

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.012

基于 Matlab 的大型球面模胎质量控制研究

王 波, 赵转萍*, 龚 醒

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对大型球面模胎的质量控制问题,对球面模胎的制造工艺、球面度误差、球径误差方面进行了研究,对球面度误差的不同算法及球面屏的修模算法进行了归纳,建立了基于 Matlab 控制算法的数学模型,提出了在最小二乘法的基础上将最小区域法运用到 Matlab 的 *fmincon* 函数中。并综合考虑以球面度误差和球径误差作为控制参数,确定了加工参数与最小修模量之间的函数关系。研究表明,该控制算法收敛速度快,精度高,修模量小,对大型球面模型的加工质量控制具有指导意义。

关键词:球面度误差;球径误差;最小区域法;*fminunc* 函数;*fmincon* 函数

中图分类号:TH161;TP391.7;TB92

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0358-04

Quality control on the large spherical mould based on Matlab

WANG Bo, ZHAO Zhuan-ping, GONG Xing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the quality control of large spherical mould, the manufacturing process of mould, sphericity error, spherical diameter error were researched, different algorithm on sphericity error and repairing mould algorithm on spherical screen were summarized, a mathematical model based on Matlab controlling algorithm was established. The minimum zone method was adapted to the Matlab's *fmincon* function on the basis of least square method. Considering the sphericity error and spherical diameter error as the control parameters, the functional relationship between the processing parameters and the least die repairing amount was determined. The results indicate that this kind of control algorithm is of fast convergent rate, high precision and few mold repairs and is of guiding significance to the processing quality control of large spherical screen model.

Key words: sphericity error; spherical diameter error; minimum zone; *fminunc* function; *fmincon* function

0 引 言

大型球面模胎是球面天线屏制造的基础,对其进行质量控制的技术和方法直接影响着加工的精度和速度。以往在对大型球面模胎的质量控制往往是采用不同方向的弧长、弧高等参数法对球面进行测量评定,对不合格的参数采用逐次修测法,直至精度达到要求为

止,这样严重影响了测量的效率。

本研究旨在通过研究加工参数与最小修模量之间的函数关系,找到最优控制方法和评定算法,从而为以后的加工、修模提供依据^[1]。

1 球面模胎的制造误差分析及控制方法

天线球面屏的制造是通过铸模实现的,其中模

收稿日期:2014-10-27

作者简介:王 波(1989-),男,安徽桐城人,主要从事测控、机电一体化方面的研究. E-mail:945487921@qq.com

通信联系人:赵转萍,女,副教授,硕士生导师. E-mail:meezpzha@nuaa.edu.cn

胎的制造过程是在基础框架上建立垂直于水平面的旋转轴,采用标准球径的刮板在规定的弧长段内绕垂直轴旋转刮制材料而形成的模胎球面。因此模胎的制造精度与垂直于水平面的旋转轴的垂直度、弧形刮板的圆度以及刮板运动的圆弧轨道的平面度相关^[2]。

若旋转轴倾斜过大或旋转轴的垂直度误差没有控制在要求的范围内,会造成模胎球面的两边不均匀,在倾斜相对的那一面的最下面会有部分刮不到,没刮到的部分则随着倾斜角的增大而增大。弧形刮板的圆度误差对模胎的制造精度也影响很大,圆度误差越大,刮制出的模胎表面越不均匀,精度则越低。刮板在运动时,若运动的圆弧轨道的平面度误差偏大,会导致刮出的某一边偏高,最下面的一部分可能刮不到,这对模胎精度产生的误差影响则与旋转轴的垂直度误差偏大产生的误差影响相类似。

因此,在模胎的制造过程中,是通过激光跟踪仪在相应的被测物上采点拟合对应的形状,再计算它们的垂直度误差、圆度误差以及平面度误差,将它们控制在合理的范围内。

2 球面误差的数学模型及评定算法

模胎的球面误差包含球径、球面度两种误差。球径误差即尺寸误差或半径误差;球面度误差的常用评定方法为最小二乘法,其中该算法具有简单、快速和性能稳定的特点,但最小二乘法不能提供满足最小条件的球面度误差的评定结果。

