

差频式时栅位移传感器研究^{*}

彭东林 刘成康 谭为民

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要 本文对差频测量法的本质进行了深入探讨,进而将原有的差频式动态传动误差测量方法移植成为一种圆分度静态精密测量新方法,并提出一套用于差频电路方案工程设计的新方法——齿波对偶法,介绍了一种双联齿差频式时栅样机。

关键词 差频 圆分度 时栅

Study on Differential Frequency Model Time Grating Displacement Sensor

Peng Donglin Liu Chengkang Tan Weimin

(State Key Lab of Mechanical Transmission, Chongqing Univ., Chongqing 400044, China)

Abstract This paper thoroughly studies the method of differential frequency measurement. And a new method for static accurate measurement of circular indexing is transformed from the method of differential frequency for dynamic transmission error measurement. Then, it proposes a "Method of duality for gear and electric wave" to be applied to engineering design of differential frequency circuit, and introduces a combined dual-gear model machine of differential frequency.

Key words Differential frequency Circular indexing Time grating

1 引言

对于文献[1]提到的时栅位移传感器,可以采用各种方法提高其分辨率,借用动态差频式测量方案就是一种,从而可以构成一种新型的“差频式时栅位移传感器”。

2 动态差频测量法

机械传动装置(机床传动链、减速机等)传动误差的测量,采用传动装置两端安装光栅等角位移传感器并进行信号比相以实现同步位移比较的方式进行。以蜗轮测量为例,分别在蜗轮(低速端)和蜗杆(高速端)上安装传感器即可。由于“放大测微”将降低传感器刻线误差和分辨间距的缘故,在蜗杆上安放的传感器的精度要求较低,而在蜗轮上安装的传感器由于自身刻

线误差将 1:1 地反映出来而得不到衰减,故精度要求较高。在关于机床传动链动态精密测量的众多设计方案中,有一种构思独特的差频式测量方案^[2],原理如图 1 所示。蜗杆安装普通磁栅传感器 H,而蜗轮上磁栅传感器为了提高其精度,采用了特殊的结构:磁盘上录有两道栅线,且两道栅线数略有差异, $\lambda_1 > \lambda_2$,并由同步电机 M 带动作高匀速旋转。由活动磁头和固定磁头分别拾取的 u_1 和 u_2 信号经差频器调制成差频信号 u_{12} 再与传感器 H 信号 u_3 比相,可测出此传动装置的传动误差。这种方案的电路核心在于差频电路,其输出信号 u_{12} 的频率等于两路输入信号的频率之差,即 $f_{12} = f_1 - f_2$,而 f_2 是固定不变的,因此 f_{12} 随 f_1 改变而改变。

对这套方法,国内曾一度有很多跟踪研究^[3-5],普遍认为采用这种方法的目的和优点主要有两点:(1)利用高速旋转,使磁栅自身的刻线误差等制造误差成为高频误差而容易被滤掉,从而大幅度提高传感器精度;(2)由于 u_2 信号只与电机转速 V 有关,而 u_1 信号则同

* 本文于 2000 年 3 月收到。
国家自然科学基金资助项目, No. 59675089。

时与 V 和蜗轮转速 v 有关, 所以差频后的信号 u_{12} 的频率为:

$$f_{12} = f_1 - f_2 = (V + v)\lambda_1 - V\lambda_2 = (\lambda_1 - \lambda_2)V + \lambda_1 v \quad (1)$$

这样, 即使蜗轮转速 v 极低以至趋于 0, 也能保证有适合于比相电路的信号 u_{12} 与 u_3 比相。由于各种原因, 对差频测量法的研究已较长时间几乎消声匿迹, 而现在要做的工作是: (1) 将以前只能用于连续动态测量的差频测量法, 推广到可用于非连续、变方向和任意速度的随机运动测量(自然地, 连续匀速运动也就包含其中了), 从而派生出一种新型传感器初型; (2) 对差频测量

