

论圆光栅多头读数系统

邹 自 强

本文为作者多年来研制圆光栅多头读数系统的经验总结。

文中首先对圆光栅误差进行了频谱分析,认为一般存在三个“频谱峰区”,误差可分成五种成分。从这个观点出发,文中讨论了多缝读数和多头读数的积分效果,作者认为,多头与多缝适当的搭配可以取得与“全积分”相当的平差效果。文中研究了积分残差的影响因素。最后,本文推荐了一种五头读数系统及由此而来的双五头系统(不等分十头系统)。

一、序 言

圆光栅与度盘、多面棱体等测角元件相比,除了便于实现自动测量外,可以用平均原理进一步提高精度是它的重要特点。所以,双头、多头、全积分等各种读数系统便很快涌现。前人已作了大量研究^{[1][6]}。以多头读数系统而言 *NEL* 早在五十年代就进行了研究*, 美国 *Baldwin* 也早已应用**,但是,随着测角仪器精度不断提高,新问题的不断出现,相应的研究工作仍在不断进行,对多头等系统进行更深入的研究仍是需要的。例如:

近年 *Graham* 曾对双头及多头读数系统进行了详细的讨论^[5],他推荐四头均布系统并用实验进行了验证。在本文中,作者则建议使用奇数头,并推荐一种五头系统及不等分双五头系统。

过去人们常认为,读数头越多圆光栅平均作用便越好,当头数变成无穷多,即一般称为“全积分”时,平均作用则最好。在本文中作者想阐明,这种看法是值得商榷的,读数头多并不一定比读数头少效果好,不同的圆光栅往往有不同的“最佳”头数;过多的增加读数头收效并不明显,相反,少数几个头和多缝读数适当搭配可以取得和无穷多头(全积分)相当的平差效果。

过去人们常常从理论上计算圆光栅的平均效果,结果常常表明这些读数系统的精度是很高的,甚至高得惊人。但是实际上却远远达不到这些计算值。这是为什么?作者在本文中通过残差公式的推导过程试图说明:圆光栅多头读数系统的平均作用是一个向量加法过程,过去许多计算方法是近似的,即,将非线性信号当作线性处理的过程。在两头对径读数时,幅度相等的两列正弦信号其零点附近的非线性恰好互补互消。因而未注意到这种非线性问题,并不影响两头读数系统的使用。但在三头以上读数时,这种非线性关系就上升为一个重要问题。作者认为,这一点常常是理解多头读数系统一些平差现象的钥匙,许多计算结果与实际效果相差很大,原因就在这理。

* W.H.P.Leslie, Some Applications of Radial Diffraction Gratings.

** E.M.Jones, Proceedings of National Electronic Conference, 1955.

在研制多头读数系统时人们发现，即使是同一个系统，头数和结构都已固定，平均效果却仍有很大变化，这又是为什么？是什么因素在影响这种平均效果？在装调多头读数系统时，人们当然希望各头幅值一致，相角一致，但实践证明这是不可能的，各头信号的幅值和相位都是在不断变化。此时，同步性同幅性应该怎样去调？调到什么程度？与此相关连的另一个问题是：在多头读数时，圆光栅与主轴同心度需要控制到什么程度？等等。

这些都是作者在本文中所要讨论的问题。

二、圆光栅误差的频谱分析

对于一个既定的圆刻度零件（度盘、码盘、光栅盘等），设在 φ 角度处刻度误差为 δ_φ ，则 δ_φ 可以表示成下列富氏级数：

$$\delta_\varphi = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\varphi + \varphi_{0k}) \dots \dots \dots (1)$$

式中， C_k 为误差函数 K 阶谱项的振幅， φ_{0k} 为 K 阶谱项的初始相角， $K=1, 2, 3, \dots$ 。

当用直径误差表示圆分度误差时， δ_φ 具有下列形式：

$$\delta_\varphi = \sum_{k=2n}^{\infty} C_k \cos(K\varphi + \varphi_{0K}) \dots \dots \dots (2)$$

