

# 高精度谐波传动刚轮、柔轮的磨齿

王 立 鼎

## 前 言

谐波齿轮传动已经在国内一些科研单位和工厂开始研制和应用。谐波齿轮传动中使用着一对齿数仅相差二、三个齿的相啮合的内齿轮和外齿轮。谐波齿轮多采用直齿廓齿形,具有齿数较多以及在薄壁筒上加工出齿形等特殊的要求。

一般,用插齿法和滚齿法加工的内外齿谐波齿轮,其传动角误差为 $1'$ 至 $3'$ 。为了满足高精度谐波齿轮传动精度的要求,除了设计合理的结构以外,还须探讨高精度谐波齿轮的加工方法,特别是内齿的精加工方法。

我们在研制高精度谐波齿轮的过程中,遵照伟大领袖和导师毛主席关于“自力更生”的教导,学习大庆工人阶级“没有条件,创造条件也要上”的革命精神,经过改装现有机床和反复实践,在国产Y7431型磨齿机上磨出了5~4级精度直线齿廓的内齿和外齿的谐波传动齿轮。

本文主要介绍磨内齿装置的工作原理以及调整使用方法。由于实践和认识有局限性,缺点和错误在所难免,希望读者批评指正。

## 一、磨内齿装置

自行设计的磨内齿装置装在Y7431(或Y7125)磨齿机上(见图1),可以磨削直线齿廓的内齿齿轮。亦可磨直线齿廓的外齿齿轮。

磨内齿装置的工作范围:

模数(m) 0.3~2

齿数(Z) 8~242

齿形角( $\alpha$ )  $15^\circ\sim 40^\circ$

直径( $d_f$ ) 100~380毫米

齿宽(B)  $\leq 30$ 毫米

齿向斜角( $\beta$ )  $\pm 20^\circ$

磨内齿过程中该装置可以完成以下四个动作。

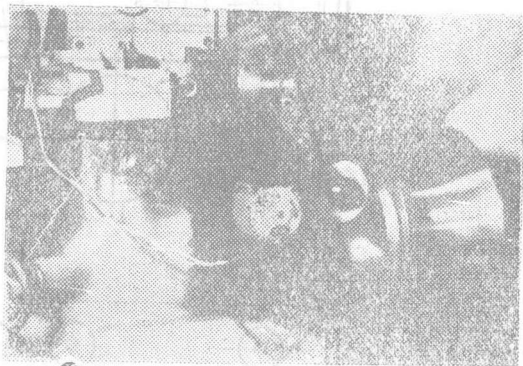


图1 磨内齿装置

### (一) 主切削运动

主切削运动由专用的小砂轮实现,它可同时磨削齿的左右两侧面。砂轮由0.14千瓦的电机拖动,转数为5600转/分,砂轮直径为 $\phi 80$ 和 $\phi 125$ 两种,分别可获得23.5和36.7米/秒的线速度。

