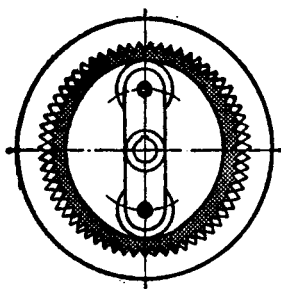


谐波传动

(内部资料)



上海市纺织科学研究院

一九七二年八月

毛主席语录

认真看书学习，弄通马克思主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们的方针要放在什么基点上？放在自己力量的基点上，叫做自力更生。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

前 言

谐波传动是以弹性变形运动来达到传动目的的一种新型传动。它的发展仅从六十年代开始，由于其结构简单、承载负荷能力大，传动比范围广及效率高，目前已日益为国内外所重视。

我院在 1962 年开始研究和应用谐波传动装置。文化大革命前，由于受刘少奇一类骗子推行的“爬行主义”、“洋奴哲学”的修正主义科研路线的影响，这项新技术的研制工作进展缓慢。在无产阶级文化大革命的推动下，我院工人和科研人员遵照毛主席关于“中国应当对于人类有较大的贡献”的教导，狠批修正主义科研路线，大搞群众运动，“走自己工业发展道路”，在谐波传动的研制工作中发扬了敢想敢干的革命精神，坚持土法上马，因陋就简，在机械设备和加工条件不足的情况下攻克了一个又一个难关，研制了各种类型的双波、复波和三波的谐波减速器。

目前这种新型传动装置在造船、机床、化工、轻纺、冶金等方面已得到了广泛的研究应用。实践证明，谐波传动装置具有广阔的发展前途。

近几年来研制小组虽然对谐波传动的研究和应用做了些工作，但还很不够。为了使这项新技术更快地发展和更好地应用，我们初步整理了《谐波传动》这份技术资料供同志们参考。由于我们的认识和实践具有局限性，缺点和错误在所难免，希望同志们批评指正。

目 录

前 言

主要代号	1
一、谐波传动概述	4
(一) 传动原理	4
(二) 传动的特点	7
(三) 谐波传动的应用	10
二、传动结构及主要构件设计	14
(一) 传动结构设计	14
(二) 谐波传动的齿形分析	23
(三) 波发生器的结构设计	31
(四) 柔轮结构及其联轴方法	38
(五) 谐波增速	44
三、设计与计算	47
(一) 柔轮的应力和径向力的计算	47
(二) 承载能力的计算	51
(三) 传动效率及散热计算	56
(四) 齿的运动速度计算	57
(五) 计算示例	57
四、谐波传动问题综述	69
(一) 主要元件的精度和光洁度	69
(二) 材料及其加工工艺	71
(三) 按装和检验	76
(四) 润滑和冷却	77
(五) 主要指标的测试	78
(六) 几个问题的讨论	79

主 要 代 号

- d —— 变形量, 即波高 (厘米)
 n —— 波数
 Z_R —— 刚轮齿数
 Z_S —— 柔轮齿数
 i —— 传动比
 D_R —— 刚轮节圆直径 (厘米)
 D_S —— 柔轮节圆直径 (厘米)
 D_i —— 刚轮齿顶圆直径 (厘米)
 D_o —— 柔轮齿顶圆直径 (厘米)
 ϕ —— 刚轮的压力角 (度)
 ϕ_1 —— 柔轮的压力角 (度)
 h —— 全齿高 (厘米)
 h' —— 齿顶高 (厘米)
 h'' —— 齿根高 (厘米)
 S —— 径向间隙 (厘米)
 S_t —— 分度圆上齿厚 (厘米)
 b —— 柔轮齿的宽度 (厘米)
 k —— 柔轮的壁厚 (厘米)
 t —— 齿的周节 (或节距) (厘米)
 L —— 柔轮总的宽度 (厘米)
 η —— 效率 %

N_1 ——输入功率 (千瓦)

n_1 ——转速 (转/分)

M_1 ——输入扭矩 (公斤-厘米)

M_o ——输出扭矩 (公斤-厘米)

K_K ——系数 $K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = K_K \approx 0.4 \sim 0.9$

