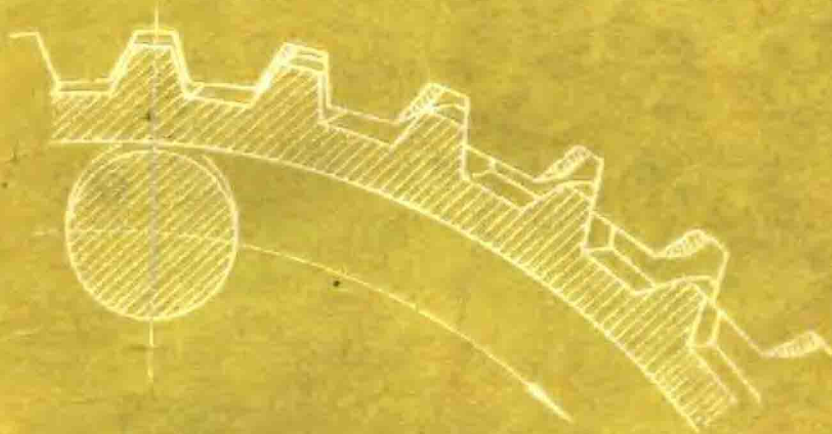


# 谐波齿轮传动

XIEBOCHILUNCHUANDONG



国防工业出版社

## 内 容 简 介

谐波齿轮传动是利用柔性工作元件的弹性变形波进行运动或动力传递的一种新型传动方式，这项技术在国内外发展较快。

本书较为系统地叙述了谐波齿轮传动的基本原理、结构形式、啮合理论以及设计和计算，并推荐采用压力角为 $20^\circ$ 的渐开线齿形作为谐波齿轮齿形的有效方法。

本书可供谐波齿轮机构设计人员、工人和工程技术人员阅读参考。

## 谐波齿轮传动

司光晨 范又功 林祖南 张微元 编著

\*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张4<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 113千字

1978年6月第一版 1978年6月第一次印刷 印数：00,001—20,200册

统一书号：15034·1638 定价：0.46元

## 编者的话

在各种机械设备、测试仪器和自动控制系统中，采用齿轮和蜗轮副等作为传动元件，早已被人们所掌握。

由于社会生产的不断发展，科学技术也必将在解决旧矛盾和研究新问题的过程中得到不断的发展。

谐波齿轮传动技术就是为克服普通齿轮和蜗轮副等元件的一些缺点而产生的，它以其独有的特点日益受到重视，并在国内外获得了较广泛的应用和发展。

遵照伟大领袖毛主席“……要接受新事物，要研究新问题。”的教导，为了进一步运用和研究谐波齿轮传动技术，我们编写了这本书，把这种新型传动技术介绍给读者，并对有关的技术问题作了探讨。

本书内容共分为：

(一) 谐波齿轮传动综述；(二) 谐波齿轮传动平面啮合问题；(三) 谐波齿轮传动的设计与计算；(四) 谐波齿轮传动精度的确定与测试四个部分。

为了便于初次接触这项技术的同志们阅读，本书首先从基本原理、一般结构形式及传动的特点讲起，然后逐步深入。我们还列出了谐波齿轮传动的结构形式、材料选用及热处理规范等有关图表，在设计与计算部分，采用了表格化的形式，力求做到图文呼应，以便给同志们在设计计算时提供方便。

同时，通过本书还将压力角为  $20^\circ$  的渐开线齿形谐波齿轮传动介绍给读者。用  $20^\circ$  压力角的渐开线齿轮刀具加工谐波齿轮的齿形，只要在切齿加工时，进行适当的移距修正就能满足要求。从检验方面来看，可袭用测量渐开线齿轮的一套仪器和方法，也

是较为方便的。这样避免或减少了因设计制造一套谐波齿轮专用刀具的麻烦和困难，明显地缩短了谐波齿轮的制造周期。因此，推荐和普及采用  $20^\circ$  压力角的渐开线齿形作为谐波齿轮的齿形是有一定现实意义的。

但需要指出的是，这种渐开线齿形，并非谐波齿轮的理论齿形。理论齿形在啮合传动中，既有高的运动精度和高的效率，又不致发生干涉，这就是所谓的共轭齿形，或叫共轭齿廓。对于这一问题，我们在本书的第二部分进行了一些分析，并列举了计算例子。

在本书编写过程中，曾得到西北工业大学沈允文同志的热情帮助，谨表示感谢。

由于水平所限，书中谬误之处一定不少，恳切地希望读者予以批评指正。

一九七六年一月

## 谐波齿轮各部分常用名称及其代号

传动比····· $i$	柔轮最大径向变形量····· $\Delta$
模数····· $m$	柔轮径向变形量····· $w$
波数····· $n$	柔轮切向变形量····· $v$
波高····· $d_B$	柔轮节曲线向径····· $\rho$
刚轮齿数 ····· $Z_G$	柔轮变形中线向径····· $\rho_c$
柔轮齿数 ····· $Z_R$	柔轮未变形齿圈的中线圆半径 ····· $R_c$
齿宽····· $b$	
柔轮壁厚····· $H$	钟形柔轮钟形角度····· $U$
柔轮轮缘厚度 ····· $H_1$	钟形柔轮钟形半径····· $R_2$
柔轮轮毂凸缘长度····· $C$	凸轮的向径····· $\rho_T$
柔轮环或筒体长度····· $L$	刚轮移距系数····· $\xi_G$
刚轮分度圆直径 ····· $D_{GF}$	柔轮移距系数····· $\xi_R$
柔轮分度圆直径 ····· $D_{RF}$	柔轮与发生器的包角····· $\beta$
柔轮齿圈处的内径 ····· $D_n$	当量渐开线齿轮的齿数····· $Z_d$
柔轮齿根圆直径 ····· $D_{RG}$	径向间隙系数····· $C_0$
柔轮齿顶圆直径 ····· $D_{RD}$	

