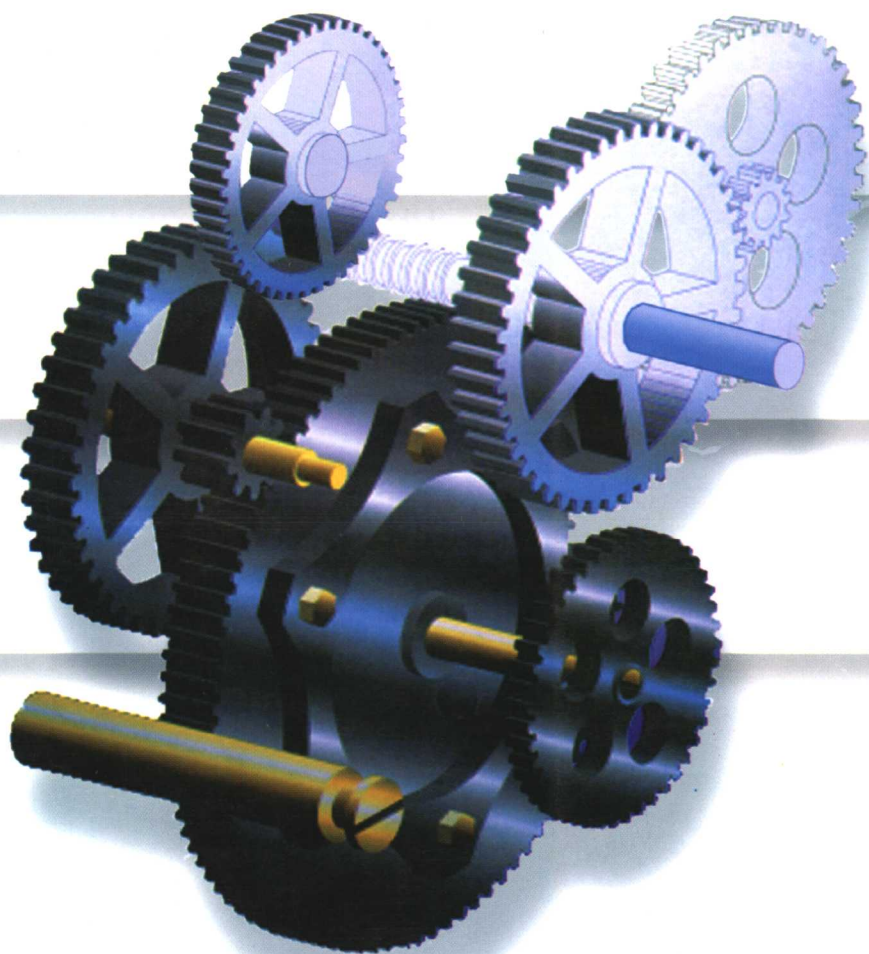


插切齿轮传动设计及 封闭图CAD数模分析

汪 萍 侯慕英 著



中国地质大学出版社

插切齿轮传动设计及 封闭图 CAD 数模分析

汪 萍 侯慕英 著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书根据机械制造业中广泛使用插齿刀加工渐开线齿轮的实际情况,系统地论述了插切计算系统的基本理论、外啮合和内啮合插切齿轮传动的设计方法和计算公式,详细地介绍了建立外啮合和内啮合插切齿轮传动变位系数封闭图所依据的数学模型,并作了必要的分析。书中还列出了一定数量的计算例题,供读者理解相关理论和进行设计计算时参考。

本书的主要读者对象是从事齿轮传动设计、制造和研究的设计师、工艺师、科研人员和高等工科院校机械工程类各专业的教师、研究生和本科生。

图书在版编目(CIP)数据

插切齿轮传动设计及封闭图 CAD 数模分析/汪萍,侯慕英著. —武汉:中国地质大学出版社, 2001. 3

ISBN 7-5625-1613-8

I. 插…

II. ①汪…②侯…

III. ①齿轮传动设计-插切计算②CAD 数模分析-封闭图

IV. TH132

插切齿轮传动设计及封闭图 CAD 数模分析

汪 萍 侯慕英 著

责任编辑:方 菊

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 31 号)

邮编:430074

电话:(027)87483101

传真:87481537 E-mail:cbo@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:330 千字 印张:12.875

版次:2001 年 3 月第 1 版

印次:2001 年 3 月第 1 次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 7-5625-1613-8/TH·10

定价:20.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

本书出版受华夏英才基金支持

前 言

众所周知,机械制造业中大量的 6~8 级精度的渐开线齿轮,大多是用滚刀和插齿刀切制而成的。研究表明,两种切齿工艺加工所得的渐开线齿轮,其齿廓曲线的几何形状和各部分尺寸并不完全一致。但是,目前在外啮合渐开线齿轮传动几何设计中的尺寸计算,不论采用滚切工艺或插切工艺,往往都使用依据滚切工艺建立起来的计算公式。实际上,用插齿刀加工的齿轮,其齿根圆、齿顶圆、齿根部过渡曲线与渐开线衔接点的位置等诸多几何因素,均与用滚刀加工的齿轮有很大的差异。如果将滚切齿轮的计算公式应用于插切齿轮的设计,不仅设计上不合理,有时会在齿轮传动中出现某些不容忽视的问题。

进一步的研究还表明,用插齿刀加工得到的一对外啮合齿轮,由于它有不同于滚切齿轮的几何特性,可以使其变位系数封闭图的闭廓许用区域有很大的扩展,特别是在正变位的区域。齿轮变位系数的增大,无疑会提高传动中的齿面接触强度和齿根弯曲强度,或者说在同样的载荷情况下有利于传动尺寸的减小,使传动装置的结构更为紧凑。另外,变位系数选择区域的扩大,还可以在齿数、模数不变的条件下,使传动中心距可变动范围拓宽,从而能更好地适应设计传动装置时所提出的特定中心距要求。因此,建立与插切工艺相一致的外啮合齿轮变位系数封闭图也是齿轮设计工作者需要解决的一个问题。

