

全国第五届系统仿真学术会议 论文集

(三)



中国宇航学会
中国自动化学会
中国航空学会

(六) 工程应用

- 微计算机仿真系统.....幸邦和 张 运 邹静涛 (885)
用 HYSHARE-700 混合计算机系统进行
实时飞行仿真.....梁柄成 王学孝 (904)
某型反坦克导弹控制盒的数字仿真研究
.....周力军 苏群星 陶英会 (924)
回旋窑烘干过程的建模和仿真.....吴惕华 (942)
自动驾驶仪实物仿真中的几个问题.....刘毓枚 (953)
歼 X 飞行系统优化仿真研究.....李浩水 李淑玲 (963)
仿真技术在大型工程项目可行性研究中的应用.....郭仲伟 (986)
系统仿真在导弹控制系统设计中的应用.....修海楼 (996)
防空情报指挥系统跟踪雷达捕捉时间分布规律的
仿真研究.....宋承令 周 林 (1018)
飞控系统仿真实验室.....汪德才 (1026)
核电站仿真中一种模块化非单一算法概念的应用.....骆志伟 (1034)
多变量系统对角化优势问题的混合计算机研究
.....白云周 庄鸿棉 薛建平 罗宁苏 (1044)
星地大回路仿真系统的数学模型.....陆镇麟 (1055)
地球观测卫星小推力轨道控制方案仿真.....王旭东 郭宝柱 (1065)
卫星控制系统的多转台物理仿真方法.....刘慎钊 (1075)
大型导航系统仿真方法的研究.....姜玉宪 (1086)
试论气浮台仿真的功能.....林来兴 (1102)
实时数字仿真的方法和实现.....朱华瑞 (1111)
控制系统平稳快速控制规律小计算机仿真.....任兴权 (1125)
实物加入环节中的飞行器控制系统数字仿真
.....陆祥瑞 杨家声 (1136)
动态矩阵控制 (DMC) 的仿真研究.....濮强国 杨巧玲 (1158)
计算机飞行控制系统及其实时仿真研究
.....王行仁 于振宇 王 怀 (1167)

船舶调距桨微机控制系统的实时混合仿真

.....邓振强 郭 晨 (1178)

(七) 非工程应用

战略仿真及其软件研究.....马正午 王佩玲 (1190)

用于交通系统的Q-GERT仿真技术.....邱菀华 杨 光 (1205)

人才预测的仿真决策模型及其应用.....冯鸣鸣 冯允成 (1214)

PERT仿真及在某新型飞机燃油系统模拟

试验中的应用.....夏国平 孙嘉树 (1224)

UTSS: 一个城市交通系统的仿真模型.....刘国庆 韩慧君 (1232)

多目标决策辅助系统实现方法

.....韩慧君 蒋 馥 陈 勤 张兆良 华守雁 (1247)

离散事件系统仿真语言FDSSL...贺大愚 陈建阳 孙国基 (1261)

系统动力学仿真技术在区域规划决策中的应用

.....孙国基 韩九强 刘海城 (1275)

具有交通控制的十字交叉路口交通分析与仿真.....焦小澄 (1283)

微计算机仿真系统
幸邦和 张运 邹静涛
北京工业学院 01 研究所

摘 要

本文介绍基于微计算机的实时仿真系统的建立。文中以导弹与目标相对运动为例简述此仿真系统的微计算机实时汇编软件的设计。其中三角函数查表程序, 求速度 V 程序, 目标程序、控制程序以及乘法除法等程序均具有较高的时间效率。此外, 还介绍了 A/D D/A 转换以及定时、同步等问题的处理。

1. 引言

仿真技术用于导弹控制系统设计具有十分重大的意义。我们知道研制一种型号的导弹需花费大量的人力、动用大量的资金。这是因为导弹控制系统是很复杂的系统, 它不仅阶次高, 还存在非线性以及随机干扰等的影响。这使得对导弹系统的设计不得不进行大量的简化, 在这样的前提下设计出来的导弹, 其可靠性较差。亦即导弹射发失败的风险较大。导弹发射的失败不仅给经济上带来极大的损失, 而且可靠性不高的导弹也严重地威胁着己方人员的生命安全。因此一种型号的导弹从设计到定型生产需进行多层次的仿真, 如数学仿真, 实物仿真等。通过仿真达到方案选择、方案论证, 优化参数和检验导弹性能的目的。特别是导弹的实物仿真, 因为加进了实物, 更接近真实情况。可以说, 实物仿真是提高导弹可靠性和设计质量的重要手段和措施。运用仿真技术可以大大地加速导弹研制周期的缩短、研制成本的降低和产品质量的提高。

