

采用单板机控制的镇相环直流电 动机的可逆运行系统

蔡 新 康

(精密机械工程系)

摘 要

本文叙述了使用小教授单板机和锁相回路来控制直流电动机的可逆运行。这种数字系统在性能、造价、灵活性、可靠性和功率需求方面提供了综合的优点。这种数字型的直流电动机控制与常规的模拟伺服机构相比有一定的优点，之一是能获得很高的速度精度，它比0.1%要小，有可能达到0.002%。在本文中详细地介绍了硬件线路和控制程序的设计方法，最后提出了速度控制系统的线性化模型。

一、概 述

在半导体技术中，由于大规模集成电路快速发展的结果，已能制造出体积很小，速度很快，价格很便宜的单片微处理器〔例如 Intel 公司在1977年所生产的8085，它是CPU(8080A)，时标发生器(8224)与系统控制器(8228)三者的总和〕，具有控制功能与计算功能，如果再与半导体存储器、输入输出接口装置、控制面板及电源等相互配合，即可组成微型计算机。

所谓微处理机是用一个或者几个大规模集成电路与工业装置相配合，其具有较宽的调速范围，良好的速度分辨能力，较高的调速精度，与严格的调速过程的重复性。通过硬件与软件的配合，可以很灵活地实现对各种类型的直传动系统的数字控制，如果再能配备故障诊断与处理过程，则必能为大功率的可控硅传动系统的应用开辟广阔的前途。

本文1986年8月15日收到。

二、总体结构图 1 的说明

1. 在本系统中由脉宽调制器、加法器、减法器、小教授单板机、脉冲分配器、可控硅桥路、直流电动机与 SZGB-1 光电转速传感器等组成一个复合的压控振荡器 (VCO)，VCO 的输出频率作为反馈信号 f_m ，小教授单板机中 CTC 的 0 通道作定时器工作，CTC 初始化时取系数为 256，时间常数为 1—58，这样其 ZC/T0 端（即回零/定时到）输出的脉冲为 6975 脉冲/秒—120 脉冲/秒，如果 SZGB-1 采用 300 脉冲/转，相当于 1395 转/分—24 转/分。达到预定的调速范围为 58 : 1，取 CTC 0 通道的输出脉冲作为给定的基准信号 f_R ，取基准信号与反

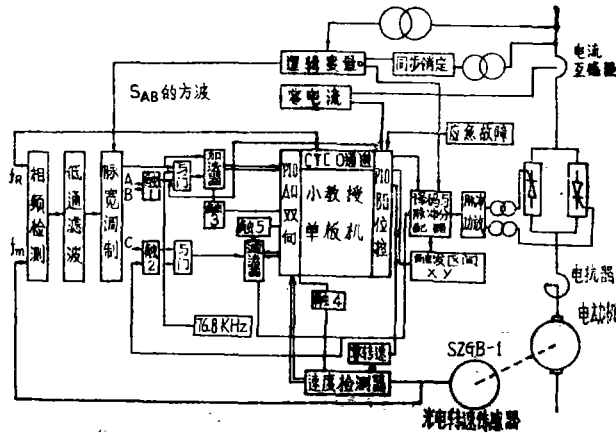


图 1

馈信号在相频检测器内作比较，以产生表示相位差的误差信号，此信号经低通滤波器过滤，提供正比于相位差电压 U_e ，此电压用来改变 VCO 的频率，以达减少相位差的目的。当 VCO 的频率正确地等于输入的基准频率时，使相位差近乎为零，达到锁相的目的，此时低通滤波器的输出电压 U_e 保持不变。由于锁相系统频率锁住，故其静态调速与稳速的精度很高，预计可达十万分之几。

2. 相频检测器 (图 2)：

采用上海元件五厂的 J691 (即 5G4046) 锁相环来构成相频检测器，当 $f_R > f_m$ 时，三态输出的 P 沟道管导通，输出高电位“1”；当 $f_R < f_m$ 时，三态输出的 N 沟道管导通，输出低电位“0”。

