

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.03.020

空间矢量 SVPWM 控制算法在变频空调设计中的应用

朱福成

(绵阳职业技术学院 信息工程系, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为进一步减少噪音, 提高电压利用率, 采用空间电压矢量 SVPWM 技术进行变频空调设计。以三相对称正弦波电压供电时交流电动机的理想磁通为基准, 用逆变器不同的开关模式所产生的实际磁通去逼近基准圆磁通, 由它们比较的结果决定逆变器的开、关, 形成 PWM 波形。并把逆变器和电机看成一个整体来处理, 具有模型简单、转矩脉动小、噪音低、电压利用率高等优点。理论分析及实验结果表明, 该方法完全能够满足变频空调的设计要求。

关键词: PWM; SPWM; SVPWM; 空间矢量; 变频器; 变频空调

中图分类号: TP301.6; TM4 **文献标志码:**

Application of SVPWM Control Method Based on Space Vector in Inverter Air-Conditioner Designing

Zhu Fucheng

(Dept. of Information & Engineering, Mianyang Vocation & Technical College, Mianyang 621000, China)

Abstract: To further reduce the noise, raises the efficiency of voltage, the voltage space vector SVPWM technology be adopted to design inverter air-conditioner. By the basic standard of motor's ideal magnetic flux with three-phase symmetrical sine wave voltage power supply is considered, use the actual magnetic flux with the inverter different switch pattern to approach the base director circle magnetic flux, compares the results to decide which time the inverter's switches open and pass, forms the PWM waveforms. And regards the inverter and the electrical motor as a whole to process, It has the merit of model to be simple, the torque pulsation be small, the noise be low, voltage use factor higher and so on. The theoretical analysis and the experimental result indicated that this method can definitely satisfy the inverter air-conditioner designing requirements.

Keywords: PWM; SPWM; SVPWM; space vector; inverter; inverter air-conditioner

0 引言

PWM 技术是利用半导体器件的通断, 把直流电压变成一定形状的电脉冲序列, 以实现变频、变压和抑制谐波的技术。最常用的 PWM 技术是正弦 PWM 即 SPWM, 其脉宽按正弦规律变化, 因此能有效抑制低次谐波, 并使电机工作在近似正弦的交变电压下。同时, 转矩脉动小, 大大扩展了交流电机的调速范围。但 SPWM 电压利用率低, 其输出电压有效值只能达进线电压的 0.864 倍。

与电压正弦 PWM 不同, 电压矢量 SVPWM, 即磁通正弦 PWM 技术是从电机的角度出发, 着眼于如何使电机获得幅度恒定的圆形磁通, 即正弦磁通。它以三相对称正弦波电压供电时交流电动机的理想磁通为基准, 用逆变器不同的开关模式所产生的实际磁通去逼近基准圆磁通, 由它们比较的结果决定逆变器的开、关, 形成 PWM 波形。由于它把逆变器和电机看成一个整体来处理, 所得模型简单, 便于微机实时控制, 并具有转矩脉动小、噪音低、

电压利用率高等优点。理论分析表明, SVPWM 具有输出电压正弦波调制时可提高 15%, 谐波电流有效值的总和接近最小。为进一步减少噪音, 提高电压利用率, 笔者采用空间电压矢量 SVPWM 技术进行变频空调设计。

1 SVPWM 原理

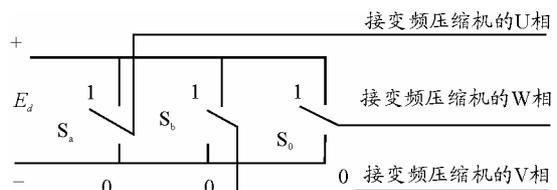


图 1 电压型逆变器原理图

电压型逆变器原理如图 1, 其输出电压矢量为:

$$\vec{U} = \vec{U}_A + a\vec{U}_B + a^2\vec{U}_C = E_d [(-1)^{-S_a} + a(-1)^{-S_b} + a^2(-1)^{S_c}] \tag{1}$$

对电机定子绕组而言:

$$U = RI + d\phi / dt \tag{2}$$

忽略 R , 当定子上施加三相对称正弦电压时,

收稿日期: 2010-10-10; 修回日期: 2010-11-01

作者简介: 朱福成 (1969—), 男, 四川人, 羌族, 硕士学位, 副教授, 从事电子信息工程技术、通信技术、传感器与检测、通信软件和应用电子技术研究。

由于电压合成矢量为等幅值旋转矢量，电机腔内旋转磁场矢量端轨迹近似为圆形，因此三相逆变器的目标是输出理想的三相正弦电压。三相桥式逆变器输出电压只有 8 种状态，如图 2，只能用这 8 个矢量线性组合近似去模拟等幅旋转矢量。

