

高精度轴角数据传递齿轮装置

薛培中

一、前言

精密弹道测量雷达，测量精度为 $0.04 \sim 0.05$ 密位(相当于 $8.6 \sim 10.8$ 角秒)。雷达天线座方位轴和俯仰轴的轴角数据信号，是由17位的光学编码器发出的。由于结构上的原因，编码器不能直接与测的轴同心联接，而必须通过一对速比 $i = 1$ 的精密齿轮，将轴的运动引出传递给编码器，为了减弱外界振动的影响和消除安装所带来的附加传动误差，在轴角数据传递系统中，还应用了两个精密弹性联轴节。^[1]

轴角数据传递系统见图1。

17位编码器的测角分辨率为 ± 10 角秒，齿轮传动误差和弹性联轴节误差的总和，不得大于编码器分辨率的数值，否则将会产生错码、降低雷达的测量精度。

轴角传递系统的误差分配，要求齿轮装置的传动误差(包括反转时的回程差)不得大于12角秒。

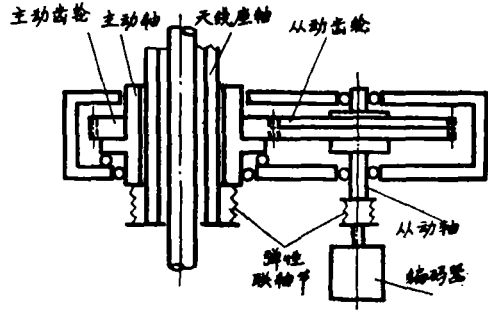


图 1

我们研制的高精度轴角数据传递齿轮装置，已经在国产的精密测量雷达上经过长期使用考验，性能一直准确可靠；设计和工艺也已得到推广。

二、结构

齿轮装置的主要组成部分为：轴系；齿轮；箱体。图2为齿轮装置的结构图。

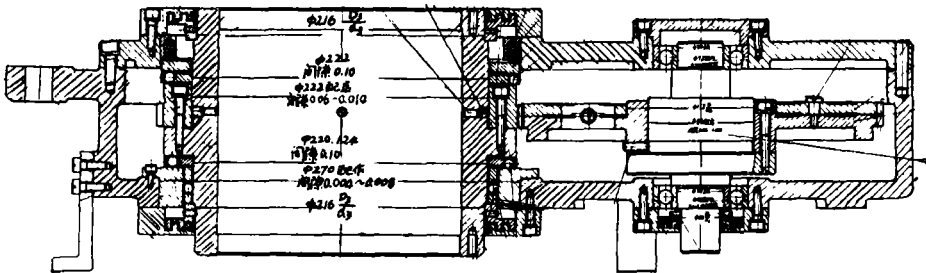


图 2

轴角数据传递齿轮装置的功用是将轴的转角运动准确的传递给编码器，因而其特点为：精度高，载荷轻，速度低。同时还要求在所使用的温度范围内（-40℃~+50℃）其精度和灵敏度不得降低。在正反转中不得有回程间隙出现。

齿轮装置的结构设计，要最大限度的保证得到高精度的结果，要有好的工艺性。

1. 轴系

齿轮装置中有两个轴系——主动轴系和从动轴系。上边分别装有主动齿轮和从动齿轮。

主动轴为空心的筒状，腔内要穿过天线座的主轴及油管、导线等、轴系的设计采用平滚道单列径向滚珠轴承和单列轴向滚珠轴承。径向的定位只靠一个轴承。轴承的外环、钢球和轴滚道之间为零间隙。外环及轴滚道面的圆度小于1微米，钢球的圆度小于0.3微米，一组钢球（36粒）的尺寸差在1微米以内。轴系的工作精度不大于1微米。

轴系的外环、钢球和轴都用同一材料制成，具有相同的膨胀系数，在任何温度下轴系间的零间隙都不会改变。轴承外环与箱体的材料不同，但在室温下其配合有6微米的间隙，外环是靠端面法兰用螺钉与箱体紧固。这种设计可防止高温时轴系间过盈及低温时间隙过大而引起轴系的精度和灵敏度的改变。

