

行星摆线齿轮 铣刀及滚刀的设计

云海 编著

机械工

721

社

行星摆线齿轮铣刀及滚刀用于加工摆线针轮减速器中摆线齿轮的齿形。本书系统地阐述了行星摆线齿轮铣刀及滚刀的基本理论及设计计算方法。

全书共分五个部分：摆线针轮减速器简介；各类外摆线；行星摆线齿轮铣刀的设计；行星摆线齿轮滚刀的设计；用电子计算机辅助行星摆线齿轮滚刀设计。

第五部分介绍了常用的 BASIC 语言、FORTRAN 语言、ALGOL60 语言。“语法”清晰，例题丰富，通俗易懂。

本书可供从事齿轮刀具研究、设计的技术人员以及大专院校有关专业师生参考，对于理科数学专业的师生，可作为联系生产实际的辅助读物，对于学习算法语言的读者，本书也是较好的自学教材。

行星摆线齿轮铣刀及滚刀的设计

云海 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{7}{8}$ · 字数 128 千字

1983 年 1 月北京第一版 · 1983 年 1 月北京第一次印刷

印数 40,001—7,000 · 定价 0.65 元

*

统一书号：15033 · 5469

前 言

早在 2200 多年前，我国就出现了铜铸齿轮，轮齿呈三角形，齿形为直线，不需特殊刀具加工。

钟表机构中采用了摆线齿轮，齿形为普通外摆线，因而也就出现了钟表齿轮滚刀（摆线齿轮滚刀）。

渐开线齿轮传动具有一系列优点，因此在机器和仪器中得到广泛应用。加工渐开线齿形的齿轮滚刀，则是目前应用得最广泛、研究得最深入的刀具之一。

近年来，采用变幅外摆线等距线作齿轮齿形的行星摆线针轮减速器，比较渐开线传动具有更多的优点，因此，在许多情况下又有代替渐开线齿轮减速器的趋势。目前，摆线针轮减速器正越来越广泛地应用于石油、化工、纺织、印染、轻工、食品、起重、运输、冶金、矿山、医药、造纸、船舶、建筑以及国防工业等部门。因此，研究行星摆线齿轮齿形加工的刀具，就成了目前迫切需要解决的重要课题。

新型刀具常是伴随着新型机械零件的出现而出现的。行星摆线齿轮滚刀就是在这种情况下出现的新型刀具（为了与钟表齿轮加工中的摆线齿轮滚刀相区别，这种摆线齿轮滚刀前面加上“行星”两个字）。

采用行星摆线齿轮滚刀加工，生产率很高，且可使用普通滚齿机，无需特殊工装，机床调整亦很简单，与加工普通直齿齿轮相同。但由于 Y 38 滚齿机能使用的最大滚刀直径为 $\phi 125$ ，当摆线齿轮的偏心距 $A \geq 3$ ，滚刀直径需大于

$\phi 125$ 时, 就不能采用滚齿加工 (如有大滚齿机自当别论), 只能用行星摆线齿轮铣刀在普通铣床上按仿形法加工。

行星摆线齿轮铣刀及滚刀是新近出现的一种刀具, 对它的研究还很不充分。本书将系统地论述这两种刀具的基本理论及设计计算方法, 并以电子计算机辅助设计为主线, 贯穿于刀具设计部分的始终。全书将分五部分: 第一部分简单地介绍摆线针轮减速器, 这些知识对于设计摆线齿轮加工刀具是必要的; 第二部分介绍各类外摆线, 为铣刀及滚刀的齿形计算打下基础; 第三、四部分分别阐述铣刀及滚刀的设计计算方法, 其中齿形计算是关键, 在导出齿形计算公式后 (建立数学模型), 为电子计算机辅助设计打下基础。

为了制造上的方便, 用圆弧代替铣刀及滚刀复杂的齿形, 是国内外还没有解决的新课题。本书解决了用圆弧代替理论齿形的计算方法, 并导出了代圆参数的计算公式, 这种计算方法已应用于实际生产中。