本研究结合最小二乘法与最小包容区域法,以最小二乘法求得的结果作为最小区域法的计算初值,并以球面轮廓度和尺寸作为综合控制参数来建立符合最小包容区域法的误差评定数学模型^[3-8]。

2.1 最小二乘法初步评定

首先本研究建立线性矩阵方程,在 Matlab 中求解初步的球心坐标和半径值^[9-10]。设 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ (其中 $i=1, 2, \dots, n$)—被测点坐标, $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ —要拟合的球心坐标, r —拟合后的半径, r_0 —球面模胎的理论半径。初始方程为:

$$(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 = r_0^2 \quad (1)$$

变换式(1)为:

$$r_0^2 - X_0^2 - Y_0^2 - Z_0^2 + 2X_iX_0 + 2Y_iY_0 + 2Z_iZ_0 = X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 \quad (2)$$

转换式(2)为线性矩阵方程:

$$[2X_i, 2Y_i, 2Z_i, ones(size(X_i))]]$$

$$[X_0, Y_0, Z_0, r_0^2 - X_0^2 - Y_0^2 - Z_0^2]^T = X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 \quad (3)$$

代入式(3)到 Matlab 中解出初步的球心坐标 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 和拟合半径 r 。调用 Matlab 中的无约束非线性规划函数 $fminunc$, 其中所调用的形式为:

$$[x, fval, exitflag, output] = fminunc(fun, x_0, options)$$

其中: x —最优解; fun —目标函数; x_0 —初始解; $options$ —设置优化选项参数; $fval$ —返回目标函数在最优解 x 点的函数值; $exitflag$ —返回算法终止标志; $output$ —返回优化算法信息的一个数据结构。

然后分别以 $Q(X_0, Y_0, Z_0)$ 为初值代入式(4)到函数 $fminunc(fun_{xyz}, [X_0, Y_0, Z_0], options)$ 求解出最小二乘球心坐标 $Q(X_0, Y_0, Z_0)$, 和以 r 为初值代入式(5)到函数 $fminunc(fun_{r_1}, r, options)$ 求出最小二乘拟合半径 r_1 。其中目标函数一为:

$$fun_{xyz} = @(Q) sum(((X_i - Q(1))^2 + (Y_i - Q(2))^2 + (Z_i - Q(3))^2 - r^2)^2) \quad (4)$$

目标函数二为:

$$fun_{r_1} = @(r_1) sum(((X_i - Q(1))^2 + (Y_i - Q(2))^2 + (Z_i - Q(3))^2 - r_1^2)^2) \quad (5)$$

最后求出所有数据点到最小二乘球心 Q 的距离, 存在一维数组 L 中。

$$L = sqrt((X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2) \quad (6)$$

因此最小二乘法求出的球面度误差为 $CZ = \max(L) - \min(L)$, 半径误差为 $\Delta r = abs(r_1 - r_0)$ 。

2.2 球面度误差的最小区域法综合评定

若根据最小二乘法求解出的球面度误差符合要求而半径偏大或偏小, 则修模时需要刮掉或填补整个一层球面; 若球径误差符合要求而球面度误差偏大, 则修模时需要刮掉或填补某一块区域, 相对修模量较少。因此, 本研究综合考虑以球径误差为约束函数, 球面度误差为目标函数, 建立满足最小区域法的评定算法。

笔者以最小二乘球心坐标为球心坐标计算初始解, 调用 Matlab 中的有约束非线性最优化 $fmincon$ 函数来求解最小区域球心坐标和半径。所调用的形式为:

$$[x, fval, exitflag, output] = fmincon(@myfun, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, @mycon, options)$$

式中: $@myfun$ —目标函数; x_0 —初始解; A, b —线性不等式约束, 若没有则取 $A = [], b = []$; Aeq, beq —线性等式约束, 若没有则取 $Aeq = [], beq = []$; lb, ub —变量的上、下边界, 若没有界可设 $lb = [], ub = []$;

@ *mycon*—约束函数; *options*—设置优化选项参数。

而 *fmincon* 函数的约束函数为:

$$function [c_1, c_2] = \min RZ(Q_1) \quad (7)$$

式中: $c_1 = \max(\text{sum}(L)/\text{length}(X_i) - r_0)$, L —所有点到最小区域球心的距离, $c_2 = []$ 。

