

文章编号:1003-8728(2004)03-0260-03



## 复杂型面天线罩精密修磨的刀具轨迹研究

盛贤君, 潘贻亮, 康仁科, 郭东明  
(大连理工大学, 大连 116023)

盛贤君

**摘要:**天线罩是由硬脆材料制成的大型薄壁复杂回转体, 对其内廓型面精密修磨难度很大, 而如何规划刀具轨迹则是实现精密修磨所要解决的关键问题。为此, 本文根据天线罩内廓型面的特点, 提出一种应用等残留高度与等参数法相结合的刀具轨迹生成方法——不等距截面环切刀具轨迹规划法。实践证明, 应用这种刀具轨迹规划方法生成的数控加工程序能实现天线罩内廓型面的高效率、高精度加工。

**关键词:**刀具轨迹; 等残留高度法; 等参数法; 天线罩

中图分类号:TP391.7 文献标识码:A

### Study on Tool Path of Precision Grinding of Complicated Radome Surface

SHENG Xian-jun, PAN Yi-liang, KANG Ren-ke, GUO Dong-ming  
(Dalian University of Technology, Dalian 116023)

**Abstract:** Radome is a large-scale and complicated revolving body. It is difficult to grind the radome's inner-surface. Thus, it is important to plan the grinding tool-path. According to the characteristic of the radome's inner-surface, a tool-path planning method, unequally-spaced sectional ring-cutting method, is presented, which is a combination of the constant scallop-height method and the isoparametric method. It has been proved in practice that the inner-surface of radome can be ground accurately and efficiently by using the method mentioned above.

**Key words:** Tool-path; Constant scallop-height; Isoparametric method; Radome

天线罩是由硬脆材料制成的大型复杂型面的薄壁零件。它在保护天线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。电磁波传输特性主要取决于天线罩的电厚度指标, 电厚度的误差越小, 则天线罩的电磁波传输特性越好<sup>[1]</sup>。材料介电常数的均匀性以及罩壁几何厚度的加工精度, 是影响电厚度误差的直接因素。实际上, 受天线罩成型工艺水平的限制, 材料介电常数不可避免地存在分散性, 使得天线罩半精加工后的电厚度精度指标尚达不到要求, 需要通过精密修磨手段改变其几何厚度分布, 来补偿介电常数分散性, 以保证全罩的电厚度分布符合设计要求。由于半

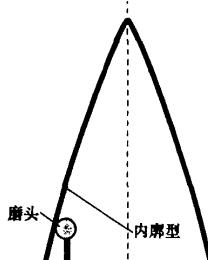


图 1 内廓修磨示意图

精加工的天线罩外廓已经满足气动外形要求, 为了保持外廓形状, 只能对天线罩内廓进行精密修磨, 如图 1 所示。对大型复杂型面的薄壁零件进行精密修磨, 其难度是很大的。针对天线罩的内廓型面的特点, 采用双工位测量与修磨方案, 提出一种应用等残留高度与等参数法相结合的刀具轨迹生成方法——不等距截面环切刀具轨迹规划法, 应用这种刀具轨迹规划方法生成的数控加工程序能实现天线罩内廓型面的高效率、高精度加工。

#### 1 双工位测量与修磨

天线罩的实际内廓表面是修磨加工的基准面, 因此, 在对天线罩进行按需修磨前需要对其内表面进行测量以建立修磨加工的基准。天线罩属薄壁类零件, 装夹中易产生变形, 重复装夹必然产生重复定位误差, 有必要采用一次装夹下完成内轮廓测量与修磨, 通过双工位(测量工位和加工工位)方式来实现<sup>[2]</sup>, 如图 2 所示。考虑天线罩的形状特点——孔深、径小, 近似标准的回转体, 在对天线罩内廓型进行测量与修磨时, 使用悬臂长杆伸进天线罩内部对其内表面测量与修磨。工作台在 Z 向水平移动, 磨头测头滑台在 X 向水平移动, 同时工件可以在 θ 向旋转, 通过控制 3 个轴的联动可以实现

收稿日期: 2003-01-13

基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA421170)资助  
作者简介: 盛贤君(1969-), 女(汉), 辽宁, 博士研究生  
E-mail: sxianjun@dlut.edu.cn

