

精密小模数齿轮的制造

高 忠 华

(上海交通大学)

引 言

随着现代科学技术的日益发展,在国民经济与国防工业的各个领域中:如生产过程的自动控制,舰艇、导弹、宇航飞船的导向,超精密雷达装置的测向与追踪等,广泛采用了各类精密控制仪器。由于齿轮传动在一般情况下能按照规定要求,不受外来干扰,保证有严格的传动比,因此各类精密仪器仪表与精密机械中的传动普遍应用了齿轮机构^[1]。

用于各类精密仪器中的传动齿轮,通常工作载荷不大,齿宽与模数较小(公制称“小模数齿轮,模数 $m = 0.1 \sim 1.5$ 毫米;英制称“细节距齿轮”,径节 $p = 20 \sim 200$ 吋⁻¹),这类齿轮总的使用要求有三:

1. 高的传动精度(包括运动精度与工作平稳性);
2. 最小的回差(在可逆传动时,四差将直接影响指示精度);
3. 良好的旋转轻松度,最小的摩擦损耗(便于选用“最小功率发动机”,减轻仪器重量)。

鉴于国防工业与仪器制造业的实际需要,精密小模数齿轮的加工问题,已经引起人们越来越多的注意;美、英、苏、西德、瑞士等国家均集中了不少力量从事这方面的试验研究工作,我国有关工厂、研究所及高校也在这方面积累了丰富经验,并在此基础上分析提高,重新制订了小模数齿轮国家标准 GB—2362; 2363,即将在全国贯彻执行。

环顾世界各国与我国精密小模数齿轮制造的生产实践和科学研究,除了至今尚处于研究阶段与需进一步完善中的自适应控制(Adapted Control, A.C.),应用功率谱分析(Spectrum Analysis)和动态数据系统(Dynamic Data System, D.D.S.)并发展相应的微型计算机,反馈控制误差以提高加工精度外,总的情况大致还是沿着改进“机床—夹具—刀具—毛坯”工艺系统,发展与之相应的检验方法与仪器,同时特别注意加工环境条件(如温度、湿度、冷却油液、切屑清理,尘埃控制……等。)根据作者亲身经验与体会,今择要综合简介于下,侧重阐述切齿机床传动误差的测量与校正,供国内有关单位生产精密齿轮时参考。

一、超精密小模数齿轮的加工

与中模数齿轮生产类似,小模数齿轮的加工可以分为:

1. 无切屑加工(如冷冲、冷轧、热轧、粉末冶金与精密压铸、冷挤压等);^[2]
2. 切削加工。

无切屑加工生产率高,且可节省材料,但精度有限,尚不能满足精密仪器的要求,故高精度的小模数齿轮加工仍沿用切削加工。视齿轮要求,通常有加工淬硬齿轮与不淬硬齿轮两

种工艺。

对淬硬齿轮言，除了在热处理后直接磨出齿形外，其典型工艺是：

…→滚齿（或插齿）→（剃齿）→热处理（淬火）→磨齿→（超声波）清洗→最终检验。

对于不需淬硬的精密小模数齿轮言，除按仿形法用成形铣刀借靠模缩放机构加工外，通常即用插齿刀或滚刀来加工。在精密滚齿机上用滚刀滚出，可获得较磨齿更高的精度^{[3]、[4]}。

美国 Sperry 陀螺仪公司为了研制导航用超精密小模数齿轮（精度超过美国标准级 AGMA 3 级，苏联标准ГОСТ9178—72 4 级），曾耗资50万美元，用于建造一个专用的全封闭净化单元，设计专用的高刚性滚齿机及周密的运输安装设施^[5]。诚然，从现时技术水平言，加工齿距误差 $<10''$ 、不同心度 $<0.3\mu$ 的小模数齿轮，似无必要化费如此大的代价，惟其改进“工艺系统”的观点仍是值得我们参考的。

根据作者的实践与分析^[4]，建议我国沿用的小模数齿轮滚刀标准进行修改，采用加大外径的新规范，从而可增加滚刀圆周齿数（ Z_b ）、相应地可增大孔径，提高滚刀主轴刚度，减少滚齿振动，并使轮齿齿面不平度（ f ）与齿侧波度（ f_b ）大大减少（图1），有助于齿轮工作时的平稳性，这对精密仪器中的齿轮传动机构是很重要的。

