

③ 9-14

应用误差均化原理提高精密机械的运动精度

秋锦如

(四川宁江机床厂, 都江堰市 611831)

~~TH115~~
TH115

摘要 在精密机械设计中从七十年代起出现了应用误差均化原理进行设计的新趋向, 对提高机械运动精度和定位精度有显著效果。本文阐述了误差均化效应的机理、设计中应具备的条件, 例举了多种应用实例, 并分析了应用该原理进行精密机械设计中的问题。

关键词: 精密机械; 误差均化原理; 结构; 精度

1 前言

在六十年代进行精密机床设计时, 常按照运动学设计原理、六点定位、避免静不定和减少干涉影响的原则进行。如在轴系和导轨设计时, 常用五个自由度约束, 一个自由度运动的定位原则, 在圆度和长度测量系统中, 用长度线纹尺和圆刻度盘, 应用光学单线瞄准光屏读数方式来达到转台和坐标测量系统的要求。随着技术的发展, 上述原理已不能满足精密机床的设计要求。

因此从七十年代起, 在精密机床设计中, 出现了单点定位原理发展为多点定位原理, 并用误差均化原理进行精密机床设计的新趋势。

2 误差均化效应的机理

在把单个定位误差起作用发展为多个定位误差同时起作用的系统中。由于每个定位点的加工精度较高, 已把系统误差全部消除。余下的将是随机误差, 其分布曲线接近正态分布。在各实际尺寸的真值处, 概率密度最大, 误差大的将是少数, 愈大则愈少。两定位元件啮合时, 将是在一件尺寸外面方向累积误差值最大处先和另一件接触。接触后由于在负荷的作用下引起结构产生变形和相对运动后的磨损, 使每个接触点的误差值逐步接近, 工作点迅速扩大, 结果导致定位元件的系统误差将是所有接触点误差的平均值, 从而可使该系统的精度大幅度提高。这一现象即通常所说的误差平均效应。

3 结构设计应具备的条件

要达到上述目的, 结构设计时必须满足如下三个条件:

负荷大小, 要使多个具有不同误差值的点同时参加工作, 达到均分作用, 运动付的构件要

紧密接触, 负荷能满足自动消除间隙。负荷大小要适当, 最大不宜超过材料硬度的 $1/3$, 否则会磨损增大, 甚至咬死。但也不能太小, 以免不能充分实现误差的均化。

啮合件单齿或中间件的尺寸形状: 要提高均分效应, 设计啮合件齿形时, 尺寸形状不宜过

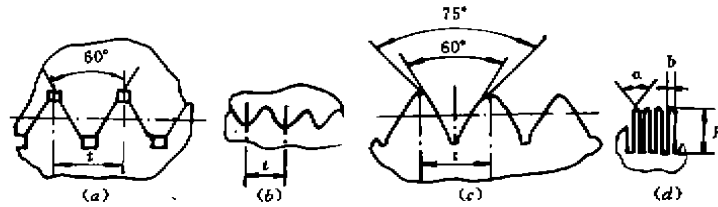


图 1

大, 要使他们易于弹性变形, 常见的见图 1。齿距尺寸不大于 3mm , 齿型一般为 60° , 齿根部有根切, 以增加弹性。甚至可设计成弹性齿图 1(d), 齿厚与槽深之比为 $1:4$ 到 $1:8$ 。这样, 每一齿都似一根悬臂梁, 在外力作用下, 齿就会产生一定的弹性变形。如要设计中间件, 必须是接触区另变形的滚珠或滚柱等。

制造精度, 虽然均化效应能提高啮合精度, 但啮合件的加工精度仍决定其工作精度, 二者近似成线性关系, 因首先接触的是误差较大的点, 受力后的弹性变形是有限的, 过大的加工误差, 将使接触点大大减少。因此制造误差最大不能超过啮合时弹性变形允许的极限。以免发生啮合错位过大, 难以研磨或大大增大研磨时间。啮合件最后可采用易位研磨法进行精加工, 这样可较高地提高加工精度。另外在一般研磨前的加工误差可比工作状态下的误差大 $10\sim 20$ 倍, 具体可随啮合件齿形的弹性状况和研磨条件而定。