把电子计算机引进刀具设计计算的领域, 这是一个崭新的课题。因此, 本书第五部分介绍科学计算上常用的 BASIC 语言、FORTRAN 语言、ALGOL60 语言, 其中有“语法”, 有举例, 通俗易懂, 并有铣刀及滚刀各种计算的源程序, 可直接上机计算, 亦可作为读者练习编写程序的参考。

限于作者的水平, 书中会有这样那样的错误, 希望读者不吝指正。

目 录

前言

一、摆线针轮减速器简介	1
二、各类外摆线	5
1. 第一种形成外摆线的方法	6
2. 第二种形成外摆线的方法	9
3. 两种方法的等效关系	11
三、行星摆线齿轮铣刀的设计计算	13
1. 铣刀齿形的确定	13
2. 用圆弧代替铣刀齿形曲线	20
3. 铣刀的结构尺寸及主要技术条件	27
4. 铣刀的设计计算举例	29
四、行星摆线齿轮滚刀的设计计算	33
1. 滚刀齿形的计算	34
2. 滚刀的结构尺寸	131
3. 滚刀的主要技术条件	135
4. 滚刀的设计计算举例	143
五、用电子计算机辅助行星摆线齿轮滚刀设计	147
1. 算法语言概述	147
2. BASIC 语言简介	148
3. FORTRAN 语言简介	165
4. ALGOL60 语言简介	175
参考资料	182

一、摆线针轮减速器简介

早在二十年代，就已开始采用变幅外摆线等距线作齿廓，研制成功了行星摆线针轮减速器。

变幅外摆线等距线的顶部为外凸曲线，根部为内凹曲线，过渡圆滑，传动平稳。根部是内凹曲线，对接触强度有利。齿高短，对弯曲强度有利。

为了缩小减速器的体积，通常是把摆线齿轮放在针轮里面，作成内啮合传动，并且摆线齿轮的齿数较针轮的齿数少一个齿。传动时，摆线齿轮作行星运动，所以叫做内啮合一齿差行星摆线针轮减速器。为了简单起见，以后我们就叫它摆线针轮减速器。

摆线针轮减速器传动原理如图1所示。针轮 Z 与机壳联成一体，摆线齿轮 B 作行星运动，运动由转臂 H 输入，经过行星齿轮减速后，由 W 机构将行星齿轮的运动传递到与转臂 H 同心的 V 轴上，由 V 轴输出。

转化轮系的传动比为：

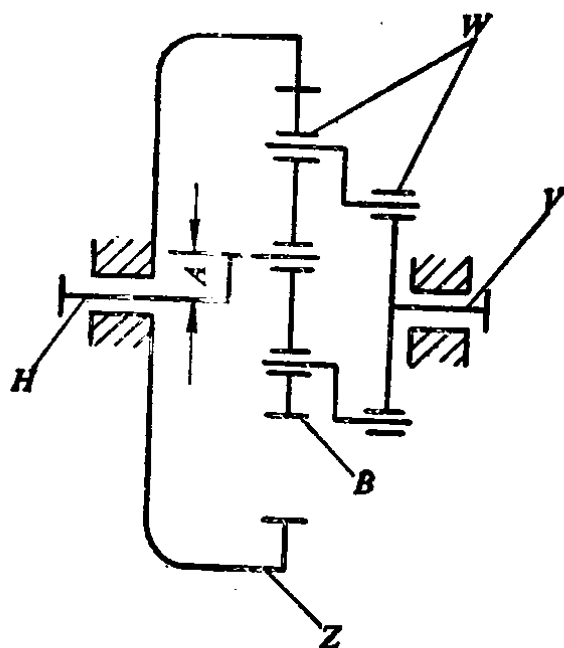


图1 摆线针轮减速器
传动原理图

$$i = \frac{n_B - n_H}{n_Z - n_H}$$

当转臂 H 不动, $n_H = 0$, 其传动比为:

$$i_{BZ}^H = \frac{n_B}{n_Z} = \frac{Z_Z}{Z_B}$$

当针轮 Z 固定时, $n_Z = 0$, 其传动比为:

$$i_{HB}^Z = \frac{n_H}{n_B} = -\frac{Z_B}{Z_Z - Z_B}$$

通常取 $Z_Z - Z_B = 1$ (即一齿差传动), 则:

$$i_{HB}^Z = -Z_B$$

亦即针轮固定时, 其传动比等于摆线齿轮的齿数, 转向与转臂 H 的转向相反。

当摆线齿轮 B 不动时, 即 $n_B = 0$, 则:

$$i_{HZ}^B = Z_Z$$

亦即摆线齿轮不动时, 其传动比等于针轮的齿数。

摆线针轮减速器具有下列突出的优点:

(1) 传动比大。通常一级蜗轮的传动比为 $8 \sim 60$, 普通平行轴双级渐开线齿轮的传动比为 $7.1 \sim 45$, 而摆线针轮减速器的单级传动比为 $11 \sim 87$, 双级可达 7569 , 三级可达 20339 , 多级组合可实现极高的减速比。

(2) 结构紧凑, 体积小, 重量轻。这类减速器高速轴和低速轴位于同一轴线, 摆线齿轮放在针轮里面, 因而结构可以作得很紧凑。与同传动比、功率相近的其他类型减速器相比, 体积、重量可减少 50% 左右。摆线针轮减速器与 JZQ 型减速器 (即渐开线双级圆柱齿轮减速器) 在满负荷、连续工作、同等速比条件下所传递功率、体积、重量等指标的比较如表 1 所示。

表1 摆线针轮减速器与渐开线齿轮减速器的比较

产 品 型 号	传递功率 kW	传动比	重 量 kg	体 积 (长×宽×高)(毫米 ³)
BW180	3	23	42	330×290×265
JZQ250	1.8	23.34	100	540×440×330
BW220	5.5	23	92	400×330×310
JZQ350	4.1	23.34	198	730×530×400
BW270	10	23	141	460×400×380
JZQ400	8.5	23.34	246	830×600×490
BW330	17	23	234	550×470×460
JZQ500	14.6	23.34	390	990×680×590
BW390	22	23	372	670×560×530
JZQ650	23	23.34	807	1280×880×790

注：BW——摆线针轮减速器。

JZQ——双级平行轴渐开线圆柱齿轮减速器。

(3) 效率高。据测定，单级摆线针轮减速器带针齿套的产品平均效率为88~95%，比单级蜗轮减速器的传动效率高很多。

(4) 运转平稳、噪声小。普通产品的噪声为65分贝(沙沙作响的树叶声大约是20分贝，人们轻声耳语音是30分贝，40分贝是正常环境，50分贝还认为是安静的，公共汽车的噪声是80分贝)。如果某些机器在使用时需特殊限制噪声，还可使噪声进一步减小。

(5) 超负荷能力强、寿命长。摆线针轮减速器对冲击负荷有较强的承受性，一般短期超载能力为名义扭矩的250%。

实际使用表明：这种减速器寿命很长，一般可达10年以上，比渐开线齿轮减速器寿命长2~3倍。

这种减速器在许多情况下可代替二级、三级渐开线齿轮

减速器及蜗轮减速器，故为世界各国所重视。我国亦正在推广。

针轮的齿是圆柱形套筒状的针齿套，加工时不需特殊刀具。摆线齿轮的齿廓（变幅外摆线的等距线），可用成形铣刀在普通铣床上铣制，亦可按照齿廓形成原理用专用夹具借助于立铣刀或凸半圆铣刀在铣床上铣出，亦可用专用辅具在插齿机上插制，还可利用行星摆线齿轮滚刀在滚齿机上按加工直齿圆柱齿轮的方法调整机床加工出来。成批生产时，可在专用的 Y 3250 型半自动摆线铣齿机上进行粗铣（该机床所加工的摆线齿轮的规格：最大直径 $\times$ 最大偏心距 $\times$ 工件宽度为 $500 \times 8 \times 150$ 毫米），可在 Y 7654 型摆线磨齿机上作精加工（该机床可磨削各种类型等距变幅外摆线齿轮）。

