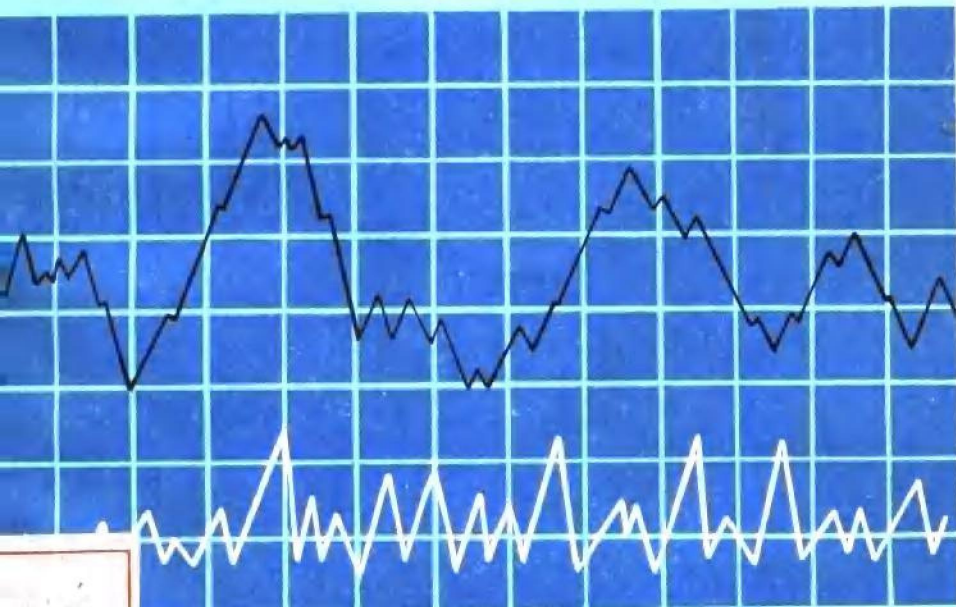


和子康 著

机床传动精度 测量和提高



02.32

中国计量出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了机床传动精度测量的原理、方法、仪器、精度分析和提高的方法。内容具有较强的实用性。全书共分三章,内容包括:国内外各种机床传动链运动精度测量仪的工作原理、结构及优缺点;机床传动精度的各种分析方法和提高机床传动精度的途径;传动精度测量分析手段在机床分度蜗轮副和 YG 3780 蜗轮母机精度提高中的应用及其效果。

本书可供齿轮、蜗轮副制造,齿轮、螺纹机床和量仪制造、使用、维修的工程技术人员、工人阅读;还可供大专院校有关专业师生和贯彻齿轮精度标准及滚齿机精度标准的测量、检验人员参考。

机 床 传 动 精 度 测 量 和 提 高

和子康 著

责任编辑 陈小林

—*

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 787×1092 1/32 印张 6

字数 129 千字 印数 1—9 000

1987年3月第一版 1987年3月第一次印刷

统一书号 15210·703

定价 1.50 元

序 言

机床传动精度测量和提高是一门涉及到精密机械、光学、电子学、计量学等学科应用的综合性技术。20年来,作者一直在从事这方面的工作。曾和其他同志一道,应用此项技术显著提高了蜗轮副、蜗轮母机、滚齿机和其他一些机床的精度,研制了数种传动精度测量仪器。如研制的 YG 3780 高精度蜗轮母机,经国家鉴定,达到了国际先进水平;承担一机部基础件蜗轮副攻关任务时,使蜗轮副达到部标 JB 162-60 的 0 级*,获国家级科技进步一等奖;研制的 CYQ 002, CYQ 003, CYQ 004 和 CYQ 007 等型运动精度测量仪器,其性能具有独特的优越性。

到目前为止,有关这门技术的专著在国内外尚不多见。为此,作者结合多年来的实践经验,写成了此书。全书共分三章。第一章介绍了国内外各种机床传动链运动精度测量仪的工作原理、结构及优缺点;第二章介绍了机床传动精度的分析方法,其中包括简便、适用的误差曲线分析方法、用傅里叶级数谐波分析的“表格计算法”(并附表格)和计算机编程计算法等。提出了较全面、实用的传动链综合运动误差公式,提高机床传动精度的途径和方法;第三章介绍传动精度测量分析手段在机床分度蜗轮副和 YG 3780 蜗轮母机精度提高中的应用及其效果。