式中 $n=1, 2, 3, \dots$ ； $K=2, 4, 6, 8, \dots$ 。

即误差表达式只含有偶次项成份。

我们曾经对国内外许多圆分度误差的实测数据进行了频谱分析，结果表明，在一般情况下，上述（1）、（2）两式所示级数都是不收敛的。

据我们研究，误差曲线各项频谱成份中，往往在三个区域出现较大峰值，作者把它称之为“频谱峰区”，图1为一个光栅盘的实际例子，刻线数32768，刻线中径210毫米，这三个“频谱峰区”分别反映三种性质的误差。在一般情况下，第一峰区出现在2~36谱项，即误差的“低频”部分，我们称之为长周期误差，此即一般光学检验方法所测出的直径误差（或格线误差）；第二峰区出现在36~360谱项，即误差的“中频”部份，我们称之为中周期误

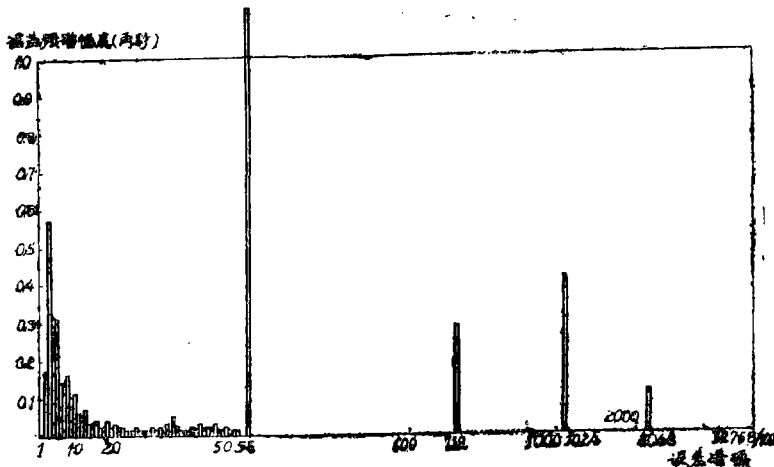


图1 光栅盘误差的频谱分析

差，我们已经实际查出的有56, 112, 144. 等谱项；第三峰区出现在360谱项以后，即误差的“高频”部份，我们称之为短周期误差，实际遇到的有1024、1080、1440、2160等。

由于古典的光学检验方法效率较低，工作量较大，测量间隔较疏，所以往往只能察觉出长周期误差，近十年来，我们使用了高效率的光电自动检验仪，发现现有蜗轮式圆分度机存在着严重的短周期误差和中周期误差，它们往往比长周期误差更大，不允许加以忽视。

在一般圆分度零件上，往往还存在另一种重要误差，即刻线过程中第一条线与最末一条线之间所夹角度误差很大，误差曲线在此处产生突然的“折断”现象，如图2所示，这是误差的

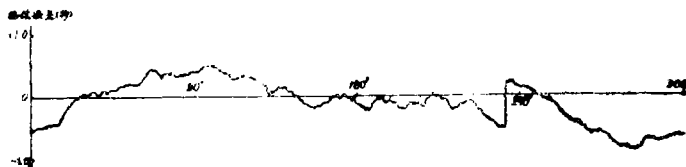


图2 封闭差实例

“脉冲阶跃”成分，我们把这种误差称为封闭差，即圆分度零件上首末两条刻线间夹角与其理论值之差。过去用一般光学方法进行检验时，由于间隔较大，不易觉察这种误差的存在，实际上，现有圆分度零件大都有这种误差，它是刻划过程中误差累积的最终表现形式，它使零件在零点附近产生突然的误差变化，因而对使用是很有害的。