从动轴采用两个单列向心滚珠轴承，在—批C级轴承中，精选出内环孔径向跳动小于1微米轴承用于装配，装配时消除轴承的间隙。

2. 齿轮

齿轮的参数是考虑到最有利的精磨齿条件而确定的。^[2]

其主要参数为：

模数：2.25毫米，

齿数：120；

压力角：20°；

直齿。

两个齿轮的参数完全相同，主动齿轮为齿圈，从动齿轮为双片浮动，用4个弹簧消除轮齿的间隙，弹簧力的计算要大于反转惯性扭矩和摩擦力矩的总和。

为了保证齿轮在精磨齿加工、齿检测和齿轮装配中的基准面相一致，减小中心偏移而产生误差，主动齿轮和从动齿轮上都制出一精确的圆柱面，做为找正的基准。

齿轮孔与轴的配合有8微米的间隙，主动轴上有8个细牙顶丝、从动齿轮上有4个细牙顶丝用来微调齿轮的中心位置。

3. 箱体

箱体和箱盖有足够的刚性，其结合面精密刮研，组合后用4个锥肖定位，肖孔钻铰后研磨，与肖钉接触面积达到80%。

各轴承孔在座床镗床上精镗，孔的圆度和同心度小于3微米。

4. 润滑和密封

齿轮和轴承的润滑，都用航空润滑脂，在高、低温情况下都能正常工作，严格防止灰尘进入箱体内，各固定结合面用橡胶圈密封，各活动面用毛毡和迷宫双层密封，迷宫槽内放入润滑脂。

三、精度

齿轮装置传动误差的主要来源为：

齿轮制造固有误差；

轴系的误差；

齿轮安装误差。

1 齿轮的运动误差

齿轮的制造误差取决于磨齿机床的精度、齿轮装卡精度及工艺调整情况。

检验齿轮误差的最完善方法是用单啮仪进行单面啮合综合检验。可以得到连续的齿轮运动误差曲线 $\Delta Fi'$ ，但对我们所用的齿轮，精度极高，目前的单啮仪和基准件都不能胜任。因而只得用单项检验的方法来控制齿轮的制造精度。

齿轮的单项检验项目及公差要求：

周节累积误差。 $\delta F_p = 0.004$ 。

单一周节误差。 $\delta F_{pt} = 0.002$ 。

齿形误差。 $\delta f_f = 0.001$ 。

齿向误差。 $\delta F_\beta = 0.003$ 。

齿面光洁度。 $\nabla 10$ 。

综合单个齿轮的运动误差值：

$$\Delta F = \frac{206400}{R_f} \sqrt{\Delta F_p^2 + \left(\frac{\Delta f_f}{\cos \alpha_f}\right)^2 + \Delta F_\beta^2} \quad (\text{角秒}) \quad \dots\dots(1)$$

式中 R_f —齿轮的分度圆半径(毫米)。

α_f —齿轮的分度圆压力角。

2. 轴系的误差及对运动误差的影响

轴系回转误差来自：

轴滚道面圆度 ΔE_1 。

轴承环滚道面的圆度 ΔE_2 。

钢球的圆度 ΔE_3 。

一组钢球的尺寸差 ΔE_4 。

综合轴系的重转误差值：

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_1^2 + \Delta E_2^2 + \Delta E_3^2 + \Delta E_4^2} \quad (\text{微米}) \quad \dots\dots(2)$$

由于轴系的误差使得齿轮中心产生晃动，引起的齿轮运动误差值：

$$\Delta F_x = \sqrt{\Delta F_{f1}^2 + \Delta F_{f2}^2 + \Delta F_{E1}^2 + \Delta F_{E2}^2 + \Delta F_{\lambda 1}^2 + \Delta F_{\lambda 2}^2 + \Delta F_{e1}^2 + \Delta F_{e2}^2} \quad (\text{角秒}) \quad \dots\dots(6)$$

5. 齿轮运动误差的相互补偿

齿数相同的一对齿轮，在传动时重复啮合的配偶齿总是不变的。因而可根据齿轮运

$$\Delta F_E = \frac{\Delta E}{R_f} \cdot 206400 (\text{角秒}) \quad \dots\dots(3)$$