当 $f_R = f_m$ 时，如 f_R 相位超前则 P 沟道管导通的时间等于两者的相位差，如 f_m 超前，则 n 沟道管导通的时间等于两者的相位差。

3. 低通滤波器 (图 3)：

采用 5G24 作为有源滤波器，实质上是一个比例积分器，其作用是积分相频检测器的输出，把相位误差变为直流电压输出。

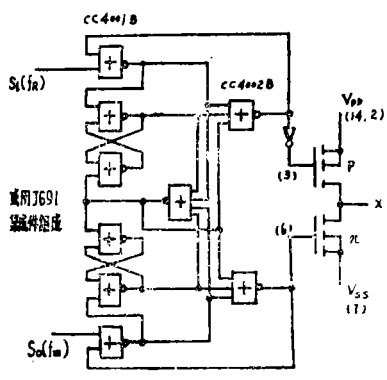


图 2

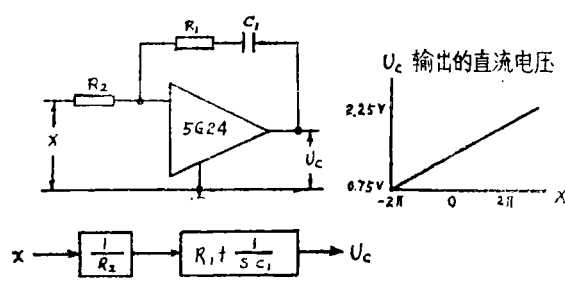


图 3

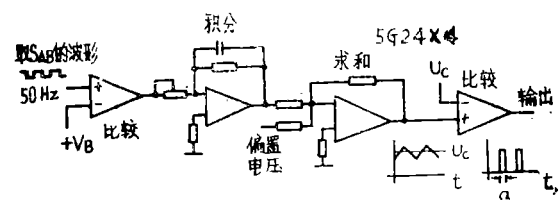


图 4

4. 脉宽调制器 (图 4) :

采用 4 个 5G24 运算放大器来构成, 从逻辑变量中取 $S_{AB}50\text{Hz}$ 的方波, 作为比较器的输入, 通过 $+V_B$ 的调整, 使比较器输出为一正负波动的方波, 然后通过积分器变成三角波, 再通过求和器, 使用偏置电压将三角波提高到一定的电位, 在最后一级的比较器中将低通滤波器输出的直流电压 U_c 与三角波作比较, 不同的 U_c 其输出的脉冲宽是不等的. U_c 的最大值可由 $\alpha_{\min}=30^\circ$ 来决定, U_c 的最小值可由 $\beta_{\min}=30^\circ$ 来决定. 从理论上来说, 脉宽调制器的输出方波的宽度最大可达 S_{AB} 的一个周期 (即 360°), 最小为 0° . 实际上受 α_{\min} 和 β_{\min} 的限制. 其脉宽是控制在 $300^\circ\text{--}60^\circ$ 之间变化.

5. 加法器与减法器 (图 1) :

从模拟量的控制角度来理解触发脉冲应在三角波的右半坡与 U_c 的交点处产生, 从数字量的控制角度来理解可在脉宽 a 内用加法器来计算, 而所计数的一半相当于触发脉冲移相角 α 所在的位置.

由于三相全控桥中六个可控硅每隔 60° 要进行一次换流, 而触发脉冲的移相角 α 可从 30° 度到 150° , 故设 XY 触发区间鉴别如表 1 所示.

表 1

$X, Y = 0.0$	$X, Y = 0.1$	$X, Y = 1.0$
$30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$	$60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$	$120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$
$30^\circ \leq \alpha' < 60^\circ$	$0^\circ \leq \alpha' < 60^\circ$	$0^\circ \leq \alpha' < 30^\circ$

将移相角 α 分成三段,以便在可控硅还未换流的范围内,来确定触发脉冲与主回路可控硅间的同步配合关系,而减法器中的数就是与触发区间的 α' 角相对应的。

设 $\alpha' = 60^\circ$ 时,减法器中恰好为 $2^8 = 256$ 个脉冲数,这样加法器与减法器所用信号源的频率 $= 50 \times 2 \times 256 \times 3 = 76.8 \times 10^3 \text{Hz}$ 。

