

微特电机
学术报告会
一九七九年 上海

WEITEDIANJI
XUESHUBAOGAOSHU
SHANGHAI 1979

论文集

1/2

中国电子学会元件专业学会

编 辑 前 言

《微特电机学术报告会》自发出征文启事后，先后收到各单位送审的稿件共七十余篇，为供会议交流和讨论，现选其中四十九篇汇编成会议录上、下集。

由于印刷条件限制，尚有部分来稿太迟，文字太长，已多次刊载他刊或与本会关系不大的稿件未选入，对此，我们表示歉意。

会议录所选的稿件并非全是大会宣读的论文报告，且其目录次序，并无规矩，更不按伦次排列，特此说明。

编辑时，对原稿中一些笔误、错、漏和模糊不清之处，虽作过部分编辑处理，但大多仍按原稿付印，且由于编辑、校对、印刷仓促，其中难免有错误，请相互指正。

一九七九年六月

永磁低速同步电动机力矩的简明计算 高云峰

高精定度的直流马达调速电路 蒋开诚

单相及多相反应式低速同步电动机性能对比及主要尺寸分析 汪国梁

微特电机转子、定子(冲片)槽型角误差分析
——兼谈形位公差在冲片圆分度中的应用 王庆法

目

录

无刷直流电动机在卫星受控系统中的应用	金如麟	1
应用复合相对参数的等效感应电机	张正辉	25
综合调速法在旋转变压器坐标变换中的应用		
——非电阻负载式同步电动机起动的一些问题	卓宏德	56
采用GTO元件的功率步进电机驱动电路	天津大学	80
大功率步进电机驱动电路	刘煜亮, 周康林	101
稀土永磁高速同步发电机	唐仁尧等	110
永磁步进电机与无刷直流电机的性能比较		
及最佳性能	弗 南	123
电机电信号的有限元法	屠美钰	161
调速同步电机谐波力矩分析及噪音、瞬态		
转速稳定性研究	鄂峻唐	187
微细铁磁合金1丁6在微电机上的应用	叶光华	209
电阻负载式同步电动机的起动问题	邱培基	222
电阻负载式功率步进电动机的合理设计	李猷毅	235
直流微电机主要尺寸计算公式探讨	顾连庭	247
伺服电机脉冲调宽控制方法分析	付佩深	256
不同负载条件下永磁步进电动机的研究	王宗培等	286
转动惯量的测量	许介昌	324
无刷直流电机未来学	龙 三	335
永磁负载同步电机基础技术的探讨	初振海	355
功率步进电机研制报告	天津大学	360
无接触式自励励磁适当增大气隙对改善工		
作性能的影响	王庆庭	377
永磁同步电机步进电机	石定机	386
提高步进电机响应速度的若干问题	石定机	394
接触式自励励磁接触可靠性与电刷压力均		
匀性的改进	傅文涛等	402

控制电机的统一理论

适应同步电机的气隙电势

LXW160—50 霍尔无刷直流力矩电机

用频中特性法测号超低惯量电动机的
机械时间常数

应用微相倍频技术的连续角度编码系
统

全组合用于适应异步机的高精度测
试

无刷直流电机的电磁设计

三制直流电动机的一般公式及主要参数
异步电机转矩性能转压曲线差为析及参数计
算方法

二相脉冲的固体模拟

被莫合全超高温退火

电机转速稳定的几个问题

电机铁芯蒸汽法处理对提高表面质量
和电机性能的研究

谐波分析在绕组及其应用中

无刷制造立体阳模的技术

伺服电动机时间常数的测试方法

多段电机如何合理斜槽

两相型异步电机驱动电机调速技术中的调速
电机参数分析

用两孔孔值量法在同步电机上测转子阻
抗不同轴度的精密设计

直流测速发电机电刷研宿与运行试验分
析

永动异步电动机三相 S₀和 S₁和 S₂电压
电流

三相伺服电动机的快速性

王振永

陆永平、高国良

沈正亚

王宏保、杨美新

张 彭

陈元基等

蒋庆伦

谭直欣

朱兵本

仇光正

柏淑迅

欧阳皓

张世德

陈景华

常工育

胡丕明

刘力平、叶葵忠

江德文

陈光宇

顾益康

刘德昌

郑博瑜

无刷直流电动机在卫星姿态控制系统中的应用

上海交通大学

本文就我们为风云一号气象卫星研制的姿态控制系统用飞轮装置作一总结。在我国尚属首次研制，我们配合卫星的试验呈研制阶段，先后提供了试样机和初样机，经过百各种模拟试验，性能良好。

