



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102792128 A

(43) 申请公布日 2012. 11. 21

(21) 申请号 201080058572. 5

(22) 申请日 2010. 12. 16

(30) 优先权数据

09015817. 1 2009. 12. 21 EP

(85) PCT申请进入国家阶段日

2012. 06. 21

(86) PCT申请的申请数据

PCT/EP2010/007716 2010. 12. 16

(87) PCT申请的公布数据

W02011/076365 EN 2011. 06. 30

(71) 申请人 康弗蒂姆技术有限公司

地址 英国沃里克拉格比鲍顿大街

(72) 发明人 理查德·伊恩·斯蒂芬斯

(74) 专利代理机构 北京英特普罗知识产权代理有限公司 11015

代理人 齐永红 常春

(51) Int. Cl.

G01C 21/16(2006. 01)

G01S 5/14(2006. 01)

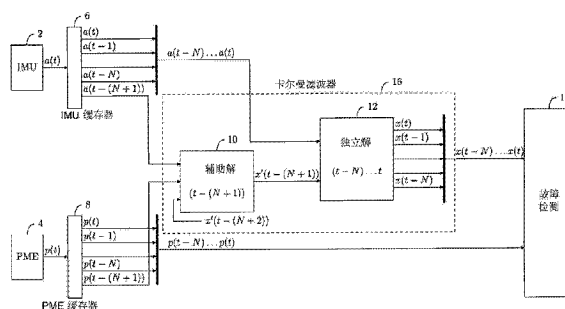
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 8 页

(54) 发明名称

故障检测方法

(57) 摘要

一故障检测方法使用由一惯性测量单元(IMU)(2)提供的惯性测量值检测位置测量设备(PME)(4)中的故障。该方法使用至少一惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)推导出在一独立解功能块(12)中的至少一独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t)$ 。然后该值与由故障检测功能块(14)中的PME(4)提供的至少一位置测量值($p(t-N) \cdots p(t)$)进行比较,以确定该PME中是否存在故障。一较早的惯性测量值($a(t-N+1)$)和一较早的位置测量值 $p(t-N+1)$ 用于推导出在辅助解功能块(10)中的辅助船舶状态估计值($x'(t-N+1)$)。该辅助船舶状态估计值($x'(t-N+1)$)用于作为一步骤的起始状态,该步骤可推导出所述的至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)。所述辅助和独立解功能块(10,12)可以为卡尔曼滤波器。



1. 一种使用由一惯性测量单元(2)提供的惯性测量值对一与船舶相关联的且可提供位置测量值和 / 或速度测量值的位置测量设备(4)中的故障进行检测的方法,该方法包括如下步骤:

使用一较早的惯性测量值($a(t-(N+1))$)以及一较早的位置测量值($p(t-(N+1))$)和一较早的速度测量值中的一个或全部两个推导出辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$);

使用至少一惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)和所述辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)作为一起始状态推导出至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$);以及,

将至少一独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t)$ 与由所述位置测量设备(4)提供的至少一位置测量值 $p(t-N) \cdots p(t)$ 和 / 或至少一速度测量值进行比较,以确定在该位置测量设备(4)中是否存在故障。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,由惯性测量单元(2)提供的惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)存储于一缓存器(6)内。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,位置测量设备(4)提供的位置测量值($p(t-N) \cdots p(t)$)和 / 或位置测量值存储于一缓存器(8)内。

4. 根据前述权利要求之一所述的方法,其中,所述推导 $t-(N+1)$ 时刻的辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)以及 t 时刻的至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)的步骤还包括;

(i) 由 $t-(N+1)$ 时刻的惯性测量值($a(t-(N+1))$)与 $t-(N+1)$ 时刻的一位置测量值($p(t-(N+1))$)一速度测量值中的一个或全部两个推导出 $t-(N+1)$ 时刻的辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$);以及,

(ii) 使用所述 $t-(N+1)$ 时刻的辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)作为一个过程的起始状态,该过程为由存储的从 $t-N$ 时刻至 t 时刻的惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)推导出该至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)。

5. 根据前述权利要求之一所述的方法,其中,使用一组存储的惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)推导出 t 时刻的独立船舶状态估计值($x(t)$),该独立船舶状态估计值($x(t)$)与 t 时刻的一位置测量值($p(t)$)和 / 或一速度测量值相比较,以确定该位置测量设备中是否存在故障。

6. 根据前述权利要求之一所述的方法,其中,使用一组存储的惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)推导出从 $t-N$ 时刻至 t 时刻的一组独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$),并且全部或部分该组独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)与从 $t-N$ 时刻至 t 时刻的全部或部分存储的位置测量值($p(t-N) \cdots p(t)$)和 / 或一组存储的速度测量值进行比较,以确定在该位置测量设备(4)中是否存在故障。

7. 根据前述权利要求之一所述的方法,其中,使用一递归算法推导出所述至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)。

8. 根据前述权利要求之一所述的方法,其中,使用一递归算法推导出所述辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)。

9. 根据权利要求7或8所述的方法,其中,该递归算法为一卡尔曼滤波器(10,12)。

10. 根据前述权利要求之一所述的方法,该方法具有多个与船舶相关联的位置测量设备(4,20),各位置测量设备提供位置测量值和 / 或速度测量值,其中,推导出所述辅助船舶

状态估计值($x'(t-(N+1))$)的步骤使用由所述多个位置测量设备(4,20)中的至少一个提供的较早的位置测量值($p_1(t-(N+1))$, $p_2(t-(N+1))$)中的一个或两个全部和/或一较早的速度测量值。

11. 根据前述权利要求之一所述的方法,该方法具有多个与船舶相关联的位置测量设备(4,20),各位置测量设备提供位置测量值和/或速度测量值,其中,推导出 $t-(N+1)$ 时刻的所述辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)的步骤使用由所述多个位置测量设备(20)的至少一个在 $t-(N+1)$ 时刻提供的位置测量值($p_1(t-(N+1))$, $p_2(t-(N+1))$)中的一个或两个全部和/或一较早的速度测量值。

12. 根据权利要求10或11所述的方法,其中,源于位置测量设备(4,20)中的两个或更多的位置测量值($p_1(t-(N+1))$, $p_2(t-(N+1))$)和/或速度测量值结合起来,用于推导出所述辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)。

