

# 新型数字频率继电器

水电部南京自动化研究所 罗景忠

## 摘要:

本文论述数字频率继电器的基本原理,介绍水电部南京自动化研究所研制的新型数字频率继电器的测量方法和电路结构。介绍提高继电器动作可靠性所采取的技术措施及实现频率定值整定数字化的方法。通过误差分析,指出提高周期测量法频率继电器测量精度的基本手段。新型数字频率继电器具有测频精度高、可靠性高、温度稳定性好、功耗低、使用维护方便等特点,能满足现代电网发展的需要。

## 一、前言

现代电力系统逐步趋于大容量及复杂化,因而要求保护继电器具有高精度、快速和较高的可靠性。作为检测系统频率高低的基本元件——频率继电器,以前大量生产的有感应型和晶体管型模拟式继电器。由于受测量原理的局限,误差较大、可靠性差、定值容易受温度变化的影响,整定校验复杂,已不能满足电网发展的需要。

为适应新的发展,我所从1984年开始应用数字电路技术开展对低频减负荷装置的研究。在研制样机的过程中得到运行单位的大力支持,特别是1985年元月在南京汤山召开的全国电网安全自动装置工作会议上,来自各地的专家们提出了许多具体意见和建议。经过反复修改,最后研制出SZH—1系列数字频率继电器和SPJ<sub>2</sub>型低频自动减负荷装置。主要采用CMOS集成电路,具有精度高、可靠性高、温度稳定性好、功耗低、频率定值整定数字化、使用维护方便等特点。在经过现场大量试运行考验后,于1985年11月通过了水电部科技司组织的技术鉴定。

SZH—1继电器与SPJ<sub>2</sub>型装置的基本原理是一样的。本文将着重介绍SZH—1数字频率继电器。

## 二、工作原理

一个信号的频率可以通过统计在一定的时间间隔内信号的周期数来测量。这种方法是直接的。但它的精度很差,特别是在测量低频时。另一种方法是周期测量法。通过测量信号的周期时间,根据频率与周期的倒数关系计算出信号的频率。这种方法具有速度快、容易实现高精度的特点,特别适用于只需要检测电网频率高低的频率继电器。

周期测量法的基本原理是在一个输入信号周期的期间里,测量来自高频时钟的脉冲数,那么,这个信号的频率可以通过时钟脉冲频率除以在一个信号周期的脉冲数 $N$ 获得,即:

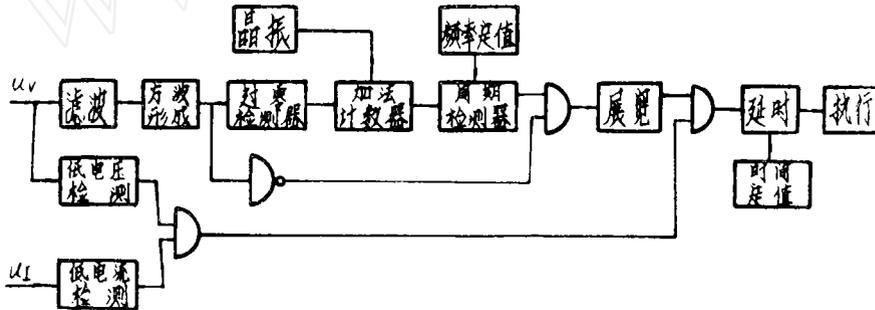
$$f = \frac{f_c}{N}$$

式中 $f_c$ 为时钟频率， $N$ 为在一个周期里的高频脉冲的数值。这种方法用于频率继电器时，只要预先整定好一个数 $N_z$ ，并且让：

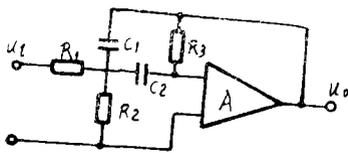
$$N_z = \frac{f_c}{f_z} \quad (1)$$

式中 $f_z$ 为频率整定值。然后，在每一个信号周期里将所测出的高频脉冲数与之比较，当 $N \geq N_z$ 时，表示系统频率低于或等于整定值；当 $N < N_z$ 时，表示系统频率高于整定值。

