



第2版

下册

齿轮手册

齿轮手册编委会 编



机械工业出版社
China Machine Press

第 23 篇 小模数齿轮加工

主 编 刘镇湖 (北京手表厂)

编写人

审稿人

第 1 章 杜长珍 (北京手表厂)

刘镇湖

第 2 章 刘镇湖

刘镇湖

杜长珍

第 3 章 杜长珍

刘镇湖

第 4 章 杜长珍

刘镇湖

第 5 章 郝景源 (天津银箭电子手表厂)

刘镇湖

刘镇湖



在航空机械、电子产品、精密机械、仪器仪表和计时机构中,广泛应用模数小于1mm的齿轮,模数小于1mm的齿轮,一般称为小模数齿轮。

小模数齿轮加工方法,其基本原理与大、中模数齿轮的加工原理相同。本篇主要介绍小模数齿轮的常见加工方法。

第1章 概 述

1 小模数齿轮传动的分类

小模数齿轮在各种机构中,由于其性能和用途的不同,齿轮的啮合、传动形式和使用对象也不同,因此其分类方式也不同。

一般按下述情况分类:

(1) 按齿轮啮合原理分类

1) 渐开线齿轮传动,包括计时仪器用渐开线齿轮传动。

2) 摆线齿轮传动,包括各种修正摆线齿轮传动。

(2) 按传动轴的相互位置关系分类

1) 平行轴齿轮传动,包括圆柱直齿轮、斜齿轮传动、直齿齿条、斜齿齿条传动等。

2) 相交轴齿轮传动,包括直齿、斜齿、锥齿,圆弧齿轮传动等。

3) 交错轴传动,包括交错轴斜齿轮传动和蜗轮蜗杆传动。

(3) 按使用对象分类

1) 分度示数用齿轮传动。

2) 计时控制机构用齿轮传动。

3) 伺服机构用齿轮传动。

4) 调整校正机构用齿轮传动。

2 小模数齿轮常用材料

2.1 对材料的基本要求

选用小模数齿轮材料应注意以下方面:

1) 材料加工性能好。

2) 容易得到较低的表面粗糙度。

3) 材料稳定性好,不易受化学物质侵蚀。

4) 根据齿轮工作条件适当考虑齿轮的强度及齿面硬度。

2.2 常用材料

一般用途的圆柱齿轮、锥齿轮,选用碳素钢或优质碳素钢。

高强度、高耐磨性的齿轮,选用合金钢,抗腐蚀性

的齿轮选用不锈钢。

齿面滑动较大的蜗杆传动、交错轴斜齿轮传动,主动轮用钢,从动轮用黄铜和青铜。

仪表齿轮常用铝合金。

计时仪器齿轮轴,用易切削钢,计时仪器用齿轮片用铜。

小模数齿轮应用非金属材料已很广泛,胶木、尼龙、工程塑料的应用,对减少传动噪声、提高抗振性能,改善加工性能开辟了新的途径。常用的小模数齿轮材料见表23.1-1。

表 23.1-1 小模数齿轮常用材料

名 称	牌 号	性 能	应用范围
优质碳素结构钢	15、20、30	切削加工性能好,15、20钢要渗碳处理	用于圆周速度小于3m/s
	35、40、45、50	切削加工性能好,需要调质处理	用于要求性能较高的齿轮
易切削钢	Y30、Y35、Y40Mn	切削加工性能好,热处理后可提高齿面耐磨性	用于制造计时仪器用齿轮轴和一般的齿轮
碳素工具钢	T7A、T8A、T10A	耐磨性好,强度高	用于制造轴齿轮,蜗杆以及要求高的齿轮
合金工具钢	15Cr、20Cr、40Cr、18CrMnTi、38CrMoAl、40CrNiMoA	15Cr、20Cr经渗碳淬火后可得到表层硬、中心韧的组织,耐磨性、抗冲击性好 38CrMoAl渗氮后表面硬度高、变形小 耐磨性、强度均比碳素工具钢好	用于制造要求较高的蜗杆,18CrMnTi等用于大载荷、耐磨性高的齿轮及蜗杆
不锈钢	2Cr13Ni2、2Cr13、3Cr13、4Cr13、9Cr18、1Cr18Ni9Ti	切削性能差、韧性好、耐酸且防锈	用于防腐、防锈的齿轮

(续)

名称	牌 号	性 能	应用范围
硬铝 超硬铝	2A11、2A12、 7A04	质量小,有足 够耐磨性	用于制造轻 型的齿轮
黄铜	H62、H63 HPb-59-1	切削性能好、 表面粗糙度较 低	用于制造普 通齿轮,一般计 时仪器用齿轮
铝青铜	QA19-2 QA19-4 QA1Fe9-4 QA1Mn9-2	切削性能一 般,耐磨性较好	用于制造强 度较高的齿 轮和耐磨性要 求高的齿轮、蜗 轮等
锡青铜	QSn6.5-0.1 QSn10-1	切削性能好, 耐磨性好,尺寸 稳定	用于高耐磨 的齿轮和蜗轮
非金属材料 工程塑料	夹布胶木 (PF) 尼龙(PA) ABS	加工性能好、 有一定的耐 磨性、抗振、抗 冲击、噪声小、 变形大	用于制造普 通齿轮,要求噪 声小的减速器 齿轮

3 小模数齿轮技术要求及加工特点

3.1 小模数齿轮技术要求

由于小模数齿轮传动机构的用途不同,对于齿轮的要求也不同。但其基本的要求应包括下列几点:

(1) 运动精度 传递运动准确、可靠,保证从动轮与主动轮运动协调,使其在每一转中旋转角度误差不超过允许的范围。

(2) 工作平稳 在传递运动过程中,尤其是高速运转的齿轮,必须要求工作平稳,没有冲击、噪声低,这就要控制瞬时传动比的变化。

(3) 接触性能好 在传递载荷时,为了不致因接触不均匀使接触应力过大,引起齿面的过早磨损,齿轮工作表面应有足够的啮合接触面积。

(4) 合理的侧隙 在传动过程中,两啮合齿非工作表面之间应有一定的间隙,以便贮存润滑油,补偿弹性变形、温度及齿轮制造误差引起的侧隙变化,防止齿轮出现“卡滞”现象,但侧隙也不能过大,以免引起传

动中出现“回差”。

3.2 小模数齿轮加工特点

与普通模数齿轮加工相比,小模数齿轮加工有下述特点:

1) 小模数齿轮传递力矩小,在设计齿轮时,一般不进行强度计算和刚度核算。齿轮模数的确定,通常由传动机构的结构尺寸选定。而小模数齿轮的加工工艺过程中的切削力、夹紧力、支承力以及其他因素,有时会引起齿轮的变形和断裂。因此,合理制订小模数齿轮加工工艺,防止加工过程中齿轮变形或断裂,是保证小模数齿轮质量极为重要的因素。

