

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200610097466.3

[51] Int. Cl.

H02P 6/12 (2006.01)

H02P 6/14 (2006.01)

H02P 6/16 (2006.01)

[45] 授权公告日 2008 年 11 月 5 日

[11] 授权公告号 CN 100431256C

[22] 申请日 2006.11.10

[21] 申请号 200610097466.3

[73] 专利权人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市御道街 29 号

[72] 发明人 马长山 周波

[56] 参考文献

CN1100576A 1995.3.22

US5469032A 1995.11.21

CN1146096A 1997.3.26

CN1243939A 2000.2.9

审查员 葛加伍

[74] 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所

代理人 阙如生

权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图 3 页

[54] 发明名称

无刷电机位置信号的故障诊断方法与容错控制方法

[57] 摘要

一种无刷电机位置信号的故障诊断方法与容错控制方法，属电机位置信号故障诊断与容错控制。该故障诊断方法，是直接利用位置信号的上升沿或下降沿和位置信号的状态实时诊断位置信号故障并给出故障种类；容错控制方法是，根据故障种类，对位置信号的边沿触发 DSP 捕获中断方式进行修改或者结合 DSP 实时计算换相信息，实现故障后的容错控制，提高了电机系统的可靠性，拓宽了应用范围。

1、一种无刷电机位置信号的故障诊断方法，其特征在于：直接利用位置信号的上升沿或下降沿和位置信号的状态实时诊断位置信号的故障，同时给出故障的种类；

(a). 对于三相无刷电机位置信号故障诊断的具体方法是：

(1). 电机位置信号发生故障后恒为低电平的故障诊断是，在电机位置信号上升沿捕获进入 DSP 中断后，将本次的中断向量和预测的中断向量相比较，比较结果若不等，则位置信号出现故障；若相等，更新预测的下次中断向量；

(2). 电机位置信号发生故障后恒为高电平的故障诊断是，在上述电机位置信号发生故障后恒为低电平的故障诊断的基础上，同时在电机系统的采样中断中，将位置信号高电平区域分成两个区域，防止相序的误触发中断，实时检测三相位置信号的状态，查下表 1 或表 2 诊断电机系统是否发生故障及其种类；

表 1 三相电机位置信号恒为低的故障诊断

故障种类	XL-X	X	具体故障
一相故障	1	37h	A 相故障
	-2		B 相故障
	1	36h	C 相故障
两相故障	0	36h	B、C 故障
		37h	A、C 故障
		38h	A、B 故障

表 1 XL 为上次进入中断的中断向量，X 为本次进入中断的中断向量，

表 2 三相电机位置信号恒为高的故障诊断

I/O 口电平	X	故障种类
011	36h	B 相故障
	37h	A 相故障
101	36h	C 相故障
	38h	A 相故障
110	37h	C 相故障
	38h	B 相故障
111	36h	B、C 故障
	37h	A、C 故障
	38h	A、B 故障

表 2 中 IO 口电平的第一位是采集 C 相位置信号的电平值，第二位是采集 B 相位置信号的电平值，第三位是采集 A 相位置信号的电平值；

(b). 对于四相无刷电机位置信号故障诊断的具体方法是，将一个位置信号周期分成 I ~ IV 四个区间，通过实时检测位置信号的电平诊断故障，根据位置信号的状态，查下表 3 诊断是否发生故障及其故障种类；

表 3 四相电机位置信号的故障诊断

IO 电平 PQ	区间	状态
00	I	P 相恒为低故障
	II	两相故障
	III	Q 相恒为低故障
	IV	正常
01	I	两相故障
	II	P 相恒为低故障
	III	正常
	IV	Q 相恒为高故障
10	I	正常
	II	Q 相恒为低故障
	III	两相故障
	IV	P 相恒为高故障
11	I	Q 相恒为高故障
	II	正常
	III	P 相恒为高故障
	IV	两相故障

表 3 中区间的划分是指在一个位置信号周期内，以 P 相位置信号上升沿为起点，根据 P、Q 两相位置信号的上升沿和下降沿依次划分为 I、II、III、IV 四个区间，IO 电平的第一位采集 P 相位置信号的电平值，IO 电平的第二位采集 Q 相位置信号的电平值。

