

# 凸轮反求系统的开发及重构精度的研究

何幼瑛, 张金萍

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 对反求工程中曲线曲面重构这一关键技术进行了深入的探讨, 对反求精度进行了全面的定义, 并提出了反求误差的分析计算方法. 在此基础上, 以 Visual C++ 为平台开发了用于平面凸轮反求的 V1.0CARS 反求系统. 该系统具有测量数据处理、反算控制点、误差分析计算等功能. 该系统还具有 DXF 图形文件接口, 可以把反求结果送入通用 CAD/CAM 系统中进行运动仿真及数控加工.

**关键词:** 反求工程; 凸轮; 数据拟合; 曲面重构; 精度分析

**中图分类号:** TH164    **文献标识码:** A    **文章编号:** 81007-855X(2004)05-0042-07

## Exploration into Reverse System for Cams and Study on Reconstruction Precision

HE You-ying, ZHANG Jin-ping

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Curves and surfaces reconstruction in reverse engineering is profoundly discussed. Reverse precision is defined thoroughly and the method of analyzing and calculating of reverse precision is put forward. According to the theory above and using Visual C++ a reverse system which can be applied to reverse of plane cams is developed.

**Key words:** reverse engineering; cam; data fitting; surface reconstruction; precision analysis

### 0 引言

反求工程又称逆向工程, 它以产品或设备的实物、软件(图纸、程序、技术文件等)或影像(图片、照片等)作为研究对象, 应用现代设计理论方法、生产工程学、材料学及有关专业知识进行系统地分析和研究, 探索其基本理论和关键技术, 从而开发出同类的、更为先进的产品. 反求包括设计反求、工艺反求、管理反求等. 本文仅对设计反求中的实物反求进行研究.

实物反求在航天、航空、造船、汽车等行业已经得到了广泛的应用, 近年来又为人造骨骼的研究和制造、放射治疗的规划和剂量计算提供可靠的技术手段.

实物反求的设计过程与传统的设计过程完全不同, 传统设计是在市场调研的基础上, 根据功能和用途来设计产品, 再根据设计图纸或 CAD 模型制造出产品. 反求工程则是从存在的零件或原型入手, 先对其进行数字化处理(即用三维点的数据集合来表示该零件或原型), 根据用数据构造的 CAD 模型来制造产品. 也就是说, 传统的设计是: 构思—图纸—零件; 反求工程是: 零件(或模型)—图纸(或 NC 程序)—零件. 反求设计既不同于传统的设计, 也不同于仿制技术. 仿制着眼于制造出与原来实物相同的产品; 而反求设计的着重点是对原有实物进行修改和再设计, 因而其产品具有比原产品更高的精度和性能.

在开发凸轮零件实物反求系统中, 要着重研究和解决以下几个问题: 样件表面数据获取技术; 曲线曲面重构技术; 系统各环节间的通讯与信息集成; 本文将重点讨论曲线曲面重构理论及其在软件开发中的应用.

收稿日期: 2003-11-20.

第一作者简介: 何幼瑛(1944~), 女, 副教授. 主要研究方向: 机械制造工艺.

## 1 重构理论

### 1.1 数据拟合

数据拟合可以分为曲线拟合和曲面拟合. 曲线拟合指: 根据已知的控制点  $V_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  构造一条曲线, 在满足一定精度条件的前提下, 这条曲线可用于代替控制点所表示的曲线. 如果是用控制点来构造曲面, 则称曲面拟合.

数据拟合又分为插值和逼近. 当所构造的曲线(曲面)通过控制点时, 称该曲线(曲面)为插值曲线(曲面). 当所构造的曲线(曲面)不通过控制点时, 称该曲线(曲面)为逼近曲线(曲面). 即: 插值时型值点与控制点重合, 逼近时型值点与控制点不重合.

在讨论曲线曲面拟合之前, 先做如下定义:

控制点指有一定拓扑关系的一系列点, 用这些点来确定曲线曲面的位置和形状, 而相应的曲线曲面不一定通过这些点, 用  $V_i$  代表控制点.

型值点指已知的有一定拓扑关系的一系列点, 用这些点来确定曲线曲面的位置和形状, 且相应的曲线曲面一定通过这些点, 用  $P_i$  代表型值点.