13. 根据权利要求10或11所述的方法,其中,至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)与由另一位置测量设备(4,20)中的至少一个提供的至少一位置测量值($p_1(t-N) \cdots p_1(t)$, $p_2(t-N) \cdots p_2(t)$)和/或至少一速度测量值进行比较,以确定在所述的另一位置测量设备(4,20)中的至少一个中是否存在故障。

14. 一故障检测系统,包括:

一提供惯性测量值 $a(t-N) \cdots a(t)$ 的惯性测量单元(2);

至少一与船舶相关联的且提供位置测量值($p(t-N) \cdots p(t)$)和/或速度测量值的位置测量设备(4);

使用一较早的惯性测量值($a(t-(N+1))$)以及一较早的位置测量值($p(t-(N+1))$)和一较早的速度测量值中的一个或全部两个,以推导出辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)的装置(10);

使用至少一惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)和所述辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)作为一起始状态,以推导出至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)的装置(12);以及,

对至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)与由所述位置测量设备(4)提供的至少一位置测量值($p(t-N) \cdots p(t)$)和/或至少一速度测量值进行比较,以确定在该位置测量设备(4)中是否存在故障的装置(14)。

15. 根据权利要求14所述的故障检测系统,还包括一用于存储由所述惯性测量单元(2)提供的惯性测量值($a(t-N) \cdots a(t)$)的缓存器(6)。

16. 根据权利要求14或15所述的故障检测系统,还包括一用于存储由所述位置测量设备(4)提供的位置测量值($p(t-N) \cdots p(t)$)和/或速度测量值的缓存器(8)。

17. 根据权利要求14至16中任意一项所述的故障检测系统,其中,用于推导出所述辅助船舶状态估计值($x'(t-(N+1))$)的装置(10)为一卡尔曼滤波器(16)。

18. 根据权利要求14至17中任意一项所述的故障检测系统,其中,用于推导出至少一独立船舶状态估计值($x(t-N) \cdots x(t)$)的装置(12)为一卡尔曼滤波器(16)。

故障检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及故障检测的方法,尤其涉及将惯性导航系统(INS)用在位置测量设备(PME)中对故障进行检测的方法,该位置测量设备可提供位置测量值和/或速度测量值。该PME可用于船舶的动态定位(DP),即,利用推进器抵抗如风力和水流的环境力,使船舶在一参考点的邻近范围内保持位置和稳固航向。

[0002] 术语“惯性导航系统(INS)”包括具有一惯性测量单元(IMU)的系统,该惯性测量单元通常为具有一具有内部或外部数据融合算法的低水平的测量系统。

[0003] 术语“动态定位(DP)系统”包括其它用于船舶的定位系统,例如将DP系统的特性与锚泊系统结合起来的锚泊辅助动力定位系统和推进器辅助锚泊系统。

背景技术

[0004] 一动态定位(DP)系统的基本组成要素为:一个或多个用于测量船舶位置和航向的位置参考系统;用于提供控制动作的推进器;以及一用于决定所需的推进器的控制器。DP系统的目的不是保持船舶绝对静止不动,而是令其在一可接受的界限内保持其位置点。允许的位置变化量取决于应用和实施条件。在许多应用下,超过可接受的界限内的位置丧失可能会对员工安全或设备或环境造成严重的影响。因此,至关重要的是,只要是在合理可能的情况下,就要采取适当的措施来保持DP系统的完整性。

[0005] DP中的安全操作依靠的是对船舶位置和航向的全程精确测量。为了保证即便在发生了故障的情况下的全程精确测量,所有测量系统都包括了冗余。物理冗余有赖于设备的备份,以保证设备的任意单一零件的故障不会造成整个系统的故障,且该物理冗余允许发生故障的设备使用冗余硬件分路。并行的冗余系统必须是独立的,即单一的故障模式不会使整个系统故障。

[0006] 所述DP系统使所有推导自任意来源的可用的位置测量值结合成为一单一的船舶位置估计值。结合所述位置测量值的算法可基于卡尔曼滤波器。

[0007] 所述位置测量值的来源可包括多种位置测量设备(PME),例如陀螺罗盘(其独立于外部干扰,可提供船舶航向(航线)的紧凑的,可靠的且精确的测量值),紧基线测距仪,卫星导航系统(其包括全球定位系统(GPS)和差分全球定位系统(DGPS)),惯性导航系统(INS),和水声定位系统。所述PME也可为一例如多普勒计程仪(DVL)的可用于提供速度测量值的系统。

[0008] INS在一惯性参考框架中使用加速度测量值估计船舶的运动。一典型的INS包括一具有一组传感器的惯性测量单元(IMU),所述传感器例如为分别检测线加速度(通常是正交的三个方向)和转动速率的加速度计和陀螺仪。由该IMU提供的加速度测量值通常用于对传感器误差和重力进行补偿,然后该加速度测量值经两次积分以提供速度和位置的估计值。在加速度测量中固有的噪声和其它不精确的结果均会导致不可避免的由INS提供的位置估计值的漂移。由于所述不可避免的漂移量,仅基于INS的位置估计值有时被指称为“独立”位置估计值。

[0009] 因此,所述漂移量通常由 INS 位置估计值结合独立的由另一 PME 单元提供的位置测量值进行补偿。通常,一卡尔曼滤波器用于结合源于 INS 的位置估计值以及源于所述另一 PME 的位置测量值,以识别和保持加速度计和陀螺仪中的偏移量或漂移量的估计值。这样的设置常被指称为“PME 辅助的 INS”,因为其提供的一个“经辅助的”位置估计值,该在位置估计值中至少可以部分补偿所述漂移量。所述卡尔曼滤波器保持一船舶状态估计值,该估计值至少包括所述船舶位置和速度,也可能包括其他数据,例如在 IMU 中的加速度计和陀螺仪的偏移量或漂移量。

[0010] 在由 INS 提供的位置估计值不被补偿的期间(例如由于 PME 断供或故障),可能的位置估计值的漂移量可实验性地由“惯性导航系统和 DP 的整合”(“Integration of an inertial Navigation system and DP”)一文中确定,该文由作者 Stephens, R. I., Cretollier, F., Morvan, P. Y., 和 Chamberlain, A. G., 在 2008 年 10 月 7-8 日在美国德克萨斯州休斯敦市举行的动态定位会议上发表。大约 60 秒后的漂移量大致小于 2 米,且 120 秒后的偏移量大致小于大约 5 米。上述内容暗示了 INS 在无需任何偏移量补偿方式的情况下可用于提供短时段内的独立位置估计值。

