

齿顶全圆弧渐开线刀具的设计加工

唐清松

四川天虎工具有限责任公司

摘要: 以拉刀为例,介绍了齿顶全圆弧渐开线刀具设计原理及数控花键磨床砂轮修整器 CAM 软件的二次开发,实现了此类刀具的齿形磨削加工。

关键词: 渐开线;刀具;CAM 二次开发;VB

中图分类号: TG715;TH162

文献标志码: B

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.024

1 引言

近年来,为降低变速器齿轮噪声和提高齿轮强度,在重型汽车变速器齿轮中,采用加大渐开线齿轮齿顶/齿根(内外齿轮:外齿轮为齿顶,内齿轮为齿根)过渡曲线的圆角半径,甚至采用齿顶/齿根为全圆弧渐开线的齿轮愈来愈广泛,因此采用齿顶/齿根全圆弧渐开线的齿轮来提高齿轮强度也越来越受到重视。由文献[1]可知,刀具齿顶全圆弧渐开线齿轮刀具的设计及制造难点在于齿形轮廓的加工。

CAM(计算机辅助制造)技术在制造业中的普及,为机械制造提供了便捷经济、效率更高的解决相关问题的基础及条件,但国内外数控系统自带的CAM软件(如FAGOR 8055 伺服系统、Siemens 802C 数控系统及其配套CAM软件)都无法实现此类特殊轮廓的编程。本文以拉刀为例,对渐开线此类特殊情况的设计及加工进行分析,通过对相关数控花键磨床的CAM数控系统的二次开发,经济高效地解决了相关问题,为同类零件和刀具的加工提供了参考。

2 设计原理及软件的二次开发

以齿顶(外齿轮)全圆弧渐开线的圆柱齿轮或齿顶全圆弧渐开线花键拉刀设计加工为例。渐开线齿形结构及参数分别见图1和表1。

2.1 设计原理

代圆弧法:以渐开线为例,在设计一些复杂轮廓及不规则弧线轮廓时,为了方便设计和经济地加工出不规则弧线轮廓,通常把不规则弧线轮廓分成若干个弧线单元,不同的弧线单元采用对应的标准圆弧段来替代,把标准圆弧段与弧线单元之间的最大误差值控制在需要的范围内,误差值 $<0.0001\text{mm}$;

过渡圆弧:连接渐开线齿形部分基圆到齿根圆

(或齿顶圆)之间的圆弧,为了提高强度,减小应力集中采用圆滑的圆弧过渡,即齿顶或齿根圆弧;

三点定代圆弧:利用弧线单元的起始点和结束点的坐标及其弧线轮廓上任意点坐标,即可以确定已知平面上代圆弧的参数,理论计算控制误差值小于 0.0001mm 。

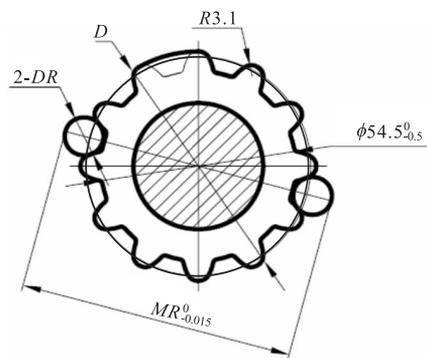


图1 渐开线齿顶圆弧结构

表1 渐开线参数

渐开线参数	实际计算参数	齿轮刀具取用参数	
模数 m	4.8846	4.8846	
齿数 z	12	12	
压力角 $\alpha(^{\circ})$	22.5	22.5	
齿顶高 $h_a=(h_a^*)m$	4.8846		
齿根高 $h_f=(h_a^*+c^*)m$	6.10575		
分度圆直径 $d=mz$	58.6152	58.6152	
齿顶圆直径 $d_a=d+2h_a$	68.3844	67.2(大径)	渐开线 $D=64.09$ +齿顶全圆弧
齿根圆直径 $d_f=d-2h_f$	46.4037	54.5(小径)	
基圆直径 $d_b=d\cos\alpha$	54.1534	54.1534	