本书在编写过程中,得到了重庆市机械工业局高可纲、

* 按公比 0.64 上推相当于 0 级精度。

官民孝同志，重庆机床厂许本侠同志，重庆圆柱齿轮机床研究所梅以道同志，以及唐其林、王琦、吴宪民等同志的大力支持，并提出了很多宝贵意见。

华中工学院路亚衡教授、机械工业部机床局梁训瑄同志对书稿进行了评阅，提出了宝贵意见，并推荐出版。对此，作者一并表示衷心的感谢。

作 者

目 录

第一章 传动链运动精度测量仪综述	(1)
§ 1-1 传动链运动精度测量仪分类.....	(1)
§ 1-2 一对磁盘测固定传动比的装置.....	(2)
§ 1-3 分频比相钢带连接式测量仪.....	(6)
§ 1-4 自录磁波差频式测量仪.....	(8)
§ 1-5 差频行波挂轮式测量仪.....	(10)
§ 1-6 静态磁头行波测量装置.....	(14)
§ 1-7 光栅比数式运动精度测量仪.....	(18)
§ 1-8 惯性式回转运动精度测量仪 (地震仪)	(21)
§ 1-9 激光式运动精度测量原理.....	(24)
§ 1-10 感应同步器运动精度测量仪	(28)
§ 1-11 差频原理的高精度测量装置	(30)
§ 1-12 磁分度单路分频式和双路分频式运动精度 测量仪	(32)
§ 1-13 多路信号误差补偿测量原理	(36)
§ 1-14 仪器联轴节分析——片簧联结器的采用.....	(42)
§ 1-15 磁尺磁盘式滚齿机差动链运动精度测量仪	(46)
§ 1-16 运动精度测量仪的精度鉴定	(57)
§ 1-17 磁分度技术中几个重要问题	(68)
第二章 机床传动链运动精度的分析	(71)
§ 2-1 传动链综合运动误差公式.....	(71)
§ 2-2 运动误差曲线实用测量分析计算法.....	(75)
§ 2-2-1 传动链中只有一种频率的误差	(76)
§ 2-2-2 传动链中只有一长周期误差和一短周期误差.....	(77)
§ 2-2-3 两频率相近的误差拍频特性	(77)
§ 2-2-4 三个以上频率相近的误差复杂拍频	(81)

§ 2-2-5 误差曲线实用表格计算分析法	(82)
§ 2-2-6 电子计算机编程谐波分析法	(84)
§ 2-3 滚齿机传动精度分析和提高	(92)
§ 2-3-1 滚齿机运动精度特征公式和特征图表	(92)
§ 2-3-2 滚齿机运动精度与切齿工作精度的关系	(96)
§ 2-3-3 提高滚齿机传动精度的途径	(99)
§ 2-3-4 国内外滚齿机分度链传动精度比较	(104)
§ 2-3-5 滚齿机差动链运动精度初步分析——差动链综 合运动误差公式	(108)
§ 2-3-6 滚齿机刀架垂直移动均匀性测量分析	(110)
§ 2-4 插齿机传动精度分析和提高	(113)
§ 2-5 其他螺旋传动机床运动精度的分析和提高	(116)
第三章 1"蜗轮母机运动精度的测量和校正	(121)
§ 3-1 YG 3780 型蜗轮母机精度状况和传动系统图	(121)
§ 3-2 精度的第一次提高 (到 5")	(123)
§ 3-3 精度的第二次提高 (到 2") ——测量系统的 十项措施	(130)
§ 3-4 精度的第三次提高 (到 1"左右) ——差频原 理高精度测量装置的使用	(142)
§ 3-5 一级精度蜗轮副攻关	(142)
附表 1 国内外一些传动精度测量仪情况表	(144)
附表 2 24 等分谐波分析计算表格	(145)
附表 3 48 等分谐波分析计算表格	(插页)
参考文献	(154)