除上述四种误差外，一般圆光栅上当然还存在着随机误差，即误差的“超高频”成分。

圆光栅读数系统对于这五种不同的误差成份，效果是不同的。本文将从此观点出发分别进行研究。

除了上述五种位置误差外，刻线的均匀性是另一类性质的重要误差，作者将在第六节中另作讨论。

三、多缝读数的积分效果

多缝读数本是莫尔条纹技术的一个基本问题，早就有了大量的论述（文献^[1]等），但为了研究多头读数的平均作用，从三个频谱峰区的概念出发，有必要进一步作若干讨论。

为了评价莫尔条纹多头读数系统的平均效果，我们引出“积分残差”和“残差系数”这两个参数。即，将刻划误差经过积分平均作用后残留下来的部份叫做“积分残差”，用符号“ ξ ”表示。积分残差“ ξ ”与原始误差 δ 的比值叫做这个读数系统的残差系数，用符号 C_ξ 表示，即，

$$C_\xi = \frac{\xi}{\delta} \dots\dots\dots (3)$$

设想从光栅盘莫尔条纹图案上取出一个局部，安置适当的座标图(3)（我们把圆周图案展成直线来讨论），当圆光栅没有误差时，莫尔条纹图案上光能密度一般可以描述为

$$A' = A_0 + A \sin Y \dots\dots\dots (4)$$

式中， A_0 为光能密度的平均值（直流分量）， A 为光能密度交变分量振幅。

狭缝整个面积上光能量：

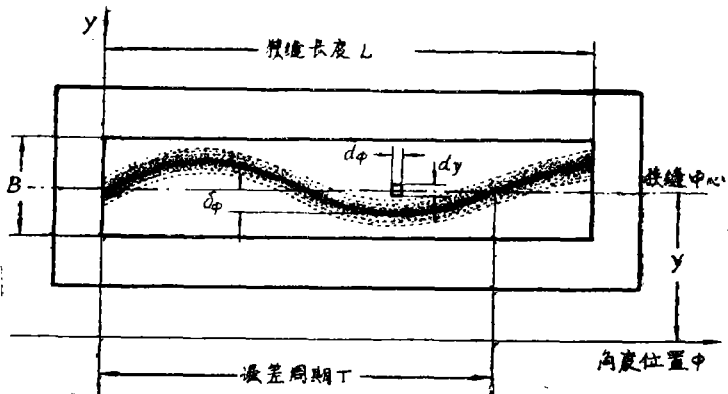


图3 多缝读数

$$\begin{aligned}
 Z &= \int_{Y - \frac{B}{2}}^{Y + \frac{B}{2}} (A_0 + A \sin y) \cdot L \cdot dy \\
 &= A_0 \cdot B \cdot L + \int_{Y - \frac{B}{2}}^{Y + \frac{B}{2}} A \sin y \cdot L \cdot dy \\
 &= A_0 \cdot B \cdot L + 2A \cdot L \cdot \sin \frac{B}{2} \cdot \sin y \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

当光栅度盘存在误差时，莫尔条纹图案产生弯曲，狭缝整个面积上光能量为

$$\begin{aligned}
 Z &= \int_0^L \int_{Y + \delta_\phi - \frac{B}{2}}^{Y + \delta_\phi + \frac{B}{2}} (A_0 + A \sin y) \cdot dy \cdot d\phi \\
 &= A_0 \cdot B \cdot L + \int_0^L \int_{Y + \delta_\phi - \frac{B}{2}}^{Y + \delta_\phi + \frac{B}{2}} A \sin y \cdot dy \cdot d\phi \\
 &= A_0 \cdot B \cdot L + 2A \sin \frac{B}{2} \int_0^L \sin(Y + \delta_\phi) \cdot d\phi \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

从上式可以看出，狭缝长度L对误差的平均效果有明显影响。对于短周期误差和中周期误差，狭缝长度对残差系数的影响如(图四)所示。在设计多头读数系统时，必须使单头的狭缝具有足够的长度，这个长度应该等于短周期误差和中周期误差相应长度的整数倍。作者建议，单头狭缝长度应至少大于中短周期误差相应长度的三倍，此时，中、短周期误差的残差系数已小于 $\frac{1}{10}$ 。