目标函数为:

$$function y = \min CZ(Q_1) \quad (8)$$

式中: $y = \max(L) - \min(L)$, L —所有点到最小区域球心的距离。

将约束函数和目标函数代入到 *fmincon* (@ *minCZ*, Q , [], [], [], [], [], [], [], @ *minRZ*, *options*) 中, 解得最小区域球心坐标为 $Q_1(X_0, Y_0, Z_0)$, 再将球心坐标 Q_1 代入式(5)解出拟合半径 r_2 。

最后根据式(6)求出最小区域球面度误差 CZ_1 和球径误差 Δr_1 。

由于本研究设置球径误差为约束函数, Δr_1 接近于零, 若此时的最小区域球面度误差仍不符合要求, 则可通过改变约束函数, 即让球径误差值扩大到接近球径误差要求值, 再重新计算此时的球面度误差, 这时球面度误差取得最小值, 若仍旧大于要求值, 则需进行修模处理。

3 球面屏的修模算法

球面屏的修模控制算法按照修模量最小和方便加工为原则有 3 种, 分别为按到拟合球心距离最小值点修模(增料修模法)、按到拟合球心距离最大值点修模(减料修模法)和综合最小值点和最大值点修模(增减结合修模法)。实际修模时选择哪种修模控制算法则根据所有数据点到球心的距离分布图来确定: 若距离最小值点比较集中, 则按增料修模; 若距离最大值点比较集中, 则按减料修模; 若距离最大最小值点分布均匀, 则增减结合修模。若分布点不明显, 同时也可记录下分别按 3 种情况修模时所需修模的点数, 然后选择所需最少修模点数的控制算法来进行修模。

以增料修模控制算法流程为例, 首先找到距拟合球心距离最小值点, 将最小值点的距离增大到拟合半径的长度, 然后利用 Matlab 中的 *fsolve* 函数求解出此点长度变化后的坐标, 再将解出后的坐标代替原来的坐标, 重新计算球面度误差。这样循环求解最小值点坐标代入原始数据, 直到计算出的球面度误差符合要求为止。

增料修模法控制算法计算流程如图 1 所示。

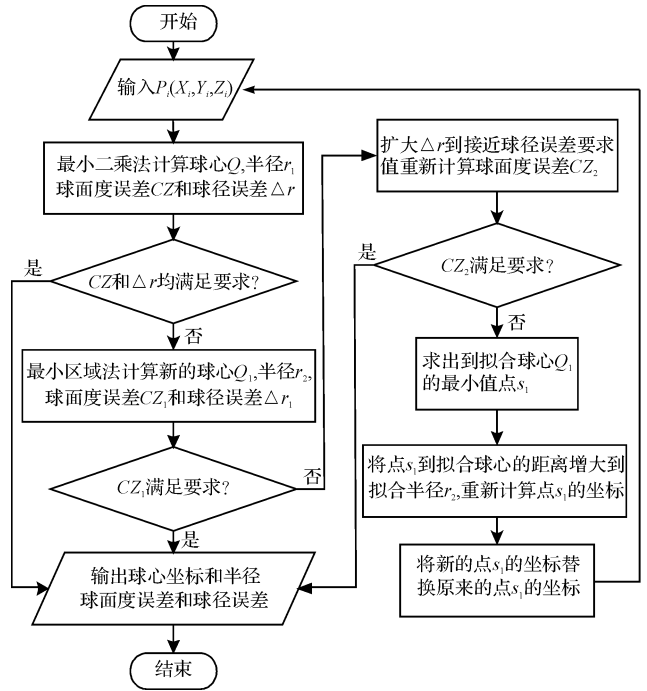


图 1 增料法修模控制算法流程图

4 相关数据结果分析

本研究采用上述控制算法针对某球面屏模胎实际测量的 517 个点进行了数据处理与分析, 结果如表 1 所示。该球面屏的曲率半径为 12.8 m, 球面度误差要求小于 3 mm, 球径误差要求在 ±3 mm 内。

