

国内外谐波传动的应用和发展

谢 金 瑞

一 概 述

谐波传动是五十年代中期随着空间科学技术的发展,在薄壳弹性变形的理论基础上发展起来的一种新型传动。传动的基本原理于1955年由美国学者 Musser C.W.发现,1959年获得专利,1960年在纽约实物展出,并成功地用于火箭、卫星……多种传动系统中。使用证实,应用这种传动原理研制的各种新型传动,较一般齿轮传动具有运动精度高、虚动量小、传动比大、重量轻、体积小、承载能力大、并能在高真空和介质辐射的空间正常工作等优点^[1,2]。因此近年来几个科学技术发展较快的国家,对这方面的研制工作都很重视。如美国就有国家航空和航天管理局路易斯研究中心(NASA—LeRC)、空间技术实验室(STL)、联合制鞋机械公司(USM)、贝尔航空空间公司(Ball Aerospace Comp.)、卡曼飞机公司(Kaman Aircraft Comp.)、本迪克斯航空公司(Bendix Aviation Comp.)、波音飞机公司(Boeing Aircraft Comp.)、肯尼迪空间中心(KSC)、麻省理工学院(MIT)、通用电气公司(General Electric Comp.)等几十个大型公司和研究中心从事这方面的研究工作。其中USM公司就450人组成的谐波传动研究部和厂房面积达十万平方米的工厂,生产供海、陆、空使用的各种类型的谐波传动装置;以及生产供民用部门使用的由小到大(柔轮分度圆直径1.4吋~16吋)、速比变化范围为60~320(一级)的系列产品^[2,3,4,5]

苏联从60年代初期开始,也大力开展这方面的研制工作,如苏联机械研究所,莫斯科鲍曼高等工业学校、列宁格勒光学精密机械研究所、全苏减速器研究所、基也夫减速厂、莫斯科建筑工程学院^[4,7]……都在从事这方面的研究工作。他们除在谐波传动的类型、结构、应用……方面有较大发展外,更主要的是在基础理论(如啮合原理、强度、电磁、液压、气动、润滑、摩擦磨损、计算技术、真空技术等基础学科在该领域中的应用)方面也较系统地、深入地进行了实验研究^[6]。另外日本、波兰对谐波传动也在进行系统的研究。其中日本的株式会社长谷川齿轮铁工所等有关企业,除从事谐波齿轮传动的研制外,自1970年开始,从美国引进USM公司的全套技术。目前除能大批生产各种类型的谐波传动装置外,并已完成了通用谐波传动装置标准化、系列化。值得注意的是对谐波传动一向不太重视的西欧一些国家,如西德、法国、英国、瑞士、瑞典等国。近年来除在卫星、机械人、数控机……采用谐波传动外,对谐波传动的基础理论也在进行系统的研究。如瑞典最近研制的能取代进步电机的一种新型气动谐波传动就是一个明显的例子^[4,8,9]。

总之,近年来由于各国对谐波传动广泛深入的研究和空间技术、能源、仿生、海洋开发……新兴科学技术发展的迫切需要,更促进了它的发展,并扩大了它的应用范围。据报导,目前除在上述新兴科技领域内得到广泛应用外,在飞机、通讯、雷达、汽车、坦克、造船、机床、仪表、起重运输、轧

钢、印刷机械等部门中的应用也在日益扩大。使用证实,无论作为高灵敏度随动系统的精密谐波传动装置,还是作为传递大扭矩的动力传动装置,都为传动技术开辟了新的途径。此外,谐波传动更主要的优点是它能在高真空的密闭空间正常工作。因而用它作为空间传动装置和用于操纵高温、高压管路,以及在有原子辐射或其他有害介质的条件下工作的机构,所显示出的优越性,更是现有一些传动装置难以比拟的^[1, 2, 3, 4]。

我国从1961年开始谐波齿轮方面的研制工作,并且在研究、试制和使用方面已取得了较大的成绩。到目前为止,我国已有几十家从事这方面的研究工作,并先后研制成多种类型的谐波齿轮传动装置。如传动精度小于10弧秒、虚动量小于3.2弧秒的高精度谐波齿轮传动装置^[10]、噪声小于45分贝的高灵敏度的小型谐波齿轮传动装置、用于水下极光探测仪的谐波传动装置,以及用于导弹发射架、雷达传动系统中的动力谐波传动装置,为我国谐波传动的研制工作打下了初步基础^[11]。