一、概 述

1. 姿态控制的目的和方式

自50年代初期第一颗人造卫星发射以来，空间技术得到迅猛发展。目前空间技术已发展成为一门独立的学科。从军事侦察卫星发展到气象卫星，资源勘测技术卫星，天文卫星，应用技术卫星，通信卫星等（多用途卫星，野发射卫星等）从最初的几天发展到几周、数月、几年，例如同步通讯卫星甚至需受长达五年以上的寿命。

以上卫星要能正常工作都必须使卫星对某天体维持确定的姿态或能按预定的指令改变姿态。这就是姿态控制的目的。提高姿态控制的精度和寿命是当前迫切的任务。卫星在太空中受到空气动力力矩、重力梯度力矩、地球磁矩力矩及太阳辐射压力力矩等于扰力矩的影响。它们的大小与卫星轨道高度、卫星重量尺寸、形状及惯性矩等多种因素有关。一般说来，低高度卫星主要受空气动力力矩的影响，中高度卫星主要受重力梯度力矩和地球磁矩力矩的影响，高高度卫星主要受太阳辐射压力力矩的影响。表1给出了有关数据，虽然数量级很小，但在太空中是尽无空气摩擦阻力的情况下，仍足以改变卫星的姿态。

表1 干扰力矩数据

卫星 项目	名称
空气动力 力矩	可忽略
重力梯度 力矩	0.08 克·厘米
地球磁矩 力矩	0.14 克·厘米
太阳辐射压 力矩	可忽略

为了实现姿态控制，装置必须产生控制力矩以克服干扰力矩的影响，目前认为产生控制力矩的方式主要有表 2 所示的两大类。

表 2 产生控制力矩的方式

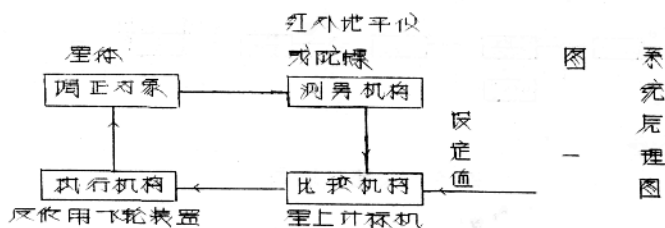
类别	I 角动量储存 (即质点喷射)	II 角动量交换 (即角动量守恒)
例	冷气喷射 控气喷射 离子喷射	反作用飞轮 动量飞轮 控制力矩陀螺

结 II 类方式可以在较宽的姿态范围精度较高，由于不受储气量的限制，电磁阀开关次数的限制，因而寿命长，得到广泛的应用。

2. 三轴反作用飞轮姿态控制系统

本系统是一个闭环的自动调节系统，反作用飞轮作为姿态控制的执行机构。

见图 1



在卫星的滚动、俯仰及偏航三轴上分别装有反作用飞轮和姿态敏感器（即测量机构）构成三个独立的系统实行姿态控制。

它利用增减飞轮转速或改变飞轮转向，对星体产生不同大小和方向的反作用控制力矩，从而补偿干扰力矩的影响，大小分的干扰力矩是作周期性变化的，平均值几乎为零，反作用飞轮旋转速度相应地作周期性的增减，使卫星姿态保持恒定，可是干扰力矩平均值不都为零，偏差积累起来，足以使旋转速度达到极大值，这时必须喷气校正行动号，使飞轮转速离开极大值，这种操作称为去饱和，因此本系统采用的星三轴反作用飞轮 + 喷气的方式，系统示意图见图2。

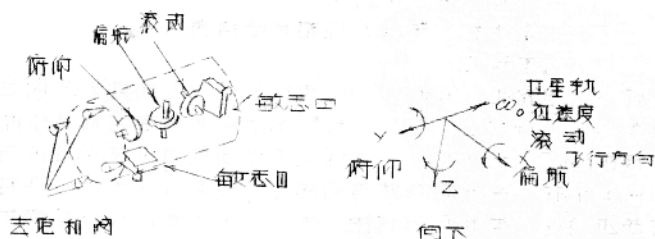


图2 三轴反作用飞轮系统图

根据气象卫星探测仪的要求，本姿态控制系统转换为每轴机械偏差 $\leq \pm 1^\circ$ ，为保证云图清晰度，三轴的精度 $< 0.05^\circ/\text{秒}$ 。

