

传动链动态精度检测的新方法—QL系统*

THE NEW METHOD—QL*SYSTEM FOR MEASURING
DYNAMIC ACCURACY OF THE DRIVETRAIN

秦树人 王嘉琛 胡信毅 江光城

Qin Shuren Wang Jiachen Hu Xinyi Jiang Guongcheng

(重庆大学)

(重庆圆柱齿轮机床研究所)

摘要 本文介绍一种由著者首次提出的齿轮加工机床传动链动态精度检测的新方法—QL系统。新方法具有很大的使用复盖面，它不仅适用于中等规格的机床，而且特别适用于超低速、大传动比的大型齿轮机床传动精度的检测。

主题词 数据处理/传动链、齿栅、电轴、栅数差频、转速差频
中国图书资料分类法分类号 TH 822 TP 274.23

ABSTRACT The paper introduces a new method—QL system suggested for the first time by the author for measuring dynamic accuracy of gear cutting machine drivetrain. The system has many uses. It suits not only the measurement of mid-size machine tool but also the measurement of very slow speed, large ratio, large-size machine drivetrain.

SUBJECT WORDS Data handling /drivetrain; gear-grid; electric-axis; frequency of grids number difference; frequency of rotational speed difference

一、引言

传动链动态精度检测，始于本世纪五十年代末至六十年代初。最早出现的检测装置有捷克斯洛伐克的磁栅系统、英国的光栅系统、西德的旋转惯性系统和美国的感应同步器系统。从六十年代初期以来，这些检测系统在我国和许多工业发达国家都得到了广泛的应用，对于提高这些国家机床的传动精度作出过很大贡献。但是由于受到系统频响的限制，上述检测装置只适用于中等规格机床传动精度的检测，对于超低速、大传动比的大型机床及大型仪器