整个天线罩内廓型的遍历测量与修磨<sup>[3]</sup>。在对天线罩内廓型进行测量之后,得到大量离散测量数据点,结合天线罩内廓型各点的去除余量先用软件通过重构得到加工后的曲面<sup>[2]</sup>。为了实际修磨该重构曲面,需要在此曲面上进行刀具轨迹规划自动生成数控代码来控制磨头遍历该曲面。采用何种数控加工刀具轨迹规划方法是一个直接关系到天线罩内廓型修磨精度和修磨效率的关键问题。

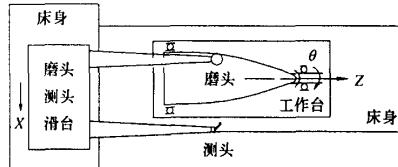


图2 双工位测量与加工示意图

## 2 刀具轨迹规划

在复杂曲面的多坐标数控加工中,同一曲面加工所选刀具轨迹不同,其精度和效率会有很大的差别。好的刀具轨迹应该能在保证加工精度的前提下,使加工效率达到最高,具体体现在以下几方面评价指标<sup>[4]</sup>:

(1) 刀具轨迹的长度。即对零件加工的刀具轨迹的总长度,其中包括刀具有效切削路径长度和空行程长度。显而易见,刀具轨迹的长度越短,加工效率越高。锯齿形的往复式双向切削刀具轨迹或螺旋线形的环切刀具轨迹要比单向切削的刀具轨迹短。

(2) 刀具轨迹的连续性。不连续的轨迹会因经常性的抬刀使得刀具往复时间增加而降低加工效率,而且被加工零件的质量也会因为系统误差而降低。因此,刀具轨迹数越少越好,即单个刀具轨迹尽可能长。

(3) 刀具轨迹方向的一致性。随着加工轨迹选取的不同,加工轨迹上法矢的变化幅度和变化频率有时会有很大差别,从而直接影响到加工效率和质量。轨迹方向的一致性包括刀具运动切线方向的变化情况和在某一轨迹上曲面法矢方向的变化情况。显然,刀具轨迹的规划应该沿着曲面法曲率变化较小的方向,从而使其切线方向和法矢方向的变化量尽可能小。

天线罩内廓型近似标准回转体。采用螺旋线形的环切刀具轨迹遍历内廓型可以使刀具轨迹的总长度最短且没有空行程,但是螺旋线形的环切刀具轨迹计算较复杂。本文采用了不等距截面的环切刀具轨迹方法:加工过程中磨头在天线罩内由里向外,先控制磨头伸到天线罩的靠近顶端处第一个截面Z<sub>1</sub>处,见图3,通过控制工件在θ向旋转和磨头X向微动、两轴联动来完成第一圈修磨;然后控制磨头移动到第二个截面Z<sub>2</sub>处,同样地由工件旋转和磨头微动两轴联动完成第二周的加工……,依次完成控制磨头对整个内廓型的遍历修磨。对于天线罩内廓型加工而言,应用不等距截面环切刀具轨迹规划方法的加工效率等同于螺旋线形的环切刀具轨迹规划方法。从刀具轨迹方向的一致性要求来考虑,天线罩内廓型面法曲率沿母线方向变化相对较小,但是假设采用

沿母线方向修磨,那么必须按照天线罩大径处的最大残留误差来求得最少走刀次数,这样在小径处就出现了相邻两条刀具部分重合的情况,致使加工效率降低,且沿母线方向修磨还存在每次修磨一条母线后有一次空行程的问题,会使效率更低,由试验证明沿圆周方向和沿母线方向修磨天线罩内廓型,其修磨质量并无明显的区别。综合上述分析,采用不等距截面环切刀具轨迹规划方法具有修磨效率较高、刀具连续性好、算法简单等优点。

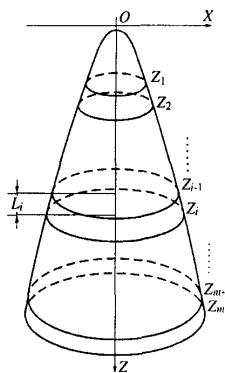


图3 不等距截面环切

## 3 刀具轨迹生成方法分析

参数曲面加工的刀具轨迹生成方法有多种,如等参数线法、等距截平面法、等距偏置法、等残留高度法等。

(1) 等参数法是最常用的一种刀具轨迹规划方法,这种方法的最大优点是算法简单。但因参数间距只能根据两相邻刀具轨迹间残留高度最大处来确定,如果曲面沿参数方向的几何尺寸变化较大时,实际得到的刀具轨迹线疏密差别较大,致使加工效率较低,加工表面质量较差。