### 1.2 插值算法

在进行插值运算时, 测量的数据点即为型值点, 过型值点  $P_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  的常用插值算法有:

1) 拉格朗日(Lagrange)多项式插值算法, 其插值方程为.

$$P(t) = \sum_{j=0}^n P_j L_j(t) \quad (1)$$

式中  $L_j$  为拉格朗日基函数,  $L_j(t_i) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$

2) 埃尔米特(Hermite)插值算法, 其插值方程为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^l \sum_{r=0}^k P_i H_{ir}(t) \quad (2)$$

上述插值算法是曲线拟合的基础, 但一般不用于反求计算. 因为随着型值点数量的增多, 插值多项式的次数也相应地增加, 这不但带来计算的复杂性及不稳定性, 而且这种算法不具备局部的修改性, 当型值点增加时或为提高精度要在原有的型值点之间添加新的型值点时, 需要全部重新进行计算.

### 1.3 逼近算法

比较常用的逼近算法: 最小二乘法逼近、圆弧逼近和样条逼近.

1) 最小二乘法逼近. 最小二乘法逼近的算法是以控制点和型值点之间的误差最小为原则. 这种算法是数值逼近的基础. 但随着控制点的增加, 算法的复杂程度成倍地增加. 且控制点稍有变化, 就得重新进行计算, 因而在反求工程中得不到实际应用. 其逼近公式为.

$$y = f(x) = \sum_{j=0}^n a_j x^j \quad (3)$$

式中  $\sum_{j=0}^n a_j$  为最小二乘法逼近的基函数.

2) 圆弧逼近. 由于圆弧能较好地体现曲线曲率的变化, 并且计算较为简单, 工程上常用于逼近精度要求不高的曲线, 故算法从略.

3) 样条逼近. 在最小二乘法逼近的基础上, 基函数采用 B-Spline 基函数的算法为样条逼近算法. 其中三次 B 样条逼近的计算公式为.

$$P_i(t) = \frac{1}{6} [t^3 \ t^2 \ t^1 \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \quad (4)$$



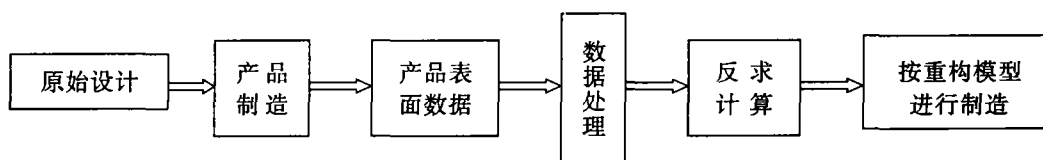


图1 反求工程中的误差来源

Fig.1 The error sources in reverse engineering

1) 计算误差  $\epsilon_{\text{计}}$ : 曲线曲面拟合计算时产生的误差, 其中也包括了计算中小数位数的舍入误差. 选用适当的拟合算法和增加计算中的控制点数都可以减小该项误差.

2) 测量误差  $\epsilon_{\text{测}}$ : 包括测量时产生的误差和测量后对测量数据进行处理时出现的误差. 测量中产生的误差主要指测量设备本身造成的误差、操作人员的视觉和操作误差、被测零件的弹性变形和测头半径的补偿误差等. 测量设备产生的误差由标定误差、温度误差、探针弯曲误差组成. 由于测量设备的高精度, 由测量设备造成的误差可以忽略不计. 因操作人员的视觉定位不准和对测量力的控制不当, 在手动测量中有较大的影响, 采用自动化程度较高的测量设备可以减小该项误差的影响.

3) 制造误差  $\epsilon_{\text{制}}$ : 指用做进行反求的零件在其制造过程中产生的误差, 该项误差在零件设计的公差范围内.

4) 磨损误差  $\epsilon_{\text{磨}}$ : 若用做进行反求的零件曾经使用过, 则存在磨损误差. 用这样的零件进行反求, 可以根据其使用年限及相应的磨损理论, 处理时增加适当的磨损量.

由于上述各项误差大多是随机误差可以用随机误差的求合的方法定义重构时的反求误差  $\epsilon_{\text{反}}$ .

$$\epsilon_{\text{反}} = \sqrt{\epsilon_{\text{计}}^2 + \epsilon_{\text{测}}^2 + \epsilon_{\text{制}}^2 + \epsilon_{\text{磨}}^2} \quad (8)$$

## 2.2 计算误差及其指标

在本反求工程软件的开发中, 采用测量点来描述被测物体. 而只从测量点中选取部分的点来进行曲线重构, 用于进行重构的点称为采样点.