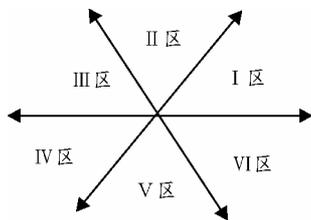


图 2 空间矢量及其分布

由式 (1)、式 (2) 知，当空间矢量非零时，定子磁通将沿着空间矢量的方向以正比于 E_d 的速度移动；当其为 0 时，定子磁通就停下来。空间矢量 PWM 控制就是通过分配空间矢量及其作用时间来调整磁通的旋转速度变化，以保证磁通接近圆形。

用 8 个矢量近似合成等幅旋转矢量方法如下：将一个周期等分为 $6N$ 个小区间，当参考矢量 \vec{U}_r 位于图 2 中大区间 i ($i=I, II, III, IV, V, VI$) 时，用该区间的 2 个非零矢量和一个零矢量合成该参考矢量，如在 I 区间时，参考矢量 \vec{U}_r 用 \vec{U}_1 和 \vec{U}_2 及零矢量 \vec{U}_0 合成。当采样时间足够短时，理论上合成电压矢量是任意的，3 个矢量施加的时间 t_i 、 t_j 及 t_0 或者 t_7 可以由三角正弦定理求得，参见式 (3)~式 (5)。 t_i 、 t_j 等可一次加满，也可平均分多次施加在整个采样区间。零矢量使用 $\vec{U}_0(0, 0, 0)$ 还是 $\vec{U}_7(1, 1, 1)$ ，应以减少开关器件动作次数为原则。在 2 个连续的采样周期内对电压矢量进行积分，可得到 SVPWM 的隐含调制函数为：

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt{3} \sin \omega_1 t & (0^\circ \leq \omega_1 t < 30^\circ) \\ \sin(\omega_1 t + 30^\circ) & (30^\circ \leq \omega_1 t < 90^\circ) \end{cases}$$

从上述分析及图 3 可见，SVPWM 的调制相当于在原正弦波上叠加了一个三次谐波。

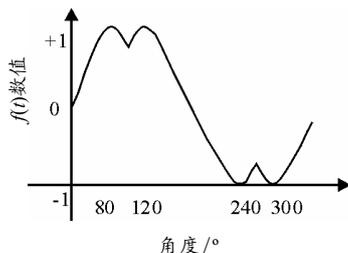


图 3 SVPWM 调制波形

针对空调逆变器，设计如下的矢量合成原则：

每一矢量均分两次发出，且 $\vec{U}_0(0, 0, 0)$ 应插在 \vec{U}_2 和 \vec{U}_2 、 \vec{U}_4 和 \vec{U}_4 、 \vec{U}_6 和 \vec{U}_6 之间发出， $\vec{U}_7(1, 1, 1)$ 插在 \vec{U}_1 和 \vec{U}_1 、 \vec{U}_3 和 \vec{U}_3 、 \vec{U}_5 和 \vec{U}_5 之间发出，使得每次矢量切换，逆变器各臂只经过一次开关动作，从而实现开关优化，降低开关频率。

照此原则，设计各区间各矢量顺序作用如下，其中，矢量 $\vec{U}(u, v, w)$ 中的 (u, v, w) 代表 PWM 的三相，其值为 1 表示相应的逆变器 IGBT 导通，为 0 则表示断开（或者反过来也可以）。

I 区： $\vec{U}_0(0,0,0) \rightarrow \vec{U}_2(0,0,1) \rightarrow \vec{U}_1(0,1,1) \rightarrow \vec{U}_1(0,1,1) \rightarrow \vec{U}_2(0,0,1) \rightarrow \vec{U}_0(0,0,0)$

II 区： $\vec{U}_2(0,0,1) \rightarrow \vec{U}_3(1,0,1) \rightarrow \vec{U}_7(1,1,1) \rightarrow \vec{U}_7(1,1,1) \rightarrow \vec{U}_3(1,0,1) \rightarrow \vec{U}_2(0,0,1)$