### (二) 分度运动

利用Y7431磨齿机上的原分度机构,它的分度元件是精密分度盘,通过图2上机床头架13中的工件主轴将分度运动传递给齿轮。属于间歇式分度。

### (三) 进给运动

进给运动控制齿厚尺寸,是由图2砂轮立柱5中的升降丝杠拖动砂轮架4上下移动,促使磨头10相对齿轮11作径向进给来实现的。

### (四) 走刀运动(磨头冲程)

实现走刀运动的磨头冲程系由机床摆杆

14拉动钢丝绳2，使活动滑座7相对固定导轨6移动来实现的。当摆杆换向放松钢丝绳时，拉簧1拉动活动滑座7实现回程。

走刀运动必须与分度运动有节奏地配合，即分度时，砂轮必须脱离齿轮，而在二

次分度的间歇时间内，砂轮完成切进齿轮和回程切离齿轮的动作。上述运动的搭配，由机床本身的马氏机构和摆杆14同周期的协调工作来保证。

图2中之1是平行的二条拉簧，如果钢

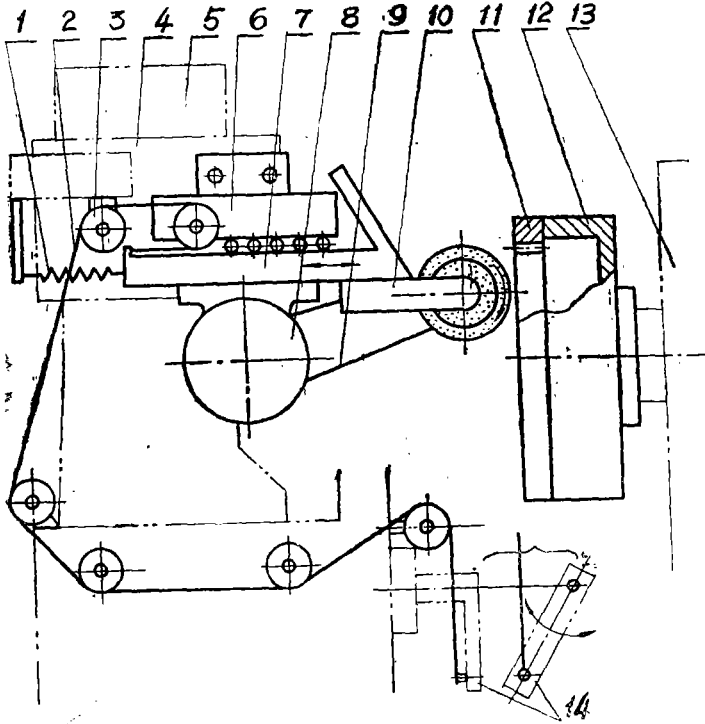


图2 磨内齿装置工作原理图

- 1.拉簧 2.钢丝绳 3.滑轮 4.机床砂轮架 5.机床砂轮立柱 6.固定导轨 7.活动滑座  
8.电机 9.皮带 10.磨头 11.内齿轮 12.磨齿夹具 13.机床头架 14.摆杆

丝绳因弯曲疲劳而发生断裂时，拉簧立即能将磨头拉向右边，使砂轮离开齿面，因而可以避免磨伤齿轮的事故。

## 二、磨齿调整

### (一) 磨齿夹具

所采用的磨内、外齿夹具如图3所示。图中的磨齿夹具装在机床工件主轴上，各种夹具均可使齿轮径向调整。其中，图a)是磨削渐开线外齿柔轮用的夹具，加工时，为了保证齿圈的圆度和精度，柔轮内装有一个几何精度和配合精度较高的内胎。图b)是磨削

渐开线或直线齿廓外齿刚轮用的夹具。图c)是磨削直线齿廓内齿柔轮用的夹具，加工时，为了保证齿圈的圆度和精度，柔轮外圆上装有一个刚性环。图d)是磨削直线齿廓内齿刚轮用的夹具。