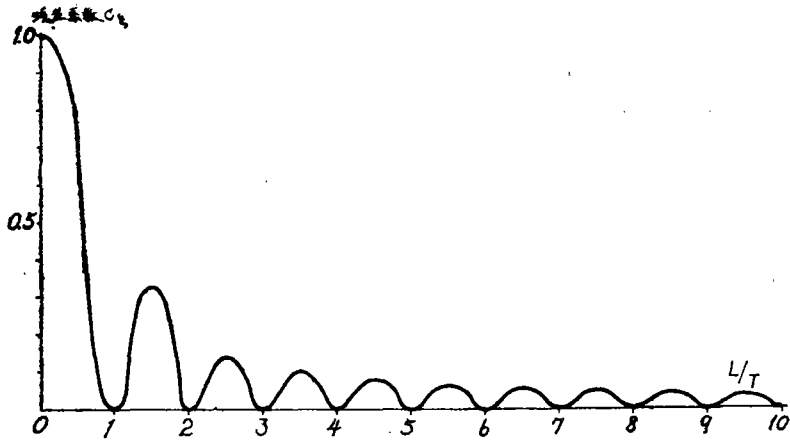


图4 狭缝长度与残差系数的关系

多缝读数对刻线的偶然局部误差有很好的平均作用，设某一条刻线的偶然误差为 δ ，多缝包容的总线数为 N ，则残差系数

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (7)$$

根据作者的实验，多缝读数的长度足够长，多头读数的头数才能足够少。本文第六节所推荐的系统就是基于这样的认识来布置的。

四、多头读数的残差公式

设在圆周上分布几个读数头，(图5)。第一个读数头的瞬时信号可以表示为：

$$A_1 \sin\left(\theta_1 + \delta_1 \frac{360^\circ}{W}\right)$$

第二个头 $A_2 \sin\left(\theta_2 + \delta_2 \frac{360^\circ}{W}\right)$

第三个头 $A_3 \sin\left(\theta_3 + \delta_3 \frac{360^\circ}{W}\right)$

" " "

" " "

第 n 个头 $A_n \sin\left(\theta_n + \delta_n \frac{360^\circ}{W}\right)$

这些式中 $A_1 A_2 \dots\dots\dots A_n$ 分别为各头信号的振幅；

$\theta_1 \theta_2 \dots\dots\dots \theta_n$ 分别为各头信号瞬时相角；

$\delta_1 \delta_2 \dots\dots\dots \delta_n$ 分别为各头所在位置的时刻误差 (单位：角秒)；

W 为圆光栅的栅距

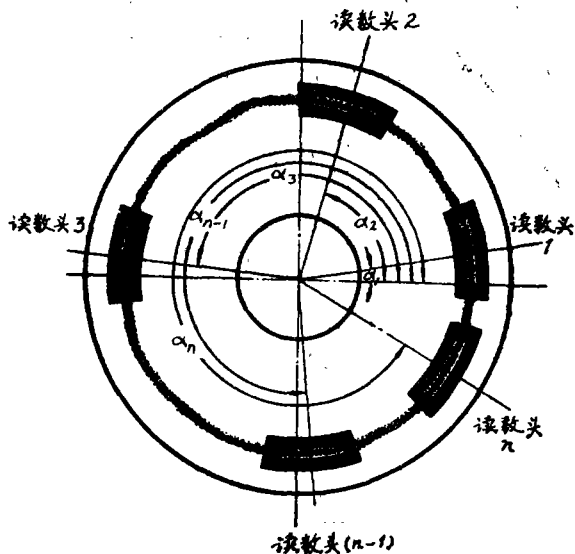


图5 读数头分布

(单位: 角秒);

多头读数后总信号为:

$$A_1 \sin\left(\theta_1 + \delta_1 \frac{360^\circ}{W}\right) + A_2 \sin\left(\theta_2 + \delta_2 \frac{360^\circ}{W}\right) + \dots + A_n \sin\left(\theta_n + \delta_n \frac{360^\circ}{W}\right) \dots \quad (8)$$