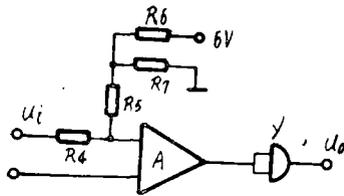
图一是低频继电器频率测量原理框图。系统母线电压经隔离变换、滤波后，进入过零检测器。过零检测器对每个交流电压波的正向过零点产生一个正脉冲，此脉冲确定输入电压波形的周期并用来触发四位十进制加法计数器，使计数器在波形的周期时间内对时钟脉冲进行累加计数。时钟脉冲是由一稳定的200kHz石英晶体振荡器产生的。下一个过零点脉冲发出周期终了信号，而周期检测器电路检查累积的脉冲数。然后把计数器清零，为下一周期作准备，并开始新的计数。频率越低，周期越长，每一周期在四位计数器中积累的时钟脉冲数越大。如果周期检测器电路检测到的一个累计数等于或大于频率的整定值，就输出一个或几个正脉冲，表明检测到一个低频率周波。经展宽和延时电路起动执行回路，图中反相器的设置是为了在无信号输入时闭锁输出、在有信号输入时必须信号的在下半周期才开放周期检测器的输出。从而增加了可靠性。



图一 低频继电器测量原理框图



图二 滤波器



图三 方波形成器

以下分别叙述框图中各环节原理

### 1. 滤波器

选用多路反馈二阶有源带通滤波电路，如图二所示。滤波器的品质因数 $Q = 1$ 。输入电压信号经滤波器滤除干扰信号和谐波分量。

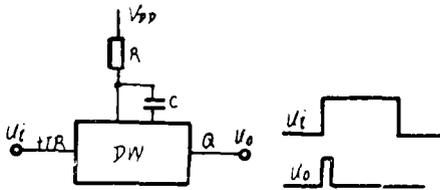
### 2. 方波形成器

如图三所示。由运算放大器构成。由于运放器的开环增益足够大( $\geq 10^5$ )，可将输入正弦波变成比较好的方波。为了进一步提高方波质量，加了一级“与门” $y_1$ ，利用CMOS电路良好的转移特

性,使方波的前沿很陡直。 $R_6$ 、 $R_7$ 的加入是为了调整运放器的正常工作点,使在无信号输入时,运放器输出高电平。

### 3. 过零检测器

采用CMOS集成电路CD4098双单稳触发器,图四仅使用了集成块的二分之一电路。

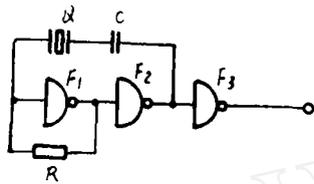


图四 单稳触发器

单稳触发器的特点是可采用上升沿触发,也可采用下降沿触发。本图采用上升沿触发。正常情况下,单稳输出为“0”态,当输入方波的上升沿到来时,单稳触发器将其展宽成一正脉冲,脉冲宽度与RC值有关。

### 4. 晶振电路

由石英晶体、CMOS反相器、频率微调电容C及反馈电阻R构成。图五所示。



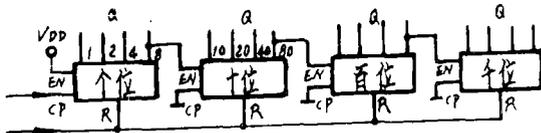
图五 晶振电路

由于反相器良好的转移特性,经石英晶体的反馈量被放大。晶体的固有振荡频率十分稳定,振荡电路的输出也具有频率稳定的特点。反相器 $F_3$ 用来整形,从而得到频率稳定的矩形标准时钟脉冲。