2) 小模数齿轮啮合种类较多,除常用的渐开线齿轮啮合外,还有各种修正摆线齿轮啮合和简化啮合,为确保齿轮精度,必须正确地加工出各种啮合的齿轮齿形曲线,因此加工小模数齿轮的设备与工具的精度,有特殊的要求,这是小模数齿轮加工的又一个特点。

3) 小模数齿轮传动中,为了缩小体积,得到较大的单级传动比,因此要求小齿轮的齿数少。少齿数的齿轮加工,是小模数齿轮加工的特点。

4) 小模数齿轮加工过程中,机床切向误差影响较小,由于小模数齿轮的径向精度,齿侧隙精度要求高,因此,当外界的因素:如振动、冲击力、温度变化等会直接影响齿轮加工精度。小模数齿轮加工的工作间,必须有较好的工作环境。

4 小模数齿轮加工方法比较

4.1 小模数齿轮加工方法分类

小模数齿轮加工方法,按其齿轮的轮齿加工分为两大类,即有切屑加工和无切屑加工。属于有切屑加工的方法有:铣齿、滚齿、插齿、刨齿、剃齿、拉齿、冲齿、研齿、抛光齿、珩齿等。属于无切屑加工的方法有:冷轧齿、热轧齿、压铸和注塑等。

4.2 小模数齿轮有切屑加工方法

小模数齿轮有切屑加工方法比较见表 23.1-2。

表 23.1-2 小模数齿轮有切屑加工方法比较

加工方法	被加工齿轮种类	特 点	机 床	加工精度
铣齿	各种直齿和斜齿	1) 用模数铣刀逐齿分度铣削 2) 工件材料硬度不超过 30HRC 3) 可以加工出各种齿形曲线,齿数小于 14 的齿轮无根切现象 4) 生产率较低	各种铣齿机床和普通铣床	7 级,齿面粗糙度 $R_{a1}\mu\text{m}$

(续)

加工方法	被加工齿轮种类	特 点	机 床	加工精度
滚齿	各种直齿和斜齿	1) 用展成滚刀滚切, 连续切削, 生产率高 2) 工件材料硬度不超过 35HRC 3) 可滚削渐开线齿轮 $z \geq 14$, 修正摆线齿轮 $z \geq 7$ 4) 最小模数滚刀 $m = 0.05\text{mm}$	各种小模数滚齿机	4级, 齿面粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$
成形滚齿	各种直齿、斜齿	1) 属于仿形、连续切削, 生产率高 2) 工件材料硬度不超过 30HRC 3) 可加工各种齿形, $z \leq 14$ 不会出现根切现象 4) 刀具寿命比滚齿低	各种小模数滚齿机	6级, 齿面粗糙度 $R_a 1.0\mu\text{m}$
插齿	各种直齿、斜齿、人字齿, 内齿和齿条	1) 按展成原理, 用插齿刀加工出齿形 2) 能加工滚、铣法无法加工的一些齿轮, 如双联齿轮、内齿轮等	小模数插齿机	6级, 齿面粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$
拉齿 (推齿)	内齿轮和齿条	1) 可在专用机床上一次拉出齿形 2) 有成形拉削、逐齿拉削、同齿廓拉削和等高齿拉削	拉削用拉床、推削可用压力机	7级, 齿面粗糙度 $R_a 1.25\mu\text{m}$
剃齿	直齿斜齿	1) 采用剃齿刀与工件做无侧隙的自由啮合运动加工出齿形 2) 对滚齿、插齿后的齿形进行精加工	剃齿机	5级, 齿面粗糙度 $R_a 0.4\mu\text{m}$
磨齿	直齿、斜齿	1) 用成形砂轮按仿形法或展成法磨削出齿轮的齿形 2) 可加工淬硬齿轮, 齿形精度高	磨齿机	3级, 齿面粗糙度 $R_a 0.4\mu\text{m}$
珩齿	直齿、斜齿	1) 用珩磨轮对淬硬齿轮珩磨 2) 可以校准齿轮精度、降低齿面粗糙度, 改善齿轮啮合性能	珩齿机	6级, 齿面粗糙度 $R_a 0.4\mu\text{m}$
抛光齿	直齿	1) 用木质或软材料制造抛光轮, 与工件作自由啮合运动, 降低齿工作面粗糙度 2) 不能提高齿形精度, 齿形误差会增加	抛齿机	7级, 齿面粗糙度 $R_a 0.1\mu\text{m}$
研齿	直齿	1) 研磨轮与工件啮合, 在齿工作面内加入研磨剂, 研光齿面, 可加工淬硬的硬齿面 2) 校正齿轮误差, 降低齿面粗糙度, 但齿形误差无法消除	研齿机	7级, 齿面粗糙度 $R_a 0.04\mu\text{m}$
冲齿	片状的内齿轮和外齿轮	1) 用冲齿模具, 在冲床上加工出齿形, 生产率高 2) 可以加工出各种齿形的齿轮片, 模数 m 最小为 0.15mm 3) 板料硬度不大于 25HRC	精密冲床	普通冲裁, 8级, 齿面粗糙度 $R_a 0.16\mu\text{m}$; 精冲, 7级, 齿面粗糙度 $R_a 1.0\mu\text{m}$

(续)

4.3 小模数齿轮无切屑加工方法

小模数齿轮无切屑加工方法比较见表 23.1-3。

表 23.1-3 小模数齿轮无切屑加工方法比较

加工方法	被加工齿轮种类	特点
注塑成型	内、外齿轮的直齿和斜齿轮	1) 用注塑机、将高温、高压下而熔蚀状态的工程塑料, 注入模具中, 使之成型固化 2) 工艺简单, 齿轮精度达 8 级 3) 模具制造复杂
冷轧	直齿和斜齿轮	1) 用轧轮使金属产生塑性变形展成齿形 2) 齿轮强度高, 齿面耐磨性好 3) 齿轮精度 7 级, 齿面粗糙度 $R_a 0.4 \mu\text{m}$

加工方法	被加工齿轮种类	特点
热轧	直齿和斜齿轮	1) 将齿坯加热后, 用轧轮轧制成型 2) 是梯齿和磨齿前的预加工工序 3) 精度达 8 级
粉末冶金	直齿和斜齿轮	1) 按规定比例的配方混合金属粉末, 经过专用处理后, 装入模具内, 经压制烧结成型 2) 精度达 8 级

第 2 章 小模数圆柱齿轮加工

1 小模数齿轮滚削加工

1.1 滚齿原理

滚齿加工是应用最广泛的齿轮加工方法。滚切法又称展成法或范成法。它是利用与工件有共轭齿形的展成工具与工件作强制的啮合运动来形成所要求的工件齿形。滚切法, 原理上相当于一对斜齿轮在空间紧密啮合, 齿轮滚刀相当于一个齿数极少的斜齿轮, 沿轴向开出若干沟槽, 并在所形成的每个刀齿齿背上铲出相应的后角, 故能在啮合过程中进行切削。由于小模数齿轮滚刀的螺旋导程角很小, 因此也可以把齿轮滚削过程看成是齿轮和齿条的啮合过程, 把滚刀的每排齿看成为齿条, 而这些齿条之间相差一个等分齿距, 并不列在一个(单头滚刀)或几个(多头)螺旋线上。切削运动时, 相当于齿条沿工件切向移动, 与工件啮合滚切出工件齿形。因此, 在滚切过程中, 滚刀轴线与工件轴线必须有一个夹角, 这个夹角称为安装角, 见图 23.2-1。