# 目 录

谐波齿轮各部分常用名称及其代号

第一章 谐波齿轮传动综述.....	1
第一节 概况 .....	1
第二节 工作原理 .....	5
第三节 传动特点和结构形式 .....	8
第二章 谐波齿轮传动平面啮合问题.....	18
第一节 几个基本问题 .....	18
第二节 柔轮中线质点运动学 .....	53
第三章 谐波齿轮传动的设计与计算.....	62
第一节 结构形式及几何参数的计算 .....	62
第二节 啮合参数的选择与计算 .....	62
第三节 强度校核及材料的选择 .....	88
附一 计算举例 .....	93
附二 零件图和装配图 .....	110
第四章 谐波齿轮传动精度的确定与测试 .....	117
第一节 零件精度与装置误差的确定 .....	117
附 装置频率的估算 .....	125
第二节 主要零件的检验与装置的测试 .....	129
参考文献 .....	137

# 第一章 谐波齿轮传动综述

## 第一节 概 况

齿轮传动是最常用的传动机构之一。齿轮元件的结构形式和质量将直接影响着传动机构的品质。随着科学技术的不断发展,对于各种机械、仪器、仪表的传动机构也提出了相应的要求。例如,在自动化机械化方面,常常要把高速旋转的电机降到很低的转速,这就需要有一个很大速比的减速机构,同时要求它的体积小、重量轻;对一些机械分度机构,既要求它结构简单,又要求它具有较高的分度准确性;对那些高精度跟踪系统的齿轮传动机构,则提出了具有一定齿侧隙、甚至零侧隙的要求,以便准确地跟踪目标;对于某些传动机构,要求它在体积一定的前题下,具有较高的承载能力等等。

在这些情况下,如果我们仍然采用普通齿轮作为它的传动元件,那么,首先必须提高对齿轮元件本身品质的要求;其次对组成传动机构的其他一些元件品质的要求,也需相应提高。尽管如此,对于某些要求来说还是无法满足。例如,向密封空间传递运动,利用普通的齿轮元件就不能实现;又如,要设计一个传动比为 $1035:1$ 、传动机构的体积约为 $25\text{厘米}^3$ 的减速机构,若采用普通的齿轮元件传动也是做不到的。

对于上述这些问题,人们通过生产实践,找到了一些解决办法,我们这里所介绍的谐波齿轮传动,就是其中的一种。

谐波齿轮传动是利用柔性工作构件的弹性变形波进行运动或动力传递的一种新型传动方式。它的特点是:结构简单,零件少,体积小,同时啮合的齿数多,传动精度高,可实现零侧隙传动,

承载能力高，传动比范围大。特别应指出的是，这种传动还可以保证向密封空间传递运动，这是一般传动很难实现的。

正因为谐波齿轮传动具有这些独特的优点，所以获得了多方面的应用。

在一般国防工程方面，谐波齿轮传动用于大功率坦克用的减速器、军用手摇式谐波增速发电机、无线电天线伸缩器的传动机构以及用于雷达天线方位和俯仰的传动机构等。

在宇宙航行方面，谐波齿轮传动用于代替某火箭中液体原动机的谐波齿轮传动马达（它的重量和体积降为原来的十分之一）、卫星外表面的太阳光线接收机的传动机构等。

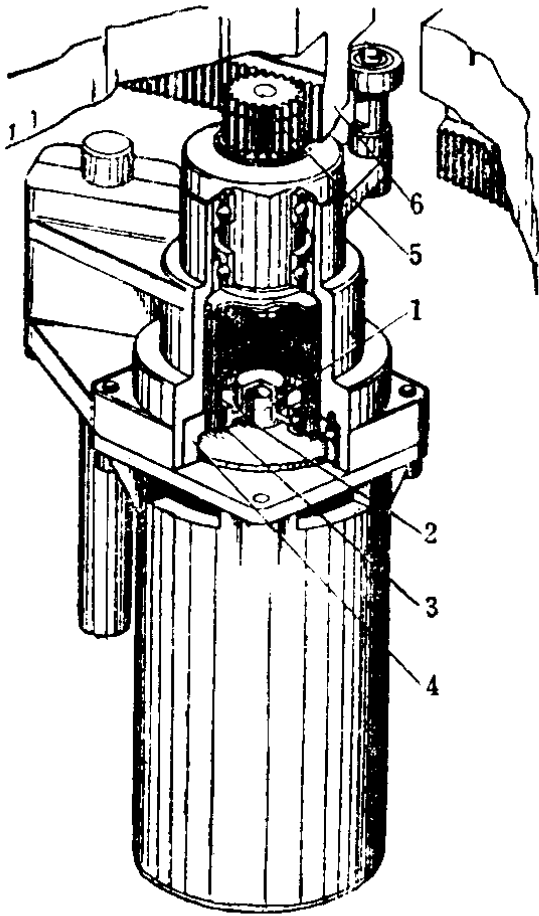


图1-1 雷达天线传动用的谐波齿轮传动装置

1—电机轴；2—发生器；3—柔轮；  
4—刚轮；5—行星轮；6—齿轮。

在飞机工业方面则用于驱动某垂直起落飞机的螺旋桨由上升位置转至水平位置的强力谐波齿轮机构，自动驾驶仪中的传动机构等。

在精密测试方面用于微小位移机构、精密分度机构、小侧隙或零侧隙传动系统等。图 1-3 是装有谐波齿轮的仪器马达减速器。

谐波齿轮传动还可用于低速重载的起重机上的大绞盘；化工纺织使用的立式谐波搅拌机；矿山隧道运输用的井下转辙机和医疗器械高速灵巧的修牙机。除此之外，在航海技术和船舶制造工业方面也有应用。