### 5. 加法计数器

选用MC14518双二—十进制同步加法计数器。计数器的输出是一种有权码,也称8421码或BCD码,由四个二进制数表示一位十进制数。

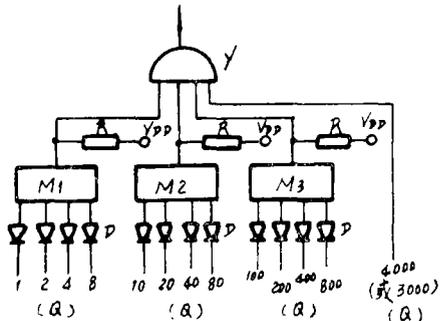
本继电器需要获得四位十进制数,因此使用了两片集成块。MC14518的特点是可



图六 计数电路

用时钟脉冲的上升沿触发,也可用下降沿触发。当需要用上升沿触发时,脉冲应从CP端输入,而允许端EN需接高电平。如果采用下降沿触发,脉冲应由EN端输入,而CP端需接低电平。对个位计数器,我们采用上升

沿触发方式,而对高位计数器则采用下降沿触发,从而达到逢十进一的目的。计数电路如图六所示。



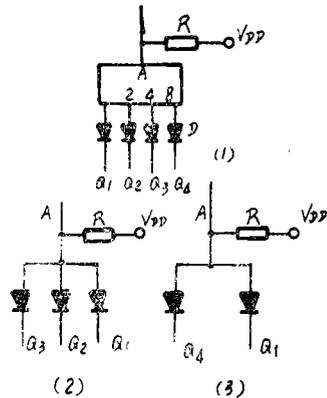
图七 周期检测电路

利用计数器的清零端R加正脉冲时,各输出端全为“0”态的特点,我们将四位计数器的R端与过零检测器的输出相接,从而实现每一输入信号周期开始时使计数器清“0”一次,然后进行加法计数。

### 6. 周期检测器

由拨码开关、二极管、提拉电阻和CMOS“与门”构成,见图七。

二一十进制拨码开关有四个输入端和一个共同端(A)。它具有把二进制数转换为十进制数的功能。四个输入端通过四只二极管和计数器的输出端相接,共同端串一只电阻后接高电平,如图八所示。当拨码开关所设定的数和计数器的状态相同时,A端输出高电平。例如,拨码开关设定的数为“7”,计数器的状态为 $Q_4 = 0, Q_3 = Q_2 = Q_1 = 1$ 时,A端为高电平;又如,当拨码开关设定的数为“9”,计数器的状态为“1001”时,A端输出为高电平。由此可见,拨码开关电路可实现有选择的二一十进制数字转换。



图八 拨码开关电路

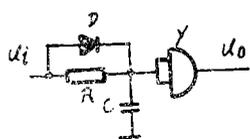
后面将进一步介绍,本继电器的千位整定数,作为低频继电器使用时恒为“4”,作为高频继电器用时恒为“3”。因此,只要用三个拨码开关选择低三位整定数即可。这样,当四位十进制计数器的状态(累计的脉冲数)与预先设定的数一致时,“与门”Y输出高电平。分析计数器电路可见,当累计的脉冲数超出设定的数,计数器状态也可能使“与门”有输出(例如整定数为4081,累计脉冲数为4083时),这是我们所希望的。然而,计数器所累计的脉冲数小于所设定的数时,“与门”是绝无输出的。从而达到检测输入信号周期的目的,并实现定值整定数字化的目的。

### 7. 展宽电路

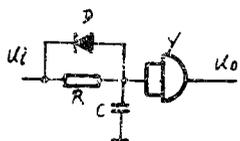
展宽电路有两种,一种采用与图四相同的电路。因为它的输出与输入脉冲宽度无关,若第一个输出脉冲未完了,第二个输入脉冲到达,则第二个输入脉冲不能使单稳触发器再次触发,如图九所示。选择适当的RC之值,就可在周期检测器输出的第一个正脉冲的上升沿到达时,将其展宽成所需要的宽度。



