

母线含非圆曲线的超声变幅杆 精确加工的研究^{*}

阮世勋[†] 雷运清 唐东炜 陈伟峰 张建锋 黄智勇

(佛山科学技术学院 佛山 528000)

吴国荣

(佛山迅力超声设备厂 佛山 528000)

摘要 介绍在普通数控车床上准确加工母线含非圆曲线的超声变幅杆的两种通用程序的编制方法及应用。方法一以等弦长划分待加工曲线决定节点,以平均曲率半径作为插补圆半径,以C语言编制出加工代码生成软件。方法二采用VB6编程,使用双圆弧法进行插补,伸缩步长法进行误差控制和决定节点,可设定并控制插补误差理论值,运行时生成的NC代码指令条数少,适应任何超声变幅杆的加工,界面友好易用。上述两程序在进行切削加工前,均可全程模拟加工过程。两软件经分别在GSK-928和G-CNC6135A(G)数控车床上应用,效果良好。而第一软件较完善。

关键词 超声变幅杆,数控车床,母线精确加工,软件

Accurate machining of ultrasonic transformers with non-circular generatrices

RUAN Shi-Xun LI Yun-Qing TANG Dong-Wei CHEN Wei-Feng ZHANG
Jian-Feng HUANG Zhi-Yong WU Guo-Rong

(Foshan University, Foshan 528000)

Abstract Two methods of designing novel universal software for accurately machining the ultrasonic transformers with non-circular generatrices by common NC lathe were developed and presented. In the first method, the panel points were decided by taking equally chords of the circles, and the average radius was taken as the inserting compensation radius. C language was used to compile the software. In the second method the universal software is based on VB6. In the software, double-arc method was used to

2003-09-03 收稿; 2004-10-18 定稿

^{*} 广东省教育厅自然科学基金资助 (Z02070)

作者简介: 阮世勋 (1946-), 男 (汉族), 广东阳江市人, 佛山科学技术学院机电与信息工程学院教授, 硕士, 主要从事功率超声及机电工程研究。

雷运清 (1971-), 男, 助理实验师, 大专。唐东炜 (1964), 女, 高级实验师, 大学。陈伟峰 (1980), 男, 本科。张建峰 (1979), 男, 本科。黄智勇 (1978), 男, 本科。吴国荣 (1956), 男, 技师, 高中。

[†] 通讯联系人 Email: RSX46@163.com

insert compensation and flexible step method was used to decide the panel points from theoretical errors. The amount of created NC codes is small and inserting compensation theoretical errors can be set and controlled beforehand. It is suitable for machining any ultrasonic transformers, the interface of the universal software is friendly to users and easy to be used. In the two software, the dynamic imitation of the whole machining process and the forms of the finished products may be displayed on the computer screen before the transformer is machined. The two methods have been used efficiently at GSK-928 CNC and G-CNC6135A(G) lathes to machine separate the ultrasonic transformers. The second one has more advantages.

Key words Ultrasonic transformer, Common NC lathe, Accurate machining of the generatrices, software

1 引言

超声变幅杆是加工准确度要求很高的元件。对于悬链线类、指数类^[1,2]、余弦类^[3]等母线为非圆曲线的变幅杆以及含这些曲线的复合变幅杆, 保证其整体加工精度的难点是其中这些非圆曲线段的准确加工。因为普通数控车床控制系统内存有限, 缺乏计算功能, 只有直线和圆弧两种插补方法, 无法直接进行变幅杆的非圆曲线部分的加工。采用 Mastercam 等现成软件进行加工, 因其只有通用性, 无法专门考虑变幅杆加工的个性需求, 加工效果也不理想。本文提出两种在普通数控车床上以一定措施保证母线含非圆曲线变幅杆准确加工的方法, 编写出相应的加工代码生成通用软件, 进行变幅杆准确加工, 实际应用效果良好。