在某些情况下，摆线齿轮不允许放在针轮里面，如搅拌机、球磨机等，采用的则是外啮合摆线针轮减速装置。

随着摆线针轮减速器得到越来越广泛的应用，使得加工摆线齿轮齿廓的刀具的设计和制造问题也越来越突出了。

由于摆线齿轮的齿形是一条相当复杂的曲线，因而滚刀的齿形就更加复杂。为了弄清楚摆线齿轮的齿形曲线及滚刀齿形曲线，得从基本的外摆线谈起。

二、各类外摆线

当动圆在定圆的外圆周上滚动时，动圆上一点的运动轨迹称为外摆线。当动圆在定圆的内圆周上滚动时，动圆上一点的运动轨迹称为内摆线。

如图 2 所示。当动圆 r 在定圆 R 的外圆周上作无滑动的滚动时，固连于动圆上一点 P 的运动轨迹是外摆线。 P 点到

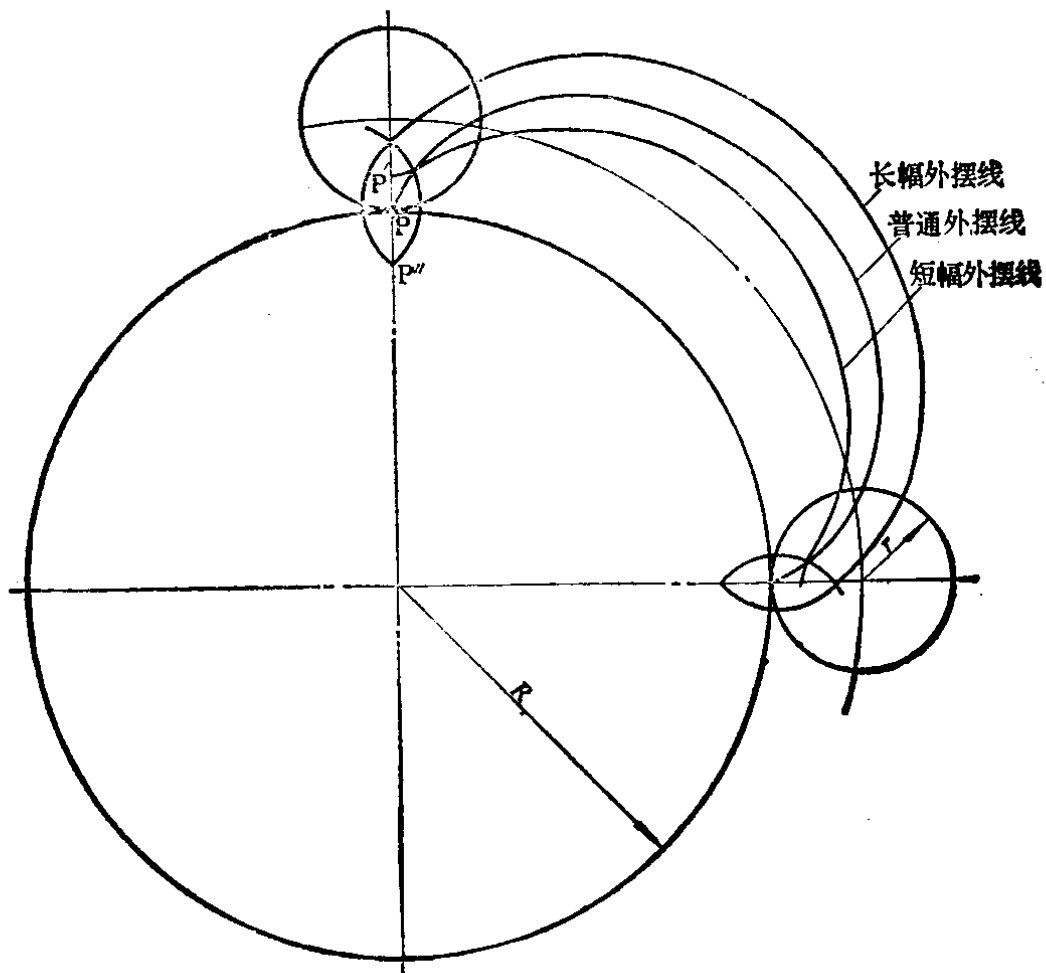


图 2 外摆线

动圆圆心的距离等于动圆的半径 r ，所得到的曲线称之为普通外摆线。 P' 点到动圆圆心的距离小于动圆半径，其运动轨迹称为短幅外摆线。反之， P'' 点到动圆圆心的距离大于动圆半径，其运动轨迹称为长幅外摆线。内、外摆线均有普通、长幅、短幅之分。长幅、短幅摆线统称为变幅摆线。

外摆线可由两种方法形成：一种方法是动圆以其外圆周在定圆的外圆周上滚动，如图 3 所示。一种方法是动圆以其内圆周在定圆的外圆周上滚动，如图 4 所示。可以证明，在某种特定情况下，两种方法可得到同样一根外摆线。