对于内啮合渐开线齿轮传动中的内齿轮,目前都是采用插齿刀进行切齿的,所以就更应该使用依据插切理论所建立的计算公式进行传动设计,并建立与之相适应的变位系数封闭图,以供选择变位系数之用。

鉴于前述理由,根据插切工艺的实际情况,阐述和分析与之相一致的插切齿轮几何设计理论是十分必要的。依据这一理论对插切齿轮进行传动设计和建立变位系数封闭图,不仅可以得到与生产实际相一致的正确设计结果,而且还有利于设计出性能更为优良的齿轮传动。本书将这种与插齿刀加工齿轮工艺相一致的渐开线齿轮设计理论称为插切计算系统。

本书是在前人所著文献的基础上,结合作者多年来的研究成果和指导硕士研究生的研究工作加以总结编写而成的。为保持设计理论和设计计算公式的完整性和系统性,本书适度地纳入了已有文献的研究成果。本书的主要内容是阐述插切计算系统的基本理论、插切齿轮传动的几何设计,以及建立插切齿轮传动变位系数封闭图所依据的 CAD(计算机辅助设计)数学模型,并对插切齿轮在切齿过程中的根切、顶切和传动中的各种干涉及质量指标作了必要的分析。

作者所指导的硕士研究生周双林、刘伟,已分别初步成功地研制出了插切外啮合、插切内啮合渐开线齿轮变位系数封闭图绘制和传动几何设计的 CAD 应用软件,这种软件可在渐开线变位齿轮传动设计工作中使用。

本书的第一、五、六章由汪萍编写,第二、三、四章由侯慕英编写。由于作者水平所限,缺点和疏漏之处在所难免,诚请各位读者批评指正。

汪 萍 侯慕英

2001 年 1 月于呼和浩特

主要符号说明

a	标准中心距
a'	齿轮传动中心距
a'_0	插齿刀加工齿轮时的切削中心距
a'_{01}, a'_{02}	插齿刀加工齿轮 1, 2 时的切削中心距(外啮合中, 1 指小齿轮, 2 指大齿轮; 内啮合中, 1 指外齿轮, 2 指内齿轮。下同。)
b_0	新插齿刀前端面距零截面的高度
b	插齿刀任意切削截面距零截面的高度
B	新插齿刀的厚度
c	齿轮传动中的顶隙
c^*	标准顶隙系数
d_1, d_2	齿轮 1, 2 的分度圆直径
d'_1, d'_2	齿轮 1, 2 的节圆直径
d_{a1}, d_{a2}	齿轮 1, 2 的齿顶圆直径
d_{f1}, d_{f2}	齿轮 1, 2 的齿根圆直径
d_{b1}, d_{b2}	齿轮 1, 2 的基圆直径
d_0	插齿刀分度圆直径
d_{a0}	插齿刀切削截面的齿顶圆直径
d'_{a0}	考虑到插齿刀刀齿有顶刃圆角时的计算齿顶圆直径
d'_{a01}, d'_{a02}	加工齿轮 1, 2 所用插齿刀有顶刃圆角时的计算齿顶圆直径
d_{b0}	加工齿轮所用插齿刀的基圆直径
d_{a01}, d_{a02}	加工齿轮 1, 2 所用插齿刀切削截面的齿顶圆直径
d_{f0}	插齿刀齿根圆直径
d_p	测量内齿轮跨棒距时所用量棒或量球直径
d_M	测量内齿轮跨棒距时量柱或量球中心所在圆的直径
e	齿轮分度圆齿槽宽
e'	齿轮节圆齿槽宽
e_1, e_2	齿轮 1, 2 的分度圆齿槽宽
e'_1, e'_2	齿轮 1, 2 的节圆齿槽宽
h_a	齿轮齿顶高
h_f	齿轮齿根高
h	全齿高
h^0	用零截面插齿刀加工标准传动齿轮的全齿高
h_a^*	标准齿顶高系数, $h_a^* = 1.0$
$h_a^{*'} $	非标准齿顶高系数
h_{a0}	插齿刀齿顶高

h_{a0}^*	插齿刀的齿顶高系数, $h_{a0}^*=1.25$ 或 1.30
h_{a01}^*, h_{a02}^*	加工齿轮 1, 2 时所用插齿刀的齿顶高系数
$\bar{h}_{c1}, \bar{h}_{c2}$	齿轮 1, 2 的固定弦齿高
k	测量外齿轮公法线长度时的跨测齿数
m	齿轮模数
M	内齿轮的跨棒距
p	齿轮的分度圆齿距
p'	齿轮的节圆齿距
p_b	齿轮的基圆齿距
r_1, r_2	齿轮 1, 2 的分度圆半径
r_1', r_2'	齿轮 1, 2 的节圆半径
r_{a1}, r_{a2}	齿轮 1, 2 的齿顶圆半径
r_{f1}, r_{f2}	齿轮 1, 2 的齿根圆半径
r_{b1}, r_{b2}	齿轮 1, 2 的基圆半径
r_0	插齿刀的分度圆半径
r_{a0}	插齿刀切削截面的齿顶圆半径
r_{a0}'	考虑到插齿刀刀齿有顶刃圆角时的计算齿顶圆半径
r_{a01}, r_{a02}	加工齿轮 1, 2 所用插齿刀切削截面的齿顶圆半径
r_{a01}', r_{a02}'	加工齿轮 1, 2 所用插齿刀有顶刃圆角时的计算齿顶圆半径
r_{b0}	插齿刀基圆半径
r_c	插齿刀刀齿的顶刃圆角半径
s_0	插齿刀分度圆齿厚
s_1, s_2	齿轮 1, 2 的分度圆齿厚
s_1', s_2'	齿轮 1, 2 的节圆齿厚
s_{a1}, s_{a2}	齿轮 1, 2 的齿顶圆齿厚
s_{a1}^*, s_{a2}^*	齿轮 1, 2 的齿顶厚系数
$\bar{s}_{c1}, \bar{s}_{c2}$	齿轮 1, 2 的固定弦齿厚
s_{a0}	插齿刀的齿顶厚
s_{f0}	插齿刀的齿根厚
u	齿数比, $u=z_2/z_1$
W	外齿轮的公法线长度
x_1, x_2	齿轮 1, 2 的变位系数
x_0	插齿刀切削截面的变位系数
x_{01}, x_{02}	加工齿轮 1, 2 所用插齿刀切削截面的变位系数
x_Σ	外啮合齿轮副的变位系数和或内啮合齿轮副的变位系数差 x_2-x_1
$x_{\min}$	插切齿轮不根切的最小变位系数
$x_{\min}^G$	滚切齿轮不根切的最小变位系数
y	齿轮传动的中心距变动系数
y_{01}, y_{02}	插齿刀加工齿轮 1, 2 时的切削中心距变动系数