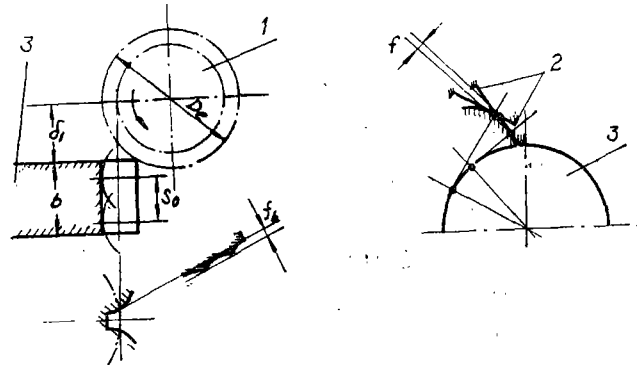


图 1

1—滚刀；2—滚刀齿刃；3—工件

二、机床传动误差的测量与校正

由于精密小模数齿轮传动精度的要求越来越高，从而对切齿机床的精度，尤其是分度精度提出了更高的要求。为此，我们在设计新的切齿机床时，必须注意相应发展有关测定分度精度或传动链精度的各种方法与仪器，并采用误差校正装置，今选择行之有效的数例阐述如下：

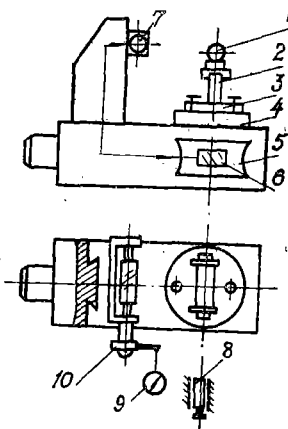


图 2

1—经纬仪；2—定位心轴；
3—定位盘；4—工作台；
5—蜗轮；6—蜗杆；7—滚
刀；8—平行光管；9—指
示表；10—定位测杆

分度精度（或传动链精度）的测量方法

1. 光学法（经纬仪—平行光管法） 将经纬仪与平行光管 8 按图 2 所示安置，初始调正时，使经纬仪借定位心轴 2 装于工作台 4 上的定位盘 3 中（四者须严格同心，偏移量不得超过 2 微米）对准平行光管的刻线；当滚刀一整转时，分度蜗轮（工作台）借经纬仪一起转过相应一角度，然后松开经纬仪度盘，转动经纬仪，重新对准平行光管刻线，测得分度蜗轮实际转过的角度…类此进行，测得滚刀与分度蜗轮间的传动误差。

实际使用时，为了精确测定滚齿机主轴（滚刀）的整转次数，可专门设计带有球形测头的定位测杆 10 与指示表 9 联用。此法虽是一种费时的、间断的测量法，惟仪器是通用的，

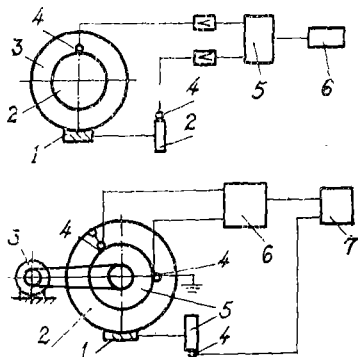


图 3

(上图)1—蜗杆；2—磁盘；3—蜗轮；
4—拾波记录头；5—相甄别器；6—相位计

(下图)1—蜗杆；2—蜗轮；3—电动机；
4—拾波记录头；5—磁盘；6—相甄别器；7—相位计

测量精度尚高，在一般工厂与实验室中应用较广，需要注意的是：

① 经纬仪的精度要高（以 $1''$ — $2''$ 级为宜，因为测量精度与经纬仪度盘精度有直接连系）；

② 安装时，要保证经纬仪的回转轴心尽可能与机床工作台中心重合。

2. 电磁法（电磁分度法）最简单的电磁分度测量的原理如图3a所示，主要元件为两个金属磁盘2，盘缘包一层能记录磁波的金层（ Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 或铜、镍、铁等特殊合金），磁盘上的磁波数量与传动比成比例，利用拾波记录头4录下磁波。如果传动链是完全精确的，则录下的频率相位不变；当传动有任何不均匀时，则反映在信号的相位误差中。相位误差由相位甄别器5检出，由相位计6记录之。