4 结构应用实例

误差均化原理的应用, 按使用目的不同有导轨系统和分度系统两类, 常见的结构有:

4.1 密珠回转轴系

这是目前高精度光学转台、光学分度头和圆度仪应用的一种新轴系, 如图 2 所示。这种轴系不仅工艺性好, 消除了间隙, 而且由于精密钢球易于弹性均分, 有较好的均分效应。应满足的条件:

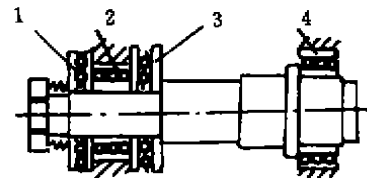


图 2

(1) 负荷力一般通过径向轴承内外滚道间的预紧过盈来达到, 过盈量一般为 $(0.005\sim 0.015)\text{mm}$, 由轴系尺寸决定。对钢球直径为 $(5\sim 6)\text{mm}$, 轴系支承外径为 $(30\sim 40)\text{mm}$ 时, 以 $(0.008\sim 0.12)\text{mm}$ 为宜。轴向止推轴承通过螺母来调整弹簧预紧力。

(2) 钢球为弹性中间件, 一般用直径 $(4\sim 8)\text{mm}$, 精度 0 级。因钢球理论上为点接触, 接触应力大, 滚道易出现压痕。设计时要求每粒钢球回转都沿着自己的滚道滚动而不重复排列成多头螺线布置。径向滚道如图 3 所示。球直径 5mm , 全长采用四组排列, 共有 20 颗钢球关系式为:

$$\text{I 组: } \alpha = 0^\circ + 24.5^\circ i, x = 4.9 + 2i;$$

$$\text{II 组: } \alpha = 90^\circ + 24.5^\circ i, x = 5.9 + 2i;$$

Ⅲ组： $\alpha=180^\circ+24.5^\circ i, x=5.4+2i$ ；
 IV组： $\alpha=270^\circ+24.5^\circ i, x=6.4+2i$ ；
 $i=0, 1, 2, 3, 4$ 。

止推轴承隔离圈如图4, 关系式为：

I组： $\alpha=0^\circ+18^\circ i, R=24.9+1.6i$ ；

Ⅱ组： $\alpha=90^\circ+18^\circ i, R=25.4+1.6i$ ；

Ⅲ组： $\alpha=180^\circ+18^\circ i, R=25.2+1.6i$ ；

IV组： $\alpha=270^\circ+18^\circ i, R=25.7+1.6i$ ；

$i=0, 1, 2, 3, 4$ 。

(3)在制造上要求内外圈滚道的圆度、锥度、同心度误差在 $1\mu\text{m}$ 以内。

这种轴系在光学分度头上应用较广, 上海机械学院的光栅分度头用此轴系后回转精度可达 $0.2\mu\text{m}$, 光学转台上用可达 0.5mm (轴系长度较短)。美国莫尔公司用在三坐标测量机的圆度仪上, 回转精度达 $0.2\mu\text{m}$ 。

4.2 直线移动密珠导轨

原理同上, 不同处是直线移动隔离圈不易封闭, 实现困难, 现有二种结构形式。

4.2.1 隔离圈跟随移动的形式

其结构如图5所示, 优点是结构简单、制造方便、钢球数量多、均化效应显著。缺点是隔离圈跟随移动, 进入孔时易卡住、移出后易外露、防尘差。故设计时应做到：

(1)为保证移动时接触长度不变, 隔离圈长度最好尽可能接近箱体长度加上一半行程。

(2)为防止进入箱体两端时卡住, 箱体套两端孔口增加 $5\text{mm} \times 3^\circ$ 的斜度, 镶套材料采用GCr15轴承钢, 淬硬HRC63。