[0011] 对于在 PME 中的故障的检测是困难的。已知的多种不同的方法包括中值检查、步骤检测和噪声检测等。然而,用于故障检测的最可靠的方法为对多个 PME 单元产生的不同位置测量值进行比较。当 DP 系统仅使用一个或两个 PME 单元时,故障检测的方法则是有限的。例如,当仅有两个 PME 单元可用时,尽管可检测到漂移量,但在缺少进一步的信息的情况下是不能识别到故障的 PME 的。

[0012] 因此,对于 PME 单元来说需要提供一改进的故障检测系统。该改进的故障检测系统可用于例如钻探船、穿梭输油船和补给船等可靠性是至关重要的 DP 系统中。

发明内容

[0013] 本发明针对一种使用来自惯性测量单元(IMU)的惯性测量值对在通常形成定位(DP)系统的一部分的一个或多个位置测量设备(PME)中出现的故障进行检测的方法所述 IMU 可形成一惯性导航系统(INS)中的一部分。在一优选的故障检测方法中,基于在某些先前的时刻 PME 运行正常且独立船舶状态估计值的短时段漂移量比检测到的误差或差异小的情况下,来自 IMU 的惯性测量值被缓存起来且用于推导出独立的“独立”船舶状态估计值。这里所使用的术语“船舶状态估计值”指的是船舶的物理状态的估计值,且该“船舶状态估计值”至少包括船舶的位置和速度,以及例如在 IMU 中的加速度计和陀螺仪的偏移量和漂移量等可选的数据。

[0014] 更特别的是,本发明提供了一种使用由一 IMU 提供的惯性测量值来检测与船舶相关联的 PME 中的故障,以及提供位置测量值和 / 或速度测量值的方法,该方法包括的步骤有:使用一较早的速度测量值,以及一较早的位置测量值中和一较早的速度测量值两者或之一,以推导出一辅助船舶状态估计值;使用至少一惯性测量值和所述辅助船舶状态估计值作为一起始状态,以推导出至少一独立船舶状态估计值;以及将该至少一独立船舶状态估计值与由所述 PME 提供的至少一位置测量值和 / 或至少一速度测量值进行比较,以确定 PME 中是否有故障。

[0015] 所述辅助和独立船舶状态估计值通常为向量的形式,该向量具有至少一代表船舶

位置估计值的位置分量和一代表船舶速度或速率估计值的速度分量。轻易可知的是,卡尔曼滤波器或其它状态观察器都会自然地提供这样的一个具有位置分量和速度分量的向量,不论其接收到的测量值是来自 PME 和 / 或 IMU。所述位置分量通常至少包含向量中的两要素或条目,一北向位置和一东向位置,虽然该位置分量可能会被按照任意其它适当的坐标系存储和 / 或测量。相似地,所述速度分量通常至少包含向量中的两要素或条目,一北向速度和一东向速度,但是以浪涌速度或摇摆速度(即,按照航体坐标)的形式测量的。独立船舶状态估计值与由 PME 提供的且用于确定在该 PME 中是否有故障的至少一位置测量值和 / 或至少一速度测量值之间的任意比较都可能由此涉及某种由一坐标系向另一坐标系的转变或转换。

[0016] 更多关于卡尔曼滤波器正常运行以得到位置和速度估计值的方法可从 Gelb, A., 实用的最佳估计(Applied Optimal Estimation), MIT 出版社,1974 以及 Astrom, K. J. 和 Wittenmark, B., 计算机控制系统:理论与设计,第二版,Prentice-Hall,1990 中得到。

[0017] 若 PME 中存在故障则会导致至少一位置测量值和 / 或至少一速度测量值与至少一独立船舶状态估计值的相应的分量之间的误差或差异。因此对误差或差异的检测可用于检查该 PME 是否正常运行。

[0018] 所述故障检测方法假设:(i)在某先前的时刻(例如 N+1 秒之前)对 PME 运行正常,因此在该先前的时刻(例如在 $t-(N+1)$ 秒时)由 PME 提供的位置测量值和 / 或速度测量值是无误差的,以及(ii)自从所述先前的时刻(例如最后的 N+1 秒)由 IMU 提供的惯性测量值的漂移量比检测到的误差或差异要小。N 值越大,对例如是漂移量的故障的识别越好。例如,在线性漂移率为 r 米每秒的情况下,剩余量为 N.r 米,因此使 N 值变大,可增强噪声抑制。可使用的 N 的实际值取决于 IMU 的质量,所需的故障检测率等等。对于一典型的 IMU 来说, $N = 60$ 秒的值有望用于检测大概 6 米或更大的误差。

[0019] 由 IMU 提供的惯性测量值通常包括线性加速度(通常在三个正交方向上)和转动速率。这些量可结合起来形成一加速度向量 $a(t)$ 。由 PME 提供的位置测量值 $p(T)$ 可以为例如空间坐标或地球上的绝对位置的形式。由 PME 提供的速度测量值 $p(t)$ 可以为例如多普勒计程仪(DVL)的形式。所述 IMU 和 PME 将以任意适当的更新率提供测量值,例如每秒一次。

[0020] 由 IMU 和 PME 提供的测量值优选地存储于不同的缓存器内。若使用多于一个 PME 则各 PME 通常具有各自的用于存储各自测量值的缓存器。

[0021] 在一典型示例中,每秒会有一加速度向量加入到加速度缓存器内,则在 N+1 之后该加速度缓存器将包括 N+1 个加速度向量。若该 PME 提供位置测量值,则在 N+1 之后该位置缓存器将包括 N+1 个位置测量值。若该 PME 提供速度测量值(或者除了该位置测量值之外,或者代替该位置测量值),则在 N+1 之后一速度缓存器将包括 N+1 个速度测量值。各缓存器通过会容纳最多 N+1 个加速度向量或 PME 测量值。在通常不会进行故障检测的准备或初始过程中对所述缓存器会被填充,或将一任意初始值(例如 0)预设至每个缓存器。一旦缓存器满了,则随着分别由 IMU2 和 PME4 提供的加速度向量和测量值的到来,最早的加速度向量和测量值被简单地从缓存器中丢弃。在故障检测方法正常运行的过程中,各缓存器因此通常包含最新的形式为 $a(t-(N+1)), a(t-N) \cdots a(t-1), a(t)$ 的加速度向量和测量值,在例如位置测量值的情况下,其形式为 $p(t-(N+1)), p(t-N) \cdots p(t-1), p(t)$ 。