每轴的示意图如图3所示，（以俯仰为例）

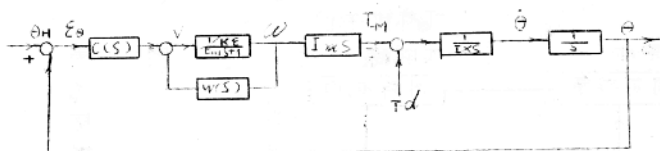


图 3 系统方块图

- θ_H —— 俯仰红外地平仪输出噪声
 ε_0 —— 俯仰红外地平仪输出的静态误差信号
 k_E —— 反电势常数
 T_M —— 飞轮时间常数
 I_M —— 飞轮转动惯量
 ω —— 飞轮角速度
 T_M —— 飞轮输出力矩
 T_d —— 常值干扰力矩
 I_x —— 卫星绕俯仰轴的转动惯量
 θ —— 卫星俯仰角
 $\dot{\theta}$ —— 卫星俯仰角速度
 $C(s)$ —— 前向补偿网络
 $W(s)$ —— 飞轮速度反馈网络
 二、反作用飞轮主要技术规格及结构特点

1. 技术规格

反作用飞轮由飞轮和驱动电动机组成。电动机定于固定在卫星相应的轴线上。星上只有太阳能电池供电，而且环境真空度达 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ 托，常规直流电动机的机械换向会引起换向火花、换向面磨损等问题，因此本方案采用了具有良好换向特性、线性调节特性、无须维护保养以及没有换向火花引起的无线电干扰等突出优点的无刷直流电动机。

$$\text{反作用飞轮的机械时间常数: } T_M = \frac{I_M \omega_0}{T_{sc}}$$

- 式中 I_M —— 飞轮转动惯量
 ω_0 —— 电动机空载角速度
 T_{sc} —— 电动机启动力矩

最大角动量与去饱和时间间隔有如下关系。

式中 T_d 常值干扰力矩总和

T 每两次去饱和的时间间隔,

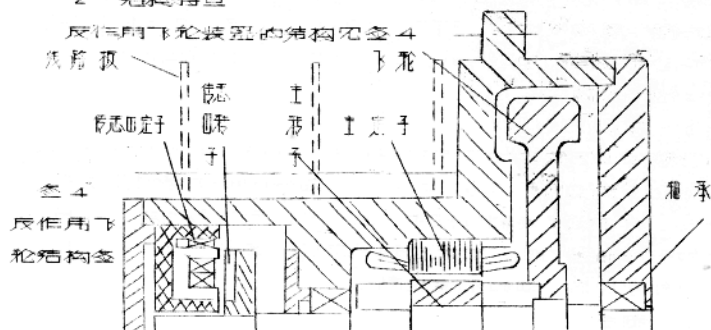
可见如果 $I_m W_0$ 太小，时间间隔 T 小，喷汽量增多，喷汽次数增多，将影响系统的精度及可靠性，而 $I_m W_0$ 太小的话，将使功耗及重量增加，过高的 W_0 还会影响轴承的寿命，我们最后确定的技术规格见表 5。

表 3 校木規格

卫星名称	风云一号气象卫星
项目	
电源电压 V_N	28 伏
驱动力矩 T_{St}	4 ~ 400 克·厘米
空载转速 n_0	2500 转/分
最大角动量 H	10000 克·厘米·秒
控制方式	速度控制、能正、反转、调速范围 $\pm 10\% \sim \pm 100\%$ ，调速特性随控制电压线性变化

此外，该装置在 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ 托高真空度下必须能运行一年以上，同时能经受卫星发射过程中的振动、冲击、离心应力等条件的考验。

2 结构特点



它由电动机、飞轮以及安装在机壳外的散块环形电路板组成。

a 电动机

电动机是电子换向式的无刷直流电动机，主定子由 0.2 毫米 G D 41 硅钢片迭压而成，以尽量减小功耗。定子为 15 槽，嵌有三相短距绕组，按星形连接。这样的分散绕组可减小较小气隙时的齿槽谐波影响，主转子采用无柱形立尖磁钢，充成两极，由于带有飞轮，转子转动惯量大，所以本电机能克服通常无刷直流电动机力矩波动较大的影响。为了减少晶体管散，减少故障中，本电机采用了最简单的三相星形绕组连接，非桥式电子开关电路，即所谓一相零通三相二状态。