这项技术近几年来在国内外发展较快，已取得了一定的成



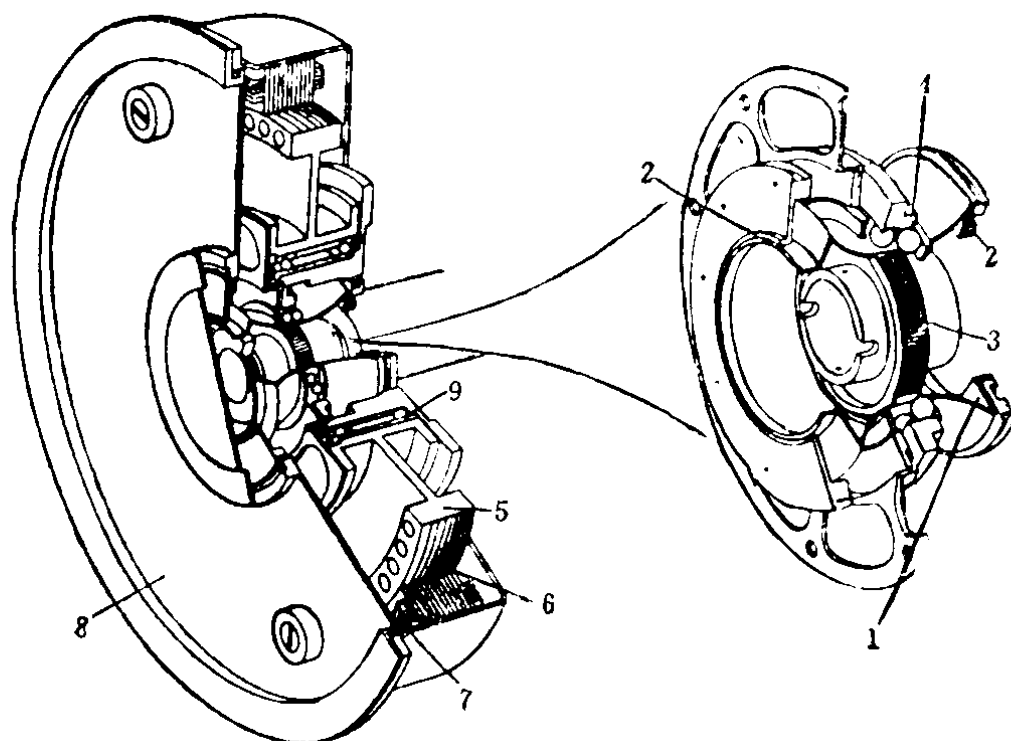


图1-2 用于卫星仪器的谐波齿轮传动装置

1—钟形柔轮；2—密封环；3—刚轮；4—外式发生器；5—电机转子；  
6—电机定子；7—平衡套筒；8—传动壳体；9—电机轴承。

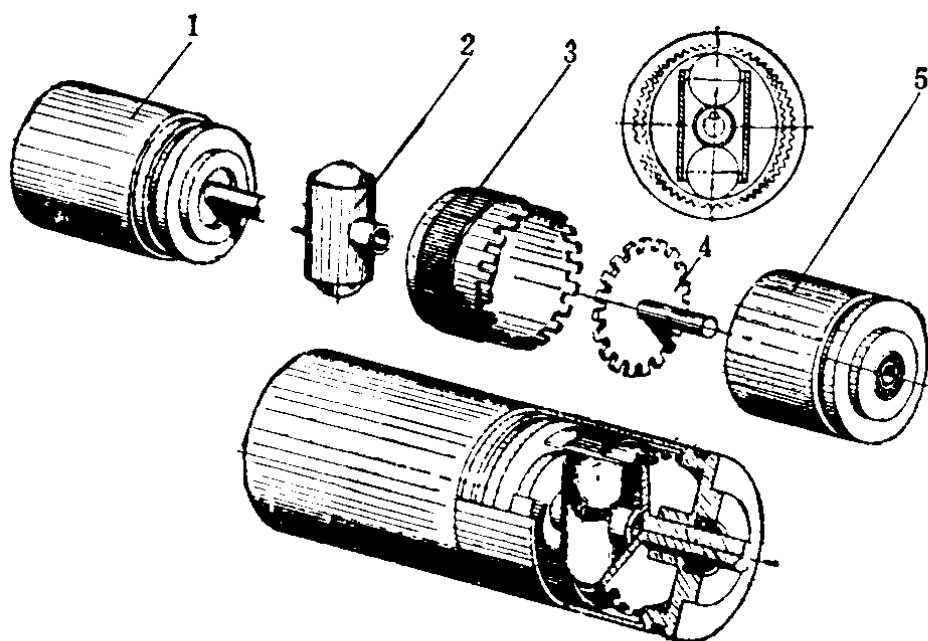


图1-3 仪器马达减速器

1—微形马达；2—波发生器；3—柔轮；4—城墙式联接轴；  
5—刚轮。

效。国外除了美国国家航空及宇宙航行局、陆军研究中心、苏联海军、空军研究中心从事谐波齿轮传动应用问题研究外，美苏还有大约二十几个大公司和大企业与高等院校的研究机构从事谐波齿轮传动的设计、研究与制造。在西德、日本等国中的有关部门也从事了这种传动的设计、制造及其应用问题的研究。