建立导弹仿真系统必须解决导弹在室中跟踪目标的问题。本文所

建立的微计算机仿真系统即是提供这种目标的装置（该目标称为等价目标）。它能使导弹跟踪等价目标的运动反映导弹在空中跟踪目标的运动。该仿真系统称为导弹与目标相对运动的微计算机仿真系统。若配上导引头、转台、驾驶仪等即可构成自寻的导弹仿真系统。

用微计算机解决导弹与目标相对运动的仿真还是一个新的尝试。微计算机，其体积小，操作容易，使用方便，其构成的仿真系统造价成本低。其实对汇编软件可修改，逐步完善。这为改善仿真系统的性能提供了丰富的潜力。可以说，微计算机在导弹仿真中也具有十分广阔的应用前景。

2. 系统建立

描述导弹质心运动的方程为：

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cdot \cos\theta \cdot \cos\psi_c \\ \frac{dy}{dt} = V \cdot \sin\theta \\ \frac{dz}{dt} = -V \cdot \cos\theta \cdot \sin\psi_c \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 x, y, z 为导弹在地面坐标系中的坐标， V 为导弹速度， θ 为导弹倾角， ψ_c 为导弹偏角。设定目标的运动为：

$$\begin{cases} x_T = f_{Tx}(t) \\ y_T = f_{Ty}(t) \\ z_T = f_{Tz}(t) \end{cases} \quad (2-2)$$

式中 x_T, y_T, z_T 为目标在地面坐标系中的坐标。

若将地面坐标系平移至导弹质心上，并取作动参考系，则目标相对导弹的运动为：

$$\begin{cases} x_r = x_T - x \\ y_r = y_T - y \\ z_r = z_T - z \end{cases} \quad (2-3)$$

已知相对位移 x_r , y_r , z_r 则目标 T 在动参考系 $MXYZ$ 中的位置被取定。

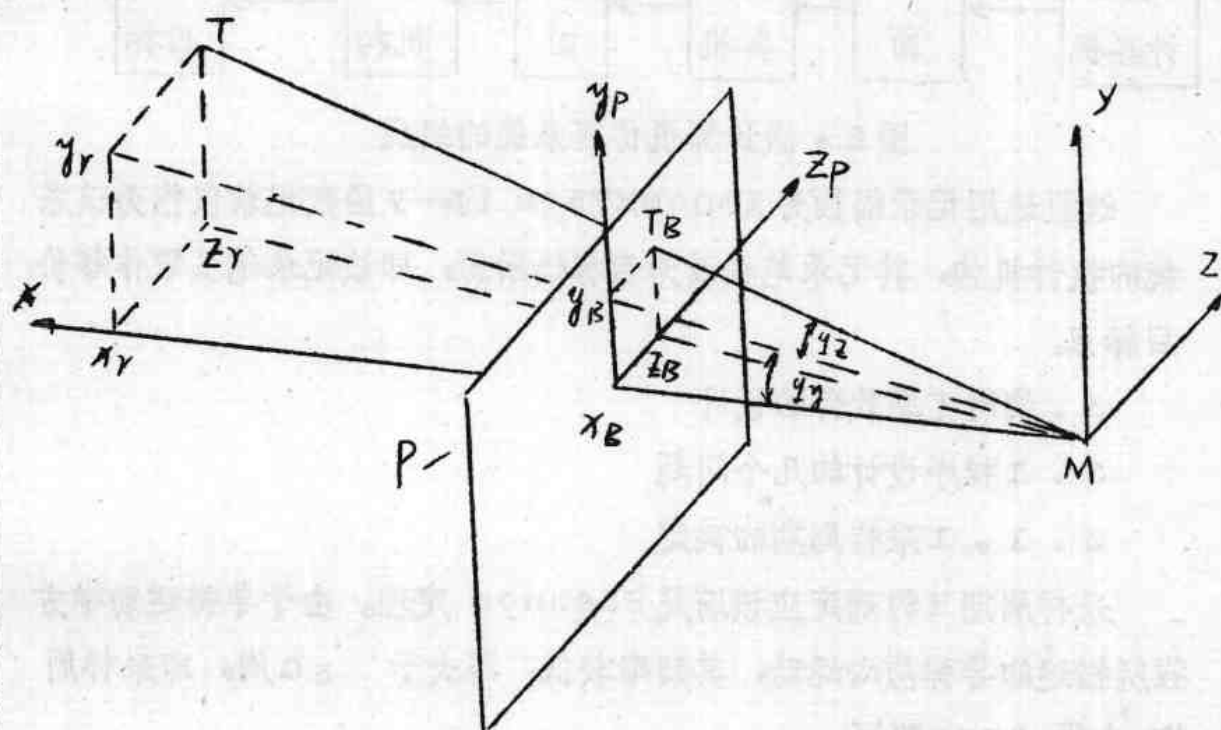


图 1. 等价关系图

现在距离导弹 M 给定距离 x_B 处置一平面 P , 在该平面上求一点, 使导弹跟踪它的运动等于导弹跟踪目标 T 的运动。且称该点为等价目标点, 记为 T_B 。导弹相对等价目标 T_B 的运动称为导弹与目标相对运动的等价运动。显然, 其等价意义体现于视线 $\overline{MT_B}$ 与视线 $\overline{MT}$ 重合。由等价关系图不难求得 T_B 点的位移:

$$\begin{cases} y_B = x_B \cdot (y_T - y) / (x_T - x) \\ z_B = x_B \cdot (z_T - z) / (x_T - x) \end{cases} \quad (2-4)$$

微计算机接收来自弹体（模拟计算机）的运动学参数之信号，按式（2-1）、（2-2）和（2-4）实时解算，即可给出等价目标 T_E 的位移，经D/A转换送至执行机构带动等价目标点运动。其组成的这一仿真系统即完成了等价目标点的输出。见图2



图2 微计算机仿真系统的组成

这里选用记录幅面为 $100\text{cm} \times 75\text{cm}$ 的x-y函数记录仪作为该系统的执行机构，其记录笔头改为目标幅射源，即该记录笔头取作等价目标点。

3. 实时汇编软件的设计

3.1 程序设计的几个问题

3.1.1 采样周期的确定

采样周期 H 的确定应该满足Shannon定理。由于导弹运动学方程所描述的导弹质心运动，其频率较低，不大于50周，即采样周期小于10ms即可。

3.1.2 微计算机及A/D，D/A转换器的选购

我们选购的微计算机BCM-80 该机主频 4MHz ，ROM 4Bytes，RAM 4. Bytes。该机是八位机中主频较高的机种之一，此有助于达到实时的要求。

设弹道倾角 θ ，弹道偏角 ψ_c 的最角度不大于 90° ；记录仪记录幅面为 $100\text{cm} \times 75\text{cm}$ 即等价目标的最大位移为1m。它们对应于8位、12位的D/A，A/D转换器的分辨可算出，见下表：

	A/D	D/A
8 位	0.7087°	0.00787m
12 位	0.04397°	0.000488m

注：分辨率除去了符号位算出

系统选用8位的转换器，分辨率太低，因此，选用了12位转换器。

3.1.3 任务予处理

微计算机的主要任务是解算(2-1)式和(2-4)式。解决这些问题涉及算法、数的类型和字长的选定。

虽然浮点数在表示数的有效位数方面优于定点数，但其运算规则要比定点数复杂得多。因而采用浮点数较难达到实时的要求，我们选用定点数（且取纯小数形式）。

鉴于实时的要求，求解方程(2-1)的算法必需简便，且精度又符合要求。按此选定了实时龙格—库塔二阶算法(Realtime RK-2)。该算法阶次较低，精度也较其它二阶算法好。(2-1)式按此法求解，即得：

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + H \cdot V_{n+\frac{1}{2}} \cdot \cos \psi_{c, n+\frac{1}{2}} \cos \theta_{n+\frac{1}{2}} \\ y_{n+1} = y_n + H \cdot V_{n+\frac{1}{2}} \cdot \sin \theta_{n+\frac{1}{2}} \\ z_{n+1} = z_n - H \cdot V_{n+\frac{1}{2}} \cdot \cos \theta_{n+\frac{1}{2}} \cdot \sin \psi_{c, n+\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3-1)$$

式中H为采样周期，下标n表示nH刻。(n=0, 1, 2...)现对上式各变量进行规格化处理：

$$\begin{cases} x_{n+1}/k_1 = x_n/k_1 + H \cdot V_{n+\frac{1}{2}} \cdot \cos \theta_{n+\frac{1}{2}} \cdot \cos \psi_{c, n+\frac{1}{2}} \\ y_{n+1}/k_2 = y_n/k_2 + H \cdot V_{n+\frac{1}{2}} \cdot \sin \theta_{n+\frac{1}{2}} \\ z_{n+1}/k_2 = z_n/k_2 - H \cdot V_{n+\frac{1}{2}} \cdot \cos \theta_{n+\frac{1}{2}} \cdot \sin \psi_{c, n+\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} z_{n+1}/k_2 &= z_n/k_2 - \frac{H \cdot V_{n+1/2} \cdot \cos \theta_{n+1/2} \cdot \sin \psi_{c, n+1/2}}{k_2} \end{aligned} \right.$$