在无法获知原始设计参数的情况下, 作如下定义.

计算误差:  $\epsilon_{\text{计}} = \text{采样点处测量值} - \text{采样点处重构值}$ ;

最大距离误差: 重构中  $\epsilon_{\text{计}}$  的最大值;

最小距离误差: 重构中  $\epsilon_{\text{计}}$  的最小值;

以上几个误差都属于绝对误差. 相对误差 = 绝对误差 / 真值;

平均距离误差: 重构中所有  $\epsilon_{\text{计}}$  的平均值:  $\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\epsilon_i|$

均方根偏差:  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}$

## 2.3 提高拟合精度的措施

由于是在未知原始设计参数的情况下进行反求, 在测量时就按一定顺序进行测量, 以便得到有序的测量数据. 在此前提下, 本课题采取了三种方法来提高重构精度.

### 2.3.1 增加采样点个数

本课题用两种不同的途径来增加采样点. 第一种是仅在误差较大的点的附近进行采样点加密, 然后再进行曲线重构. 为了便于计算机自动实现误差计算, 也可以在预先选定采样点时, 等距的成倍增加采样点数. 如事先选定的采样点为测量点中的 1, 5, 9, 13, ... 点, 则成倍加密后的采样点就为所以测量点中的 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, ... 点,

### 2.3.2 采用合理的拟合方法

若仅靠增加采样点数来提高拟合精度, 必然增加测量成本、影响计算速度, 为用最少的点拟合出精度最高、重构形状最接近原始形状的曲线, 本文所开发的软件采用了三种拟和方法, 并通过计算分析它们的

误差来比较其重构精度.这三种拟合方法是:三次均匀  $B$  样条曲线直接插值;三次均匀  $B$  样条等距曲线插值;三次均匀  $B_3$  样条曲线直接插值.

### 2.3.3 剔除坏点

定义  $|\epsilon_{ij}| > 4\sigma$  的点为坏点.如果计算控制点时采用了采样点中的坏点,则无论是用什么算法、无论是进行一次反算还是两次反算,计算误差的减少都不十分明显.而剔除坏点将有效地提高重构精度.

当出现  $|\epsilon_{ij}| > 4\sigma$  的点时,先改用其它的插值算法进行计算;计算后如果任然存在  $|\epsilon_{ij}| > 4\sigma$  的点,则剔除该点,重新选取插值点进行计算;直到满意为止.

## 3 软件开发

在对各种反求算法和对反求精度的深入研究及探讨的基础上,利用 VisualC++ 6.0 的强大的界面编辑、数值运算、文件管理、图形绘制等功能,本文开发了一个曲线重构的计算机软件系统—凸轮轮廓反求系统(CARS1.0).该系统能够对任意由封闭曲线扩展构成的曲面(柱状面)的测量数据用三种不同的算法进行曲面重构、计算重构精度、对不同算法的重构精度进行比较、并实现用增加采样点数、改变插值算法、剔除坏点等办法提高重构精度.

### 3.1 系统功能及特点

- 本系统采用对话框与主菜单和下拉菜单相结合的界面,界面直观.系统设置了若干基于鼠标操作的功能按钮,简单易学.

- 强大的数据初始化功能,包括数据的输入、追加、修改、保存等功能.

- 强大的数据处理功能,包括参数设置(设置采样点个数和选取插值方法)、采样点显示、控制点计算(和控制多边形同步进行计算)、样条曲线生成、误差计算等功能.

- 显示功能,包括测量点、采样点、控制点、插值点和计算误差的列表显示.生成的样条曲线的图形显示

- 结果的输出功能,系统有三中输出方式:由测量数据画成的凸轮轮廓与本软件的重构轮廓的图形输出;由生成的控制点画成的多义线的 DXF 文件的输出;误差计算结果的 .TXT 格式文件的输出.

- 采用了面向对象的系统设计方案和模块化设计,便于系统移植、维护、调试和进一步开发完善.为方便用户使用该软件,系统还提供了帮助功能.

### 3.2 该软件的操作步骤

- 输入数据或读入数据文件;

- 对输入的数据进行编辑、对输入错误进行修改.或对已保存数据点进行添加;

- 参数设置:选取采样点个数、确定具体的采样点,选择插值算法;

计算控制点,同时绘制出控制多边形;

- 选择插值点数,生成样条曲线;

- 计算重构误差,当误差值超过允许偏差时,给予提示,以便用户采取减小误差的措施;

- 曲线的 DXF 文件和误差计算结果的输出.

