

应用荟萃

# 均匀 B 样条曲面在导引雷达天线罩精密加工中的应用

郭东明 潘贻亮 盛贤君 康仁科

(大连理工大学机械工程学院 大连 116023)

**摘要** 导弹天线罩是薄壁复杂回转体, 罩壁的电厚度的均匀性要求严格。在精密修磨天线罩内廓型面时, 必须先根据测量型值点重构出内廓型面, 建立精密修磨的相对参考基准。因此三维自由内廓型面的重构精度是决定天线罩精密修磨精度的关键。使用基于最小二乘法的双三次均匀 B 样条方法, 实现天线罩内廓型面的重构, 并已成功应用于导弹天线罩精密修磨系统中。天线罩的内廓型面的精密修磨结果证明: 应用文中方法重构的曲面精度高、光顺性好。

**关键词** 曲面重构 双三次均匀 B 样条 最小二乘法 天线罩

中图法分类号 TG659 ;TP391

## Application of B-spline Surface in Precision Machining of Missile Radome

Guo Dongming Pan Yiliang Sheng Xianjun Kang Renke

( School of Mechanical Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116023 )

**Abstract** Missile radome is complicated revolving body. In order to establish the datum of inner-surface before precision internal grinding, it is necessary to reconstruct the free curved inner-surface from a large amount of discrete measured data. A bicubic B-spline method based on least squares techniques to reconstruct 3D surface of radome's inner-surface is presented, and successfully applied in the precision grinding system of missile radome. The results after internal grinding prove that the inner-surface reconstructed by this method is smooth and accurate.

**Key words** surface reconstruction ;bicubic B-spline ;least square approximation ;missile radome

## 1 前 言

主动导引头天线罩是主动制导导弹的关键部件之一, 位于导弹的最前端, 它既是弹体组成部分, 又是无线雷达制导系统的组成部分。它在保证导弹气动外形、保护其内部的无线电寻的导引头免受任何形式损伤的同时, 还应具有良好的电磁波传输特性。电磁波传输特性由天线罩的电厚度性能决定, 若电厚度均匀, 则会有良好的电磁波特性和瞄准精度<sup>[1]</sup>。天线罩的电厚度性能由材料的介电常数和罩壁的几何厚度决定。由于材料介电常数不可避免地存在分散性, 使得天线罩在半精加工后电厚度精度指标尚达不到要求, 因此需要修磨罩壁改变其几何厚度来

补偿介电常数分散性, 以提高电厚度均匀性。而半精加工的天线罩外廓已经满足气动外形要求, 不能再修磨外廓, 因此只能对天线罩内廓进行精密修磨。

## 2 天线罩内廓型面重构

欲对天线罩内廓型面进行精密修磨必须先精确建立其加工基准, 即对半精加工的天线罩内廓型面进行精密测量与精确曲面重构。在半精加工时, 以天线罩轴线及外廓为测量、加工基准。精加工时由于要求电厚度一致, 要考虑材料介电常数的分散性, 因此只能以内廓及其折算厚度为依据。导弹天线罩属薄壁类零件, 装夹中易产生变形, 而重复装夹必然产生重复定位误差, 故本文采用一次装夹下完成内廓

原稿收到日期 2002-11-06, 修改稿收到日期 2002-12-11。本课题得到国家自然科学基金(59975016)和国家“八六三”高技术研究发展计划(2001AA421170)资助。郭东明 男, 1959 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为特种及精密加工、几何量精密测量、加工过程的计算机控制技术等。潘贻亮 男, 1978 年生, 硕士, 主要研究方向为曲面造型及数控加工技术。盛贤君 女, 1969 年生, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为计算机辅助设计与制造。康仁科 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密及特种加工、高速加工、计算机辅助测试、设计与制造。

型面的测量与修磨,通过测量工位和加工工位双工位方式来实现(如图1所示)在重构曲面基准上对天线罩内廓型面按需修磨。对测量离散点进行精确曲面重构得到加工基准是修磨系统中一项关键技术。在进行曲面重构时,使构造曲面通过所有测量数据点,叫作插值。若测量数据本身就有误差,则构造曲面严格通过给定的数据点就没有什么意义。此时应设法使构造曲面在某种意义上最为接近测量的数据点,称之为逼近<sup>[2]</sup>。插值与逼近统称拟合。目前有Ferguson, Coons, Bézier, B样条等曲面拟合方法,其中B样条曲面兼具了Bézier等方法的一切优点,同时克服了Bézier等方法由于整体表示带来的不具有局部性质的缺点,是最广泛应用的形状数学描述的主流方法。本文的测量系统采用的LG-10A微位移测长仪,其对天线罩内廓测量精度达到1μm。对测量所得曲面上的型值点进行双三次B样条曲面重构,是一个由已知型值点反求控制点的曲面反算问题。若所求控制点决定的曲面通过已知型值点,即为双三次B样条曲面插值<sup>[3]</sup>。此方法简单实用,易于编程,但要求型值点必须是双有序的,这给曲面测量中的采样造成很大的困难;也无可避免地带入随机测量误差,使得插值出来的曲面有微小的锯齿形现象。若采用最小二乘法来消除这种现象,可使逼近曲面比插值曲面更加光顺,符合实际要求。本文采用基于最小二乘法的均匀B样条曲面,可以使控制点在空间中尽可能均匀分布,方法简单,能够满足天线罩拟合精度要求。另外,本文方法还具有以下优点:能消除随机误差使曲面光顺,算法简单,易于编程,改变控制点的数量可以调整拟合精度等。