式中 $k_1 \geq x_{\max}$; $k_2 \geq \max\{y_{\max}, z_{\max}\}$ 。 $x_{\max}$, $y_{\max}$, $z_{\max}$ 分别为 x_n , y_n , z_n 的最大值。且称 k_1 , k_2 为规格化系数。经上述处理, 变量均达到不大于 1。

输入变量: $\theta_{n+1/2}$; $\psi_{c, n+1/2}$ 按实时采样转换进入计算机。由于导弹在飞行模拟实验阶段, 导弹速度一般已知, 我们将其用程序装入内存。并将速度加权, 即加权速度 $V_1 = V \cdot H/k_1$; $V_2 = V \cdot H/k_2$ 处理。则 (3-2) 式可减少乘除的次数。

为使式简洁, 约去下标 $n+1/2$, 且将规格化处理的变量 $\frac{x_{n+1}}{k_1}$

仍记为 x_{n+1} , 余同, 则由 (3-2) 式得:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + V_1 \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi_c \\ y_{n+1} = y_n - V_2 \cdot \sin \theta \\ z_{n+1} = z_n - V_2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi_c \end{cases} \quad (3-3)$$

将等价变换式 (2-4) 中的常数因子 $(-x_B)$ 提出来置于 D/A 转换后一并考虑, 则由式 (2-4) 有:

$$\begin{cases} y_{b, n+1} = \frac{y_{n+1} - y_{T, n+1}}{x_{T, n+1} - x_{n+1}} \\ z_{b, n+1} = \frac{z_{n+1} - z_{T, n+1}}{x_{T, n+1} - x_{n+1}} \end{cases} \quad (3-4)$$

实时处理程序即需完成 (3-3) 和 (3-4) 式的处理。计算机将 $y_{b, n+1}$, $z_{b, n+1}$ 作为输出值。

现推算所需字长: D/A 转换已取定 12 位, 即需计算机按 12 位输出。现取计算机按 16 位输出, 则 (3-4) 式需按 32 位/16 位的除法计算。亦即 x_n , y_n , z_n 需取 32 位。设它们的最

大值为 5000m, 则取 32 位的分辨率可达:

$$5000\text{m}/(2^{32}-1) = 1.164 \times 10^{-6}\text{m} \quad \text{因此, 该字长是合适的。}$$

3.2 程序结构设计

在结构上, 考虑将实时处理程序大致分为: 初始化程序, 主程序, 中断服务程序 I, 此外, 为补偿执行机构的滞后, 还增加了一块控制程序。各程序之间的关系及其主要功能见图 3, 图中 CTC 为可编程定时器。程序中设置开关量取代开关 k 的作用。

3.3 各子程序设计

3.3.1 三角函数查表程序

按分辨率 $90^\circ/2^{12}-1$ 等分区间 $\langle 0^\circ, 90^\circ \rangle$, 即将 90° 等分成 2048 份。借助高级语言求出等分点上的正弦函数值, 并转换成 16 进制数, 取双字节的函数值 (16 位), 得到 $4k=4 \times 1024$ 个字节的数据。将其制成表格, 存放于内存 2000H-2FFFH 中。见图 4。图中, (l) 表示低字节, (h) 表示高字节。数字后面的 H 表示为十六进制数。

由于 A/D 转换采用偏移二进制码, 故查表程序的入口参数 θ ; ψ_c 呈偏移码形式。(记为 D_θ ; D_{ψ_c}) 所谓偏移码, 即为符号取反的二进制码。

按照上面的处理, 表格函数与 12 位的偏移码有如下对应关系:

偏移码	表格函数地址	函数值
FFF H (4095)	2FFFH	$\sin 90^\circ$
800 H (2048)	2000H	$\sin 0^\circ$
001 H (1)	.	$\sin(-90^\circ)$