[0022] 由惯性测量单元提供的较早的惯性测量值(例如在 $t-(N+1)$) 时刻) 与由 PME 提供的较早的位置测量值中的一个或全部两个和一较早的速度测量值(例如在 $t-(N+1)$) 时刻) 相结合, 以推导出“辅助”船舶状态估计值。然后该辅助船舶状态估计值用于作为一个推导出至少一独立船舶状态估计值的起始状态, 该独立船舶状态估计值的推导过程将在下面进行更详细的描述。轻易可知的是, 较早的位置测量值中的一个或全部两个和较早的速度测量值的使用取决于何种 PME 测量值是可用的, 以及特定的故障检测系统的配置。

[0023] 对于故障检测方法中的每次迭代(通常为每秒一次), 对于一时刻 t 优选地执行下面的步骤:

[0024] 1. 由 $t-(N+1)$ 时刻的惯性测量值(例如加速度测量值 $a(t-(N+1))$) 结合 $t-(N+1)$ 时刻的位置测量值中的一个或全部两个以及一速度测量值(例如位置测量值 $p(t-(N+1))$) 推导出迭代所针对的 $t-(N+1)$ 时刻的辅助船舶状态估计值(例如 $x'(t-(N+1))$)。

[0025] 2. 所述 $t-(N+1)$ 时刻的辅助船舶状态估计值(例如 $x'(t-(N+1))$) 作为一个过程的起始状态, 该过程为由从 $t-N$ 时刻至 t 时刻的存储的惯性测量值(例如所述经缓存的加速度向量 $a(t-N) \cdots a(t-1), a(t)$) 得到至少一独立船舶状态估计值。

[0026] 例如, 使用所述辅助船舶状态估计值 $x'(t-(N+1))$ 作为一起始状态, 该过程由加速度向量 $a(t-N)$ 得到一第一独立船舶状态估计值 $x(t-N)$; 由加速度向量 $a(t-(N-1))$ 得到一第二独立船舶状态估计值 $x(t-(N-1))$; 由加速度向量 $a(t-(N-2))$ 得到一第三独立船舶状态估计值 $x(t-(N-2))$; 以此类推直到由加速度向量 $a(t)$ 得到一最终独立船舶状态估计值 $x(t)$ 。换句话说, 对于每次迭代所述经缓存的加速度向量 $a(t-N) \cdots a(t-1), a(t)$ 可用来推导出 $t-N$ 时刻与 t 时刻之间的所有时间步长的一组独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1), x(t)$ 。作为起始状态的所述辅助船舶状态估计值是从由 PME 提供的较早的位置测量值中的一个或全部两个以及一较早的速度测量值(例如对于 $t-(N+1)$ 时刻)推导出的。因此轻易可知的是, 对于故障检测方法中的每次迭代, 所述经缓存的位置测量值和 / 或速度测量值以及 $t-(N+1)$ 时刻的加速度向量用于推导出辅助船舶状态估计值, 而剩余经缓存的 $t-N$ 时刻与 t 时刻之间的所有时间步长的加速度向量用于推导出该组独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1), x(t)$ 。由经缓存的测量值和加速度向量推导出该组独立船舶状态估计值的过程在小于故障检测方法的迭代率的时段中完成。

[0027] 所述辅助船舶状态估计值 $x'(t-(N+1))$ 优选地作为起始状态, 以推导出所述第一船舶状态估计值 $x(t-N)$, 并且推导出随后的各独立船舶状态估计值的过程会利用先前得到的独立船舶状态估计值。

[0028] 所述故障检测方法会利用全部或部分该组独立船舶状态估计值, 或仅会利用该组独立船舶状态估计值中的一个(例如 $x(t)$)。

[0029] 至少一独立船舶状态估计值与由 PME 提供的至少一位置测量值和 / 或至少一速度测量值之间的用于决定 PME 中是否有故障的比较步骤可以以多种方式实施, 且会利用全部或部分经缓存的测量值(例如经缓存的位置测量值 $p(t-N) \cdots p(t-1), p(t)$, 或仅会利用所述经缓存的测量值中的一个(例如经缓存的位置测量值 $p(t)$)。例如, 若故障检测方法在每次迭代中提供一 t 时刻的独立船舶状态估计值(例如 $x(t)$), 则该独立船舶状态估计值可直接与至少一由 PME 提供的 t 时刻的测量值(例如位置测量值 $p(t)$) 进行比较。如果所述独立船舶状态估计值 $x(t)$ 与至少一由 PME 提供的测量值的相应的分量之间的误差超过了特定的阈

值,则该特定的迭代会被标示出来,以指示有可能具有一故障。例如,如果 PME 提供位置测量值,则独立船舶状态估计值 $x(t)$ 的位置分量可与位置测量值 $p(t)$ 相比较,且如果误差超过了例如 m 米的特定的阈值,特定的迭代会被标示出来。类似的,如果 PME 仅提供例如为多普勒计程仪 (DVL) 的形式的速度测量值,则独立船舶状态估计值 $x(t)$ 的速度分量可与速度测量值相比较,且如果误差超过了例如 p 米/秒的特定的阈值,特定的迭代会被标示出来。被标示出来的迭代会使用一适当的算法监测,以尽量避免虚假误差的产生。例如,故障检测方法会在判定故障最终产生之前寻找一定数量的连续的带标示的迭代,或者在一特定时段内寻找一定数量的带标示的迭代。可选择地,可使用某种数学算法进行从 $t-N$ 时刻至 t 时刻的一组独立船舶状态估计值中的全部或部分(例如 $x(t-N) \cdots x(t-1), x(t)$) 与从 $t-N$ 时刻至 t 时刻的一组位置测量值和 / 或速度测量值(例如经缓存的位置测量值 $p(t-N) \cdots p(t-1), p(t)$ 之间的比较。因此,在先前的 N 秒内各次迭代会利用全部或部分位置测量值和 / 或速度测量值。

