

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200610011960.3

[51] Int. Cl.

G01P 3/487 (2006.01)

G01P 13/04 (2006.01)

G01D 5/12 (2006.01)

G01D 5/244 (2006.01)

[43] 公开日 2006 年 10 月 11 日

[11] 公开号 CN 1844930A

[22] 申请日 2006.5.23

[21] 申请号 200610011960.3

[71] 申请人 北京航空航天大学

地址 100083 北京市海淀区学院路 37 号

[72] 发明人 房建成 刘虎 刘刚 孙津济

王志强

[74] 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责任公司

代理人 刘秀娟 成金玉

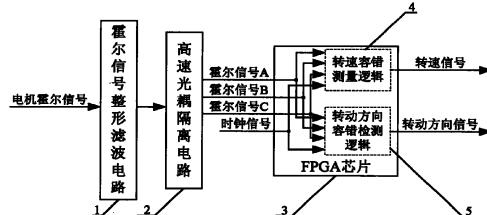
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 4 页

### [54] 发明名称

一种磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置

### [57] 摘要

一种磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，是一种能够利用磁悬浮反作用飞轮系统中无刷直流电机三路霍尔信号进行转子转速和转动方向可靠检测的检测装置，其主要包括霍尔信号滤波整形电路、高速光耦隔离电路和 FPGA 芯片。该装置首先对霍尔信号进行整形滤波，然后经高速光耦隔离后输入 FPGA 芯片，FPGA 芯片利用内部的转速容错测量逻辑和转动方向容错检测逻辑对输入的霍尔信号进行处理得到飞轮转子的转速值和转动方向。本发明利用磁悬浮反作用飞轮系统中无刷直流电机三路霍尔信号实现了转子转速和转动方向的容错检测，在单路霍尔故障情况下仍能实现转速和转动方向的正确检测，提高了转速和转动方向检测的可靠性。



1、一种磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，其特征在于：包括：

霍尔信号整形滤波电路（1）：其输出与高速光耦隔离电路（2）相接，用于将输入的三相电机霍尔信号滤波与整形，滤除霍尔信号中的高频干扰信号并进行波形整形；

高速光耦隔离电路（2）：其输出与 FPGA 芯片（3）相接，用于将电机霍尔信号的参考地与 FPGA 的参考地隔离；

FPGA 芯片（3）：完成磁悬浮飞轮转子转速和转动方向的容错检测，其内部功能包括转速容错测量逻辑（4）和转动方向容错检测逻辑（5）两个模块；转速容错测量逻辑（4）完成飞轮转子转速的容错测量，能够保证单相霍尔故障情况下转速测量结果的正确；转动方向容错检测逻辑（5）完成飞轮转子转动方向的容错检测，在单路霍尔信号故障情况下利用其容错逻辑实现转动方向的正确输出。

2、根据权利要求 1 所述的磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，其特征在于：所述的转速容错测量逻辑（4）包括控制逻辑（6）、计数器（7）、计数值锁存器（8）、计数值选择逻辑（9）和除法器（10），其中控制逻辑（6）完成计数器（7）的计数使能、清零，计数值锁存器（8）的锁存以及除法器（10）的除法操作的控制，其中计数器（7）由三个计算器 A、B、C 组成，计数值锁存器（8）由三个计数值锁存器 A、B、C 组成，利用 T 法原理计数器 A、B 和 C 分别以系统时钟信号的频率对霍尔信号 A、B 和 C 相邻的脉冲间隔计数，计数值分别由计算值锁存器 A、B 和 C 锁存，计数值选择逻辑（9）完成计数值锁存器（8）中三个锁存值的比较，选择三个锁存值的中值作为除法器（10）的除数，除法器（10）进行除法运算得到转速值。

3、根据权利要求 1 所述的磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，其特征在于：所述的转动方向容错检测逻辑（5）包括转动方向检测状态机（11）和转向容错检测逻辑（12），其中转向容错检测逻辑（12）包括多数表决器（13）、2 位增/减计数器（14）和数字滞环比较器（15），转动方向检测状态机（11）由三个状态机构成，三个状态机均使用两个霍尔信号作为输入完成转动方向的检测，多数表决器（13）根据转动方向检测状态机（11）的三个转向信号进行表决，2 位增/减计数器（14）在三相霍尔信号每个信号的上升沿计数，其计数方向由多数表决器（13）的表决结果决定，数字滞环比较器（15）根据 2 位增/减计数器（14）的计数值判断转动方向。