总之，由于科学技术的发展，谐波齿轮传动技术在机械、电气、液压和气动系统、核子反应堆、电离层的研究以及在高速自动化工业设备中都得到了进一步的发展和应。图 1-4 是转换运动方式的谐波齿轮传动机构。

谐波齿轮传动为我们提高产品质量、减轻产品重量、缩小产品体积提供了一条有效途径。这种齿轮将以体积小、传动比大、承载能力高为特征，而取代一些笨重庞大的普通齿轮、蜗轮等传动机构，并将以小功率、高精度、大速比的传动为特征，而逐步地应用于尖端和精密技术中的伺服装置、操纵机构和运动传递机构中。此外，它在密封（高真空）和放射性介质条件下工作的特殊应用中，也必将得到更新的发展。

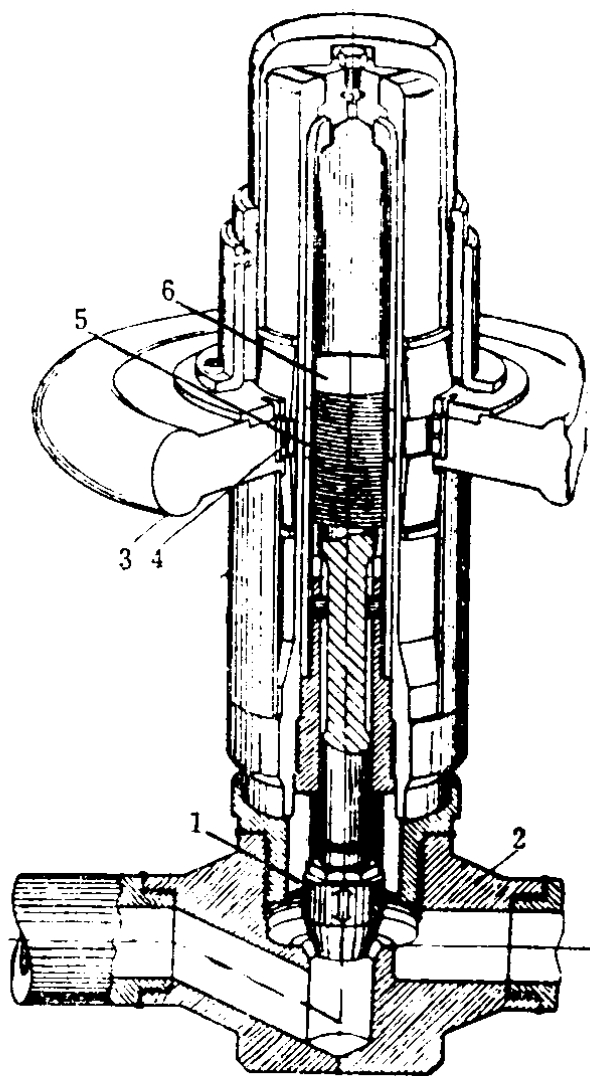


图1-4 转换运动方式的谐波齿轮传动机构

1—阀杆；2—阀体；3—手轮；4—发生器；5—柔性螺母；6—螺杆。

## 第二节 工作原理

谐波齿轮传动机构的基本构件如图 1-5 a 所示有：谐波发生器 1（简称发生器，通常是采用凸轮或偏心安装的轴承）、柔性齿轮 2（简称柔轮）和刚性齿轮 3（简称刚轮）。三个构件中的任何一个皆可为主动，其余两个之一或为从动，或为固定。其传动结构实例及柔轮输出连接形式见图 1-5 b。

谐波齿轮传动运动的传递，是在发生器的作用下，迫使柔轮产生弹性变形，并与刚轮相互作用而达到传动目的。柔轮的变形过程是一个基本对称的和谐波，如图 1-6 所示，故称之为谐波齿轮传动。