2、一种无刷电机位置信号的容错控制方法，其特征在于，根据对无刷电机位置信号故障诊断的故障种类，进行对位置信号的边沿触发 DSP 捕获中断方式进行修改或者结合 DSP 实时计算换相信息，实现故障后的容错控制；

(a). 三相无刷电机位置信号故障的容错控制方法是，(1) 当一相位置信号发生故障时，利用前一相位置信号的下降沿输出换相信息，即将前一相位置信号置成双沿触发 DSP 中断；

(2)当两相位置信号故障后,利用正确位置信号的下降沿代替下一相位置信号的上升沿触发换相信息,同时结合DSP实时计算位置信号高电平维持的一个时间周期,在正确相位置信号下降后的一个时间周期输出另一相位置信号的换相信息,一直到正确相位置信号上升沿来临止;

(b).四相无刷电机位置信号故障的容错控制方法是,当一相位置信号发生故障后,实时计算正确相位置信号高电平时间为2个时间周期,即一相位置信号发生故障后,在相邻相位置信号上升沿一个时间周期后输出上述故障相位置信号上升沿或下降沿的换相信息;在该故障相的相邻相位置信号下降沿一个时间周期后输出故障位置信号下降沿或上升沿的换相信息,一直到相邻相位置信号上升沿来临为止。

无刷电机位置信号的故障诊断方法与容错控制方法

一、技术领域

本发明涉及无刷电机(无刷直流电机、开关磁阻电机,双凸极电机等结构类似的电机)的位置信号有无故障的实时诊断方法,以及在位置信号出现故障后进行容错控制方法。

二、背景技术

对于无刷电机而言,位置传感器是无刷电机正确换相的关键。位置信号出现永久性实效故障后,电机的换相逻辑混乱,输出转矩降低,电机转速下降或为零。在某些高可靠性的系统或者特定场合中,不允许系统出现故障,或者出现故障后应能继续运行一段时间,然后进行故障处理。为提高系统可靠性,使电机能在正确的位置输出换相信息,对位置信号进行故障诊断和容错控制是必要的。

迄今为止,在国内外众多文献中,对无刷直流电机、开关磁阻电机和双凸极电机等无刷电机进行了大量研究。对位置信号的研究局限于位置信号的调整方法,以及位置信号故障的简单描述,但对位置信号的故障诊断及其故障后的容错控制研究都没有涉及。

三、发明内容

本发明的目的是提供一种无刷电机位置信号的故障诊断方法与容错控制方法,提高系统的可靠性。

(I)无刷电机位置信号的故障诊断方法

本发明的无刷电机位置信号的故障诊断方法,直接利用位置信号的上升沿或下降沿和位置信号的状态实时诊断位置信号的故障,同时给出故障的种类。本发明以三相无刷电机需要三个位置传感器和四相无刷电机需要两个位置传感器为例说明。位置信号发生故障后可能有两种状态:

- ① 恒为低电平,即 $H_i \equiv 0, i = A, B, C$;
- ② 恒为高电平,即 $H_i \equiv 1, i = A, B, C$ 。

三相无刷电机位置信号故障的具体方法:

- (1) 恒为低电平的故障诊断:在位置信号上升沿捕获进入 DSP(数字信号处理器)

中断后，将本次的中断向量和预测的中断向量相比，若不等，则位置信号故障出现故障。若相等，更新预测的下次中断向量。

(2) 恒为高电平的故障诊断：在上述(1)的基础上，同时在系统的采样中断中，将位置信号高电平区域分成 t1 和 t2 两个区域，防止相序的误触发中断。实时检测三相位置信号的状态，查表 1 或表 2 诊断系统是否故障及其种类。

表 1 三相电机位置信号恒为低的故障诊断

故障种类	XL-X	X	具体故障
一相故障	1	37h	A 相故障
	-2		B 相故障
	1	36h	C 相故障
两相故障	0	36h	B、C 故障
		37h	A、C 故障
		38h	A、B 故障