III 区： $\vec{U}_0(0,0,0) \rightarrow \vec{U}_4(1,0,0) \rightarrow \vec{U}_3(1,0,1) \rightarrow \vec{U}_3(1,0,1) \rightarrow \vec{U}_4(1,0,0) \rightarrow \vec{U}_0(0,0,0)$

IV 区： $\vec{U}_4(1,0,0) \rightarrow \vec{U}_5(1,1,0) \rightarrow \vec{U}_7(1,1,1) \rightarrow \vec{U}_7(1,1,1) \rightarrow \vec{U}_5(1,1,0) \rightarrow \vec{U}_4(1,0,0)$

V 区： $\vec{U}_0(0,0,0) \rightarrow \vec{U}_6(0,1,0) \rightarrow \vec{U}_5(1,1,0) \rightarrow \vec{U}_5(1,1,0) \rightarrow \vec{U}_6(0,1,0) \rightarrow \vec{U}_0(0,0,0)$

VI 区： $\vec{U}_6(0,1,0) \rightarrow \vec{U}_1(0,1,1) \rightarrow \vec{U}_7(1,1,1) \rightarrow \vec{U}_7(1,1,1) \rightarrow \vec{U}_1(0,1,1) \rightarrow \vec{U}_6(0,1,0)$

如图 4，假设 \vec{U}_r 在 I 区间，用 \vec{U}_1 、 \vec{U}_2 、 \vec{U}_0 来合成 \vec{U}_r ，则有：

$$\begin{cases} t_i U_d + t_j U_d \cos 60^\circ = T |U_r| \cos \theta_i \\ t_j U_d \sin 60^\circ = T |U_r| \sin \theta_i \end{cases} \quad (3)$$

式中， U_d 为直流环节电压； T 为一个矢量周期。

令 $|U_r| = (\sqrt{3}/2) \cdot U_d \cdot m$ ， m 为调制深度系数，于是有：

$$\begin{cases} t_i = T \cdot m \cdot \sin(60^\circ - \theta_i) \\ t_j = T \cdot m \cdot \sin \theta_i \quad (0 < \theta_i < 60^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$$t_0, t_7 \text{ 满足 } t_i + t_j + t_0 = T, t_i + t_j + t_7 = T \quad (5)$$

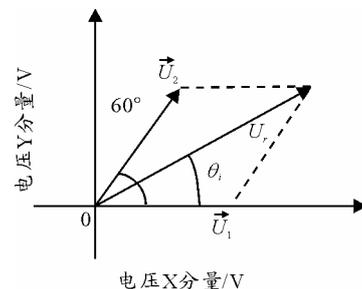


图 4 矢量合成示意图

2 变频空调 SVPWM 数学模型及算法实现

2.1 公式推导

以 MOTOROLA 68HC908MR32 系列变频芯片为例，当 \vec{U}_r 在 I 区时，其矢量合成算法图见图 5，结合 MR32 资料，推导公式如下（其中： c_hacarr

为 half_carrier, 即半周期数值; $titj=t_i+t_j$):

```
pval1=c_hacarr;
pval3=c_hacarr-ti;
pval5=c_hacarr-titj;
```