这种测量方法的主要优点为：

- ① 连续无惯性的动态测量法，测量精度甚高，可达0.5秒；
- ② 磁盘的录波精度要求不高，一般生产厂均可制造；
- ③ 可以在机床正常运转中进行连续测量；
- ④ 测量过程时间短，从而可以排除温度的影响；
- ⑤ 通用性大，因为磁盘可以很方便地更换或重录。

但是，这种简单的磁分度测量每测量一对不同传动比的蜗轮付，均要求利用上述的专用装置灌制两个磁盘，因此改进如图3(b)所示：

为了简化测量过程，仅在磁盘5边缘录上读数磁波，当蜗杆1转动时，通过拾波记录头4录下该磁波，放大后再经拾波记录头将磁波转录在磁盘5上，然后将磁盘5与蜗轮2脱开，另用电动机3高速带动之，则此时由固定不动的拾波记录头和与蜗轮固联的记录头经过盘5时，将发出不同信号，经相位甄别器6获得一与被测运动付误差有关的微差信号，由相位计7测得并记录之。

3. 地震仪法 地震仪式扭转振动测量仪(图4(a))从可以任意安装在滚齿机上，用以测定机床工作台运转的均匀性。地震仪是惯性测振仪的一种，它系利用惯性在空间建立静止点以测得振动量(或旋转量)的相对位移。如图4(a)所示，如果机床工作台旋转均匀($\Delta\omega = 0$)，则由于惯性原理，旋转重块1与指示器6的相互位置保持不变。当 $\Delta\omega \neq 0$ 时，则通过仪器的支架2、转簧3，指示器与旋转重块间产生相对的位置变动—这种超出仪器基频以上的振动，可由电感仪测得，并通过测量电桥记录之。阻尼磁铁5的作用系用以消除旋转重块本身振动所引起的误差。

地震仪的作用原理，可以很方便地按牛顿运动定律表明，如图4(b)所示，令

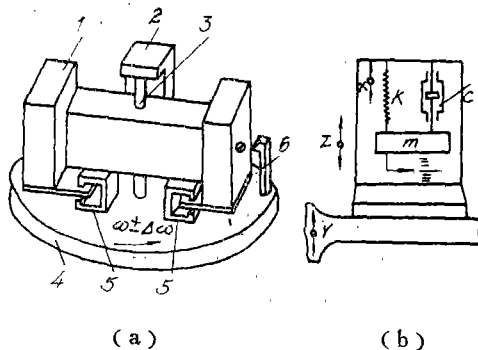


图 4

1—旋转重块；2—支架；3—转簧；4—机床工作台；5—阻尼磁铁；6—测值指示器

Y —被测物体的振动位移;
 Z —重块的绝对位移;
 X —重块与支架的相对位移, (即仪器的示值);
 k —弹簧的刚度;
 m —重块质量;
 c —阻尼系数。

为了简化计算, 假设

- ① Z 很小, 弹簧弹性力与 X 成正比;
- ② 整个系统除阻尼器产生阻尼力外, 无其它摩擦力; 且设阻尼力与速度成正比;
- ③ 弹簧本身的质量略去不计。

系统的运动方程式为:

$$m\ddot{Z} + c\dot{X} + kX = 0$$

而 $Z = X + Y$

$$\text{故 } m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = -m\ddot{Y}$$

$$\text{或 } \ddot{X} + \frac{c}{m}\dot{X} + \frac{k}{m}X = -\ddot{Y}$$

$$\text{令 } \frac{c}{m} = 2\varepsilon \text{ (相当阻尼系数);}$$

$$\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0 \text{ (系统的固有振动频率, 即基频);}$$

$$\text{则 } \ddot{X} + 2\varepsilon\dot{X} + \omega_0^2 X = -\ddot{Y}$$

从上式可知, 若仪器的基频很低 ($\omega_0 \approx 0$), 阻尼弱 ($2\varepsilon \approx 0$), 则上述运动方程式简化为

$$\ddot{X} = -\ddot{Y}$$

积分后略去常数, 得 $X = -Y$, 即仪器的示值与被测物体的振动位移的瞬时值相应, 构成测振仪。

地震仪测量法的特点是: 它工作时的频率很高, 但是基频很低 (0.25Hz), 因此放大倍数可达很大 ($\approx 10,000$ 倍), 其缺点是不能将机床工作台(分度蜗轮)的误差作出直接的记录。