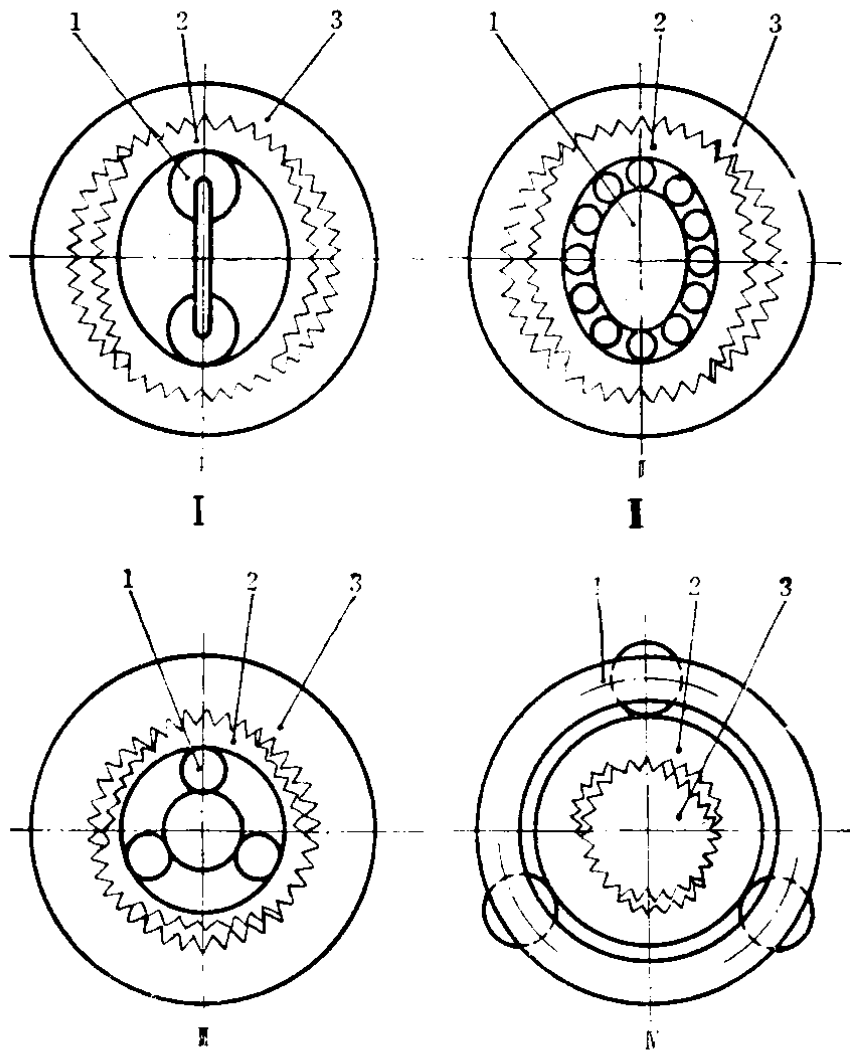


图1-5a 四种结构形式

I、II—双波内发生器形式；III—三波内发生器形式；  
IV—三波外发生器形式。

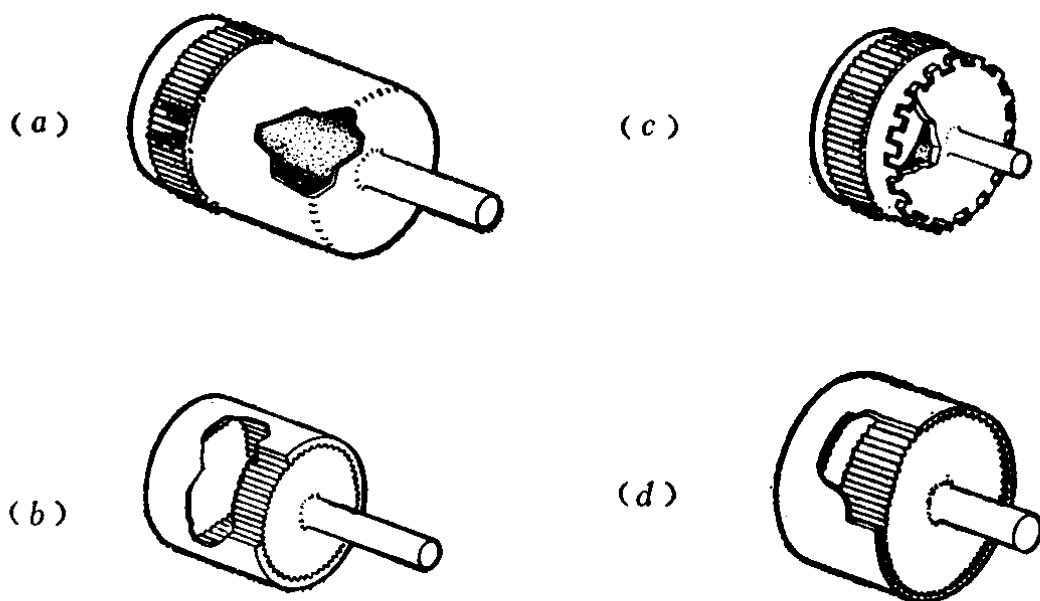
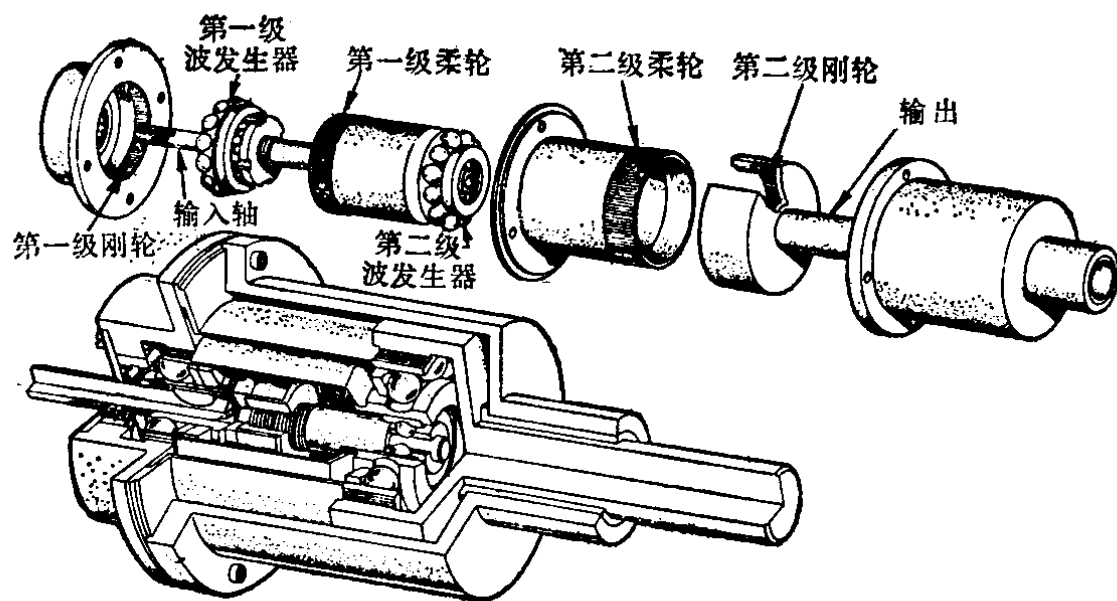


