

齿轮及其刀具 制造的研究

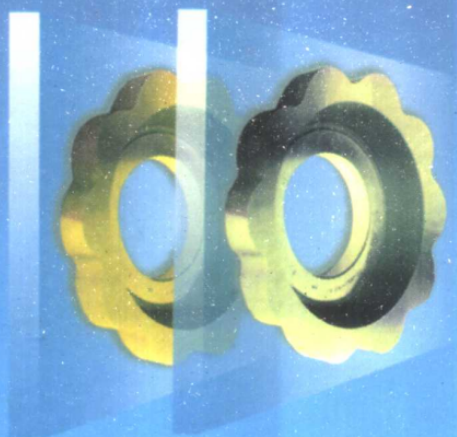
梁锡昌 邵 明 吉野英弘

李元元 周玉山 著



重庆大学出版社

CHILUNJIQIDAOJUZHIZAODEYANJIU



ISBN 7-5624-2323-7



9 787562 423232 >

ISBN 7-5624-2323-7/TH 81 定价:20.00 元



国家“九五”重点图书
《机械传动技术丛书》

齿轮及其刀具制造的研究

梁锡昌 邵 明 吉野英弘
李元元 周玉山 著

重庆大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

齿轮及其刀具制造的研究/梁锡昌等著. —重庆:重庆大学出版社, 2001. 8

(机械传动技术丛书)

ISBN 7-5624-2323-7

I. 齿... II. 梁... III. ①齿轮 - 机械制造 - 研究
②齿轮 - 机械制造 - 刀具 - 研究 IV. TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 030363 号

齿轮及其刀具制造的研究

梁锡昌 邵 明 吉野英弘 李元元 周玉山 著

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆电力印刷厂印刷

*

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 6 字数: 161 千

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1 - 2000

ISBN 7-5624-2323-7/TH · 81 定价: 20.00 元

前 言

本书介绍作者在齿轮成形磨齿技术和齿轮刀具制造技术方面的研究成果。在本书最后,简要介绍了近年齿轮制造技术的新进展。这些成果是作者在重庆大学以及在日本佐贺大学的研究总结。

成形磨齿与展成磨齿法相比,具有精度高和生产效率高的优点。近年来成形磨齿逐渐被公司所采用。逼近磨齿法具有设备简单的优势,在某些情况下,能获得较好的生产效果。对插齿刀逼近磨齿的研究,发展出一类特形插齿刀的设计和制造技术,以及特形插齿技术,解决了小退刀槽型面的加工难题,并发展出斜齿特形插齿刀。作者还采用现代专家系统、数值模拟,解决了齿轮滚刀、插齿刀的制造问题。

以上研究在齿轮制造技术方面有所发展。但鉴于作者水平所限,错误之处,敬请指正。

作者

2000 年 11 月 30 日

目 录

1 逼近磨齿技术	1
1.1 逼近加工原理	1
1.1.1 逼近加工曲线及曲线库	1
1.1.2 逼近加工曲线的调用及逼近方法	5
1.2 渐开线逼近磨齿法	9
1.2.1 基本原理	9
1.2.2 优化数学模型	11
1.2.3 优化计算流程	13
1.2.4 计算实例	15
1.3 成形磨齿精度	18
1.3.1 成形磨齿精度分析	18
1.3.2 金刚笔磨损对齿形精度的影响	25
2 CNC 成形磨齿技术	32
2.1 成形砂轮廓形计算方法	32
2.1.1 坐标系与坐标变换式	32
2.1.2 计算方法	34
2.1.3 计算实例	36
2.2 CNC 成形磨齿实例	37
2.2.1 CNC 成形磨齿机	37
2.2.2 砂轮修整方法	38
2.2.3 磨齿实验	40
2.3 提高磨齿精度的方法	41
2.3.1 齿形精度分析	41
2.3.2 磨齿误差补偿方法	44
2.4 修形齿轮 CNC 成形磨齿方法	47
2.4.1 成形磨削修形齿轮的附加运动	47
2.4.2 齿向修形齿轮的齿形计算方法	49
2.4.3 计算实例	50