图九 展宽波形图



图十 展宽回路



图十一 延时回路

“与门”Y输出高电平。分析计数器电路可见,当累计的脉冲数超出设定的数,计数器状态也可能使“与门”有输出(例如整定数为4081,累计脉冲数为4083时),这是我们所希望的。然而,计数器所累计的脉冲数小于所设定的数时,“与门”是绝无输出的。从而达到检测输入信号周期的目的,并实现定值整定数字化的目的。

另一种展宽电路如图十所示。由于CMOS“与门”输入阻抗大,二极管正向电阻很小,因此,当输入正脉冲到达时,输出立即变为高电平;当输入端从高电平变为低电平时,电容C通过电阻放电,直到“与门”的输入电平 $U_c$ 降到其翻转电平 $U_z$ 时,输出变为低电平。因此,它实际上是个瞬时动作延时返回电路。

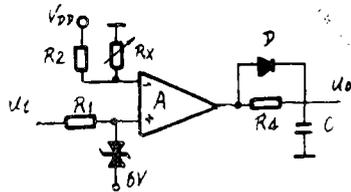
### 8. 延时电路

如图十一所示。输入正脉冲通过电阻向电容C充电,目标值为 $U_{DD}$ 。当电容电位 $U_c$ 达到“与门”的翻转电平 $U_z$ 时,“与门”输出高电平;而当输入电位由高电平变为低电平时,电容通过二极管立即放电,“与门”输出变为低电平。因而此电路属延时动作瞬时复归电路,延时时间由R、C值

决定。

### 9. 低电压、低电流检测。

继电器设有低电压和低电流闭锁电路。当母线电压低于60%时，闭锁继电器输出。低电流闭锁信号来自线路CT，经变换后引入低电流检测电路，其定值由用户提供，可任意整定。

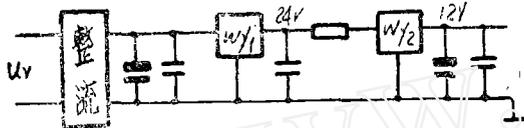


图十二 闭锁回路

低电压、低电流检测电路如图十二所示。输入电压信号接运算放大器的正输入端，负输入端整定门槛电压。调整电阻 $R_x$ 使正常情况下有输出，当输入电压（或电流）低于整定值时无输出。

### 10. 电源

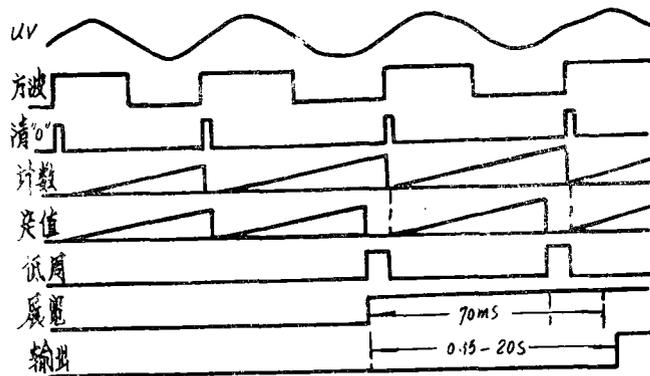
如图十三所示。由于主要使用CMOS集成电路，功耗很小。因此，直接从系统母线PT取工作电源不会给PT带来太大负担。选用集成三端稳压器取得24伏和12伏稳压电源。其中24伏用于出口中间继电器启动线圈工作电源，12伏为集成元件电路工作电源。