[0030] 其它可能的故障检测技术会随着时间的流逝在一组独立船舶状态估计值中的全部或部分与一组位置测量值和 / 或速度测量值中的全部或部分之间寻找误差分布中的不连续的或特定的变化(例如步长变化)。

[0031] 由故障检测方法的各次迭代中提供的独立船舶状态估计值也可在被用于确定在 PME 中是否有故障之前被存储或缓存起来,并且可使用任意适当的数学算法结合起来。

[0032] 所述辅助和独立船舶状态估计值优选地利用一例如卡尔曼滤波器等递归算法得到。对于辅助和独立船舶状态估计值两者来说,注意以下的情况是重要的,所述递归算法使用由 IMU 提供的惯性测量值(例如,可结合线性加速度和转动速率以形成一加速度向量 $a(t)$) 得到一位置的估计值。因此初始的步骤可包括从惯性测量值中推导出以一位置和速度估计值的形式的惯性解。若 PME 仅提供速度估计值,则在切换至故障检测系统之后且在开始故障检测方法之前的某点,所述卡尔曼滤波器或其它状态观察器需要至少一个位置测量值以设定或初始化其位置估计值。该位置估计值也有可能来自例如另一个 PME 或一将其录入的操作者。轻易可知的是,一旦卡尔曼滤波器初始化完毕就不需要更多的位置测量值,因为一位置估计值(即向量的位置分量)可通过由 PME 提供的速度测量值和 / 或由 IMU 提供的惯性测量值推导得出。

[0033] 所述至少一独立船舶状态估计值可与由单一的 PME 提供的至少一位置测量值和 / 或速度测量值进行比较。例如,故障检测方法可依靠来自单一的例如卫星导航系统(例如 GPS 和差分 GPS (DGPS)) 的 PME 的位置测量值和 / 或速度测量值。然而,也有可能提供一可选择的带有两个或更多的并行设置的且与船舶相关联的惯性导航结构。在这种情况下,所述故障检测系统可按照上述方式针对各 PME 得到各自的辅助和独立船舶状态估计值。可替换的是,对于故障检测方法中的各次迭代,所述辅助船舶状态估计值可使用由一个或更多个 PME 提供的较早的位置测量值和 / 或较早的速度测量值推导得出。通过使用一开关阵列和开关控制器在位置和速度测量值中进行适当切换的方式,选择 PME 的不同组合方式,推导出所述辅助船舶状态估计值。各次迭代中的辅助船舶状态估计值也可源于由两个或更多个由 PME 提供的较早的位置测量值和 / 或较早的速度测量值的组合(例如,加权组合或加权平均)。故障检测可应用于一个或多个 PME,且任何需要故障检测的 PME 不必为这样一个 PME,即,该 PME 的较早的位置测量值和 / 或较早的速度测量值用于推导出辅助船舶状态估

计值。换句话说,在故障检测方法的各次迭代中,一第一 PME 可提供用于推导出辅助船舶状态估计值的较早的位置量值和 / 或较早的速度测量值,而一第二 PME 可提供至少一位置量值和 / 或速度测量值,该位置量值和 / 或速度测量值将与该至少一独立船舶状态估计值进行比较,以确定在第二 PME 中是否存在故障。

[0034] 该故障检测方法可用作船舶的 DP 系统的一部分。在这种情况下,由 IMU 提供的惯性测量值(或由包括 IMU 的 INS 提供的位置和 / 或速度估计值)和由 PME 提供的位置和 / 或速度测量值也可以在不同的过程中结合,以推导出船舶位置或速率的估计值。

[0035] 本发明进一步提供的一故障检测系统(或惯性导航结构)包括:一用于提供惯性测量值的 IMU ;至少一与船舶相关联的且用于提供位置测量值和 / 或速度测量值的 PME ;用于通过使用较早的惯性测量值与较早的位置测量值中的一个或全部两个和一较早的速度测量值的方式推导出辅助船舶状态估计值的装置 ;用于通过使用至少一惯性测量值和辅助船舶状态估计值作为起始状态的方式推导出至少一独立船舶状态估计值的装置 ;以及用于对至少一独立船舶状态估计值与由 PMU 提供的至少一位置测量值和 / 或至少一速度测量值进行比较,以确定该 PMU 中是否存在故障的装置。

[0036] 可提供不同的缓存器用于存储由 IMU 提供的惯性测量值和由 PME 提供的位置测量值和 / 或速度测量值。

[0037] 用于推导出至少一独立船舶状态估计值和辅助船舶状态值的装置优选为一卡尔曼滤波器。更特别的是,所述独立和辅助船舶状态估计值可推导自一单一的卡尔曼滤波器,也可推导自并行设置的不同的卡尔曼滤波器。

[0038] 所述故障检测系统可进行改写或配置,以实施上面更加详细描述故障检测方法。

附图说明

[0039] 图 1 为根据具有单一位置测量值的本发明所记载的第一故障检测系统的整体架构图 ;

[0040] 图 2 为展示图 1 中辅助解功能块的内容的示意图 ;

[0041] 图 3 为展示对于故障检测方法的各次迭代如何顺序确定针对 $t-N$ 时刻至 t 时刻的各独立解的示意图 ;

[0042] 图 4 为展示图 3 中的一个独立解功能块中的内容的示意图 ;

[0043] 图 5 示出了标绘有一个时间段内独立船舶状态估计值和各自的位置测量值之间的误差的图表 ;

[0044] 图 6 为根据具有第一和第二位置测量设备(PME)单元的本发明所记载的第二故障检测系统的整体架构图,该第一和第二 PME 并行地提供位置测量值以分别推导出用于各次迭代的和用于故障检测的辅助船舶状态估计值 ;

[0045] 图 7 为根据具有第一和第二 PME 单元的本发明所载的第三故障检测系统的整体架构图,由该第一和第二 PME 提供的位置测量值结合起来,以得到用于各次迭代的辅助船舶状态估计值,且在所述位置测量值中仅第一 PME 提供的位置测量值用于故障检测 ;

[0046] 图 8 为根据具有第一和第二 PME 单元的本发明所记载的第四故障检测系统的整体架构图,由该第一 PME 提供的位置测量值用于推导出各次迭代中的辅助船舶状态估计值,