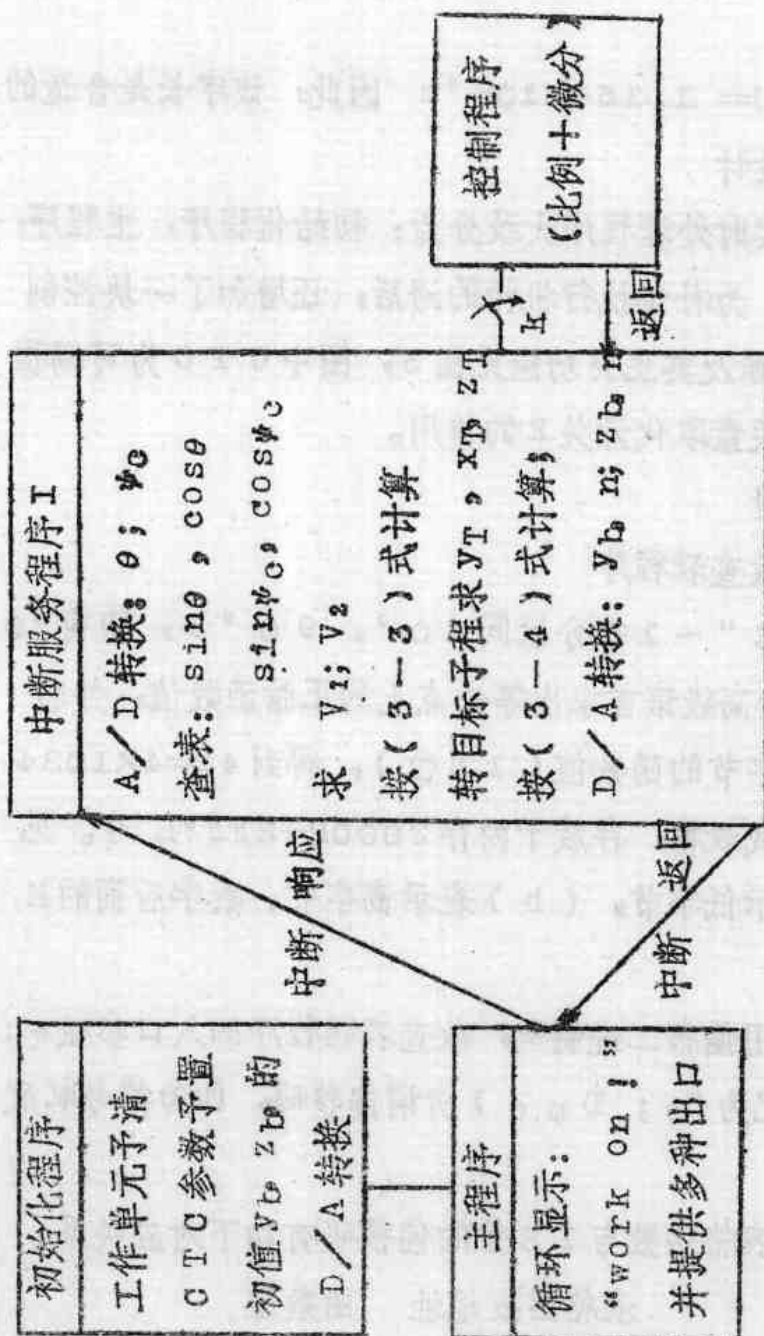


图3

2000H:	$\sin 0^\circ(l)$
2001H:	$\sin 0^\circ(h)$
...	...
2FFEH:	$\sin 90^\circ(l)$
2FFFH:	$\sin 90^\circ(h)$

按此对应关系，可求出有效 $\sin \theta$ 的表格地址：

当 $\theta \geq 0$ 时

$\sin \theta$ 相对表头的地址： $\text{radr}_1 = 2 \cdot (D_\theta - 800H)$

$\sin \theta$ 的绝对地址： $\text{Adr}_1 = \text{BTAB} + \text{radr}_1$

$\text{BTAB} = 2000H$ 为表头地址

当 $\theta < 0$ 时

$\sin \theta$ 相对表末的地址： $\text{radr}_2 = 2 \cdot (D_\theta - 1)$

$\sin \theta$ 的绝对地址： $\text{Adr}_2 = \text{ETAB} - \text{radr}_2$

$\text{ETAB} = 2FFEH$ 为表末地址

$\cos \theta$ 可利用上述正弦表查询。假定 radr_1 ; radr_2 意义上，则有：

$\theta \geq 0$ 时

$\cos \theta$ 的绝对地址： $\text{ETAB} - \text{radr}_1$

$\theta < 0$ 时

$\cos \theta$ 的绝对地址： $\text{BTAB} + \text{radr}_2$

现对上述结论说明如下：

$\theta \geq 0$ 时，见图 5。

$\therefore (\text{ETAB} - \text{BTAB})$ 表示 90° 在表内的长度。 radr_1 表示 $\sin \theta$ 相对表头的地址，其绝对地址为： $\text{BTAB} + \text{radr}_1$

$\therefore r_{\text{radr}_1} = (\text{ETAB} - \text{BTAB}) - \text{radr}_1$ 即为 $\sin(90^\circ - \theta)$ 相对表头的地址, 则 $\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$ 绝对地址为: $\text{BTAB} + r_{\text{radr}_1} = \text{ETAB} - \text{radr}_1$;