### (二) 磨头调整

砂轮轴选用C或D级精度径向止推滚珠轴承，并加予紧力，使轴向窜动控制在2微米之内。为了消除震动，砂轮和电机转子经过平衡。

磨头相对于活动导轨前后位置的调整，应使金刚石切削刃的移动轨迹能够通过砂轮轴心线。如果金刚石切削刃移动轨迹偏离砂

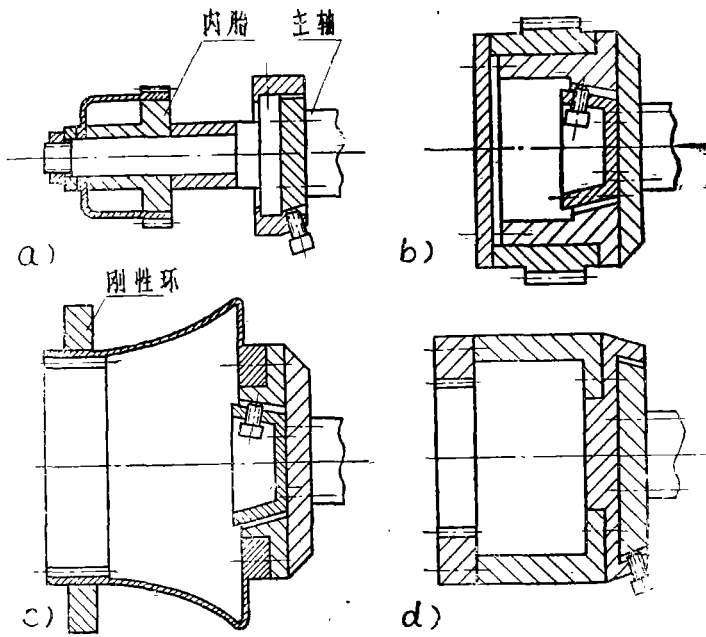


图3 谐波传动齿轮磨齿夹具

轮轴心线，修整砂轮时将产生图4所示的截形误差，砂轮截形轮廓不直，且截形角增大。

$$\begin{aligned} \beta &= \theta + \gamma \\ &= \theta + \frac{180^\circ}{Z} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

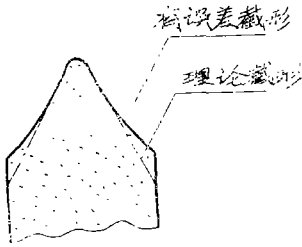


图4 砂轮截形误差

(三) 齿形角调整

1. 砂轮截形角的计算

磨外齿时的砂轮截形角  $\theta$  与齿轮齿形角 [见图5 a)] 的关系式为：

$$\begin{aligned} \theta &= \alpha + \gamma \\ &= \alpha + \frac{180^\circ}{Z} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

式中， $\alpha$ ——齿轮的齿形角；  
 $Z$ ——齿轮的齿数。

磨内齿时的砂轮截形角  $\theta$  与齿轮齿形角 [见图5 b)] 的关系式为：

$$\theta = \alpha \dots\dots\dots (2)$$

其内齿齿体半角  $\beta$  与  $\theta$  角的关系式为：

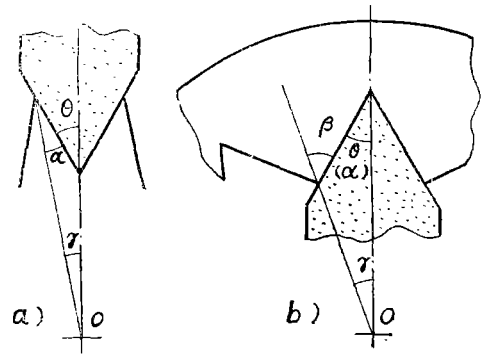


图5 砂轮截形角与齿轮齿形角的关系

2. 砂轮修整器有关尺寸的确定

砂轮修整器在活动导轨的前部、砂轮的斜上方，如图6所示。

砂轮修整器的设计，采用了正弦尺的原理，以几个线量尺寸来确定修整砂轮的截形角  $\theta$  (见图7)。

下面用计算方法找出  $O_{15}$ 、 $O_{20}$ 、 $O_{30}$ 、 $O_{40}$  各点的位置，这些点是当  $\theta$  角分别为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $40^\circ$  时，导向板和平面板之间定位孔的中心。

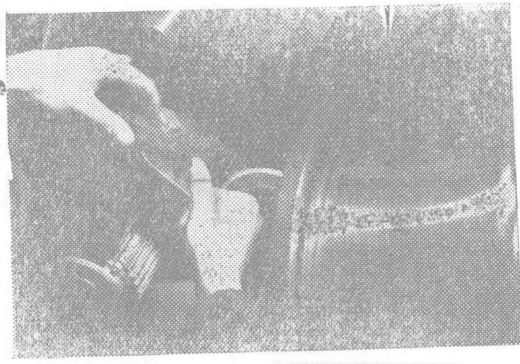


图6 砂轮修整器

图7中,

$$\triangle OAD \sim \triangle EAB$$

$$\frac{\overline{OA}}{\overline{EA}} = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}}$$