二、谐波齿轮传动的主要特点^[1, 13, 14]

(一) 运动精度高:由于谐波齿轮传动是多齿啮合,并且啮合区在径向方向对称分布,误差有相互补偿和消减的作用,因而传动装置的运动误差小于刚轮(或柔轮)的运动误差。如我们研制的高精度谐波齿轮传动装置,传动误差 $\Delta\varphi'' < 10$ 弧秒,而刚轮和柔轮的运动误差却分别为 $\Delta T_{\Sigma c} = 16.25 \sim 21$ 弧秒; $\Delta T_{\Sigma R} = 21.25 \sim 22.5$ 弧秒^[13]。故当谐波齿轮传动的元件与普通齿轮传动的元件具有相同的制造精度时,谐波齿轮传动的精度较普通齿轮传动的精度高的多。据有关文献^[2]报导,与普通圆柱齿轮相比,若齿面经过同样的精加工后,谐波齿轮传动的运动精度较普通齿轮传动的运动精度约高4倍。

(二) 虚动量小:虚动量的存在,对伺服系统是一个非线性因素,它将影响系统的精度和稳定性。而在谐波齿轮传动中,齿侧间隙可以很容易地通过改变波发生器的结构尺寸、增加齿厚或改变柔轮的变形方式来加以控制,而获得小虚动量,甚至无虚动量的谐波齿轮传动。如美国USM公司已有无虚动量的谐波齿轮传动装置作为特殊订货的商品出售^[5]。我所也研制出间隙虚动量小于3.2弧秒的谐波齿轮传动装置^[13]。

(三) 传动比大、变化范围广:一般单级谐波齿轮传动,其速比范围为50~500,当采用行星式波发生器时为150~4000;若采用复波传动则可达 1.6×10^7 。

(四) 重量轻、体积小、结构简单、零件少:与普通齿轮减速器相比,在满足同样运动要求和传递同样载荷的情况下,零件的数目大量减少,体积和重量大幅度下降。如国外为代替火箭伺服传动系统中的液压传动装置,而研制的谐波马达减速器,其体积和重量较原来竟降低10倍左右。我所为射电望远镜设计的复波谐波齿轮传动装置,较同功能的齿轮或蜗轮传动,重量也将减小4~5倍。

(五) 同时参加啮合的齿数多:据文献^[2]报导,双波谐波传动时,同时啮合的齿数可达总齿数的50%以上,三波谐波传动则更多。如我所研制的双波谐波齿轮传动,同时啮合的齿数可达33.3%^[14],有的甚至可达40%左右。而普通圆柱齿轮传动,则不管齿轮的分度圆直径多大,齿数多少,同时参加啮合的齿数总不会超过2。

(六) 当正确选择啮合参数时,柔轮齿相对刚轮齿将沿着一条滑动速度很小的轨迹曲线移动,这样齿面相对滑动速度将比一般齿轮传动至少小两个数量级^[2]。另外在啮合的过程中齿与齿是面接触,比压较低,故齿面磨损小,传动效率高。

(七) 谐波齿轮传动因滑动速度小、接触比压低。因此只要在齿面上镀一种特殊的金属(如白金)来改善金属表面的摩擦特

性，它就能在高真空的条件下正常工作。因而这种传动在发展空间科学技术、能源以及有特殊要求的技术领域内占有独特的地位。

(八) 输出轴和输入轴位于同一轴心线上，这一特点将使传动装置的结构简化、外形尺寸缩小。这对研制机械人、遥控操作机、数控机……中的传动装置具有特殊的意义。

(九) 在材料机械性能相同，传动比相同的情况下，承载能力较一般传动显著提高。由资料中可以看出，因在啮合中，相对速度比较小，所以轮齿上允许的工作载荷可以接近于轮齿的静态强度载荷。在许多情况下，允许的静态过载超过计算载荷近10倍左右^[2]。