1. 第一种形成外摆线的方法

如图 3 所示。动圆半径为 r ，定圆半径为 R 。动圆以其

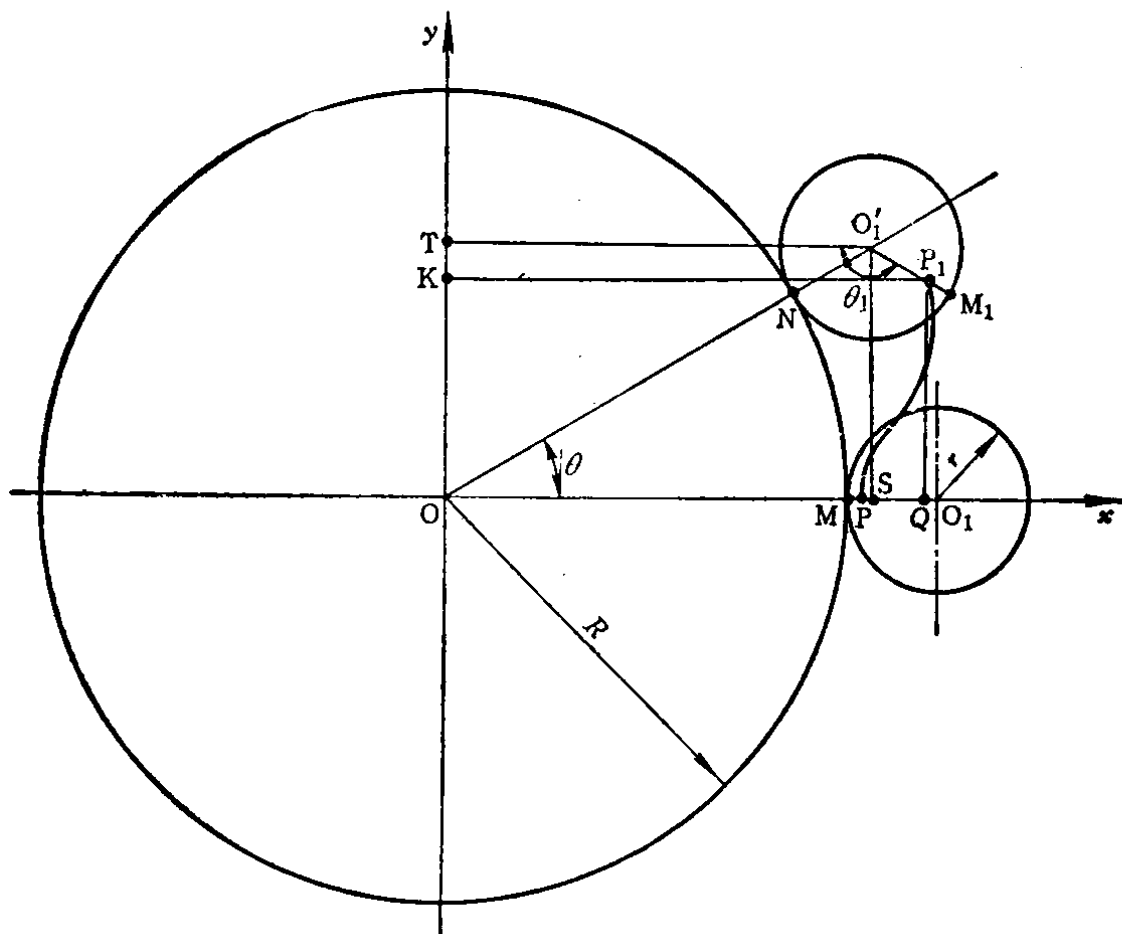


图 3 第一种形成外摆线的方法

外圆周在定圆外圆周上滚动。固连于动圆上一点 P 的运动轨迹为摆线 PP_1 。

$$O_1P = O_1'P_1 = e$$

$$\widehat{MN} = \widehat{M_1N}$$

即：

$$R\theta = r(\theta_1 - \theta)$$

$$\theta_1 = \left(1 + \frac{R}{r}\right)\theta$$

$$\angle O_1'P_1K = 180^\circ - \theta_1$$

摆线上 P_1 点的座标为：

$$x = OS + SQ$$

式中

$$OS = (R + r)\cos\theta$$

$$SQ = e\cos(180^\circ - \theta_1) = -e\cos\theta_1$$

$$= -e\cos\left(1 + \frac{R}{r}\right)\theta$$

将 OS 与 SQ 之值代入 x 的公式中，得：

$$x = (R + r)\cos\theta - e\cos\left(1 + \frac{R}{r}\right)\theta$$

$$y = OT - TK$$

式中

$$OT = (R + r)\sin\theta$$

$$TK = e\sin(180^\circ - \theta_1) = e\sin\theta_1 = e\sin\left(1 + \frac{R}{r}\right)\theta$$

将 OT 与 TK 之值代入 y 的公式中，得：

$$y = (R + r)\sin\theta - e\sin\left(1 + \frac{R}{r}\right)\theta$$

于是外摆线的座标为：