在装调过程中, 一般设法使各头信号幅值相等, 起始相位相同, 即 $A_1 = A_2 = A_3 \dots = A_n = A$ 及

$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \dots = \theta_n = \theta$, 此时合成总信号为:

$$A \left[\sin\left(\theta + \delta_1 \frac{360^\circ}{W}\right) + \sin\left(\theta + \delta_2 \frac{360^\circ}{W}\right) + \dots + \sin\left(\theta + \delta_n \frac{360^\circ}{W}\right) \right]$$

$$A = \sin(\theta + \Delta\theta) \dots \quad (9)$$

式中 $\Delta\theta$ 为刻划误差 $\delta_1 \delta_2 \dots \delta_n$ 对合成信号相位的合成影响。

当只有两个头对径读数时, 如果两头的信号均为很纯的正弦波 (即谐波引起的波形畸变很小),

$$\Delta\theta = (\delta_1 + \delta_2) \cdot \frac{360^\circ}{W} \dots \quad (10)$$

所以两头对径读数的积分残差

$$\xi = \delta_1 + \delta_2 \dots \quad (11)$$

要注意, 在三个以上头读数时, $\Delta\theta$ 与 $\delta_1 \delta_2 \dots \delta_n$ 是矢量合成关系, 只有当各头彼此之间的相位差都调整到很小时, $\Delta\theta$ 与 $\delta_1 \delta_2 \dots \delta_n$ 间才可以近似地处理成简单的线性相加关系, 此时

$$\Delta\theta = (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) \cdot \frac{360^\circ}{W} \dots \quad (12)$$

在这个前提下, 多头读数的积分残差才可以近似地表示为:

$$\xi = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n \dots \quad (13)$$

当 n 个读数头在全周上均匀分布时

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos [K\varphi + \phi_{ok}]$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos \left[K \left(\phi + \frac{360^\circ}{n} \right) + \phi_{ok} \right]$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos \left[K \left(\phi + 2 \times \frac{360^\circ}{n} \right) + \phi_{ok} \right]$$

$$+ \dots$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos \left[K \left\{ \phi + (n-1) \frac{360^\circ}{n} \right\} + \phi_{ok} \right] \dots \quad (14)$$

将刻度误差函数相同频谱的成分归并可得

$$\begin{aligned} \xi = & \sum_{k=1}^{\infty} C_k \left\{ \cos [K\Phi + \Phi_{0k}] \right. \\ & + \cos \left[K\Phi + \Phi_{0k} + \frac{K \cdot 360^\circ}{n} \right] \\ & + \cos \left[K\Phi + \Phi_{0k} + 2 \times \frac{K \cdot 360^\circ}{n} \right] \\ & + \dots \dots \dots \\ & \left. + \cos \left[K\Phi + \Phi_{0k} + (n-1) \frac{K \cdot 360^\circ}{n} \right] \right\} \dots \dots \dots (15) \end{aligned}$$

当K等于n的整数倍时, 即 $K = m \cdot n$

$m = 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots \dots \dots$ (m为任意正整数) 时

$$\begin{aligned} \xi = & \sum_{k=m \cdot n}^{\infty} C_k \left\{ \cos [K\Phi + \Phi_{0k}] \right. \\ & + \cos [K\Phi + \Phi_{0k} + m \cdot 360^\circ] \\ & + \cos [K\Phi + \Phi_{0k} + 2m \cdot 360^\circ] \\ & + \dots \dots \dots \\ & \left. + \cos [K\Phi + \Phi_{0k} + (n-1)m \cdot 360^\circ] \right\} \\ = & \sum_{k=n \cdot m}^{\infty} n \cdot C_k \cos [K\Phi + \Phi_{0k}] \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

此式表明, 当K等于n整数倍时, (合成信号幅度增加了n倍) 而相对相位不变, 即, n头均布读数, 对于K等于n整倍数的误差成分不起平均作用, 这些误差成分构成了多头读数系统的积分残差。

当K不等于n的整数倍时, 上式中n个余弦量相加, 它们彼此在相位上错开 $\frac{K \cdot 360^\circ}{n}$, 即在 $K \cdot 360^\circ$ 范围内均匀分布, 应用旋转矢量加法可知, 其合成矢量一定等于零。(典型例子如图6所示)。因而当K不等于n的整倍数时综合以上两式当n头均布读数时,