表 1 综合评定算法拟合结果

拟合误差 评定算法	球面度误差/mm	球径误差/mm
最小二乘法	3.49	13.93
最小区域法	3.21	0.02
改变球径误差	3.03	2.80

数据表明, 经改变球径误差后, 球面度误差明显减小, 球径误差也符合要求。因此, 笔者绘制的所有数据点到改变球径误差后拟合球心的距离的分布图如图 2 所示。

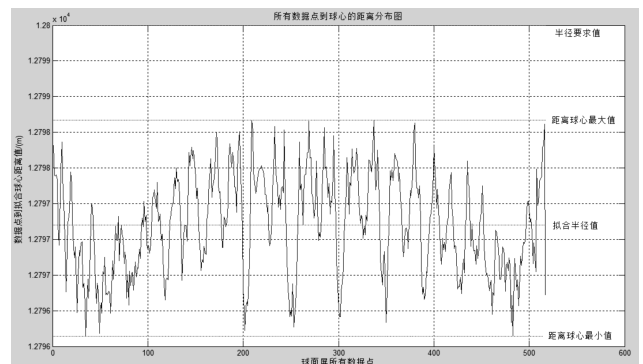


图 2 所有数据点到拟合球心的距离分布图

本研究分别按 3 种修模方式计算所需的修模次数,比较结果显示如表 2 所示。

表 2 不同修模方式修模量比较(单位: mm)

	球面度误差	球径误差	所需修模次数
增修	(3.03,3.01,2.89)	2.80	3
减修	(3.03,3.02,2.94)	2.80	3
综修	(3.03,3.01,2.83)	2.80	3

注:增修为增料修模法,减修为减料修模法,综修为综合修模法。

针对球面屏模胎所测得的 517 个点,笔者增修所需修模的地方(即距离球心最小值点处)依次为第 35、483、49 个点的位置,减修所需修模的地方(即距离球心最大值点处)依次为第 337、209、243 个点的位置,综修所需修模的地方(即综合距离球心最小值点和最大值点处)依次为第 35 和 337、483 和 209、49 和 243 个点的位置。

综上,综合修模后的球面度误差最小为 2.83 mm,但每次修模均需要修最大值点与最小值点;增料修模法与减料修模法比较,修模次数相同,但增料修模后的球面度误差更小,因此,本研究综合考虑该球面屏修模方式选择增料修模法。

5 结束语

本研究提出了球面屏模胎全过程质量控制方法,在分析制造误差的基础上,提出了以球径误差和球面度误差综合评定。根据最小包容区域法思想来调用 Matlab 的 *fmincon* 函数来计算大型曲面的球面度误差,并将 *fmincon* 函数中的 *@ mycon* 函数的球径误差设置

到接近球径误差要求值时所得到的球面度误差为最小。

球面模胎修模时,根据到拟合球心的距离分布图 and 不同修模方案所需的修模次数可选择最佳修模方案。

参考文献(References):

- [1] 蒋公芹,赵转萍. 大型球面模胎质量评定方法的研究[J]. 工具技术,2010,44(8):7-10.
- [2] 刘品,张也哈. 机械精度设计与检测技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.
- [3] 刘明文,邓善熙,聂恒敬. 球度误差包容评定的高精度实现方法[J]. 计量学报,2000,21(2):100-105.
- [4] 郭叙蕊,金施群. 高精度球面轮廓的测量和评定方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,2007.
- [5] 喻晓,黄美发,夏澎,等. 基于改进粒子群算法的球度误差评定[J]. 计算机应用系统,2009(12):201-203.
- [6] WEN Xiu-lan, SONG Ai-guo. An immune evolutionary algorithm for sphericity error evaluation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(10): 1077-1084.
- [7] 雷贤卿,宋红卫,薛玉君,等. 球度误差的网格算法[J]. 农业机械学报,2013(5):222-225.
- [8] 刘飞,彭晓南. 最小外接球法球度误差评价与实现[J]. 机械工程学报,2009,45(9):243-248.
- [9] 陈杰. Matlab 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [10] 马莉. Matlab 语言实用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2010.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

王波,赵转萍,龚醒. 基于 Matlab 的大型球面模胎质量控制研究[J]. 机电工程,2015,32(3):358-361.

WANG Bo, ZHAO Zhuan-ping, GONG Xing. Quality control on the large spherical mould based on Matlab[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(3):358-361.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>