滚齿加工的运动有: 滚刀切削运动, 工件分度运动, 滚切轴向运动和工件分度运动。

滚切法加工齿轮, 不但可以加工渐开线齿形, 也可以加工修正摆线齿形、计时仪器用圆弧齿形、双圆弧齿形等非渐开线齿形。

在滚削渐开线齿轮时, 改变滚刀与齿坯中心的位置, 可以滚切出各种变位齿轮。而滚切修正摆线和计时

仪器用圆弧齿轮时, 滚刀与齿坯轴线位置是固定不可变的, 因此, 没有齿轮变位的概念。

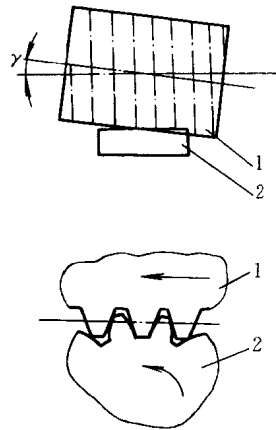


图 23.2-1 滚齿加工运动

1—滚刀 2—工件 γ —安装角

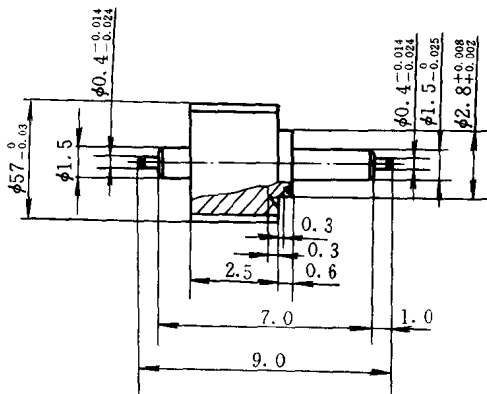
1.2 滚齿工艺

1.2.1 典型工艺

这里主要介绍渐开线直齿圆柱齿轮和计时仪器用圆弧齿轮滚齿工艺。

(1) 小模数轴齿轮加工工艺 小模数直齿渐开线轴齿轮加工工艺见表 23.2-1。计时仪器用圆弧齿轴齿轮加工工艺见表 23.2-2。

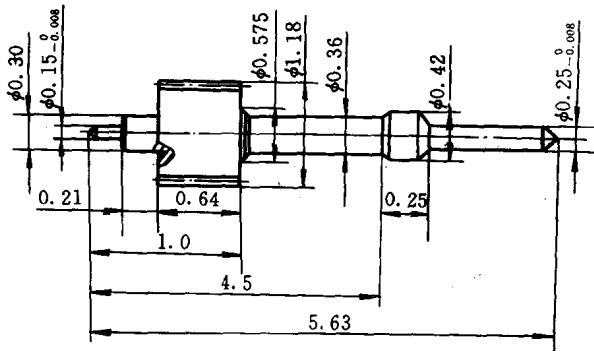
表 23.2-1 小模数渐开线轴齿轮加工工艺



模数 m 0.15mm
 齿数 z 36
 压力角 α 20°
 精度等级 7-d GB 2363--80
 材料 2Cr13Ni2
 热处理 45~55HRC

序号	工序名称	说明
1	下料	材料牌号 2Cr13Ni2, 光棒, 规格 $\phi 6.0\text{mm} \times 1500\text{mm}$
2	车外圆及端面	在自动车床上车外圆及端面, 精车留余量 0.05~0.10mm, 轴颈留抛光余量 0.02~0.04mm, 表面粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$
3	车	车铆接槽、空刀槽及外圆尺寸, 表面粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$
4	滚齿	全切式滚齿, 采用硬质合金整体式滚刀, 齿厚留余量 0.01mm
5	抛齿(粗)	留精抛齿余量 0.007mm, 齿面粗糙度 $R_a 0.32\mu\text{m}$
6	轴颈粗抛光	留精抛余量 0.002mm, 表面粗糙度 $R_a 0.3\mu\text{m}$
7	热处理	真空光亮淬火和回火, 45~55HRC
8	精抛齿	齿形、齿厚尺寸附合图样要求, 表面粗糙度 $R_a 0.08\mu\text{m}$
9	精抛轴颈	轴颈尺寸符合图样要求, 表面粗糙度 $R_a 0.04\mu\text{m}$
10	成品总检验	按产品图样检验各项要求
11	清洗包装	

表 23.2-2 计时仪器用圆弧齿轴齿轮加工工艺



模数 m 0.0975mm
 齿数 z 10

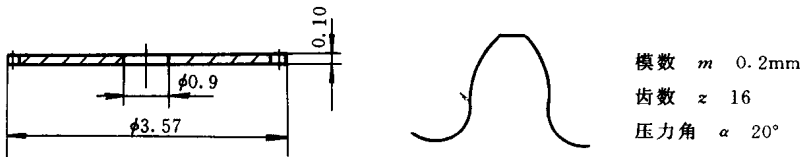
序号	工序名称	说明
1	下料	材料牌号 T10Pb, 磨光棒料, 规格 $\phi 1.3\text{mm} \times 1500\text{mm}$
2	车成形	在自动车床上车成外形, 轴颈留余量 0.008mm, 齿顶留余量 0.06mm

(续)

序号	工序名称	说 明
3	镀铜	为用化学去毛刺作准备
4	滚齿	用硬质合金整体式滚刀滚削, 齿形尺寸按照下列尺寸: 外径 $\phi 1.185_{-0.015}^0$ mm, 根径 $\phi 0.6_{-0.06}^0$ mm, 齿厚 $0.112_{-0.013}^0$ mm 齿面表面粗糙度 $R_a 0.4\mu\text{m}$
5	清洗	清除油污为化学去毛刺作准备
6	去毛刺	去除滚齿后在齿面上的毛刺, 用化学法去除
7	淬火、回火	真空或气体保护炉淬火、回火
8	滚抛齿面	在滚抛筒内滚抛齿面, 齿形尺寸附合产品图样要求, 齿面粗糙度 $R_a 0.08\mu\text{m}$
9	清洗、去铜	在专用溶液内除去零件镀层
10	磨轴颈	轴颈尺寸磨止尺寸附合产品图样要求
11	防油扩散处理及包装	经检验尺寸合格后进行防油扩散处理再包装入库