4. 光栅式传动链测试仪^[6] 现时, 在很多精密传动系统中常常要求对整个传动链精度进行动态连续测量。1978年2月由中国科学院长春光机所与北京量具刃具厂联合研制成功的、分辨率达0.5秒的“CDY—1型传动链测试仪”今已批量生产供应。由于该仪器具有体积小、精度高、惯量小, 测量范围宽, 对驱动转速均匀性要求不高, 且能在垂直或水平位置使用等特点, 因此应用较广。

该仪器适用于精密齿轮加工机床(如滚齿机), 雷达减速箱, 跟踪望远镜、精密分度头等传动链误差的测量; 谐波传动链以及其它非渐开线齿轮传动链误差的测量; 仪器还可以用来作为圆柱齿轮付、伞齿轮付、行星齿轮付、蜗杆蜗轮付、圆弧齿轮付等传动误差的测量和配对; 用标准齿轮或标准蜗杆可对单个齿轮误差进行测量。由于仪器是动态地、连续地测量, 所以能在比较接近实际使用情况下查出传动误差, 并直接记录出误差曲线图。通过对误差曲线图的分析, 可以获得传动链误差的种类、数量以及产生的原因, 从而可以指导传动元件的加工和传动系统的装配工艺等。该仪器的示意图及原理方框图见图5、6所示。

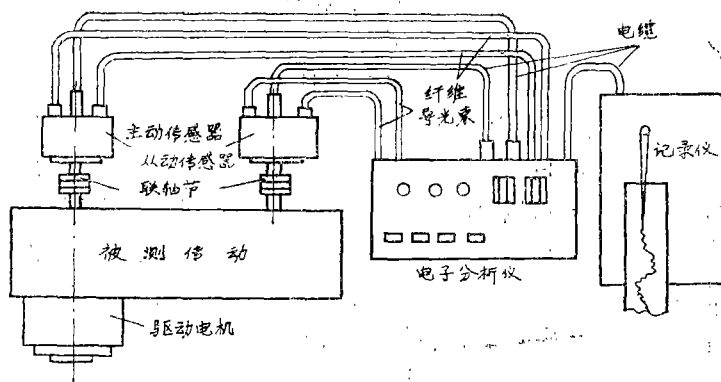


图5 传动链测试仪连接示意图

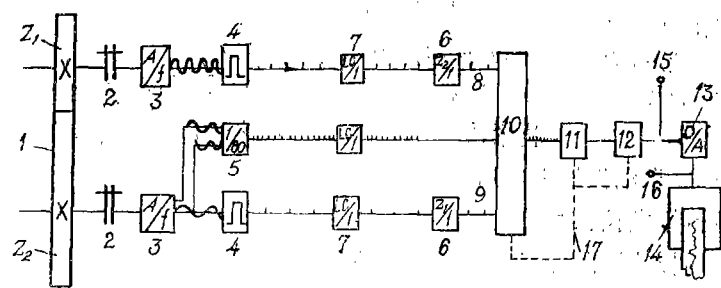


图6 CDY-1型传动链测试仪原理框图

- 1—被测传动装置；2—联轴节；3—角位移传感器（模拟频率转换器）；4—脉冲成形级；5—八十细分电路；6—“可调传动比”的脉冲分频器；7—“量程选择”脉冲分频器；8、9—主动路及从动路；10—门电路；11—计数器；12—寄存器；13—数/模转换器；14—记录仪；15—数字输出；16—模拟电压输出；17—同步连接。

