

作为开环系统的高精度定位装置

叶庆泰 叶 勇 陈劲松

(上海交通大学机械工程系, 上海 200030)

朱 正

(上海隧道工程设计院)

摘要 作者分析了闭环及开环控制系统各自的优缺点, 提出了利用计算机高速大容量的特点进行离线检测、在线补偿的可能性, 以及在实施过程中必须解决的关键问题。最后附有实测数据。该系统在 25mm 行程中示值误差 $\leq 1\mu\text{m}$ 、回程误差 $\leq 0.3\mu\text{m}$ 、分辨率为 $0.1\mu\text{m}$, 结构简单、可靠、价格低廉。已获得专利。

关键词: 定位装置; 高精度; 开环系统

1 在大量高精度定位系统中采用开环系统的可能性分析

在高精度检测系统中通常采用闭环系统, 由于它采用反馈环节, 从而降低了系统误差、提高了控制精度, 这样, 就可能采用精密度要求不高、成本较低的元件构成系统来满足一定的控制要求。这在开环系统中是不能做到的。但是, 实际系统一般都具有质量、惯性或延滞, 由于采用闭环控制, 就有可能使系统产生不稳定, 甚至不能工作。反馈改变了控制系统的动态性能, 也增加了问题的复杂性。而开环系统的结构简单、价格低廉、使用维修方便, 在给定一个输入时, 便有一个相应的输出。但是当系统响应, 作为若干的随机变量的函数形式出现时, 要达到精确的输出量是很困难的。

随着商品经济的发展, 对产品性能价格比提出了更高的要求, 为此, 当工厂向我们提出研制大量程 (25mm 行程)、高精度 (μm 级) 定位装置的要求时, 我们作了细致的分析研究。我们发现目前高精度大量程的定位装置要求精度是几个 μm , 要末是 nm 级。究其原因, 关键在于一个检测传感器, 亦即如何来找到一个真实误差 Δ , 从而来实现误差补偿, 这就要求检测传感器的精度必须比定位装置所需的精度提高一个数量级。当然测出其真实误差后, 如何消

除误差, 在高精度定位装置中, 还是相当困难的, 如系统中的间隙问题、爬行问题等等。为了达到 μm 级的精度, 在闭环系统中必须把这样高精度的检测装置作为系统的一部分, 这样, 就使系统极为复杂, 使用要求也极为严格, 产品成本也大为提高。那么出路何在? 有否可能在原来开环系统的基础上, 再辅以闭环系统的补偿原理, 从而实现提高系统精度的目的呢?

回答应是肯定的。为此, 就必须解决如下两个方面的问题: 其一是是否能建立一个较好的数学模型。所谓数学模型, 亦即是把系统中规律性的东西都提出来, 这些规律性的东西可以是确定性的、也可以是随机性的, 最后留下的, 应是正态分布的随机量或是白噪声。当然关键是能否将这些量控制在允许的范围之内。其二是使系统重复精度能达到相当高的水平。假如仅仅通过提高加工精度的方法来达到这样的目的, 不仅具有很大的难度, 也是不合算的。我们可在适当提高加工精度的同时, 再采用补偿的方法。在微处理器迅速发展的今天, 完全可以在离线情况下, 测出系统的计量误差, 通过数据处理, 将其存入计算机, 在实际测量过程中进行补偿。当然这两者是相互关联的, 必须处理好这两者的关系才能得到一个优良的系统。

2 系统配制

建立系统的原则: 1 充分利用计算机高速大容量的特点把补偿规律及部分数据存入计算机以便进行开环补偿; 2 尽量把随机性的问题转化为确定性的问题来处理; 3 尽量把系统中的外摩擦, 转变为结构的内摩擦, 从而改善系统的爬行问题; 4 提高系统的分辨率, 以便解决高精度定位的实施。

系统具体配制如下:

1 用单片机, 进行系统控制。

2 由于步进电机具有精度定位和无累积误差等优点, 因此, 采用了步进电机。但由于步进电机的惯性, 其启动频率也受到限制, 为此本系统采用了自动升降频率电路。

3 采用了特殊的消间隙机构。

4 采用了谐波传动装置。由于谐波传动是一种依靠弹性变形运动来达到传动目的的新型传动, 它具有结构简单、重量轻、传动比大、啮合齿数多的特点, 因此, 传动精度高, 承载能力大; 由于是柔性传动, 因此, 齿侧间隙小, 甚至可以达到无侧隙传动等一系列其它传