以尽量少的代码数取得尽可能高的插补精度, 是本课题成功的关键, 我们采取了如下措施:

2 以等弦长划分节点用每段曲线的平均曲率半径进行圆弧插补的方法

显然, 对于非圆曲线变幅杆加工, 采用圆弧插补比较有利。在杆件加工中每个座标点均求取尽可能准确的插补圆弧曲率半径是准确加工的关键。我们设计沿曲线走向以等弦长进行

曲线区段划分决定节点, 将每一区段曲线再细划分成许多微线段, 各等弦长曲线段的平均曲率半径 $\bar{\rho}$ 通过其各微曲线段端点的曲率变化率的一阶导数 y' 和二阶导数 y'' 由式

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{(1 + y'^2)^{1/2}}{|y''|}}{m} \quad \text{计算求得}^{[4]}, \text{其中 } m \text{ 为曲线段内微曲线段段数。}$$

这样就消除了以等长坐标进行分割求曲率半径时由于母线曲率变化快慢对于所求得插补圆弧半径误差的影响, 可取得较准确的插补圆弧曲率半径。

本方法保证了不同曲线变幅杆都具有较强的适应性和精度, 经在 GSK-928 数控车床上应用, 效果良好。其不足之处主要有: (1) 为保证较高精度, 弦长就不能分得太长, 故生成的 NC 代码较大, 占用机床数控系统贮存空间较多, 对于频率较低, 杆长较长的变幅杆, 插补数据有超出系统贮存容量的可能, 这样就只能采用分段加工的办法。(2) 软件没有误差定量计算和预先设定控制功能。(3) 采用 C 语言编写, 在 DOS 状态运行, 操作不如采用窗口显示的软件直观方便。故其已被下述更完善精确的方法所取代。

3 以伸缩步长法选定节点双圆弧法进行插补的方法

本方法以 VB6 语言进行编程, 采用双圆弧法进行插补, 伸缩步长法根据误差满足条件控

制插补步长。使上述第一种方法的存在问题得到了根本的解决。

3.1 双圆弧法插补原理^[5]

图 1 所示 P_i 和 P_{i+1} 为非圆曲线 $y=f(x)$ 上的任意两个点。把这两点作为某次插补计算的起点和终点。取原零件轴线为 X 轴, 直径方向为 Y 轴组成 XOY 整体坐标系, 以 P_i 和 P_{i+1} 的延长线 P_iU_i 及其垂线 P_iV_i 组成 $U_iP_iV_i$ 局部坐标系, 该坐标系与整体坐标系成 φ_i 夹角。可以想见, 局部坐标随着 P_i 和 P_{i+1} 点的不同而变化, 故 φ_i 角及下面我们所讨论的在该坐标系上的诸数据都是随这两个点的不同而变化的, 这些数据都加上脚标 i 以示其为第 i 次计算的数据。 P_iG_i 为非圆曲线在 P_i 点的切线, G_iP_{i+1} 为在 P_{i+1} 点的切线, G_i 为这两条切线的交点。 T_i 为 $\triangle P_iP_{i+1}G_i$ 的内心, 即 $\angle G_iP_iP_{i+1}$ 和 $\angle G_iP_{i+1}P_i$ 两角平分线的交点。过 T_i 点作垂直于 P_iU_i 的直线 T_iO_i , 过 P_i 点作 P_iG_i 的垂线 P_iO_{i1} 交 T_iO_i 于 O_{i1} , 过 P_{i+1} 点作 P_iG_i 的垂线 $P_{i+1}O_{i2}$ 交 T_iO_i 于 O_{i2} , 则通过简单的几何关系即可证明, 分别以 O_{i1} 、 O_{i2} 为圆心, $O_{i1}P_i$ 和 $O_{i2}P_{i+1}$ 为半径的两个圆弧分别与 P_iG_i 和 G_iP_{i+1} 相切于 P_i 、 P_{i+1} 且它们公切于 T_i 点。 P_iT_i 和 T_iP_{i+1} 两圆弧就是我们用于进行插补的双圆弧。显然, 根据非圆曲线某微段内的弯曲程度以由上述方法计算出来的两个相切圆弧进行插补, 比一个圆弧插补拟合可达到的精度高得多, 达到同样精度每次插补的区间要大得多, 故可大大减少