K_1 ——齿的啮合间隙 (或误差) 系数

K_2 ——齿轮的加工精度系数

K_3 ——波发生器的型式系数

K_4 ——齿形不同 (齿形误差) 系数

如果精度高、积极式发生器取高值, 否则取中间值或者低值

K_τ ——系数 $K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \approx K_\tau \approx K_K \approx 0.4 \sim 0.9$

P_1 ——柔轮变形至波高 d 时所需力 (公斤)

P ——对波发生器的径向压力 (或传递扭矩时径向力的总和) (公斤)

r ——柔轮的节圆半径 (厘米)

r_1 ——行星轮大半径 (厘米)

r_2 ——中心轮 (又称太阳轮) 半径 (厘米)

f_1 ——齿面的摩擦系数 (或滑动摩擦系数)

f_2 ——滚动摩擦系数

P_a ——柔轮变形时所产生的轴向力 (公斤)

n_i ——主动轮转速

n_o ——被动轮转速

Z_o ——主动轮齿数

Z_F ——被动轮齿数

i_T ——二个传动比的乘积

σ ——材料的应力 (公斤/厘米²)

$(\sigma)_K$ ——材料的许用接触应力 (公斤/厘米²)

(τ) ——材料的许用剪切应力 (公斤/厘米²)

$(\sigma)_w$ ——材料的许用疲劳应力 (公斤/厘米²)

σ_{1H} ——材料的挤压应力 (公斤/厘米²)

(σ_{-1}) ——对称循环时的许用应力 (公斤/厘米²)

σ_K ——材料的接触强度限 (公斤/厘米²)

τ ——材料的剪切强度限 (公斤/厘米²)

E ——材料的弹性模量 (公斤/厘米²)

Q_s ——减速器工作时产生的热量 (千卡/小时)

Q_c ——减速器表面散热量 (千卡/小时)

t_1 ——润滑油的温度(°C)，充许在 75°C~95°C

t_2 ——空气温度，一般为 20°C

K ——散热系数，一般 $K = 7.5 \sim 15$ 千卡/小时，通风良好
时 $K = 12 \sim 15$ 千卡/小时，没循环空气流动 $K = 7.5$
~9 千卡/小时

S ——传动装置散热面积 (米²)

$$S = S_1 + 0.5S_2$$

S_1 ——传动装置表面冷却面积 (米²)

S_2 ——为 S_1 表面计算的补强筋、凸座面、底座或扭
架上的面积 (米²)

一、谐波传动概述

谐波传动是通过机械波（或动力波）使材料产生弹性变形来达到传动要求的一种新传动方式，即弹性变形齿轮传动。它具有其他传动难以达到的一些优点。下面分三个部分介绍其传动原理、传动特点及在各方面的应用。

（一）传动原理

谐波传动是由波发生器所产生的机械波，通过柔性齿轮变形，从而产生齿间相对位移而达到传动目的。其基本元件为刚性轮、柔性轮和波发生器。图 1-1 是三个元件装配而成的双波

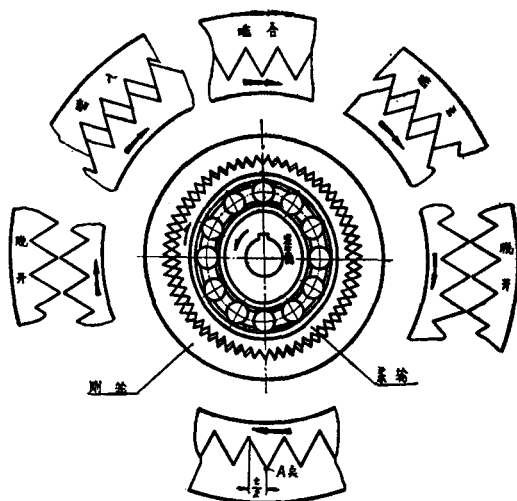


图 1-1 传动原理

结构，其中波发生器通常为主动，其余两个元件为从动或固定。

波发生器装入柔性齿轮后，使原来为圆形的柔轮变为椭圆形(波发生器装入柔轮内或柔轮外)。椭圆长轴二端的柔轮齿与刚轮齿相啮合，短轴二端的柔轮齿与刚轮齿处于脱离状态，其他各处按旋转的方向逐渐啮入；若方向相反，则是逐渐啮出。波发生器在柔轮内(外)旋转时，迫使柔轮发生波形弹性变形，此时椭圆长轴也随发生器的回转而转动，啮合区与脱离区随之变化，这样就使柔轮与刚轮齿间产生相对的位移运动。