第一章 传动链运动精度

测量仪综述

§ 1-1 传动链运动精度测量仪分类

传动链运动精度的测量，多年来一直为人们高度重视。最早有薰烟玻璃法即 SIGMA 装置法、摩擦盘法、切向绕绳比长法等等。这些方法都因古老、落后、庞大、笨重、精度不高而趋于淘汰。近些年来由于电子、光学技术的飞速发展，我国和联邦德国、捷克等国家运动精度测量仪的研制也蓬勃发展起来，各种测量原理的仪器不断涌现，投入市场。

传动链测量仪按被测对象分为两种。

回转运动精度测量仪——测量两回转轴回转运动不均匀性的仪器。如滚齿机、插齿机分度传动链等。

螺旋运动精度测量仪——测量直线运动相对于回转运动不均匀性的仪器。如滚齿机差动链、螺纹磨床传动链等。

传动链测量仪按仪器原理又可分为下列四种。

磁原理。基于这种原理的测量仪的传感器基准件为磁盘、磁尺、磁头系统或旋转变压器、感应同步器等。

光栅原理。基于这种原理的测量仪的传感器基准件为光栅盘、光栅尺。利用莫尔条纹原理由光敏元件拾取信号。

惯性式原理。基于这种原理的测量仪可分为回转式和直线式，又称地震仪。是利用惯性原理测量运动精度的仪

器。

激光原理。基于这种原理的测量仪可分为直线式和回转式激光干涉仪，是利用干涉光原理把机械长度量转变成电学量，进行高精度测量。

按仪器使用性能又可分为下列两种。

专用测量装置。

通用测量仪器。通用测量仪器又可分为无级分频式、差频式、行波挂轮式、电器比相式、电器比数式等。

下面对各种仪器分述之。着重阐述市场提供过的仪器产品。

§ 1-2 一对磁盘测固定传动比的装置

这是我国最早的磁分度测量系统。六十年代以科研产品的形式提供给国内一些单位使用，并在生产使用中不断有所改进和发展，在我国运动精度测量技术的发展和完善方面起了一定的作用。

该装置的基本原理是以磁盘（或磁尺）为基准元件，分别装在两个被测运动件上，随着运动的快慢由磁头发出两路与运动同步的信号，这些信号的相位差，代表了被测运动误差。

相位差由相位计转换成电学量，送记录器自动记录。

磁盘或磁尺是在非磁性材料的基体上均匀电镀一层 Ni, Co, P 合金磁性材料，然后在其上录制等分的磁波，作为测量的基准元件。

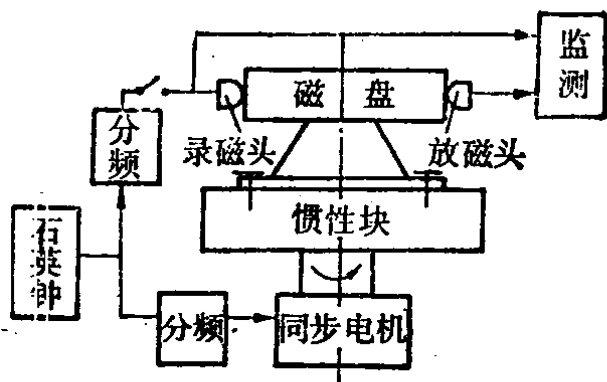


图1-1 录制磁盘原理框图

录磁是在专门的录磁机上，以石英钟为标准信号源，经过分频控制同步马达，带动磁盘匀速转动。同时此信号分频后，通过磁头变成磁信号，向磁盘合金面脉冲充磁，磁盘表面被磁化而形成一定波数分度精度很高的磁波（图1-1）。

磁尺的录制是在激光测长仪上，以光波波长为基准。将光波干涉信号经过分频放大，通过磁头向磁尺等距离充磁。磁尺的精度就是光波波长分频后的复现精度（激光测长仪见图1-19）。

磁头。原理如图1-2。在环形导磁材料上绕以线圈。材料开口留一个0.01 mm至0.03 mm的狭缝。在录磁时，磁头线圈通以交流脉冲信号，磁头狭缝处产生一交变磁通，可使磁