收文日期 1989年8月2日。

*国家自然科学基金资助项目。

QL——此类仪器国标规定的符号。

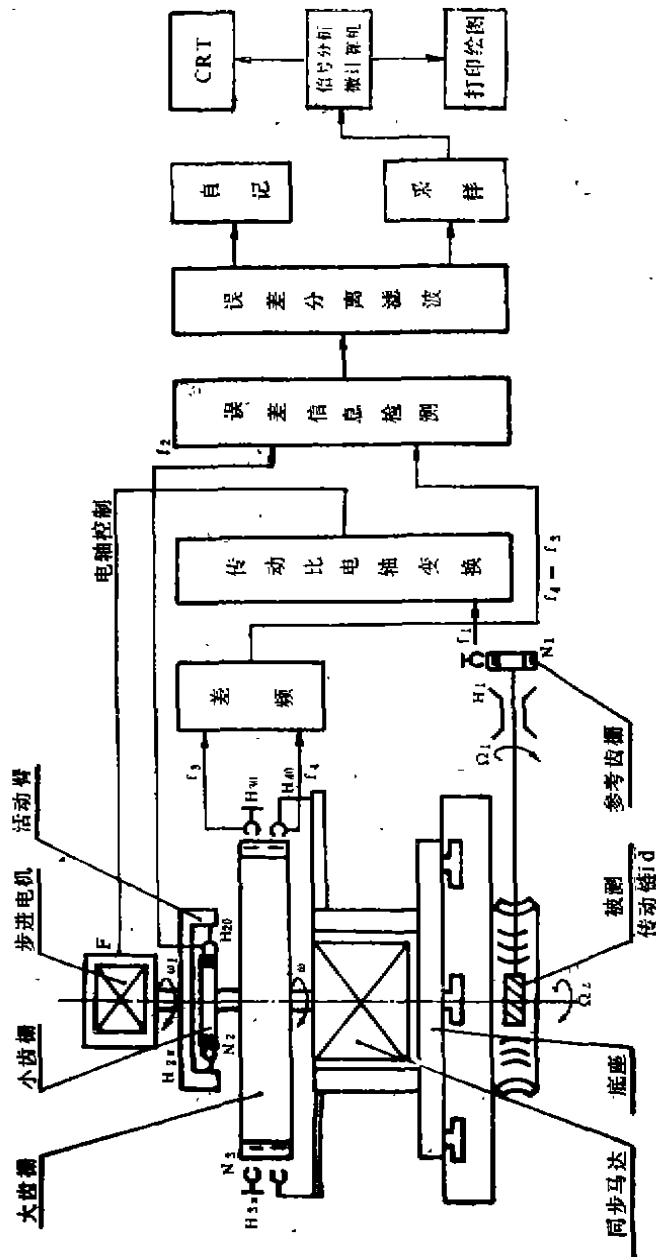


图 1 (a) QL检测系统原理图

(如天文仪、雷达天线系统)的传动精度,在七十年代前几乎没有有什么正规的检测方法和装置。七十年代初,聪明的捷克人 *těpánek* 发明了一种差频辅助挂轮式检测系统 [1][2][3], 在世界上首先解决了极低速、大传动比的大型齿轮加工机床传动精度的检测问题。但是由于辅助挂轮引入检测装置后,使其产生了一系列缺陷 [2], 致使这项在七十年代具有突破性的检测方法,在以后的应用中却逐渐沉寂了下来。截至八十年代初,超低速、大传动比的大型传动链的传动精度检测仍然是一个尚待解决的问题。针对 *těpánek* 系统的缺陷,本文著者在八十年代初,从机构学原理的突破入手,提出了一种新的方法并研制成功一种新的检测装置—QL系统,这种新的检测装置,不仅结构简单,而且几乎克服了 *těpánek* 系统的全部缺陷。

二、QL系统的组成和原理

图1(a)表示QL检测系统的原理图。这个系统是自七十年代以来出现的一种新方法。它由齿栅式高、低速角位移传感器、电轴式误差信息检测装置和误差数据处理与分析微计算机等三部分组成。图1(b)是QL装置的检测实况。以下分别对低速传感器、高速传感器、信息检测装置和整个检测系统的工作原理作一介绍。

1. 低速传感器

检测时安装在被测传动链慢端(例如滚齿机工作台上)的传感器称为低速传感器。它由大直径齿栅圆盘、小直径发讯齿轮(即小齿栅)、高精度主轴与轴承、同步电机、步进电机、拾讯测头、活动旋转臂和底座等构成,如图1(a)左侧所示。在大齿栅圆盘的外圆上,刻有上下两道精度要求不高、栅纹数略有差异(N_4 略大于 N_3)的齿栅;齿栅圆盘与发讯齿轮(即图1(a)中的小齿栅)均通过滚珠轴承与传感器的主轴同心连接,并在对运动中的传动链进行

检测时, 可通过底座上的蜗杆蜗轮传动作任意转速 ω_1 的步进电机安排使精度不高的齿栅刻线误差, 在运动状态下其误差比被测传动链误差数字还几倍至几百倍, 故可在检测过程中将齿栅自身的刻线误差滤除, 这相当于把一个精度原来不高的齿栅, 模拟成了一个分度精度很高的齿栅。这一用误差频率分离原理来提的传感器在线测量精度的相对测量方法, 是本系统的一个鲜明特点。在齿栅圆盘及发讯齿轮外圆, 分别装有固定不动的测头 H_3 和能与被测传动链慢端联动的活动测头 H_1 , 以及能与旋转臂联动的活动测头 H_2 。如齿栅圆盘和发讯齿轮在同步电机带动下作独立高速旋转时, 固定测头 H_3 与活动测头 H_1 、 H_2 , 便分别从各自对应的齿道上拾取信号。由于活动测头 H_1 实际上已保证和传动链慢端联动, 故被测传动链的传动误差便准确无误的反映在测头 H_2 的运动中并调制在它从齿栅拾取的信号里, 从而保证了被测传动误差的传递与检测。由于测头 H_3 固定不动, 故在检测时 H_3 和 H_1 形成差动, 其转速差恰为被测传动链慢端, 例如机床的工作台(转速 Ω_2)。显然测头 H_1 拾取的信号频率由两部分转速决定, 一部分取决于同步电机的转速 ω_1 , 一部分取决于传动链慢端的转速 Ω_2 。同样, 测头 H_2 的信号频率亦由两部分决定, 其中一部分仍然取决于同步电机的转速 ω_1 , 另一部分取决于步进电机的转速 ω_2 。检测信号的这种频率结构正是解决低速传动链测量的关键之一, 下文还将作进一步说明。

2. 高速传感器

低速传感器中步进电机的驱动信号, 由高速传感器中的参考齿栅信号 f_1 经电轴装置作频率变换后供给。由于本系统的两个检测信号均由低速传感器发出, 故高速传感器的结构非常简单, 主要由参考齿栅圆盘、蜗杆、蜗轮和外壳等组成。但是为了保证检测的正常进行, 测头 H_2 的信号频率, 不能是任意的, 因此驱动 H_2 旋转的步进电机转速 ω_2 亦不能是任意的, 它要受到低速传感器中各测头信号频率的制约, 为了满足这些制约条件, 高速传感器中齿栅的栅纹数 N_1 的选取, 与现在所有的检测系统都不相同, 它必须满足以下关系