2.4.4 修形齿面的等高线表示与实例	52
3 插齿刀逼近制造技术	55
3.1 曲线逼近制造法	55
3.1.1 方法原理	55
3.1.2 曲线逼近法制造外插齿刀	57
3.1.3 曲线逼近法制造内插齿刀	57
3.1.4 提高重磨精度的方法	58
3.2 曲面逼近制造法	60
3.2.1 方法原理	60
3.2.2 插齿刀侧后刀面的数值计算方法	62
3.2.3 逼近误差数值分析	64
3.2.4 插齿加工的数值模拟	66
3.2.5 计算实例	67
3.3 设计制作实例	70
3.3.1 插齿刀磨齿设备	70
3.3.2 插齿刀精度检验	71
3.3.3 插齿实验	71
4 插齿刀 CNC 成形磨齿制造技术	75
4.1 铲磨砂轮廓形计算方法	75
4.1.1 铲磨砂轮廓形计算	75
4.1.2 铲磨砂轮廓形验算	76
4.1.3 磨齿用软件系统	77
4.2 插齿刀刀刃计算方法	79
4.2.1 插齿刀的基准齿条	79
4.2.2 插齿刀刀刃计算	80
4.3 设计制作实例	82
4.3.1 计算实例	82
4.3.2 磨齿实验	83
4.3.3 插齿刀前刀面的磨削方法	87
4.3.4 插齿刀齿形测量方法	89
4.3.5 切齿实验	90
4.4 插齿刀重磨误差分析	92

4.4.1	分析方法	92
4.4.2	插齿刀重磨后的前刀面	92
4.4.3	重磨误差分析实例	93
4.4.4	插齿刀实际后角的计算方法	95
4.5	插齿刀重磨误差补偿技术	97
4.5.1	补偿原理	97
4.5.2	计算实例	98
4.5.3	磨齿实验	99
4.6	特形插齿刀的生产应用	100
5	滚刀 CNC 成形磨齿制造技术	107
5.1	滚齿过程的数值模拟	107
5.1.1	已知滚刀刃形计算滚切齿轮齿形	107
5.1.2	已知齿轮齿形计算滚刀刃形	109
5.1.3	计算实例	110
5.2	铲磨过程的数值模拟	112
5.2.1	铲磨砂轮廓形计算	112
5.2.2	铲磨出的滚刀齿形计算	114
5.2.3	滚刀的基准齿条齿形	115
5.2.4	设计制作实例	116
5.3	滚刀重磨误差分析	120
5.3.1	圆弧齿轮滚刀重磨误差分析	120
5.3.2	渐开线齿轮滚刀重磨误差分析	121
5.4	重磨误差补偿技术	122
5.4.1	补偿原理	122
5.4.2	计算实例	123
5.4.3	磨齿实验	126
5.5	指状砂轮滚刀铲磨技术	127
5.5.1	指状砂轮廓形计算	127
5.5.2	指状砂轮铲磨出的滚刀齿形计算	128
5.5.3	计算实例	129
5.5.4	磨齿实验	130
6	专家系统在齿轮刀具设计制造中的应用	132

6.1 特形插齿专家系统	132
6.1.1 特形插齿技术概述	132
6.1.2 特形插齿刀设计计算通式	133
6.1.3 特形插齿专家系统与开发应用	136
6.2 滚刀设计制造专家系统	142
6.2.1 系统开发策略	142
6.2.2 系统应用	144
7 齿轮制造新技术简介	148
7.1 齿轮加工技术新进展	148
7.1.1 滚齿加工技术的新进展	148
7.1.2 插齿加工技术的新进展	151
7.1.3 剃齿技术的新进展	152
7.2 机夹不重磨插齿刀	153
7.2.1 插齿刀结构与特点	153
7.2.2 应用实例	154
7.2.3 插齿刀非正常失效的原因与防止措施	155
7.3 内珩轮珩齿技术	158
7.3.1 加工原理	158
7.3.2 修整工具的设计制作	160
7.3.3 内珩轮	161
7.3.4 珩齿工艺	162
7.4 球面蜗杆砂轮磨齿技术	164
7.4.1 硬齿面齿轮精加工方法	164
7.4.2 球面蜗杆砂轮磨齿工艺	165
7.4.3 硬齿面齿轮精加工的经济分析	166
7.5 剃齿刀修形磨削用数控修整器	168
7.5.1 修形修整器工作原理	168
7.5.2 JWB 砂轮修整器的修形误差及其误差补偿技术	171
7.5.3 JWB 砂轮修整器控制系统的硬件及软件	177
后记	179
参考文献	180