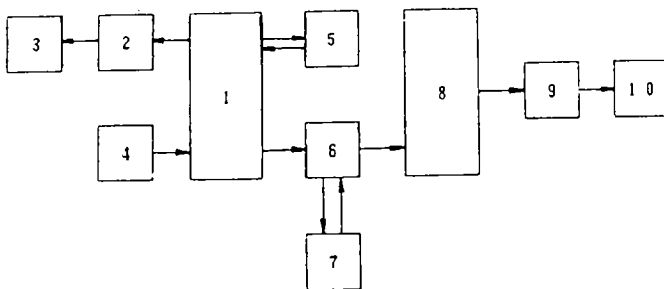


图 1

1—微处理器、2—打印机驱动器、3—打印机、4—时钟、
5—存储器、6—接口、7—键盘、8—步进电机驱动器、
9—步进电机、10—执行机构

执行机构的组成是:

步进电机、谐波减速装置、消除机构、特种零级测微头

动所难以达到的特点。为此,采用谐波传动可提高系统的分辨率及传动精度、减小系统的回程误差。

5 由于末级机构的精度直接影响到整个系统的输出精度,因此,采用特种零级测微头。其示值误差在 0~25mm 范胃内 $\leq 3\mu\text{m}$,在任意 10mm 范围内 $\leq 2\mu\text{m}$,回程误差 $\leq 0.8\mu\text{m}$,测量面的平面度误差 $\leq 0.6\mu\text{m}$,螺杆测量面与测微螺杆轴线的垂直度误差 $\leq 1\mu\text{m}$ 。系统结构框图如图 1。

3 系统精度分析

3.1 步进电机的步距精度

步进电机的步距误差不会长期积累,每转一周其步距误差就会自动消除。国内生产的步进电机在 360°内各步误差积累值为步距角的 10%以内。

本系统采用 36BFO2B 型步进电机,步距角为 3°,则最大步距角误差为 0.3°,通过传动比为 81 的谐波减速器的螺距为 0.5mm 的测微头,则换算到系统的精度误差为

$$\frac{0.3}{360 \times 81} \times 500 = 0.00514\mu\text{m}$$

3.2 谐波传动装置的运动误差

由于谐波传动同时啮合齿数较多,又柔轮为弹性元件,使误差得以补偿;再由于其啮合区的对称性,使偏心误差大大减小。因此在相同的制造精度等级下,谐波传动的精度要比一般齿轮传动的精度高得多,通常,至少提高一级。

影响谐波传动运动误差的因素有:1 零件制造及装配精度;2 同时参与啮合的齿数;3 齿轮的传动比;4 柔轮和轴的弹性变形;5 发生器总成及其弹性变形等。

谐波传动极限概率误差的计算模型为:

$$\Delta\varphi_{hg} = \pm \frac{K_m}{\sqrt{Z_{mp}}} \left[0.25 \left(\sum_1^j \Delta F_{\Sigma j} + \frac{\pi d'}{4U\omega_0 i_h} \sum_1^n \Delta\rho_n \right) + 0.4 \sqrt{\sum_1^j (\Delta F_{\Sigma j})^2 + \left(\frac{\pi d'}{4U\omega_0 i_h} \right)^2 \sum_1^n (\Delta\rho_n)^2} \right] \frac{412.8}{d'} + \Delta e$$

式中: $\Delta\varphi_{hg}$ —谐波齿轮传动输出轴相对于输入轴的位置(转角)误差(S)

Z_{mp} —谐波齿轮传动同时参与啮合的齿数

K_m —系数。为位置(转角)误差的实测值与计算值的比值。计算时取 $K_m = 0.8 \sim 1.0$

$\Delta F_{\Sigma j}$ —每个齿轮的综合误差(μm)

i_h —齿轮传动的传动比

U —波数

ω_0 —柔轮径向位移之最大值(mm)

d' —近似等于柔轮分度圆直径(mm)

$\Delta\rho_n$ —波发生器件零件的径向制造误差(μm)

Δe —弹性回差的理论值(S)

本系统采用的谐波减速器其传动比为 81, 柔轮齿数为 162, 刚轮齿数为 164, $\alpha=20^\circ$, $m=0.15$ 。采用双圆盘波发生器, 柔轮和刚轮的制造精度均为 7-a, 最终求得:

$$\begin{aligned} & 4.387' \\ \Delta\varphi_{hg} &= -3.386' \end{aligned}$$

将其换算到系统的精度误差为:

$$+0.102\mu\text{m}, \quad -0.078\mu\text{m}$$

3.3 特零级测微头的示值误差

装配于系统中的特零级测微头之示值误差, 主要是测微螺杆的螺距误差, 在不计检具两支的同轴度误差时, 测量面对螺杆轴线的垂直度误差对测微头的精度影响极其微小, 数值为实际行程 $(1-\cos 1'3'')$, 可忽略不计。这样, 得出装配于系统的测微头示值误差 (在不计检具误差情况下)

$$\Delta L = 2.5\mu\text{m}$$

为此, 系统总示值误差为:

$$\Delta L_{\Sigma} = \sqrt{0.00514^2 + 0.102^2 + 2.5^2} = 2.502\mu\text{m}$$

3.4 系统的回程误差:

1 特种零级测微头置于检具上用扭簧表和 4 等 1 级量块进行检测, 回程误差不大于 $0.8\mu\text{m}$;

2 谐波传动装置的最大总回差值

$$\psi_{bhmax} = (\Delta s + \Delta g + \Delta f + \Delta t) \frac{6880}{d'}$$

式中: Δs — 输入轴和输出轴部件的弹性变形回差;

Δg — 刚轮、柔轮和波发生器制造和装配的误差以及波发生在载荷下弹性变形引起的回差;

Δf — 柔轮扭转变形引起的回差;

Δt — 由于温度变化引起的回差;

最终求得: $\varphi_{bhmax} = 1.51'$, 换算到系统的回程误差为:

$$0.0349\mu\text{m}$$

3.5 所采用的特种消除机构, 用有限元计算结果, 其回差值为:

0.032 μm

因此,系统总回程误差为:

$$\sqrt{0.8^2 + 0.0349^2 + 0.032^2} = 0.8014\mu\text{m}$$

4 实测数据:

经专用特种消除机构及误差补偿后,系统精度实测数据如表。

受检点 (mm)	1.0100	1.0200	1.0300	1.0400	1.0500	1.0600
实测值 (正行程)	1.0100(1)	1.0199(200)	1.0300	1.0400	1.0500	1.0599(600)
实测值 (反行程)	1.0100(1)	1.0200(1)	1.0300(1)	1.0401(2)	1.0500(1)	1.0600(1)
1.0700	1.0800	1.0900	1.1000	1.2000	1.3000	1.4000
1.0699(700)	1.0800	1.0900(1)	1.0999	1.2001(2)	1.3001(2)	1.4000
1.0699(700)	1.0800(1)	1.0901(2)	1.1001(2)	1.2002(3)	1.3002(2)	1.4000(1)
1.5000	1.6000	1.7000	1.8000	1.9000	2.0000	2.5000
1.5000	1.6000(1)	1.7001(2)	1.8000(1)	1.9000(1)	2.0000(1)	2.5000(1)
1.5000(1)	1.6001(2)	1.7001(2)	1.8001(2)	1.9000(1)	2.0001(2)	2.5001(2)
3.0000	3.5000	4.0000	4.5000	5.0000	5.5000	6.0000
3.0000	3.4999(5000)	4.0000(1)	4.5000	4.9999(5.0000)	5.4999(9)	5.9999(6.0000)
3.0000(1)	3.4999(5000)	4.0000	4.4999(5000)	4.9999(9)	5.4999(9)	5.9999(6.0000)
6.5000	7.0000	7.5000	8.0000	8.5000	9.0000	9.5000
6.5000	6.9998(9)	7.4998(9)	7.9999(8.0000)	8.4998(9)	8.9998(9)	9.4997(8)
6.4998(9)	6.9998(9)	7.4997(8)	7.9998(9)	8.4998(9)	8.9998(9)	9.4997(8)
10.0000	11.0000	12.0000	13.0000	14.0000	15.0000	16.0000
9.9998(9)	10.9998(9)	12.0000	12.9999(13.0000)	14.0000	15.0000(1)	15.9998(9)
9.9998(9)	11.9996(7)	11.9998(9)	12.9998(9)	13.9998(9)	14.9998(9)	15.9997(8)
17.0000	18.0000	19.0000	20.0000	21.0000	22.0000	23.0000
16.9998(9)	17.9999(18.0000)	19.0000	19.9999(20.0000)	21.0000	22.0000(1)	22.9999(23.0000)
16.9997(8)	17.9996(7)	18.9997(8)	19.9997(8)	20.9997(8)	21.9997(8)	22.9999(23.0000)
24.0000	25.0000					
23.9999(24.0000)	24.9999(25.0000)					
24.0000						

末尾括号中的数值是数码管跳动的数值。

5 结 束 语

该系统于91年7月起经频繁使用,至今性能良好。作为千分表及百分表的检定仪使用,得

到工厂欢迎。今后的工作是进一步扩大量程范围到100mm、200mm、300mm, 及扩大维数, 做到在二维、三维的条件下仍可实现 $1\mu\text{m}$ 的定位精度。这方面的工作将是相当有意义的。

An Open-loop High-precision Positioner

Ye Qingtai, Ye Yong, Chen Jingsong

(*Depa. of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Changhai 200030*)

Zhu Zheng

(*Shanghai Designing Institute of Tunneling Engineering*)

Abstract

Authors analyzed the virtues and defects of closed loop control system and open one respectively, introduced a new way tacking advantage of computers speed and capacity to realize the detached measuring and the real time compensation, and pointed out some key problems which must be solved in practice. Furthermore, gave measured data which reach the performance index of full stroke readout error $\leq 1\mu\text{m}$, backstroke readout error $\leq 0.3\mu\text{m}$, and $0.1\mu\text{m}$ distinguish ability.

Key words: Positioner, High-precision, Open-loop system