图十三 电源

电源电路具有简单、经济和维护方便等特点。SZH-1系列继电器正常功耗小于3伏安。

低频继电器的工作波形如图十四所示。通过波形图可清楚了解继电器的工作过程。



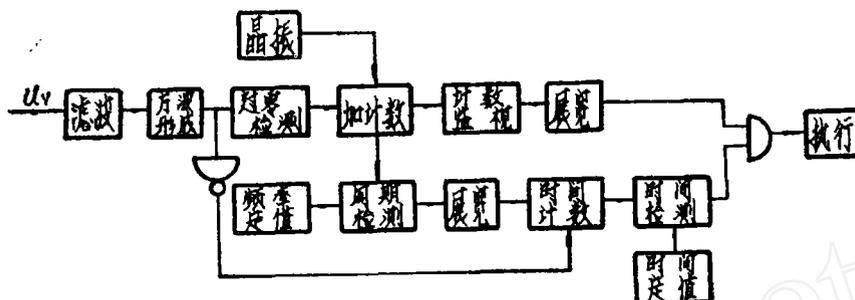
图十四 低频继电器工作波形图

### 高频率继电器（注）

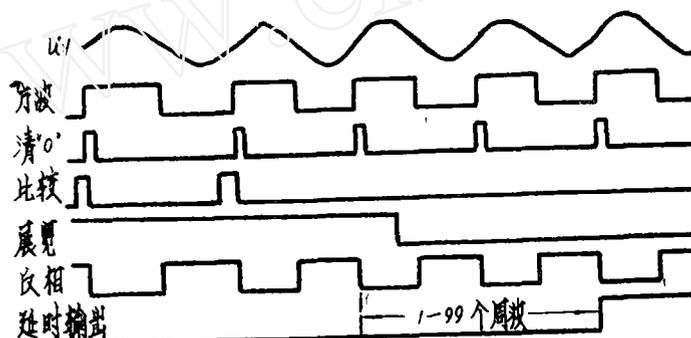
高频率继电器测量原理如图十五所示。在输入信号的周期时间内，当加法计数器所累积的时钟脉冲数等于或大于整定值时，周期检测器输出的正脉冲经展宽后对时间加法计数器清零，这样，时间检测器无输出。如果加法计数器所累积的脉冲数小于整定值时，周期检测器无输出，从而开放时间计数电路，时间计数器开始对输入电压方波进行累加计数。当所计方波数达到整定值时，时间检测器输出高电平，并保持不变，直到周期检测器连续检测到两个低频信号为止。时间整定采用拨码开关来实现，直接拨出所需延时