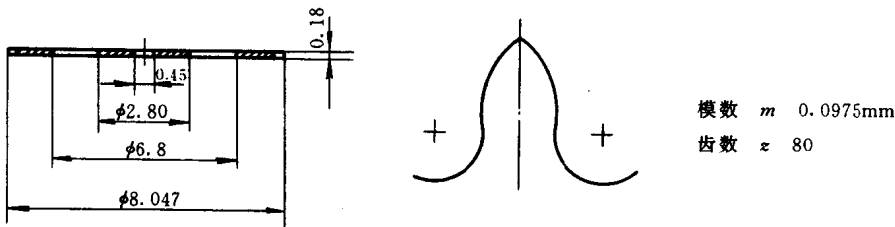
(2) 小模数片齿轮加工工艺 小模数渐开线片齿 工艺见表 23.2-4。
轮加工工艺见表 23.2-3。计时仪器用圆弧齿片齿轮加

表 23.2-3 小模数渐开线齿片齿轮加工工艺



序号	工序名称	说 明
1	下料	材料牌号 HPb59-1, 规格板料, 厚 0.15mm
2	落料、冲孔	用落料模具冲裁成形, 孔留余量 0.02mm, 表面粗糙度 $R_a 3.2\mu\text{m}$
3	去毛刺	手工去毛刺
4	校平	清洗、装夹、保温、校平和冷却
5	表面处理	酸洗后钝化处理
6	铰孔或精修	铰孔或用模具修孔, 孔按图样尺寸, 表面粗糙度 $R_a 0.4\mu\text{m}$
7	滚齿	以孔定位, 全切式滚齿, 用硬质合金整体式滚刀滚切, 表面粗糙度 $R_a 0.63\mu\text{m}$
8	抛齿	齿面粗糙度 $R_a 0.32\mu\text{m}$
9	总检验和包装	经清洗后按产品图样检验, 包装

表 23.2-4 计时仪器用圆弧齿片齿轮加工工艺



(续)

序号	工序名称	说 明
1	下料	材料牌号 HPb59-1, 规格: 板料, 厚 0.15mm, 表面抛光, 粗糙度 $R_a 0.8\mu\text{m}$
2	落料	用模具冲孔和落料, 外径留余量 0.15mm, 表面粗糙度 $R_a 3.2\mu\text{m}$
3	去毛刺	手工去除冲裁毛刺
4	滚齿	毛坯以花档定位, 成串滚削, 齿面粗糙度 $R_a 0.63\mu\text{m}$, 滚刀用硬质合金整体式滚刀
5	修孔	以齿形外圆定位, 用模具修孔, 孔的表面粗糙度 $R_a 0.4\mu\text{m}$, 尺寸按产品图样要求, 用保证齿外径的径向跳动附合产品图样要求
6	电镀	为防锈和美观, 在专用电镀槽内进行镀金
7	清洗检验	在清洗液内用超声波清洗, 经检验后包装

1.3 滚削方式与条件

根据使用的滚刀不同, 小模数齿轮滚削方法有普通滚齿法和全切式滚齿法二种。普通滚齿法所用的滚刀顶刃和侧刃参加切削, 工件的齿顶圆不被滚削, 仍保持毛坯原有尺寸。而全切式滚齿的滚刀, 其刀齿的顶刃、侧刃和底刃全部参加滚切。全切式滚齿所加工的齿轮, 其齿顶圆与其齿形一次滚切成形, 因此其齿轮精度比普通滚齿法高。但全切式滚齿, 由于底刃参加切削, 切削负荷增大, 对滚削加工和滚刀制造增加了难度。

1.3.1 渐开线齿轮滚切条件

用展成法滚切标准齿轮时, 不论是普通滚齿法还是全切式滚齿法, 齿轮参数必须满足下列条件:

1) 齿轮的齿数 z 必须大于或者等于最少齿数 z_{\min} , 否则要产生根切。

$$z_{\min} \geq \frac{2h_a^*}{\sin^2 \alpha}$$

式中 h_a^* —— 齿轮齿顶高系数;

α —— 齿轮分度圆压力角。

2) 用展成法切削齿轮时, 不允许齿轮齿顶变尖。由于小模数齿轮传动机构中, 会遇到很少齿数的齿轮, 采用变位能切制出齿数少于 z_{\min} , 又无根切现象的齿轮, 但由于变位, 会使齿轮的齿顶圆齿厚减薄, 因此, 必须选择合理的变位系数, 确保齿轮的齿顶圆齿厚 s_a 大于或等于 $0.2m$ 。

$$s_a = \frac{zm \cos \alpha}{\cos \alpha_a} \left(\frac{\pi}{2z} + \frac{2 \tan \alpha}{z} + \text{inv} \alpha - \text{inv} \alpha_a \right) \geq 0.2m$$

式中 z —— 齿轮齿数;

m —— 齿轮模数;

α —— 分度圆压力角;

α_a —— 齿顶圆压力角, $\alpha_a = \arccos \frac{r \cos \alpha}{r_a}$;

r_a —— 齿顶圆半径;

r —— 齿轮分度圆半径。

变位系数的选用可按表 23.2-5。表中 $x_{\text{滚}}$ 是齿轮不发生根切时的变位系数, $x_{0.2}$ 是当齿顶圆齿厚

$s_a = 0.2m$ 时的变位系数。

表 23.2-5 变位系数选用表

z	8	9	10	11	12	13	14
$x_{\text{滚}}$	0.532	0.474	0.415	0.357	0.298	0.240	0.181
$x_{0.2}$	0.375	0.412	0.444	0.471	0.496	0.517	0.536
z	15	16	17	18	19	20	
$x_{\text{滚}}$	0.123	0.064	0.005	-0.053	-0.111	-0.166	
$x_{0.2}$	0.553	0.569	0.583	0.596	0.607	0.618	

1.3.2 修正摆线齿轮滚切条件

1) 用展成法滚切修正摆线齿轮时, 设计展成滚刀的滚动圆直径, 必须大于或者等于工件中心圆直径, 即

$$D_{\text{滚}} \geq d_c$$

式中 $D_{\text{滚}}$ —— 滚刀的滚动圆直径;

d_c —— 齿轮中心圆直径。

从齿轮啮合原理可知, 一对啮合的齿形曲线, 其公法线必须通过连心线上的节点, 而且齿形上各点的法线必依次相交于同一圆上, 此圆即为滚动圆, 见图 23.2-2。当齿形曲线齿顶圆弧 \widehat{ab} 曲线有共轭曲线时, 选择滚动圆半径 $R_{\text{滚}}$ 大于或者等于中心圆半径 R_c 。其曲线上的法线依次相交于滚动圆上。如果中心圆直径大于滚动圆直径, 齿顶部分齿形曲线的法线, 不与滚动圆