$\theta < 0$ 时, 见图 6

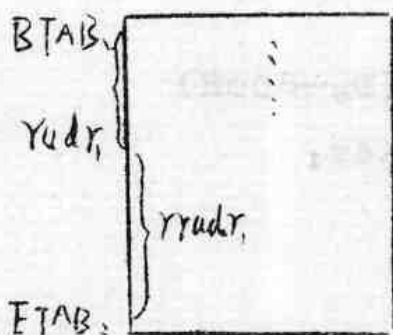


图 5

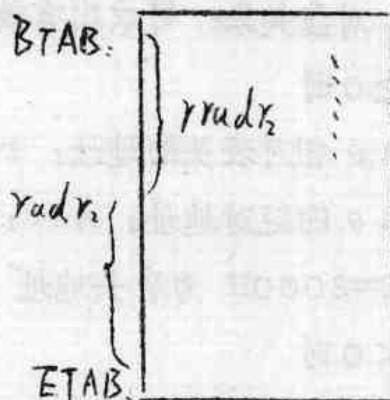


图 6

同样 $(\text{ETAB} - \text{BTAB})$ 表示 90° 在表内的长度。 radr_2 为 $\sin \theta$ 相对表末的地址, 其绝对地址为: $\text{ETAB} - \text{radr}_2$

$\therefore r_{\text{radr}_2} = (\text{ETAB} - \text{BTAB}) - \text{radr}_2$ 为 $\sin(90^\circ - \theta)$ 相对表末的地址, 则 $\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$ 的绝对地址:

$$\text{ETAB} - r_{\text{radr}_2} = \text{BTAB} + \text{radr}_2$$

按上述查表的方法编写了查表程序, 其框图见图 7, 该程序入口参数是: D_θ ; $D_{\psi c}(\theta; \psi c \text{ 的偏移码})$; 出口参数: $\sin \theta$; $\cos \theta$;

$\sin \psi c$; $\cos \psi c$ 。该程序由 95 条语句组成, 其较为突出的优点是查表迅速, 完成上列 4 个函数值的查询所需的最长时间为: 0.120ms 表函数的最大误差为 $7.7 \times 10^{-4} \text{rad}$ 。

3.3.2 求速度 V 子程序

为简洁之便, 加权速度仍用 V 表示。现将速度曲线分成 1 个线性段 ($1 = 1, 2 \dots$) 每一线性段按采样间隔 H 等分。记第 1 段的起始速度