1 逼近磨齿技术

1.1 逼近加工原理

逼近加工法是在计算机应用和计算数学发展的基础上创造出来的曲线逼近的通用加工方法。它是利用曲线的相互可逼近性,以简单运动生成的曲线去逼近加工各种曲线零件。

1.1.1 逼近加工曲线及曲线库

由于当装置的运动愈简单时,愈容易实现,而且可能达到的精度愈高,成本愈低,因此采用直线运动、圆运动、直线在圆上纯滚动等易实现的简单运动来生成各种形态的曲线。

1.1.1.1 一个直线运动生成双曲线族(包含直线)

如图 1-1a)所示,在坐标系 $o; x, y, z$ 中,点 P 在与 xoz 平面平行且与 $yo z$ 平面夹角为 α 的直线 MN 上作直线运动。矢量 $\vec{r} = (o, a, b)$, $MP = l$, 矢量 $\vec{l} = (l \sin \alpha, o, -l \cos \alpha)$, P 点的运动轨迹的矢量方程为

$$\vec{S} = \vec{S}(l) = \vec{r} + \vec{l} = (l \sin \alpha, a, b - l \cos \alpha) \quad (1-1)$$

将 $\vec{S}$ 绕 x 轴旋转 θ , 得双曲面方程

$$\begin{cases} x = l \sin \alpha \\ y = a \cos \theta - (b - l \cos \alpha) \sin \theta \\ z = a \sin \theta + (b - l \cos \alpha) \cos \theta \end{cases} \quad (1-2)$$

令 $z = 0$, 得 xoy 截面双曲线方程

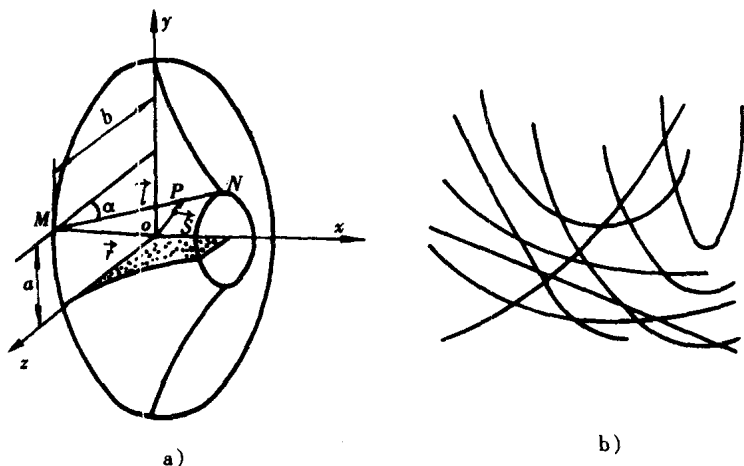


图 1-1 直线运动生成双曲线族示意图

a) 坐标系 b) 生成的双曲线族

$$y^2 - (b - x \cot \alpha)^2 - a^2 = 0 \quad (1-3)$$

写成标准形式

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{(x - b \tan \alpha)^2}{(a \tan \alpha)^2} = 1 \quad (1-4)$$

式中 a, b, α 为参数, x, y 为变量, 双曲线族图像如图 1-1b) 所示。

当 $a = 0$ 时, 式(1-3)可化为直线方程

$$y = -x \cot \alpha + b \quad (1-5)$$

1.1.1.2 一个圆运动生成扁圆族(包含圆)