表 1 XL 为上次进入中断的中断向量，X 为本次进入中断的中断向量，

表 2 三相电机位置信号恒为高的故障诊断

I/O 口电平	X	故障种类
011	36h	B 相故障
	37h	A 相故障
101	36h	C 相故障
	38h	A 相故障
110	37h	C 相故障
	38h	B 相故障
111	36h	B、C 故障
	37h	A、C 故障
	38h	A、B 故障

表 2 中 I/O 口电平的第一位是采集 C 相位置信号的电平值，第二位是采集 B 相位置信号的电平值，第三位是采集 A 相位置信号的电平值；

四相无刷电机位置信号故障的具体方法：

对于四相开关磁阻电机或双凸极电机而言，只需两个位置信号 P 和 Q。因此可以将一个位置信号周期分成四个区间 I ~ IV，通过实时检测位置信号的电平诊断故障。根据位置信号的状态，查表 3 诊断是否发生故障及其故障种类。

表 3 四相电机位置信号的故障诊断

IO 电平 PQ	区间	状态
00	I	P 相恒为低故障
	II	两相故障
	III	Q 相恒为低故障
	IV	正常
01	I	两相故障
	II	P 相恒为低故障
	III	正常
	IV	Q 相恒为高故障
10	I	正常
	II	Q 相恒为低故障
	III	两相故障
	IV	P 相恒为高故障
11	I	Q 相恒为高故障
	II	正常
	III	P 相恒为高故障
	IV	两相故障

表 3 中区间的划分是指在一个位置信号周期内,以 P 相位置信号上升沿为起点,根据 P、Q 两相位置信号的上升沿和下降沿依次划分为 I、II、III、IV 四个区间,IO 电平的第一位采集 P 相位置信号的电平值,IO 电平的第二位采集 Q 相位置信号的电平值。

(II) 无刷电机位置信号的容错控制方法

本发明的无刷电机位置信号的容错控制方法,是在系统诊断出位置信号故障后,根据故障的种类进行对位置信号的边沿触发 DSP 捕获中断方式进行修改,或结合 DSP 实时计算换相信息,实现故障后的容错控制。本发明以三相无刷电机需要三个位置传感器和四相无刷电机需要两个位置传感器为例说明。具体方法包括:

(1) 三相无刷电机的三相位置信号的特征是,一相位置信号上升沿和前一相为位置信号的下降沿几乎重合。因此,当一相位置信号故障时,可以利用前一个位置信号的下降沿输出换相信息,即将前一个位置信号置成双沿触发 DSP 中断。

(2) 对于三相无刷电机的位置信号,当两相位置信号故障后,可以利用正确相位置信号的下降沿代替下一相位置信号上升沿发出换相信息,同时结合 DSP 实时计算位置信号的高电平维持时间 T ,在正确相位置信号下降沿后 T 时刻输出另一相位置信号的换相信息,一直到正确相位置信号上升沿来临止,其中 T 为一个周期内正确相位置信号维持高电平的时间。

(3) 对于四相无刷电机的两个位置信号 P 和 Q,当一相位置信号发生故障后,实时计算正确相位置信号高电平时间 $2T$ 。如 Q 相位置信号故障后,在 P 位置信号上升沿 T

时间后输出 Q 相位置信号上升沿的换相信息；在 P 相位置信号下降沿 T 时间后输出 Q 相位置信号下降沿的换相信息，一直到 P 相位置信号上升沿来临止，其中 T 为一个周期内正确相位置信号维持高电平时间的一半。

本发明巧妙利用位置信号的触发沿及其电平状态诊断位置信号故障，根据位置信号之间的关系，通过 TMS320LF2407 DSP 对位置信号换相逻辑控制器进行重构，实现位置信号故障后的容错控制，提高系统可靠性，拓宽应用范围。