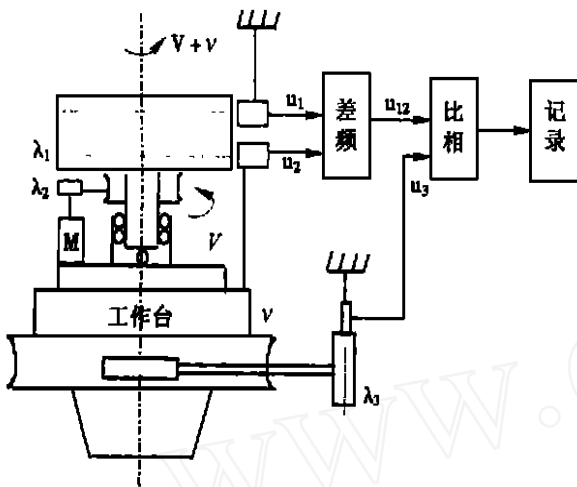


图 1 差频法测蜗轮传动误差

法从新的角度给予解释, 进而有所新认识、新发现; (3) 根据这种新的认识, 提出一种用于差频参数设计的新方法: 齿波对偶法, 为后述实用型新型角位移传感器的参数设计提供指导。

3 静态差频测量新方法

相对于连续的、同方向的、基本上匀速的运动测量, 本文提出的静态差频测量新方法原理如图 2 所示。显然, 它是从图 1 移植过来的, 蜗轮传动被 1:1 的刚性轴代替, 磁栅由齿栅代替(用齿栅是便于后面分析, 用磁栅是一样的), 三联齿轮齿数分别为 z_1, z_2 和 z_3, z_1 略大于 z_2 , 用作差频, z_3 相当于蜗杆上的分度器件, 同步电机转速 $V = 3000\text{rpm} = 50\text{rps}$, 当转台不动时, 参加比相的两路信号频率比固定:

$$\frac{f_3}{f_{12}} = \frac{z_3 \cdot 50}{(z_1 - z_2) \cdot 50} = \frac{z_3}{z_1 - z_2} \quad (2)$$

当转台转动时, 动测头信号 u_1 相对于定测头信号 u_3 将发生相位移动形成行波, 根据 (1) 式, u_{12} 信号相位

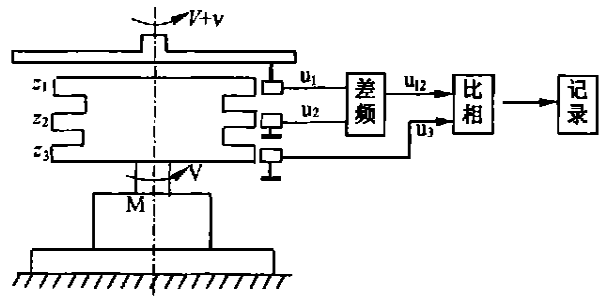


图 2 静态分度新装置初型

也会相对于 u_3 相位移动形成行波, 每转动一个 z_1 齿距 W_1 , 相位移动 2π 周期即一个完整波。因此转台每转过一周 360° , u_1 和 u_{12} 信号将分别移动过 z_1 个波。根据 (2) 式, u_{12} 相对 u_3 移动 z_1 个波, 也可理解为是 u_3 相对于 u_{12} 移动的波数为:

$$p_3 = z_1 \times \frac{f_3}{f_{12}} = \frac{z_1 z_3}{z_1 - z_2} \quad (3)$$

转台一周对应这么多个 p_3 波, 则每个 p_3 波对应的角秒数即 p_3 的脉冲当量即为:

$$N_3 = \frac{1296000}{p_3} = \frac{1296000 (z_1 - z_2)}{z_1 z_3} \quad (4)$$

实例如图 3 所示, 用计算机计数方式进行比相、累加和显示。

若转台不动, 每个 p_{12} 对应 324 个 p_3 , 此为固定标准值, 每到一个 p_{12} 采样一次并减掉 324, 差值为 0 送累加器, 显示为零。当转台转动, p_{12} 相位移动(根据转向而超前或滞后) 采样后的差值或正或负, 送累加器; 何时转台运动停止, 何时累加器的计数值变化停止。这样, 对曾发生过的正反转变化均通过对 p_3 的累积计数一一记录在案, 并换算成度、分、秒显示。

按照 (4) 式, 此时 p_3 脉冲的当量为:

$$N_3 = 1296000 (4000 - 3992) / 4000 \times 2592 = 1 \quad (5)$$

4 齿波对偶法

图 3 例在原理上用不大于 4000 齿的齿轮实现了 1 的分辨率, 但本方案未采用任何细分手段, 何以能用刻线数为 2592 线的分度器件 z_3 产生的 p_3 信号达到 1 的分辨率? 联想到“放大入微”的讨论, 只能先假设: 采用差频法测量, 等效于增加了一级“齿轮传动比放大”。现仍利用此例证明如下。