但事物总是一分为二，谐波齿轮传动自然也存在一些缺点，比较明显的有：

① 由于柔轮等元件都是一些形状比较特殊的薄壁件，工艺性较差，加工困难。

② 谐波齿轮传动装置只能获得固定的传动比，如想中间出轴再获得其他的传动比，则难于实现。

三、谐波齿轮传动在各个领域中的应用

到目前为止，谐波齿轮传动应用广泛，类型繁多，难以一一列举。下面只能介绍几种有代表性的例子，略反映其概貌：

(一) 在空间科学技术方面：

1. 在人造卫星上的新型恒速传动装置中采用了电磁谐波齿轮传动机构^[2]。它的传动比为111、重量544克（包括动力源）、外形轴向尺寸为59.2毫米、波发生器为电磁式外配置、内齿柔轮为双钟型结构与壳体固定不动、外齿刚轮与输出轴刚性联结、最大输出扭矩为0.144公斤—厘米、传动精度可达12弧秒。实验证明该传动装置能允许20g的冲击载荷，能在真空度 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 毫米水银柱和介质幅射的空间正常工作。

2. 用于卫星太阳能天线阵传动系统中的谐波齿轮传动：在科学试验卫星和同步轨道通讯卫星上，所安装的太阳能电池板要一直指向太阳，这就要求电池板对卫星要有相对转动。在该传动系统中就采用了一种转速为 $15^\circ/\text{小时}$ ，误差小于5分的密闭谐波齿轮传动装置^[2]。该传动装置工作在卫星外部的宇宙空间内。为了保证它在真空的条件下有足够的生产能力，在齿面上镀上一层特殊的金属（如白金等），来改善在真空状态下金属接触表面的摩擦性能，而无需再采用其他的润滑形式。

3. 美国国家宇航局Goddard空间飞行中心，研制的轨道地球物理观测装置的OPEP(Orbit Plant Experiment Packages)的控制系统中，采用了美国空间技术实验室研制的端面谐波齿轮传动^[15]。该传动装置总的传动比为24000，其中谐波齿轮传动部分的速比为100，并处在宇宙空间内。齿轮用镀青铜和钼烧结成的材料制成，靠自润滑就能正常工作。

4. 在天马座(Centaur)航天飞行器的发动机的燃烧室中，采用了密闭谐波齿轮传动来控制液态氢和液态氧的供应阀门，保证氢和氧在燃烧室内按精确的比例进行混合。这既保证了液态氢、氧的准确供应，又排除了它们泄漏的可能性，因而保证了飞行器的安全工作^[5]。

5. 在某一火箭机构的伺服系统中，采用了传动比为104、直径41.3毫米、长127毫米、重（包括电机）0.657公斤、输出扭矩为1.5公斤—米、运动误差不大于1弧分的密闭谐波齿轮传动装置，来代替原有的液压传动装置。结果可使传动装置的重量和体积大致只为原传动装置的1/10。

6. 在宇宙飞行器的气动操纵系统中，气动谐波传动得到了广泛的应用^[16]。这种传动装置惯量小、重量轻、体积小、承载能力大并能在高温和高速下正常工作。如本迪克斯公司，在稳定飞行系统中就采用了这种传

动装置^[17]。它的传动比为700、传递扭矩为810kg—m、它能在环境温度800℃、传动箱中的温度冷却至425℃的情况下正常工作。再如最近美国空军火箭推进实验室，正在研制的用于洲际弹道导弹喷管涡轮作动器中的气动谐波齿轮传动^[18]。总传动比为9600~2640021(其中谐波齿轮传动的传动比为720)，装置长度为43.2毫米，重量仅为27.2kg，而它的输出扭矩却为8065kg—m，输入轴的最高转速为100000转/分，工作温度经特殊降温后仍在500℃左右。

7. 《土星5号》火箭运输机是当前美国国家航空和航天管理局制造的最大运输机^[19]。它可运输直径10米，长42.5米的巨型火箭。运输机有24个轮子(12对)，每对轮子都是借助谐波齿轮减速器单独驱动^[20]。该传动装置直径508毫米，高248毫米，输出扭矩可达3450kg—m。这是按美国国家航空和航天管理局肯尼迪宇宙飞行中心的订货要求，由联合制鞋机械公司协同《Garvey Aluminium》公司的实验室一块研制的。

(二) 在机械人和遥控操作机中的应用：

由于谐波齿轮传动体积小、效率高、承载能力大、高速轴与低速轴同轴线配置，能在高真空的条件下正常工作等特点。因此近年来在智能机械中应用更广。如美国送到月球上的机械人，全身各个关节部位都用电动谐波传动装置驱动。其中一个胳膊就用了30个谐波传动装置。又如美国送入月球的有人驾驶的“月球车”(Lunar Rover)每个行走机构的轮子都是密闭谐波齿轮传动驱动的^[21]；苏联送入月球的移动式机械人“登月者”