由第二 PME 提供的位置测量值用于故障检测。

具体实施方式

[0047] 参照图 1, 一第一故障检测系统包括一可组成部分惯性导航系统 (INS) 的惯性导航单元 (IMU) 2。该惯性导航单元 2 包含一组例如为分别检测线加速度 (通常在三个正交方向上) 和转动速度的加速度计和陀螺仪的传感器。将由 IMU2 提供的 t 时刻的惯性测量值结合起来以形成加速度向量 $a(t)$ 。

[0048] 位置测量值可由任意合适的位置测量设备 (PME) 4 提供, 该位置测量设备例如是一个 GPS 接收机。由该 PME4 提供的 t 时刻的位置测量值 $p(t)$ 可以为例如空间坐标或地球上的绝对坐标的形式。虽然接下来的描述中仅涉及位置测量值, 但轻易可知的是, 作为该位置测量值的替代或者在该位置测量值的基础上, 所述 PME 还可提供速度测量值 (例如以多普勒计程仪 (DVL) 的形式)。这样, 所述故障检测系统就可配置为将速度测量值与独立船舶状态估计值的速度分量进行对比。还有可能需要向卡尔曼滤波器 16 (见下文) 提供至少一个位置测量值, 以设置或初始化其位置估计。若该位置测量值不能由另一个 PME 提供, 则该位置测量值由操纵人员输入。

[0049] 所述 IMU2 和 PME4 形成了船舶的部分动态定位 (DP) 系统。

[0050] IMU2 和 PME4 每秒钟提供一加速度向量和一位置测量值并均存储于缓存器内。更特别的是, 从 $t-(N+1)$ 时刻至 t 时刻的加速度向量存储于一 IMU 缓存器 6 中, 且从 $t-(N+1)$ 时刻至 t 时刻的位置测量值存储于一 PME 缓存器 8 中。换句话说, 若 $N = 60$ 秒, 则每个缓存器内会分别存储各总计 61 个由 IMU2 和 PME4 提供的在前面的 61 秒内的加速度向量和位置测量值。实际上由 IMU2 和 PME4 提供的加速度向量和位置测量值可能以不同的速率到达, 因此所述故障检测系统通常有一些用于对测量值进行同步的方法。这可能涉及忽略一些额外的测量值或者在某一特定时段取测量值的平均值。通常还会有一些处理源于 IMU2 或 PME4 的丢失测量值的方法, 例如可以通过假设任意丢失测量值与上一个丢失测量值是相同的。

[0051] 在准备或初始过程中, 所述缓存器 6, 8 会被顺序填充加速度向量和位置测量值, 在该过程中, 通常不会进行故障检测。可选择地, 可为缓存器预设一任意值 (例如 0)。一旦缓存器 6, 8 满了, 且 IMU2 和 PME4 又在每秒钟提供新的加速度向量和位置测量值时, 则加速度向量和位置测量值中最早的加速度向量和位置测量值被简单地从缓存器中丢弃。因此, 在故障检测方法的正常运行过程中, 从 $t-(N+1)$ 时刻至 t 时刻, 各缓存器 6, 8 中包含将是最新的形式为 $a(t-(N+1)), a(t-N) \cdots a(t-1), a(t)$ 的加速度向量和形式为 $p(t-(N+1)), p(t-N) \cdots p(t-1), p(t)$ 的位置测量值。

[0052] 所述故障检测方法以多次迭代的方式运行。在本示例中每秒钟发生一次迭代, 但轻易可知的是, 也可以使用其它迭代速率。

[0053] 对于 t 时刻的迭代, 执行下列步骤:

[0054] 1. 至少包括一个船舶的位置和速度的估计值 (即, 具有一位置和一速度分量) 的辅助船舶状态估计值 $x'(t-(N+1))$ 可从辅助解功能块 10 中推导出;

[0055] 2. 一组独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1), x(t)$ 中的每个至少包括一船舶的位置和速度的估计值 (即, 具有一位置和一速度分量), 该系列独立船舶状态估计值可从独立解功能块 12 中推导出;

[0056] 3. 所述独立船舶状态估计值 $x(t)$ 的位置分量在故障检测功能块 14 中与位置测量值 $p(t)$ 进行比较,以决定 PME4 是否运行正常。

[0057] 所述辅助和独立解功能块组成了部分卡尔曼滤波器 16。

[0058] 下面参考附图 2 至 5,给出上述每一步骤更加详细的解释。

[0059] 图 2 示出了所述辅助解功能块 10 的内容。本质上讲,该辅助解功能块 10 通过将前一辅助船舶状态估计值 $x'(t-1)$ 、以及由 IMU2 提供的加速度向量 $a(t)$ 和由 PME4 提供的位置测量值 $p(t)$ 结合起来,以推导出一辅助船舶状态估计值 $x'(t)$ (以至少具有一位置分量和一速度分量的向量的形式)。轻松可知的是,在故障检测方法的 t 时刻的迭代中,所使用的加速度向量为经缓存的加速度向量 $a(t-(N+1))$,且所使用的位置测量值为经缓存的位置测量值 $p(t-(N+1))$ 。

[0060] 所述辅助解功能块 10 的第一输入为前一辅助船舶状态估计值 $x'(t-1)$ 。一数学模型用于将此向量向前外推至 t 时刻,产生一未经修正的,经外推的向量 $x^*(t)$ 。 $H_1(t)$ 是一数学模型,该数学模型提取出船舶加速度和旋转的预测值,用于与 IMU2 提供的加速度向量 $a(t)$ 进行比较。该预测的加速度和旋转值与加速度向量 $a(t)$ 之间的误差 $e_1(t)$ 乘以一增益矩阵 $K_1(t)$ (通常指的是卡尔曼增益矩阵)得到一修正向量,该修正向量加上所述外推的向量 $x^*(t)$ 得到独立的船舶状态估计值 $x(t)$ 。 $H_2(t)$ 是一数学模型,该数学模型提取出船舶位置的预测值,用于与 PME4 提供的位置测量值 $p(t)$ 进行比较。该预测的位置值与位置测量值 $p(t)$ 之间的误差 $e_2(t)$ 乘以一增益矩阵 $K_2(t)$ 得到一附加修正向量,该附加修正向量加上独立船舶状态估计值 $x(t)$ 得到辅助船舶状态估计值 $x'(t)$ 。