按这种假设画出的假想测量系统如图 4(b) 所示, 与 (a) 比较, 分度器件 z_3 不是直接置于被测轴上, 而是

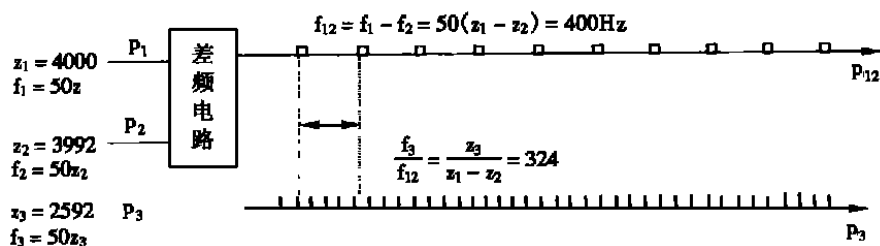
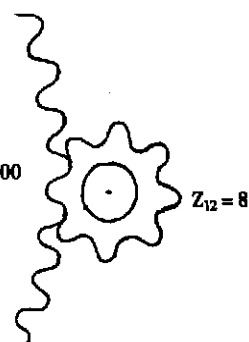
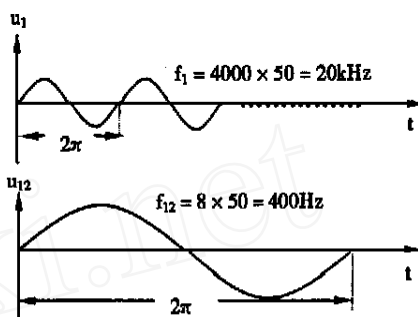


图 3 静态差频测试实例

通过了一级齿轮传动, 其中 z_{12} 是抽象出来而实际上不存在的。和前述放大测微分辨间距按传动比折小的原理一样, 刻线数为 2592 的分度器件 (z_3 齿轮) 的分辨间距再缩小 500 倍, 于是达到 1 的分辨率。再结合图 3、4 从信号角度分析, 问题的关键在于: 正如图 5 中 z_1 转动一齿, z_{12} 也要转动一齿, 但 z_{12} 一齿代表的空间距离放大了 500 倍一样, 当 u_1 信号因转台转过一齿距离而移相一个波时, u_{12} 信号根据 $f_{12} = f_1 - f_2$ 也要移相一个波, 但 u_{12} 一个波代表的时间周期放大了 500 倍。 u_3 信号是和 u_{12} 比相, 而不是和 u_1 比相, 从图 4 看, 就是用 z_3 测 z_{12} 的转动, 而不是测 z_1 的转动, 也就相当于是 在一级传动后



z_1 和 z_{12} 同时转动一齿
空间角位移放大 $i = \frac{z_1}{z_{12}} = \frac{w_{12}}{w_1}$ 倍
(a)



u_1 和 u_{12} 同时移相 2π 电角度
时间周期放大 $i = \frac{f_1}{f_{12}} = \frac{T_{12}}{T_1}$ 倍
(b)

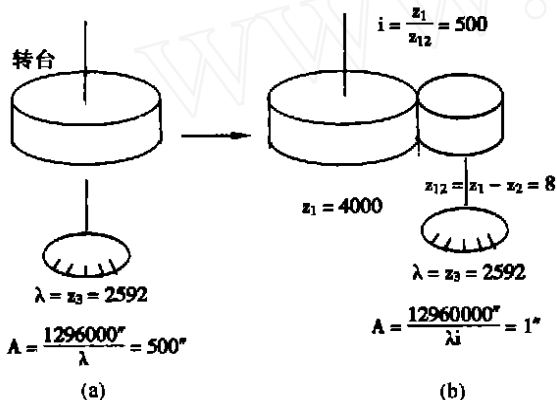


图 4 假想齿轮传动比放大

的高速端间接地测量 z_1 的转动, 达到脉冲当量缩小 500 倍的效果。于是有了本项研究的另一重要发现:

用差频方法进行分度测量 (无论是动态或静态测量) 时, 存在一个假想的齿轮 z_{12} (齿数 $z_{12} = z_1 - z_2$) 和一个等效的传动比放大机构, 传动比 $i = z_1 / z_{12}$, 其中 z_1 和 z_2 为参与差频的两路信号的传感器栅线数。因此差频方法的本质在于对测量信号的放大, 从而有利于测微。并且这种放大是对信号域时间周期的放大, 其降低分度器件分辨间距和刻线误差的作用与机械放大测微相似。

于是可以通过画出对偶的机械装置来辅助进行差

5 假想齿轮转动与信号移相的对偶关系

频电路设计, 这种方法可称为“齿波对偶法”。相对于差频电路设计, 人们关于齿轮传动组合形式的知识要多得多, 于是可以用齿波对偶法去对差频电路进行各种创新性的设计。再对上例继续讨论。如果真的想用齿轮作为分度器件, 那么 4000 齿和 2592 齿是太难加工了。为了减少齿数, 先分析 $A = 1296000 / i\lambda$, 和 $i = z_1 / z_{12}$, 希望 z_1 和 $\lambda(z_3)$ 尽量小, 而 i 不能太小, 就只能让 z_{12} 尽量小。所以取 $z_{12} = 1$ 即 z_1 和 z_2 的齿数差为 1, 而不是上例的 8。图 6 (a) 就是一种兼顾折衷的方案, 但 z_1 和 z_2 不能同时再减少了。这时会想到, 根据齿波对偶法, 既然齿轮传动可以通过几级传动达到较大传动比, 肯定也能用几级差频来达到用较少栅线数实现较大等效传动比的目的。如果要用两级差频, 可以采用 4 联齿轮如 (b)。(c) 图方案是一种误入歧途的设计方案, 两级差频并未达到减少 z_1 齿数的目的, 正如对应的机械图中 20 齿的 z_{12} 只属过渡齿轮而不对 i 产生影响一样。而 (d) 图才是真正的两级传动, 并且从机械图看, z_{12} 转一