图 1(b) QL系统检测实况

式

$$N_1 = \left(\frac{N_2}{N_3} \right) \cdot \frac{S}{M} \quad (1)$$

式中 S 是步进电机的步数, M 是电轴装置的总倍频系数。栅纹数 N_1 的选择方法, 是本系统新原理之一——电轴变换原理的基础。

以下同样还将作深入的说明。

3. 信息检测装置

信息检测装置由模拟信号检测电路、差频器、分频倍频器、鉴相器、定标器、移相器、误差分离滤波器, 电轴式电子挂轮和功能开关等组成。图 2、3 和 4 表示检测装置的逻辑框图。图 2 为低速传感器信号检测电路。它的功能是产生两路频率相等的鉴相检测信号 $(f_4 - f_3)$ 和 f_2 。图 3 是高速传感器信号检测电路, 它的信号频率 f_1 经电轴装置变换后用作驱动步进电机。图 4 是检测装置完整的原理框图, 对它的功能分述如下

1) 鉴相检测 如前所述, 被测传动误差是以调制信号的形式, 调制在测头的信号中。信号

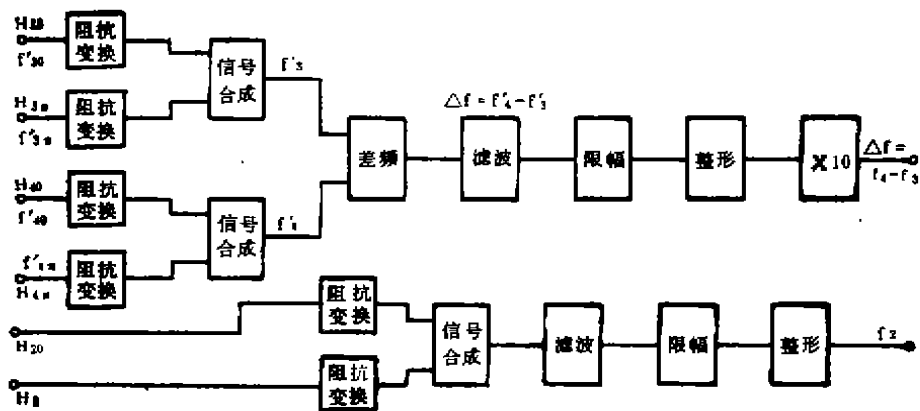


图 2 低速传感器信号检测电路

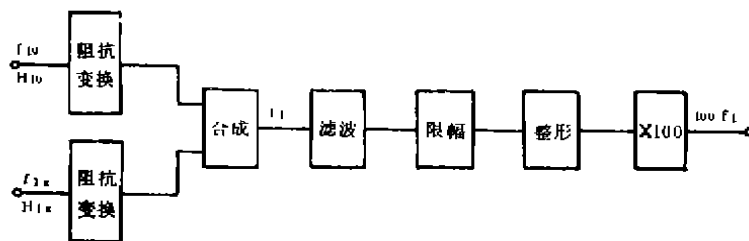


图 3 高速传感器检测原理框图

经整形后，其中的误差信号实际是起着改变信号零点时刻的作用。误差信号检测实际上就是检测信号零点的变化。从图 4 见，从低速传感器信号检测电路输出的两个同频率的信号 ($f_4 - f_3$) 和 f_2 ，经功能开关①后，进入各自的通道，经缓冲、分频和移相后再经功能开关②到达鉴相器进行鉴相。鉴相器输出是一个变宽度的矩形脉冲如图 5 所示，其脉冲宽度的变化与两个信号 ($f_4 - f_3$), f_2 的相位差成比例，显然检测到这个脉冲宽度的变化就检测到了传动链误差。

2) 传动比电轴变换 电轴是机电人员对话的一种术语，这里它又是一种装置。它的功能原理是：用装置输出信号频率的变化来代替传动轴转速的变化，因此称为电轴。利用这一原理来使检测系统适应被测传动比 i_d 的改变，从而使系统的检测与传动比无关。图 4 下方表示电轴的原理图，它由分、倍频器、分相器和步进电机驱动器以及低速传感器中的步进电机、旋转臂、测头 H_2 、发讯齿轮等组成。其工作原理为：将高速传感器信号 f_1 倍频，然后将倍频信号除以传动比 i_d 再将此信号经分相、功放后，便可驱动步进电机旋转，而此转速可在任何传动比 i_d 时均可满足测头 H_2 的信号频率 f_2 与差频信号频率 ($f_4 - f_3$) 相等，从而满足同频鉴相的要求。电轴式传动比变换装置又称为电子挂轮。电轴功能的实现，是本系统的一项重要突破。