此方法不需要添加额外硬件，仅利用软件进行故障诊断和容错控制，对无刷电机有较大的实用价值。

附图说明

图 1 是三相无刷电机的三相位置信号示意图

图 2 是三相无刷电机的三相位置信号故障诊断方法示意图

图 3 是改进的三相无刷电机的三相位置信号故障诊断方法示意图

图 4 是 C 相故障后位置信号容错控制示意图

图 5 是 B、C 两相故障后位置信号容错控制示意图

图 6 是四相无刷电机位置信号故障诊断和容错控制示意图

图 7 是捕获中断软件流程图

图 8 是采样中断软件流程图

具体实施方式

1 位置信号故障的种类

三相无刷电机需要三个位置传感器，三个位置传感器在空间上互差 120° ，产生的位置信号如图 1 示，1/3 周期为高点平，2/3 周期为低电平，三个位置信号之间的相位差为 1/3 周期。位置信号故障可以分为三种：① 一相故障；② 两相故障；③ 三相故障。在三种故障中，一相位置信号发生故障的概率最高，其次两相故障，故障率最低是三相同步发生故障。位置信号发生故障后可能有两种状态：

- ① 恒为低电平，即 $H_i \equiv 0, i = A, B, C$ ；
- ② 恒为高电平，即 $H_i \equiv 1, i = A, B, C$ 。

对于 8/6 极等四相开关磁阻电机和双凸极而言，可以用两个位置传感器。两个位置信号如图 6 示，1/2 周期为高电平，1/2 周期为低电平，相位上相差 1/4 周期。因此，位置信号的故障只有①、②两种，其故障诊断和容错控制的方法与三相电机略有不同，将在第 4 节给出。2、3 节为三相电机的故障诊断和容错控制。

2 三相无刷电机位置信号的故障诊断

位置信号的故障诊断是基于 DSP 对位置信号运行状态实时监测，通过对位置信号的边沿或电平变化来诊断位置信号的故障。

2.1 恒为低电平的故障诊断

位置信号故障后电平一直为低，因此不能形成边沿触发进入捕获中断进行换相。三相位置信号 A、B、C 经过整形后直接连到 DSP 的捕获口 cap4~cap6，在每个位置信号上升沿触发中断，进入捕获中断子程序，输出换相逻辑，读取对应的中断矢量分别为 36h、37h、38h（十六进制数）。图 2 左上角为本次进入捕获中断的中断向量，右下角为预测下次进入捕获中断的中断向量。如捕获中断子程序检测到中断向量为 37h，系统判定为 B 相位置信号上升沿触发中断，同时预测下次进入的中断向量为 38h，即 C 相。

在位置信号上升沿触发进入捕获中断后，读取进入中断的中断向量，与预测的中断向量相比，若相同，为正常进入的中断，同时预测下次进入中断的向量，如不相同则为故障。

出现故障后，可以将本次进入中断的中断向量和上次的中断向量相比，若相等为两相位置信号故障。若不等，将上次的中断向量减去本次中断向量，根据它们的差判断相应的故障。令本次中断向量为 X，上次中断向量为 XL，当两次中断向量的差为 1 时，根据本次进入的中断向量，诊断是 A 相故障还是 C 相故障。具体判别如表 1 所示。

对于三相位置信号故障后恒为低的故障诊断将在 2.2 节描述。

2.2 恒为高电平的故障诊断

在位置信号正常情况下为低电平时发生故障，故障后恒为高电平，故障时形成一个上升沿。此上升沿将触发 DSP 进入捕获中断。用 2.1 节的方法可能会将某些故障引起的触发中断认为正常捕获中断。例如在 A 相上升沿之后、B 相上升沿来临前，B 相位置信号发生故障，电平由低变高。同时 DSP 检测到 B 相上升沿触发进入中断。检测本次中断

向量为 37h, 和预测中断向量相同, 即系统认为正常中断, 于是修改换相逻辑, 使系统触发逻辑混乱, 电机输出转矩降低。因此用 2.1 节的故障诊断方法不适合故障后恒为高电平的情况。

但 2.1 节的方法可以将不正确的相序故障进行诊断。如在 A、B 上升沿之间 C 相发生故障, 预测中断向量为 37h, 本次中断向量为 38h。为此, 需要对 2.1 节的方法进行改进, 方法如图 3 示。