4、根据权利要求 3 所述的磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，其特征在于：所述的数字滞环比较器（15）设置滞环比较值的上限和滞环比较值下限来屏蔽单相霍尔信号故障对转动方向检测结果的影响。

---

## 一种磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置

### 技术领域

本发明涉及一种磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，用于磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的可靠检测。

### 背景技术

飞轮是三轴姿态稳定的中小型卫星上基本的姿态控制执行机构，磁悬浮反作用飞轮相对于传统的机械轴承飞轮具有无转速过零摩擦且可以进行振动主动控制的优点，所以在高精度卫星上具有广阔的应用前景。另外磁轴承没有摩擦，避免了机械轴承本身由于摩擦带来的磨损，其可靠性取决于控制系统电子元器件的可靠程度，因此相对于机械轴承飞轮其具有更长的使用寿命。

磁悬浮反作用飞轮转子极转动惯量与赤道转动惯量比值大(大于1.8)，由陀螺动力学方程(其中 $\Omega$ 为转子转速)

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= f_x = f_{ax} + f_{bx} \\ m\ddot{y} &= f_y = f_{ay} + f_{by} \\ I_x\ddot{\alpha} + I_z\Omega\dot{\beta} &= p_x = -f_{ay}a - f_{by}b \\ I_y\ddot{\beta} - I_z\Omega\dot{\alpha} &= p_y = f_{ax}a + f_{bx}b \end{aligned}$$

可知随着转子转速升高，陀螺效应非常明显。为了抑制陀螺效应，实现磁轴承系统的稳定悬浮，需要根据转子的转速进行解耦控制，因此必须准确的检测飞轮的转速，而磁悬浮反作用飞轮又存在正转和反转两种工作状态，因此为了实现磁悬浮反作用飞轮磁轴承系统的稳定控制，还必须可靠的检测飞轮转子的转动方向。

目前磁悬浮反作用飞轮的转动驱动系统多为有霍尔位置传感器的三相

无刷直流电机。利用霍尔信号采用 T 法即取相邻两个霍尔信号间隔的计数脉冲数的倒数的方法可以实现转速的测量，根据霍尔信号的相位关系也可以很容易的实现转动方向的判断。但是霍尔元件存在故障的可能，如果利用单个霍尔信号采用 T 法进行转速测量，也就存在转速测量结果的不正确的可能。另外，霍尔信号的故障也会造成转动方向判断的错误。对于磁悬浮反作用飞轮来说，转速或者转动方向检测的错误都将造成磁轴承系统的不稳定甚至振动，影响姿态控制系统的正常工作，因此必须采用可靠的方法检测磁悬浮飞轮转子的转速和转动方向。

目前磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测都是使用霍尔信号，但是并没有提供容错机制，因此可靠性低。

## 发明内容

本发明的技术解决问题：克服现有技术的不足，提供一种基于三相霍尔信号的转速和转动方向的容错检测装置，实现在三相霍尔位置传感器的单相信号故障情况下磁悬浮飞轮转子转速和转动方向的正确检测，。

本发明的技术解决方案：一种磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置由霍尔信号整形滤波电路 1、高速光耦隔离电路 2 和 FPGA 芯片 3 三部分构成，

霍尔信号整形滤波电路 1：与高速光耦隔离电路 2 相接，用于将输入的三相电机霍尔信号滤波与整形，滤除霍尔信号中的高频干扰信号并进行波形整形；

高速光耦隔离电路 2：与 FPGA 芯片 3 相接，用于将电机霍尔信号的参考地与 FPGA 的参考地隔离；

FPGA 芯片 3：完成磁悬浮飞轮转子转速和转动方向的容错检测，其内部逻辑功能包括转速容错测量逻辑 4 和转动方向容错检测逻辑 5 两个模块。转速容错测量逻辑 4 完成飞轮转子转速的容错测量，能够保证单相霍尔故障情况下转速测量结果的正确；转动方向容错检测逻辑 5 完成飞轮转子转动方