周波数。计数监视电路监视加法计数器的工作，当晶振电路停振或输入信号为零时，闭锁输出电路。

图十六为高频率继电器的工作波形。



图十五 高频率继电器测量原理框图

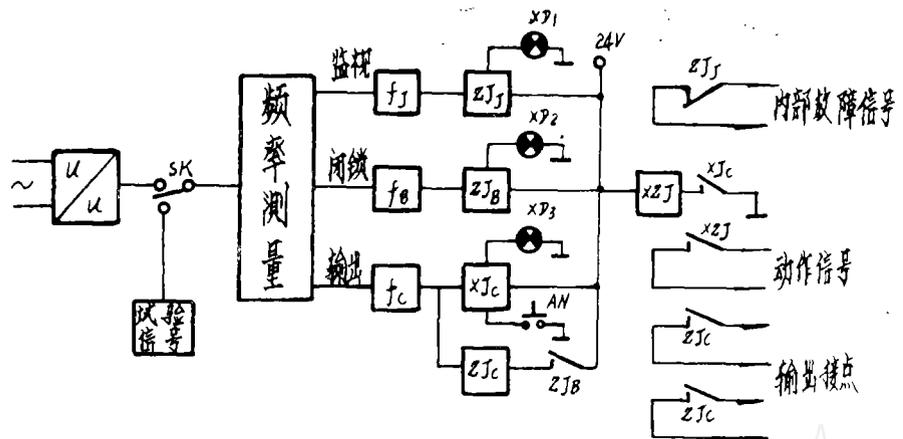


图十六 高频率继电器工作波形图

### 三、整组结构

继电器设正常运行监视级、频率下降（升高）闭锁级和输出级。如图十七所示。低频继电器的监视级频率已固定整定为51Hz（高频继电器整定为49.5Hz），正常运行频率下，监视信号灯常亮。当继电器内部故障或电源消失时，监视级返回，其输出中间继电器的动断触点可用于发出报警信号。闭锁级频率整定为49.5Hz（高频继电器为50.3Hz），当电网频率下降至49.5Hz时，闭锁级起动，通过继电器的动合触点接通输出级出口中间继电器的正电源。当频率继续下降到输出级的整定频率值时，输出级经延时后输出。监视、闭锁级的设置，是为了防止继电器的拒动和误动，增加可靠性。

继电器内设试验信号。低频继电器的试验信号频率为42Hz（高频继电器为55Hz），面板上的拨动开关SK置于试验位置时，试验信号从输入端接入，继电器各级动作一遍，面板上的监视、闭锁及输出信号灯相继点亮，表示继电器正常。



图十七 继电器逻辑原理图

当输出级动作后，输出信号灯由磁保持继电器保持，便于运行人员确认。电网频率恢复正常后，通过按钮手动复归。

#### 四、使用说明

##### 1. 频率定值整定

继电器的时钟频率  $f_c = 200\text{kHz}$ ，根据公式 (1)，我们有整定公式

$$N_z = \frac{2}{f_z} \times 10^6 \quad (2)$$

上式已刻在继电器的面板上。

计算表明，当  $40\text{Hz} < f \leq 50\text{Hz}$  时，有  $4000 \leq N_z < 5000$ ；当  $50\text{Hz} < f_z \leq 60\text{Hz}$  时，有  $3000 \leq N_z < 4000$ 。因此，选用四位二一十进制加法计数器即可。既然在低频继电器的使用范围内，千位整定数恒为“4”，高频继电器千位整定数恒为“3”，因此，在印制板上，我们已将千位整定数作了固定连接，只选用三位二一十进制拨码开关整定定值的后三位数。拨码开关固定在继电器的面板上，整定十分方便。例如，低频继电器整定频率  $f_z = 49\text{Hz}$ ，根据公式 (2) 算出  $N_z = 4081$ ，只要将三个拨码开关顺序拨出 081 即可。又如，高频继电器的整定频率  $f_z = 51\text{Hz}$ ，算出结果  $N_z = 3921$ ，把三个拨码开关顺序拨出 921，整定即告完成。

##### 2. 延时整定

低频继电器出厂前通常整定好三档延时：0.15秒、0.5秒、20秒。采用微动开关进行选择。用户也可在定货时向厂方提出任意时间定值。

高频继电器的延时整定采用两位二一十进制拨码开关直接拨出。拨码开关设在面板上，其延时单位用周波数表示。可连续整定 1—99 个周波。

3. 当需要用内部试验信号自检继电器时，必须首先断开低周屏上继电器的出口压板，以免误切负荷。

4. 出口中间继电器触点容量为  $\pm 220\text{V}$ ，30W。

5. 不要带电拔插插件。

## 6. 型号介绍

SZH—1 系列继电器分为SZH—1 A、SZH—1 B、SZH—1 C和SZH—1 D四种型号。每台继电器提供一轮频率输出级。

SZH—1 A和SZH—1 B是为了现场直接更换老式低周继电器而设计的。其中SZH—1 A用于替换原感应型GDZ—1型继电器，SZH—1 B用于替换原晶体管型BDZ—1、BDZ—2型继电器。现场更换时，可不改变原有低周屏的配线，只要更换机芯就可以了。可仍然利用原有继电器外壳。