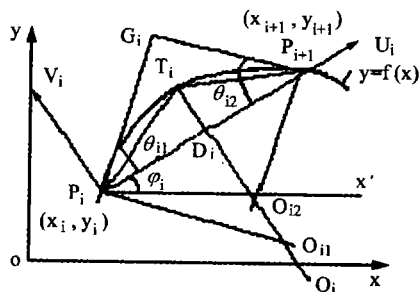


图 1 双圆弧法逼近非圆曲线插补原理

节点和生成的 NC 指令数量, 提高机床贮存空间的利用率和生产率。

3.2 以伸缩步长法确定每次插补节点

伸缩步长法是在每次插补计算的起始节点决定后, 用步长从大到小以满足误差条件为准进行试探, 决定该次插补计算的终节点的方法。其基本过程是这样的: 非圆曲线起点 A 处的 X 方向坐标为 x_A , 终点 E 处 X 向的坐标为 x_E 。节点计算从曲线的起点 A 开始。例如某次的起点是 P_i , 在 X 方向上根据初定的步长 S , 取 $x_{i+1} = x_i + s$, 求出下一个试验节点 P_{i+1} , 进行插补运算, 得出插补双圆弧的圆心、半径等一系列参数, 然后将插补双圆弧轨迹与非圆曲线在 P_iP_{i+1} 段进行 Y 值的离散计算, 并将相同 X 坐标点的两者的 Y 值进行对比, 得出最大拟合误差 δ , 与预先设定的编程允差 $\delta_{允}$ 相对照, 如不满足 $\delta \leq \delta_{允}$, 则逐步缩短步长, 调整 P_{i+1} 点的位置, 直到满足 $\delta \leq \delta_{允}$ 条件, 这样就确定本次插补运算的终点 P_{i+1} 。然后以该 P_{i+1} 点为新起点 P_i , 重复前面过程, 确定新的终点 P_{i+1} , 如此直到终点 E 。就能确定所有满足插补精度要求的节点坐标及插补所需的所有数据。由于该方法计算每对节点时, 均以其达到编程允差为准, 因而这是以最少的指令达到规定的插补误差的有效试探方法, 具有等误差逼近的特征。

根据上述原理进行数学运算后得到一系列相应公式即可进行生成 NC 代码软件的编制。

3.3 软件的使用

本程序具有友好的界面。使用时, 根据运行弹出的图 2 所示的主界面的提示进行选择, 然后根据所弹出的相应界面进行应用操作。

3.3.1 变幅杆参数输入

以鼠标按下图 2 所示主界面右上方输入参数大类选择区中的“零件尺寸”按钮, 弹出零件尺寸输入界面, 按从右到左的顺序逐段输入零件中的圆柱形、圆锥形各段的尺寸参数。然后按下“加非圆曲线到第 n 段”按钮, 弹出非圆曲线参数输入对话框, 根据其表格内容输

入非圆曲线方程、尺寸参数、该段曲线所在段次、加工允差等，然后按“确定”键，则非圆曲线输入界面将显示曲线方程，主显示屏显示零件形状。如有多段非圆曲线，则在设置完成一段后，按该界面上的“设置下一段”按钮，重复以上输入操作。全部输入完后，再按“确定”按钮，显示零件形状。如以上均无误，则变幅杆参数输入完成。