Δy	齿轮副的齿高变动系数
z	齿数
z_1, z_2	齿轮 1, 2 的齿数
z_0	插齿刀的齿数
z_{01}, z_{02}	加工齿轮 1, 2 所用插齿刀的齿数
z_{Σ}	外啮合齿轮副的齿数和或内啮合齿轮副的齿数差 $z_2 - z_1$
$z_{\min}$	不根切的最少齿数
$z_{\min}^0$	用零截面插齿刀切削齿轮时不根切的最少齿数
z_J^D	用零截面插齿刀切削标准外齿轮不发生顶切的齿轮界限齿数, $z > z_J^D$ 时无顶切
α	齿轮分度圆压力角
α'	齿轮传动的啮合角
α'_0	插齿刀加工齿轮时的切削啮合角
$\alpha'_{01}, \alpha'_{02}$	插齿刀加工齿轮 1, 2 时的切削啮合角
α_{a1}, α_{a2}	齿轮 1, 2 的齿顶圆压力角
α_{a0}	插齿刀的齿顶圆压力角
α'_{a0}	插齿刀有顶刃圆角时的计算齿顶圆压力角
$\alpha_{a01}, \alpha_{a02}$	加工齿轮 1, 2 时所用插齿刀的齿顶圆压力角
α_e	插齿刀顶刃后角
α_{g1}, α_{g2}	齿轮 1, 2 齿廓曲线上过渡点的压力角
α_{g0}	插齿刀齿廓曲线上过渡点的压力角
α_{0t}	插齿刀基本构形中端截面齿形的分度圆压力角
α_{J1}	齿轮 1 有根切时, 渐开线与齿根过渡曲线交点 J 处的压力角
α_D	渐开线上齿廓工作段最低点的压力角
γ	插齿刀的前角
δ_1	节点进入偏小(外)齿轮齿顶部双齿啮合区的深度系数
δ_2	节点进入偏大(内)齿轮齿顶部双齿啮合区的深度系数
Δ_0	根切指数, $\Delta_0 \geq 0$ 无根切
Δ_D	顶切指数, $\Delta_D \geq 0$ 无顶切
Δ_g	过渡曲线干涉指数, $\Delta_g \geq 0$ 无干涉
Δ_1	节点处于啮合区之后的节点外啮合距离系数
Δ_2	节点处于啮合区之前的节点外啮合距离系数
ϵ	齿轮传动的重合度
η_1, η_2	齿轮 1, 2 的齿面滑动系数
θ	齿轮分度圆上的渐开线展角
θ_{a1}, θ_{a2}	齿轮 1, 2 在齿顶圆处的渐开线展角
ρ	渐开线齿廓的曲率半径
ψ_0	插切齿轮的齿根深切系数
ψ_{01}, ψ_{02}	插切齿轮 1, 2 的齿根深切系数
ω_1, ω_2	齿轮 1, 2 的角速度

目 录

第一章 引 论	(1)
1.1 插切齿轮传动设计及变位系数封闭图的研究概况	(1)
1.2 标准直齿插齿刀简介	(2)
1.2.1 盘形插齿刀	(3)
1.2.2 碗形插齿刀	(3)
1.2.3 锥柄插齿刀	(3)
1.3 插齿刀的齿形分析	(4)
1.3.1 插齿刀的基本构形	(4)
1.3.2 插齿刀的切削齿形	(5)
1.3.3 切削齿形变位系数的确定	(6)
1.3.4 插齿刀齿顶部的过渡圆角	(7)
1.3.5 插齿刀齿根部的渐开线起点位置	(8)
1.3.6 齿形分析的结论	(10)
1.4 通用标准插齿刀的主要参数和尺寸	(10)
1.5 插切齿轮变位系数的定义	(13)
1.5.1 插切齿轮变位系数的两种定义	(13)
1.5.2 内齿轮的变位系数与齿厚变化	(15)
1.5.3 两种变位系数定义的比较	(15)
第二章 外啮合插切齿轮传动的分析与设计	(18)
2.1 外啮合传动及切削啮合基本方程	(18)
2.1.1 外啮合传动的无侧隙啮合方程	(18)
2.1.2 外啮合传动中心距和中心距变动系数	(19)
2.1.3 插切外齿轮时的切削啮合角和中心距	(19)
2.2 插切外齿轮齿根圆尺寸与齿根深切系数	(20)
2.2.1 插切外齿轮的齿根圆尺寸	(20)
2.2.2 插切外齿轮的齿根深切系数	(20)
2.3 插切外齿轮的齿顶圆尺寸及齿高变动系数	(23)
2.3.1 插切外齿轮的齿顶圆尺寸	(23)
2.3.2 插切外齿轮的全齿高和齿高变动系数	(24)
2.4 外齿轮的齿厚测量尺寸计算	(25)
2.4.1 公法线长度与跨测齿数	(25)
2.4.2 固定弦齿厚与齿高	(26)
2.5 插切外啮合齿轮副的几何尺寸计算	(27)
2.5.1 插切齿轮时的切削啮合参数与尺寸	(27)
2.5.2 外啮合插切齿轮的传动参数与尺寸	(27)
2.5.3 齿轮副的参数与尺寸	(28)
2.6 外啮合插切齿轮传动设计计算举例	(28)