(Луноход)，它的成对安装的八个轮子，也是分别用密闭谐波传动单独驱动的。至于在地面上、海洋中用的各种类型的机械手、遥控操作机中应用也在逐渐增多。

(三) 在原子反应堆和高能加速器中的应用：

带斜齿轮的谐波齿轮传动和丝杠—螺母

传动，由于它的密闭性好、承载能力大、能在高温高压下正常工作。因此这种密闭谐波传动装置用来将反应堆(或高能加速器)外部的高速回转运动，变为传到它们内部的慢速直线运动，以及用来操纵高灵敏度和高密闭性能的阀门和螺旋开关时。无需采用隔膜、波纹管和其他类似的密封结构，就能很简便地保证具有毒性、放射性和其他有害的物质以及在高温高压下的液体与气体完全密闭。因此近年来在核能、宇航、化工……领域中得到了较多的应用。如在原子能反应堆中，用于操纵原子反应堆的铀棒移动的传动机构^[22]，和美国最新研制的用于高能回转加速器束流测量装置中的传动机构^[22]，以及操纵阀门和螺旋开关的机构，都采用密闭谐波丝杠—螺母传动或密闭谐波斜齿轮传动。

(四) 在航空中的应用：

最早将谐波传动作为飞机动力传动装置的是本迪克斯公司，他们将谐波传动用于驱动直升飞机螺旋桨的传动装置。传动装置由功率250马力、转速为50000转/分的透平带传动，传动比为100:1^[23]。

60年代初，美国波音飞机公司，在《波音707》飞机自动驾驶仪传动系统中，已用谐波齿轮传动同电机、离合器构成的传动系统去代替原有的液压传动系统。结果使传动系统的重量大幅度下降、性能显著提高^[24]。

70年代初，美国航空和航天管理局埃米斯研究中心(NASA Ames Research Center)，把谐波传动用于风洞动态稳定装置(Dynamic Stability Rig)的各种传动系统中^[24]。该装置是飞机(导弹)实验模型在吹风实验时，模拟其飞行姿态的重要实验装置，更主要的是它的横截面积与风洞横截面有密切的关系。因而采用谐波齿轮传动，将使风洞的横截面积大幅度下降，动力消耗明显地降低。从而为今后兴建大型风洞提供了新的技术途径。

(五) 在自动机自动线中的应用：

1. 美国麦克罗马迪克珩磨机公司 (Micromatic Hone Comp.) 在生产自动线的精密设备中, 就应用了谐波齿轮传动装置。例如在高度自动化的精密镗磨机中, 能自动改变镗磨头直径的机构, 就采用了速比达 1206576 的谐波齿轮传动装置^[5]。这种装置除能使镗磨头在刚开始进入加工孔时自动达到要求的尺寸, 加工完磨头又能自动减小尺寸退出加工孔外。更主要的是为了补偿磨头在加工过程中的磨损量, 它能以 0.21 微米/分 (即谐波齿轮传动装置输出轴的转速为 0.00016 转/分) 的运动速度, 使磨头在径向方向均匀地连续增加。其精度可达在补偿 2.1 微米的过程中, 累积误差不超过 0.1 微米。因此用它加工出的汽缸体几乎没有锥度。故这种设备对飞机、坦克、汽车拖拉机发动机的加工自动化和质量的提高有非常重要的实用价值。

2. 步进电动机是数控机床中较重要的基本部件, 它的性能将直接影响数控机床的精度。最近瑞典科学院利用气动谐波齿轮传动的原理, 研制成叫作 “Rotell motor” 的步进传动装置, 较现有的步进电动机具有结构简单、精度高、间隙小、输出力矩大、转动惯量小等优点^[9]。因此这种传动装置的出现, 对数控机床和遥控操作机的进一步发展将会有较大的作用。

(六) 在光学仪器中的应用:

1. 美国哥伦比亚广播系统 (Columbia Broadcasting System) 公司将密闭谐波齿轮传动用在录相装置的传动系统中^[5]。这种装置是用来记录从运动物体 (如飞机或卫星) 那里发出的视频讯号并随后把它复现出来。在该装置中, 用来记录讯号的薄不锈钢环带, 在密闭的电子射线管中的恒速运动, 就是通过该密闭谐波齿轮传动装置来实现的。