(3)钢球在隔套内排列成沿移动方向有 $3\sim 6^\circ$ 斜度, 使每一钢球移动轨迹不重合, 如图6所示, 以防止出现压痕和过早磨损。

(4)隔离圈内径比轴大 $(0.5\sim 0.6)\text{mm}$, 放钢球的孔, 为了加工方便, 内侧孔口加工成 90° , 孔径比钢球大 0.1mm , 钢球装入后, 长出内壁 0.3mm 以上, 不掉出, 孔口装配时铆边, 达到钢球转动灵活, 又不能掉出。材料用H62。

(5)钢球直径常采用 3mm , 过盈量 $(4\sim 10)\mu\text{m}$, 大小由移动轴的直径而定, 钢球精度 $0\sim 1$ 级, 一致性差为 $1\mu\text{m}$ 。

(6)为了减少灰尘影响, 套筒两端最好设计两个橡胶防尘套, 视使用场合而定。

这种结构适用于坐标镗床、坐标磨床等机床的主轴套筒上下移动用, 由于误差均化效应, 在箱体孔圆柱度为 $(3\sim 4)\mu\text{m}$ 的情况下, 直线移动精度可达 $(1\sim 2)\mu\text{m}$ 。而且具有灵敏度高、刚性大、不易受发热膨胀而卡死等优点。

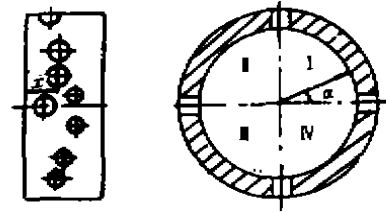


图3

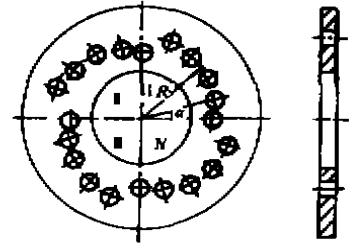


图4

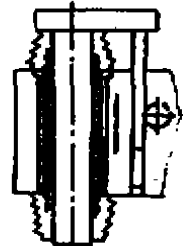


图5

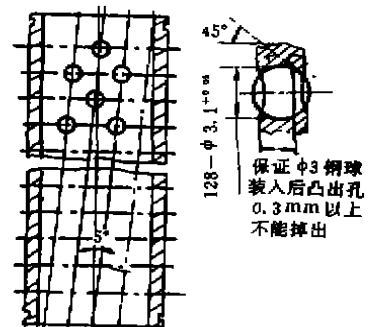


图6

4.2.2 钢球自动循环的移动方式(图7)

其结构如图7所示,它是为了改善上述缺陷的一种结构。但它结构复杂,制造困难,精度不易提高。图8所示,是一种新型的轴承结构,它由上盖1、下盖2、中间轴承体3、镶块4、内套5和钢球6所组成。它具有以下特点:

(1)常用0级直径3mm的钢球来保证精度。因采用隔离圈相隔有困难,在3mm钢球间加入(2.98~2.99)mm钢球,起隔离作用。

(2)镶块4是为了便于滚道加工而设置的。

(3)负荷大小靠轴承内孔与轴、钢球的过盈量来实现,其过盈量一般为(4~8) μm 。

4.2.3 多齿分度台(图9)

其工作原理如图9所示,它由两个齿形和节距相同的平面齿轮1、2相啮合,工作时一个平面齿轮沿轴向向上移动,使齿腔开,按要求的角度相对转动,达到要求后,向下复原,靠多齿啮合复位的特性,可得到高精度。

由于两齿盘啮合时端面上的齿全部参加工作,故具有下列特点:

(1)分度精度高,由于多齿啮合时的均化效应,使分度精度远高于多齿盘自身的精度。

(2)承载能力大,啮合时上下齿盘的齿彼此相嵌,接触面积大,犹似一整体。

(3)结构简单、制造容易、使用方便、容易实现自动化。缺点是不能任意分度。从结构上可分为刚性齿和弹性齿两种。

4.2.4 刚性齿多齿分度台

国外最著名的是美国莫尔公司的1440精密分度台,它在圆周610mm的上下齿盘上各有齿形和模数相同的1440齿,最小分度值为 $1/4^\circ$,因齿形小,齿距只有0.432mm,故齿形设计 60° 圆弧形图9。为避免上下齿盘齿顶与齿根干涉,齿根半径不大于0.025mm,分度精度可达 $\pm 0.1''$ 。另外西德、日本、苏联和国内一些厂也都生产刚性分度台。除1440齿外,还有720、360齿,相应的最小分度值为 $30'$ 和 1° ,虽然从原则上齿数越多,均分效应越好,分度精度越高。但齿数越多,加工难度增加,实现高精度更加困难。

4.2.5 弹性齿多齿分度台

齿形如图9所示,即在齿的根部开了一条很深的窄槽齿厚 b 与槽深 t 之比一般为 $1:8\sim 1:4$ 。这样每个齿都似一根悬臂梁,在外力作用下,齿根极易发生弹性变形,故称为弹性齿。齿形角常取 60° ,也可取 45° 或 90° 。啮合原理与刚性齿多齿分度台相同。齿发生弹性变形的结果,保证上下齿盘上所有的齿都能确实接触,多齿啮合的均化效应将得到充分发挥,理论上可以证明,当材料遵守虎克定律和有足够轴向力时,则任意两位置的分度误差将等于零。弹性齿多齿分度盘的齿数常选用180、360和720,相应的最小分度值为 2° 、 1° 和 $30'$,这是我国在1967年由

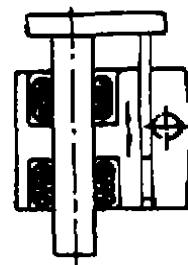


图7

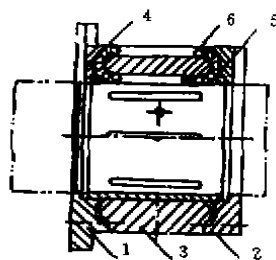


图8

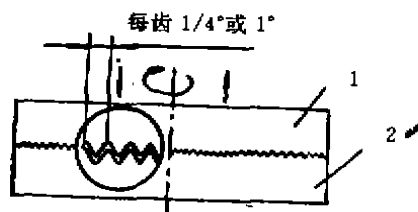


图9

机械工业部科学院首先试制成功的,其分度误差达到 $\pm 0.1''$ 。弹性齿的弱点是齿的刚性较低,只能承较小的载荷或切削力。

4.2.6 精密丝杆副

这是一种传统的传动方式,应用较广,长刻线机丝杆副的结构示意图如图 10 所示,采用弹簧力自动消除间隙,螺距常为 1mm,牙形一般为 60° ,螺母长度(90~100)mm,丝杠材料用合金工具钢 CrWMn,硬度为 HRc63,螺母用材料为磷青铜 ZQSn10-1,丝杠要经过磨削、研磨后达到 5 级精度,螺母采用与丝杠一起磨出的丝攻攻制。经最后跑合后可使小距离内的分度精度提高到 $0.5\mu\text{m}$ 。美国莫尔公司的丝杠和螺母在经精细的加工和研磨后,在 B14、B18 型坐标镜床上应用,使 30mm 内的定位精度提高到 $0.6\mu\text{m}$ 。最有成效的是英国国家物理试验室的梅尔顿,他充分应用了误差均化的原理,设计了一种弹均式丝杆副,其螺母具有弹性。把弹性螺母与用精密车床车出的细牙丝杠通过过盈配合而得到精度在 $0.2\mu\text{m}$ 以内的分度运动。并通过机构再车出一段精度极高的丝杠,这段丝杠的精度完全可以满足作为计量用复制光栅母型的要求。