向的容错检测，在单路霍尔信号故障情况下利用其容错逻辑实现转动方向的正确输出。

本发明的原理：

(1) 转速容错测量的原理：计数值锁存器 8 的三个计数值锁存器 A、B、C 分别记录霍尔信号 A、B、C 各相相邻两个上升沿间隔内系统时钟脉冲的个数。

在霍尔信号 A、B、C 无故障情况下，由 T 法测速的原理可知三个计数值锁存器 A、B、C 的锁存值中最大和最小值相差不超过 2，使用最大值和最小值做除法运算得到的转速值相差很小（尤其在转子低速转动时），完全可以满足磁轴承稳定控制对转速测量精度的要求，因此此时选择三个计数值锁存器 A、B、C 的锁存值的中间值作除法运算可以得到正确的飞轮转子转速。

在单路霍尔故障情况下，假设霍尔信号 A 故障，则计数值锁存器 A 的锁存值将保持不变而不随转子转速变化而变化。如果计数值锁存器 A 的锁存值介于计数值锁存器 B 和 C 的锁存值中间，计数值选择逻辑 9 将计数值锁存器 A 的锁存值给除法器 10 做除法运算得到转速值，该转速值介于使用计数值锁存器 B 的锁存值做除法运算得到的转速值和使用计数值锁存器 C 的锁存值做除法运算得到的转速值之间，由于霍尔信号 B 和 C 正常，因此使用计数值锁存器 B 的锁存值和使用计数值锁存器 C 的锁存值做除法运算得到的转速值都是正确的，所以在计数值锁存器 A 的锁存值介于计数值锁存器 B 和 C 的锁存值中间时用计数值锁存器 A 的锁存值做除法运算得到的转速值是正确的；反之，如果计数值锁存器 A 的锁存值大于或者小于计数值锁存器 B 和 C 的锁存值，计数值选择逻辑 9 将选择计数值锁存器 B 或者 C 的锁存值给除法器 10 做运算得到转速值，由于霍尔信号 B 和 C 均是正常的，因此选择计数值锁存器 B 或 C 的锁存值做除法运算得到的转速值都是正确的，所以在计数值锁存器 A 的锁存值大于或者小于计数值锁存器 B 和 C 锁存值

时用计数值锁存器 A 的锁存值做除法运算得到的转速值也是正确的。

其它霍尔信号故障情况下的分析过程同上，仍然会得出同样的结论。

由上面的分析可以看出该发明实现了单路霍尔信号故障情况下飞轮转子转速的正确测量。

(2) 转动方向容错检测的原理：霍尔信号正常情况下，飞轮转子转动时三路霍尔信号具有  $120^\circ$  的相位差，且具有周期性。假设飞轮转子正向转动时霍尔信号 A 的相位超前霍尔信号 B 的相位  $120^\circ$ ，霍尔信号 B 的相位超前霍尔信号 C 的相位  $120^\circ$ ，则飞轮转子反转时三路霍尔信号的相位关系变为：霍尔信号 C 的相位超前霍尔信号 B 的相位  $120^\circ$ ，霍尔信号 B 的相位超前霍尔信号 A 的相位  $120^\circ$ 。图 6 为正转时三路霍尔信号一周期内的波形。

设高电平为 ‘1’，低电平为 ‘0’，则有：

正转时霍尔信号的状态一周期内的变化为：

A B: “10” → “11” → “01” → “00”

A C: “11” → “10” → “00” → “01”

B C: “01” → “00” → “10” → “11”

反转时霍尔信号的状态一周期内的变化为：

A B: “10” → “00” → “01” → “11”

A C: “11” → “01” → “00” → “10”

B C: “01” → “11” → “10” → “00”

可以看出，正转与反转时霍尔信号状态的变化顺序相反，因此根据霍尔信号的变化即可得出转子的转动方向，依据该原理，下面介绍转动方向检测状态机 11 中的三个状态机的转向检测。

转动方向检测状态机 1 的状态转移过程如图 7 所示。其中 State00、State01、State11、State10 代表霍尔信号的状态，箭头表示状态转移方向，符号 XY/Z 的 X、Y 分别代表霍尔 A、B 的状态（高电平为 ‘1’，低电平为 ‘0’），Z 代表转动方向输出（正转输出为 ‘1’，反转输出为 ‘0’）。

转动方向检测状态机 2 的状态转移过程如图 8 所示，其中 State00、State01、State11、State10 代表霍尔信号的状态，箭头表示状态转移方向，符号 XY/Z 的 X、Y 分别代表霍尔 A、C 的状态（高电平为 ‘1’，低电平为 ‘0’），Z 代表转动方向输出（正转输出为 ‘1’，反转输出为 ‘0’）。