加法器由三块 C184 (即 5G854) 可预置四位二进制可逆计数器构成, (实际上只用 10 位), 利用 PIO 的 A 口 (方式 2, 双向操作, 其单元地址为 80H), 依靠程序及触发器 3, 分二次将加法器的数输入。

在计满数时应发出中断信号 (采用中断方式 2), 同时脉宽调制器输出方波的下降沿通过微分电路产生脉冲至 A 点, 使触发器 1 由原来的 “0” 态变为 “1” 态, 将计数与门封锁, 中断响应分二次将数取走后, 由清零信号将加法器清零, 同时送至 B 点, 使触发器 1 反转成 “0” 态, 为下一个脉宽到来时作好加法器的计数准备。

加法器的数通过 PIOA 口输入时, 右移一位 (即向低位移动一位), 以达到除 2 的目的, 数输入单板机的变址寄存器 IX 然后再按 XY 触发区间鉴别的子程序, 将余数作为初始常数输至减法器, 同时将 XY 的信息通过 PIO 的 B 口 (位控方式) 输至触发区间鉴别器。

减法器其内存放的是经 XY 触发区间程序鉴别后的余数, 即对应

于 α' 的脉冲数, C 点是 $S_{AB}, S_{AC}, S_{BC}, S_{BA}, S_{CA}, S_{CB}$, 六个波的下降沿通过微分电路产生脉冲, 再通过或门与触发器 2 去打开减数与门, 用 76.8kHz 的信号源进行减数, 减到零时一方面通过译码与脉冲分配器使输出脉冲经功放去触发对应的可控硅, 另一方面产生脉冲使触发器 2 反转去关闭减数与门, 直到下一循环开始。

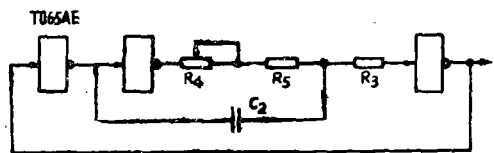


图 6

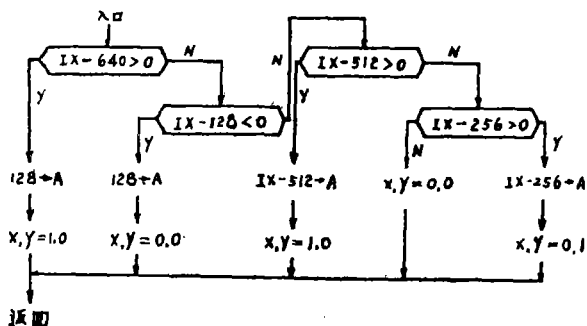


图 5

6. 信号源 (图 6):

由 T065AE 或 C035 (即 5G802) 3 输入端的三与非门与阻容参数相搭配构成振荡器, 以获得 76.8kHz 的信号源。

7. 逻辑变量发生器与脉冲分配器 (图 7):

三相经二极管 D_1-D_6 桥式整流后的波形

经鉴幅器 JF (其由反相器和与非门) 组成, 找到与自然换流点相应的脉冲列, 然后再经环形分配器变换成 $S_{AB}, S_{AC}, S_{BC}, S_{BA}, S_{CA}, S_{CB}$ 六个方波 (彼此相隔 60° 相位角, 且频率都是 50 周), 其反映 6 个可控硅要每隔 60° 进行一次换流。

8. 脉冲分配的译码器表 (图 5):

电角度 60° 对应于 256 个脉冲数, 30° 对应于 128 个脉冲数, 120° 对应于 512 个脉冲数, 150° 对应于 640 个脉冲数。

当 $30^{\circ} \leq \alpha < 60^{\circ}$, 即 $30^{\circ} \leq \alpha' < 60^{\circ}$ 时

$128 \leq IX < 256$
 $128 \leq \text{被减数} < 256$
 $XY = 0, 0$

当 $60^{\circ} \leq \alpha < 120^{\circ}$, 即 $0^{\circ} \leq \alpha' < 60^{\circ}$ 时