以 A 相为例, 通过对每个位置信号的高电平区间分成两个区域 t_1 和 t_2 , 在 t_1 内触发的任何捕获中断都视为不正常中断, 这样可以避免 B 相的误触发中断。根据电机的转速, 调整 t_1 的值, 使 t_2 尽可能短。

通过系统采样中断实时检测三相位置信号的电平, 正常情况下, A 相位置信号上升沿触发进入捕获中断后, 读取三相位置信号电平为 001b (二进制数, 左数第一位代表 C 相、第二位代表 B 相, 第三位代表 A 相), 且一直维持到下一相上升沿为止。同样, B 相进入捕获中断后, 三相位置信号值为 010b。C 相进入捕获中断后, 三相位置信号值为 100b。因此通过实时检测三相位置信号电平就可以判定系统是否故障, 同时根据本次进入的中断向量就可以诊断出故障的种类, 具体的故障诊断如表 2 示。

由上述分析可知, 故障后恒为高电平的故障诊断较恒为低电平要复杂。通过实时监测位置信号的状态, 可以及时诊断位置信号故障, 并给出相应故障指示信号, 提高故障诊断的准确性和快速性, 为有效实现容错控制提供条件。

当系统出现三相故障后, 位置信号电平一直为低或高, 无法触发进入中断。为检测三相故障, 可根据转速设置一个时间 t , 当系统计算超过时间 t 后仍没有位置信号触发进入捕获中断, 且检测到三相位置信号电平为 000 或 111, 则系统判定为三相位置信号故障。

3 三相无刷电机位置信号的容错控制

在系统诊断出位置信号故障后, 通过对不同故障状态下的换相逻辑控制器进行重构, 使得在故障后立即转入相应的处理程序, 减少过渡时间。由于三相位置信号同时发生故障时, 无法确定任一相的基准点, 也无法根据位置信号计算电机的转速, 因此三相位置信号故障后无法实现容错控制。与一相或两相位置信号故障相比, 三相位置信号同

时发生故障的概率很小，因此针对一相位置信号故障和两相位置信号故障进行容错控制研究。

3.1 一相位置信号故障的容错控制

从图 1 可知，一相位置信号的上升沿和前一相位置信号的下降沿完全重合。因此当一相位置信号发生故障时，可以用前一相位置信号的下降沿替代故障信号上升沿。以 C 相位置信号故障为例，可以利用 B 相位置信号下降沿触发中断进入中断子程序，输出 C 相位置信号上升沿时换相信息。在实时检测到故障后，将 B 相位置信号设置为双沿触发，即 B 相位置信号的上升沿和下降沿都能触发进入捕获中断，进行相应的换相逻辑控制，如图 4 示。同理，若 A 相发生故障时，可以使 C 相变成双沿触发；若 B 相故障时，可以使 A 相变成双沿触发。

3.2 两相位置信号故障的容错控制

当两相位置信号发生故障时，利用正确的位置信号下降沿可以替代下一相位置信号的上升沿，但由于一相位置信号只有两个沿，另一相位置信号的上升沿的时刻只能通过精确计算得到。以 B、C 两相位置信号发生故障为例，可以将 A 相位置信号设置双沿触发，此时 A 相的下降沿代替 B 相的上升沿输出换相信息，如图 5 示。由于 A 相位置信号是双沿触发，中断向量都是 36h，需结合位置信号的电平判断是上升沿触发还是下降沿触发。若进入中断后读取电平为 1，则为上升沿触发，同时将定时器的计数值清零，否则为下降沿触发。当下次 A 相位置信号下降沿触发进入中断时，保存定时器的值到变量 T 中，同时输出 B 相位置信号上升沿换相信息。然后在采样周期中，不断读取定时器的值，当定时器的值大于等于 T 时，输出相应的 C 相位置信号上升沿换相逻辑，维持到 A 相上升沿为止，其中 T 为一个周期内正确相位置信号维持高电平的时间。