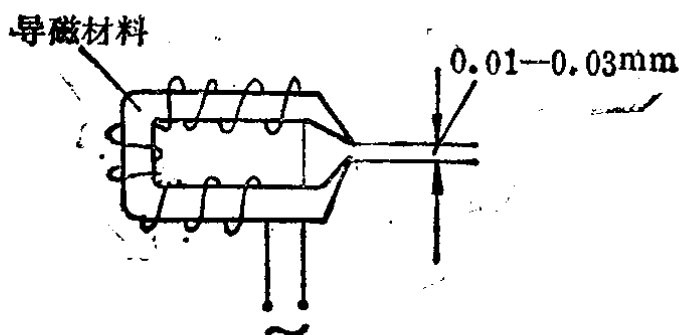


图1-2 磁头原理图

盘或磁尺表面磁化形成磁波。而在拾磁时，磁头磁盘相对位移，磁头狭缝处由于磁波的变化，使磁头导体上产生交变磁通，在线圈中感应出交变信号。该信号可送电器箱进行信号处理。

齿轮发信头。当磁盘要求波数不多，精度不高时，可用一般齿轮代替。这时的磁头必须代之以齿轮发信头（图1-3）。齿轮发信头是在永久磁铁 NS 上绕以线圈，其狭缝处有一约 0.5 mm 至 2 mm 的间隙。当齿轮转动时，齿廓与齿槽处磁阻不同而使线圈磁通量发生变化，从而在线圈中感应出交流电

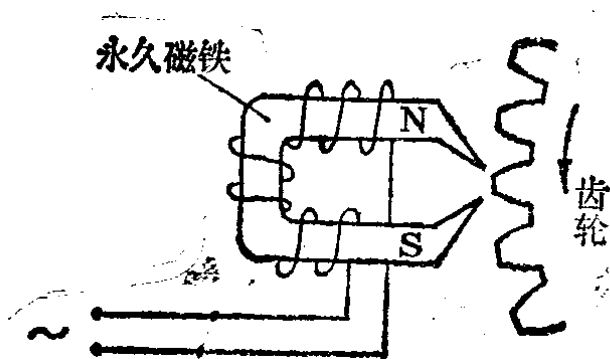


图1-3 齿轮发信头

势。齿轮每转一齿，发信头就发出一个电信号。

相位计。电信号要通过相位计进行处理。相位计的作用是能将两路脉冲信号的相位变化转换成电平变化，以供

自动记录器记录。相位计的比相部分实际上就是一个双稳态触发器。两路信号分别经放大整形后变成两路方波，再通过电容微分二极管检波变成两路脉冲波。两路脉冲波同时送入相位计中的双稳态触发器。因两路脉冲信号数相等，故一路信号将它冲“开”，另一路信号就将它冲“闭”，一开一闭就输出一个方波，方波的宽度就是两路信号的相位差。当被测传动链没有误差时，两路信号相位差不变，相位计输出的方波宽度也不变，通过滤波器后的电平也不变，自动记录器将记录出一条直线；当被测传动链有误差时，两路信号就随着误差的大小而改变着相位差，因而相位计输出的方波的宽度也相应改变。宽度变化着的方波通过滤波器后就转换成电平变化。由自动记录器将变化的电平自动记录出曲线，这条曲线就代表传动链运动精度误差曲线。相位计中的低通滤波器可将运动误差和低频长周期误差（即累积误差）分离出来，用高通带通滤波器可将高频短周期误差分离出来。运动误差、长周期累积误差和短周期误差等三种误差可供测量者根据具体情况参照精度标准进行选用。

该测量装置原理见图1-4。以测蜗轮副为例，大磁盘（波数为 N_2 ）装在工作台（蜗轮）上，小磁盘（波数为 N_1 ）装在蜗杆轴上，小磁盘可用齿轮和齿轮发信头代替。被测传动