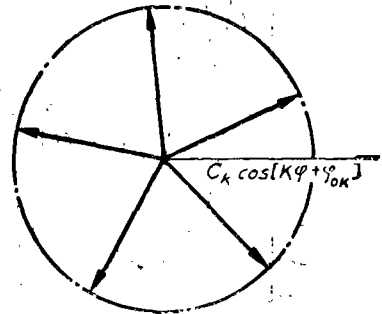


图6 n=5 时旋转矢量分布情况

$$\xi \equiv 0 \dots \dots \dots (17)$$

$$\xi = \sum_{k=m \cdot n}^{\infty} C_k \cos [K\Phi + \Phi_{0k}] \dots \dots \dots (18)$$

这就是多头读数系统的残差公式。

五、多头读数的平均效果

影响多头读数系统平均效果的因素很多, 根据作者的经验, 现讨论以下几个问题。

(一) 多头读数与多缝读数的关系。不等分布。

刻度误差函数的富氏展开式, 在一般情况下都是不收敛的, 所以, 没有多缝读数而只有简单的多头读数, (例如: 每个头是一个单缝的光电显微镜), 式(18)残差ξ的富氏展开式也就不

收敛，此时难以得到很好的平均效果。如果每个头都是多缝读数而且包容的缝数（线数）很多，如作者在第三节中所建议的，则刻度误差函数的富氏展开式其收敛性大为改善，很快就能收敛，各头读数误差只剩下少数低频成分，在这种情况下，多头读数便很容易将这些剩余的低频成分平均掉。所以，多头读数必须建立在足够好的多缝读数的基础上，多头读数必须与多缝读数很好地结合才能得到良好的和完整的平均效果。

(二) 头数与平均效果的关系。

n 越大， ξ 包含的频谱项数越少，所以一般地说读数头较多误差的平均效果就可能较好。但是，残差系数与头数 n 并不是线性关系，当头数越多，再增加一个头或一些头所起的作用就越不明显，特别是在多缝读数已经很好发挥其平均作用的情况下，这种非线性关系更是明显。例如：从单头读数($n=1$)变成对径读数($n=2$)，误差立即可以得到十分明显的减小；从对径读数变成三头均布，误差则得到进一步较大的减小；但从 $n=5$ 以后，若再增加一个头，平均效果提高就已不很明显；而当 $n=11$ 时，积分残差几乎与 $n \rightarrow \infty$ （即一般所谓“全积分”状态）时差不多，典型的例子如图7所示。所以，在多缝读数已经充分发挥“积分”作用的情况下，适当的多头读数即适当的“组合积分”，完全可以取得和“全积分”相当的平差效果。十多年来，我们的实践已经证实了这一点^{[3][4][7][8]}。

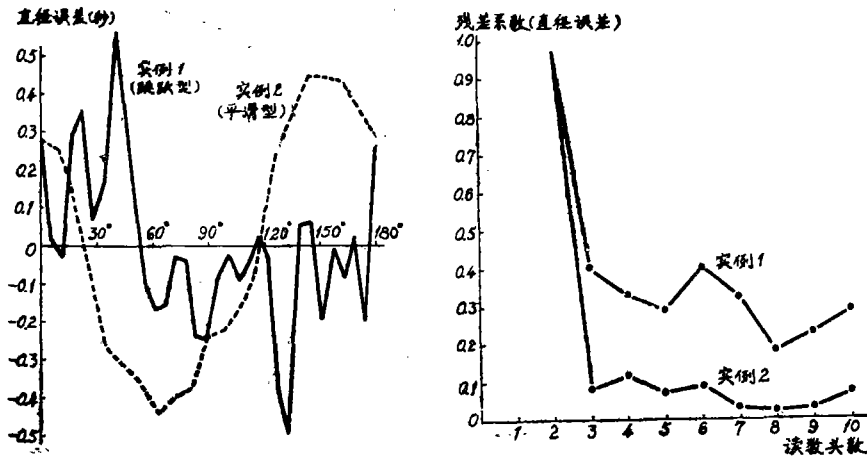


图7 积分效果与头数的关系

作者认为，不应笼统地说头数越多平均作用就越好。不同的光栅盘往往有自己不同的“最佳”头数。从图7实例看，六头反而比五头残差大，九头反而比八头残差大；例1中四头优于三头，而例2中则三头优于四头，各不一样，等等。