4 四相无刷电机位置信号的故障诊断和容错控制

4.1 故障诊断

对于 8/6 极四相开关磁阻电机和双凸极电机可以只用两个位置传感器，因此位置传感器的安装位置和三相无刷电机略有不同。两个位置传感器输出的位置信号 P、Q 之间的上升沿和下降沿不是完全重合，但其诊断方法与三相电机相似。

一个位置信号周期可以分成 4 个区域 I ~ IV，四个区域的宽度完成相同。由于每个

区间的 P、Q 信号逻辑电平不同，因此可以根据不同区间的电平状态诊断位置信号的故障，具体如表 3 示。

4.2 容错控制

由于只有两相位置信号，因此当两相位置信号同时故障时无法实现容错控制，本发明给出一相位置信号故障后的容错控制方法。

例如 Q 位置信号发生故障后，通过 DSP 内部定时器实时计算 P 相位置信号一个上升沿与下一个下降沿之间的时间为 $2T$ 。在 P 信号上升沿后的 T 时刻就是 Q 信号的上升沿，P 信号的下降沿后的 T 时刻就是 Q 信号的下降沿。因此，可以通过软件计算复现 Q 信号的信息，实现故障后的容错控制，如图 6 示，其中 T 为一个周期内正确相位置信号维持高电平时间的一半。