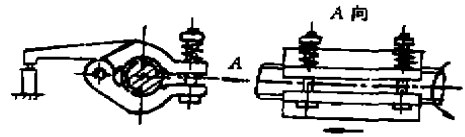


图 10

4.2.7 长、圆光栅或感应同步器

近年来数显数控圆分度系统增多,分度元件圆刻度盘逐步由圆光栅或圆感应同步器代替。图 11 是 $1''$ 光栅分度头用的一种圆光栅,光栅盘固定在主轴上,随主轴回转,三块固定光栅分别固定在分度盘后面,呈对径及相位 90° 三个位置,由对径分布 A、B 二个进行分度和计数,C 用作辨别转动方向。光栅盘刻有 21600 条线,两线之间的夹角为 $1'$,固定光栅以 $1^\circ 30'$ 、90 条线进行对线读数,读数值为 90 条线的平均脉冲作用。通过误差均化作用,使分度精度提高到 $0.5''$ 以上。目前在高精度分度头和分度转台上应用。

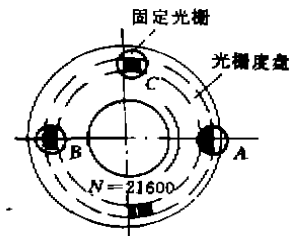


图 11

七十年代以后新设计的坐标机床大部分都已采用光栅尺或感应同步尺取代光学线纹尺,尤其是感应同步尺应用更广。

感应同步尺常设计成直线式,由相对平行移动的定尺和移动尺组成,其间有(0.25~0.30)mm 的气隙,工作原理如图 12 所示,是一个幅值状态下的数字显示测量系统。移动尺一般长 100mm、线距 2mm,50 条线同时对线,误差均化后可把(2~10)mm、内精度提高到(0.5~1) μm 。

光栅尺采用每毫米刻 25~50 条线,精度(3.3~13) μm 的金属光栅尺,有采用每毫米刻 100 条线,精度(2~10) μm 的玻璃透射光栅尺。副尺设计成(5~10)mm,这样对线条线达 250~1000 条,故均化效应较高,小距离内精度可

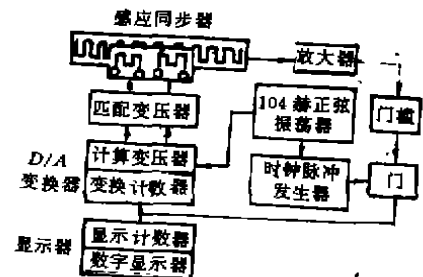


图 12

提高到 $0.5\mu\text{m}$ 以上。

5 结 论

目前误差均化原理在精密机械结构设计中的应用已获得较大成效,如密珠轴承结构在高精度低速回转的精密分度头、丝杆测长仪、对刀仪和精密转台的轴系中,已逐步取代原有的滑动轴承和滚动轴承;多齿分度台已逐步发展成为高精度的角度基准;光栅尺或感应同步尺,从七十年代起已逐步取代光学线纹尺,并广泛应用在精密机械的测量系统中。

目前精度要求愈来愈高,角度精度要求比 $1''$ (或长度精度要求比 $1\mu\text{m}$)提高了一个数量级,达到了零点几秒和零点几微米的精度要求,为此在结构设计上,应用误差均化原理是解决目前系统精度低于元件精度、磨损后精度降低等问题的有效途径,应加强这方面的研究和应用。

参 考 文 献

- [1]狄锦如,改善轴筒拉毛问题的途径,机床,1983年1期
 [2]史习敏,黎永明主编,《精密机械设计》,上海科技出版社,1987年
 [3][美]韦恩 R. 穆尔,《机械精度基础》,国防工业出版社,1977年

Improving the Moving Accuracy of Precision Machinery with Error Averaging Principle

Di Jinru

(Ningjiang Machine Tool Works, Dujiangyan 611831)

Abstract

In the area of precision machinery design, a new tendency appeared by using Error Averaging Principle from 1970s. By means of using this principle, the machinery moving accuracy and position accuracy have been improved a great deal. This paper describes the machinery principle of error averaging, the possible conditions in designing and various practical examples, and also analyzes the problems in using the principle to design.

Key words: Precision machinery, Error averaging principle, Structure, Accuracy