$256 \leq IX < 512$
 $0 \leq \text{被减数} < 256$
 $XY = 0, 1$

当 $120^{\circ} \leq \alpha < 150^{\circ}$ 即 $0^{\circ} \leq \alpha' < 30^{\circ}$ 时,

$512 \leq IX < 640$
 $0 \leq \text{被减数} < 128$
 $XY = 1, 0$

其脉冲分配译码表如表 2 所示。由译码表可得图 8 所示具体电路图。

表 2

$\{s_i j_j\}$						$X, Y = 0, 0$	$X, Y = 0, 1$	$X, Y = 1, 0$
S_{AB}	S_{AC}	S_{BC}	S_{BA}	S_{CA}	S_{CB}	$30^{\circ} \leq \alpha < 60^{\circ}$	$60^{\circ} \leq \alpha < 120^{\circ}$	$120^{\circ} \leq \alpha < 150^{\circ}$
1	0	0	0	1	1	可控硅 1.6	5.6	5.4
1	1	0	0	0	1	1.2	1.6	5.6
1	1	1	0	0	0	3.2	1.2	1.6
0	1	1	1	0	0	3.4	3.2	1.2
0	0	1	1	1	0	5.4	3.4	3.2
0	0	0	1	1	1	5.6	5.4	3.4

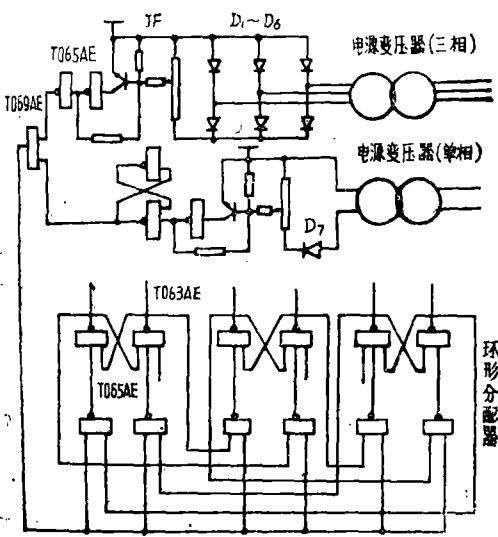


图 7

9. 速度检测器:

SZGB-1 光电转速传感器, 每转出300个脉冲数, 最高转速为 1395 转/分, 故 可出 6975 脉冲/秒, 故只要用 13 位计数器, 现用 4 块 C184 集成元件来组成16位的计数器, 其一方面通过零转速译码可测得转速过零的信息, 以便供可逆运行时逻辑切换用, 速度检测器提供的转速 n 值, 在起动机程序与非稳定运行子程序中都有用, 另一方面通过其可加上速度显示与打印。

10. PIO 中的 B 口起位控作用, 8 位中的分配情况:

(1) 极性鉴别 $B_1 B_0$ 二位输出, 作为 CJ, CJ' 信号去控制正反组桥的脉冲分配。

(2) 应急故障告警 B_2 一位输入, 告知 CPU 需紧急停车, 于是 CPU 使输出的 CJ , CJ' 均为低电位, 正反组桥的脉冲均被封锁, 电机由正常运转进入能耗制动, 紧急停车。

(3) 不同加工指令的控制信号 B_3 一位输出, 在起动指令与非稳定运行指令(即降速或反转运行等), B_3 要输出信号去控制加法与门关闭, 因为在这两种运行状态时, 减法器均由 CPU 按对应的子程序强行置数, 不受加法影响, 而当稳定运行指令时, B_3 要输出信号去控制加法与门打开, 使加法器中的计数受瞬变状态的变化而变化, 从而影响减法器的置数, 以实现闭环控制的目的。