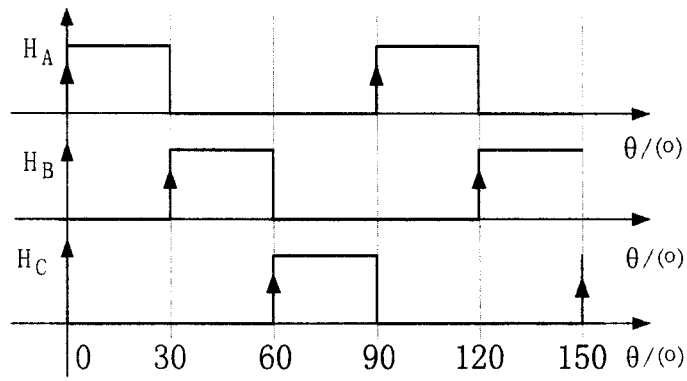


图 1

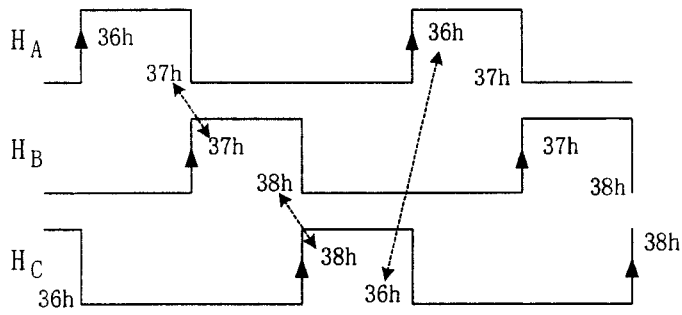


图 2

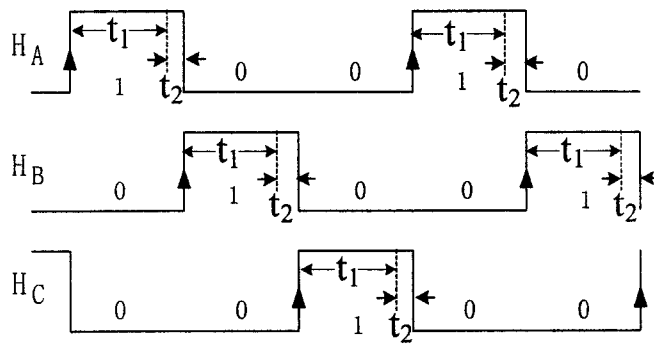


图 3

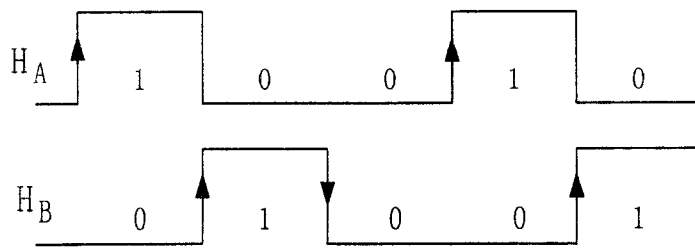


图 4

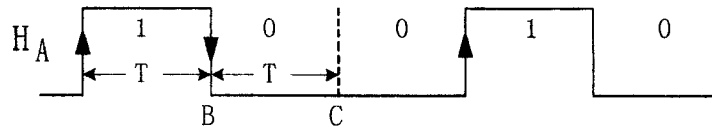


图 5

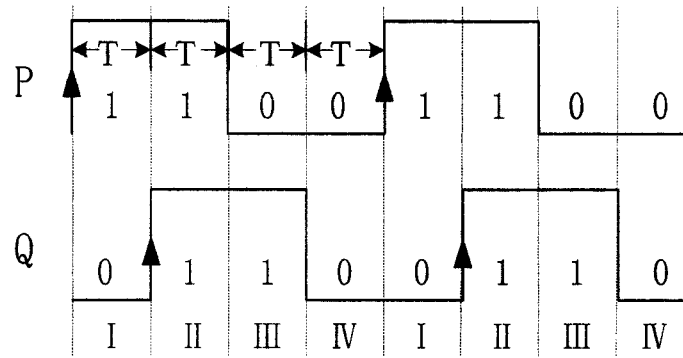


图 6

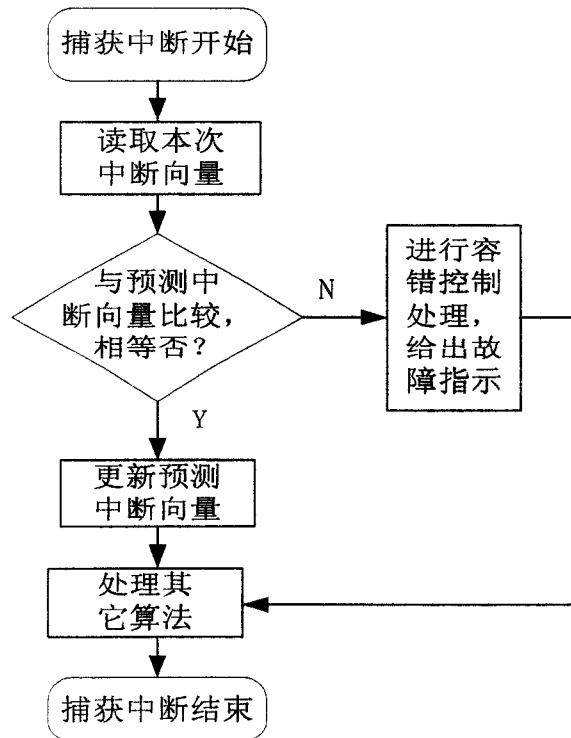


图 7

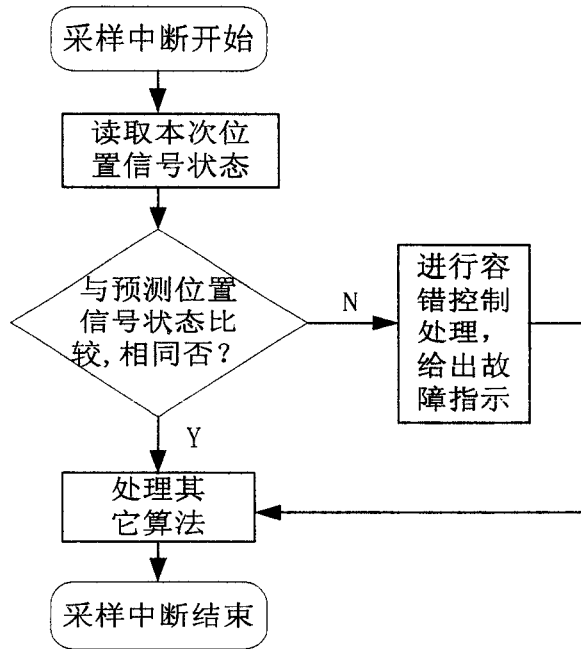


图 8