误差数据曲线的频谱分析

我们知道：任一复杂周期数据 $x(t)$ 在时域中可按富里叶级数表达如下：

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} x_n \cos(2\pi n f_1 t - \theta_n)$$

即复杂周期数据可由一个静态分量 x_0 与无限多个谐波分量（振幅为 x_n ，相位为 θ_n ）组成，其频率是 f_1 的整倍数。在具体实践中分析该复杂周期数据时，常可将相角 θ_n 忽略，而以离散谱转换至频域中来表征^[7]，如图7所示。从频谱图中可以既清晰又直观地看出该误差曲线中那个频率（区间）下的幅值影响最大，从而分析出切齿机床中那个环节特别需要进行修正。例如：基频 (f_1) 误差影响最大，一般是蜗轮付传动或分度机构产生；高频 ($>4f_1$) 误差影响较大者，则通常系交换齿轮传动链所产生；……等等。由此，可按之制成“校正曲线”

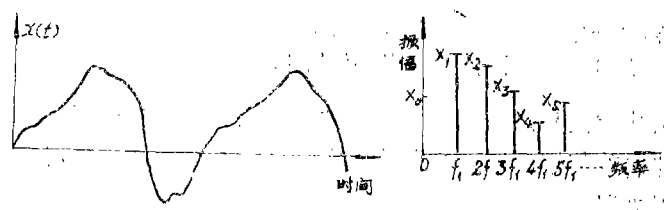


图7

以补偿误差，提高切齿精度。

误差校正装置

尽管人们多年来对切齿机床的分度蜗杆与蜗轮的制造精度作了很大努力，例如采用了轴向余隙很小并经精密研磨的单头蜗杆；在具有原始分度蜗轮（精度极高的“母蜗轮”）的所谓“基准机床”上切制蜗轮……等。但是，不可能无限制地提高制造精度，单纯采用这种方法，会使成本昂贵。因此，近一、二十年内，在精确测得分度机构误差曲线的情况下，广泛采用了“误差校正装置”，较典型的有下列五种：

1. 蜗杆轴向附加串动的校正装置

如图8所示，测得分度蜗轮付的传动误差后，将之制成校正曲线盘4，借助于杠杆机构3，使蜗杆在转动的同时获得附加的轴向串动以补偿误差。

这种装置的缺点是蜗杆结构刚性较差，优点是成本低、结构紧凑，因此适用于仪表机床上。瑞士生产的Lambert—68

型及 Lambert—75 型滚齿机上采用这类装置，效果很好。

2. 双凸轮行星式校正装置

如前所述，蜗杆的轴向可串动带来了驱动装置刚性降低的缺点，因此本法改用了蜗轮的附加运动通过蜗杆的回转来达到。在机床上的具体构造如图9(a)所示，其工作原理(图9(b))为：蜗轮8与蜗杆9的校正运动是靠杠杆(摆爪)11沿蜗轮与蜗杆的校正圆盘(凸轮)14与7的滑动来获得；附加的回转运动即由该两个独立的校正圆盘传出：其中凸轮14产生附加蜗轮修正误差的运动，(摆爪在蜗轮回转一次时绕凸轮转一圈)，凸轮7产生附加蜗杆修正误差的运动，(摆爪在蜗杆回转一次时，绕凸轮转一圈)；齿轮4与5的齿数应该这样选择：即当蜗轮回转一次，5与4须相对地回转一次。例如，若单线蜗杆与 $Z = 120$ 齿的蜗轮相啮合时，则齿轮5与4的齿数将为120与119。