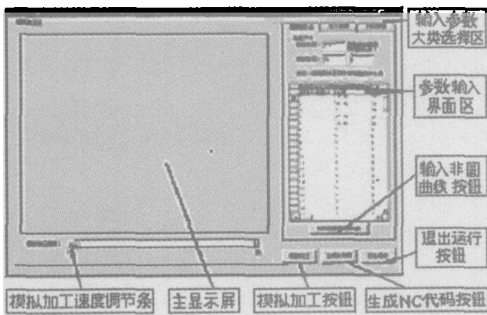


图 2 程序应用主界面

3.3.2 加工参数和刀具管理参数的输入

按下主界面右上方输入参数大类选择区中的“加工参数”按钮，弹出加工参数输入界面，分别输入粗、精加工所用刀号，工件转速、每次进刀量等加工参数。再按下该区内的“刀具管理”按钮，弹出设定刀具管理参数界面，设定刀具号码，类别、是否加润滑液及类别等。至此，所有参数设置完成。

3.3.3 加工过程的动画模拟仿真

设置完成后，按下“模拟加工”按钮，则主显示屏动态显示粗、精加工全过程。调节主显示屏下方的“模拟加工速度”调节条的位置可使显示的模拟过程达到您认为满意的速度。

3.3.4 切削加工

按下主界面右下方的“生成 NC 代码”按钮，则所编程序生成机床加工用的 NC 代码。并在主显示屏上显示出来。如果需要进行简单修改，例如加退刀位，加过渡圆弧等，也可直接在 NC 代码上修改，然后保存。点击通讯按钮将这些代码发送到车床数控系统，按预先设定配置好相应的刀具、经设置加工原点、光学

对刀等常规操作后，即可在机床数控面板上操作运行，进行加工。

3.4 实际加工效果

本文两程序均曾在 G-CNC6135A(G) 数控车床上实施加工，下列数据是以方法二加工的两组两端为圆柱形而中间段分别为悬链线型和指数型的复合变幅杆^[1,2]的测试数据。采用小信号正弦激振法^[3]进行频率测试。

表 1 中间为悬链线型的复合变幅杆
谐振频率 f 测试结果

序 号	测试值 $f_{\text{测}}$ (kHz)	均值 $\bar{f}$ (kHz)	离散值 $\Delta f = f_{\text{测}} - \bar{f}$ (kHz)	离散率 $\Delta f / \bar{f}$ (%)
1	20.047		0.014	0.069
2	20.029	20.033	-0.004	-0.020
3	20.023		-0.010	-0.050
4	20.033		0.000	0.000

表 2 中间为指数型的复合变幅杆
谐振频率 f 测试结果

序 号	测试值 $f_{\text{测}}$ (kHz)	均值 $\bar{f}$ (kHz)	离散值 $\Delta f = f_{\text{测}} - \bar{f}$ (kHz)	离散率 $\Delta f / \bar{f}$ (%)
1	19.712		0.016	0.081
2	19.695	19.696	-0.001	-0.005
3	19.682		-0.014	-0.071

两组变幅杆谐振频率离散率均在 0.1% 以内，性能参数一致性好。这其中还包括了由于在变幅杆两端加工的螺丝孔因深浅不同等原因引起的误差。这些变幅杆装机试验效果很好。将该软件与 Mastercam 软件进行运行数值模拟误差分析对比发现，尺寸精度要比后者高得多，特别是在直径变化比较快的部位，精度提高极为显著，误差值已经不是一个数量级。作为对比，我们用 Mastercam 软件加工了 1 根与表 1 所列样品同样图纸的变幅杆，其谐振频率为 19.916kHz。

本程序生成的 NC 代码指令条数少。例如，在粗加工误差定为 0.05mm，精加工定为 0.001mm 的情况下，加工长 135.59mm，含长

为 96.35mm 悬链线型段的超声变幅杆,生成的 NC 代码一共才 200 多条指令。一般较新普通数控车床数控系统的存贮容量达 40kB,可容纳 2000 条以上这样的指令,因此,其容量已经足够应付任何变幅杆的加工,无需考虑分段加工问题。