2. 在电视摄像机的变焦距镜头以及其他各种类型的变焦距镜头中, 调焦、变倍、调光栏都希望能实现自动化。在已有的几种

变焦距镜头中, 这些自控系统都用一般的齿轮减速器来实现。这样不只体积、重量稍大, 更主要的是噪声高。近年来我们正在研制的一种可用于变焦距镜的、高灵敏度小型谐波马达减速器, 它不只体积小、重量轻, 更主要的是它的噪声可以大幅度地下降。根据国内有关单位的初步测定, 其噪声不大于 42 分贝。

四、当前谐波齿轮传动的研究动向

由文献^[2, 7, 9, 12]中可以看出, 谐波齿轮传动是当前传动领域内发展速度较快, 涉及基础学科 (机械原理、电磁、液压、气动、摩擦磨损、弹性力学, 计算技术、真空技术……) 较多的一项新技术。不少国家都在付出较大的人力物力进行深入的研究, 由公开发表的资料中可以看出, 主要有以下几方面:

(一) 谐波齿轮传动啮合原理的研究:

由谐波齿轮传动的基本原理可知: 轮齿的几何尺寸, 刚轮和柔轮轮齿之间的相对运动关系, 对传动精度、承载能力、效率、寿命等主要性能指标有直接的关系。而轮齿几何尺寸的决定又与波发生器的轮廓形状、柔轮的变形量等重要因素直接有关。因此近年来苏联、美国、日本在这方面进行了较多的研究工作。他们在薄壳弹性变形的理论基础上, 首先弄清了柔性薄壁筒 (或圆环), 当受径向力之后, 除产生径向变形外, 同时产生切向变形和轴向变形。对柔轮来说, 由于曲率的变化, 轮齿的对称轴线还要产生转动^[25, 26]。另外还弄清了波发生器的结构形式、运动轨迹与上述变形之间的关系^[26, 27, 28, 29, 30]。从而为确定齿形的几何尺寸及其相对运动关系提出了理论根据, 为谐波齿轮传动的进一步深入研究和研制各种新型的谐波齿轮传动装置提供了有用的分析工具。

另外为了利用现有的齿轮加工设备、刀

具和设计计算资料,目前已研究出 20° 压力角的渐开线齿轮和 30° 压力角的渐开线齿轮,通过变位来获得同样啮合质量指标的啮合分析方法^[23, 31, 32],现已在生产中得到应用。

近年来我国在谐波齿轮传动啮合原理方面也做了不少工作,如西北工业大学^[33]、303所^[34]、北京广播器厂^[35]等兄弟单位用平面啮合的方法(即包络法)进行了较深入的研究,并获得了一定的成果。我所近年来在这方面也较系统的进行了理论研究,并先后对余弦凸轮波发生器,椭圆凸轮波发生器、四滚子波发生器、双偏心盘波发生器、双滚子波发生器、外波发生器的谐波齿轮传动进行了较系统的分析研究^[36],并分别建立了相应的设计计算方法^[37]。经生产实践证实,这些方法基本上是可行的,现已被国内有关单位所采用。

(二) 谐波齿轮传动结构形式的研究:

为了进一步改善谐波齿轮传动的性能、满足空间技术和一些新兴科技领域发展的需要。最近几年美国、苏联对电磁谐波传动、液压谐波传动、气动谐波传动,端面谐波传动以及用于密闭空间的密闭谐波传动,进行了更深入的研究^[2, 4, 5]。因而近年来出现了不少传动性能更好的新结构:如电磁谐波传动的出现,不仅使马达与减速器变为一体,大大缩小了轴向尺寸,体积和重量,更主要的是克服了机械式波发生器谐波齿轮传动转动惯量大和伺服电机在高真空中无法工作的致命弱点。再如最近瑞典科学利用气动谐波齿轮传动的原理所制成的叫“Rotell motor”的步进传动装置^[9],较传统的步进电机不只结构上发生了根本性的变化,而且精度,动态特性也有显著的提高。还有美国空军火箭推进实验室为洲际弹道导弹喷管涡轮作动器研制的气动谐波齿轮传动^[16],它不只能在重量轻、体积小、结构非常简单的情况下输出极大的力矩,更主要的是它在高温下能正常工作。

(三) 运用电子计算机进行自动设计的

研究:

谐波传动的性能指标是受多种变化因素限制的,设计时需要进行大量的计算。因此目前国外都是用电子计算机进行自动设计,选用最佳传动方案,确定设计计算参数。另外,为了更具体地看出其啮合规律,目前苏联学者 Шувалов, С. А 等人研究出一种图解分析法^[26]。这样可根据设计提出的各项技术要求,按选用的结构、参数及其相应的基本关系,用电子计算机算出数据并直接画出啮合性能图,看能否满足设计要求。这样就能使设计建立在比较稳妥可靠的基础上,从而缩短了研制周期,提高了质量,加速了谐波传动的发展。

近年来我所在这方面也进行了较系统的研究。我们曾先后对椭圆波发生器、余弦凸轮波发生器、双偏心盘波发生器、四滚子波发生器、双滚子波发生器、外波发生器的谐波齿轮传动建立了设计计算方法,编出了较完整的设计计算程序^[37]。并且为国防工程以及光学镜头、天文仪器,摄影棚灯光自动化……中所用的多种类型的谐波齿轮传动进行了设计,都获得了较满意的结果。

(四) 谐波传动精度的研究:

在伺服系统中,传动装置的运动精度和虚动量对系统是一种干扰。为了消除其影响,在伺服系统综合时,不只要知道运动误差的最大随机幅值,而且还要知道各种误差的频谱。近年来随着谐波传动在伺服系统中的广泛应用,特别是在卫星、宇航、遥控操作机……高灵敏度伺服系统中的应用,对谐波传动的精度分析和综合就提出了更高的要求。为了研制出高精度的谐波传动以适应尖端科学技术的发展,国内、外有关人员,对谐波传动的精度和频谱分析进行了较深入的研究。如美国 Musser C. W. 等人,对谐波传动的误差源,各种原始误差对总传动精度的影响程度,进行了较多的实验分析工作。证实了谐波传动由于多对轮齿对径啮合,误差有相互消减和补偿的作用,初步揭

示了谐波传动能实现高精度、小虚动量的根本原因^[2]。后来随着传动精度理论的发展和地震仪、电继分度、光栅等传动精度动态测量装置的相继出现。70年代初,苏联学者Шувалов С. А., Поиов П. К., Скворцова Н. А. 等人^[38-99]对谐波传动的精度理论和测试分析技术进行了较多的工作,并分别提出了在有虚动量 and 无虚动量的情况下谐波传动精度的分析计算方法、传动精度和频谱的分析计算方法、以及传动精度与传动刚度之间的关系、传动精度高频误差与低频误差之间的定量关系……。从而为谐波传动的精度理论和分析计算方法建立了初步理论基础。近年来,我所在谐波传动的精度理论和测试技术方面也进行了较系统的研究工作。到目前为止,除对谐波传动精度、频谱分析提出了较结合工程实际的分析计算方法外。为了提高谐波传动装置的传动精度和平稳性,根据精度和频谱分析的理论,对怎样更合理的选择传动方案和精度分配还提出了比较具体的意见^[13]。实践证明,这些分析计算方法和具体建议基本上是正确的,对今后研制高精度谐波传动有一定的实用价值。

(五) 材料性能的研究:

柔性元件是谐波传动的基本元件,它直接影响谐波传动装置的承载能力、寿命、外形尺寸和运动特性……。由于柔轮形状特殊,受力情况比较复杂,因此对结构、材料和热处理的选择便提出了很高的要求。近几年苏联对柔轮材料和热处理的选择进行了比较系统的研究,他们曾对四十多种可用来做柔轮的钢的机械特性和热处理规范进行了分析归纳,并推荐了根据计算出的柔轮当量疲劳强度,选择柔轮材料和热处理规范的具体方法和图表^[40-41]。

为了降低成本和适应传动比小于50(对一级谐波齿轮传动)的谐波齿轮传动装置的研制,以及对于结构复杂、疲劳强度要求更高的柔轮,且在特殊环境下工作,而无需润滑的谐波齿轮传动装置研制的需要。近年来

美国、苏联、对具有塑料柔轮的谐波齿轮传动也比较重视。他们先后研究出多种疲劳极限和弹性模量比较大的新型塑料,如聚丙烯、缩醛树脂100……用来制造柔轮都获得了较好的结果。另外他们对柔轮的结构及其设计方法也进行了较多的试验研究工作,并且获得了较完整的设计公式、资料和数据^[4-45]。