转动方向检测状态机 3 的状态转移过程如图 9 所示。其中 State00、State01、State11、State10 代表霍尔信号的状态，箭头表示状态转移方向，符号 XY/Z 的 X、Y 分别代表霍尔 B、C 的状态（高电平为 ‘1’，低电平为 ‘0’），Z 代表转动方向输出（正转输出为 ‘1’，反转输出为 ‘0’）。

在霍尔信号 A、B、C 无故障情况下，转动方向检测状态机 11 输出的三个转向信号 1、2、3 保持一致（转子正向转动时输出为 ‘1’，反转时输出为 ‘0’），经多数表决器 13 进行多数表决后输出的增/减计数控制信号在转子正转时为 ‘1’，反转时为 ‘0’。数字滞环比较器 15 的设置如图 10 所示，滞环比较上限为 2，滞环比较下限为 1。转子正转时 2 位增/减计数器 14 的计数值将在三相霍尔信号中每相的上升沿都加 1，直到等于最大计数值 3，此时数字滞环比较器 15 输出的转动方向信号为 ‘1’，即正转；转子反转时 2 位增/减计数器 14 的计数值将在三相霍尔信号中每相的上升沿都减 1，直到等于最小计数值 0，此时数字滞环比较器 15 输出的转动方向信号为 ‘0’，即反转。因此，在霍尔信号 A、B、C 无故障情况下本发明实现了转子转动方向的正确检测。

在单路霍尔故障情况下，假设霍尔信号 A 故障，则霍尔信号 A 将保持高电平或者低电平，进一步假设霍尔信号 A 保持高电平，则转子正转时三路霍尔信号的波形、转动方向检测状态机 11 的三个转向信号 1、2、3 及多数表决器 13 输出的增/减计数控制信号将变为下图所示的波形。设高电平为 ‘1’，低电平为 ‘0’。

由图 11 可知，在一个周期内多数表决器 13 输出的增/减计数控制信号有三个 ‘1’ 状态，一个 ‘0’ 状态，即在一个周期内 2 位增/减计数器 14 执

行三次加 1 和一次减 1 操作，因此在设置计数值上限为 3 的情况下 2 位增/减计数器 14 的计数值在每个周期内最终将在 2、3 两个值之间变换。根据数字滞环比较器 15 的逻辑功能，转动方向信号将保持为 ‘1’，屏蔽了霍尔信号 A 的故障，实现了转子转动方向的正确检测。

霍尔信号 A 故障情况下保持低电平和其它霍尔信号故障情况下的分析过程同上，仍然能得出转动方向输出正确的结论。

由上面的分析可以看出该发明实现了单路霍尔信号故障情况下飞轮转子转动方向的正确检测。

实现转向容错检测的关键在于 2 位增/减计数器 14 和数字滞环比较器 15，如果选择位数更多的增/减计数器在转子转动方向变化时将会有大的延时，同时也会增加硬件开销，2 位为最低要求。

该发明的可靠性与现有的检测方案的可靠性对比分析：

系统的中心控制模块是采用 FPGA 实现的，它的可靠性远高于霍尔器件的可靠性，在实际中还可以采用反熔丝技术的 FPGA，因此在可靠性计算时把 FPGA 的故障率近似为 0。假设各路霍尔信号的可靠性相同， $R(t)$  为单路霍尔信号的可靠性，根据电子系统模型，其可靠度随时间的变化服从指数分布，即  $R(t) = e^{-\lambda t}$  ( $\lambda$  为故障率)。

(1) 采用现有方案，检测方案无容错能力，使用单路霍尔信号测量转速，两路霍尔信号检测转动方向，可靠性分析如下：

转速测量的可靠性： $R_{s1}(t) = R(t) = e^{-\lambda t}$

转动方向检测的可靠性： $R_{s2}(t) = R(t) \times R(t) = R(t)^2 = e^{-2\lambda t}$

(2) 利用本发明的方案进行转动方向和转速检测的可靠性：

转速和转动方向检测的可靠性相同，均为三路霍尔信号中单路故障下可正常工作，可靠性计算公式为：

$$R_{s3}(t) = C_3^0 \times R(t)^3 \times (1 - R(t))^0 + C_3^1 \times R(t)^2 \times (1 - R(t))^1 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}$$