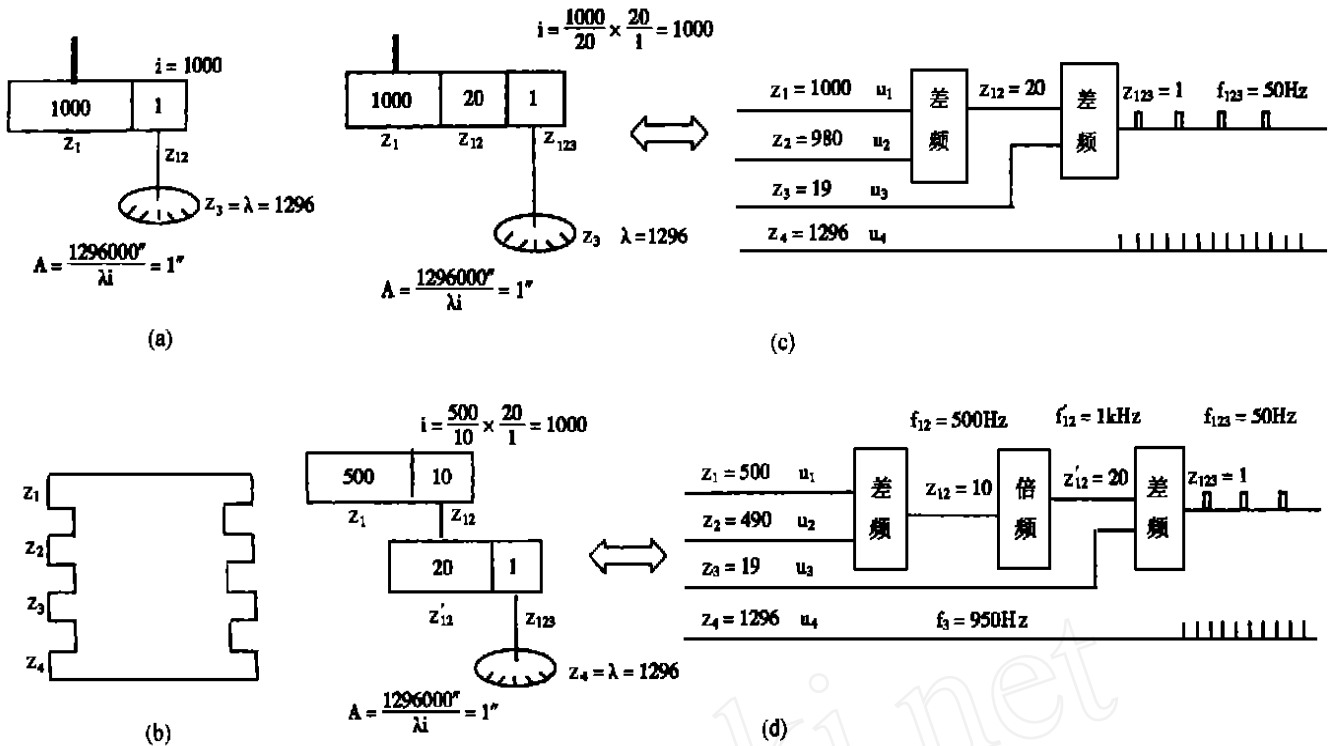


图 6 齿波对偶法设计实例

齿, z_{12} 转 2 齿, 这就提示在两级差频器之间应该增加一个 2 倍频器, 才能保证 u_{12} 信号移相一个波, z_{12} 信号移相两个波。这样就成功地将 z_1 降低了一半。齿波对偶法的启发和指导作用略见一斑。

不难看出, 齿波对偶法把空间域机械移相和时间域差频信号移相联系在一起: 机械传动系统一齿转动带动一齿转动, 但转动的空间放大 i 倍, 差频信号系统一波移动对应一波移动, 但移动的时间周期放大 i 倍。因此, 齿波对偶法使人们对差频电路有了更深一层的认识: 其本质还不只在于高速旋转滤掉制造误差和可用于极低速测量, 更在于其对测量信号的放大测微功能, 即降低刻线误差和分辨间距的功能。

还应指出, (1) 式中 $(\lambda_1 - \lambda_2)V$ 为栅线差频, 是由栅线数不同而引起; $\lambda_1 V$ 为转速差频, 是由 V 和 $V + v$ 不同引起。有些差频测量方案的两道栅线相同, 则栅线差频部分消失, 只有转速差频, 上述放大测微功能和齿波对偶法不成立。

5 差频双联齿式时栅传感器

设计了一种“差频双联齿式时栅^[1]”角位移测试系统如图 8 所示, 当转台以任意方向任意转速随机转动,

其角位移值由微计算机显示。双联齿齿数分别为 $z_a = 600$ 和 $z_b = 598$, 故 $z_c = 2$, 按照齿波对偶法, 即信号分辨间距先利用放大测微原理, 缩小 300 倍, 再用时钟脉冲作分度器件, 通过差频将比相周期放大而将脉冲当量缩小, 可以减轻时钟电路的负担和对恒速的要求, 并且传感器的实质发生了变化, 图 2 例是由齿轮 z_3 发出的信号作为分度器件信号, 因此它是“齿栅”, 而现在是用时钟信号作为分度器件(齿轮只是用作调制和差频), 因此它是“时栅”(图 7)。这种方案比较好地利用了“平均效应”。对于动测头, $W_1 = 1/z_1$ (转/齿), 理论上转台连