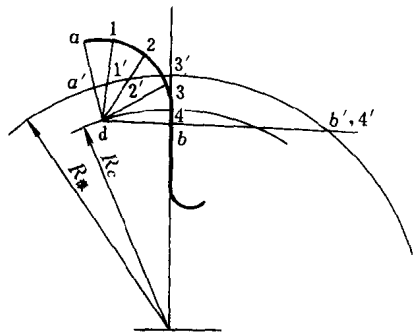


图 23.2-2 滚动圆选取合适时示意图

顺序相交，则滚削不出齿顶曲线，见图 23.2-3。

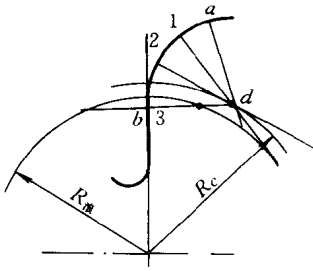


图 23.2-3 滚动圆选取不合适时示意图

2) 用展成法滚切修正摆线齿轮时，能滚切出径向直线，而不产生过渡圆弧，齿形参数必须满足

$$\zeta > \frac{1}{2}(\theta_0 - \sin\theta_0)$$

$$\cos(\theta_0/2) = \frac{(r_f + \rho_f)\cos\zeta}{R_m}$$

式中 ζ, θ_0 ——几何参数见图 23.2-4；

r_f ——齿根圆半径；

ρ_f ——齿根圆弧半径；

R_m ——滚动圆半径。

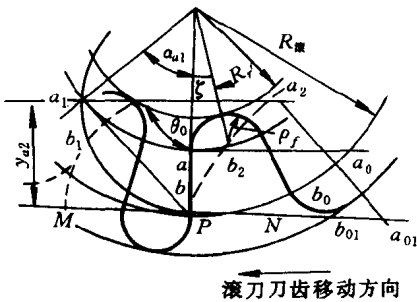


图 23.2-4 齿轮滚切示意图

3) 用展成法滚切修正摆线齿轮时，能滚切出齿根过渡圆弧，而且滚刀齿形不会变尖，其齿形参数必须满足下式：

$$r_f - (R_m + \rho_f)\cos\gamma$$

$$+ \sqrt{\rho_f^2 - \left[\frac{R_m}{z}\pi - (r_f + \rho_f)\sin\gamma \right]^2} \geq 0.3$$

式中 r_f ——齿根圆半径(mm)；

R_m ——滚动圆半径(mm)；

ρ_f ——齿根过渡圆弧半径(mm)；

γ ——图 23.2-5 中几何参数(°)；

z ——齿轮齿数。

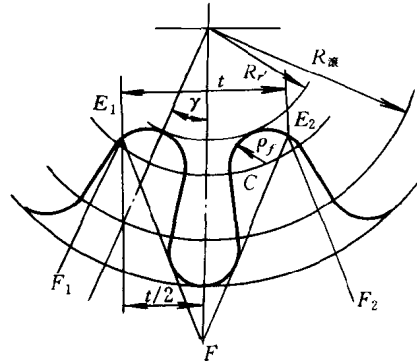


图 23.2-5 滚切齿根过渡圆弧示意图

1.4 切削用量

滚齿的切削用量包括：进给量、切削速度、切削深度及走刀次数。

滚齿切削用量是根据工件材料的力学性能、机床刚度、工件精度和齿轮参数来选择的。

(1) 进给量的选择 工件旋转一周的轴向进给量 f_a (mm/r)其计算公式如下：

$$f_a = C_f m^a z^b$$

式中 C_f ——轴向进给系数，其值见表 23.2-6；

m ——工件模数(mm)；

z ——工件齿数；

a, b ——模数和齿数的指数，其值见表 23.2-6。

表 23.2-6 系数 C_f 和指数 a, b 值

工件材料	C_f	a	b
钢	0.158	0.54	0.265
铜	0.275	0.54	0.320

滚削加工钢和铜材时的轴向进给量 f_a 见表 23.2-7 和表 23.2-8。

表 23.2-7 滚削加工钢材时的轴向进给量 f_a 值

(mm/r)

m/mm	0.09	0.10	0.12	0.15	0.165	0.20	0.25
z							
7	0.07	0.08	0.08	0.10	0.10	0.11	0.13
8	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.12	0.13
10	0.08	0.09	0.09	0.11	0.11	0.12	0.14
12	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15
15	0.09	0.09	0.10	0.12	0.12	0.14	0.15
20	0.10	0.10	0.11	0.13	0.13	0.15	0.17
30	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.19

(续)

m/mm z	0.09	0.10	0.12	0.15	0.165	0.20	0.25
40	0.11	0.12	0.13	0.15	0.16	0.18	0.19
50	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.21
60	0.13	0.14	0.15	0.17	0.18	0.20	0.22
70	0.13	0.14	0.15	0.18	0.19	0.20	0.23
75	0.14	0.14	0.15	0.18	0.19	0.21	0.24
80	0.14	0.15	0.15	0.18	0.19	0.21	0.24
85	0.14	0.15	0.15	0.19	0.20	0.21	0.24
90	0.14	0.15	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25
100	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25

表 23.2-8 滚削加工钢材时的轴向进给量 f_a 值
(mm/r)

m/mm z	0.09	0.10	0.12	0.15	0.165	0.20	0.25
7	0.14	0.15	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25
8	0.15	0.16	0.18	0.20	0.21	0.23	0.26
10	0.16	0.17	0.19	0.22	0.23	0.25	0.28
12	0.17	0.18	0.20	0.23	0.24	0.26	0.30
15	0.18	0.20	0.22	0.25	0.26	0.28	0.32
20	0.20	0.21	0.24	0.27	0.28	0.31	0.35
30	0.23	0.24	0.27	0.30	0.32	0.35	0.40
40	0.25	0.27	0.29	0.33	0.35	0.39	0.44
50	0.27	0.29	0.32	0.36	0.38	0.42	0.47
60	0.29	0.30	0.34	0.38	0.40	0.44	0.50
70	0.30	0.32	0.36	0.40	0.42	0.46	0.52
75	0.31	0.33	0.36	0.41	0.43	0.48	0.54
80	0.32	0.33	0.37	0.42	0.44	0.48	0.55
85	0.32	0.34	0.38	0.43	0.45	0.49	0.56
90	0.33	0.35	0.39	0.43	0.46	0.50	0.57
100	0.34	0.36	0.40	0.45	0.47	0.52	0.59

(2) 切削速度的选择 切削速度 v (m/min) 按下式计算:

$$v = \frac{C_v}{m^c f_a^d}$$

式中 C_v ——切削速度系数;
 m ——工件模数(mm);
 f_a ——轴向进给量(mm/r);
 c, d ——模数和进给量指数。
 C_v 和 c, d 值见表 23.2-9。

表 23.2-9 系数 C_v 和指数 c, d 值

工件材料	C_v	c	d
钢	14.74	0.42	0.42
黄铜	92.40	0	0.16

滚削加工钢材时的切削速度值见表 23.2-10, 滚削铜材时的切削速度值见表 23.2-11。滚削加工模数 $m \geq 0.2\text{mm}$ 的齿轮, 切削用量见表 23.2-12。