即 
$$\frac{H}{L} = \frac{L - \frac{r+h}{\cos \theta}}{L \cdot \tan \theta}$$

$$H = \frac{L \cdot \cos \theta - (r+h)}{\sin \theta} \dots\dots (4)$$

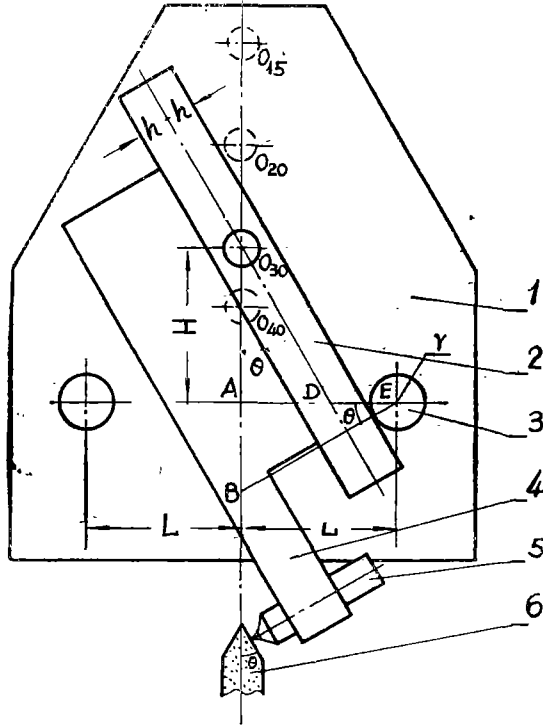


图7 砂轮修整器各部尺寸关系

1.平面板 2.导向板 3.定角柱 4.刀体 5.金刚刀 6.砂轮

在设计中确定  $L = 30$ ,  $h = 6$  并令  $r = 5$ , 此时可按式(4)计算出  $\theta$  在特定角度下的  $H$  值:

$\theta$	15°	20°	30°	40°
H	69.460	50.262	29.962	18.639

假若  $\theta$  不是上列整数, 如  $\theta = 27^\circ 43' 30''$  时, 可以选用与它相接近角度 (即  $30^\circ$ ) 的定位孔, 以更换定角柱的方法进行修整。定角柱的尺寸计算式如下:

$$r = L \cdot \cos \theta - H \cdot \sin \theta - h \dots\dots\dots (5)$$

### 3. 砂轮修整器的误差分析

对式(5)全微分, 并用增量近似表达:

$$\begin{aligned} \Delta r &= \frac{\partial r}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial r}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial r}{\partial H} \Delta H + \\ &+ \frac{\partial r}{\partial h} \Delta h \\ &= \Delta L \cdot \cos \theta - L \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta \\ &- H \cdot \cos \theta \cdot \Delta \theta - \Delta H \cdot \sin \theta - \Delta h \\ \Delta \theta &= \frac{\Delta L \cdot \cos \theta - \Delta H \cdot \sin \theta - \Delta h - \Delta r}{L \cdot \sin \theta + H \cdot \cos \theta} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

由式(6)可以计算修整器各部尺寸误差所引起砂轮截形角的误差。假若 $\theta = 27^{\circ}43'30''$ 、 $L = 30$ 、 $H = 29.962$ ，而且各部尺寸按最不利的偏差方向和数值来考虑，即 $\Delta L = 0.02$ 、 $\Delta H = -0.02$ 、 $\Delta h = -0.02$ 、 $\Delta r = -0.01$ ，此时

$$\Delta\theta \approx 5'$$

#### 4. 齿轮齿形角的精调

在磨齿中，常由于砂轮修整器各圆柱配合部位的间隙引起齿形角加大，还可能出现左右齿廓齿形角不相等的现象。因此，在齿轮的齿形半精磨之后，可根据工艺检验的齿形误差，采取如下措施提高齿形精加工的精度。