第三章 外啮合插切齿轮变位系数封闭图的数学模型	(32)
3.1 插切外齿轮的根切	(32)
3.1.1 插切外齿轮无根切条件	(33)
3.1.2 插切外齿轮不根切的最少齿数	(35)
3.1.3 插切外齿轮不根切的最小变位系数	(37)
3.1.4 插齿刀及齿轮各参数对 $x_{\min}$ 的影响	(38)
3.1.5 滚切与插切齿轮的根切比较	(40)
3.2 插切外齿轮的微量根切	(41)
3.2.1 外齿轮的微量根切条件	(42)
3.2.2 齿轮轮齿根部过渡曲线方程	(42)
3.2.3 齿轮齿廓渐开线方程	(47)
3.2.4 齿轮微量根切限制条件方程式	(47)
3.3 插切外齿轮的顶切	(48)
3.3.1 外齿轮不发生顶切的条件	(48)
3.3.2 对插齿刀界限齿数 z_{0g} 的讨论	(50)
3.3.3 插齿刀参数对齿轮顶切的影响	(50)
3.3.4 插切标准齿轮的顶切问题	(52)
3.4 插切齿轮齿顶厚系数	(54)
3.5 外啮合插切齿轮传动的重合度	(55)
3.5.1 插切外齿轮传动重合度特点	(55)
3.5.2 插切与滚切齿轮传动重合度的比较	(55)
3.6 插切外啮合齿轮的过渡曲线干涉	(56)
3.6.1 齿轮传动过渡曲线干涉现象	(56)
3.6.2 插切齿轮齿廓过渡点位置	(57)
3.6.3 齿廓工作段最低点位置	(58)
3.6.4 齿轮传动不干涉条件	(59)
3.6.5 插齿刀参数对过渡曲线干涉的影响	(60)
3.7 插切齿轮传动的滑动系数	(61)
3.7.1 齿廓滑动系数	(61)
3.7.2 最大滑动系数	(62)
3.7.3 等滑动系数方程	(63)
3.8 节点双齿啮合及节点外啮合	(63)
3.8.1 节点双齿啮合	(63)
3.8.2 节点外啮合	(66)
3.9 插切齿轮传动的等弯曲强度条件	(67)
3.9.1 齿根弯曲应力分析	(67)
3.9.2 插切外齿轮齿形系数的计算	(70)
3.9.3 轮齿等弯曲强度条件	(75)
3.9.4 有关参数对插切齿轮齿形系数的影响	(76)
3.9.5 插切与滚切齿轮齿形系数的比较	(78)
第四章 外啮合插切齿轮变位系数封闭图的分析与应用	(80)
4.1 插切齿轮变位系数封闭图的组成及图例	(80)

4.1.1	封闭图的限制曲线	(80)
4.1.2	封闭图中的质量指标曲线	(82)
4.1.3	插切齿轮变位系数封闭图图例	(83)
4.2	齿轮副和插齿刀参数对封闭图的影响	(84)
4.2.1	齿轮副齿数对封闭图形状的影响	(84)
4.2.2	插齿刀参数对封闭图的影响	(86)
4.3	插切与滚切齿轮变位系数封闭图的比较	(88)
4.4	插切外啮合齿轮变位系数封闭图的应用	(90)
4.4.1	用封闭图选择变位系数	(90)
4.4.2	变位系数方案的可行性与质量指标的校验	(93)
4.5	插切齿轮设计计算应用举例	(94)
第五章	内啮合插切齿轮传动的分析与设计	(98)
5.1	内啮合传动及切削啮合基本方程	(98)
5.1.1	内啮合传动的无侧隙啮合方程	(98)
5.1.2	内啮合传动的中心距和中心距变动系数	(99)
5.1.3	内啮合变位齿轮传动的三种类型	(100)
5.1.4	插切内齿轮时的啮合角和中心距	(101)
5.2	插切内齿轮的齿根圆尺寸	(101)
5.2.1	插切内齿轮的齿根圆尺寸计算	(101)
5.2.2	内齿轮齿根圆直径计算公式分析	(102)
5.3	插切内啮合齿轮副的齿顶圆尺寸及齿高变动系数	(104)
5.3.1	插切内啮合齿轮副的齿顶圆尺寸	(104)
5.3.2	插切内啮合齿轮副的全齿高与齿高变动系数	(105)
5.4	内齿轮的齿厚测量尺寸计算	(106)
5.4.1	内齿轮的跨棒距	(106)
5.4.2	内齿轮的固定弦齿厚及齿高	(108)
5.5	插切内啮合齿轮副的几何尺寸计算	(110)
5.5.1	切削啮合参数和尺寸的计算	(110)
5.5.2	内啮合传动参数和尺寸的计算	(110)
5.5.3	齿轮副参数和尺寸的计算	(111)
5.6	少齿差内啮合齿轮副尺寸计算的特点	(112)
5.7	插切内啮合齿轮传动设计举例	(113)
第六章	内啮合插切齿轮变位系数封闭图的数学模型与应用	(117)
6.1	内齿轮的刀根过渡曲线顶切	(118)
6.1.1	内齿轮产生刀根过渡曲线顶切的原因	(118)
6.1.2	内齿轮不发生刀根过渡曲线顶切的条件	(119)
6.1.3	关于渐开线顶切的讨论	(120)
6.1.4	计算举例	(121)
6.2	内齿轮的径向切入顶切	(122)
6.2.1	切削内齿轮时的径向切入顶切现象	(122)
6.2.2	范成运动中的两种运转状态	(122)
6.2.3	两种运转状态的综合分析	(126)