图1-5 b 双级轴向式谐波齿轮传动  
及柔轮输出连接形式

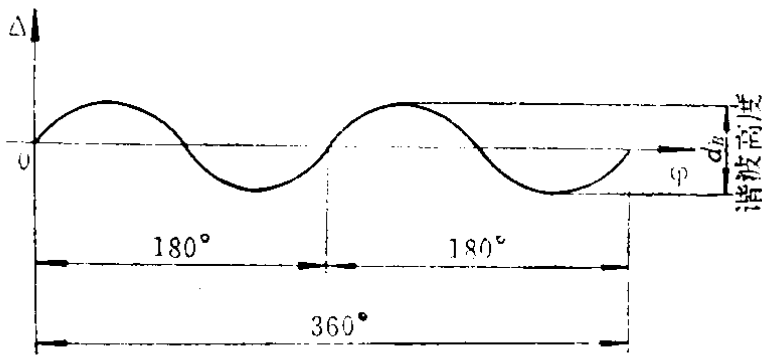


图1-6 柔轮双波变形波波形

在传动中，发生器转一转，柔轮某一点变形的循环次数叫做波数。常用的是双波和三波两种。双波谐波齿轮传动的特点是变形时柔轮的表面应力小，易获得大的传动比，结构较

简单。三波谐波齿轮传动的特点是作用于轴上的径向力小，内应力较平衡，精度较高，但变形时柔轮的表面应力较双波的为大，而且结构较为复杂。图 1-5 a 中的“Ⅰ”是采用触头式发生器的双波传动；“Ⅱ”是采用凸轮薄壁轴承式发生器的双波传动；“Ⅲ”是采用行星式发生器的三波传动；“Ⅳ”是采用外发生器的三波传动。

谐波传动机构的刚轮和柔轮齿的周节相等，但其齿数是不相等的。当采用双波时，齿数之差为 2（或波数的整数倍），即刚轮和柔轮的周长差 2 个齿距的弧长；采用三波时，齿数差为 3（或波数的整数倍）。

现在就图 1-7 的传动形式简述其工作原理如下：令发生器为主动，当它在柔轮内旋转时，就迫使柔轮产生变形，于是柔

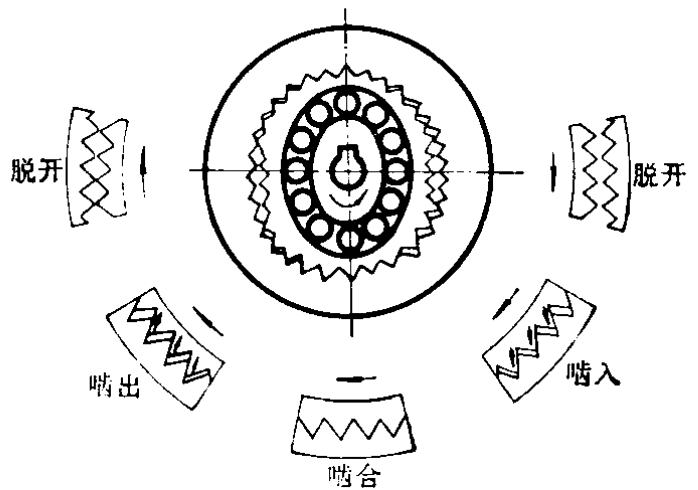


图1-7 啮合过程图

轮的齿就在变形的过程中进入或退出刚轮的齿间。在发生器的长轴方向，刚轮和柔轮的齿完全啮合；而在发生器的短轴方向，刚轮和柔轮的齿则处于完全脱开状态。处于发生器长轴和短轴之间（如  $45^\circ$  方向）的齿，沿周长的不同区段内有的逐渐进入刚轮齿间，处于半啮合状态，我们称它为啮入；有的则逐渐退出刚轮齿间，处

于半脱开状态，我们称它为啮出。由于发生器的连续转动，就使得啮入、啮合、啮出、脱开这四种情况不断地改变着各自原来的工作状态，即啮入变为啮合，啮合变为啮出，啮出变为脱开，脱开变为啮入。这种现象，我们称之为错齿运动。正是这种错齿运动，把输入转动变为输出转动。若刚轮此时固定不动，柔轮则向着与发生器旋转方向相反的方向转动。反之，若柔轮固定不动，刚轮则向着与发生器旋转相同的方向转动。对于双波传动，它的转动规律是：发生器转一转，柔轮相对于刚轮在圆周方向错过两个齿距的弧长；二分之一转时，错过一个齿距的弧长；四分之一转时（ $90^\circ$ ），错过二分之一一个齿距的弧长，依此类推。

为什么会是这样的关系呢？这是因为刚轮和柔轮在节圆处的贴合过程，也如同两个纯滚动（无滑动）的圆环一样，它们在任一瞬间，转过的弧长都必须相等。但因柔轮比刚轮的节圆周长短了2个齿距的弧长，这样一来，为了满足它们在节圆处贴合和转过的弧长相等的条件，柔轮在啮入和退出的一转中，就必然要相对刚轮在圆周方向错过两个齿距的弧长，以保证贴合运动的正常进行。