表 23.2-10 滚削钢材时的切削速度值

(m/min)							
m/mm $f_a/(\text{mm/r})$	0.09	0.10	0.12	0.15	0.165	0.20	0.25
0.05	147	141	130	119	114	105	96
0.07	127	122	113	103	99	91	83
0.08	120	115	106	97	93	86	78
0.10	109	104	97	88	85	78	71
0.12	101	97	89	81	78	72	66
0.15	92	88	81	74	71	66	60
0.20	81	78	72	65	63	58	53
0.25	74	70	65	59	57	53	48
0.30	68	65	60	55	53	49	44
0.40	60	58	54	49	47	43	39

表 23.2-11 滚削铜材时的切削速度值

(m/min)									
$f_a/(\text{mm/r})$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.85
v	133	118	112	107	103	100	98	96	95

表 23.2-12 滚削 $m \geq 0.2\text{mm}$ 的齿轮的切削用量

工件材料	进给量 $f_a/(\text{mm/r})$	切削速度 $v/(\text{m/min})$	
		高速钢 刀具	硬质合 金刀具
钢	$\sigma_b < 600$ MPa	0.20~0.50	25~35 50~70
	$\sigma_b > 600 \sim 900$ MPa	0.15~0.40	20~30 40~60
	$\sigma_b > 900 \sim 1100$ MPa	0.10~0.30	15~20 30~40
铜	软	0.25~0.50	20~40 50~120
	硬	0.20~0.40	15~30 30~60
	黄铜	0.20~0.50	25~60 80~120
	硬铝	0.20~0.50	40~70 80~140
	塑料	0.30~0.60	40~60 80~100

1.5 切削液

滚削小模数齿轮用的切削液,必须有良好的冷却润滑性、清洗和防锈性能。由于小模数齿轮滚削工艺复杂、滚切条件差,为提高滚齿加工精度和刀具耐用度,

为降低切削力和表面粗糙度,要求切削液渗透性好,形成润滑膜的能力和强度好。为此,通常采用油性切削液,而很少用乳化液和水溶性的切削液。常用切削液包括:矿物油、动植物油、复合油和极压切削油,其成份及性能见表 23.2-13。

表 23.2-13 常用切削液的成分及性能

名称	组成	质量分数	说明
L-AN 全损耗系统用油: 7、10、15、32、46			从天然原油中炼制的,在透明性、稳定性好,冷却性能好,而润滑性能比植物油稍差
植物油: 豆油、菜籽油、棉籽油、蓖麻油、复合油			复合油是将动、植物油与矿物油混合制成,植物油和复合油有良好的润滑性能和渗透性能,但易变质
防锈切削液	L-AN 全损耗系统用油 15 或 32 石油磺酸钡	0.95~0.98 0.02~0.05	有良好的防锈性能、冷却性能和润滑性能
	煤油 石油磺酸钡	0.98 0.02	有良好的防锈性能、冷却性能和清洗性能
极压切削液	硫化切削油 煤油 油酸 L-AN15 或 32	0.30 0.15 0.30 0.25	在切削过程中,与金属起化学反应,生成硫化铁,燃点高,硫化膜不易破坏,耐高温和高压,对铜及铜合金有腐蚀作用
	L-AN15 硫化鲸鱼油	0.98 0.02	适用于加工钢件
	L-AN7 或 10 氯化石蜡 二烷基二硫化磷酸锌	0.79 0.20 0.01	在切削过程中与金属表面起化学反应,生成氯化物形成润滑膜,可减小刀具的摩擦,降低切削力,提高刀具的耐用度
	L-AN32 L-AN10 氯化石蜡 环烷酸铅 石油磺酸钡	0.735 0.10 0.10 0.06 0.005	适用于铜和钢的加工,形成的润滑膜牢固
F43 切削液	L-AN7 氯化石油脂钡皂 二烷基二硫化磷酸锌 石油磺酸钙 石油磺酸钡 二硫化铝	0.835 0.04 0.04 0.04 0.04 0.005	
20 号滚齿油	L-AN20 二烷基二硫化磷酸锌 硫化椰子油 十二烷基丁二酸 2,6-二叔丁对甲酚	0.8567 0.01 0.05 0.0003 0.003	适用于材质为铜、钢材及要求润滑条件和防锈性能较高的齿轮加工
复杂刀具用油	L-AN20 氯化石蜡 二烷基二硫化磷酸锌 高碱性石油磺酸钙	0.902 0.08 0.01 0.008	性能接近 20 号滚齿油

1.6 齿轮滚刀

1.6.1 小模数齿轮滚刀特点

小模数齿轮滚刀按照刀具材料的不同,可分为高速钢整体滚刀和硬质合金整体滚刀。按照制造精度高低,可分为高精度滚刀(AAA级或更高)、精密级滚刀(AA级)、普通级滚刀(A、B、C级)。按照螺纹头数,可分为单头滚刀和多头滚刀。按照滚刀齿形不同,可分为渐开线滚刀、计时仪器用圆弧齿形滚刀和其他非渐开线齿形滚刀。小模数齿轮滚刀的特点如下:

1) 小模数齿轮滚刀的容屑槽开成直槽,而且滚刀螺旋角小,因此,滚刀制造简单。直槽滚刀刀齿是逐渐切入齿坯

的,其切削平稳,切削角不对称导致的加工误差,影响很小。

2) 小模数齿轮滚刀,其结构均为整体结构,常用材料为硬质合金和高速钢,因此制造工艺复杂,必须要有高精度的加工设备和测量仪器。

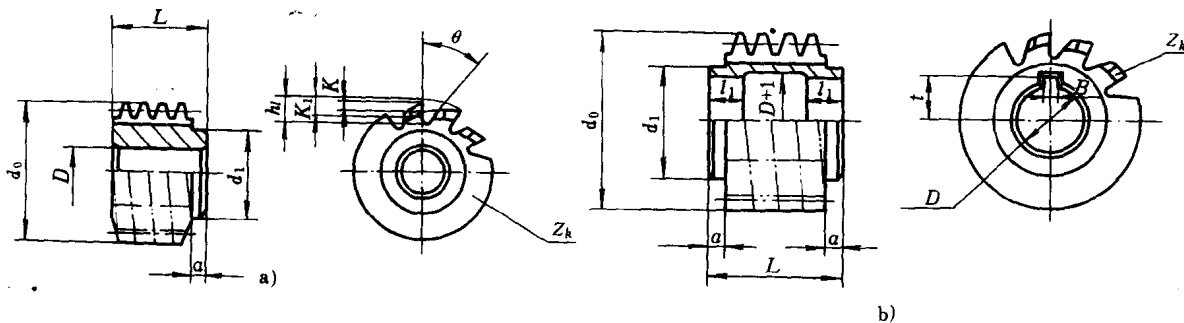
3) 小模数齿轮滚刀,一般采用全切式滚削,尤其加工修正摆线齿轮和其他非渐开线齿轮中,全切式滚削,要求齿轮滚刀整个齿形参加滚切,这样可以控制齿轮的加工精度和降低齿轮毛坯的精度。但是对于滚刀的制造增加了难度。