2.2 CAM 软件的二次开发

以FAGOR 8055 伺服系统和Siemens 802C 伺服系统控制的数控花键磨床修形器的CAM软件为基础进行二次开发,选用VB6.0 编程软件作为开发工具。

(1) 齿顶全圆弧、渐开线以及倒角坐标计算
渐开线公式(极坐标公式)为

$$\operatorname{inv}\alpha = \tan\alpha - \alpha; r = r_b / \cos\alpha \quad (1)$$

式中, $\operatorname{inv}\alpha$ 为渐开线函数,也是渐开线展开角 θ (弧

度); α 为单位弧度,是渐开线上一点的压力角; r 为 α 点到基圆中心的距离; r_b 为基圆半径。

设计拉刀需要渐开线花键的轮廓,即齿顶全圆弧 R (点1-3)。点1为齿轮或刀具的大径和齿顶圆弧 R 的切点;点2为齿顶圆弧 R 段1-3之间的任意一点;点3为齿顶圆弧 R 和渐开线段起始点的切点,只需要上述3点就可以完全确定齿顶圆弧 R 段轮廓。渐开线齿轮或刀具的大径 R_3 为齿顶圆直径, R_2 为小径的渐开线段,可以分为任意 n 段。从拉刀的渐开线大径依次开始为 n 段的弧线单元,即 $2n+1$ 个节点。

倒角段轮廓:从拉刀的渐开线大径依次开始,以第 $2n+1$ 个节点为倒角段与渐开线段终点的交点,第 $2n+2$ 个节点为倒角段与渐开线齿轮或刀具底径 R_1 的交点,以此构成齿顶全圆弧渐开线齿轮或刀具的线形轮廓。

(2) 渐开线点坐标计算

计算渐开线的点坐标时,把渐开线平均分成 n 段,共 $2n+1$ 点。以第1齿底径的一半为基点,半径依次递加并循环,即可计算出渐开线所需点的坐标值。计算公式及VB编程主要代码如下:

```
'渐开线上 2n+1 个点的坐标计算
基圆半径 = 模数 * 齿数 / 2 * cos(压力角 / 180 * pi)
invad = tan(压力角 / 180 * pi) - 压力角 / 180 * pi
nb1 = pi / 齿数 - 弧齿厚 / (2 * 分度圆半径) - invad
渐开线高度 = 大径 / 2 - 基圆半径
ry = 大径 / 2 + 0.02
For i = 1 To 2 * 分段数 + 1
    ay(i) = Arccos(基圆半径 / ry)
    invay(i) = Tan[ay(i)] - ay(i)
    ny(i) = nb1 + invay(i)
    xx(i) = ry * Sin(ny(i))
    xy(i) = ry * Cos(ny(i))
    ry = ry - 渐开线高度 / (2 * 分段数)
Next i
cenxu = cenxu & "标准渐开线上点的坐标" & vbCrLf
Text1.Text = cenxu
```

(3) 计算齿顶全圆弧 R 的坐标

计算齿顶全圆弧 R (点1、2、3)坐标,已知 R 的齿顶全圆弧分别与齿轮或刀具的大径相切于点1。从拉刀的渐开线大径开始依次确定渐开线3个节点(点3、4、5)圆弧相切,计算出相关切点坐标。计算公式及VB编程主要代码如下:

```
Call 圆心坐标(xx(1), xy(1), xx(2), xy(2), xx(3), xy(3), yha1, yhb1)
'计算渐开线 1.2.3 点确定的圆心坐标
yhr1 = Sqr((xx(1) - yha1)^2 + (xy(1) - yhb1)^2)
```

```
Call 圆与两圆相内切的圆心坐标(0,0, 刀具大径/2, yha1, yhb1, yhr1, 齿顶圆弧 R, yha2, yhb2) 计算齿顶圆弧 R 的圆心坐标
```

```
yhr2 = Sqr((xx(1) - yha2)^2 + (xy(1) - yhb2)^2)
```

```
Call 两圆相内切的切点坐标(0,0, 刀具大径/2, yha2, yhb2, yhr2, yha3, yhb3)
```

```
'计算齿顶圆弧 R 与刀具大径的切点坐标
```

```
yha4 = (yha3 + xx(1)) / 2 '计算齿顶圆弧 R 中点的坐标
```