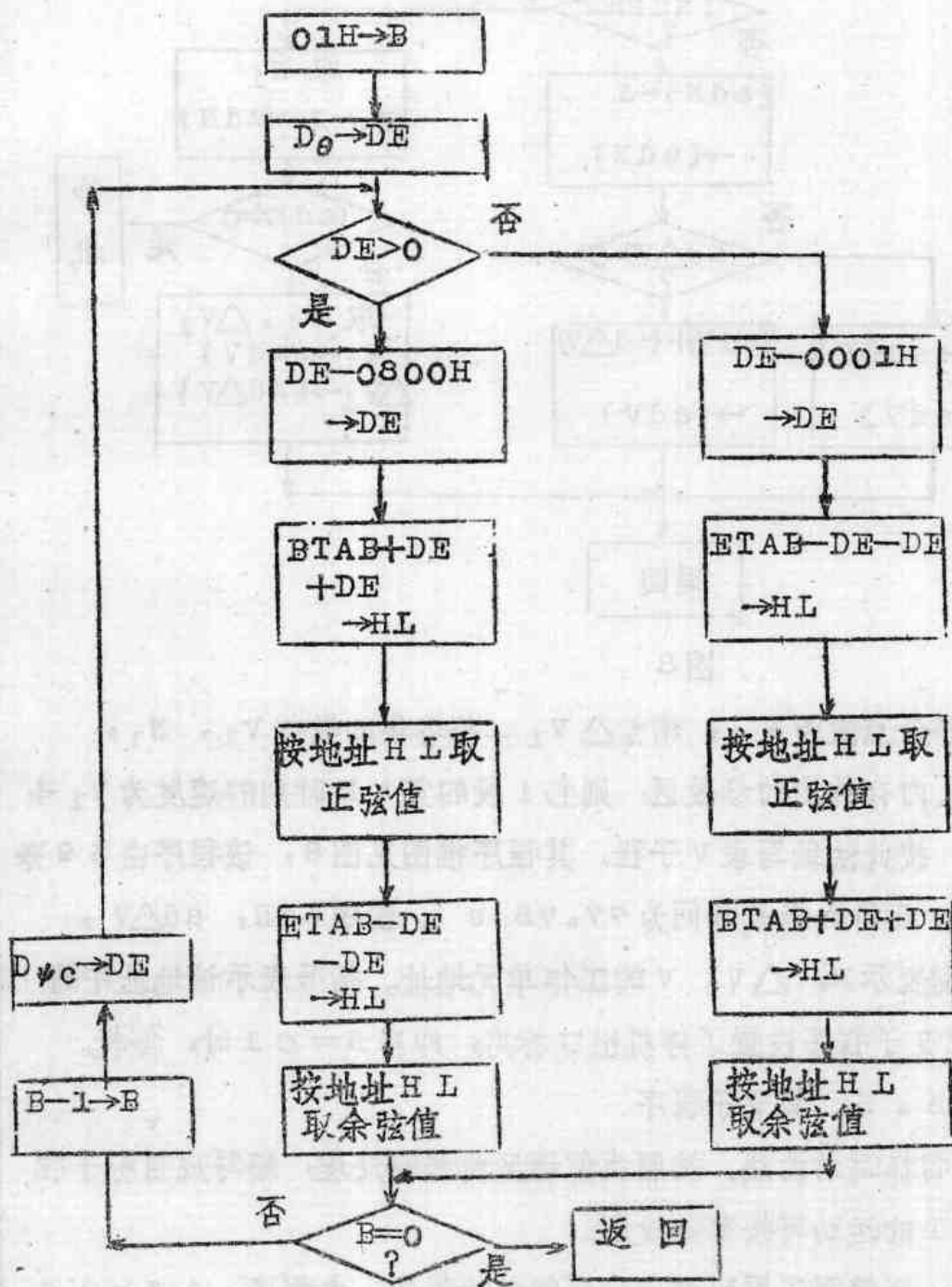


图 7

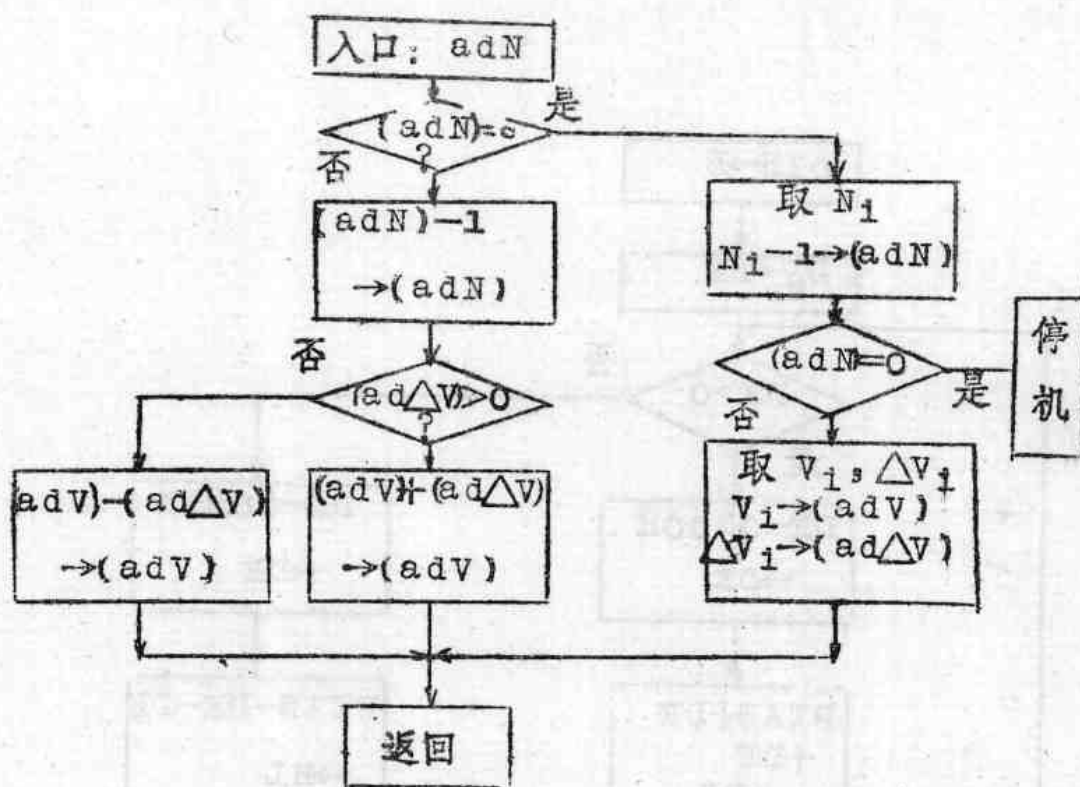


图 8

为 V_1 ，等分点数为 N_1 ，增量 ΔV_1 。将各段的数据 V_1 ， N_1 ， ΔV_1 装入内存约定的参数区。则第 1 段的第 n H 时刻的速度为 $V_1 + n\Delta V_1$ ，按此法编写求 V 子程，其程序框图见图 8，该程序由 39 条语句组成，运行之最长时间为 $77.75\mu s$ 。图中 adN ， $ad\Delta V$ ， adV 分别表示 N ， ΔV ， V 的工作单元地址。括号表示该地址中的内容。求 V 子程序设置了停机出口标志，即当 $N=01$ 时，停机。