① 在定角柱与导向板之间加垫片的方法使齿形角减小

对式(1)和(2)微分，

$$\Delta\theta = \Delta\alpha \dots\dots\dots (7)$$

对式(5)微分，

$$\Delta r = -(L \cdot \sin \theta + H \cdot \cos \theta) \Delta\theta \dots\dots\dots (8)$$

将式(7)代入式(8)，

$$\Delta r = -(L \cdot \sin \theta + H \cdot \cos \theta) \Delta\alpha \dots\dots\dots (9)$$

式中 $\Delta r$ 表示，当齿形角误差 $\Delta\alpha$ 为“+”偏差时应该加垫片的厚度。

② 砂轮横向位移，补偿左右齿廓齿形角一正一负的误差

如图8所示，齿轮齿槽锥角为 $2\alpha$ ，但齿轮中心O不在砂轮锥角平分线上，而偏离一

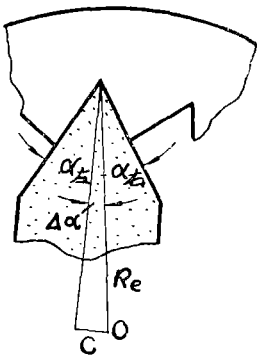


图8 左右齿形角不对称

距离C，这样，

$$\alpha_{左} = \alpha + \Delta\alpha$$

$$\alpha_{右} = \alpha - \Delta\alpha$$

左齿廓齿形角误差为 $+\Delta\alpha$ ，

右齿廓齿形角误差为 $-\Delta\alpha$ 。此时，

$$\Delta\alpha = \frac{C}{Re} \dots\dots\dots (10)$$

针对这种误差特点，只要将砂轮向右移动C值的离距，齿槽重新与砂轮对刀修磨齿形就可以把它消除。

$$C = \Delta\alpha \cdot Re \dots\dots\dots (10a)$$

式中， $Re$ ——齿轮的齿顶圆半径。

当 $\alpha_{左}$ 正确，只 $\alpha_{右}$ 有 $-\Delta\alpha$ 误差，同样可用这样方法修磨右齿廓齿形角。但是，砂轮要脱离左齿廓。

#### (四) 砂轮与齿轮对中的调整

上面已经叙述了砂轮锥角平分线不通过齿轮几何中心，会使齿轮左右齿廓齿形角不对称。在此，介绍一下砂轮与齿轮对中的方法，亦即砂轮修整器与齿轮对中的方法。

图9表示了一种摆表的对中方法。把百分表装在一个以工件主轴为摆动中心的摆杆

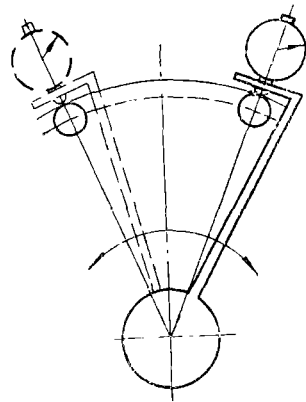


图9 砂轮修整器与齿轮的对中

上，摆动摆杆，使表的测头划过砂轮修整器上的两个定角柱，调整砂轮架与工件主轴轴线的相对位置，直到百分表划过两个定角柱时的指示数值一致，即表示对中。

经过分析计算，此种方法可控制不对中误差在0.01~0.05毫米，由此产生的左右齿

廓的齿形角误差仅为1'左右。

### (五) 齿向的调整

目前,谐波传动齿轮采用直齿,在调整机床时,须使磨内齿装置活动滑座的运动方向与工件主轴轴线相平行。其调整办法见图10。在工件主轴上装一个标准圆柱检验棒(或利用如图3d)夹具体的准确外圆柱面),在装置的活动滑座上装一表架,把表触及圆