3) 误差分离滤波 将 ($f_4 - f_3$) 与 f_2 鉴相输出的变宽度脉冲经超低频段的滤波器滤波后，可提取误差特征信息，特征信息经功能开关③、④控制滤波器使之可顺序输出运动、累积和周期三种典型的传动误差。

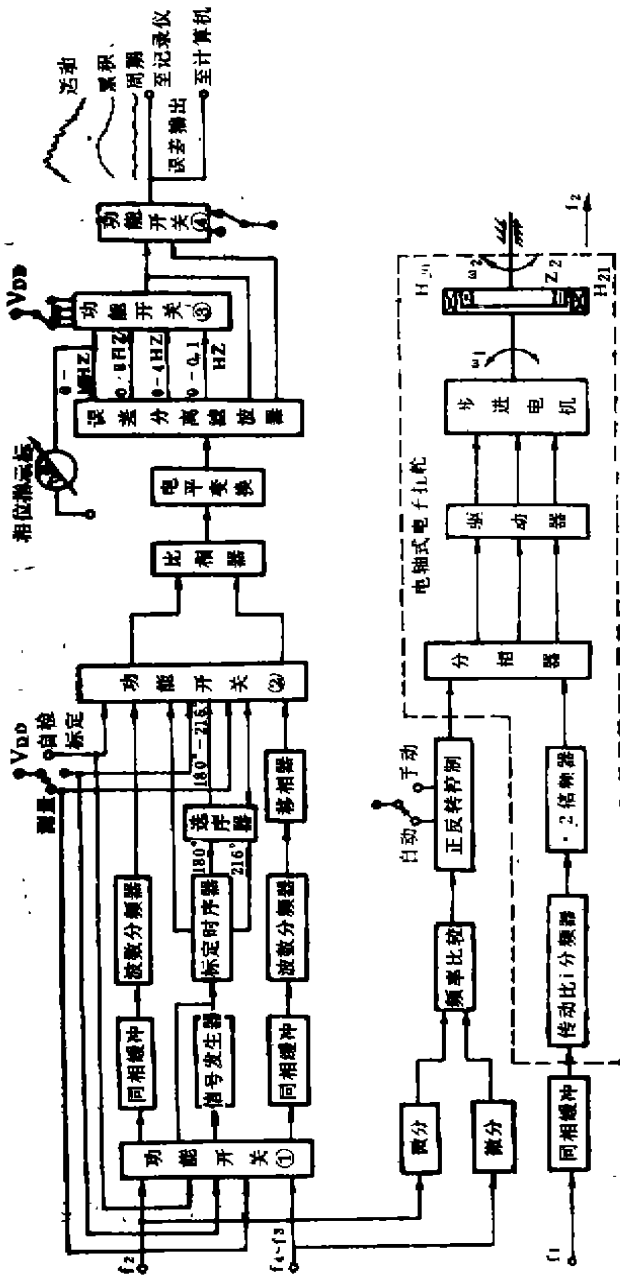


图4 检测装置原理框图



图5 鉴相波形

除上述功能外，装置还具有定标、自检、移相等功能。

4. 系统工作原理

将低、高速传感器、检测装置联成系统后使可对传动链进行动态精度检测。以下说明它的工作原理

1) 差频信号频率 ($f_4 - f_3$) 的计算与分析 与现有同类检测系统不同，QL系统的两个检测信号均从低速传感器输出。其中测头 H_3 和 H_4 的差频信号频率 ($f_4 - f_3$) (见图1(a)和图4) 为：

$$f_4 - f_3 = \underbrace{(N_4 - N_3)}_{\substack{\text{栅数差频} \\ \text{固定不变}}} \omega_2 \pm \underbrace{N_4}_{\substack{\text{转速差频} \\ \text{随 } \Omega_2 \text{ 而变}}} \Omega_2 \quad (2)$$

如前所述,式(2)所示的差频频率由两部分组成。第一项称为栅纹数差频,当同步电机转速 ω_2 确定后其值固定不变。第二项由两差动测头的转速差(即传动链慢端转速) Ω_2 决定,故称转速差频。“ \pm ”号的选择由齿栅圆盘相对于传动链的转向决定。由于同步电机的转速 ω_2 很高,无论栅纹数差 $(N_4 - N_3)$ 的数值(恒为正整数)如何小,栅纹数差频总比较高(一般为几十至几百HZ),这样无论 Ω_2 如何低,即使低到使转速差频接近于零,传感器总有一个可供正常检测的信号频率,这样便大大扩展了可测频域的下限值,解决了极低速、大型传动链传动精度的检测问题。