6.2.4	内齿轮径向切入顶切的验算	(128)
6.2.5	其他问题的讨论	(128)
6.2.6	计算举例	(130)
6.3	内齿轮的齿顶厚系数	(131)
6.3.1	内齿轮齿顶厚系数计算式	(131)
6.3.2	齿顶厚系数的界限曲线和指标曲线方程	(131)
6.3.3	计算举例	(132)
6.4	内啮合齿轮传动的重合度	(132)
6.4.1	内啮合传动的重合度计算式	(132)
6.4.2	传动重合度的界限曲线、指标曲线及其方程	(133)
6.4.3	计算举例	(133)
6.5	内啮合传动的过渡曲线干涉	(134)
6.5.1	内啮合传动过渡曲线干涉的产生原因	(134)
6.5.2	避免过渡曲线干涉的条件	(135)
6.5.3	过渡曲线干涉界限曲线及其方程	(139)
6.5.4	计算举例	(139)
6.6	内啮合传动中的齿廓重叠干涉	(142)
6.6.1	齿廓重叠干涉现象及其产生原因	(142)
6.6.2	避免齿廓重叠干涉的条件	(143)
6.6.3	齿廓重叠干涉界限曲线及其方程	(144)
6.6.4	计算举例	(145)
6.7	其他干涉及限制条件	(148)
6.7.1	径向安装干涉	(148)
6.7.2	对顶干涉	(152)
6.7.3	内齿轮齿顶部有渐开线的限制条件	(153)
6.7.4	关于零啮合角和负啮合角的讨论	(153)
6.8	滑动系数及等滑动系数曲线方程	(155)
6.8.1	齿廓内接触的滑动率	(155)
6.8.2	内啮合传动滑动系数计算与分析	(156)
6.8.3	齿根最大滑动系数的计算	(158)
6.8.4	等滑动系数方程式	(158)
6.8.5	计算举例	(159)
6.9	其他传动质量指标曲线	(161)
6.9.1	节点双齿啮合指标曲线	(161)
6.9.2	节点外啮合指标曲线	(166)
6.9.3	$\Delta y=0$ 的参考界限曲线	(168)
6.10	内啮合齿轮副变位系数封闭图的应用	(171)
6.10.1	变位系数封闭图的组成	(171)
6.10.2	齿轮和插齿刀参数对封闭图的影响	(174)
6.10.3	变位系数封闭图的使用方法	(178)
附录:渐开线函数表 $\text{inv}\alpha=\tan\alpha-\alpha$		(182)
参考文献		(192)

第一章 引 论

1.1 插切齿轮传动设计及变位系数封闭图的研究概况

渐开线齿轮的齿廓几何形状和各部分尺寸,显然与切削齿轮所用刀具的类型密切相关。就目前的齿轮加工工艺而言,以范成原理切削齿轮的刀具基本上分成两大类:齿条形刀具和齿轮形刀具。属于前一类的有滚刀、梳齿刀、磨削砂轮等;属于后一类的刀具有插齿刀、剃齿刀、珩磨轮等。对于应用最广的6~8级精度齿轮,则大多采用滚刀和插齿刀来完成最后的切削。由于滚刀和插齿刀的几何形状和某些参数的不同,使切削所得的齿轮几何尺寸以及齿廓的形状也并不完全一致。因此,从理论上讲,渐开线齿轮传动的几何设计应该按照与所用切削刀具类型相一致的计算公式进行计算,这就产生了渐开线齿轮传动设计的两种计算系统:滚切计算系统和插切计算系统。

插切计算系统的问题,最早是由前苏联的科学家 В. А. Гавриленко 首先提出来的。他在1962年由前苏联的机械工业出版社出版的《机械制造业中的齿轮传动》一书中^[15],用四章的篇幅,较为详细地论述了用插齿刀加工内、外齿轮时的切削啮合关系和插切齿轮传动设计的一些基本问题。但由于该书对插切齿轮变位系数采用了基齿轮制的定义而致使传动设计的公式显得相当复杂。在国内,关于渐开线插切齿轮传动设计的理论,从1978年以后,在陆续发表的论文和某些著作中有所论述。汪萍等^①首先较为系统地结合我国当时的实际情况论述了渐开线插切齿轮计算系统的设计原理,并对某些问题做了较为深入的研究。随后汪萍(1980)^[7]又对外啮合的渐开线插切齿轮的几何特性作了详细的分析。该论文的分析结果明确指出,若采用插齿切削的计算系统对外啮合变位齿轮传动进行设计,可以明显地扩大变位系数的选择范围,从而能够满意地解决某些齿轮变速箱中所要求的大变位齿轮的设计问题,并因而大幅度地提高齿轮传动的强度和耐磨性指标。西北工业大学机械原理及机械零件教研组编写的《机械设计》是当时在全国高等学校中普遍使用的教材之一,其中也简略地介绍了应用插切计算系统原理对插切齿轮传动进行设计的一些基本问题。

与插切计算系统问题提出来的同时,有关建立插切齿轮变位系数封闭图的论著也开始问世。1960年,前苏联科学家 Т. П. Болотовская 等人在1960年 NO. 5 的高等学校通报《机械制造》卷上发表了题为“关于用插齿刀加工的外啮合齿轮变位系数的选择问题”的论文。随后于1963年由 Т. П. Болотовская 撰写的另一著作《渐开线齿轮与蜗轮传动几何设计手册》中,发表了插切齿轮传动的若干幅变位系数封闭图,国内于1982年出版的由朱景梓主编的《渐开线齿轮变位系数的选择》中也引用了这些封闭图。