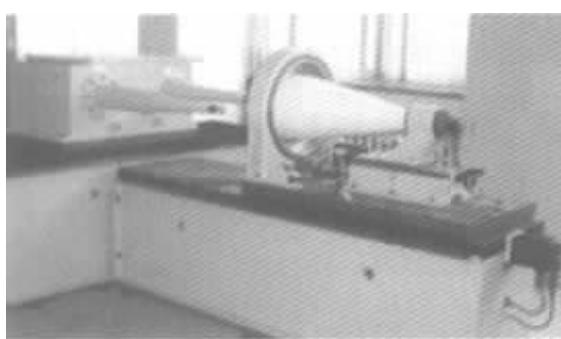


图1 测量与修磨双工位机床

### 3 基于最小二乘法的B样条曲线重构

通过由测量鼻锥形天线罩内廓型面某一母线得到的型值点  $p_k(r_k, z_k), k = 0, 1, \dots, M$ , 反算出最接

近所有型值点的三次均匀B样条曲线的控制点  $d_i, i = 0, 1, \dots, m$ , 属B样条曲线反算问题。根据实际的曲线长度和精度要求, 取合适的控制点个数  $m + 1$ , 一般型值点远多于控制点, 即  $M \gg m$ 。

#### (1) 型值点的弦长参数化

首先假定由控制点决定的每一曲线段长度相同, 然后计算型值点位于均匀曲线段上的哪一固定位置, 以确定型值点的参数。要求应用这种参数化方法反算出来的控制点尽可能分布均匀。由于型值点与控制点并不是一一对应关系, 因此需要确定每个型值点属于三次样条曲线的哪个曲线段, 即与哪4个控制点有关。采用  $U_i = (m - 2) \times L_i / L$  进行参数化; 其中,  $U_i$  表示型值点在整个曲线段上的惟一位置参数;  $L = \sum_1^i |p_k - p_{k-1}|$  是积累弦长总和;

$L_i = \sum_1^i |p_k - p_{k-1}|$  是从第1点开始到第*i*点的积累弦长, 令

$$\begin{cases} S_k = [U_k] \\ u_k = U_k - [U_k]' \end{cases}$$

完成对型值点的参数化, 就可得到  $p'_k(S_k, u_k), k = 0, 1, \dots, M$ 。

#### (2) 反算控制点

用于逼近  $M + 1$  个测量型值点  $p_k(r_k, z_k), k = 0, 1, \dots, M$  的三次 B 样条曲线可写为

$$p(i, u) = \sum_{j=i}^{i+3} B_j(u) d_j,$$

其中,  $u \in [0, 1], i = 0, 1, \dots, m - 3$ 。

将曲线定义域内的型值点一次代入方程, 应满足拟合条件, 即令

$$p_k(S_k, u_k) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} u_k^3 & u_k^2 & u_k^1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{S_k} \\ d_{S_k-1} \\ d_{S_k+2} \\ d_{S_k+3} \end{bmatrix} =$$

$$p_k(r_k, z_k), k = 0, 1, \dots, M.$$

每一个型值点都可以确定一个向量方程, 最后得到有  $M + 1$  个向量方程的方程组, 该方程组是  $m + 1$  元一次超静定方程组, 用最小二乘法来解方程组即可求出控制点  $d_i, i = 0, 1, \dots, m$ , 于是就定义了逼近曲线。同样地, 可以对天线罩内廓型面圆周曲线进行精密测量和逼近。