\bar{U}_r 在其他几区的推导方法相同, 其公式见后面的函数 pwm_calculate_()。

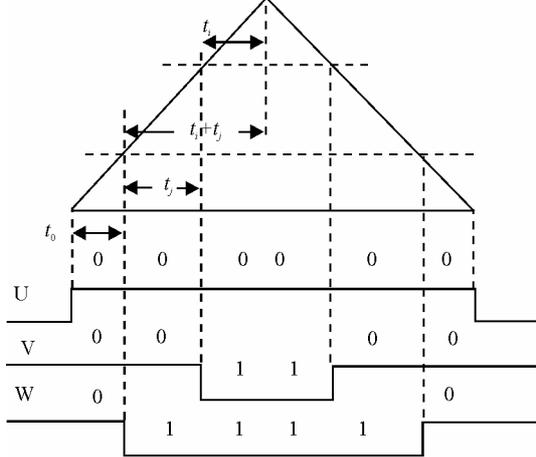


图 5 PWM 合成算法示意图

其算法程序为:

```
void pwm_calculate__(
{
    calcul_divide();
    if(sin_zone_number==0||sin_zone_number>=6){
        /* sin_zone_number 为 Ur 所处的区号*/
        pval1=c_hacarr;
        pval3=c_hacarr-ti;
    }
    else if(sin_zone_number==1){
        pval1=ti;
        pval3=titj;
        pval5=0;
    }
    else if(sin_zone_number==2){
        pval1=c_hacarr-titj;
        pval3=c_hacarr;
        pval5=c_hacarr-ti;
    }
    else if(sin_zone_number==3){
        pval1=0;
        pval3=ti;
        pval5=titj;
    }
    else if(sin_zone_number==4){
        pval1=c_hacarr-ti;
        pval3=c_hacarr-titj;
        pval5=c_hacarr;
    }
}
```

```
else{
    pval1=titj;
    pval3=0;
    pval5=ti;
}
}
pctl1.ldok=1;
}
```

2.2 公式的计算机数字化处理

为了充分利用单片机的 8 位和 16 位存储器其值分别为 0~255 及 0~65 535 的优势, 以及双字组成的 32 位字, 其高 16 位值相当于原 32 位字除以 65 536 结果等特点, 对有关公式数字化处理如下:

由 $t_j = T \cdot m \cdot \sin \theta_i = T \cdot \sin \theta_i \cdot |U_r| / (U_d \cdot \sqrt{3} / 2)$, 且 $|U_r| = V_f$, V_f 为变频压缩机的压频曲线, 得:

$$t_j = T \cdot \frac{V_f}{U_d} \cdot \sin \theta_i / (\sqrt{3} / 2) \approx 6.6 V_f (256 \times \sin \theta_i) / 256$$

其中: T 取 1 600, $U_d \approx 280$ 。

将 $256 \times \sin \theta_i$ 平均分成 256 等分, 算出其值见表 1。可见 $256 \times \sin \theta_i$ 最大为 221, 不重复范围为 0~253 共 254 项。同理可得:

$$t_i \approx 6.6 V_f (256 \times \sin (253 - \theta_i)) / 256$$

其中: T 取 1 600, $U_d \approx 280$ 。

将一个圆等分为 6 份, 分别得到 I、II、III、IV、V、VI 共 6 个电压矢量区, 一个圆对应一个 16 位寄存器, 其范围为 65 536, 每一个区域数字化为 $65\ 536 / 6 = 10\ 922.7 \approx 254 \times 43$ 。

当计算出每个采样周期旋转矢量 \bar{U}_r 走过的角度之累加和 $\sum \Delta \text{phase_point}$ 后, 就可计算出电压矢量 \bar{U}_r 所处的区域号 sin_zone_number 及其角度 θ_i 。算法是: 先算出 $N1 = (\sum \Delta \text{phase_point}) / 43$, 再用 N1 除以 254, 其整数部分就是 sin_zone_number, 其余数就为 θ_i , 254 正好为 $256 \times \sin \theta (0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$ 之不重复的 254 个数据 (见表 1)。计算程序参见 calcul_divide()。

而

$\Delta \text{phase_point} = 65\ 536 * \text{output_f} * \text{carrier_period}$, 其中 output_f 为变频器当前的工作频率, 当载波频率为 2 500 Hz 时, carrier_period = 1 / 2 500, 此时有:

$$\begin{aligned} \Delta \text{phase_point} &= 65\ 536 * \text{output_f} * \text{carrier_period} = \\ &= 65\ 536 * 65\ 536 * \text{output_f} / 2\ 500 / 65\ 536 = \\ &= 6\ 872 * 250 * \text{output_f} / (10\ 000H) \end{aligned}$$

其算法参见函数 void pwm_parameter_just()。

```

void calcu_divide()
{
unsigned char *hl;
unsigned int wa;
union{
    unsigned int wa;
    struct{
        unsigned char w;
        unsigned char a;
    }byte;
}word,pwm_wa,midle_hi;
word.wa=phase_point+=phase_update;
/*phase_update 的计算见函数 void
pwm_parameter_just()*/
pwm_wa.byte.w=(int)word.byte.w/43;
_asm pshh;
_asm pula;
_asm sta word.byte.w;
pwm_wa.byte.a=word.wa/43;
sin_zone_number=pwm_wa.wa/254;
_asm pshh;
_asm pula;
_asm sta sin_alfa;
hl=sin0+253-sin_alfa;
pwm_wa.wa=*hl*vf_coeff;
midle_hi.wa=pwm_wa.byte.w*depth_m_n1;
/*depth_m_n1/ depth_m_n2 =6.6, 但应根据实
际情况适当调整*/
word.byte.w=(unsigned
int)midle_hi.byte.w/depth_m_n2;
_asm pshh;
_asm pula;
_asm sta midle_hi.byte.w;
word.byte.a=midle_hi.wa/depth_m_n2;
if(word.wa>=c_hacarr) word.wa=c_hacarr;
ti=word.wa;
hl=sin0+sin_alfa;
pwm_wa.wa=*hl*vf_coeff;
midle_hi.wa=pwm_wa.byte.w*depth_m_n1;
word.byte.w=(unsigned
nt)midle_hi.byte.w/depth_m_n2;
_asm pshh;
_asm pula;
_asm sta midle_hi.byte.w;
word.byte.a=midle_hi.wa/depth_m_n2;
word.wa+=ti;
if(word.wa>=c_hacarr) word.wa=c_hacarr;
titj=word.wa;
}