可靠性对比曲线如下图所示，坐标系的横轴为单通道的故障与工作时间

的乘积 ( $\lambda \times t$ )，纵轴为可靠度，实际应用中单通道的故障与系统的设计寿命（工作时间）的乘积小于 0.5，因此如图 12 可以说明本发明的可靠性与未进行容错设计的检测方案的可靠性的关系。由曲线可知：利用本发明进行转速测量时的可靠度 ( $R_{s3}(t)$ ) 高于利用单路霍尔信号测量转速的可靠度 ( $R_{s1}(t)$ )；本发明转动方向测量的可靠度 ( $R_{s3}(t)$ ) 同样明显高于利用两路霍尔信号测量转动方向的可靠度 ( $R_{s2}(t)$ )。

本发明与现有的检测方案相比优点在于：本发明利用无刷直流电机三相霍尔信号实现了磁悬浮飞轮转子转速和转动方向的容错检测，提高了转速和转动方向检测的可靠性：

(1) 可以实现在单个霍尔信号故障情况下的转速正确测量，与没有容错能力的方法相比，大大提高了转速测量的可靠性。

(2) 采用容错方法后，在单路霍尔出现故障情况下仍能实现转动方向的正确检测，与未进行容错处理的方法相比更加可靠。

## 附图说明

- 图 1 为本发明的硬件组成框图；
- 图 2 为本发明的转速测量原理框图；
- 图 3 为本发明的计数值选择原理框图；
- 图 4 为本发明的转动方向检测的原理框图；
- 图 5 为本发明的转向容错检测逻辑的原理框图；
- 图 6 为本发明的正转时三路霍尔信号一周期内的波形；
- 图 7 为本发明的转动方向检测状态机 1 的状态转换图；
- 图 8 为本发明的转动方向检测状态机 2 的状态转换图；
- 图 9 为本发明的转动方向检测状态机 3 的状态转换图；
- 图 10 为本发明的数字滞环比较器的输入输出特性图；
- 图 11 为本发明的霍尔信号 A 故障情况下多数表决器的增/减计数控制信号输出波形；

图 12 为本发明的可靠度对比曲线；  
**具体实施方式**

如图 1 所示，本发明的硬件模块主要由霍尔信号整形滤波电路 1、高速光耦隔离电路 2 和 FPGA 芯片 3 三部分组成，霍尔信号整形滤波电路 1 对电机的三相霍尔信号高频滤波，滤除高频干扰信号，然后用施密特触发器整形得到质量比较好的方波信号，高速光耦隔离电路 2 将整形后的霍尔信号进行隔离，FPGA 芯片 3 根据转速容错测量逻辑 4 和转动方向容错检测逻辑 5 对输入的霍尔信号进行处理，得到转子的转速值和转动方向信号。

如图 2 所示，给出了本发明的转速测量原理框图，利用 T 法原理计数器 A、B 和 C 分别以系统时钟信号的频率对霍尔信号 A、B 和 C 相邻的脉冲间隔计数，计数值分别由锁存器 A、B 和 C 锁存，计数值选择逻辑 9 选择三个锁存器中的中值作为除法器 10 的除数，除法器 10 进行除法运算得到转速值。计数器 7 的计数、清零，计数值锁存器 8 的锁存以及除法器 10 的除法运算均由控制逻辑 6 控制，控制逻辑 6 主要完成时序控制功能。

如图 3 所示，给出了计数值选择原理框图。16 位比较器 A、B、C 的输出分别为 X1、X2、X3，均由各自的输入 1 和输入 2 的大小决定：当输入 1 大于输入 2 时输出为 1，反之输出为 0。计数值选择控制依据三个 16 位比较器 A、B、C 的输出 X1、X2、X3 的值决定其输出（计数值 S）的值，如下表所示。

比较结果 (X1 X2 X3)	计数值选择控制的输出 (计数值 S)
0 0 0	锁存值 B
0 0 1	锁存值 C
0 1 1	锁存值 A
1 0 0	锁存值 A
1 1 0	锁存值 C
1 1 1	锁存值 B

如图 4 所示，给出了本发明的转动方向检测的原理框图，转动方向检测状态机 11 中的三个状态机均使用两个霍尔信号作为输入完成转动方向的检测，检测的转动方向为正转时输出为 1，检测的转动方向为反转时输出为 0。三个转向信号 1、2 和 3 由转向容错检测逻辑 12 进行处理，输出转动信号。