作者还认为，多头读数不一定必须取平均分布，不同的圆光栅往往有不同的“最佳”分布，有时，按某种规律安排的不等分分布效果更好，本文图8所述的就是一例。

(三) 偶数头与奇数头

式(18)积分残差公式适用于格线误差，此时，头数 n 是奇数还是偶数，关系不大。高精度测角仪器常常运用对径读数这种方法，其精度常用直径误差来衡量，在这种情况下，头数 n 取奇数或偶数就有较大差异。

设在某一角度 ϕ 处积分残差为 ξ_{ϕ} ，其对径位置 $\phi + 180^{\circ}$ 积分残差为 $\xi_{\phi+180^{\circ}}$ ，则此时直径误差

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{1}{2}(\xi_\phi + \xi_\phi + 180^\circ) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=m \cdot n}^{\infty} C_k \cos[K\phi + \phi_{ok}] \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=m \cdot n}^{\infty} C_k \cos[K(\phi + 180^\circ) + \phi_{ok}] \right\} \\ &= \frac{1}{2} C_k \sum_{k=m \cdot n}^{\infty} \left\{ \cos[K\phi + \phi_{ok}] + \cos[K\phi + \phi_{ok} + K \cdot 180^\circ] \right\} \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

当 $n =$ 偶数时，上式大括号中两项相同，此时

$$\Delta\phi = \sum_{k=m \cdot n}^{\infty} C_k \cos[K\phi + \phi_{ok}] \dots \dots \dots (20)$$

即，采用偶数头时，积分残差取其直径误差后，其值不变。

当 $n =$ 奇数时，上式大括号中两项相位相差 $K \cdot 180^\circ = m \cdot n \cdot 180^\circ$

其中 m 为偶数时，式(19)大括号中两项同相，其平均值不变。 m 为奇数时最后相差 180° ，式(19)大括号中两项之和等于零。

所以，采用奇数头均布读数时，积分残差取直径误差后只剩下了谱项为 $2K = 2m \cdot n$ 的成分，即，误差消去了一半频谱成分。例如，五头均布读数，取直径误差后，积分残差只剩下了

$K = 10, 20, 30 \dots \dots$ 等成分。正因为如此，六头均布读数虽然比五头均布读数多了一个头，但在取用直径误差的条件下，它的残差反而比五头的更大。

作者建议，在取用直径误差的条件下，尽量优先选用奇数头读数。

(四) 同步同幅对平均效果的影响

从上节积分残差推导过程可以看出，参加平均的各头信号必须幅度相同，相位相差不过大，否则，平均作用便受到削弱甚至破坏。

由于圆光栅总是存在一定的均匀性误差，所以，各头信号幅度要做到完全相同是不可能的。根据作者的经验，应该做到当圆光栅旋转一周时，各头信号幅度在全周上的平均值相等，为此，我们使用固定参考部位的调整方法。

由于圆光栅总是存在一定的刻划误差和安装误差，所以，各头信号相位要做到完全相同也是不可能的。作者认为应该作到，当圆光栅旋转一周时各头信号起始相位的全周平均值等于零。按照作者的经验，在一周中，各头信号相对相位差不要超过 $\pm 30^\circ$ 。

除了圆光栅自身的刻划误差而外，主轴的幌动以及圆光栅与主轴的相对偏心，是造成各头信号同步差的重要原因，Lewis和Young在应用圆光栅时讨论了这个因素*，Leslie则具体指出圆光栅与主轴的偏心量不要超出光栅常数的 $\frac{1}{8}$ **，许多圆光栅使用者也都是根据 $\frac{1}{8}$ 这个界限来控制使用的。作者认为，这个界限对于多头读数是适用的，根据作者的经验，在多头读数系统中圆光栅与主轴的偏心量不要超过光栅常数的 $\frac{1}{24}$ ，否则平均效果便明显变差从而丧失了多头读数的优越性。

* A. Lewis, I. R. Young, J. S. I., 1959, 4, P 153-7;
 ** W. H. P. Leslie, Machinery 1961, 11, P 1269-1270;