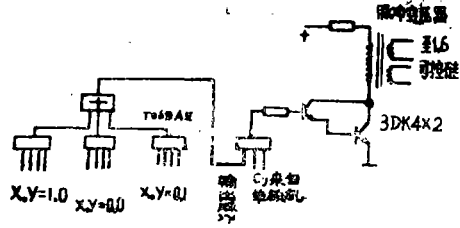


图 8

(4) XY 触发区间标志 B_4 , B_5 二位输出, 以供脉冲分配时的译码用。

(5) 零电流检测 B_6 一位输入, 供反转时逻辑切换使用。

(6) 零转速检测 B_7 一位输入, 供反转时逻辑切换使用。

11. 同步锁定电路(图 7):

由单相变压器通过 D_7 半波整流, 再经由反相器和非门组成的鉴幅器(JF), 输出之“0”, 至脉冲分配器造成同步锁定电路, 以确保 S_{AB} , S_{AC} , S_{BC} , S_{BA} , S_{CA} , S_{CB} 间的相序关系。

12. CTC 其他通道的说明:

小教授单板机中 CTC 0 通道, 在本系统中已作定时器使用, 1 通道为稳定运行时作定时用, 最大可设定 36ms, 2 通道与 3 通道在逻辑切换时作 2ms 与 7ms 的延时用。

三、三相反并联桥控制直流电动机可逆运行时的过程

当电动机需由正转变到反转时:

1. 桥 1 需由整流进入逆变状态(即本桥逆变)由于电路中电感的贮能使 I_a 逐渐下降至 0, 从而出现了回馈电动的状态。

2. 电流过零后, 经 2ms 延时使桥 1 封锁, 再经 7ms 延时后, 解除桥 2 的封锁, 以预防逆变的颠覆, 桥 2 打开后是逆变投入, 其逆变电压应与电机内的感生电势相配合, 以确保在 $1.5I_a$ 下进行回馈制动, 加快制动的过程。

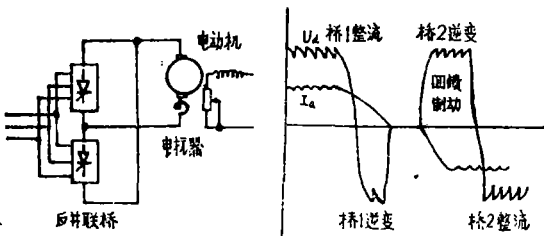


图 9

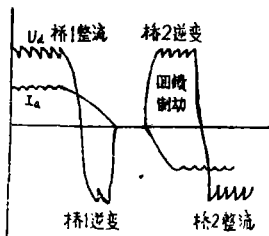


图 10

3. 当转速过零后, 桥 2 由逆变逐渐变成整流状态, 电动机则进行反转。

其电路图参看图 9。电流与电压变化的波形参看图 10。对其稳态值来说应参看

图11.

对于停车与降速时电流与转速或电势间的关系参看图12、13.

四、由单板机来控制直流电动机可逆运行的软件

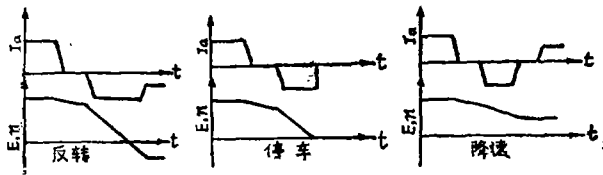


图 11 图 12 图 13

- 1. 主程序框图:
主程序框图参看图14.
- 2. 起动时的子程序:
由 $\alpha = 90^\circ$ (即输出电压为0) 开始起动, 最大可能加速至 $\alpha = 30^\circ$ (因为 $\alpha_{\min} = 30^\circ$), α 变化 60° , 相当于变化256个脉冲数.
如果直流电动机的起动时间为0.5秒, 分16级起动, 则每级约有31.25毫秒, 执行一条指令平均算作 $10\mu s$, 则31.25ms 中可执行31.25条指令, 故有足够的时间来完成一些运算与判断等功能.
转速从24转/分到1395转/分亦分成16级, 这样 CTC 的初始常数
为 58, 54, 50, 47, 43, 39, 35, 31, 28, 24, 20, 16, 12, 9,
5, 1.