$$\left. \begin{aligned} x &= (R + r) \cos \theta - e \cos \left(1 + \frac{R}{r} \right) \theta \\ y &= (R + r) \sin \theta - e \sin \left(1 + \frac{R}{r} \right) \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

摆线的座标方程亦可以用 θ_1 作参变数来表达:

$$\theta = \frac{r}{R + r} \theta_1$$

代入 (1) 式, 得:

$$\left. \begin{aligned} x &= (R + r) \cos \left(1 - \frac{R}{R + r} \right) \theta_1 - e \cos \theta_1 \\ y &= (R + r) \sin \left(1 - \frac{R}{R + r} \right) \theta_1 - e \sin \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

如果动点 P 到动圆圆心的距离 e 等于动圆半径, 即:

$$e = r$$

得到的是普通外摆线。

如果动点 P 到动圆圆心的距离 e 小于动圆半径, 即:

$$e < r$$

得到的是短幅外摆线。

如果动点 P 到动圆圆心的距离 e 大于动圆半径, 即:

$$e > r$$

得到的是长幅外摆线。

如果定圆的半径变为无穷大, 即:

$$R = \infty$$

变成动圆在一直线上滚动, 得到的是平摆线。平摆线亦有普通、短幅、长幅之分。

如果动圆的半径变为无穷大, 即:

$$r = \infty$$

于是动圆变成一根直线，此直线在定圆上滚动，其上一定点的运动轨迹为渐开线。因此，渐开线只是摆线的一个特例。此直线上如有若干个定点，则得到若干条渐开线，这些渐开线互为等距线。因此，渐开线的等距线仍为渐开线。渐开线亦有普通、短幅、长幅之分。