2)检测信号频率 f_2 的计算与分析 由步进电机驱动的活动测头 H_2 的检测信号频率为

$$f_2 = N_2 \omega_2 \pm N_2 \omega_1$$

选 $N_2 = N_4 - N_3$, 故

$$f_2 = (N_4 - N_3) \omega_2 \pm N_2 \omega_1 \quad (3)$$

欲使式(2)和(3)相等即 $f_2 = f_4 - f_3$, 须使传动链在任何传动比时, 均能满足 $N_4 \Omega_2 = N_2 \omega_1$ 。由于步进电机的驱动频率 $F = S \omega_1$, 而测头 H_1 的信号频率 $f_1 = N_1 \Omega_1$, 故 f_1 经电轴变换后得到的步进电机驱动频率为

$$S \omega_1 = \frac{M N_1}{i_d} \Omega_1 \quad (4)$$

式中 M 为电轴中的总倍频系数, i_d 为电轴中的分频系数(其大小等于被测传动比), Ω_1 为传动链快端转速。若将式(1)中的 N_1 代入式(4)并求出 ω_1 有

$$\omega = \frac{M N_1}{i_d S} \Omega_1 = \frac{M}{i_d S} \cdot \left(\frac{N_4}{N_2} \right) \cdot \frac{S}{M} \cdot i_d \Omega_2 = \left(\frac{N_4}{N_2} \right) \Omega_2 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)使有

$$\begin{aligned} f_2 &= (N_4 - N_2) \omega_2 \pm N_2 \left(\frac{N_4}{N_2} \right) \Omega_2 = (N_4 - N_3) \omega_2 \pm N_4 \Omega_2 \\ &= f_4 - f_3 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)说明:小齿栅与活动测头 H_2 在运动中巧妙的结合,亦能产生一个与差频频率一样的由两部分频率成份组成的信号;同时由于电轴变换的作用,又能使 f_2 在任何传动比时都能与 $(f_4 - f_3)$ 相等,使检测不受传动比改变的影响。

综上计算分析:QL系统由于引入栅纹数差频,使检测与传动链转速无关,即使转速接近于零,系统仍可正常工作;由于电轴的功能,使检测与传动比的改变无关,传动比实际可在很宽的范围(几十至几千)内选择。这样QL检测系统就完全解决了极低速、大传动比的大型传动链的传动精度检测问题。

三、数据处理系统

QL系统的数据处理系统,由A/D转换器、信号分析微机及其外设组成(见图1(a)右

侧)。软件系统包括角度值定标、误差信号的时域分析(含幅域分析)、频域分析、相关分析和自回归(AR)分析。图6表示它的流程简图。

1. 定标

从传动误差的时域图线上计算误差的特征值(如峰峰值, 最大、最小值, 均值等等)需要经过角度定标值的换算才能求得。定标值(或称标尺)的物理意义如图7所示。如用 θ_0 表示标尺的值, 则有