由图 1-1 可见，当波发生器按剪头方向旋转 45° 时，柔轮与刚轮就在图示的啮入处啮合，在此同时，原来柔轮与刚轮的脱开处变为啮入，而原来柔轮和刚轮的啮出处脱开。此时，两者相对的位移了 $\frac{1}{4}$ 齿。同理，当发生器旋转 90° 时，原来的啮合区全部脱开而脱开区全部啮合，这时柔轮与刚轮相对的位移了 $\frac{1}{2}$ 齿；当发生器旋转 180° 时，柔轮和刚轮又在原来的 A 点和 180° 位置啮合，而两个齿轮的齿相对位移了一个齿的距离。依此类推，波发生器每旋转一转，柔轮和刚轮的相对位移为二个齿。(如果是三波，两个齿轮相对位移为三齿的距离)。如将刚轮固定，则柔轮的旋转方向与波发生器的旋转方向相反。反之，将柔轮固定，则刚轮的旋转方向与波发生器的旋转方向相同。如果波发生器连续旋转，柔轮的长、短轴就不断地改变位置，其产生的变形是对称和谐的波，如图 1-2a, b 所示。所以这种传动称为谐波传动。

柔轮的变形波数 n ，就等于完全啮合(或脱离)区域的数量(即波发生器的触头数)，理论上可制成 n 个波数。但是，由于材料所能承受的应力有限，在实际应用中只能制成二波或三波，其中二波较常用。

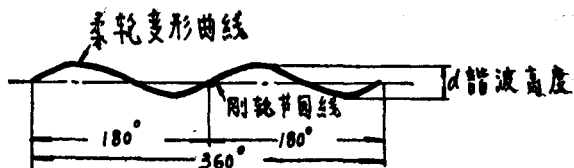


图 1-2a 柔轮变形展开图(二波)

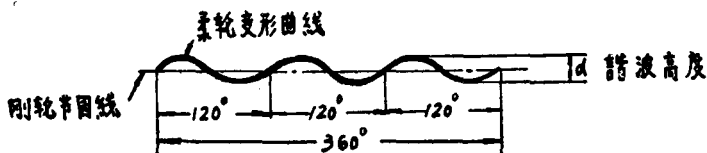


图 1-2b 柔轮变形展开图(三波)

柔轮的齿数比刚轮的齿数少(外啮时相反),一般二波相差为二齿,三波齿数差为三齿,其齿数差用下式表示:

$$Z_R - Z_S = n \quad (1-1)$$

由于柔轮和刚轮二者的节距相同,因而柔轮的变形值就等于两齿轮节圆直径之差,即波高 d 。而波发生器的最大和最小半径就依此设计,以此保证齿轮的啮合和传动。

图 1-1 所示是属于最简单的单级结构。它的传动比 i 可达 $50 \sim 5 \times 10^2$ 。当刚轮固定时:

$$i = \frac{n_i}{n_o} = \frac{Z_o}{Z_o - Z_F} = \frac{Z_S}{Z_S - Z_R} \quad (1-2)$$

这是最基本的计算公式,由波发生器输入,柔轮输出。若输入与输出的方向相反,其值为负;方向相同时,其值为正。

在双波传动中,如刚轮齿数 $Z_R = 402$,柔轮齿数 $Z_S = 400$,由公式(1-2)计算可得:

$$i = \frac{400}{400 - 402} = -\frac{200}{1}$$

当柔轮固定时:

$$i = \frac{n_i}{n_o} = \frac{Z_o}{Z_o - Z_F} = \frac{Z_R}{Z_R - Z_S} \quad \langle 1-3 \rangle$$