这些变位系数封闭图,虽然对插切齿轮变位系数的选择起到了方法上的启迪和使用上的

^① 汪萍,侯慕英,仇铎伯,1978,渐开线插切齿轮计算系统设计原理,中国机械工程学会第二届机械传动学术年会论文。

指导作用,但它却存在有许多不足之处。首先,由于当时个人计算机(PC机)尚未出现,计算机的使用面很窄,不可能研制出供广大设计人员应用的计算机软件,而仅是对用数种插齿刀齿数切削加工的某些齿轮齿数组合,绘制了数量极为有限的变位系数封闭图,这是远远不能满足插切齿轮传动设计需要的。其次,这些封闭图都是在使用新插齿刀加工出来的齿轮几何尺寸的基础上绘制的,不能反映出用任意刃磨程度旧插齿刀加工时齿轮变位系数封闭图的变化情况,并且有些限制曲线仍是在滚切计算系统前提下绘制的。第三,利用这些封闭图只能大致地在给定的许用范围内选择合理的变位系数方案,但对该方案的各项具体传动质量指标的数值还需要用手工来进行计算,不能有效地提高设计人员的工作效率。第四,对绘制这些封闭图的数学模型缺乏系统、完整的分析和描述。另外,这些封闭图所用的插齿刀规格和某些参数标准已经不能满足当代我国的使用要求。

针对上述指出的已有封闭图的不足,国内又围绕这些问题做了许多进一步的研究。汪萍等^①在国内首先提出了用电子计算机研究外啮合渐开线插切齿轮的几何设计和封闭图,该论文初步研究了建立封闭图所需的相关数学模型,并提供了计算机程序。李华敏等(1985);杨兰春(1995)都对插切外啮合和内啮合齿轮传动设计的有关问题做了较为详细的阐述。近年来,作者的研究生在作者的指导下,对插切齿轮外啮合和内啮合传动变位系数封闭图的计算机辅助设计通用软件的研究,做了大量的、细致的工作^{②③}。这些论文不仅较为系统地阐述了插切齿轮传动设计的基本理论以及建立变位系数封闭图的数学模型,而且根据我国的直齿插齿刀国家标准研制了实用的CAD软件。该软件一方面可以满足用封闭图法选择合理变位系数的要求,另一方面在此基础上可同时进行啮合齿轮副的传动设计和计算它的传动质量指标数值,设计人员可在很短的时间内获得一个满意的设计结果。另外,对于外啮合插切齿轮传动,还能将设计的结果在计算机屏幕上显示其运动的模拟图形,使设计者对设计结果和将来制造出来以后的啮合运转状况有一个一目了然的了解。这些研究成果,使复杂的插切齿轮传动设计工作变得简便易行,因而有利于插切计算系统在广大齿轮设计人员中推广使用。本书正是在这些研究成果的基础上编写而成的。

本书是围绕以插齿刀切削得到的齿轮为对象来讨论齿轮副的传动设计和变位系数封闭图的建立等问题,因此有必要首先对插齿刀的基本形式、几何特性和插齿刀规格等一些知识作简要的介绍。本章以下各节就叙述这些内容。

1.2 标准直齿插齿刀简介

插齿刀是按范成原理加工圆柱齿轮的一种齿轮形切削刀具。它可分成两大类:一类是用以加工直齿圆柱齿轮的直齿插齿刀;另一类是用以加工斜齿圆柱齿轮的斜齿插齿刀。因本书只讨论直齿的插切齿轮,所以下面仅介绍通用直齿插齿刀。另外,模数 $m=0.1\sim1.0\text{mm}$ 的小模数插齿刀不列入本书讨论范围之内,因其标准另有第一机械工业部制定的JB3095-82所规定。

国家标准GB6081-85规定的直齿插齿刀,基本形式分为三种:盘形直齿插齿刀(I型),

① 汪萍,侯慕英,1978(6),用电子计算机研究外啮合渐开线插切齿轮的几何设计与封闭图,内蒙古工学院学术论文专刊。

② 周双林,1998,插切外啮合变位齿轮变位系数封闭图CAD,内蒙古工业大学硕士学位论文。

③ 刘伟,2000,内啮合渐开线齿轮变位系数封闭图CAD研究,内蒙古工业大学硕士学位论文。

碗形直齿插齿刀(Ⅱ型),锥柄直齿插齿刀(Ⅲ型)。模数范围为 $m=1.0\sim 12\text{mm}$ 。

1.2.1 盘形插齿刀

盘形插齿刀的结构形状见图 1.1(a)。它主要用于加工外齿直齿圆柱齿轮、大直径的内齿直齿圆柱齿轮和齿条等。公称分度圆直径有 75、100、125、160 和 200mm 五种,模数范围为 $m=1\sim 12\text{mm}$ 。按标准制定的原则规定,公称分度圆直径为 75、100 和 125mm 的盘形插齿刀用于加工外齿轮,公称分度圆直径为 160 和 200mm 的盘形插齿刀加工大直径的内齿轮(《齿轮手册》,1994)。不同的公称分度圆直径对应有不同的模数范围。分度圆直径较小的盘形插齿刀,模数在较小的区段;反之,则模数在较大的区段。具体的数据参阅本章第 1.4 节所列的表 1.2。