如图 5 所示，给出了本发明的转向容错检测逻辑的原理框图。转动方向检测状态机 11 输出的转向信号 1、2 和 3 经多数表决器 13 进行多数表决：当有两个或三个转向信号为 ‘1’ 时增/减计数控制信号为 ‘1’；当有两个或三个转向信号为 ‘0’ 时增/减计数控制信号为 ‘0’。2 位增/减计数器 14 在三相霍尔信号 A、B、C 每个信号的上升沿计数，计数方向由多数表决器 13 输出的增/减计数控制信号决定，当计数值等于 0 且计数方向为减计数时计数值保持为 0，当计数值等于 3 且计数方向为增计数时计数值保持为 3。设置数字滞环比较器 15 的滞环比较上限和比较下限，在 2 位增/减计数器 14 的计数值大于滞环比较上限且当前转向信号为 ‘0’ 时输出正转信号 ‘1’，在增/减计数器 14 的计数值小于滞环比较下限且当前转向信号为 ‘1’ 时输出反转信号 ‘0’。

本发明虽为磁悬浮反作用飞轮转子转速和转动方向的检测装置，但也可以作为一种通用的基于霍尔信号的转速和转动方向的检测装置。

# 说 明 书 附 图

200610011960.3

第1/4页

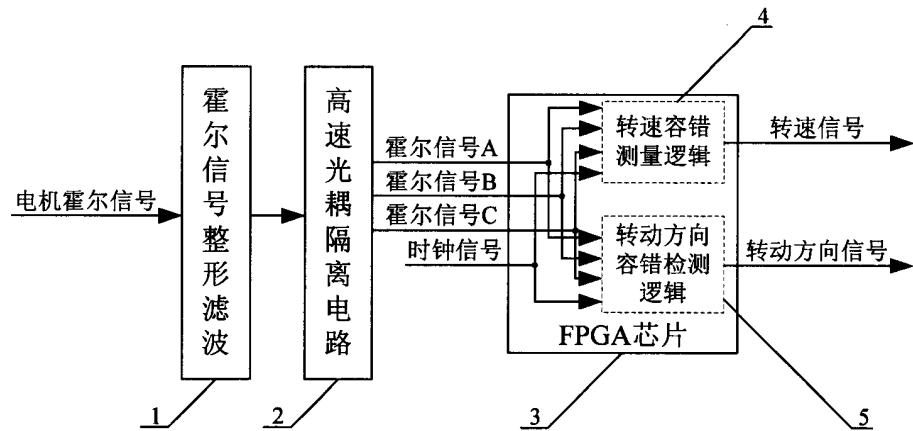


图 1

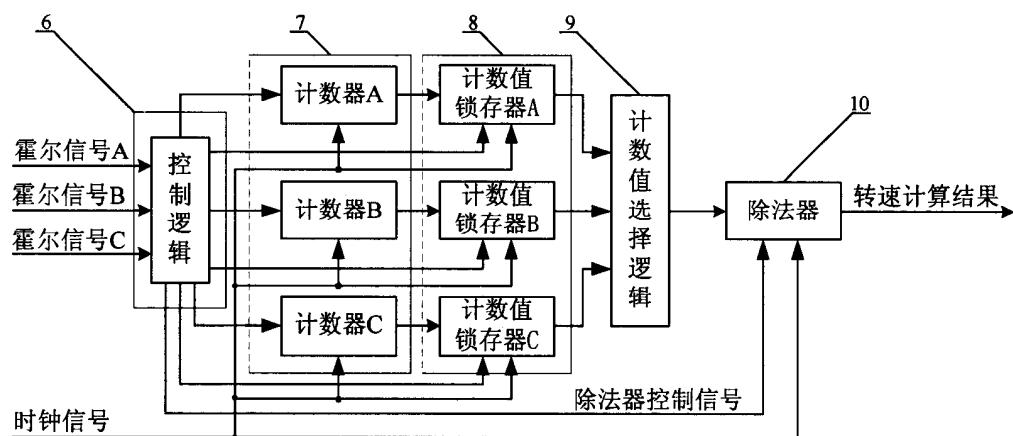


图 2

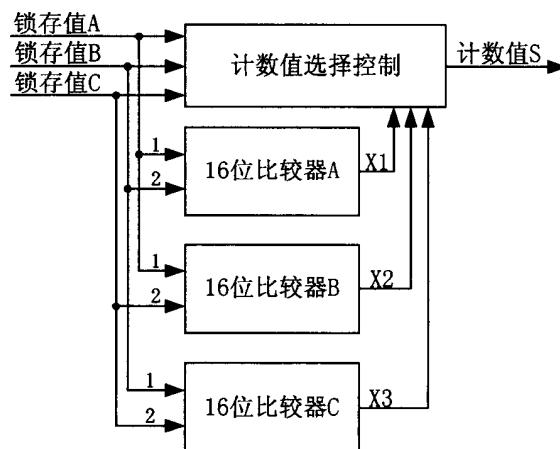


图 3

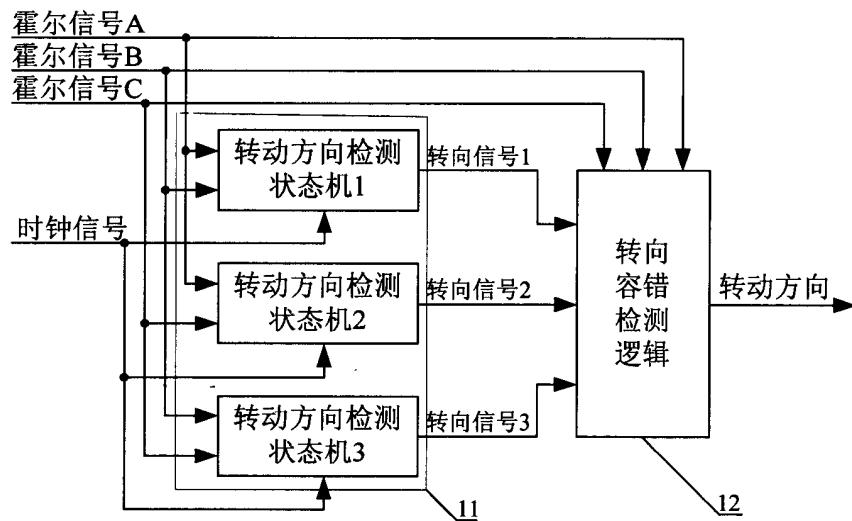


图 4

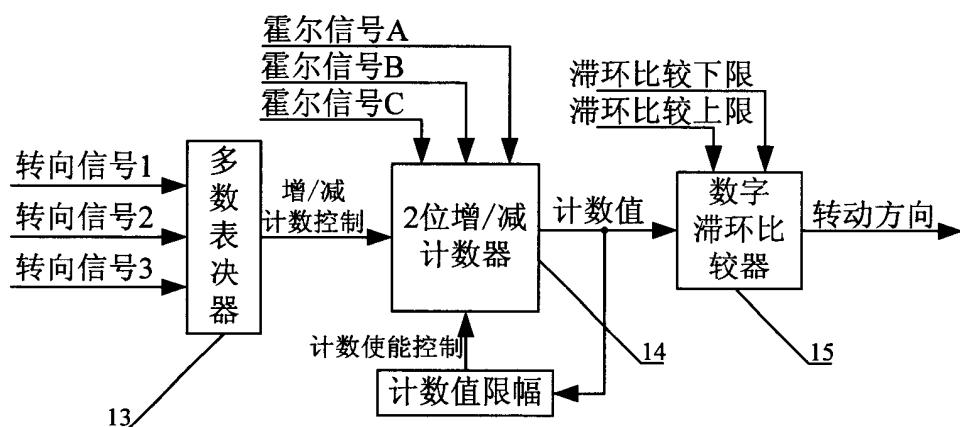