3.3.3 其它子程序

对于目标运动曲线。按照类似速度曲线的处理，编写成目标子程序。目标 T 的运动可按需要设定。

此外，还编写了原码到偏移码的转换程序，主程序， 16×16 位原码，补码程序， $32/16$ 位的无符号除法程序（其最长运行时间分别为 $0.27825ms$ ； $0.28125ms$ ； $0.36825ms$ ）以及采用

“比例+微分”策略的控制子程序。

3.4 中断服务程序 I

中断服务程序 I 是该实时处理程序的核心。图 9 为其程序框图。该程序共由七百多条语句组成，运行的最长时间 3.054ms （不加控制）； 3.69675ms （加控制）。能够在 3ms 左右完成该实时任务的处理，表明该程序在时间上是优质的。按照 Realtime RK-2 算法的要求，采样间隔为上列时间的 2 倍，它们均小于 10ms ，即能达到实时的要求。

3.5 利用 CTC 定时和启步

Realtime RK-2 算法需用 nH 时刻的状态， $(n + \frac{1}{2})H$ 时刻的输入，求 $(m + 1)H$ 时刻的状态 [见 (3-1) 式]。即要求在 $(n + \frac{1}{2})H$ ($n = 0, 1, 2 \dots$) 时刻对输入信号采样：



将模拟计算机的启动信号作为处于定时器工作状态的 CTC 之触发脉冲，CTC 一旦被触发启动，则经过 $H/2$ 应中断进行首次采样。

此后每间隔 H 采样一次，则可实现启步，同步和定时。但置入 CTC 中的时间常数先为 $H/2$ ，后应为 H ，即需变更一次才能达到上述要求。为此，我们利用了 CTC 的二个通道 $ch0$ ， $ch1$ 。具体作法如下：

使 CTC 的通道 $ch0$ ， $ch1$ 同时被触发脉冲启动进入定时器工作状态。 $ch0$ 的时间常数予置为 $H/2$ ，而使 $ch1$ 的时间常数 $< H/2$ （实际取为： $0.012 : 3\text{ms}$ ）即使 $ch1$ 在启动后立刻产生中断，转入对应的中断服务程序 II。在该程序中完成使 $ch1$ 通道复位，修改 $ch0$ 通道的时间常数的中断处理。这里利用了 CTC 的一个特性：当一个通道正在计数或定时时，如果一个新的时间常数输入

到CTC的时间常数计数器中，要等到减数计数器完成现行的操作而回“零”时才有效。

因此，首次置入的 $H/2$ 是有效的。

现设定CTC的控制字为BFH，其意义：允许中断；定时器方式；定标系数256；触发脉冲上边沿有效；外部触发启动；装入时间常数；通道复位。

设置CTC的中断字

中断字设为FOH；它与中断其地址（即CPU中的寄存器I中的

内容，设为44H）拼成的地址44FOH即为中断服务程序入口地址表的表头地址。按照对应关系，优先级别最高的CTCcho通道对应的中断服务程序I的入口地址4500H应放在44FOH，cn1对应的中断服务程序II的入口地址4E00H则放在44F2H，即：

44FOH : 00H	44F2H : 00H
44F1H : 45H	44F3H : 4EH

上列CTC各参数予置是在初始化程序中完成的

5.6 接口

图

A/D、D/A转换是实现微计算机与外国设备、模拟计算机、执行机构的接口，这里选用12位的A/D、D/A转换板。将转换板的数据线 $\overline{D}_1$ （ $i=1, \dots, 8$ ）八条；地址线 $\overline{A}_1$ 八条；控制线（ $\overline{M}_1$ 、 $\overline{WAIT}$ 、 $\overline{RESET}$ 、 $\overline{HALT}$ ）四条；时钟 ϕ ；I/O请求线 $\overline{IORQ}$ ；不可屏蔽中断线 $\overline{INT}$ ；读、写控制线 $\overline{WR}$ 、 $\overline{RD}$ ，地线GND与微计算机BCM-80的总线对接。即可通过设定作为微计算机外部设备的D/A、A/D转换之设备号（即外设地址之高字节）而实现微计算机与转换板之间的通讯。这里设定转换板的设备号为CH，即该板占用口地址