仍将上值代入公式<1-3>中得到

$$i = \frac{402}{402 - 400} = \frac{201}{1}$$

当波发生器固定时:

$$i = \frac{n_i}{n_o} = \frac{Z_o}{Z_F} \quad \langle 1-4 \rangle$$

将上面数值代入公式<1-4>中, 在柔轮主动时, 可得微小的传动比 (即减速传动):

$$i = \frac{400}{402} = \frac{200}{201}$$

当刚轮主动时, 可得微小增速传动, 即

$$i = \frac{402}{400} = \frac{201}{200}$$

从上述公式可知, 传动比是齿的函数, 与齿形无关。

(二) 传动的特点

谐波传动与其他各种类型的传动相比, 其特点可概括如下:

1. 同时啮合的齿数多。在双波传动中, 二个啮合区可以有 50% 的齿同时啮合。在三波传动中, 同时啮合的齿数还要多。在一般的传动中, 同时啮合的齿数只有 2~7%。由于它改变了齿的啮合状态, 齿的啮合较为理想。

2. 承载能力高。由于啮合方式的改变, 承受载荷的齿数成倍的增加, 全部工作 (承受载荷) 的齿数占总齿数的 12.5% 左右, 所以齿的应力相应地减少很多。与一般传动相比, 它的负载能力大大增加。

3. 传动比高，且范围大。谐波传动可以采用各种不同的结构，大致可在 $35 \sim 10^7$ 之间进行有级减速或增速。

4. 传动效率高。谐波传动的齿是依靠摩擦滑移而运动的。根据制造的光洁度与润滑条件，采取适当的结构其效率可达 $0.69 \sim 96\%$ 。

5. 结构简单。谐波传动装置主要由刚轮、柔轮和波发生器三大元件组成，其另件数量少，故重量轻。如和传动比相当的齿轮减速器比较，可减少另件约一半，重量减到七分之一。在制造时生产周期可以减短，如果成批生产，可以采用先进的加工工艺。

6. 线速度低，齿的磨损均匀。在传动中，齿的啮入和啮出速度都很低。刚轮固定时，其线速度为零，柔轮的转速与输出轴同。若增大传动比，被动轴速度低，啮合点的速度就更低。又由于圆周速度低，相对滑移小，径向移动少，加上齿与齿之间为面接触，而且齿比较宽，所以对润滑没有特殊要求，如同一般减速器。

从双波传动原理图 1-1 中可知，齿的啮入和啮出两侧都在工作，即两侧都有磨损（只是磨损程度上有差别）。所以，工作中齿的磨损均匀，且又很小。

7. 运转平稳、无冲击。齿的啮出和啮入随波形逐渐变化，速度均匀、无突然变化和冲击现象。又因同时接触的齿数多，线速度和滑移速度低，运动属于等速，故传动中无冲击，运转平稳。

8. 齿侧间隙可以调整。在齿的啮合过程中，齿和齿的间隙主要取决于波发生器的最大半径。柔轮和刚轮啮合时，若由于齿轮的磨损而产生间隙，可以调整波发生器的半径，以保证其无间隙的啮合运动。

上面简单地介绍了谐波传动的特点，为了更清楚地说明问题，对行星齿轮、人字齿轮、普通蜗杆蜗轮、蜗杆蜗轮加螺旋齿轮、以及圆柱齿轮减速器(Z_{50-7-I-A})，与谐波减速器的各项指标作了比较，将其情况列于附表1中。从表中可以看出谐波减速器的一些主要特性是其他形式的传动所难以达到的。