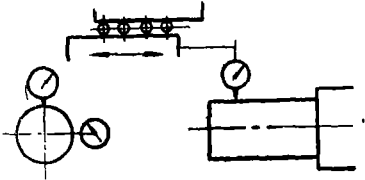


图10 调整磨内齿装置导轨的运动方向

柱面上,通过滑座往复运动进行调整。滑座对主轴轴线在垂直平面内的平行性,靠固定导轨与机床砂轮架间螺钉孔与紧固螺钉的间隙来调整(见图2);在水平平面内的平行性,靠机床砂轮立柱的转角来调整。

当轮齿半精磨后工艺检验发现有齿向误差时,可以对机床再次精调。如左右齿廓属于同旋向误差,只要砂轮立柱微调一个角度即可。游标刻度值为1',微调角度按下式计算:

$$\varepsilon = 3438 \frac{\Delta B_x}{B} \text{ (弧分)} \dots\dots\dots (12)$$

式中, B —— 齿轮的齿宽;

$\Delta B_x$  —— 齿轮的齿向误差。

### (六) 磨头行程长度的调整

计算磨头行程长度S时,要考虑机床分度时间和3~5毫米的磨头超程量(见图11),如果齿轮的齿宽为B,则

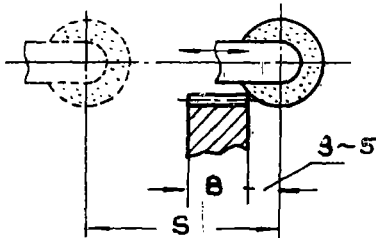


图11 磨头行程调整

$$S = 2B + (5 \sim 10) \dots\dots\dots (13)$$

装置可以达到的最大行程长度 $S$ 为65毫米。调整S值,通过调节机床床身内曲柄盘的偏心量来实现。

### 磨齿举例

磨削内齿柔轮(见图12)  $m = 1.25$ 、 $Z = 242$ 、 $\alpha = 27^\circ 43' 30''$ 、 $B = 26$ 。

(1) 设计砂轮修整器的定角柱

$$\begin{aligned} r &= L \cdot \cos \theta - H \cdot \sin \theta - h \\ &= 30 \cos 27^\circ 43' 30'' - 29.962 \sin 27^\circ 43' 30'' - 6 \\ &= 6.617 \end{aligned}$$

确定定角柱直径为 $\phi 13.234^{\pm 0.02}$

(2) 制造齿槽数为242的机床分度盘,角齿距累积误差 $\Delta \gamma_{\Sigma f} = 14''$ ,角单-齿距误差 $\Delta_d \gamma_f = 4''$ 。

(3) 齿轮外圆基面径向找正3.5微米

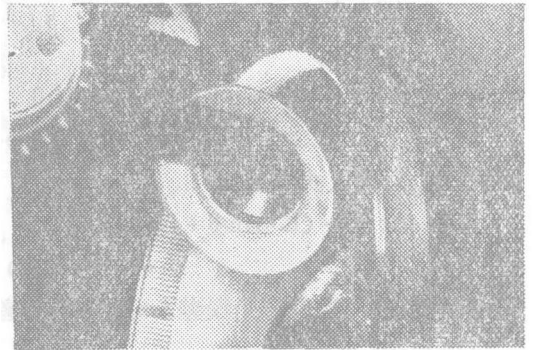


图12 磨削内齿柔轮

(为双周期误差),端面基面找正3微米。

(4) 粗磨齿,选用直径 $\phi 80$ 、粒度100#的砂轮;精磨齿,选用直径 $\phi 125$ 、粒度150#的砂轮。切削速度分别为23米/秒和36米/秒。粗磨齿,径向吃刀量为0.01~0.02毫米;精磨齿,径向吃刀量为0.005~0.01毫米。选用磨头行程长度 $S = 62$ 毫米。砂轮每分钟冲程次数为22次。