轮齿随变形波逐渐错齿的过程如图1-8所示。

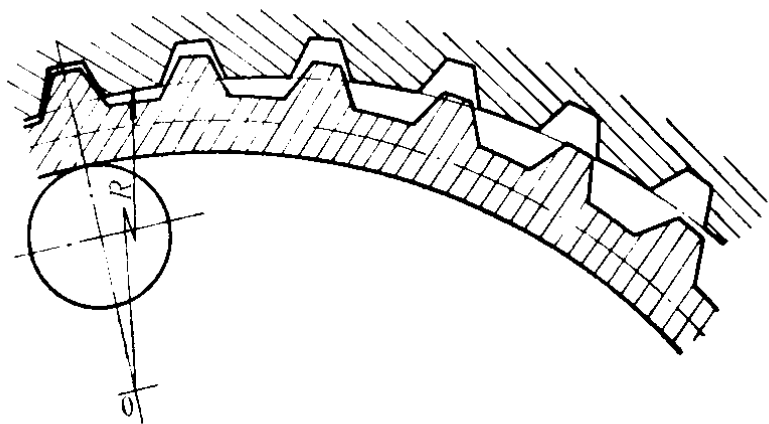


图1-8 错齿过程图

### 第三节 传动特点和结构形式

#### 一、传动特点

1. 谐波齿轮传动机构既可做减速器用，又可做增速器用。三个构件中的任何一个皆可为主动，其余两个之一或为从动，或为固定；

2. 同时啮合的齿数多。在承载情况下，双波传动的啮合齿数

一般可达总齿数的 30~40% 左右，三波传动则更多。而普通渐开线圆柱齿轮同时啮合的齿数一般为两对左右，即重叠系数小于 2；

3. 输出轴和输入轴位于同一轴心线上；

4. 传动比范围大。一般单级谐波齿轮传动，传动比可在 1.002~500 范围内变化；当采用行星式发生器时为 150~4000；若采用复波传动则可达  $10^7$ ；

体积小。在相同的工作条件下，这种传动机构的体积可比普通齿轮减速器的体积减小 20~50% 左右，零件数约少一半，重量也可大大减小；

5. 运动精度高。由于多齿啮合，一般情况下，其运动精度要比同等精度等级的普通齿轮元件所组成的减速器高 4 倍左右。某些精密谐波齿轮传动机构的运动精度已达  $20''$  以内，有的达到了  $9''$  甚至  $6''$ ；

6. 传动效率高。传动装置的总效率可达 60~90%；

7. 在材料的机械性能和传动比相同的情况下，它的承载能力比其他形式的传动为高，传递功率可由不足一瓦到几十千瓦，目前供试验用的谐波齿轮传动已有作到一百多千瓦的；

8. 齿侧隙可由对发生器的调整而得到改变，甚至可获得零侧隙传动；

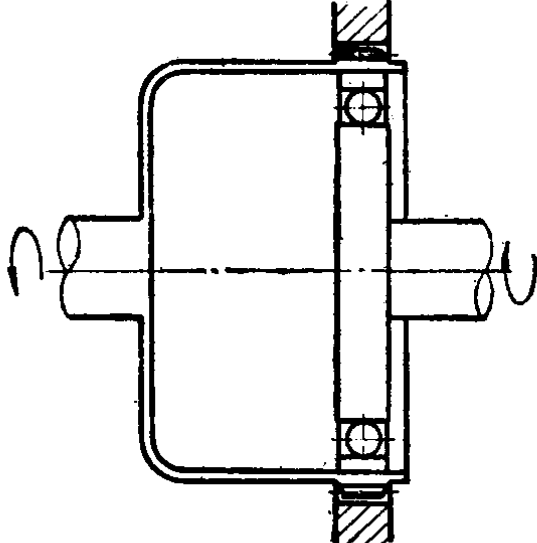
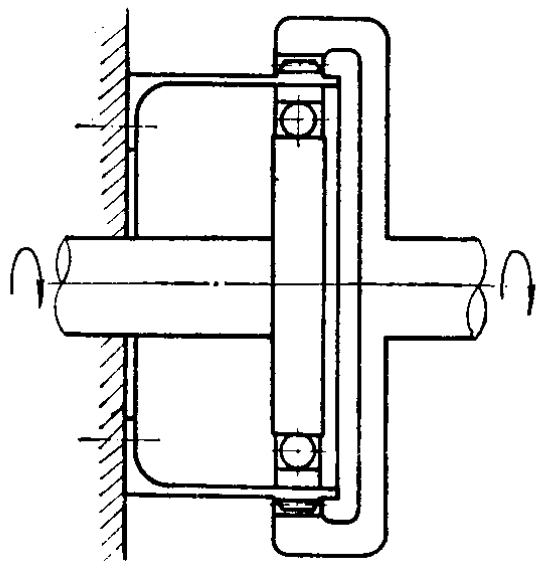
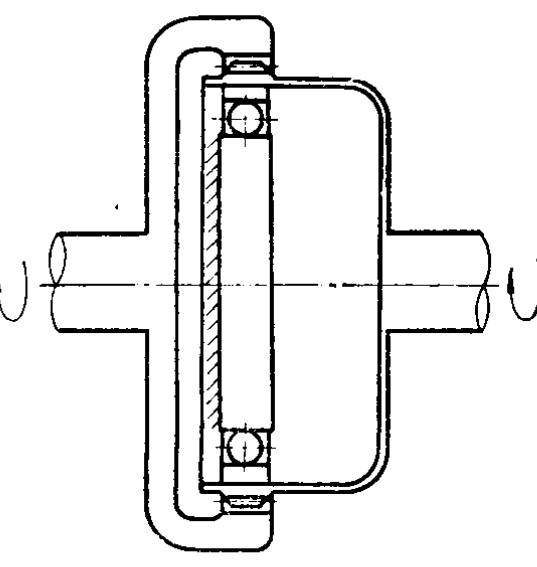
9. 啮合时齿是面接触，滑动速度小，所以磨损小而且均匀。同时齿的啮入和啮出是随柔轮的变形逐渐进入和退出刚轮齿间的，因而运动平稳，无冲击现象；