## 4 基于最小二乘法的 B 样条曲面重构

根据天线罩特点,参数方向根据天线罩内廓型面形状的特点和加工要求来确定:分别取母线、圆周为两参数方向。对曲面型值点的参数化方法有均匀参数化、积累弦长参数化、向心参数化、修正弦长参数化等。此外还可以根据实际需要,对型值点实行某种合适的参数化,尤其在构造曲面时将会遇到以上情况<sup>[4]</sup>。在这里,测量得到整个内廓型面的型值点并非双有序,所以用以上方法来解决有很大的困难。因为实际型值点和理论内廓之间偏差在半精加工的公差范围内,故可利用理论内廓方程对所有离散型值点  $p_k(\theta_k, r_k, z_k), k = 0, 1, 2, \dots, N$ ( $N$  约为 2 万左右)进行近似弧长参数化,其中  $\theta_k, r_k, z_k$  是柱坐标的弧度、半径和高度。由于半精加工后的内廓型面与内廓型面理论曲线之间差别很微小,因此用内廓型面理论方程对型值点进行近似弧长参数化,比积累弦长参数化法更简单、更准确。天线罩的内廓型面用  $(m+1) \times (n+1)$  个控制点  $d_{i,j}, i = 0, 1, \dots, m, j = 0, 1, \dots, n$  来拟合,  $N \gg (m+1) \times (n+1)$ , 其中  $m+1, n+1$  是控制点在  $u, v$  方向上的控制点数,若  $m = n = 40$  时就可以达到很高的逼近精度。由于天线罩顶端小局部不需要修磨,因此不用对顶端小局部进行测量和重构,天线罩内廓型面需要测量和重构的部分实际上是一个上下两端开口的环状自由曲面。对型值点进行参数化

$$\begin{cases} U_k = (m-2) \times L_i / L \\ V_k = (n-2) \times \theta_i / 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $U_k$  表示型值点在天线罩母线上惟一位置的参数;  $L_i$  是  $z = z_{\min}$  到  $z = z_k$  之间理论母线的长度;  $L$  是  $z_{\min}$  到  $z_{\max}$  之间理论母线的总长,  $z_{\min}$  和  $z_{\max}$  分别是需要重构的环状自由曲面的最低和最高  $z$  坐标;  $V_i$  是圆周方向的参数。

这种参数化方法可以使得控制点尽可能地在空间上均匀分布,因为由式(1)事先假定控制点均匀分布且控制点对应的各样条曲线段等长度,所以在这种假定下计算得到型值点参数,再由型值点参数反算出的控制点会在空间上大致均匀分布。使用最小二乘法反求得逼近曲面的控制点,通过正算就求得了逼近的测量曲面。

## 5 误差分析

应用基于最小二乘法的双三次均匀 B 样条方

法重构天线罩内廓型面时,最大误差为  $e = \max |p'_k(S_k, u_k, T_k, v_k) - p_k(\theta_k, r_k, z_k)|$ , 以检验其是否满足精密修磨精度要求。对高约 1 000 mm 的天线罩内廓型面进行曲面重构时,若取控制点  $m = n = 40$  则计算得到最大误差  $e < 2 \mu\text{m}$ 。分析结果表明,用本文方法所重构的曲面能够满足天线罩精密修磨的精度要求。

## 6 结 论

基于最小二乘法的双三次均匀 B 样条曲面逼近方法成功地解决了导弹天线罩内廓型面重构问题,建立了精密修磨的相对参考基准。此外,应用该方法还可以实现误差修正后内廓型面重构和在此重构曲面上的刀具中心轨迹规划。导弹天线罩的精密修磨实验证明:应用该方法能够有效地消除测量引入的随机误差,所重构出的自由曲面具有精度高、光顺性好等特点,如图 2 所示。

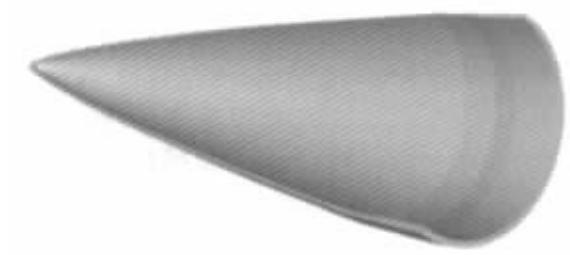


图 2 修磨后内廓型面剖面图

## 参 考 文 献

- [1] Ao Liaohui. Development of missile radome's technology [J]. Telecommunication Engineering, 2000, (2): 14~15 (in Chinese)  
(敖辽辉. 天线罩技术的发展 [J]. 电讯技术, 2002 (2): 14~15)
- [2] Qiu Zeyang. Stepwise approximation approach of surface reconstruction [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(7): 622~625
- [3] Guo Dongming, Lou Xin, Wang Xiaoming, et al. Reconstruction of the 3D surface for precision machining of missile radome [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(9): 92~95 (in Chinese)  
(郭东明, 娄鑫, 王晓明, 等. 面向导弹天线罩精密加工的三维曲面重构 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 92~95)
- [4] Shi Fazhong. Computer-Aided Geometric Design & NURBS [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1994 (in Chinese)  
(施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994)

## 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>