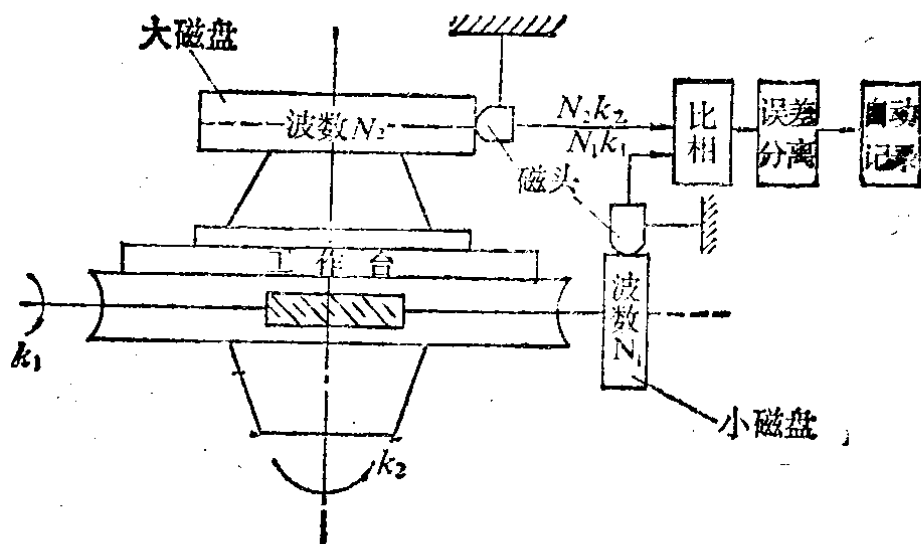


图1-4 固定传动比测量系统原理图

比为：

$$i = \frac{k_1}{k_2}$$

式中 k_1 ， k_2 为转速。选磁盘波数，令 $k_1 N_1 = k_2 N_2$ ，即

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{k_1}{k_2} = i \quad (1-1)$$

即使大小磁盘的波数比等于被测传动链的传动比，因而两路信号的波数必然相等，即 $k_1 N_1 = k_2 N_2$ 。当传动链没有误差时，两路信号相位差不变，经相位计比相后自动记录出一条直线；当被测传动链有误差时，两路信号将有相位差变化，其变化量由相位计检出，送自动记录器把误差曲线记录下来，然后与定标值比较得出误差实际值。

定标。一般采用 180° 反相定标，其原理是将其一路信号反复倒相 180° 与另一路信号比相，记录器将记录出一方波，方波宽度代表磁盘半波长占有的角秒数。为了小角度定

标，可将记录仪按比例衰减达到小角度定标的目的。

该测量系统的测量精度主要取决于磁盘精度。该系统因传动比固定，不同传动比需换用不同的磁盘，操作安装使用非常不便，但作为临时使用的科研测试装置，是有较大的实用价值的。

§ 1-3 分频比相钢带连接式测量仪

为了在每次测量时不再重新安装调整磁头，故将磁头磁盘设计成一个整体。磁头可绕磁盘自由回转。测量时，仪器装在工作台上，固定磁头用的可回转壳体用平行钢带与外支架联接。当磁盘随被测件回转时，磁头（壳体）不动而发出信号。这样，减少了每次安装调整磁头的困难。

又为了用一对基准磁盘来测量任意传动比 i (i 为正整数)，可使两磁盘的波数相同（均为 N ）。在电器高频通道中加入分频器（除以 i ）后使两路波数相等，再进行比相和自动记录。

分频器的原理是利用多级双稳态触发器，将末级输出脉冲分别反馈到某几级双稳态触发器上，以保证分频器每输入 i 个脉冲后就可输出一个脉冲，达到使输入脉冲数除以 i 的目的。图 1-5 为其原理方框图。