### 3.3 系统结构

“类”是 VC 编程的基础和核心,一个类负责完成一项工作.CARS 软件开发中引用和创建了 13 个类.图 2 所示为用框架结构表示的本软件系统的主要模块.

### 3.4 系统应用实例及结果分析

应用本系统对云南烟草机械厂提供的平面凸轮进行了反求,在此仅对其中一个凸轮的测量数据及反求结果进行分析.

测量时以该凸轮的设计基准(安装孔)为测量基准,圆周上每隔 0.5 度读取一个测量点,共得到 720 组测量数据(数据过多从略).用本软件在这些点中分别选取 6 个点、12 个点、18 个点、36 个点、45 个点、60 个点、72 个点、90 个点及 180 个点,并分别用三次均匀  $B$  样条曲线直接插值,三次均匀  $B$  样条等距曲线插

值及三次均匀  $B_3$  样条曲线直接插值三种方法进行反求. 反求后的误差值由表 1 列出.

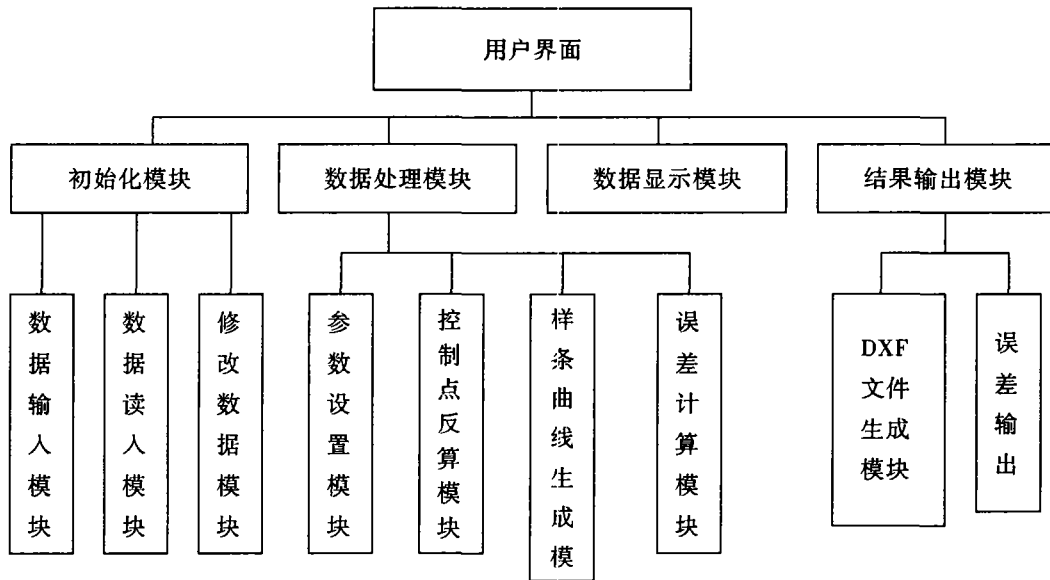


图2 系统的主要模块  
Fig.2 The main models of cars 1.0 system

表 1 反求误差

Tab.1 The reverse error using the inicial data measured

单位:mm

取点数	三次均匀 $B$ 样条曲线直接插值				三次均匀 $B$ 样条等距曲线插值				三次均匀 $B_3$ 样条曲线直接插值			
	最大误差	最小误差	平均误差	均方根	最大误差	最小误差	平均误差	均方根	最大误差	最小误差	平均误差	均方根
6	16.506	5.349 0	10.857	11.655	18.550	4.875	11.112	11.957	18.625	4.997 0	11.183	12.006
12	2.475 0	0.469 2	1.144 0	1.249 8	1.701 2	0.646 6	1.163 9	1.227 9	1.749 0	0.733 6	1.216 8	1.277 8
18	0.420 4	0.089 6	0.247 6	0.269 2	0.444 6	0.033 5	0.170 8	0.200 3	0.434 7	0.045 6	0.172 9	0.201 9
36	0.148 8	0.005 0	0.058 6	0.068 7	0.067 5	0.001 6	0.012 6	0.018 2	0.069 6	0.001 2	0.013 2	0.018 7
45	0.097 2	0.004 1	0.038 6	0.044 8	0.036 2	0.000 7	0.006 2	0.009 8	0.033 6	0.000 8	0.006 0	0.009 2
60	0.051 4	0.001 8	0.021 4	0.025 1	0.016 3	0.000 1	0.003 4	0.004 5	0.017 6	0.000 2	0.002 9	0.004 3
72	0.095 4	0.001 0	0.017 9	0.023 9	0.097 9	0.000 1	0.006 7	0.015 7	0.097 4	0.000 2	0.005 4	0.014 8
90	0.026 5	0.000 4	0.000 9	0.011 8	0.019 7	0.000 4	0.002 8	0.004 3	0.021 7	0.000 1	0.002 5	0.004 1
180	0.087 1	0.000 0	0.003 4	0.007 4	0.085 7	0.000 0	0.003 2	0.087 1	0.085 7	0.000 0	0.000 2	0.006 7