[0061] 图 3 示出了独立解功能块 12 的内容。本质上讲,该独立解功能块 12 通过经缓存的加速度向量 $a(t-N) \cdots a(t-1)$, $a(t)$ 和前一独立(或辅助)船舶状态估计值推导出的一组独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1)$, $x(t)$ (以至少具有位置分量和速度分量的向量组的形式)。推导出的所有独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1)$, $x(t)$ 均用于故障检测方法中各次迭代中。换句话说,独立解功能块 12 在故障检测方法中的各次迭代中使用所有经缓存的由 $t-N$ 时刻至 t 时刻的加速度向量,并且推导出 $t+1$ 时刻迭代的该组独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1)$, $x(t)$ 的所有过程都在 $t+1$ 时刻的下一迭代之前完成。

[0062] 为清楚起见,图 3 示出了 $N=3$ 秒时的情况。由辅助解功能块 10 得出的辅助船舶状态估计值 $x'(t-4)$ 用作一第一功能块 18a 的起始状态。该辅助船舶状态估计值 $x'(t-4)$ 与所述第一功能块 18a 中的一经缓存的加速度向量 $a(t-3)$ 结合得到一第一独立船舶状态估计值 $x(t-3)$ 。该第一独立船舶状态估计值 $x(t-3)$ 与第二功能块 18b 中的一经缓存的加速度向量 $a(t-2)$ 结合得到一第一独立船舶状态估计值 $x(t-2)$,以此类推得到一组独立船舶状态估计值 $x(t-3) \cdots x(t-1)$, $x(t)$ 。

[0063] 现在参考图 4,对所述功能块 18a 至 18d 进行更加详细的描述。本质上讲,各功能块 18a 至 18d 通过将前一独立船舶状态估计值 $x(t-1)$ (或者如是第一功能块 18a,则该前一独立船舶状态估计值为 $x'(t-1)$)与一由 IMU2 提供的加速度向量 $a(t)$ 结合,推导出一独立船舶状态估计值 $x(t)$ 。轻易可知的是,对于故障检测方法中的 t 时刻的一次迭代,用于功能块 18a 的加速度向量将是经缓存的加速度向量 $a(t-N)$,在功能块 18b 中使用的加速度向量将是经缓存的加速度向量 $a(t-(N-1))$,以此类推。所述功能块 18a 将使用由辅助解功能块 10 提供的辅助船舶状态估计值 $x'(t-(N+1))$ 作为其起始状态,相应地,则使用上述的经

缓存的加速度向量 $a(t-(N+1))$ 和经缓存的位置测量值 $p(t-(N+1))$ ，以推导出故障检测方法中 t 时刻的相同迭代中的所述辅助船舶状态估计值。

[0064] 所述功能块 18a 的第一输入为前一辅助船舶状态估计值 $x'(t-1)$ ，且各随后的功能块 18b 至 18b 的第一输入顺次为由前一功能块推导出的前一独立船舶状态估计值 $x(t-1)$ 。一数学模型用于将此向量向前外推至 t 时刻，得到一未经修正的，经外推的向量 $x^*(t)$ 。 $H_1(t)$ 是一数学模型，该数学模型提取出船舶加速度和旋转的预测值，用于与 IMU2 提供的加速度向量 $a(t)$ 进行比较。该预测的加速度和旋转值与加速度向量 $a(t)$ 之间的误差 $e_1(t)$ 乘以一增益矩阵 $K_1(t)$ 得到一修正向量，该修正向量加上所述经外推的向量 $x^*(t)$ 得到独立的船舶状态估计值 $x(t)$ 。

[0065] 所述故障检测方法会使用全部或部分该组独立船舶状态估计值，或者仅使用该组独立船舶状态估计值中的一个。图 5 示出了检测 PME 漂移量的示例。标记有的点代表 60 秒的时段内由 PME4 提供的位置测量值和由相应的独立船舶状态估计值的位置分量之间的误差。在此示例中，PME4 在 $t=150$ 秒的时刻发生故障，该故障导致所述位置测量值产生漂移。在此示例中，仅有一独立船舶状态估计值 $x(t)$ 用于故障检测方法的各次迭代中。换句话说，对于 $t=120$ 秒的时刻，该故障检测系统将在前 60 秒（即，从 $t=61$ 时刻至 $t=120$ 时刻）使用经缓存的加速度数据，以推导出一组独立船舶状态估计值 $x(t=61) \cdots x(t=119)$ ， $x(t=120)$ ，但仅使用最后的独立船舶状态估计值 $x(t=120)$ 的位置分量，确定图中所示的 $x(t=120)$ 与位置测量值 $p(t=120)$ 之间的误差。剩下的独立船舶状态估计值 $x(t=61) \cdots x(t=119)$ 则不被使用，但它们当然的会影响最后的独立船舶状态估计值 $x(t=120)$ ，因为，随后的独立船舶状态估计值的推导方式是以功能块 18 中的前一独立船舶状态估计值为参考的。图 5 中示出的最后的独立船舶状态估计值 $x(t=121) \cdots x(t=180)$ 的位置分量与相应的位置测量值 $p(t=121) \cdots p(t=180)$ 之间的误差也是以同样的方式推导出的。

[0066] 水平短划线代表故障检测方法的误差阈值（即， $m=5$ 米）。

[0067] 从 $t=130$ 秒时刻可以看出由 PME2 提供的位置测量值 $p(t=130)$ 和源于独立解功能块 12 的独立船舶状态估计值 $x(t=130)$ 的位置分量之间的误差超过了所述误差阈值，但没有检测到一个故障。

[0068] 位于 $t=169$ 秒时刻的竖直虚线代表一检测到的故障，在该故障处由 PME2 提供的三个连续的误差已超出了所述误差阈值。如果一故障被检测到了则该 PME 可能会被 DP 系统隔离，直到该 PME 经过了检查和修理。