1.6.2 小模数齿轮滚刀结构尺寸

小模数齿轮滚刀有两种结构形式,其形式和尺寸见表 23.2-14。

表 23.2-14 小模数齿轮滚刀结构尺寸

(mm)



d_0	m_n	θ	Z_k	h_1	d_1	D	a	L	l_1	B	t	
8	0.02~0.2	50°	8	0.9	15.5	8.0	0.8	3.0	7.5			
10			12	1.1				3.5				3.5
12			12	1.5				4.5				4.0
16			12	2.0				6.0				5.0
25	0.1~0.3	50°	12	2.5	20.0	10.0	2.5	10	10			
	>0.3~0.6	45°		3.5				14				
	0.1~0.3	30°	15	3.5				10				
	>0.3~0.6							14				
32	0.1~0.3	45°	12	4.2	20.0	10.0	2.5	10	20	6		
	>0.3~0.6							14				
	>0.6~1.0							14				

(续)

d_0	m_n	θ	Z_k	h_1	d_1	D	a	L	l_1	B	t
32	0.1~0.3	30°	15	3.5	20.0	10.0	2.5	10	6	4.08	17.7
	>0.3~0.6							14			
	>0.6~1.0			20							
40	0.3~0.6	45°	12	6.5	25	16	4	18	8	4.08	17.7
	>0.6~1.0		15					30			
50	0.3~0.6	45°	12	7.5	36	22	4	30	12	6.08	24.1
	>0.6~1.0		15					40			

1.6.3 小模数渐开线齿轮滚刀齿形设计

非全切式小模数齿轮滚刀齿形设计与大、中模数齿轮滚刀设计相同,我国已制订了小模数齿轮滚刀的标准,见 JB 2494—78。全切式小模数齿轮滚刀的法向齿形和轴向齿形尺寸计算公式如下:

1. 法向齿形尺寸计算公式

(1) 齿顶高 h_{a0}

$$h_{a0} = (h_a^* + c^*)m_n$$

(2) 齿根高 h_{f0}

$$h_{f0} = h_f^* m_n$$

(3) 全齿高 h_0

$$h_0 = (2h_a^* + c^*)m_n$$

(4) 法向齿距 p_{0n}

$$p_{0n} = \pi m_n$$

(5) 法向齿厚 s_{0n}

$$s_{0n} = p_{0n}/2 + \Delta s$$

式中 h_a^* ——齿轮齿顶高系数;

c^* ——齿轮顶隙系数;

h_f^* ——齿轮齿根高系数;

m_n ——齿轮法向模数;

Δs ——齿轮滚刀齿厚增量,见表 23.2-15。

表 23.2-15 全切式小模数齿轮滚刀齿厚增量 Δs 值

m/mm	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
$\Delta s/\mu\text{m}$	8	8.5	9	9.5	10	11	12
m/mm	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0	
$\Delta s/\mu\text{m}$	14.5	17	20	23.5	27	31	

2. 轴向齿形尺寸计算公式

(1) 轴向齿距 p_{0x}

$$p_{0x} = p_{0n}/\cos\gamma_0$$

(2) 轴向齿厚 s_{0x}

$$s_{0x} = s_{0n}/\cos\gamma_0$$

(3) 轴向齿形角 α_{0x}

$$\cot\alpha_{0x} = \cot\alpha_n \cos\gamma_0$$

式中 γ_0 ——滚刀分度圆柱螺旋导程角;

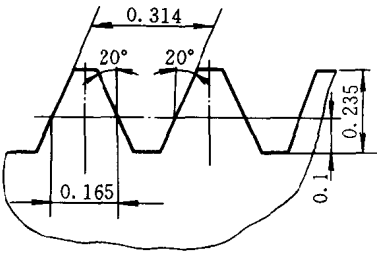
α_n ——法向齿形角。

全切式小模数齿轮滚刀设计计算实例见表 23.2-16。

表 23.2-16 全切式小模数齿轮滚刀设计计算实例

被加工齿轮参数		$m_n=0.1\text{mm}, z_1=24, z_2=50, \alpha_n=20^\circ, h_a^*=1, h_f^*=1, c^*=0.35$			
序号	计算项目	符号	计算公式	计算结果	
1	结构基本尺寸				
	1) 外径	d_a	按表 23.2-14 选取	$d_a=25\text{mm}$	
	2) 孔径	D		$D=8\text{mm}$	
	3) 槽(齿)数	Z_k		$Z_k=12$	
2	法向齿形尺寸				
	1) 齿顶高	h_{a0}	$h_{a0} = (h_a^* + c^*)m_n$	$h_{a0}=0.135\text{mm}$	
	2) 齿根高	h_{f0}	$h_{f0} = h_f^* m_n$	$h_{f0}=0.1\text{mm}$	
	3) 全齿高	h_0	$h_0 = h_{a0} + h_{f0}$	$h_0=0.235\text{mm}$	
	4) 法向齿距	p_{0n}	$p_{0n} = \pi m_n$	$p_{0n}=0.314\text{mm}$	
	5) 法向齿厚	s_{0n}	$s_{0n} = \frac{p_{0n}}{2} + \Delta s$ Δs 查表 23.2-15	$s_{0n}=0.165\text{mm}$	

(续)

序号	计算项目	符号	计算公式	计算结果
3	切削部分 1) 前角 2) 铲背量 3) 槽形角	γ K θ	$\gamma=0^\circ$ $K=\frac{\pi d_a}{Z_k} \tan \alpha_a \alpha_a=6^\circ 28'$ θ 查表 23.2-14	$\gamma=0^\circ$ $K=0.742\text{mm}$ $\theta=45^\circ$
4	分度圆直径	d_0	$d_0=d_{a0}-2h_{a0}-(0.2\sim 0.4)K$	$d_0=24.507\text{mm}$
5	分度圆螺旋导程角	γ_0	$\gamma_0=\arcsin(m_n/d_0)$	$\gamma_0=14' 2''$
6	轴向齿形尺寸 1) 轴向齿距 2) 轴向齿厚 3) 轴向齿形角	p_{0x} s_{0x} α_{0x}	$p_{0x}=p_m/\cos\gamma_0$ $s_{0x}=s_n/\cos\gamma_0$ $\cot\alpha_0=\cot\alpha_n/\cos\gamma_0$	$p_{0x}=0.314$ $s_{0x}=0.165$ $\alpha_0=20$
7	滚刀螺旋方向		一般为右旋	右旋
8	滚刀齿廓		 <p>$m=0.1\text{mm}$ 全切式滚刀齿廓</p>	

1.6.4 小模数计时仪器用圆弧齿轮滚刀齿形设计

(1) 滚动圆半径 $R_{滚}$ 计算

$$R_{滚} \leq \sqrt{R_c^2 + \rho_a^2 / \zeta}$$

式中 R_c —— 齿轮中心圆半径 (mm);

ρ_a —— 齿轮齿顶圆弧半径 (mm);

ζ —— 系数, 当齿轮齿数 $z \leq 12$ 时, $\zeta > 27$, 当 $z > 12$ 时, $\zeta = 27$.