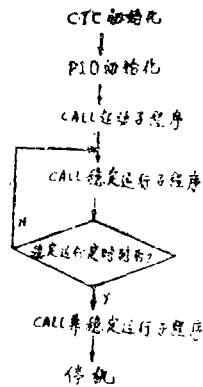


图 14

$$E = C_e n \phi$$
$$U = E + 1.5 I_a R_a$$

另一方面

$$U = 1.35 U_1 \cos \alpha$$

所以

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{u}{1.35 U_1}$$
$$x = \frac{256}{60} \cdot \alpha \text{ (脉冲数)}$$

算得余数 X' 与对应的 XY 值.
将对应于16级的初始常数、感生电势、脉冲数 X' 与 XY 值分别存入固定的内存单元(占用64个内存单元). CTC 的初始常数在1A00—1A0F, 感生电势在1A10—1A1F, 脉冲数 X' 在1A20—1A2F, XY 值在1A30—1A3F.

- 输入参数: 转向
 转速
起动级数 (由转速可查得对应的起动级数).
- 子程序框图如图15所示.
- 3. 稳定运行的子程序:
输入常数: 转向 } 与起动时的输入参数相同.
 转速 }

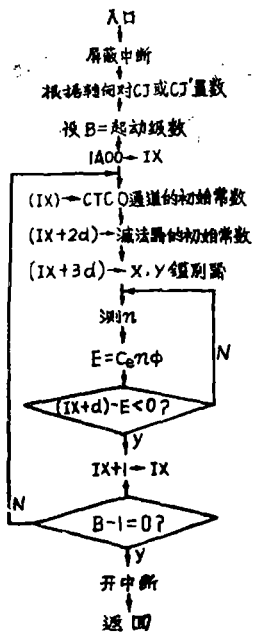


图 15

稳定运行的时间：设定 CTC 1 通道的最大定时时间为 36ms，如果采用一个字节（256—1）循环中断方式可达 9.18 秒，采用 2 个字节（2¹⁶—1）循环中断方式可达 39.32 分。采用 3 个字节（2²⁴—1）循环中断方式可达 167.77 小时。

稳定运行的子程序是采用中断控制方式，即当加法器加满数后发出中断请求，得中断响应后，即可获得入口地址。

子程序框图如图 16 所示。

4. 非稳定运行的子程序：

输入参数

转向，由其来确定是反转还是升降速。

转速，由其来确定是否停车。反桥逆变的级数，由原来的转速与降速值或反转、停车的要求来确定。

反向起动的级数，只有在反转时才需要。

反转时：本桥逆变是以最大逆变电压（即 $\beta_{\min} = 30^\circ$ ）下进行，以使电流快速过零。反桥逆变时

$$E = C_0 n \phi$$

$$U_\beta = E - 1.5 I_a R_a$$

另一方面

$$U_\beta = 1.35 U_I \cos \beta$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{U_\beta}{1.35 U_I}$$

$$\alpha = 180^\circ - \beta$$

$$x = \frac{258}{60} \alpha \text{ 脉冲数}$$

算得余数 X'' 与对应的 XY 值。

最大逆变级数亦按 16 级设定，将对应于 16 级的 X'' 与值分别存入固定的内存单元（占用 32 个内存单元）。

脉冲数 X'' 在 1A40—1A4F

XY 值在 1A50—1A5F

降速时：第一次本桥逆变是在最大逆变电压

下进行，反桥逆变时须根据原来的转速值与预定降低的速度值来确定逆变级数。

第二次本桥逆变是使电流又反回去，然后就使桥 1 进入整流状态。

升速时：只要根据原来的转速值，预定要升高的转速值，定出对应的升速级数（参照启动级数来确定）CALL 启动的子程序进行升速。

子程序框图见图 17。

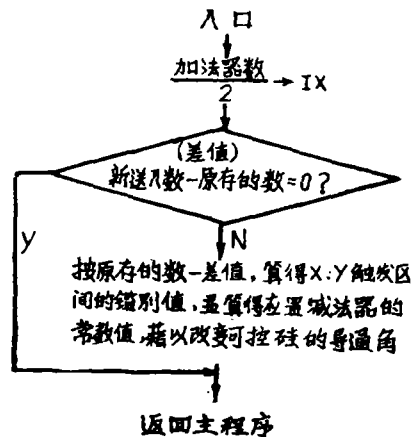


图 16

$$v_0(KT + t_k + \delta t_k) = v_0(KT + t_k) + \frac{dv_0(KT + t_k)}{dt} \delta t_k + \dots$$