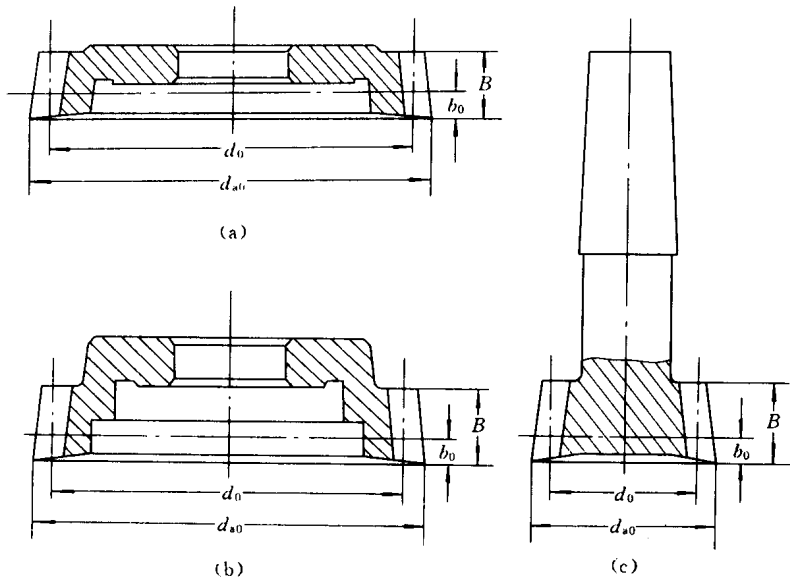


图 1.1 直齿插齿刀的基本形式

1.2.2 碗形插齿刀

碗形插齿刀的结构形状见图 1.1(b)。它与盘形插齿刀相比较,在结构上的特点是可使夹紧刀具的螺母容纳在刀体的内凹空穴内。当加工齿轮时,可使紧固刀具的螺母不会碰撞到齿轮零件的其他实体部分,因此常用来加工带有凸肩的齿轮、双联或多联的齿轮块零件等。碗形插齿刀当然也可以用来加工盘形插齿刀能加工的各种齿轮。碗形插齿刀的公称分度圆直径有 50、75、100 和 125mm 四种,模数范围为 $m=1.0\sim 8.0\text{mm}$ 。原则规定,公称分度圆直径为 50、75mm 两种插齿刀用于加工内齿轮,而直径为 100、125mm 两种用于插切外齿轮。

1.2.3 锥柄插齿刀

锥柄插齿刀的结构形状参看图 1.1(c)。它主要用于加工内齿轮,靠尾部的 2 号或 3 号莫氏短圆锥的锥柄部紧固在机床的主轴上。锥柄插齿刀的公称分度圆直径仅有 25 和 38mm 两种,前者的模数范围为 $m=1.0\sim 2.75\text{mm}$,后者的模数范围为 $m=1.0\sim 3.75\text{mm}$ 。

通用直齿插齿刀的精度分为三种等级:AA 级、A 级和 B 级。AA 级插齿刀用于切削精度为 6 级或 7-6-6 级的齿轮,A 级插齿刀用于加工 7 级或 8-7-7 级齿轮,B 级插齿刀为加工 8

级齿轮。锥柄插齿刀只有 A、B 两种精度等级。

1.3 插齿刀的齿形分析

1.3.1 插齿刀的基本构形

插齿刀的基本构形如图 1.2 所示。为了使插齿刀在切削齿轮时具有顶刃后角 α_e 和侧刃后角,在垂直于插齿刀轴线的各截面(以下称端截面)内,刀具的齿形是一系列变位系数连续变化的变位齿轮的齿形。在刀具最前面的端截面(以下称前端面)中,变位系数最大,故分度圆弧齿厚和齿顶圆直径都为最大。当端截面由前端面逐渐移向后端面时,则其变位系数逐渐变小,于是其分度圆弧齿厚和齿顶圆直径也不断地减小,这就必然地形成了插齿刀的顶刃后角和侧刃后角。

在我国的标准中,新插齿刀在前端面内的变位系数,除了表 1.2 和表 1.4 中有 $b_0=0$ 的三种规格插齿刀为零以外,其余都为正值,后端面的变位系数均为负值。所以,在前、后两端面之间必然有一个刀具变位系数 $x_0=0$ 的截面,这个截面称为插齿刀的原始截面,也称为零截面,如图 1.2 中所示的 0—0 截面。

在原始截面中,插齿刀刀齿的齿形类同于一个标准渐开线直齿圆柱齿轮的齿形,其差别主要是插齿刀刀齿的齿顶高系数 h_{a0}^* 大于标准齿轮轮齿的齿顶高系数 h_a^* ,这是为切削出被切齿轮应有的齿根高所必须的,另一个差别是插齿刀刀齿的齿顶部可能有过渡圆角。在 GB6081—85 中规定的插齿刀齿顶高系数有 $h_{a0}^*=1.25$ 和 1.30 两种,其中 $h_{a0}^*=1.30$ 只用于公称分度圆直径为 100mm、模数 $m \geq 4.5\text{mm}$ 以及公称分度圆直径为 125mm 的盘形和碗形插齿刀。

在原始截面中,插齿刀的尺寸计算式为

$$\begin{aligned} \text{分度圆齿厚} \quad s_0 &= \frac{1}{2} \pi m \\ \text{齿顶高} \quad h_{a0} &= h_{a0}^* m \\ \text{齿顶圆直径} \quad d_{a0} &= (z_0 + 2h_{a0}^*) m \\ \text{齿根圆直径} \quad d_{f0} &= (z_0 - 2h_{a0}^*) m \end{aligned}$$

在其他任一端截面中,如图 1.2 中的截面 I—I,刀具的变位系数 x_0 不等于零,其变位系数的大小与该端面到原始截面的轴向距离 b 成正比,按刀具顶刃后面的圆锥母线为直线的几何关系可以写出 x_0 的计算式为

$$x_0 = \frac{b}{m} \tan \alpha_e \tag{1.1}$$

式中,插齿刀的顶刃后角 α_e 在标准中规定为 6° ,端截面到原始截面的距离 b 有正、负值之分:若端截面在原始截面之下(如图 1.2 的 I—I 截面), b 取正值,反之(如截面 II—II),则 b 取负值。