图 5

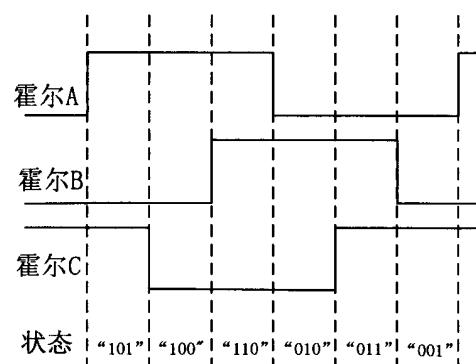


图 6

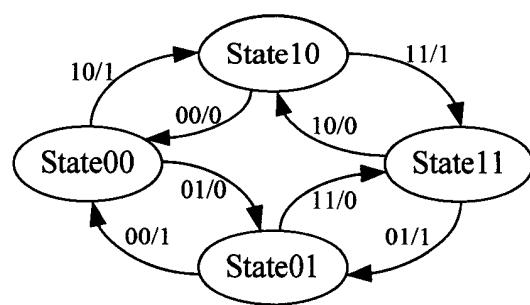


图 7

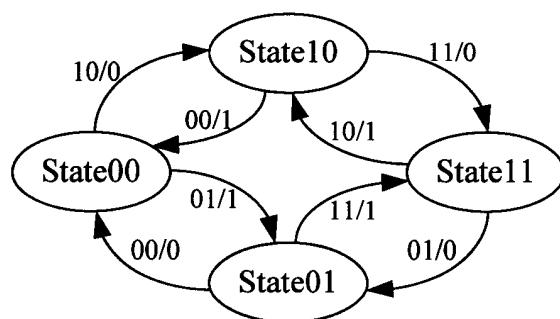


图 8

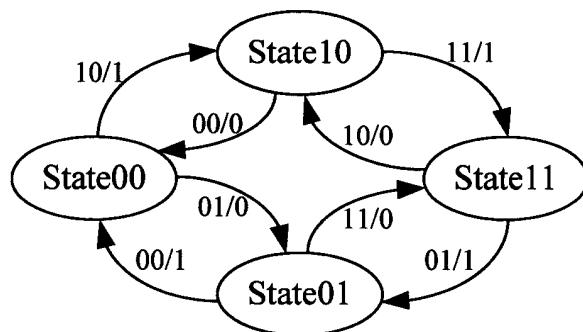


图 9

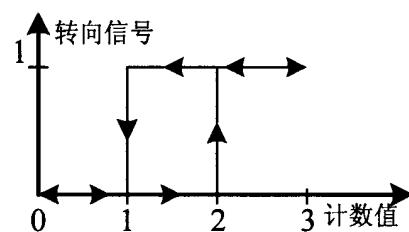


图 10

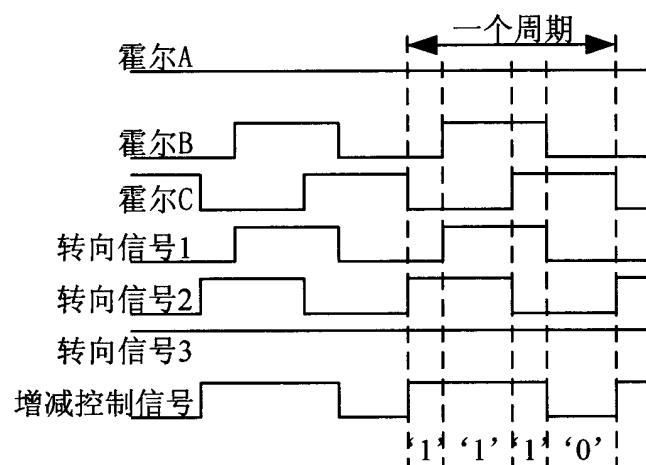


图 11

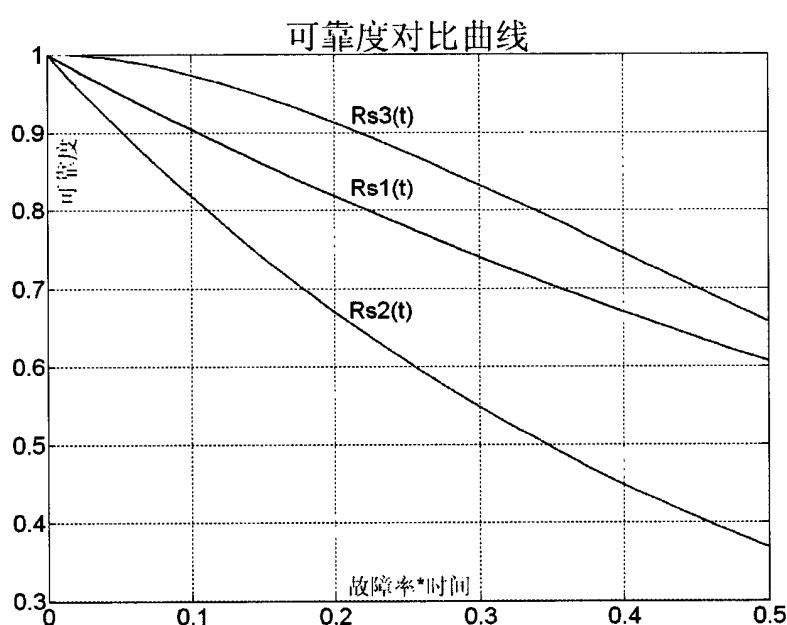


图 12