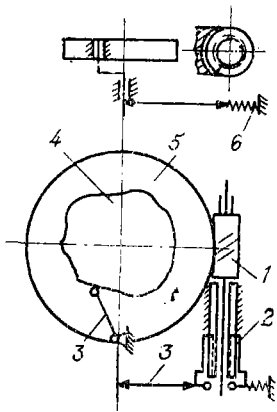


图8

- 1—蜗杆；2—螺杆与螺套；
3—杠杆机构；4—校正曲线盘；5—蜗轮；6—弹簧；

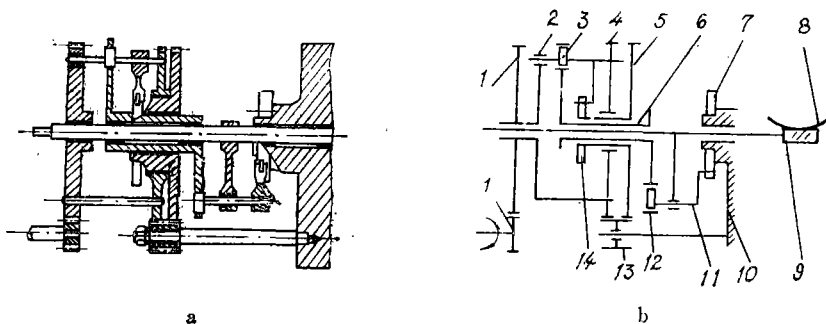


图9

- 1—可换齿轮；2—导架；3—偏心轮；4.5.13—齿轮；6—套筒；7—蜗杆校正圆盘；
8—蜗轮；9—蜗杆；10—床身；11—偏心轮杠杆；12—套筒臂；14—蜗轮校正圆盘

这种校正装置结构尚简易，且能消除蜗轮的累积误差与蜗杆误差，余下的只是误差值不致过大的运动链元件误差与蜗轮渐开线误差，实际试验结果表明：采用这种校正装置很易将机械误差修正至7微米以内。

3. 双蜗轮式校正装置

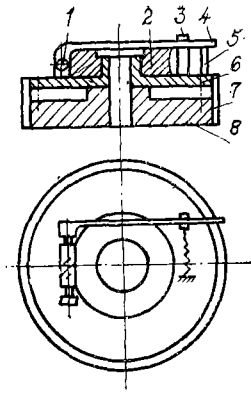


图10

- 1—附加蜗杆；2—附加蜗轮；
- 3—支架；4—摆杆；5—触头；
- 6—台面（修正环）；
- 7—盖板；8—工作台

如图10所示，在机床工作台面8上附加一回转台面6，其上紧固修正环，端面刻有与机床分度付相应的误差修正曲线，依靠触头5、摆杆4，使曲线升降的波值变为附加蜗杆1与附加蜗轮3的附加运动，以补偿工件因机床分度蜗轮付所造成的周节误差。此方法称为修正环补偿法。

双蜗轮式校正装置需要附加一套蜗轮付，且只适用于误差较大时修正，这是因为附加运动与切削力之间有方向性之故。

4. 利用衍射计量光栅法的校正装置

英国国家物理实验室(NPL)与国家工程实验室(NEL)首创并发展了将衍射计量光栅应用于机床控制方面。

适用于位移(包括角位移)测量的简单光栅主要是在玻璃标尺上刻有高密度的、有规律间隔的平行黑线(作角位移测量时，则按径向辐射状刻划，如车轮辐条一样)从而形成交替出现的透明与不透明条纹(图11(a))。如将两片这样的光栅面对面放置，并使两组黑线不十分平行，用光照射后，则可看到垂

直于这两组黑线的中央方向呈现较宽的暗带与亮带，称“莫尔条纹”(Moiré fringes)。如图11(b)所示。

莫尔条纹所以能用于测量是因为：当一片光栅相对于另一片光栅沿着与光栅线条垂直的方向移动(或旋转)一条线的间距时，莫尔条纹就会恰恰移动一个条纹的间距。由于条纹间距较线条间距大很多倍(两光栅的夹角愈小，则莫尔条纹间距愈大)，故条纹图样是光栅间位移的极灵敏的指示器。