如图 1-2a) 所示, 在坐标系 $o: x, y, z$ 中 P 点作圆运动的中心 o_1 为 (a, b, c) , 旋转轴线为坐标系 $o_1: x', y', z'$ 的 y' 轴, y' 轴与 y 轴的夹角为 τ 。两个坐标系的坐标转换为

$$\begin{cases} x = x' \cos \tau + y' \sin \tau + c \\ y = -x' \sin \tau + y' \cos \tau + a \\ z = z' + b \end{cases} \quad (1-6)$$

P 点在半径为 R 的空间圆弧 MN 上作圆运动, 绕其轴线 y' 轴顺时针转过 ε 角, 在坐标系 $o_1: x', y', z'$ 得 $x' = -R \sin \varepsilon, y' = 0, z' =$

上述 5 个参数, 可将扁圆变成各种形状曲线。

1.1.1.3 直线在基圆上作纯滚动生成广义渐开线(包含渐开线)

如图 1-3ε.) 所示, 基圆半径为 r_b , P 点与直线 MN 固联。当直线 MN 在基圆上作纯滚动时, P 点的轨迹为广义渐开线。

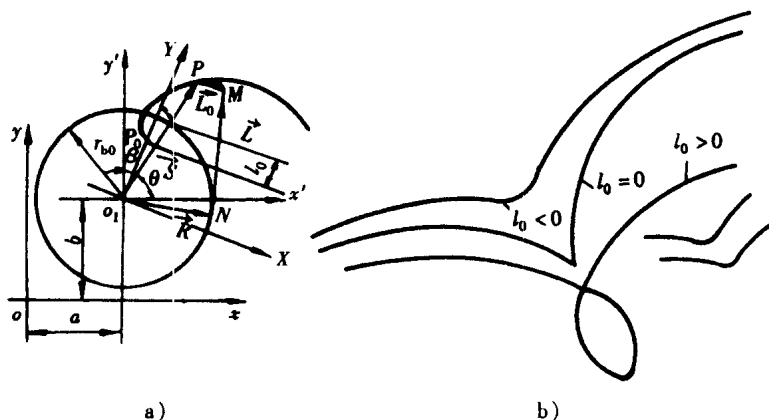


图 1-3 基圆上纯滚动生成广义渐开线族示意图

a) 坐标系 b) 生成的广义渐开线族

由图中可知, P 点在坐标系 XO_1Y 中运动轨迹的矢量方程为

$$\vec{S} = \vec{R} + \vec{L} + \vec{L}_0 \quad (1-11)$$

广义渐开线在坐标系 xoy 中的方程为

$$\begin{cases} x = (r_{b0} - l_0) \sin(\theta + \beta) - r_{b0} \theta \cos(\theta + \beta) + a \\ y = (r_{b0} - l_0) \cos(\theta + \beta) + r_{b0} \theta \sin(\theta + \beta) + b \end{cases} \quad (1-12)$$

化隐函数形式为

$$\begin{aligned} & y - (r_{b0} - l_0) \cos \left[\frac{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 - (r_{b0} - l_0)^2}}{r_{b0}} \right] - \\ & \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 - (r_{b0} - l_0)^2} \\ & \sin \left[\frac{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 - (r_{b0} - l_0)^2}}{r_{b0}} \right] - b = 0 \end{aligned} \quad (1-13)$$

当 $l_0 = 0$ 时, 方程为渐开线; 当 $l_0 > 0$ 时, 方程为长幅渐开线;

当 $l_0 < 0$ 时, 方程为短幅渐开线。如图 1-3b) 所示, 方程共有 r_{b0} , l_0, a, b, β 共 5 个参数。改变 r_{b0} 和 l_0 , 广义渐开线形状发生变化; 改变 a, b 和 β , 只是改变广义渐开线的位置。调节上述 5 个参数, 可得到各种广义渐开线。

综上所述, 由一种简单运动关系可建立一个曲线方程 $f(x, y) = 0$, 并代表着一族曲线。通过上述几种简单运动关系, 可产生各种形态的曲线, 存入计算机中, 建立起逼近加工曲线库。