(五)一种多头读数系统

基于以上各观点,作者设计了一种五头读数系统以及由此变化而来的双五头系统,从1963年起,十多年来,我们先后多次在多种光电圆刻划机和光电检验仪上使用了这种系统^{[3][6][8]},取得了较好的效果。在1965年,我们也曾设计使用过七头均布系统^[4]。

在圆周上每隔 72° 均布一个读数头(图8)每个读数头约包容 $8^\circ\sim 15^\circ$ 范围的刻线,即每个读数头包容相当多的刻线。光源置于中央下方,五路聚光镜呈辐射状分布,使能量充分利用。每个读数头都安置两个狭缝、两个长条透镜和两个光敏元件,即每个读数头都取出 $+\sin\theta$ 和 $-\sin\theta$ 两个成对的信号,所有 $+\sin\theta$ 信号相加求和,所有 $-\sin\theta$ 信号另行相加求和,然后对这两个和求差作为基准信号。这样,莫尔信号中的偶次谐波被消掉了,圆光栅的均匀性误差被消掉了,灯丝衰老及电压变化对信号零位的影响也被消掉了。

有时,我们在圆周上再插入一组五头系统(图8中虚线所示), β 不要等于 36° ,我们一般取 $\beta=9^\circ\sim 30^\circ$ 。这种双五头系统实际上是十头不等分系统。

实践已经表明,这样设计的五头系统具有良好的平均作用,在一般情况下,积分残差(直径误差最大值)约等于原始误差(直径误差最大值)的 $\frac{1}{5}\sim S\frac{1}{20}$ 。与Mcilraith^[7]及Graham^[5]的全积分系统相比,这个系统对光强变化

有自动补偿作用,对圆光栅的均匀性误差有双重消差作用,即求差及求和两个过程都对均匀性误差起消差作用。在现有工艺条件下,圆光栅的均匀性误差常比其分度误差更大,充分消除均匀性误差是个重要问题,因此,这种系统消差作用很好。

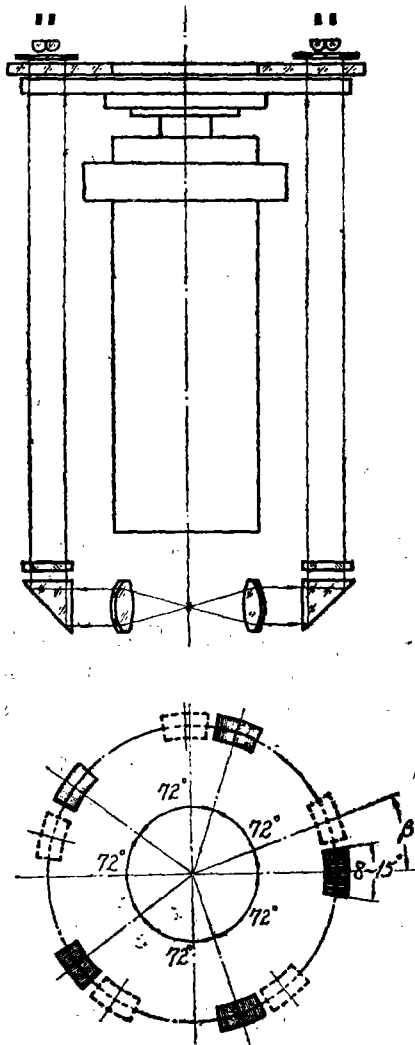


图8 一种多头读数系统

参 考 文 献

- [1] J. Guild; Diffraction Gratings as Measuring Scales, Oxford, 1960.
- [2] 邹自强; 测绘学报1963, NO2, 44.
- [3] 邹自强; 光学机械本期.
- [4] 邹自强, 朱应时; 全国精密机械测试会议报告, 1965年, 济南.
- [5] R. M. Graham; Microtechnic 1970, 7.
- [6] 邹自强, 朱应时时等; 国际计量会议NELEX82论文集, 4·5.
- [7] A·H·Mcilraith, A·B·Penford; J. Sci. Inst., 1966.
- [8] 邹自强, 史淑华等; 光学机械, 本期.