用光电管对准光栅上任一小块面积，即可将条纹运动时所呈现的亮度的周期变化转换成周期性的电讯号而测出。

将衍射计量光栅用作测量标尺的主要优点是：测量过程可以认为是连续不断的，因此可用作动态测量与控制机床用的校正装置的基础(图12)。

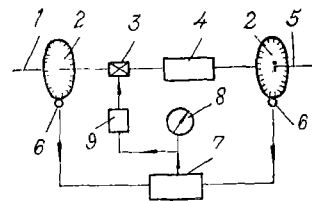


图12

- 1—输入；2—圆光栅；3—差动机构；4—主传动机构；5—输出；6—判读头；7—相位计；
- 8—指示器或记录器；9—伺服装置。

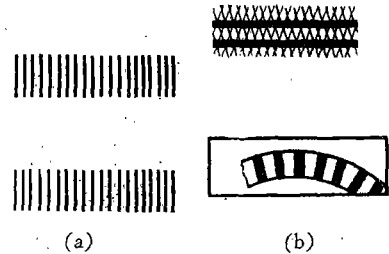


图11 计量光栅与莫尔条纹示意

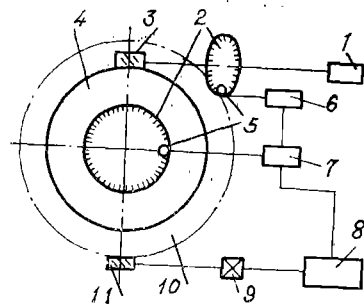


图13

- 1—主电动机；2—圆光栅；3—滚刀；4—工件(齿轮坯)；5—判读头；6—脉冲计数器；7—相位计；8—伺服电机；9—差动机构；10—蜗轮；11—蜗杆

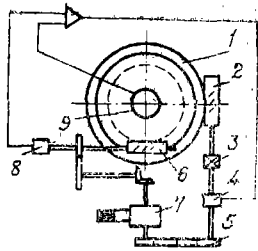


图14

1—控制蜗轮；2—控制蜗杆；
3—差动机构；4—反馈装置；
5—传动齿轮；6—滚刀；7—主
传动；8—传感器；9—传感器

动间的误差（图13）。

5. 反馈伺服电子校正装置

其原理如图14所示，将普通的分度蜗轮付（图中未示出）只作驱动用的精密蜗轮付（称“控制蜗轮1”与“控制蜗杆2”），滚刀与工作间的传动误差，经传感器8、9至反馈伺服装置4，指令控制蜗杆附加转动而进行校正。

这种装置的优点在于：用作驱动的蜗轮付仅需着重考虑如何提高其传递效率，而不必太严格要求其传动精度问题；控制蜗轮付则不承受附加载荷，磨损少。缺点是多加了一对蜗轮付，增加机床的制造成本。

三、小模数齿轮检测

为了保证小模数齿轮的使用质量，揭露工艺上产生误差的根源并予以消除，除了在制造工艺上努力提高外，对小模数齿轮的检验与测试环节也必须给予最大的注意^{[8]、[9]}。

从检测工作的组织形式言，一般可分为：预防性检验（机床—刀具—夹具的定期检验以及工件的首件检验）；工艺性检验（用作工艺调整及揭露误差产生原因）与最终检验（即验收）。三者的比重与工厂文明生产的水平有关。在齿轮制造过程中及时采取措施，预防废品的产生，远较在加工完毕后验收时再剔除废品要有利和经济得多。因此工业较发达的欧美各国多强调平时定期检验工艺系统的精度，验收时多采用较单啮检验更简易的双啮检验，这看来确有其合理性，尤其当小模数齿轮产量大，品种多与难检验等情况下，自应严格控制机床—刀具—夹具—工件（即工艺系统）的精度。

由于电子技术与电子计算机的迅猛发展，在齿轮检测方面广泛采用了动态测量以替代静态测量，并有趋势逐渐应用专用电子计算机（微型计算机和微处理机）贮存与分析测量信息，进而反馈控制加工误差以提高精度，这方面需要我们给予密切关注。

参 考 文 献

- [1] G. W. Michalec, Precision Gearing, Theory and Practice, 国防工业出版社, 1966.
- [2] 美国专利 No. 2934980 Приборостроение 1962, No. 9.
- [3] 高忠华, 《上海交通大学学报》, 1963, No. 2.
- [4] 高忠华, 上海机械, 1964, No. 9.
- [5] E. J. Tangerman, «Machinist(u. s.)» 1956, 100, No. 11.
- [6] J. S. Bendat, A. G. Piersol, 随机数据分析法, 国防工业出版社, 1976.
- [7] 黄立里等, 中国科学, 1973, No. 4.
- [8] Б. А. Таїц, Машгиз, 1972.