(2) 等距截平面法是用一组平行平面和曲面相截,将所得到的截线作为刀具运动的轨迹。这种方法的缺点是截平面法最佳方位通常很难确定,多数情况下只好选用与某坐标轴向垂直的平面来简化计算,该方法虽然保证了刀具轨迹在几何空间的距离相等,但一般情况下在不同位置处的残留高度并不相等,平行平面的间距只能根据残留高度最大处决定,因而加工效率有时也较低。

(3) 等距偏置法是求边界曲线的等距离曲线作为刀具轨迹线,这种方法与等距截平面法相似。

(4) 以上几种方法在确定相邻两刀具轨迹的距离时都是根据残留高度最大的情况来确定,在不同程度上存在重复切削。加工效率依赖于曲面几何形状和曲率的变化情况,实际上沿刀具轨迹方向的残留高度往往是变化的,而最大值不能超过许用值,因而加工效率不高。相比之下,等残留高度法则是通过控制相邻轨迹间的距离使得轨迹间的残留高度不变,从而在已知一条加工轨迹、刀具半径和允许残留高度的前提下,下一条刀具轨迹便可以计算出来。显然这种方法是一种高效的加工方法。

经过上面的分析,再结合天线罩的自身形状特点,提出轴向采用等残留高度与圆周θ方向采用等参数法相结合的方法。在轴向上母线曲率是不断变化的,故采用等残留高度法可使加工效率最高;而曲面沿圆周参数u方向的几何尺寸变化均匀,故可以采用等参数法,既计算简单又没有使加工效率降低。等残留高度与等参数法相结合生成的刀具轨迹——不等距截面环切刀具轨迹对天线罩内廓型而言是

最优化的刀具轨迹。由双三次样条进行曲面重构得到加工后的曲面参数方程  $S(u, v)$ <sup>[3]</sup>,  $u$  是母线方向的参数,  $v$  是圆周方向的参数。先在轴向按等残留高度法进行刀具规划, 由下式计算截面位置  $Z_{i-1}$  处到下一个截面的距离<sup>[4]</sup>, 即

$$L_i \approx 2 \sqrt{2hR} \sqrt{\frac{R_{i-1}^*}{R_{i-1}^* - R}} \quad (1)$$

式中:  $h$  为给定的残留高度;  $R_{i-1}^*$  为在截面  $Z_{i-1}$  处的理论内廓母线的曲率半径;  $R$  为磨头的半径;  $L_i$  为刀具轨迹规划的行距。

下一个截面的位置

$$Z_i = Z_{i-1} + L_i \quad (2)$$

递推计算得到一系列的垂直于  $Z$  轴的不等距截面位置  $Z_0, \dots, Z_{i-1}, Z_i, \dots, Z_m$ , 随着轴向  $Z$  的增大, 母线曲率半径  $R_{i-1}^*$  也会增加, 行距  $L_i$  则随着  $R_{i-1}^*$  的增大而减小, 因此在靠近天线罩的端口处行距较小, 而在靠近罩体尖端处行距较大(图 3), 从而可实现高效加工。

$Z_0, \dots, Z_{i-1}, Z_i, \dots, Z_m$  对应于参数  $0, \dots, u_{i-1}, u_i, \dots, u_{m-1}, 1$ , 所得的截面  $S(u, v)$  上是一个圆周方向的封闭曲线, 然后对这个曲线进行参数化, 取  $0, \dots, v_{i-1}, v_i, \dots, v_{m-1}, 1$ , 得到曲面上的点  $S(u_i, v_j)$ , 其中  $v_i - v_{i-1}$  是一个常量。由上述方法得到一系列的修磨点  $S(u_i, v_j), i = 0, 1, \dots, m, j = 0, 1, \dots, n$ 。