3. 齿轮安装误差及对运动误差的影响
齿轮在轴上的安装误差主要为径向偏心 e_D 和端面歪斜 e_T 。

由于径向偏心而引起的齿轮最大运动误差值：

$$\Delta F_e = \frac{2e_D}{R_f} \cdot 206400 (\text{角秒}) \quad \dots\dots(4)$$

由于齿轮歪斜而引起的齿轮最大运动误差值：

$$\Delta F_\lambda = \frac{\delta_\lambda \cdot B}{2R_f} \cdot 206400 \quad (\text{角秒}) \quad \dots\dots(5)$$

式中 B —齿圈的宽度(毫米)。

δ_λ —齿轮歪斜的角度

$$\delta_\lambda = \frac{e_T}{2R_T} = \frac{e_A}{2R_A}$$

e_T —齿轮端面跳动量。(毫米)

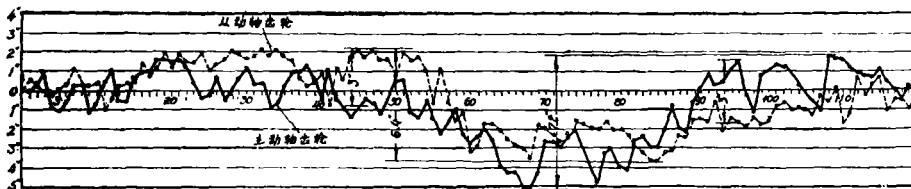
R_T —齿轮端面圆的半径。(毫米)

e_A —轴台的轴向跳动量。(毫米)

R_A —轴台圆的半径。(毫米)

4. 综合两个齿轮运动误差、轴系误差而产生的齿轮装置的传动误差值：

动误差曲线选择最合适的齿搭配，使得两齿轮的运动误差相互补偿。进一步提高两齿轮的传动精度。



主动齿轮的 $\Delta t_x = 7.2$ 角秒

从动齿轮的 $\Delta t_x = 6.4$ 角秒

两齿轮误差相补偿后传动误差 = 6 角秒

图3. 2#装置两齿轮误差相补偿

图3为两齿轮误差补偿的实例。主动齿轮的运动误差为 7.2° 角秒，从动齿轮的运动误差为 6.4° 角秒，相互补偿后的传动误差则只有 6° 角秒。

6. 齿轮装置传动误差的估算

已知： $\Delta F_v = 0.004$ ， $\Delta f_f = 0.001$ ，

$\Delta F_\beta = 0.003$ ， $R_f = 135$ ，

$\alpha_f = 20^\circ$ ，

由式(1)可算出 $\Delta F = 7.81^\circ$ 角秒。

又知： $\Delta E_1 = 0.001$ ， $\Delta E_2 = 0.001$ ，

$\Delta E_3 = 0.0003$ ， $\Delta E_4 = 0.001$ 。

由式(2)、式(3)可算出 $\Delta F_{\lambda_1} = 2.8^\circ$ 角秒。

又知： $e_D = 0.0005$ ， $e_T = 0.002$ 。

由式(4)、式(5)可算出 $\Delta F_{\lambda_2} = 1.52^\circ$ 角秒

$\Delta F_{\lambda_1} = 0.019^\circ$ 角秒

$\Delta F_{\lambda_2} = 0.15^\circ$ 角秒

最后代入式(6)算出 $\Delta F_s = 11.9^\circ$ 角秒。

可满足设计指标 12° 角秒的要求。

四、鉴定

齿轮装置的主要鉴定项目为传动误差，不得大于 12° 角秒。^[3]