4 结语

本文提出两种在普通数控车床上进行母线含非圆曲线超声变幅杆的准确加工的方法和据此编制的应用软件。其中方法二编写出来的软

件考虑更全面、性能更好、更实用、方便、更能保证加工精度,为用普通数控车床进行母线含非圆曲线的超声变幅杆的精确加工这个难题提供了有效的解决方法和工具。

参 考 文 献

- 1 林仲茂. 超声变幅杆的原理与设计. 科学技术出版社, 1987.
- 2 阮世勋. 应用声学, 1996, 15(2):17~19.
- 3 阮世勋. 声学技术, 1997, 16(1):22~25.
- 4 同济大学数学教研室. 高等数学 (上册). 高等教育出版社, 1997.3.
- 5 廖效果. 数控技术. 湖北科学技术出版社, 2000.5

2004' 中国中西部声学技术交流会

由陕西省声学会, 西安声学会、湖北省声学会、四川省声学会联合发起的“2004' 中国中西部声学学术交流”, 于 2004 年 10 月 27 日至 31 日在西北工业大学举行。来自北京、上海、浙江、重庆、四川、陕西、福建等地高等院校, 科研院所等单位的声学科技专家、教授等共 70 名代表参加了会议。

在开幕式上, 西北工业大学副校长高德远教授到会祝贺, 陕西省声学会理事长王英明教授代表各学会, 向来自全国各地的会议代表表示热烈的欢迎, 他们对会议的支持和关注表示诚挚的谢意; 西安声学会理事长林书玉教授和四川省声学会副理事长罗宪中高级工程师, 分别代表西安和四川声学会对会议的召开表示热烈地祝贺。

中国声学学会办公室主任罗燕女士、《应用声学》编辑部副主编王丽生女士也出席了大会。

本次会议共征集到的学术论文 80 篇, 纳入论文集 80 篇, 会上交流 42 篇。论文涉及的专业领域大致划分, 包括以下五个专题: 1. 物理声学和水声学 2. 功率超声和超声电子学 3. 环境与检测声学 4. 医学超声与工程 5. 语音听觉音乐声学及声学测量

学术交流分大会专题报告和分组交流进行, 中国工程院院士、西北工业大学马远良教授, 陕西师范大学林书玉教授, 第四军医大学周向东教授等六位专家, 在大会上作了精彩的专题报告。

分组交流分医学超声、功率超声和超声电子学类; 物理声学、水声学、环境与检测声学等综合类;

语音通信及声学测量类三个小组进行。

本次交流会, 由专家组成的学术委员会, 偏重于鼓励中青年科技工作者评选出优秀论文 8 篇, 并发给了优秀论文证书和奖金。

本次交流的学术论文在较大程度上反映了我国声科学技术在以上几个专业的发展方向和水平; 到会的老一辈专家和中青年专家都是活跃在声学科技领域的中坚和骨干力量, 他们提交的论文所阐述的理论, 取得的成果具有很高的学术价值和实际的开发应用前景, 为我国声学技术的进步作出了宝贵的贡献。这次交流会是我国声学界水平和效率都较高的一次学术会议, 会上交流积极向上, 学术气氛浓厚, 对促进我国中西部地区乃至全国声学科技的发展具有重要影响。同时有力地加强了我国中西部地区, 以至全国声学科技工作者的沟通。会议取得了圆满的成功, 也达到了预期目的。

这次会议的成功召开, 得到了西北工业大学航海学院大力支持和协助, “声学技术”杂志编辑部以增刊形式出版了会议论文集。

本次会议得到了福州蓝德隔声技术有限公司, 北京声望技术有限公司, 北京横和技术有限公司, 四川声学学会的经费赞助。

期待几个学会继续合作, 于明年黄金季节在《中国科学城—绵阳》成功举办 2005 年度声学学术会议。

(陕西省声学会 西安声学会 四川省声学会)