10. 可实现向密封空间传递运动。因而它用在操纵高温、高压的管路以及用来驱动工作在高真空、有原子辐射或其他有害介质空间的机构，是现有其他一切传动所不能比拟的。

## 二、结构形式

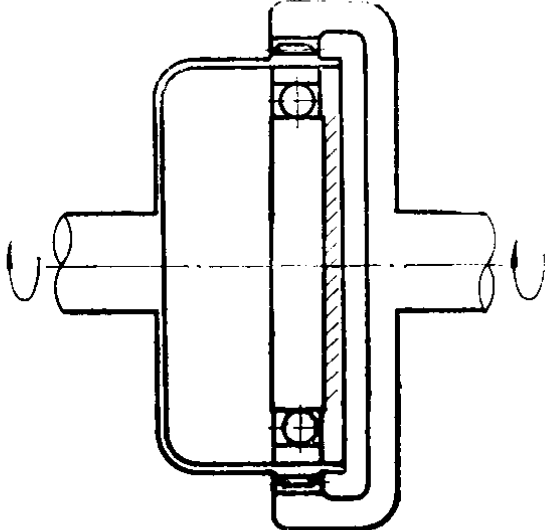
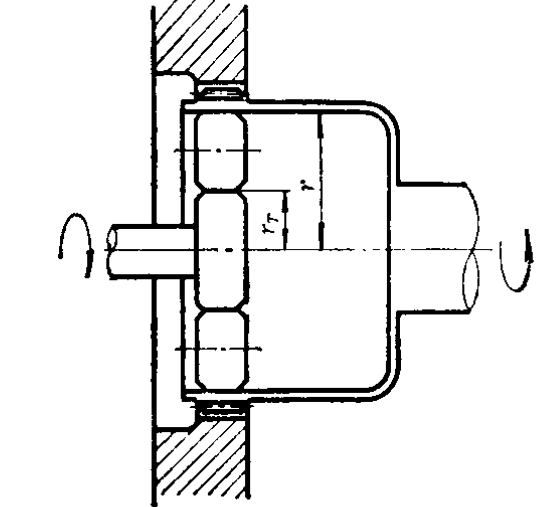
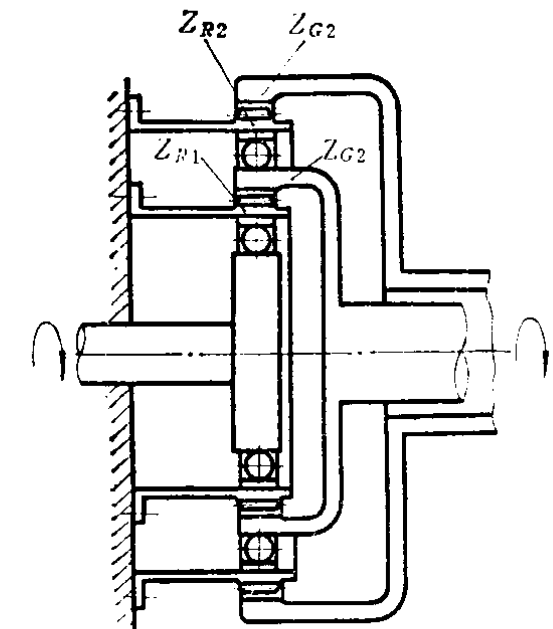
根据传动应用对象的不同，其结构形式可以设计成很多种，现将几种常见的形式列于表 1-1。

表1-1 谐波齿轮传动结构形式

图号	结构形式示意图	说 明
1		<p>刚轮固定, 发生器主动, 单级减速</p> $i = \frac{Z_R}{Z_R - Z_G}$ $i = 75 \sim 5 \times 10^2$
2		<p>柔轮固定, 发生器主动, 单级减速</p> $i = \frac{Z_G}{Z_G - Z_R}$ $i = 75 \sim 5 \times 10^2$
3		<p>发生器固定, 刚轮主动, 单级增速</p> $i = \frac{Z_G}{Z_R}$ $i = 1.002 \sim 1.015$



(续)

图号	结构形式示意图	说明
4		<p>发生器固定，柔轮主动，单级减速</p> $i = -\frac{Z_R}{Z_G}$ $i = \frac{1}{1.002} \sim \frac{1}{1.015}$
5		<p>单级行星式</p> $i = i_1 \cdot i_X$ $i_1 = \frac{Z_R}{Z_R - Z_G}$ $i_X = \frac{r_T + r}{r_T}$ $i = 1.5 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$
6		<p>双级径向式</p> $i = i_1 \cdot i_2$ $i_1 = \frac{Z_{G1}}{Z_{G1} - Z_{R1}}$ $i_2 = \frac{Z_{G2}}{Z_{G2} - Z_{R2}}$ $i = 5.5 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^5$