(2) 滚刀齿根部分计算公式 齿轮滚刀齿根齿廓, 是按齿轮齿顶圆弧包络形成。滚切时, 齿轮以半径 $R_{滚}$ 沿滚刀齿条节线作纯滚动, 其圆心 O_c 的摆线方程为

$$x = R_{滚} \varphi - R_c \sin \varphi$$

$$y = R_{滚} - R_c \cos \varphi$$

变换坐标后 (见图 23.2-6) 方程为

$$x_1 = R_{滚} \varphi - R_c \sin \varphi - R_{滚} \theta$$

$$y_1 = R_{滚} - R_c \cos \varphi$$

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = \rho_a^2$$

$$(x - x_1) \frac{dx_1}{d\varphi} + (y - y_1) \frac{dy_1}{d\varphi} = 0$$

$$\frac{dx_1}{d\varphi} = R_{滚} - R_c \cos \varphi \quad \frac{dy_1}{d\varphi} = R_c \sin \varphi$$

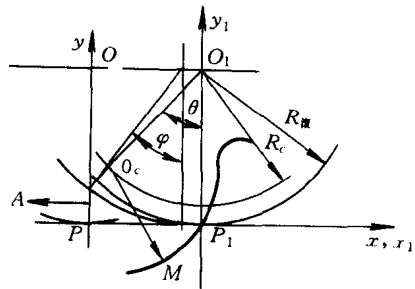


图 23.2-6 滚刀齿根部分的计算

$$x = R_{滚}(\varphi - \theta) - R_c \sin \varphi + \frac{\rho_a R_c \sin \varphi}{\sqrt{R_{滚}^2 - 2R_{滚} R_c \cos \varphi + R_c^2}}$$

$$y = R_{滚} - R_c \cos \varphi - \frac{\rho_a (R_{滚} - R_c \cos \varphi)}{\sqrt{R_{滚}^2 - 2R_{滚} R_c \cos \varphi + R_c^2}}$$

$$\varphi = \arccos \left[\frac{R_c}{R_{滚}} (1 - K^2) + K \sqrt{1 - \frac{R_c^2}{R_{滚}^2} (1 - K^2)} \right]$$

$$k = \frac{R_{滚} \cos \varphi - R_c}{\sqrt{R_{滚}^2 - 2R_{滚} R_c \cos \varphi + R_c^2}}$$

$$\theta = \arccos (R_{滚}^2 + R_c^2 - \rho_a^2) / (2R_{滚} R_c)$$

式中 x, y ——在 xpy 坐标系中的坐标值；
 x_1, y_1 ——在 $x_1p_1y_1$ 坐标系中的坐标值；
 $R_{滚}$ ——滚动圆半径；
 R_c ——齿轮中心圆半径；
 φ, θ ——参数角。

$$x = R_{滚} \arccos \frac{R_c}{R_{滚}} \frac{R_c}{R_{滚}} \sqrt{R_{滚}^2 - R_c^2}$$

$$y = \frac{R_{滚}^2 - R_c^2}{R_{滚}}$$

式中 $R_{滚}$ ——滚动圆半径；
 φ ——滚动参数角；
 K_1 ——斜率；
 R_c ——齿轮径向直线参数值。

(3) 滚刀齿顶部分的计算 滚刀齿顶齿廓,是根据齿轮齿根径向直线包络形成的,见图 23.2-7,取 x 轴为滚刀节线,滚动圆圆心 O 在 y 轴上,径向直线与 y 轴重合,当滚动齿轮转过 φ 角时,圆心 O 移到 O' 。AO 变成 A_1O' ,则

$$y_1 - y = K_1(x_1 - x)$$

$$y_1 = y_0 \quad x_1 = R_{滚} \varphi$$

$$K_1 = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \cot \varphi$$

$$x = \frac{R_{滚}}{2}(2\varphi - \sin 2\varphi)$$

$$y = \frac{R_{滚}}{2}(1 - \cos 2\varphi)$$

$$R_c = R_{滚} \cos \varphi$$

$$\sin \varphi = \frac{1}{R_{滚}} \sqrt{R_{滚}^2 - R_c^2}$$

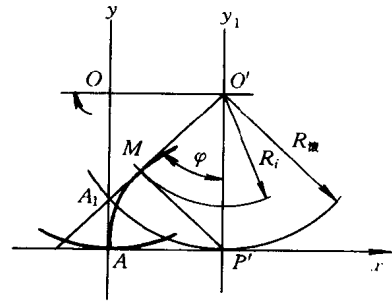
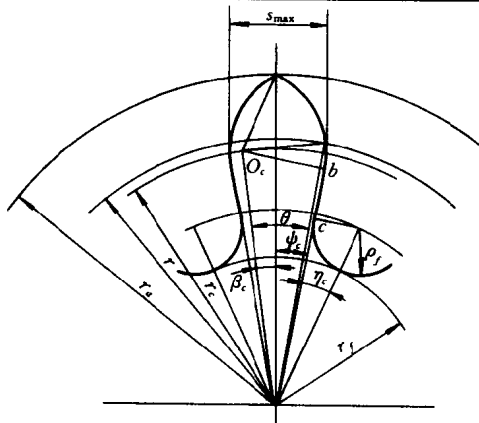


图 23.2-7 滚刀齿顶部分的计算

(4) 计算举例 小模数计时仪器用圆弧齿轮滚刀
 计算实例见表 23.2-17。

表 23.2-17 计时仪器用圆弧齿轮滚刀齿形计算



$m=0.08\text{mm}, z_1=8, r=0.32\text{mm}, c=0.3072\text{mm}, \rho_a=0.1502\text{mm}, r_a=0.405205_{0.0075}^0\text{mm}, r_f=0.2008_{-0.015}^0\text{mm},$
 $\tau=45^\circ, s_n=0.10443_{-0.012}^0, \rho_f=0.05161\text{mm}$

序号	计算项目	代号	计算公式	计算结果
1	齿厚系数	s_i	$s_i = \left[\arccos \frac{r^2 + r_c^2 - \rho_a^2}{2rr_c} - \arcsin \frac{2\rho_a - s_{\max}}{2rr_c} \right] z / 360^\circ$	
2	参数角	β_c	$\beta_c = \arccos(r^2 + r_c^2 - \rho_a^2) / (2r)r_c - \arcsin \frac{s_{\max}}{2r_c}$	18.223358°
3	齿顶圆半径	r_a	$r_a = r_c \cos \beta_c + \sqrt{\rho_a^2 - r_c^2 \sin^2 \beta_c}$	0.407252
4	齿厚中心半角	φ	$\varphi = \arcsin(\rho_a - r_c) - \beta_c$	11.047070
5	齿槽中心半角	η_c	$\eta_c = \tau / 2 - \varphi$	11.452930
6	齿根圆半径	r_f	$r_f = r_f - \Delta r_f / (2-3)$	0.197