(六) 谐波传动标准化、系列化的研究:

为了便于推广、应用,加速新型谐波传动装置的研制,不少国家对谐波齿轮传动装置标准化、系列化的研究十分注意。如美国USM公司,已将速比范围60~320、分度圆直径1.4~16吋的通用谐波齿轮传动装置的速比、分度圆直径、输入轴转数、输入功率、输出扭矩、主要零件的关键尺寸、传动装置的结构形式、润滑方式……都已标准化、系列化。苏联也由全苏减速器研究所与莫斯科鲍曼高等工业学校主持,对速比范围80~2500、输出扭矩11~35040公斤——米的通用谐波齿轮减速器和马达——谐波减速器的速比、输出扭矩、柔轮的内径、传动装置的结构型式……分别制定了一些具体的标准和规定,并初步达到了标准化、系列化。

五、结 束 语

综合上述,使我们不难看出,谐波传动对多种科技领域,特别是一些新兴科技领域(如空间、仿生、能源……)的发展,是用途较为广泛的一种新技术。因此尽管它出现的时间不算很长,但在国外各个领域内已被大量应用。而我国起步虽不算太晚,但由于对这一新技术的作用认识不足、重视不够,因而长期以来在这一领域中研究工作条件极差、人力分散、工作内容重复、基础性的工作很少有人去做,致使目前在这一领域中,大部分仍然处于国外60年代到70年代初期的水

平。因此，为了加快谐波传动研制工作的进展，使谐波传动这项新技术在我国四个现代化中发挥较大的作用，建议：

1. 国家应尽快制定发展规划，加强领导，更好地安排、利用目前仅有的一点研究力量，选好主攻方向，尽快开展工作；

2. 加强学术交流，有计划地组织国内外的调研，争取尽快摸清谐波传动研制较发达的几个国家，科研生产的基本情况和今后发展的主要动向；

3. 加强基础理论的研究，特别是对发展新兴科学技术有密切关系的电磁谐波传动、气动谐波传动、密闭谐波传动……的基本原理、结构、设计计算方法、特殊加工工艺和测试技术的研究；

4. 在可能和必要的情况下，争取从国外引进全套有关技术、设备；

5. 加强有关资料、书籍的编写、翻译和出版工作。

总之，由于自己的水平所限，本文所介绍的一些情况和看法难免有不妥、甚至错误的地方，请有关领导和同志们多多指正。

参 考 文 献

1. Musser C.W., The Harmonic Drive, Machine Design, Vol, 32, No8, Apr., 14, 1960.
2. Цейтлин Н.И., Цукерман Э. М., Волновые передачи, Вопросы Ракетной Техники, 1965, No8.
3. Цейтлин Н.И., Цукерман Э. М., Новые тенденции проектирования волновых передач для применения в механизмах привода ракет и спутников, Вопросы Ракетной Техники, 1965, No2.
4. Цейтлин Н.И., Цукерман Э.М., Волновые передачи, Машиностроительные Материалы, Конструкции к Расчет деталей Машин. Гидро-

привод(ВИНИТИ АН СССР). Москва, 1968.

5. Harmonic Drive, Machine Power Transmission Systems, Internat, Div. United Shoe Mach. Corp. Boston, Mass. S. A., 34pp., ill CM. Также ЭИ, Серия "Детали Машин.", 1968, No11, реферат 29.
6. 国外精密谐波齿轮传动简介, 中国人民解放军沈字619部队, 《科技参考》, 1973, No3.
7. Иванов М. Н., Бойко Л. С., Чиров А.А., Финогенов В.А., Редукторы общего назначения с волновой передачей, Вестник Машиностроения, 1976, No8.
8. 沢田幸夫, ハーモニックドライブ減速機の機構と応用, 機械設計, Vol. 22, No5, 1978.
9. Step motors for precise regulation, «Progress in Swedish Research and Technology», 1977, 7.5.
10. 中国科学院长春光学精密机械研究所, 高精度谐波齿轮传动几个基本问题的初步探讨, 1975, 1.
11. 沈允文, 谐波齿轮传动的基本原理和运动学, 齿轮, 1977, No4.
12. Цейтлин Н.И., Цукерман Э.М., Волновые передачи и их применение в приводах механизмов ракет и спутников, Вопросы Ракетной Техники, 1964, No5.
13. 谢金瑞, 高精度谐波齿轮传动的精度分析, 齿轮, 1978, No3.
14. 凌如昭、李元燮, 谐波齿轮传动啮合过程的连续摄影法, 1978.6.
15. Advances in the Astronautical Sciences, Volume 12, P167.
16. Система стабилизации полета на горячем газе для космическ-