内齿柔轮达到的精度:

周节累积误差  $\Delta t_{\Sigma左} = 17'' (0.0125)$

$\Delta t_{\Sigma右} = 18'' (0.0132)$

单一周节差  $\Delta_d t_{左} = 5'' (0.0037)$

$\Delta_d t_{右} = 5'' (0.0037)$

# 带通滤光片研制

会 战 小 组

## 引 言

随着光学技术的发展,在光学仪器中,所用滤光片的类型也随着增多。由于滤光片性能的好坏直接影响光学仪器的质量,本文主要介绍五种带通滤光片的研制。

## 一、技术指标

七六年我们着重在  $0.3-1.0\mu$  光谱区内分成五个连续波段进行工作的,这五个波段为:

1.  $0.3\mu-0.4\mu$
2.  $0.4\mu-0.5\mu$
3.  $0.5\mu-0.6\mu$
4.  $0.6\mu-0.7\mu$
5.  $0.7\mu-1.0\mu$

这五个波段的光学行为是由五种带通滤光片来实现的。这些带通滤光片的制备是我们的研制任务。

$0.3\mu-0.4\mu$ : 紫外区,透射率  $T \geq 60\%$  以上,透射带宽  $W = 1000 \text{ \AA}$  (半宽度)

$0.4\mu-0.5\mu$  } 可见区,透射率:  $T \geq$   
 $0.5\mu-0.6\mu$  } 75%以上,半宽度  $W =$   
 $0.6\mu-0.7\mu$  } 1000  $\text{\AA}$

$0.7\mu-1.0\mu$ : 红外区,透射率:  $T \geq 75\%$  以上,半宽度  $W = 3000 \text{ \AA}$

从  $0.3\mu-1.0\mu$  光谱区内除上述主透射

带外,次峰要  $\leq 6\%$ ,通带内的纹波系数一定要小,滤光片工作视场角可为  $46^\circ$ ,滤光片不均匀性为  $100 \text{ \AA}$ 。显然这些滤光片最好做成矩形,通带内透射率要求尽量的高,滤光片两边截止带要陡,并且要有足够的截止区宽度。

## 二、研制方案

构成带通滤光片的方法很多,如叠加前后截止滤光片、多半波滤光片、颜色玻璃与膜系组合及两种颜色玻璃组合等等,均可构成带通滤光片。怎样才能实现这五种带通滤光片的技术要求呢?我们在所内外进行充分调研基础上,总结已有的实践经验,破除迷信,解放思想,群策群力,集中讨论,根据现有条件制定了如下方案。

### 1. $0.3\mu-0.4\mu$ 波段紫外带通滤光片:

要使  $0.3\mu-0.4\mu$  波段带通滤光片具有高的透射率,而且其它光谱区次峰小于  $6\%$ ,单用叠加反射膜系展宽反射带来完成是很困难的。同时,还要考虑到热蒸发法紫外材料的局限性,及蒸发材料的紫外吸收特性。因此,我们采用了紫外颜色玻璃( $ZWB_1$ )作为实现  $0.3\mu-0.4\mu$  区域带通滤光片的主要手段。从颜色玻璃( $ZWB_1$ )厚  $2.5\text{m/m}$  光谱特性曲线可看出,除在  $7200 \text{ \AA} \pm 200 \text{ \AA}$  波长处有一个透射约  $20\%$  的次峰外,其它指标均可满足要求,因此紫外区主要考虑用典型短波

齿圈径向跳动  $\Delta e_j = 0.006$

齿形误差  $\Delta J_{左} = 0.003$

$\Delta J_{右} = 0.005$

齿向误差  $\Delta B_{x左} = 0.002$

$\Delta B_{x右} = 0.006$

齿面光洁度  $\nabla 7$  以上。