1. 传动误差的动态测量方法

用动态测量方法，可以连续无遗漏的测量和记录下齿轮装置的传动误差，其所用仪器和方法见图4。

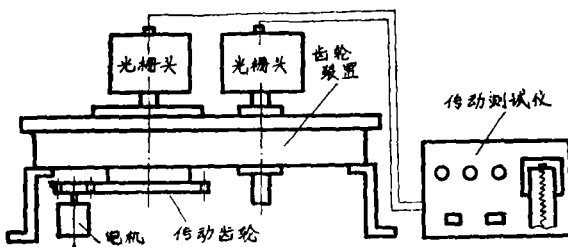


图 4

两个光栅头分别联接在主动轴及从动轴上，驱动电机经过齿轮减速带动主动轴转动，这时从动轴也转动，两个光栅头发出的

光电信号输入到传动测试仪进行比相，齿轮装置的传动误差可测出并将误差曲线记录下来。

2. 传动误差的静态测量方法

静态测量方法是间断的测出传动误差，其所用仪器和方法见图5。

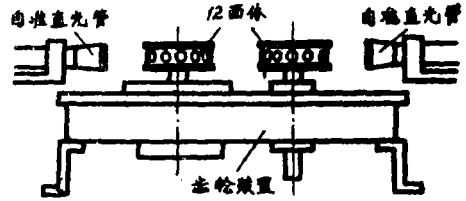


图 5

在主动轴及从动轴上分别安装精确的光学12面体，两台自准直光管与相应的反射面对正，当主轴每转过 30° 后，两自准直光管读数之差即为该转角的传动误差，主轴回转一周可测得12个点的误差值。

主轴正转一周，再反转一周，所测得的总误差值即包括齿轮和轴承可能存在间隙而产生的回程误差值。

3. 测量结果示例

图6为 2° 齿轮装置在室温和零下 15°C 条

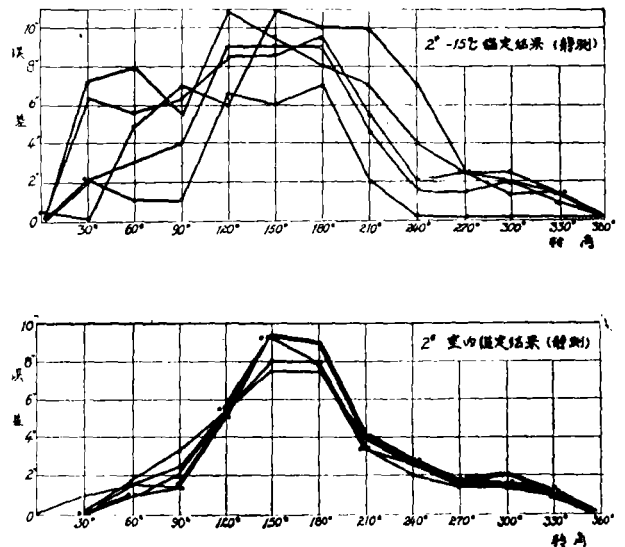


图 6

件下静测的结果比较。可以看出：在量值上没有变化，只是由于在低温下操作，读数的分散性较大。

图7为3#齿轮装置用静测和动测两种方法测量结果的比较。

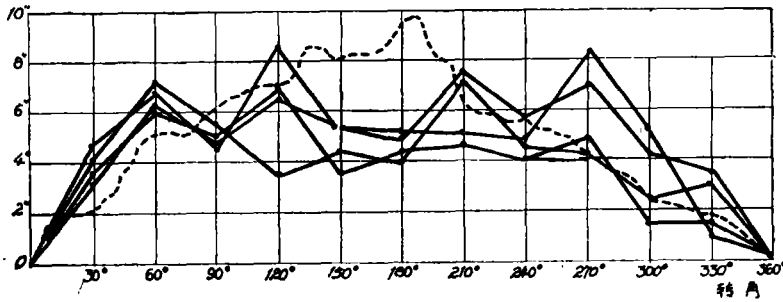


图 7

下表为几台齿轮装置的精度鉴定结果。

序号	静 测		动 测
	20℃	-15℃	
2#	9.5角秒	11角秒	13角秒
3#	8.5角秒		10.4角秒
4#	6.1角秒		
5#	6.4角秒		

五、结语

1. 轴角数据传递齿轮装置的精度，在一定程度上决定了雷达的测量精度。结构设计及精度分配上的合理、良好的工艺性是实现高精度的重要因素。

2. 零间隙滚动轴承、齿轮的可调整安装，以及齿轮运动误差的补偿，是齿轮装置得到高精度的有效措施。

3. 为保证在各种温度下长期使用的可靠性，采用轴承外环与箱体孔有间隙配合和端面紧固的方法，选用合适的材料和热处理工艺，是非常重要的。

参 考 文 献

- [1]精密弹性联轴节
长春光机所研究报告
- [2]用国产 y7431 型磨齿机磨制超精密齿轮
长春光机所研究报告
- [3]高精度齿轮分度误差及齿轮装置传动误差的测量
长春光机所研究报告