```

```

void pwm_parameter_just()
{
vf_looked_table_regester=get_vf_y(freout);
/*根据当前输出频率查 v-f 表, 结果存入 8 位
寄存器 vf_coeff 中*/
vfcoeff_just_acording_to_v_bus();/*根据电网电
压对 vf_coeff 即压频曲线  $V_f$  进行修正补偿*/
word2.wa=250*freout;
word1.wa=6872;
phase_update=_calcu_multiply_2word();
}
unsigned int _calcu_multiply_2word()
{
unsigned char a;
unsigned int h_position_w,place_x1y1,place_x2y2;
union{
    unsigned int wa;
    struct{
        unsigned char w;
        unsigned char a;
    }byte;
}subordinate,place_x1y2,place_x2y1;
place_x2y2=word2.byte.a*word1.byte.a;
place_x1y2.wa=word2.byte.w*word1.byte.a;
place_x2y1.wa=word2.byte.a*word1.byte.w;
place_x1y1=word2.byte.w*word1.byte.w;
subordinate.wa=place_x2y2;
a=0;
subordinate.byte.w+=place_x1y2.byte.a;
_asm rol a;
if(a) ++place_x1y1;
a=0;
subordinate.byte.w+=place_x2y1.byte.a;
_asm rol a;
if(a) ++place_x1y1;
h_position_w=place_x1y1;
h_position_w+=(unsigned
int)place_x1y2.byte.w;
h_position_w+=(unsigned
int)place_x2y1.byte.w;
return(h_position_w);
}

```

表 1 $256 \times \sin\theta(0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$ 之正弦函数表

```

const unsigned char sin0[]={
0x00,0x01,0x02,0x03,0x04,0x05,0x06,0x07,0x08,0x09,0x0a,0x0b,0x0c,0
x0d,0x0e,0x0f,
0x10,0x11,0x12,0x14,0x15,0x16,0x17,0x18,0x19,0x1a,0x1b,0x1c,0x1d,0
x1e,0x1f,
0x20,0x21,0x22,0x23,0x24,0x25,0x26,0x27,0x28,0x2a,0x2b,0x2c,0x2d,0
x2e,0x2f,
0x30,0x31,0x32,0x33,0x34,0x35,0x36,0x37,0x38,0x39,0x3a,0x3b,0x3c,0

```

```

x3d,0x3e,0x3f,
0x40,0x41,0x42,0x43,0x44,0x45,0x46,0x47,0x48,0x49,0x4a,0x4b,0x4c,0
x4d,0x4e,0x4f,
0x50,0x51,0x52,0x53,0x54,0x55,0x56,0x57,0x58,0x59,0x5a,0x5b,0x5c,0
x5d,0x5e,0x5f,
0x60,0x61,0x62,0x63,0x64,0x65,0x66,0x67,0x68,0x69,0x6a,0x6b,0x6c,0
x6d,0x6e,0x6f,
0x70,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7a,0x7b,0
x7c,0x7d,0x7e,0x7f,0x7f,
0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89,0x89,0x8a,0x8b,0
x8c,0x8d,0x8e,0x8f,
0x90,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96,0x96,0x97,0x98,0x99,0x9a,0
x9b,0x9c,0x9c,0x9d,0x9e,0x9f,
0xa0,0xa1,0xa1,0xa2,0xa3,0xa4,0xa5,0xa5,0xa6,0xa7,0xa8,
0xa9,0xa9,
0xaa,0xab,0xac,0xad,0xad,0xae,0xaf,0xb0,0xb0,0xb1,0xb2,
0xb3,0xb3,0xb4,0xb5,0xb6,
0xb6,0xb7,0xb8,0xb9,0xb9,0xba,0xbb,0xbb,0xbc,0xbd,0xbe,
0xbe,0xbf,
0xc0,0xc0,0xc1,0xc2,0xc2,0xc3,0xc4,0xc5,0xc5,0xc6,0xc7,