2. 第二种形成外摆线的方法

如图 4 所示。动圆 r_{II} 以其内圆周在定圆 R_{I} 的外圆周上滚动。定圆的半径为 R_{I} ，动圆的半径为 r_{II} 。固连于动圆

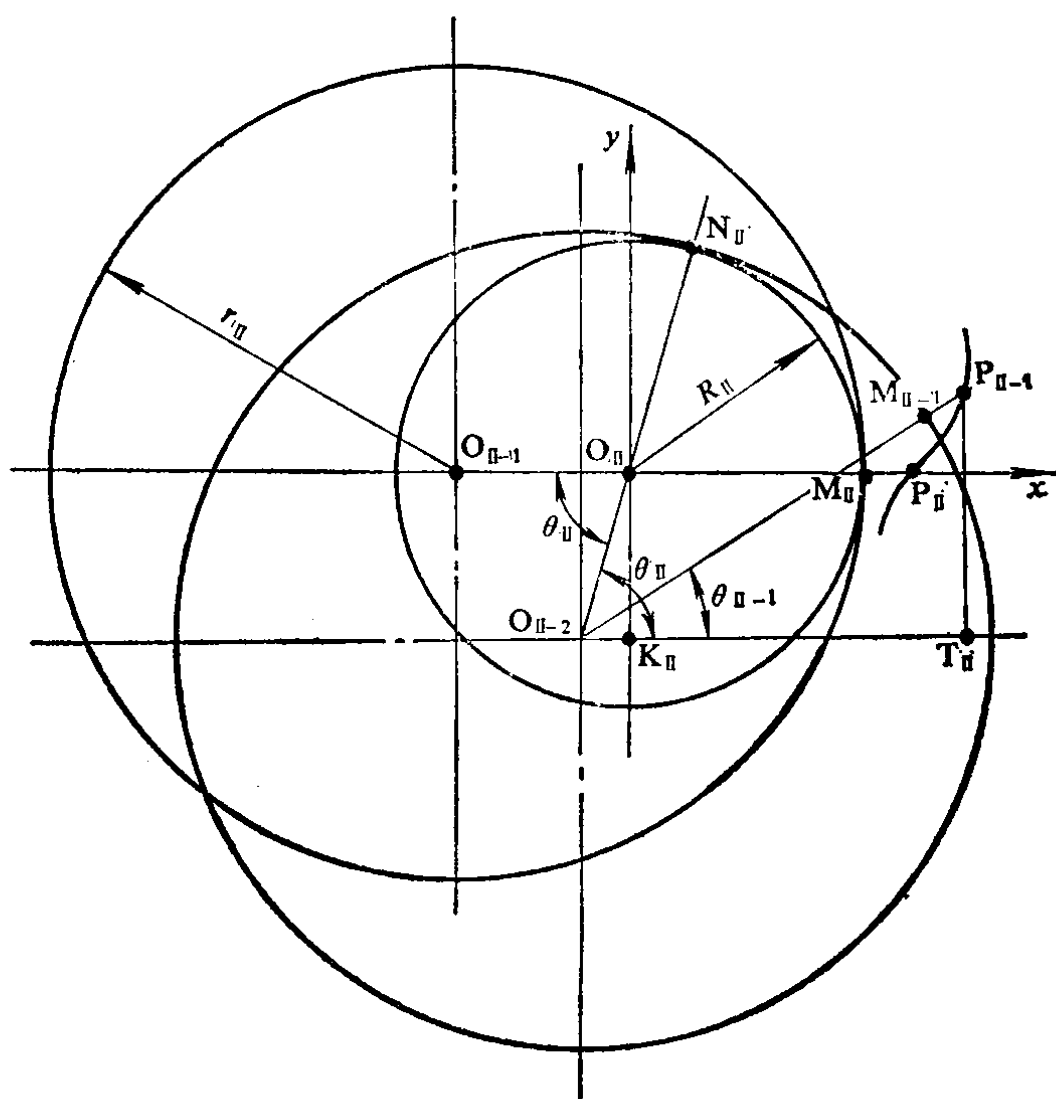


图 4 第二种形成外摆线的方法

上的一点 P_I 的运动轨迹亦为外摆线。 P_I 点到动圆圆心 O_{I-1} 的距离:

$$P_I O_{I-1} = e_I$$

当动圆以其内圆周在定圆外圆周上滚动时, 动圆圆心从 O_{I-1} 移至 O_{I-2} , 动圆上一点 M_I 移至 M_{I-1} , 此时:

$$\widehat{M_I N_I} = \widehat{M_{I-1} N_I}$$

即: $R_I \theta_I = r_I (\theta_I - \theta_{I-1}) = r_I \theta_I - r_I \theta_{I-1}$

$$\theta_{I-1} = \frac{r_I - R_I}{r_I} \theta_I = \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I$$