#### 4 刀具中心的轨迹计算

加工自由曲面时, 必须找出刀具中心的轨迹以建立刀位文件。刀具中心的轨迹在与加工后天线罩内廓曲面法向距离为磨头半径  $R$  的曲面上。当给定法向等距离  $R$  以后, 可以构造出分别位于已知重构天线罩曲面两侧的两个等距面, 在修磨天线罩内廓时用到天线罩内侧的等距面。由修磨点、刀具半径和修磨点处的曲面法向量  $n(u_i, v_j)$  得到刀位点  $P(u_i, v_j)$

$$\begin{aligned} P(u_i, v_j) &= S(u_i, v_j) - R \times n(u_i, v_j) \\ n(u_i, v_j) &= \frac{S_u(u_i, v_j) \times S_v(u_i, v_j)}{\|S_u(u_i, v_j) \times S_v(u_i, v_j)\|}, \quad (3) \\ i &= 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n \end{aligned}$$

#### 5 刀具轨迹编辑处理

将生成的刀位点  $P(u_i, v_j)$  后置处理转换为机床的数控代码前, 应该先拟合成刀位轨迹曲线进行检查, 看其是否符合要求或者是否光顺。如果出现自交或间断, 就应该对其进行光顺或其他处理。在圆周方向上刀位轨迹曲线接近圆弧, 采用圆弧插补可以使加工效率提高 3~5 倍<sup>[4]</sup>。

刀位点的圆弧插补算法如下:

- (1) 依次读入当  $u = u_i$  时的一组圆周截面上刀位轨迹线上的  $k$  个数据点  $P(u_i, v_j), P(u_i, v_{j+1}), \dots, P(u_i, v_{j+k})$ ;
- (2) 找出一组数据的中间点;
- (3) 求通过这组数据的起始点、中间点、最后点的圆弧的圆心坐标  $(x_c, y_c)$  和半径值  $r_c$ ;
- (4) 计算其余各点的直角坐标值  $(x_i, y_i, z_i)$  与上述所

求圆弧的误差:

$$e_p = |r_c - d| = |r_c - \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}| \quad (4)$$

(5) 如果存在  $e_p > \delta$  ( $\delta$  为插补允差), 则说明用圆弧来拟合所有点的误差过大, 从这一数组中放弃最后一个点, 形成新的数组  $P(u_i, v_j), P(u_i, v_{j+1}), \dots, P(u_i, v_{j+k-1})$ , 返回到第 2 步重复进行;

(6) 如果  $e_p < \delta$ , 则说明用圆弧来拟合所有点的误差能满足精度要求, 输出圆弧插补命令;

(7) 将所剩的刀位点形成的新数据组, 返回到第 2 步重复进行, 直到所有刀位点被处理完毕。

通过上述处理即可得到刀位文件, 通过数控机床完成天线罩内廓型面的修磨, 图 4 所示为修磨后内廓型面剖视图。

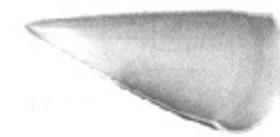


图 4 修磨后内廓型面剖视图

#### 6 结束语

应用等残留高度与等参数法相结合的不等截面环切刀具轨迹规划方法很好地解决了天线罩大型复杂内廓型面数控加工的刀具轨迹规划问题。精密修磨天线罩内廓型面的结果证明应用本文研究的方法所生成数控刀位文件, 在修磨天线罩内廓型面时可以在满足精度的情况下获得较高加工效率。

#### 【参考文献】

- [1] 故辽辉. 天线罩技术的发展[J]. 电讯技术, 2000, (2)
- [2] 郭东明, 盛贤君, 徐志祥等. 导弹天线罩专用修磨机床控制系统研究[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(5): 560~563
- [3] 郭东明, 娄鑫, 王晓明等. 面向导弹天线罩精密加工的三曲面重构[J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 92~95
- [4] 任秉银, 唐余勇. 数控加工中的几何建模理论及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000

本刊 2002 年度总被引频次在 65 种机械类期刊中排第 8 位

期刊总被引频次是一个重要的期刊评价指标, 它指的是期刊历年所发表的论文在统计当年被引用的总次数, 因此总被引频次反映了一份期刊在学术界的影响面。

根据中国科技信息研究所 2003 年 12 月公布的 2002 年度中国科技期刊引证报告, 《机械科学与技术》在 2002 年度的总被引频次为 419 次, 在中国大陆 65 种机械类科技期刊中排第 8 位。总被引频次最多的前 10 种期刊分别是: 中国机械工程 1377 次, 机械工程学报 827 次, 中国电机工程学报 801 次, 铸造 653 次, 金属热处理 530 次, 摩擦学学报 530 次, 机械设计 473 次, 机械科学与技术 419 次, 特种铸造及有色合金 388 次, 焊接学报 285 次。

## 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>