$$\delta v(KT + t_k + \delta t_k) = \frac{dv(KT + t_k)}{1!} + \dots$$

$$= \delta v(KT + t_k)$$

故

$$v_0(KT + t_k) + \frac{dv_0(KT + t_k)}{dt} \delta t_k - \delta v(KT + t_k) = 2\pi k \quad (6)$$

式(2) — (6), 并注意到

$$\frac{dv_0(KT + t_k)}{dt} = w(KT + t_k)$$

因此

$$w(KT + t_k) \delta t_k - \delta v(KT + t_k) = 0 \quad (7)$$

$$\delta t_k = \frac{\delta v(KT + t_k)}{w(KT + t_k)} \quad (8)$$

由于角频率 $w(KT + t_k)$ 几乎为常数, 故

$$\delta t_k = \frac{1}{w} \delta v(KT + t_k) \quad (9)$$

在 X 中变化的 δX 是 δt 持续时间中的脉冲的变化, 此脉冲的

$$\text{幅值} = \begin{cases} V_s, & kT + t_k < t \leq kT + t_k + \delta t_k \\ 0, & \text{除上之外} \end{cases} \quad (10)$$

此脉冲变化的面积

$$A = V_s \delta t_k = \frac{V_s}{w} \delta v(KT + t_k) \quad (11)$$

由于 δt_k 很小, 上述一系列的脉冲的变化可看成是上述面积为幅值的一系列采样脉冲, 即

$$\delta x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{V_s}{w} \delta v(KT + t_k) \delta(t - kT - t_k) \quad (12)$$

当 $w = \frac{2\pi}{T}$ = 常数, t_k = 常数时, 我们能够移动 t 以消去式(12)中的 t_k , 因此

$$\delta x = \frac{V_s T}{2\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \delta v(KT) \delta(t - kT) \quad (13)$$

其说明 δx 由许多在时间上是离散的值组成, $\delta(t - kT)$ 表示每个值出现的时刻(即采样时刻), $\frac{V_s T}{2\pi} \delta v(KT)$ 表示信号的幅值, 故相频检测器的线性化模型是以 $\frac{V_s T}{2\pi}$ 为权的, 相位差的采样脉冲。

2. 速度控制系统的线性化模型:

参看图18(b)。这是一个闭环的离散系统, 采用 z 变换可来讨论系统的稳定性与确定参数, 具体分析可参考文献〔4〕。

参 考 文 献

- 〔1〕Hoang Le-Hoy, A Synchronous Thyristorized DC Motor Drive, IEEE Trans Industry Applications, 2 (1979).
- 〔2〕Bimal K. Bose and Kenneth J. Jentzen, Digital Speed Control of a DC Motor With Phase-Locked Loop Regulation, IEEE Trans I.E.C.I, 1 (1978).
- 〔3〕Jacob Tal, Speed Control By Phase-Locked Servo Systems-New Possibilities and Limitations. IEEE Trans I.E.C.I, 8 (1977).
- 〔4〕绪方胜彦著, 现代控制工程, 科学出版社, (1980)。

A Single Board Microcomputer Controlled Reversible Rotation System for DC Motor with Phase-Locked Loop

Cai Xinkang

Abstract

This paper describes a reversible rotation system for DC motor with phase-locked loop. This is a digital system controlled by Micro-Professor Single Board Microcomputer.

This digital system offers an overall advantage in performance, price, flexibility, reliability and power requirements. This digital type control for DC motor has certain advantages over that of conventional analog servo. Among these is the ability to obtain a precision of better than 0.1% and possibly approaching 0.002% in speed control.

The circuit of hardware and the design of control program are presented. Finally, a linear model of speed control system is proposed.