由表中数据可以得出以下结论:

1) 反求误差与取点数关系很大. 随着采样点数的增加, 曲线与原轮廓形状的吻合程度增加. 对误差数据的分析可知, 36 个采样点已经可以保证足够的精度.

2) 从所选取的反求计算方法而言,  $B_3$  样条的逼近程度最高, 等距曲线次之, 利用  $B$  样条直接反求的精度最低.

3) 选取采样点时若选到了坏点, 则会产生很大的误差, 尤其是最大误差很大. 上述实例中采用 72 个采样点和 180 个采样点时, 出现了坏点. 对分析到的坏点进行修改后, 误差减小了很多, 如表 2 所示.

表 2 修改坏点后的反求误差

Tab.2 The reverse error after the bad points modified

单位:mm

取点数	三次均匀 $B$ 样条曲线直接插值				三次均匀 $B$ 样条等距曲线插值				三次均匀 $B_3$ 样条曲线直接插值			
	最大误差	最小误差	平均误差	均方根	最大误差	最小误差	平均误差	均方根	最大误差	最小误差	平均误差	均方根
72	0.097 4	0.000 2	0.005 4	0.014 8	0.097 9	0.000 1	0.006 7	0.015 7	0.097 4	0.001 0	0.017 9	0.023 9
180	0.010 8	0.000 0	0.002 9	0.003 5	0.010 3	0.000 0	0.002 1	0.002 6	0.009 2	0.000 0	0.001 5	0.002 1

4) 判断重构精度不能只看最大误差,而要把最大误差和平均误差、均方根偏差结合起来进行分析.在最大误差小于允许误差的情况下,平均误差和均方根偏差低的算法重构精度最高.

5) 由于本软件可以进行重构精度的计算和误差的输出,可以用于对有精度要求的曲线、柱状面及凸轮零件的重构.

#### 参考文献:

- [1] 朱心雄.曲线与曲面重构技术[M].北京:科学出版社,2000.1.
- [2] 栗全晴,王宏,张英杰,赵汝嘉,等.实物反求工程的关键技术分析[J].机械设计,1999,6.
- [3] 李江雄,柯映林,程耀东.基于实物的复杂曲面产品反求工程中的CAD建模技术[J].中国机械工程,1999,(10):20~25.

(上接第32页)

其最佳工艺条件为: $Q_m = 3.61 \text{ L/min}$ ;  $S_m = 1.7 \text{ mm}^2$ ;  $H_m = 500 \text{ mm}$ ;  $r_m = 142.4 \text{ mm}$  或  $98.6 \text{ mm}$ .

## 4 结 论

由上述试验结果可得出以下结论:①底部供气量  $Q_m$  的增大能缩短熔池混合均匀时间  $\tau_m$ ,对熔池的搅拌有利.但增大的程度及极限等规律如何,还有待作进一步研究;②底喷枪位置  $r_m$  的增大对熔池的搅拌有利,特别是双底吹试验尤为明显.这表明两枪距越近,熔池的搅拌动能越易被相互抵消,但考虑到对炉壁的维护, $r_m$  也不能距炉壁太近;③熔池深度  $H_m$  和底喷枪通气面积  $S_m$  对熔池混合均匀时间  $\tau_m$  的影响不大,可不作为主要因素;④大于 100 t 的炉子,双底吹(或以上),其熔池混合均匀效果优于单底吹.

#### 参考文献:

- [1] 李宝宽.炼钢中的计算流体力学[M].北京:冶金工业出版社,1996.232.
- [2] 崔广心,相似理论与模型试验[M].徐州:中国矿业大学出版社,1989.31~45.