$$\theta_0 = \frac{\theta}{U} \quad (\text{角秒/伏}) \quad (7)$$

式中 θ 为已知角度值(单位为角秒), U 为与 θ 对应的电压值。

2. 时域分析

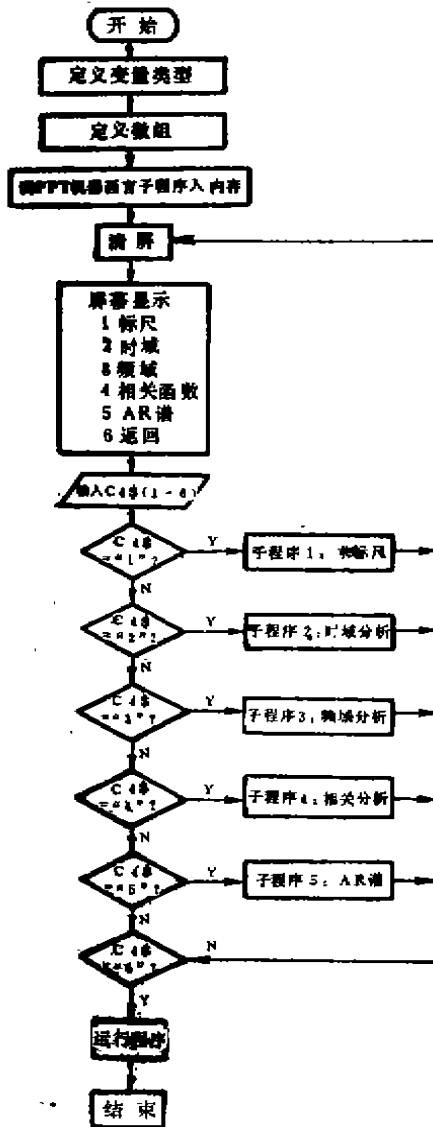


图6 数据处理软件流程

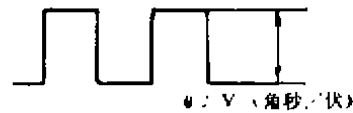


图7 角度标尺

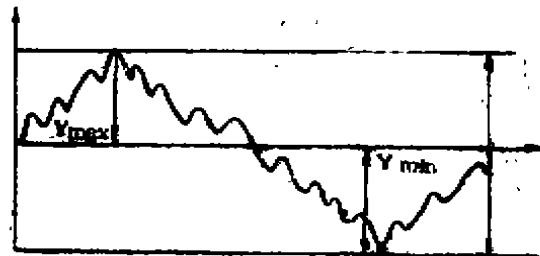


图8 运动误差峰-峰值

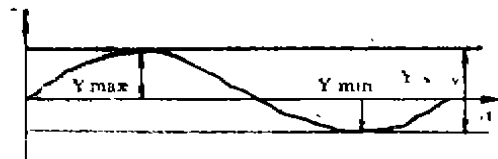


图9 累积误差峰-峰值

时域分析主要包括误差信号的统计分析, 以及幅值域中的直方图分析和求出误差的概率分布函数。

1) 运动误差 ΔT_i 的峰-峰值 由图8见传动链运动误差的峰-峰值由下式计算

$$\Delta T_i = Y_{v-i} = Y_{Max} - Y_{Min} \quad (8)$$

2) 累积误差 Δl_{g_i} 的峰-峰值 由图9见传动链累积误差峰-峰值由下式计算

$$\Delta l_{g_i} = Y_{v-v} = Y_{Max} - Y_{Min} \quad (9)$$

3) 周期误差 ΔT 的特征值 周期误差表示传动链的高频误差。图10表示周期误差图线。最大和最小值由各周中峰-峰值最大和最小的误差值表示。其余特征值计算如下

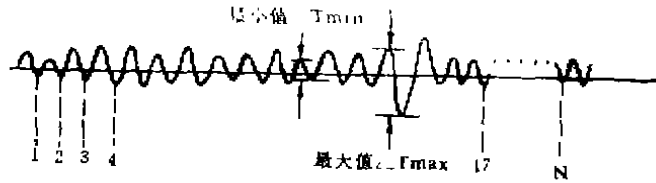


图10 周期误差

$$\text{均值} \quad Y_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i \quad (10)$$

$$\text{均方值} \quad Y_{ms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta T_i)^2 \quad (11)$$

$$\text{方差} \quad Y_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta T_i)^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i \right)^2 \quad (12)$$

4) 概率直方图 概率直方图(幅值计数)分析, 是研究某误差值落入某一区间的概率。其求法按以下步骤进行

第一、计算划分区间的介限值

$$Y_P(I) = (Y_{Max} - Y_{Min}) \times \frac{I}{N_x} + Y_{Min} \quad (13)$$

N_x 表示划分的区间数, I 表示区间号。

第二、计算误差幅值若在各个区间 $(Y_p(I), Y_p(I+1))$ 内的频数 N_i

第三、计算落入各区间误差幅值的概率

$$Y_{sq}(I) = \frac{N_i}{N} \quad (14)$$

5) 概率分布函数 概率分布函数表示误差瞬时值小于等于某一值的概率, 它是概率密度函数在区间 $(-\infty, y)$ 上的积分 $(-\infty < y < \infty)$ 。在计算机内它是通过计算级数的和而求得, 其表达式为

$$F(I) = \sum_{K=1}^{I-1} Y_{SQ}(K) \quad (15)$$

3. 频域分析

频域分析是通过计算机对误差信号进行快速富利叶变换(FFT)后, 进而求出信号的自功率谱、对数自谱、倒频谱和幅值谱的过程。各种频谱的计算如下

1) 自功率谱 $G_{yy}(I)$

$$G_{yy}(I) = \frac{1}{T} |Y(I)|^2 \quad (16)$$

式中 $Y(I)$ 是误差信号离散时间序列 $y(k)$ 的富氏变换, I 是频率序列的序号, $Y(I)$ 可分介为实部和虚部, 故自功率谱可按下式计算

$$G_{yy}(I) = TR^2(I) + TI^2(I) \quad (17)$$

式中 $TR(I)$ 、 $TI(I)$ 分别表示 FFT 的实部和虚部。

2) 对数自谱

$$\text{对数自谱} = \lg G_{yy}(I) \quad (18)$$

3) 倒频谱 G_y

$$G_y = F^{-1} \lg G_{yy}(I) \quad (19)$$

4) 幅值谱 A_y

$$A_y = \sqrt{G_{yy}(I)} \quad (20)$$

4. 相关分析

本系统的相关分析主要是求误差信号的自相关函数。自相关函数定义为

$$R_{yy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t-\tau)dt \quad (21)$$