传感中采用了抗震性强，输出幅度大而稳定的磁电式传感中，我们采用了便于加工的轴向气隙装配式结构。传感中转子把 135° 的 M X —— 2000 高导磁铁氧体扇形片用环氧树脂浇铸在非磁性金属圆盘上，与主转子同轴。传感中定子由 M X —— 2000 高导磁铁氧体迭压绕组组成，为了方便地给面正反转控制信号，我们将 6 个 D 型磁芯用环氧树脂浇铸在胶木的元环座上，在近内无磁芯上绕过了六组有共同的励磁线圈，而在外围相隔 60° 的六个磁芯面上绕着仅号线圈，传感中定子是六个共尾边激磁的含有气隙的变压器，若 1、3、5 仅号线圈给面信号时，电动机正转，则当 2、4、6 仅号线圈给面信号时，电动机反转。它方便地将通常所需的正、反转二套传感中合併成一套，体积小紧凑，这种 D 型磁芯成型方便，通用性亦强，可用于多极形式，定、转子传感中磁芯端面都经磨削加工，以保证气隙均匀。我们选取了 0.5 mm 的轴向气隙。

b 飞轮

飞轮由强度较大的黄铜材料制成，外径 150 mm，重量 1.4 kg，转动惯量 $509 \text{ cm}^2 \text{Sec}^2$ ，轴向用四个螺钉紧固在压圈上，为了减小发射过程中，由于共振而加剧的应力，将飞轮放置在轴承内侧，放大了轴承直径，选用了 $\phi 22 \times \phi 10 \times 8$ 的轴承规格，轴的刚度较高。

c 轴承

采用了滚珠轴承干膜润滑方式，以保证高转速下的寿命要求。

三 无刷直流电动机的性能方程与传达函数

1 性能方程

众所周知，直流电动机的电压方程式为

$$V = I R_a + E \quad (3)$$

式中 V —— 电压电压 I —— 电枢电流

R_a —— 电枢电阻 E —— 反电动势

无刷直流电动机的各相绕组，按一定的逻辑关系依次导通，它的定子电枢磁场是跳跃式的，相电流是脉动的，从而造成力矩波动，见图 5。

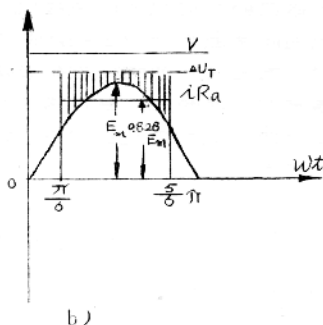
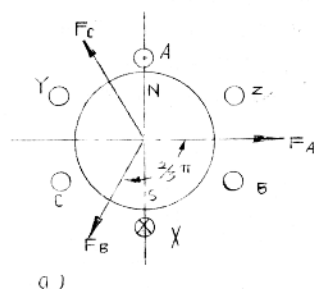


图 5 无刷直流电动机的原理图及波形图

以一付二极，三相绕组星形连接，非桥式电子开关电路为例。假定气隙磁感应按正弦规律分布，忽略绕组换断时的过渡过程，忽略绕组电感的影响，它的瞬间电压平衡方程式及平均电压平衡方程式分别为。

$$V = a V_T = i R_a + E_m \sin \omega t \quad (4)$$

$$V = a V_T = I_{av} R_a + E_{av} \quad (5)$$

$$E_{av} = 0.828 E_m \quad (6)$$

式中 V —— 电压电压

$a V_T$ —— 换向开关管管压降

I_{av} —— 电枢电流平均值

E_{av} —— 反电动势平均值

E_m —— 反电动势峰值

将式(3)与式(5)比较,可见若用平均面处理变化的电流,无刷直流电动机的电压方程式和一般直流电动机的电压方程式是完全相同的,众所周知,这两种电动机基本作用原理是相同的,但是我们认为它们之间还存在下述的区别。

a 一般直流电动机的电枢磁场与主磁场在空间都是静止的,相对也是静止的,无刷直流电动机的电枢磁场在一个磁状态范围(如 120°)内是静止的,相对来说,主磁场是旋转的,因此电枢反应的形响是变化的。b 一般直流电动机各支路的电流是完全一样的,而无刷直流电动机每匝的那绕组和不导通的各相绕组电流是完全不同的。c 直流电动机正在换向的绕组元件被电刷所短路,因此交变电流在电感上的形响,完全可以忽略,无刷直流电动机没有电刷,换流过程中电流突变在电压(自感或互感)上的形响不能忽略。基于上述分析,无刷直流电动机性能方程应该按下述矩阵形式表示。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{di_n}{dt} \end{pmatrix} + \frac{d\theta}{dt} \begin{pmatrix} \frac{d\psi_1}{d\theta} \\ \frac{d\psi_2}{d\theta} \\ \vdots \\ \frac{d\psi_n}{d\theta} \end{pmatrix}$$