如图，分频器由五级双稳态触发器组成。每一级双稳态

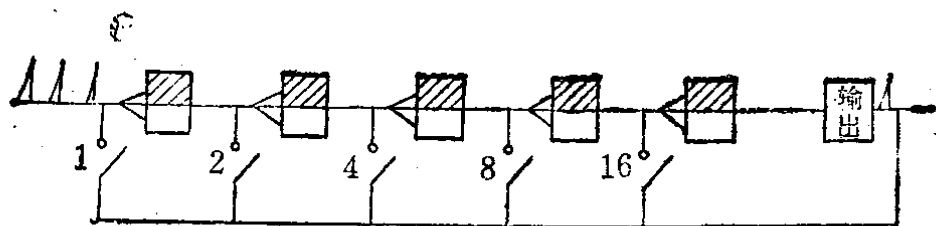


图1-5 分频器原理框图

触发器必须输入两个脉冲信号才能输出一个脉冲信号，即可使脉冲波数除以 2。五级相连，输入脉冲总数被除以 2^5 ，即每输入 2^5 个脉冲后才输出一个脉冲。

如果将输出信号反馈到某一级双稳态触发器前，第一级前每个反馈信号代表 1 个输入信号，分频数就成为 $2^5 - 1$ 。如果第二级前再加入反馈信号，其每个信号相当于 2 个输入信号，分频数就成为 $2^5 - 1 - 2$ 。如第三级前再加入反馈信号，其每个信号相当于 4 个输入信号，分频数就成为 $2^5 - 1 - 2 - 4$ 。同理，信号反馈到第四级前分频数成为 $2^5 - 1 - 2 - 4 - 8$ 。依次类推。

如果组合控制信号反馈的级数，就可在正整数范围内达到任意分频的目的。

实用中为便于操作，定全部开关接通，分频器分频数为 1（即不分频）。分频数 i 等于各断开开关所代表输入信号数之和再加 1，即通过开关的组合达到任意整数分频的目的。除此以外，还有利用集成线路，拨码计数清零达到分频目的的分频器也得到较广泛的应用。

图 1-6 所示为分频比相钢带连接式测量仪原理图。被测

传动比 $i = \frac{k_1}{k_2}$ ，大小磁盘波数均为 N ，蜗轮蜗杆转速分别为 k_2, k_1 ，蜗轮上磁盘信号频率为 $k_2 N$ ，蜗杆上磁盘信号频率为 $k_1 N$ ， $k_1 N$ 经过分频器除以 i 后则有：

$$\frac{k_1 N}{i} = k_1 N \times \frac{k_2}{k_1} = k_2 N$$

故两路信号频率相等，可送入相位计比相，传动误差被自动记录器记录下来。

此仪器特点如下：

(1) 因采用多级分频器，使仪器可测任意传动比。

(2) 安装操作较方便。

(3) 精度低，尤其是测累积误差，其原因有二。一是磁盘为测量基准，它不可能把精度做得很高，一般在 $4''$ 左右；二是采用了平行钢带定位机构，钢带对仪器有一随机变化的