其离散形式为

$$R_{yy}(\tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} x_i(t)x_i(t-\tau) \quad (22)$$

由维纳—辛钦定理知, 自相关函数与自功率谱是一对富氏变换对。因此对自谱求 $IFFT$ 便可求出自相关函数

$$R_{yy}(\tau) = F^{-1}[G_{yy}(I)] \quad (23)$$

自相关函数表示误差信号与其延时信号间的相似程度, 因此可通过自相关分析判定误差信号的性质。

5. 自回归(AR)分析

自回归分析是一种参数模型分析方法。它首先根据误差数据序列, 建立一个如下的数学模型。

$$y_i = \sum_{i=1}^m a_i y_{i-1} + \varepsilon_i \quad (24)$$

式中 a_i 为自回归参数, $\varepsilon_i \sim NID(0, 1)$, 为具有零均值, 方差为 1 的正态分布白噪声序列。为了求得误差信号自谱的估值, 可按以下三个步骤进行。

第一、参数估计: 根据误差观测值的时间序列, 估算出式(24)中的自回归参数 a_1, a_2, \dots, a_m 。

第二、定阶: 根据 Akaike 准则确定模型的阶数。

第三、谱估计: 当求得模型的自回归参数 a 和模型的阶数 m 后, 则可由下式求出功率谱的估值。

$$G_{yy}(f) = \frac{1}{\left| \left[1 + \sum_{i=1}^m a_i \exp(j2\pi if) \right] \right|^2} \quad (25)$$

图11、表 1 为一滚齿机分度传动链传动误差的时域分析、幅域分析、相关分析和标尺的分析处理结果。图12和表 2 为一故障诊断实例。它包括滚齿机传动系统图、链内传动件的转速档案表、幅值谱图和自回归谱图。利用传动件转速与频率的对应关系, 可在谱图对应的谱峰处, 查找到传动链内的故障部位, 并在对应的谱峰处打印出传动轴的代码, 也可在档案表下面, 依误差大小顺序打印出故障部位的代码利用本系统的频谱分析, 可以方便的实现传动