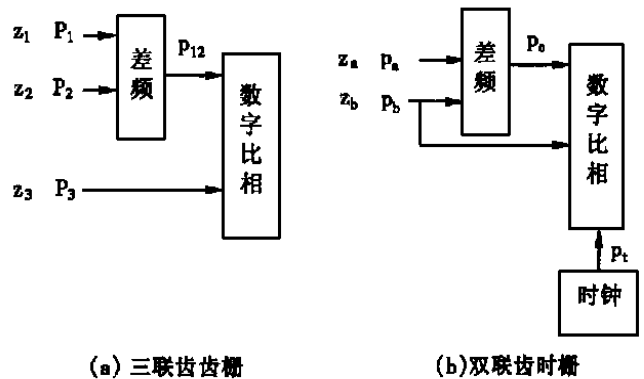


图 7 二种测量方案比较

(下转第 523) 页。

- 2 西安热工研究所. 热工技术手册——热工仪表与自动化分册. 北京: 水利电力出版社, 1992
- 3 孙增圻, 等. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- 4 姚林生, 等. 传感器非线性校正的人工神经网络方法. 仪器仪表学报, 1994, 15(3): 299~ 302
- 5 田社平, 等. 基于神经网络的仪器非线性校准系统研究. 自动化仪表, 1997, 18(7): 15~ 17.
- 6 汪晓东, 等. 用遗传算法拟合传感器的输出特性. 仪器仪表学报, 1997, 18(4): 354~ 357.
- 7 庄哲民. 热电偶模型的非线性估计. 电工技术学报, 1998, 13(3): 30~ 32
- 8 查美生. 热电偶补偿导线测温误差分析及修正方法. 工业仪表与自动化装置, 1998, (5): 3~ 6
- 9 方一鸣, 等. 一种单片机实现的热电偶测温的通用查表法. 电气自动化, 1998, (5): 37~ 39.
- 10 王俊杰, 等. 最小二乘法在铂热电阻测温中的应用. 仪表技术与传感器, 1999, (5): 35~ 36
- 11 Albus J. S. A New Approach to Manipulator Control: the Cerebellar Model Articulation Controller. J. Dyn. Sys. 1975.
- 12 李阳春. 长兴电厂在线监测与管理系统 [硕士学位论文]. : 浙江大学, 1998

(上接第 509 页)

同测头每转过一齿产生一个附加正弦波, 即 $u_m = \sin \frac{2\pi}{W} x_0$. 由于齿轮 z_1 是在作高速旋转, 所以这里所说的“测头转过一齿”, 就不是转过真正的 z_1 中的一颗“有肥有瘦”的具体齿, 而是 z_1 颗齿平均后的一颗“动态平均齿”齿距, 才对应地发出一个代表位移量的正弦波, 再以附加相角的形式调制在代表高速旋转的载波之中。

6 传感器实验结果

实验装置如图 8 所示, 差频双联齿式时栅采用与光栅对比的方式进行实验。国产的机械回转分度转台

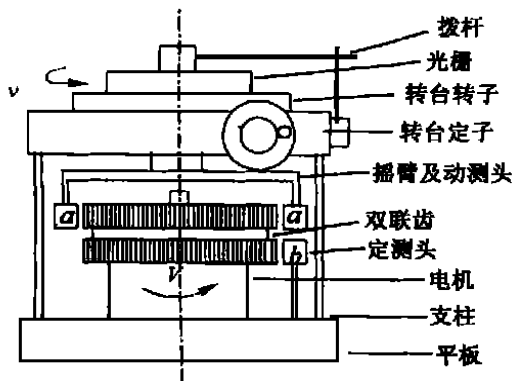


图 8 差频双联齿式时栅实验装置

(传动比 $i=90$ 的蜗轮副) 上装有 HE DENHA N 圆光栅

(栅线数为 36000, 通过电子细分箱, 最小分辨间距 1)。圆光栅外壳的轴通过拨杆与转台定子(外壳)固定。圆光栅外壳则与转台转子固定并随之转动。

转台的转子(芯轴)下方安装一摇臂, 使转台的回转运动能反映到摇臂上的测头上来, 动测头对径安装两个, 以减小回转齿回转中心相对于转台回转中心的偏心影响; 动测头和定测头两路信号接入计算机内的接口电路板, 配合程序, 完成信号的放大、差频、整形、计数、比相、换算和显示。

时栅由电机、齿轮和测头组成, 转台是工作机械, 光栅是对比实验标准。实测时, 按 30 为间隔, 一周取 12 个点, 以光栅读数为横坐标, 时栅读数与光栅读数之差为纵坐标, 各测试点连接之折线图即为误差折线图, 测出其峰峰值即综合误差值为 ± 34 。另外, 因为 $V = 3000$ 转/分 $= 64.8 / \mu s$, 采用 2M 时钟并经 300 倍差频放大, 因此分辨率 $N_t = 64.8/2 \times 300 = 0.108$ /脉冲。

参考文献

- 1 彭东林, 刘成康, 谭为民. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报, 2000, 21(4): 338~ 342
- 2 和子康. 机床传动精度测量和提高. 北京: 计量出版社, 1987.
- 3 托 迄拉可维茨[捷], 和子康译. TOCNMO 系列运动精度测量仪. 重庆圆柱齿轮研究所, 1982.
- 4 秦树人. 磁栅及其测量系统. 重庆: 重庆出版社, 1984.
- 5 包善明, 陈永林, 黄善明. 差频式传动链测量仪. 上海机械, 1980, (9): 16~ 18.