式中 n 绕组相数 V_n 第 n 相绕组两端电压
 R_n 第 n 相绕组电阻 L_{nn} 第 n 相绕组自感
 L_{n1} 第 n 相绕组与第 1 相绕组之间的互感
 i_n 第 n 相绕组电流瞬时值
 θ 转角 ψ 转子磁通

2 传递函数

为了简化分析,我们仅就简化形式的方程式讨论,在动态过程。

$$U = iR_a + L \frac{di}{dt} + E \quad (\text{忽略开关管压降}) \quad (8)$$

$$E = k_E \omega \quad (9)$$

k_E ——反电势常数

ω ——转子角速度

$$T = k_T i = I_m \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

T ——电磁转矩 k_T ——转矩常数

I_m ——转子转动惯量 $\frac{d\omega}{dt}$ ——角加速度

由 (8) (9) (10) 三式可得

$$U = \frac{R_a I_m}{k_T} \frac{d\omega}{dt} + \frac{L I_m}{k_T} \frac{d^2\omega}{dt^2} + k_E \omega \quad (11)$$

按拉氏变换

$$\begin{aligned} \frac{\omega(s)}{U(s)} &= \frac{k_T}{s^2(L I_m) + s(R_a I_m) + k_E k_T} \\ &= \frac{1/k_E}{s^2 \left(\frac{L I_m}{k_E R_T} \right) + s \left(\frac{R_a I_m}{k_E k_T} \right) + 1} \quad (12) \end{aligned}$$

令

$$T_m = \frac{R_a I_m}{k_E k_T} \quad \text{电动机机械时间常数}$$

$$T_e = \frac{L}{R_a} \quad \text{电动机电气时间常数}$$

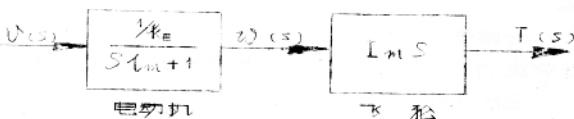
则 (12) 式可表达为

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{1/k_E}{s^2 T_m T_e + s T_m + 1} \quad (13)$$

当 $T_m \gg T_e$ 时, (13) 式可简化为

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{1/k_E}{(s T_m + 1)(s T_e + 1)} \approx \frac{1/k_E}{s T_m + 1} \quad (14)$$

因此电动机及负载作用下的系统方块图表示如下



当有速度反馈时（通常在预定装置中只用负反馈），设反馈量为 β ，则对一个惯性环节，它的时间常数和放大倍数都减小到原来的 $\frac{1}{1+\beta k}$ ($k = \frac{1}{k_E}$)，上述装置引入速

度负反馈后的传递函数的表示如下。

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k}{1+k\beta}}{\frac{T_m}{1+k\beta} S + 1} \quad (15)$$

四 电子线路

无刷直流电动机的电子换向线路能被当位置传感器中的精密位置传感器接电机绕组，以保证电机可靠运行。无刷直流电动机配备了适当的电子换向线路后即能得到许多优异的性能，使无刷直流电动机能适应多种用途。我们为反作用飞轮配备的无刷直流电动机的电子线路有以下特点。

① 采用脉冲调宽方法调节电动机转速，因而功耗小，工作可靠。

② 电动机绕组和相应的功率级采用简单可靠的三相星形绕组—相导通三状态的工作方式。虽然，这样引起的电动机转矩脉动将较大，但它带有 $30(9 \cdot \text{cm} \cdot \text{Sec}^2)$ 的惯性负载，故相应的速度波动并不大。在气浮台上的系统模拟试验证明这种简单的功率电路完全能满足要求。

③ 采用正反转二细纹编码器通过一定的逻辑控制能方便地实现正反转。

④ 从位置传感器中的精密位置器通过一定的逻辑处理，引出正比于转速的速度脉冲。它既向系统输出速度脉冲信号，同时在速度控制中通过一定的变换作为速度负反馈用，从而省略了专门的测速装置。