1.1.2 逼近加工曲线的调用及逼近方法

1.1.2.1 工件曲线的单元处理

根据逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 的曲线形状特性, 首先将工件曲线 $g(x, y) = 0$ 单元化, 即把工件曲线划分为 n 个无拐点的曲率渐增曲线单元、曲率渐减曲线单元、曲率由渐增到渐减曲线单元、曲率由渐减到渐增曲线单元四种形式的曲线单元 $\phi_i(x, y) = 0$ ($i = 1, 2, \dots$), 然后将各工件曲线单元 $\phi_i(x, y)$ 逐段调用逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 进行曲线逼近。

1.1.2.2 曲线单元的可逼近性

当某逼近加工曲线族 $f(x, y) = 0$ 的某曲线单元与工件曲线单元 $\phi_i(x, y) = 0$ 的逼近误差小于误差要求时, 则可用这种逼近加工曲线族的这段曲线单元去逼近代替工件曲线单元。这就是曲线单元的可逼近性。例如, 采用直线运动修整装置生成的双曲线去逼近修整锥面砂轮磨齿机展成磨削鼓形齿轮的锥面砂轮齿形修形曲线, 又如, 采用圆运动修整装置生成的扁圆去逼近修整成型磨削齿轮的成型砂轮齿形曲线。

在各逼近加工曲线族中的各曲线单元之间也常存在相互可逼近性。如一段双曲线, 可能用一段扁圆, 或一段渐开线来逼近。而且, 同一族内的曲线单元之间也常存在可逼近性。如一段渐开线可由另一基圆生成的渐开线来逼近。

1.1.2.3 曲线单元的离散处理

在用逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 去逼近工件曲线单元

$\phi_i(x, y) = 0$ 时, 首先将这段工件曲线单元离散化为由 K 个点组成的坐标数组 $(x_j, y_j), j = 1, 2, \dots, K$ 。

1.1.2.4 逼近加工曲线的调用方法

(1) 逼近加工曲线的参数优化模型

已知工件曲线单元 $\phi_i(x, y) = 0$ 的曲线形状后, 可调用曲率变化趋势相近的曲线族 $f(x, y) = 0$ 来逼近, 并建立逼近加工曲线的参数优化模型为

$$\begin{cases} \text{目标函数 } S = E(X_1, X_2, \dots, X_l) \rightarrow \min \\ \text{约束条件 } a_i \leq X_i \leq b_i (i = 1, 2, \dots, l) \end{cases} \quad (1-14)$$

上式中, $S = E(X_1, X_2, \dots, X_l)$ 为曲线逼近评价误差构造的目标函数; $X_1, X_2, \dots, X_l$ 为逼近加工曲线调整参数的 l 个设计变量。对于双曲线逼近加工, 设计变量为式(1-4)中的三个调整参数 a, b, α ; 对于扁圆逼近加工, 设计变量为式(1-9)中的五个调整参数 R, a, b, c, τ ; 对于广义渐开线逼近加工, 设计变量为式(1-13)中的五个调整参数 r_{b0}, l_0, a, b, β 。约束条件 $a_i \leq X_i \leq b_i (i = 1, 2, \dots, l)$, 由逼近加工曲线产生装置的极限参数确定。

(2) 曲线逼近评价误差

设工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 上 i 点坐标为 (x_i, y_i) , 逼近加工曲线方程为 $f(x, y) = 0$ 。 $f(x, y) = 0$ 相对于 $\phi(x, y) = 0$ 的曲线逼近评价误差有以下四种表达方式:

1) 函数逼近误差 ε_{f_i}

当工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 上的点 (x_i, y_i) 在逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 上时, $f(x_i, y_i) = 0$; 否则, $f(x_i, y_i) \neq 0$ 。这时逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 相对于工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 在点 (x_i, y_i) 的函数逼近误差值为

$$|\varepsilon_{f_i}| = |f(x_i, y_i)| \quad (1-15)$$

2) x 向逼近误差 ε_{x_i}

将工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 上的点 (x_i, y_i) 的 y 坐标值 y_i 代入逼近加工曲线, 得

$$f(x, y_i) = 0 \quad (1-16)$$

上式的解为 x'_i , 则逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 相对于工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 在点 (x_i, y_i) 的 x 向逼近误差值为

$$|\varepsilon_{x_i}| = |x_i - x'_i| \quad (1-17)$$

3) y 向逼近误差 ε_{y_i}

将工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 上的点 (x_i, y_i) 的 x 坐标值 x_i 代入逼近加工曲线, 得

$$f(x_i, y) = 0 \quad (1-18)$$

上式的解为 y'_i , 则逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 相对于工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 在点 (x_i, y_i) 的 y 向逼近误差值为

$$|\varepsilon_{y_i}| = |y_i - y'_i| \quad (1-19)$$

4) 法向逼近误差 ε_{N_i}

工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 在点 (x_i, y_i) 处的法线方程为

$$y - y_i = \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} / \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) (x - x_i) \quad (1-20)$$

将上式与逼近加工曲线方程 $f(x, y) = 0$ 联立求解, 可得工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 在 (x_i, y_i) 处的法线与逼近加工曲线 $f(x, y) = 0$ 的交点 (x'_i, y'_i) , 则逼近加工曲线相对于工件曲线单元 $\phi(x, y) = 0$ 在点 (x_i, y_i) 处的法向逼近误差值为

$$|\varepsilon_{N_i}| = \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \quad (1-21)$$

x 向逼近误差 ε_{x_i} , y 向逼近误差 ε_{y_i} 和法向逼近误差 ε_{N_i} 的几何意义如图 1-4 所示。

(3) 构造曲线逼近评价误差目标函数的方法

设 ε_i 为四种逼近评价误差 ($\varepsilon_{f_i}, \varepsilon_{x_i}, \varepsilon_{y_i}, \varepsilon_{N_i}$) 中的任一种逼近误差。构造曲线逼近评价误差目标函数, 有以下几种方法:

1) 极大极小逼近

$$S = E(X_1, X_2, \dots, X_I) = \left\{ \max_{1 \leq i \leq K} |\varepsilon_i| \right\} \rightarrow \min \quad (1-22)$$

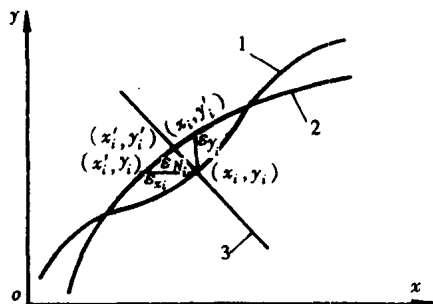


图 1-4 逼近误差的几何意义

1—工件曲线单元 2—逼近加工曲线 3—工件曲线上一点的法线

2) L_1 逼近

$$S = E(X_1, X_2, \dots, X_l) = \sum_{i=1}^K |\epsilon_i| \rightarrow \min \quad (1-23)$$

3) L_p 逼近

$$S = E(X_1, X_2, \dots, X_l) = \sum_{i=1}^K |\epsilon_i|^p \rightarrow \min \quad (1-24)$$

L_1 逼近把各点所有误差看成是等权的。极大极小逼近则只考虑最大误差值。对于 L_p 逼近, 由于出现了 P 次幂, 当 P 增大时, 最大误差值的作用越占优势。当 $P \rightarrow \infty$ 时, L_p 逼近趋于极大极小逼近之间的过渡。对于 $1 < P < \infty$, 当 $P = 2$ 时, L_2 逼近即为人们所熟悉的最小平方逼近。这时

$$S = E(X_1, X_2, \dots, X_l) = \sum_{i=1}^K |\epsilon_i|^2 \rightarrow \min \quad (1-25)$$

采用曲线逼近评价误差目标函数不同和逼近误差定义不同时, 会导致参数优化模型的解不同。

(4) 优化计算

由于曲线逼近评价误差目标函数很难直接求出一阶梯度和二阶梯度, 一般多采用只需求函数值的单纯形加速法、随机方向搜索法、可行方向法等数学优化方法进行优化计算, 解出逼近加工曲线发生装置的最优调整参数。