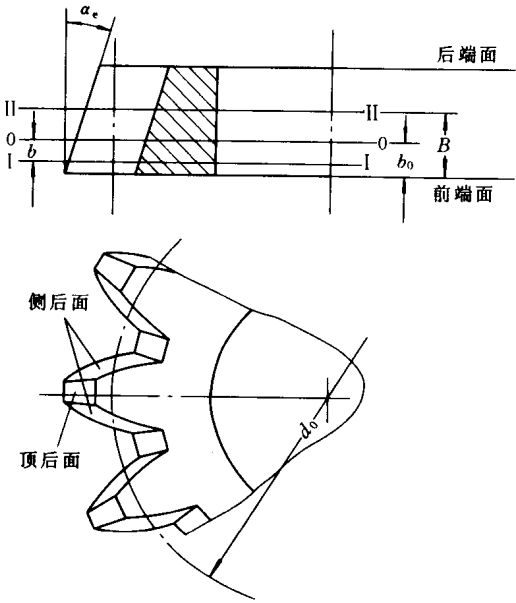


图 1.2 插齿刀的基本构形

由此可知,在任一截面中的插齿刀的尺寸应按如下公式进行计算

$$\begin{aligned} \text{分度圆弧齿厚} \quad s_0 &= \left(\frac{\pi}{2} + 2x_0 \tan \alpha_{0t} \right) m \\ \text{齿顶高} \quad h_{a0} &= (h_{a0}^* + x_0) m \\ \text{齿顶圆直径} \quad d_{a0} &= (z_0 + 2h_{a0}^* + 2x_0) m \\ \text{齿根圆直径} \quad d_{f0} &= (z_0 - 2h_{a0}^* + 2x_0) m \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中, α_{0t} 为插齿刀端截面齿形的分度圆压力角。应该指出,插齿刀的该分度圆压力角与被切齿轮的分度圆压力角标准值 $\alpha = 20^\circ$ 是不相等的。这是由于插齿刀在实际切削时必须有一定大小的前角(在基本构形中端截面的前角为零),因而为使磨制出前面后切削刃在前端面上投影的齿形角为 20° ,其端截面齿形角 α_{0t} 应予以修正,详见 1.3.2 节的分析。

根据上述分析可知,由于插齿刀在不同端截面中的齿形是不同变位系数的渐开线变位齿轮的齿形,因而插齿刀的基本构造形状是:一个以刀具中心线为轴线的圆锥面构成了插齿刀的切削顶后面,而两个螺旋方向相反的渐开螺旋面构成了插齿刀的两个切削侧后面。

1.3.2 插齿刀的切削齿形

由于刀具切削的需要,插齿刀的切削刃必须具有前角,即不能用基本构形中端截面内的渐开线齿形廓线作为切削刃(因为这样前角为零),故在插齿刀的实际结构中,将前端面处磨削出一个底角 $\gamma = 5^\circ$ 的圆锥面作为刀具切削时的前面,角度 γ 称为前角,如图 1.3 所示。磨出前面以后的插齿刀,其顶部切削刃仍是前端面上的齿顶圆弧部分,而侧切削刃则是作为前面的圆锥面与作为侧后面的渐开螺旋面的交贯线,这是一条空间曲线。

用插齿刀切削齿轮时,是通过其顶刃和侧刃进行切削的,被切齿轮的齿廓曲线是由插齿刀切削刃投影到前端面上的曲线,在与被切齿轮之间作范成运动的过程中,逐渐包络而形成的。下面,我们把插齿刀顶刃和侧切削刃在端面上的投影齿形称为切削齿形,正是这个切削齿形包络出了被切齿轮的齿形。

由图 1.3 可以明显地看出:切削齿形的分度圆齿厚是 A—A 截面上的分度圆齿厚, A—A 截面是作为刀具前面的圆锥面与插齿刀分度圆柱面交线所在的平面;切削齿形的齿顶厚 s_{a0} 、齿顶高 h_{a0} 都是前端面上的齿顶厚和齿顶高;切削齿形的齿根厚 s_{f0} 、齿根高 h_{f0} 则是在插齿刀 B—B 截面上的齿根厚和齿根高。切削齿形两侧的曲线是空间曲线在端面上的投影,严格地说已不再是准确的渐开线,只因为偏差很小而仍可以近似地把它看作为渐开线。

图 1.4 是两种齿形的比较,实线是切削齿形,虚线是插齿刀未磨制出前面时的前端面内的齿形,两齿形的齿顶厚相同,但切削齿形的分度圆齿厚和齿根圆齿厚都减薄了,这是因为在 A—A 截面和 B—B 截面中刀具变位系数 x_0 都较之前端面减小的缘故。由图 1.4 不难看出,切削齿形与原基本构形中前端面上的齿形相比较,其分度圆压力角有所减小。为了使切削齿形的分度圆压力角保证为标准值 $\alpha = 20^\circ$,则在设计插齿刀时应使基本构形中前端面齿形的分度圆

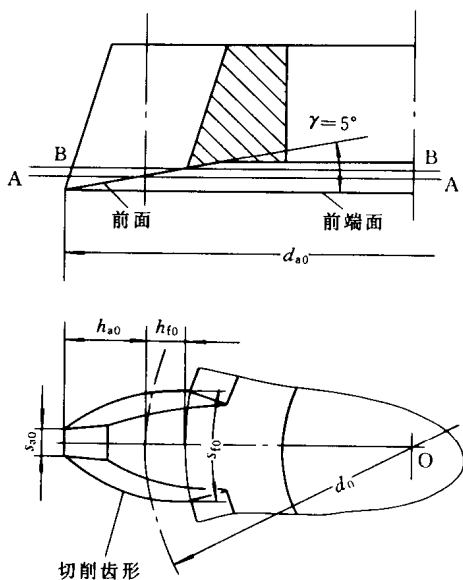


图 1.3 插齿刀的切削齿形