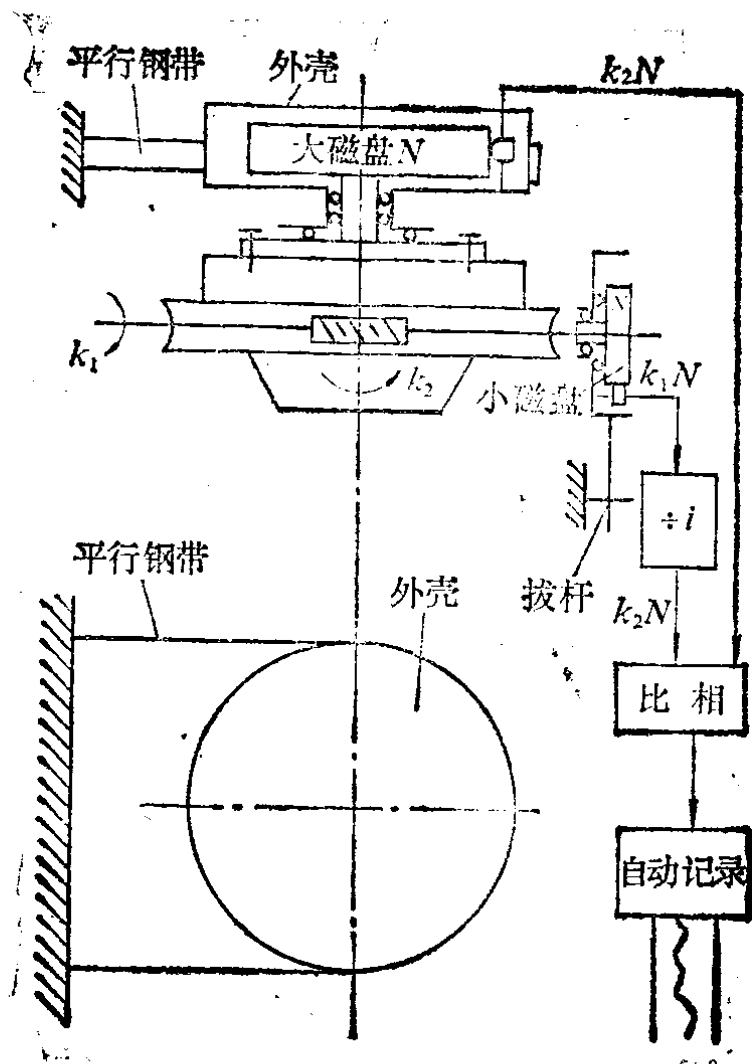


图1-6 分频比相钢带连接式测量仪原理图

力，它与偏心安装量、钢带的安装调整都有关，使仪器产生复杂变形，大大影响了精度。钢带系统在捷克和我国有不少厂家采用，危害非浅。捷克从1970年起已将其淘汰。我国近些年来新研制的同类仪器也已不再采用这种定位机构了。

§ 1-4 自录磁波差频式测量仪

测量原理如图1-7所示。蜗杆轴小磁盘波数为 N_1 ，其信

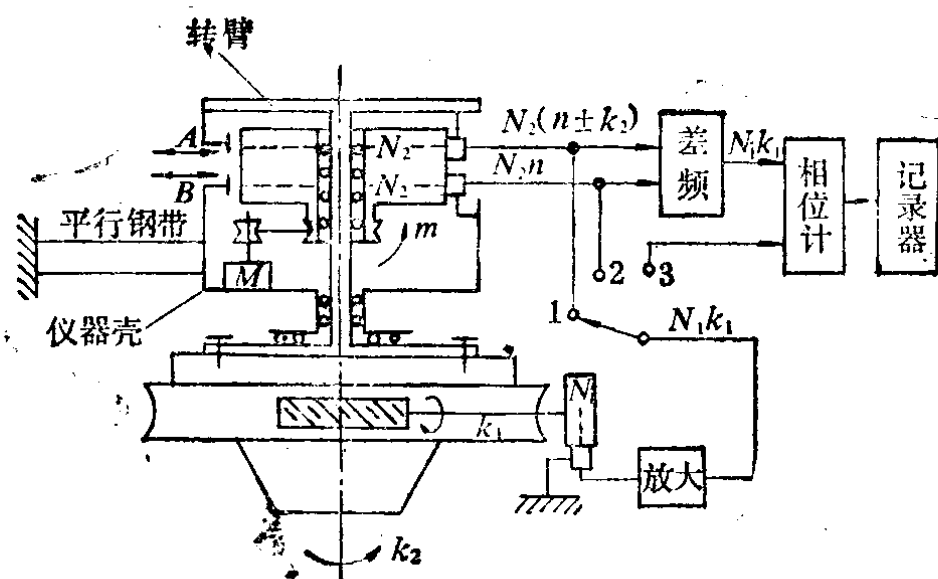


图1-7 自录磁波差频式测量原理

号频率为 $N_1 k_1$ 。用电磁离合器 B 可将大磁盘与外壳固死，外壳用钢带系统定位。开动机床后，磁盘不动，转臂随机床回转，转换开关置 1，录制出大磁盘的上磁道，波数为 N_2 ， $N_2 =$

$$= \frac{N_1 k_1}{k_2} = N_1 i.$$

松开 B ，通过电磁离合器 A ，将大磁盘与转臂固死。机床开动时，磁盘将随机床回转，将转换开关置 2，可录制大磁盘下磁道，其波数仍为 $N_2 = N_1 i$ 。

开始测量时，转换开关置 3，松开 A 和 B 两个离合器，开动马达 M ，使大磁盘高速旋转，转速为 n ，则下磁道磁头信号频率为 $N_2 n$ ，上磁道磁头信号频率为 $N_2 (n \pm k_2)$ 。其正负号决定于 k_2 的转向。