SZH—1 C是具有嵌入式新结构的低频继电器。

SZH—1 D是反映电网频率升高的高频继电器，其结构与C型相同。

SP<sub>2</sub>型低频自动减负荷装置具有3—5轮频率输出级。用于需要多轮切负荷的大中型变电所。

## 五、误差分析

继电器采用周期测量法测量电网频率，显然有

$$T = N\tau_c \quad (3)$$

式中T是信号的一个周期， $\tau_c$ 是时钟脉冲周期， $\tau_c = \frac{1}{f_c}$ 。N是在一个信号周期时间内所累积的时钟脉冲数。

对上式取对数并微分，我们得到测量周期时的相对误差表示式

$$\frac{dT}{T} = \frac{dN}{N} = \frac{d\tau_c}{\tau_c}$$

考虑到最大误差情况，则有

$$\left(\frac{dT}{T}\right)_{max} = \pm \left( \left| \frac{dN}{N} \right| + \left| \frac{d\tau_c}{\tau_c} \right| \right) \quad (4)$$

式中 $\frac{dN}{N}$ 为量化误差， $\frac{d\tau_c}{\tau_c}$ 为标准频率误差。

### 1. 量化误差

由于过零检测器的输出与计数脉冲之间的相位关系是随机的，而计数值N只能是整数，结果便产生因量化单位有限所引起的误差。显然，最大量化误差 $dN = \pm 1$ ，又因

$N = \frac{T}{\tau_c}$ ，故有

$$\frac{dz}{N} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{\tau_c}{T} = \pm \frac{f}{f_c}$$

由上式可见，提高晶振频率并且将输入信号周期加以倍乘可以提高测量精度。本继电器采用较为简单的每周期测量一次的办法，且取 $f_c = 200\text{kHz}$ 。这样，在频率为50Hz情况下，由此而引起的相对误差为：

$$\left| \frac{dN}{N} \right| = \frac{f}{f_c} = 0.025\%$$

## 2. 标准频率误差

标准频率误差包括振荡频率的稳定度和准确度。选用高稳定度的晶体振荡器并采用高精度的频率计来校准,可减少标准频率的误差。当用七位数字频率计校验时,准确度可控制在 $\pm 1 \times 10^{-7}$ ;按厂家的规定,在环境温度为 $-40 \sim +70^\circ\text{C}$ 范围内,JD<sub>5</sub>型石英晶体振荡频率的稳定度达 $1.5 \times 10^{-4}$ 。这样,标准频率误差 $\frac{d\tau_c}{\tau_c} \doteq 0.003\%$ 。因此,继电器的最大相对误差为

$$\left( \frac{dT}{T} \right)_{\max} \doteq \pm 0.028\%$$

在50Hz情况下,最大绝对误差为 $\pm 0.014\text{Hz}$ 。随被测频率的下降,误差将减小。而随被测频率的升高,误差将增加。在54Hz情况下,测量误差为 $\pm 0.015\text{Hz}$ 。

此外,由于继电器设置了一系列抗干扰措施,并且周期检测器的输出设置了一定的返回延时( $\leq 70\text{ms}$ ),大量实测结果表明,测量误差均不超过上述估算值。

## 六、小结

1. 周期测量法数字频率继电器电路简单,便于实现多功能,容易获得高精度。
2. 采用CMOS集成元件,抗干扰能力强、温度稳定性好、功耗低。
3. SZH—1系列数字频率继电器和SPJz型低频自动减负荷装置频率综合测量误差小于 $\pm 0.015\text{Hz}$ ;返回系数接近100%;最大返回时间小于70毫秒;使用环境温度范围: $-20 \sim +40^\circ\text{C}$ 。由于设置监视、闭锁级等技术措施,可靠性高。采用二进制拨码开关整定频率定值,使定值整定数字化。继电器和装置使用维护简单、方便,有利于推广使用。

## 参考文献

1. 郑家祥、傅崇伦,“电子测量基础” 国防工业出版社 1981。
2. T.S MADHAVARAO, “Power system protection static relays” 1979。