摆线上 P_{I-1} 点的座标为:

$$x = O_{I-2} T_I - O_{I-2} K_I$$

式中 $O_{I-2} T_I = e_I \cos \theta_{I-1} = e_I \cos \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I$

$$O_{I-2} K_I = (R_I - r_I) \cos \theta_I$$

将 $O_{I-2} T_I$ 及 $O_{I-2} K_I$ 的值代入 x 式中, 得:

$$x = e_I \cos \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I + (R_I - r_I) \cos \theta_I$$

$$y = T_I P_{I-1} - K_I O_I$$

式中 $T_I P_{I-1} = e_I \sin \theta_{I-1} = e_I \sin \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I$

$$K_I O_I = (R_I - r_I) \sin \theta_I$$

将 $T_I P_{I-1}$ 及 $K_I O_I$ 的值代入 y 式中, 得:

$$y = e_I \sin \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I + (R_I - r_I) \sin \theta_I$$

即
$$\left. \begin{aligned} x &= e_I \cos \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I + (R_I - r_I) \cos \theta_I \\ y &= e_I \sin \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I + (R_I - r_I) \sin \theta_I \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

如果动点 P_I 到动圆圆心 O_{I-1} 的距离 e_I 等于动圆半径 r_I , 即:

$$e_I = r_I$$

得到的是普通外摆线。

如果动点 P_I 到动圆圆心 O_{I-1} 的距离 e_I 小于动圆半径 r_I , 即:

$$e_I < r_I$$

得到的是短幅外摆线。

如果动点 P_I 到动圆圆心 O_{I-1} 的距离 e_I 大于动圆半径 r_I , 即:

$$e_I > r_I$$

得到的是长幅外摆线。摆线齿轮齿形采用这种形成方法。

3. 两种方法的等效关系

比较 (3) 式与 (2) 式, 如果令:

$$e_I = R + r$$

$$\frac{R_I}{r_I} = \frac{R}{R + r}$$

$$R_I - r_I = -e$$

将这三个式子代入 (3) 式, 得:

$$\begin{aligned} x &= e_I \cos \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I + (R_I - r_I) \cos \theta_I \\ &= (R + r) \cos \left(1 - \frac{R}{R + r} \right) \theta_I - e \cos \theta_I \\ y &= e_I \sin \left(1 - \frac{R_I}{r_I} \right) \theta_I + (R_I - r_I) \sin \theta_I \\ &= (R + r) \sin \left(1 - \frac{R}{R + r} \right) \theta_I - e \sin \theta_I \end{aligned}$$

我们不妨把 (2) 式再写一遍, 以资比较:

$$x = (R + r) \cos \left(1 - \frac{R}{R + r} \right) \theta_1 - e \cos \theta_1$$

$$y = (R + r) \sin \left(1 - \frac{R}{R + r} \right) \theta_1 - e \sin \theta_1$$

可以看出, 在这种特定情况下, (3) 式可以写成 (2) 式完全相同的形式。由此可以证明, 在上述条件下, 用两种方法可以形成同一根外摆线, 只不过第一种方法形成的短幅外摆线 ($e < r$) 正好是第二种方法形成的长幅外摆线 ($e_1 > r_1$)。摆线针轮减速器中摆线齿轮齿形用的是第一种方法形成的短幅外摆线, 亦即第二种方法形成的长幅外摆线。为了避免混乱, 一些书上就笼统地称之为变幅外摆线。这种曲线上凸下凹, 过渡平滑, 且齿高小, 用于传动特别有利, 只是制造上比较困难。一旦制造摆线齿轮的专用刀具获得妥善解决, 可以预期, 这种减速器将会很快得到推广。