(4) 计算倒角段轮廓

计算倒角段轮廓($2n+1$ 和 $2n+2$ 点),以 $2n+1$ 点为倒角段与渐开线段的终点作交点, $2n+2$ 点为倒角段与渐开线齿轮(或刀具)的底径 R_1 到交点的坐标。计算倒角与刀具小径交点的坐标主程序为

```
cenxu = cenxu & "倒角与刀具小径交点的坐标" & vbCrLf
Text1.Text = cenxu
KK = Tan[(90 - 倒角半角) * pi / 180]
KC = xy(分段数 * 2 + 1) - KK * xx(分段数 * 2 + 1)
Call 直线与圆相交 y 值大的交点坐标(0,0, 刀具小径 / 2, KK, KC, aa, bb)
```

(5) 齿顶全圆弧渐开线齿轮或刀具的线形轮廓制作

在尺寸驱动的三维立体软件 Solidworks 等软件中,可以轻易作出1:1的齿顶全圆弧渐开线齿轮或刀具的线形轮廓,并验证相关交点坐标的正确性。关于点、线、圆等之间切点和交点等计算推导(圆上三点坐标计算圆心坐标、两个相交圆的圆心坐标及半径计算相交点 y 值坐标、圆与两圆相内切的圆心坐标等),可以根据相关关系联合直线方程以及圆方程求解,这里不再作详细推导。

圆与两圆相内切的圆心坐标 VB 程序如下:

```
Public Sub 圆与两圆相内切的圆心坐标(a1, b1, r1, a2, b2, r2, r3, a, b)
    k = (r1 - r3)^2 - (r2 - r3)^2 + a2^2 - a1^2 + b2^2 - b1^2
    k1 = k / (2 * a2 - 2 * a1)
    k2 = (2 * b2 - 2 * b1) / (2 * a2 - 2 * a1)
    k3 = k2^2 + 1
    k4 = 2 * a1 * k2 - 2 * k1 * k2 - 2 * b1
    k5 = k1^2 - 2 * a1 * k1 + a1^2 + b1^2 - (r1 - r3)^2
    'b = (-k4 - Sqr(k4^2 - 4 * k3 * k5)) / (2 * k3)
    b = (-k4 + Sqr(k4^2 - 4 * k3 * k5)) / (2 * k3)
    a = k1 - k2 * b
End Sub
```

(6) 砂轮修整器运动轨迹

以 FAGOR 8055 伺服系统控制的数控花键磨床修整器为例,对砂轮修整器的运动轨迹进行说明。一般来说,砂轮修整器的金刚笔修整器位于与工作台面砂轮加工工件成 90° 的水平位置,所以第一步应对上述相关参数做相应的坐标系旋转变换,可表示

为

$$\begin{aligned} X' &= X\cos\theta + Y\sin\theta \\ Y' &= Y\cos\theta - X\sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

由以上公式可以计算出所对应的齿顶全圆弧坐标点 + 渐开线坐标点 + 倒角轮廓上节点坐标。

(7) 计算砂轮修整器的金刚笔轨迹

由于砂轮修整器的金刚笔轨迹永远走该点直线或该点圆弧切线所垂直的法向,所以需计算金刚笔轨迹的相关坐标点及各点所在位置角度。因过3点可以确定圆的圆心坐标和计算半径,其中齿顶全圆弧 R 分别由左、右两个以点 1 为切点的左右圆弧组合而成。为了让齿顶全圆弧在点 1 形成光滑过渡的圆弧,在编程时需要作细节处理,以完善金刚笔轨的轨迹,此处不作更多说明。