表1 传动性能比较

传动参数	减 速 器 类 型					
	行星 齿 轮	人 字 齿 轮	普通蜗 杆蜗轮	蜗杆蜗 轮加螺 旋齿轮	Z _{50-7- I-A} 圆柱齿轮	XB100 谐波传动
减速级数	3	2	2	2	3	1
输出扭矩M 公厘·厘米	3980	3980	3980	3980	3980	3980
输出转速n 转/分	18	18	18	18	18	18
传动比i	97.4	96	108	100	98.31	100
效率 η %	85	85	40	78	93	82
输入马力N _i	1.176	1.176	2.5	1.28	1.08	1.22
齿 轮 数	13	4	2	4	6	2
轴 承 数	17	6	6	6	8	2
节圆处线速度 公厘/秒	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	0.0942
齿的滑动速度 公厘/秒	12.7	12.7	7.62	12.7	12.7	0.12
同时接触齿数 %	7	5	2	3	3	50
齿面接触应力 σ_k 公斤/厘米 ²	3515	3515	351	3515	3515	42.1
齿所受的剪应力 τ 公斤/厘米 ²	1757	1757	1055	1757	1757	21
安全系数*	3	3	2	2	5	36

(续前表)

传 动 参 数	减 速 器 类 型					
	行 星 齿 轮	人 字 齿 轮	普通蜗 杆蜗轮	蜗杆蜗 轮加螺 旋齿轮	Z, 50-7- I-A 圆柱齿轮	X B 100 谐波传动
齿接触情况	线	线	线	线	线	面
运转平稳性		好	好	好	好	好
力的平衡	好	好	不好	不好	好	好
轮廓尺寸 高 厘米	33.1	35.6	58.4	40.6	58.8	15
长 厘米	38.1	50.8	48	43.2	91	16
宽 厘米	33.1	25.4	35.6	25.4	34.6	15
体 积 厘米 ³	40000	146000	100000	44000	184800	3600
重 量 公斤	111	127	104	92.5	325	13.6

注：本表安全系数是指齿面接触应力按 $\sigma_k = 3515$ 公斤/厘米² 时，减速器所能承载负荷。按入轴转速为 1800 转/分时的功率与同台减速器输入功率 1 马力输出转速为 18 转时相比较的近似安全系数。

(三) 谐波传动的应用

由于谐波传动具有一般齿轮传动所不能达到的很多优点，特别是它的结构简单、体积小、传动比大、负载能力高等因素，对于节约原材料、减少电力消耗、缩短制造加工周期、提高使用效率和简化机械设备结构等方面，具有很大的实用意义。为了贯彻落实毛主席关于“备战、备荒、为人民”的战略方针，多年来这一传动装置已经在各方面进行了试制和应用。实践证明：它的一些基本特点是其他传动装置难以比拟的。

国内外采用此种机构最多的是代替一般大速比的减速器。例如：用在大型绞盘、起重等设备中。由于采用了谐波传动装置，其另件数仅为行星-蜗杆蜗轮结构减速器的 20% 左右；而

且效率高、稳定性好。图 1-3 的行星式谐波传动结构是较典型的一种，在船舶制造、矿山运输、国防工程等设备中都有采用。此种结构与图 1-4，图 3-9 所示的结构也被应用于机床、轧钢等设备的自动进给系统中。在化工设备中，采用了立式谐波减