⑤ 脉冲调宽电路采用逻辑放大电路构成所需电路，可以

方便地引入各种负反馈（例如速度反馈、电流反馈等）

⑥ 在电机减速过程中应接入能耗制动线路，以保证在失电、高寒空载环境条件下电机仍能较快的减速。

⑦ 整形及测速脉冲形成电路由 CMOS 集成电路，按照一定的逻辑关系组成，具有功耗小、抗干扰能力强、以及电压适用范围大等特点。

电子线路的逻辑框图如下：

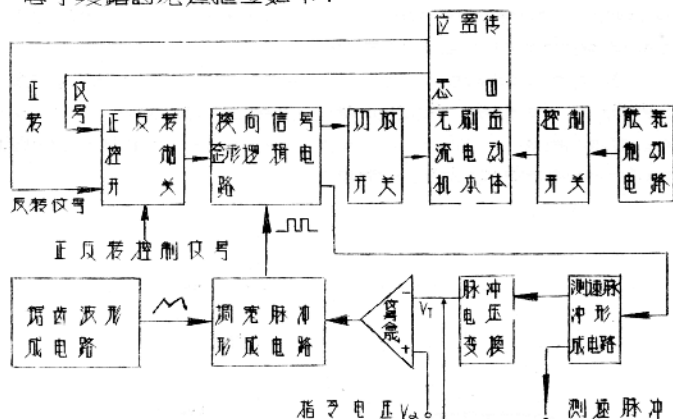


图 6 电子线路逻辑框图

速度反馈电压，测速脉冲

下面对几个主要环节作一简单介绍

1 调宽脉冲电路

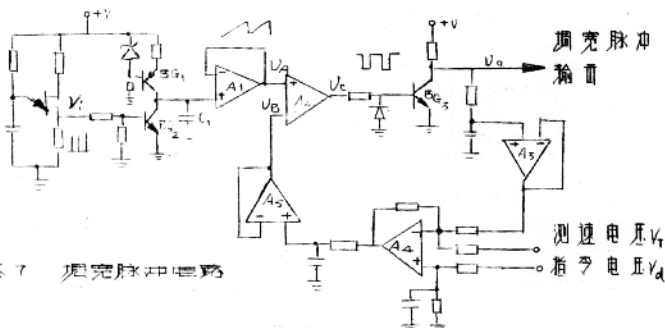


图 7 调宽脉冲电路

它经后锯齿波形成，仅与合成反比较中三个主要元件
锯齿波形成电路中，用单结晶体管构成锯齿波振荡器，其
频率为 500 周左右，输出的尖脉冲经开关管 BG2 短暂导
通，晶体管 BG1 构成一恒流源给电容 C1 充电，C1 的电
压线性上升构成锯齿波的上升段，BG2 的短暂导通使电容
C1 的电压迅速下降放电而构成锯齿波的下落段。

运放放大中 A4 构成误差合成电路，指令电压 V_d 从同
相端输入，速度反馈电压 V_T 从反相端输入，从而能方便地
在基准电压中引入速度负反馈。

合成误差经电压跟随器 A5 构成可调基准电压 V_E 送入
比较器 A2 反相端，锯齿波电压经电压跟随器 A1 送入比较
器 A2 的同相端，比较器 A2 的输出经 BG3 管倒相整形后送
至脉冲宽度调制电路进行脉宽调制。

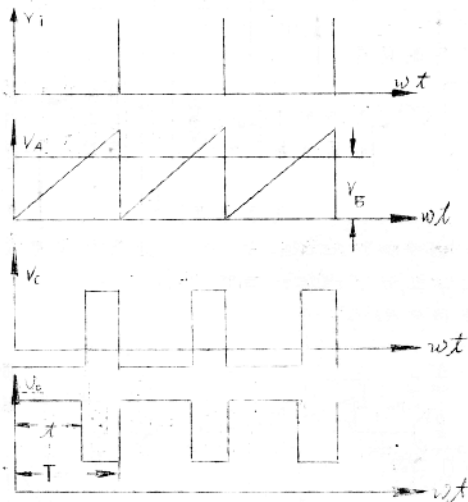


图 8 电压波形各

图 8 给出 V_i 、 V_A 、 V_C 及 V_E 各点波形，可见输出脉冲
占空度 $\left(\frac{\tau}{T}\right)$ 随指令电压校正而变化。

该系统要求当 V_d 在 0 ~ 10 V 范围内变化的时，输出脉冲
占空度应在 0 ~ 100% 范围内变化。