(8) CAM 软件二次开发

由齿顶全圆弧 R (点 1、2、3) 坐标可以确定一个圆,结合不同的修整器控制代码和轨迹程序代码即可。修整器 CAM 软件的二次开发分为两部分:①计算齿顶全圆弧渐开线轮廓坐标点(齿顶全圆弧坐标点 + 渐开线坐标点 + 倒角坐标点),文中已作详细阐述;②根据齿顶全圆弧渐开线计算出轮廓坐标点,并结合不同的修整器控制代码和齿顶全圆弧段 + 渐开线段 + 倒角段轮廓上的节点坐标轨迹,通过计算机编程语言实现对修整器程序代码的二次开发,从而实现对齿顶全圆弧渐开线等刀具 CAM 软件的二次开发,完成此类刀具的齿形磨削加工。

考虑到程序的通用性,二次开发分为两部分。对于特殊的抬高后顶尖渐开线拉刀的加工和一般通用渐开线加工都可以实现。VB 编程的部分轨迹程序代码:

切线斜率(切线斜率为切点和圆心连线所在直线的垂直方向)

$$k1 = -(qx2 - ya) / (qy2 - yb)$$

$z1 = -\text{Abs}(\text{Atn}((qy2 - yb) / (qx2 - ya)))$ 计算金刚笔的其始角度

$z1 = \text{Format}(z1 * 180 / \text{pi}, "0.000")$ 把弧度转换成度数,其中/10 为机床默认设置当量

$$qz1 = -\text{Abs}(\text{Atn}((qy1 - yb) / (qx1 - ya)))$$

$$qz1 = \text{Format}(qz1 * 180 / \text{pi}, "0.000")$$

切线 $y = qy2 + 2'$ 沿切点外延 2mm 的 X 坐标

$$dc = qy2 - (k1 * qx2)$$

$$\text{切线 } x = ((\text{切线 } y) - dc) / k1$$

$$\text{切线 } x = \text{Format}(\text{切线 } x, "0.000")$$

$$\text{切线 } y = \text{Format}(\text{切线 } y, "0.000")$$

$$qx2 = \text{Format}(qx2, "0.000")$$

$$qx1 = \text{Format}(qx1, "0.000")$$

$$qy2 = \text{Format}(qy2, "0.000")$$

$$qy1 = \text{Format}(qy1, "0.000")$$

Text4.Text = Format(qy2 * 2, "0.000") 砂轮的最小理论所需厚度

If 砂轮宽 < 2 * qy2 Then'判断所选砂轮厚度是否满足要求

MsgBox "砂轮厚度过窄,请选择更厚的砂轮值",48,"错误"

Text8.SetFocus

Exit Sub

End If

cenxu = cenxu & vbCrLf & "N200" & "G0G90U" & Format(x(2 * 分段 + 2) + 2, "0.000") & "F1200"

金刚笔快速起定刀点,最右边

cenxu = cenxu & vbCrLf & "" & "V" & 砂轮宽 / 2 + 1 & "C" & - z1

切入点角度

cenxu = cenxu & vbCrLf & "" & "G41U" & 切线 x & "V" & 切线 y

cenxu = cenxu & vbCrLf & "" & "G1U" & qx2 & "V" & qy2

把 VB 程序运算生成的指令代码转换存为系统可以识别的文本格式,一般数控系统为 txt 文本,并上传至数控机床系统。

3 结语

通过对齿顶全圆弧渐开线齿轮和刀具设计原理及数控花键磨床 CAM 软件的二次开发,可以快速完成设计,并充分利用现有设备以经济的加工方式实现产品齿形磨削关键工序的加工。以此类推,可以实现更多此类特殊轮廓及复杂形面的设计和加工。

参考文献

- [1] 庄中. 齿顶整圆弧滚刀的应用和设计[J]. 汽车工艺与材料, 2005(8): 22 - 25.
- [2] 汝元功, 唐照民. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [3] 沈守范. 反渐开线函数的综合解算法[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [4] 孙靖民. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [5] 江洪, 李仲兴, 邢启恩. SolidWorks 2003 二次开发基础与实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

作者: 唐清松, 工程师, 四川天虎工具有限责任公司, 641400 成都市

Author: Tang Qingsong, Engineer, Sichuan Tian Hu Tools Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 641400, China