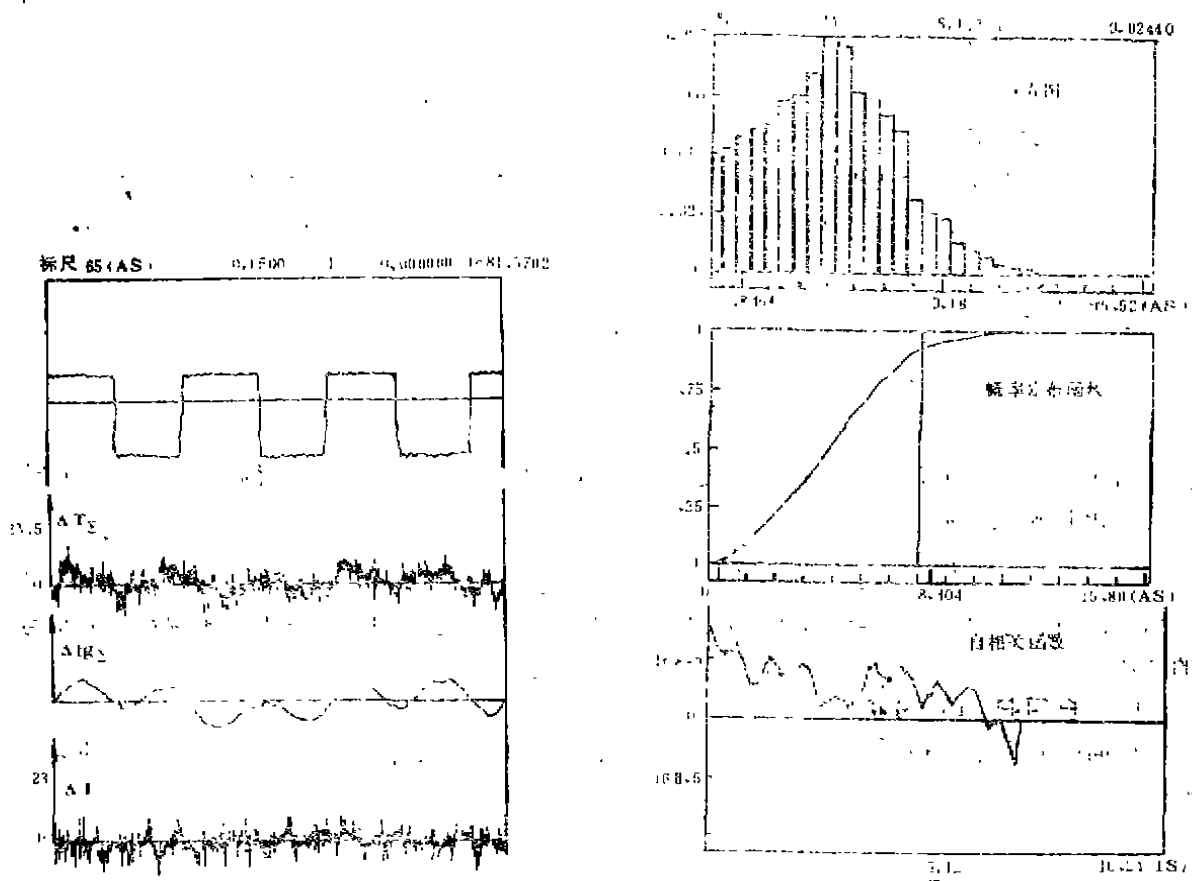


图11 时域、幅域、相关分析

链的在线诊断。

单位：角度·秒

表1 特征值表

峰峰值	最大值	最小值	均值	方差	均方值
30.1436	16.3914	-16.8082	9.4054	9.059	90.4580

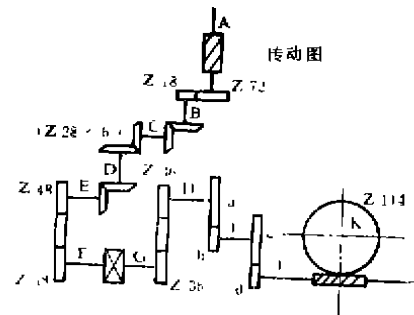
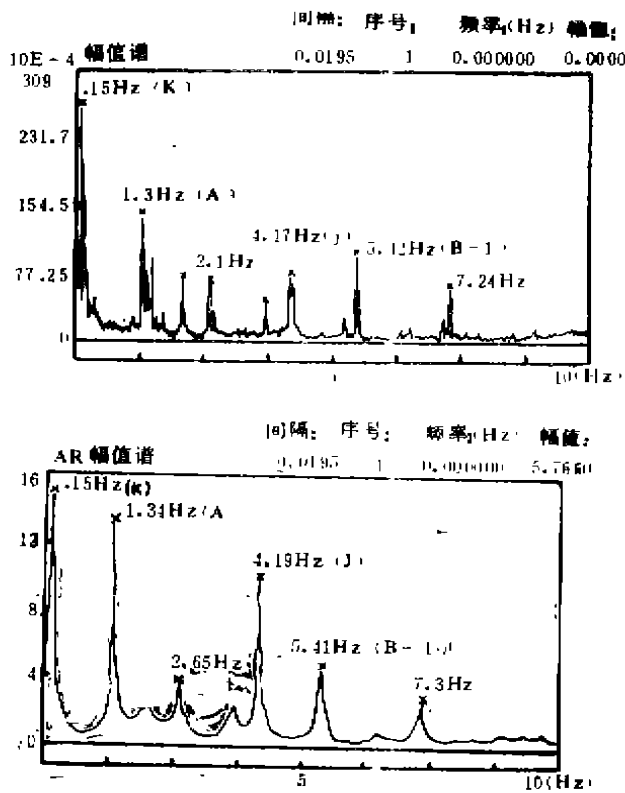


图12 传动链故障诊断

$$i_{挂} = a \cdot c / b \cdot d = 36 / 100$$

表2 转速档案

各传动轴(组) 的代码	A	B-I	J	K	
				1×K	12×K
各传动轴(组) 转速(转/秒)	1.300	5.200	4.420	0.013	0.159

据误差大小顺序排列的各传动轴代码：K, A, B-I, J

邓琪芳、刘英、何玮、刘远琛、郭小渝、曾国英参加了本文的工作。

参 考 文 献

- [1] K. tĕpánek, New methods and apparatus for checking the kinematic accuracy of gears and gear drives, proceedings of fourteenth inter. M.T.D.R.Cdnf. Sept. 1973.
- [2] 秦树人, tĕpánek测量系统及其最新方案, 全国高校机械测试研究会第二届年会论文, 1982.8.
- [3] 秦树人, 磁栅及其测量系统, 第六章, 重庆出版社, 1984.6.
- [4] Qin Shuren, The system for measuring the dynamic accuracy and data processing for gear hobbing machine drivetrain, proceeding of ICMMA Conf., Chongqing University, China, 1989.6.