```

(上接第 63 页)

```

sca_sck=1;
if(sca_miso) ad_buf = ad_buf | 0x0001;
ad_buf <<=1;
_nop_();
sca_sck=0;
_nop_();_nop_();_nop_();
cnt2--;
}
sca_csb=1;
sca_sck=0;
}
//主程序
void main(void)
{
.....
cmd=0x10; //通过 SPI 读 X 通道的加速度
ad_update();
anglex=ad_buf;
cmd=0x11; //通过 SPI 读 Y 通道的加速度
ad_update();
angley=ad_buf;
ang=asin(((float)anglex-1 024) /1 638. 0)*
360/6.28; //差分信号先转换为弧度值, 再转换为角
度
//其中, 1 638 为器件灵敏度
.....
}

```

驻车坡度采集节点的中断程序流程图如图 4。

4 总结

测试结果表明, 该系统能实时采集车辆停驻坡

```

0x0c7,0x0c8,0x0c8,0x0c9,
0x0ca,0x0ca,0x0cb,0x0cc,0x0cc,0x0cd,0x0ce,0x0ce,0x0cf,0x0cf,0x0d0,0
x0d1,0x0d1,0x0d2,0x0d3,0x0d3,0x0d4,
0x0d4,0x0d5,0x0d5,0x0d6,0x0d7,0x0d7,0x0d8,0x0d8,0x0d9,0x0da
,0x0db,0x0db,0x0dc,0x0dc,0x0dd,0x0dd,0x00);

```

3 结论

目前, 根据这一原理设计的交流变频模糊空调控制器, 实验运行效果很好。大量的理论分析和实验验证证明, 该方法完全能够满足变频空调的设计要求。

参考文献:

[1] 周克亮. 空间矢量法 SPWM 全数字化变频器的研制[J]. 电力电子技术, 1998(1): 14-16.
[2] 李永东. 脉宽调制 (PWM) 技术-回顾、现状及展望[J]. 电气传动, 1996(3): 2-12.

度并解算相关制动力, 控制相关驻车系统。该系统的应用延长了电子驻车制动系统的使用寿命, 使电子驻车系统更加节能、经济。

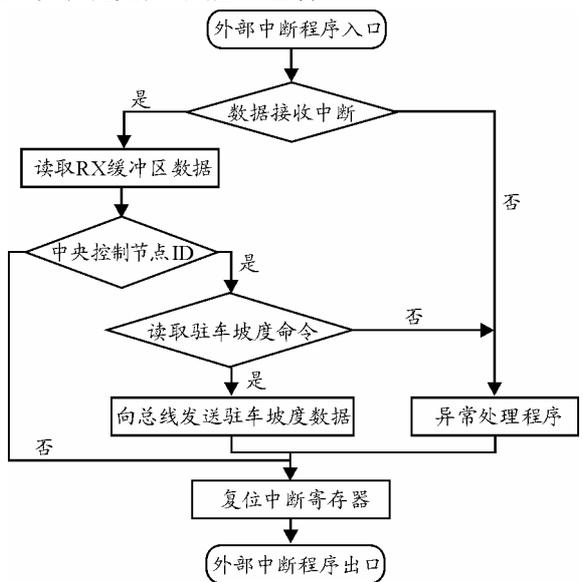


图 4 驻车坡度采集节点的中断程序流程图

参考文献:

[1] 程飞, 过学迅. 汽车线控技术的应用及发展趋势[J]. 上海汽车, 2007(3): 37-40.
[2] 宗长富, 刘凯. 汽车线控驱动技术的发展[J]. 汽车技术, 2006(3):1-5.
[3] 钟伟. 线控制动系统的安全策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2006: 1-15.
[4] 陈宝江. MCS 单片机应用系统使用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
[5] 徐凯. 微控制器抗干扰的软件对策[J]. 电测与仪表, 2002, 39(5): 39-42.
[6] GY8501 CAN232B PC-CAN 总线接口卡使用说明书. 武汉吉阳光电科技有限公司.