。图示为一初始寻位工作站，工作台上安装一数控回转台，转台上放置一个刻划有一系列同心圆的圆盘，供安放工件时参考，不致使得工件对转台偏心太大。工件以端平面为支承面被粗略地安放在转台中心。采用照度均匀的柯拉照明方式并对被测工件进行平行光照射。在工件精确定位之前，用 1024×1024 的 CCD 摄像机和黑白图像采集卡对工件内轮廓边缘进行图像采集和处理。为了实现大范围测量，进一步降低单纯靠提高 CCD 摄像机性能而导致价格过高的成本，数控回转台带动工件旋转以获得工件圆周上的多幅图像。信息处理系统进行图像拼接和边缘提取，并根据相关算法计算出边缘像素点相应的几何位置信息，从而求得工件相对于机床的相对空间位置。操作人员可根据这些信息对工件进行有针对性地位置调整，从而实现了大型工件的快速精确定位。

5.2 天线罩多工位间的主动寻位安装

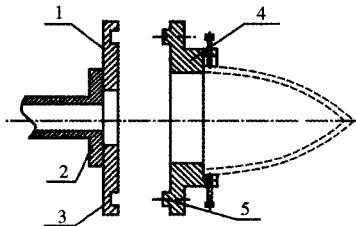


图 4 子系统在机床上的快速寻位安装

Fig.4 Rapid locating installation of subsystem on machine tools

- 1.标准精密寻位器 2.机床主轴 3.寻位器接口
- 4.工件/夹具子系统 5.寻位器接口

完成初始寻位安装后，天线罩与夹具组成一个实体，即工件/夹具子系统，如图 4 所示。该实体通过夹具中的标准精密寻位器的接口，与 IPD 测量仪、专用修磨机床上的标准精密寻位器进行

配合，从而实现工件/夹具子系统在 IPD 测量仪、专用修磨机床上的快速寻位。

5.3 主动寻位安装系统的工作流程

主动寻位系统的工作流程示意图，如图 5 所示。天线罩在初始工作寻位站上完成初始定位，形成工件/夹具子系统后，通过转换接口，可实现在 IPD 测量工位，精密修磨工位，以及初始工作寻位站上的寻位安装。在整个工作过程中，一般不需要进行修磨机床与初始工作寻位站之间的转换，但若在修磨结束后，需检验天线罩的初始定位是否由于磨削力等因素遭到破坏，则可直接到初始工作寻位站上进行检测，如图 5 中的虚线过程所示。

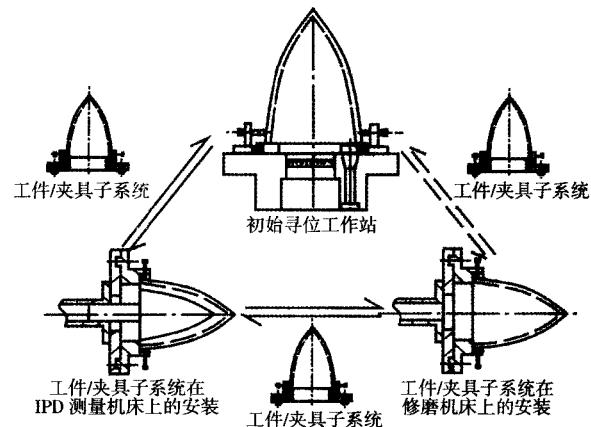


图 5 天线罩主动寻位安装系统工作流程

Fig.5 Process diagram of Initiative locating installation system

工件使用转换接口在机床上进行安装，由工件本身的制造误差 t ，夹具的制造误差 T ，以及转换接口的制造误差 U 可确定安装误差 δ ， δ 为系统常值误差，可表示为： $\delta = k_1 t + k_2 T + K_3 U$ (5)

采用此方法可避免因在线调整法安装产生的随机安装误差。

6 结论

导弹天线罩电气性能的优劣直接影响导弹瞄准精度。针对某大型回转类天线罩在安装时精度和效率低等问题，提出了一种主动寻位的安装方法，天线罩在测量与修磨机床间的转换安装不再需要人工调整的过程，安装子系统通过转换接口，可直接完成工位间的转换。该方法具有以下优点：(1)天线罩在 IPD 测量机床与修磨机床上的安装，不需进行人工调整，降低了劳动强度，提高了劳动效率；(2)使用标准精密寻位器完成工位间的转换，避免了因人工调整而产生的随机误差，使工位间的转换变得简便、快速。

参考文献

- [1] 季田.天线罩内廓形精密测量与修磨工艺技术研究[D].大连：大连理工大学，2004.
- [2] 王克欣.天线罩电厚度测量的运动轨迹规划及实现[J].哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(5):102-105.
- [3] 冷波.天线罩精密修磨机床关键技术研究[D].大连：大连理工大学，2008
- [4] 曾照勇.导弹天线罩 IPD 测量仪研究[J].宇航学报, 2009(4):1582-1586.
- [5] 张生芳, 郭东明, 等.天线罩制造中的电厚度测量技术[J].仪器仪表学报, 2004, 25(4):34-37
- [6] 王庆霞, 李蓓智.基于影像测量技术的工件主动寻位问题研究[J].机械设计与制造, 2010(8):261-263

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)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)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)，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>