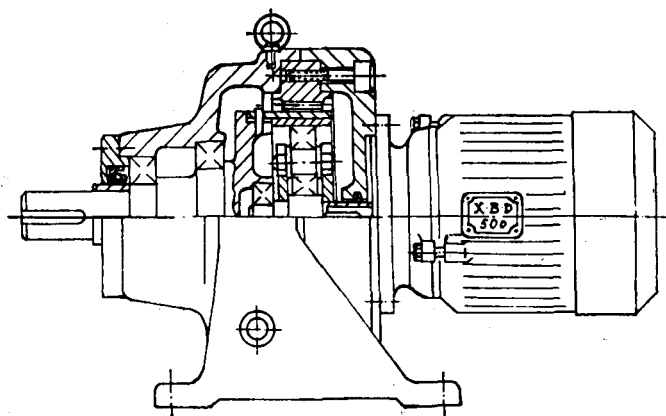


图 1-3 行星式谐波减速电机

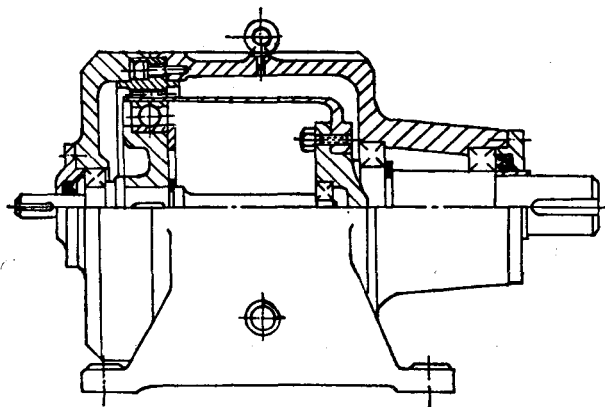


图 1-4 积极控制式谐波减速传动装置

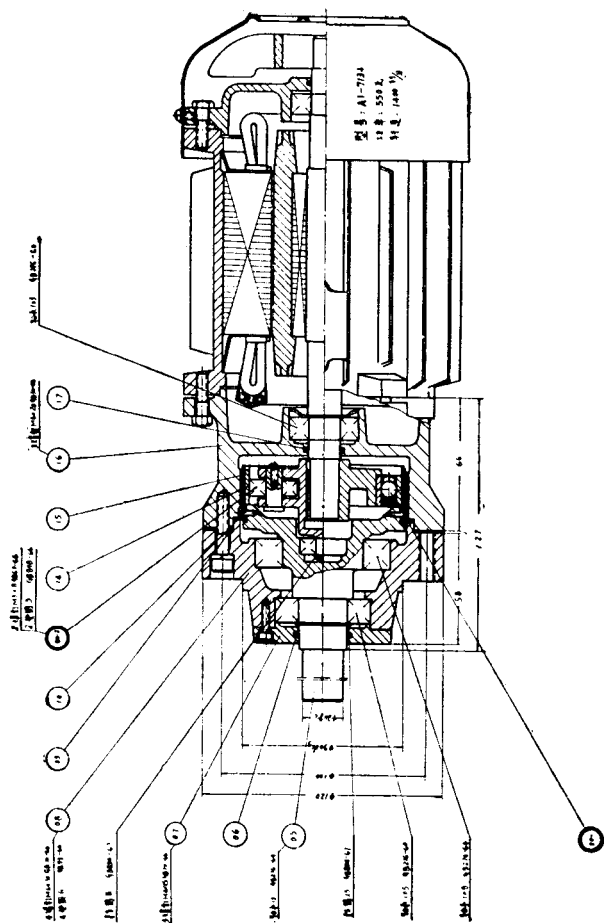


图 1-5 附于电动机的小型谐波减速装置

速器作为搅拌机减速装置。轻工和纺织设备中亦有采用。从它的发展情况看,此类新装置有可能逐渐替代效率较低、齿轮较多、体积庞大的蜗轮蜗杆传动及圆柱齿轮减速箱。

在高精度传动系统中,谐波传动装置已经应用于雷达装置的传动,自动控制系统的强力伺服传动,仪器设备的自动系统以及特殊用途的密封传动(如图 2-29)。同样,谐波传动也可应用于增速传动方面,例如在通讯和医疗发电机的有关系统中作为反馈增速装置。图 3-10 的装置可以在小功率、高精度的传动系统中作为减速装置或增速装置。图 1-5 为附于电动机上的小型谐波减速装置。

图 1-5 技 术 要 求

XB06135 型减速器由谐波传动减速器和 A1-7134 型电机组合而成,故称谐波减速电机。输出转速为 10 转/分,谐波传动速比 $i=135$,波高 $d=0.6$,波数 $n=2$ 。此设计备有二种形式的波发生器,即有滚珠轴承组成的间隔式发生器 00-2,另一种用轴承改制的积极控制式发生器 00-1,可按使用条件选择。

柔轮 15 按装前需经探伤检查。总装时用夹具将柔轮压缩一波高 d ,然后将发生器装入柔轮中,并检查齿顶长短轴尺寸,一般为不变形齿顶外径增大和减小一波高 d ,误差不大于正负 $d/16$ 。在装入刚轮 16 时,需检查啮合是否正常,并用手转动电机轴以防卡死。

按装时需涂润滑脂或加 30 号机油至钢球中心。

按装后需经短时跑合,跑合后重新拆洗,而后方可使用。