- их летательных аппаратов, Вопросы Ракетной Техники, 1964. No4.
17. Aviation Week and Space Technology, 74, 1964, No8.
 18. 先进导弹推力向量控制用的涡轮作动器, 国外导弹技术, 1974, No4.
 19. Engineer, 219, No5688, 249(1965).
 20. Carlson J. Ground Support Equipment, 6, No1, 32.
 21. Anon., 'Lunar Rover Expands the Frontiers of the moon, Mach. Des., 43. July 22, 57(1971).
 22. Lucas L.R. and Walz D.R., A precision actuator and shaft encoder for a high radiation environment and other beam component developments at SLAC, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1971. No3.
 23. 三机部 303 所, 谐波齿轮传动, 国外航空, 1977, No4.
 24. Ronald E. Mancini, Dennis S. Matsuhira and Wilbur C. Vallotton, Rotary mechanism for wind tunnel stall/spin studies, 10th Aerospace Mechanisms Symposium California Institute of Technology Pasadena.
 25. Иванов М.Н., О кинематика волновых передач, Известия Вузов. Машиностроение, 1968, No8.
 26. Шувалов С.А., Дудко В.Д., Блокировочные контуры волновой зубчатой передачи, Известия Вузов. Машиностроение, 1971, No7.
 27. Шувалов С.А., Дудко В.Д., Пространственное представление зацепления волновой передачи, Известия Вузов. Машиностроение, 1972, No10.
 28. Шувалов С.А., Расчет волновых передач с учетом податливости звеньев, Известия Вузов. Машиностроение, 1974, No6.
 29. Иванов Н.М., Ромашин В.Н., Волновая передачи со специальными профилями зубьев коле, Известия Вузов, Машиностроение, 1975, No8.
 30. Вохонов В.И., Красношеков Н.Н., О выборе профиля зубьев волновой передачи, Машиноведение, 1971, No3.
 31. Волкова Д.П., Крайнева А.Ф., Расчет волновых зубчатых передач, Волновые зубчатые передачи. Техника, 1976.
 32. Кудрявцев В.Н. и Кирдяшев Ю.Н., Планетарные передачи, Машиностроение, 1977.
 33. 沈允文, 采用渐开线齿形的谐波齿轮啮合研究中的几个问题, 西北工业大学, 科技资料, 1978, 5.
 34. 司光晨、范又功、林祖南、张微元, 谐波齿轮传动, 国防工业出版社, 1978, 6.
 35. 戴浩, 渐开线齿廓的谐波齿轮传动的计算方法, 广播与电视, 1978, No2.
 36. 谢金瑞, 谐波齿轮传动的啮合分析方法 (初稿), 1976.
 37. 谢金瑞, 谐波齿轮传动的自动设计方法 (初稿), 1978.
 38. Шувалов С.А., Поиов П.К., Характеристика точности и жесткости волновых зубчатых передач, Известия Вузов. Машиностроение, 1970, No6.
 39. Поиов П.К., Шувалов С.А., Некрасов В.Н., Частотный спектр кинематический ошибок волновых зубчатых передач, Известия Вузов. Машиностроение, 1973, No1.

40. Фукс Ю.П., О Выборе материалов гибких колес волновых зубчатых передач, Известия Вузов. Машиностроение, 1975, No4.
41. Фукс Ю. П., Определение запаса прочности гибких колес волновых зубчатых передач, Известия Вузов. Машиностроение, 1975, No11.
42. Schaeler H.F., Jennings F.V., United States Patent Office 3091979.
43. Иванов М. Н., Шувалов С. А., Амосова Э.П., Клеников С.С., К вопросу экспериментального исследования напряженного и деформированного состояния гибкого колеса герметичной волновой зубчатой передачи. Известия Вузов. Машиностроение, 1971, No7.
44. Деулин Е.А., Попов Е.Н., Изготовление гибких колес герметичных волновых зубчатых передач. Известия Вузов. Машиностроение, 1977, No12.
45. Tinder D.V., Carey W.R., Mechanical Engineering, 86, No7, P50~53, (1964).