两信号通过差频器，差频为：

$$N_2 (n \pm k_2) - N_2 n = \pm N_2 k_2 = \pm N_1 i k_2 = N_1 k_1$$

它与蜗杆来的信号频率相等。这两路信号的相位差代表了传

动误差，送相位计比相，可由自动记录器记录出传动链误差曲线。

此仪器特点如下：

(1) 磁头用来录放磁通，测量时自行录磁、放磁，可测任意传动比。

(2) 虽然磁盘录磁时的误差包含了被测传动链误差，但在测量时，磁盘高速旋转，磁盘误差变成了高频误差。通过相位计中的误差分离器将其滤掉。因此，测量精度不受基准件磁盘精度的影响。这是该仪器最大特点。

(3) 平行钢带机构和轴系带来较大的误差，故结构精度较差。

§ 1-5 差频行波挂轮式测量仪

此仪器已成系列，是捷克斯特潘尼克工程师在七十年代研制出来的。他巧妙地运用了旋转变压器和不等波数的差频法均匀合成频率，实现了多功能测量。两频率的均匀合成称为“行波”。

旋转变压器有正反两种用法，其原理如图 1-8 所示。它的定子绕组 f_s ， f'_s 是垂直布局的，而转子则是随轴转动的，转子绕组与定子绕组间的夹角 θ 随转子转角而变。

当 f_s 转子绕组通以频率为 $f_s = \frac{\omega}{2\pi}$ 的交变信号

$$f_s = A_s \sin \omega t \quad (1-2)$$

时，定子绕组感应出调幅波：

$$f_s = A_s \sin \omega t \cos \theta$$

$$f'_s = A_s \sin \omega t \sin \theta$$

通过相敏检波解调后可得：

$$f_{s \text{ 解调}} = A_s \cos \theta \quad (1-3)$$

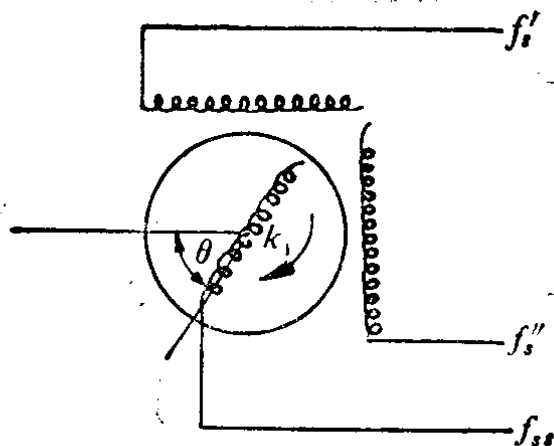


图 1-8 旋转变压器原理

$$f_{s''} = A_s \sin \theta \quad (1-4)$$

即信号为转角 θ 的函数。
此为常规用法。

反之，当 f_s 、 f_s' 分别

通以同幅同频 $\left(f_s = \frac{\omega}{2\pi}\right)$

但相位差为 90° 的激励信号：

$$f_s = A_s \sin \omega t \quad (1-5)$$

$$f_s' = A_s \sin(\omega t + 90^\circ) = A_s \cos \omega t \quad (1-6)$$

则转子上绕组为定子上两绕组感应的合成：

$$\begin{aligned} f_{ss} &= A_{ss} \sin \omega t \cos \theta + A_{ss} \cos \omega t \sin \theta \\ &= A_{ss} \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (1-7)$$

因为

$$\theta = 2\pi k_1 t$$

$$\omega = 2\pi f_s$$

所以

$$\begin{aligned} f_{ss} &= A_{ss} \sin(2\pi f_s t + 2\pi k_1 t) \\ &= A_{ss} \sin 2\pi t (f_s + k_1) \end{aligned} \quad (1-8)$$

f_{ss} 反映了基波频率 f_s 和转角频率 k_1 的合成。即 f_{ss} 的频率为 $f_s + k_1$ ，实现了两频率的均匀合成而成“行波”。也就是说基波频率信号发生相位移，其相移量与 k_1 同步，成为行走（移相）的波。

该仪器就是应用了旋转变压器的第二种方法。

仪器测量原理如图 1-9 所示。

低速头 J_{SP} 装在蜗轮工作台上，它由转子、定子和壳体构成。转子为磁盘（或齿盘），由马达带动高速回转，其转速为 n 。定子与工作台通过心轴相连，转速为 k_2 。壳体可绕轴自由回转，使用时通过片簧连接器与固定架联接不动。片簧连接器可保证壳体有五个自由度，只约束其回转自由度。