[0069] 应当知道的是，其它技术和算法也可用于故障检测。

[0070] 现在参照图 6，描述一第二故障检测系统。该第二故障检测系统大体上与第一故障检测系统相似，但其包括两并行的独立的 PME。

[0071] 位置测量值由一第一 PME4 和一第二 PME20 提供。由所述第一 PME4 提供的位置测量值 $p_1(t)$ 存储于一第一 PME 缓存器 8 内，而由所述第二 PME20 提供的位置测量值 $p_2(t)$ 存储于一第二 PME 缓存器 22 内。如上面所述地，由所述第一 PME4 提供的位置测量值 $p_1(t)$ 与 t 时刻的一次迭代中的辅助船舶状态估计值一同使用，该辅助船舶状态估计值由第一卡尔曼滤波器 16 中的位置测量值 $p_1(t-(N+1))$ 推导出，该组位置测量值 $p_1(t-N) \cdots p_1(t-1)$ ， $p_1(t)$ 中的全部或部分与一组独立船舶状态估计值 $x_1(t-N) \cdots x_1(t-1)$ ， $x_1(t)$ 的全部或部分将在第一故障检测功能块 14 中进行比较。

[0072] 由所述第二 PME20 提供的位置测量值 $p_2(t)$ 在 t 时刻与辅助船舶状态估计值并行使用进行迭代, 该辅助船舶状态估计值是在第二卡尔曼滤波器 24 中由位置测量值 $p_2(t-(N+1))$ 推导出的, 并且一组位置测量值 $p_2(t-N) \cdots p_2(t-1)$, $p_2(t)$ 中的全部或部分与一组独立船舶状态估计值 $x_2(t-N) \cdots x_2(t-1)$, $x_2(t)$ 的全部或部分将在第二故障检测功能块 26 中进行比较。这样的故障检测系统可使用相同的源于 IMU2 的惯性测量值并行得到针对各 PME 的各自的辅助和独立船舶状态估计值, 因此能够独立地在各 PME 中识别故障。

[0073] 虽然图 6 示出了两个 PME, 但应该可知的是, 可将任意数量的 PME 并行结合起来, 并与一相关联的 PME 缓存器、卡尔曼滤波器和故障检测功能块连接在一起。

[0074] 现在参照图 7, 描述一第三故障检测系统。该第三故障检测系统大体上与第一故障检测系统相似, 但其包括两独立的 PME, 两 PME 均提供用于得到辅助船舶状态估计值的位置测量值。

[0075] 由所述第一 PME4 提供的位置测量值 $p_1(t)$ 在 t 时刻以如上面所述的方式与辅助船舶状态估计值作迭代一同使用, 该辅助船舶状态估计值是由在卡尔曼滤波器 28 中的位置测量值 $p_1(t-(N+1))$ 推导出的, 该位置测量值 $p_1(t)$ 与一组独立船舶状态估计值 $x_1(t-N) \cdots x_1(t-1)$, $x_1(t)$ 的全部或部分将在故障检测功能块 14 中进行比较。然而, t 时刻的一次迭代中的辅助船舶状态估计值也由第二 PME20 提供的位置测量值 $p_2(t-(N+1))$ 推导出。随后的位置测量值 $p_2(t-N) \cdots p_2(t-1)$, $p_2(t)$ 被缓存起来但不被所述故障检测方法所使用。因此, 仅在第一 PME4 中的一个故障可被所述第三故障检测系统检测到。经缓存的位置测量值 $p_2(t-N) \cdots p_2(t-1)$, $p_2(t)$ 可能会被例如 DP 系统所使用。

[0076] 参考图 2, 由第一和第二 PME 提供的位置测量值 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 可结合起来(例如, 用于提供一加权组合或一加权平均), 然后用于推导误差 $e_2(t)$ 。

[0077] 在一可选的设置中, 可使用一开关阵列选择所述位置测量值 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 中的一个或全部两个, 以推导出辅助船舶状态估计值。虽然图 7 示出了两个 PME, 但轻易可知的是, 可用源于任意多个 PME 的位置测量值来推导出各自的辅助船舶状态估计值。一开关阵列(未示出)可用于选择一个或多个可用的位置测量值, 以在卡尔曼滤波器 28 中推导出辅助船舶状态估计值。如果两个或更多个位置测量值被选择, 则这些位置测量值可如上面所描述的那样结合起来(例如, 用于提供一加权组合或一加权平均)。

[0078] 现在参照图 8, 描述一第四故障检测系统。该第四故障检测系统大体上与第三故障检测系统相似, 但由一个 PME 提供的位置测量值用于推导出辅助船舶状态估计值, 而由另

[0079] 一 PME 提供的位置测量值用于故障检测。换句话说, 在第三故障检测系统中, 至少一 PME 提供的位置测量值既用于推导出辅助船舶状态估计值又用于故障检测, 但是在第四故障检测系统中, 用于检查故障的 PME 不提供用于推导出辅助船舶状态估计值的位置测量值。

[0080] 由第一 PME4 提供的位置测量值 $p_1(t)$ 在 t 时刻以如上面所述的方式, 与辅助船舶状态估计值进行迭代, 该辅助船舶状态估计值是由位置测量值 $p_1(t-(N+1))$ 在卡尔曼滤波器 16 中推导出的。然而, 并没有向故障检测功能块 14 提供位置测量值 $p_1(t)$ 。随后的位置测量值 $p_1(t-N) \cdots p_1(t-1)$, $p_1(t)$ 被缓存起来但不用于故障检测方法中。该经缓存的位置测量值 $p_1(t-N) \cdots p_1(t-1)$, $p_1(t)$ 可被例如 DP 系统所使用。

[0081] 由第二 PME20 提供的位置测量值 $p_2(t)$ 存储于 PME 缓存器 22 中。然后一组位置

测量值 $p_2(t-N) \cdots p_2(t-1)$, $p_2(t)$ 中的全部或部分提供给故障检测功能块 14 且与一组独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1)$, $x(t)$ 的全部或部分相比较, 所述独立船舶状态估计值 $x(t-N) \cdots x(t-1)$, $x(t)$ 由辅助船舶状态估计值和由 IMU2 提供的一组加速度向量 $a(t-N) \cdots a(t-1)$, $a(t)$ 推导得到。因此, 仅在第二 PME20 中的一个故障可被第四故障检测系统检测到。

[0082] 所述第二、第三和第四故障检测系统可与源于一个或更多个 PME 的位置测量值相结合使用, 所述一个或更多个 PME 用于推导出辅助船舶状态估计值, 但在一个或多个 PME 中进行故障检测是可选的。这样, 一个或多个开关阵列也可用于决定哪些位置测量值用于推导出辅助船舶状态估计值, 以及哪些经缓存的位置测量值是提供给故障检测功能块用于故障检测的。

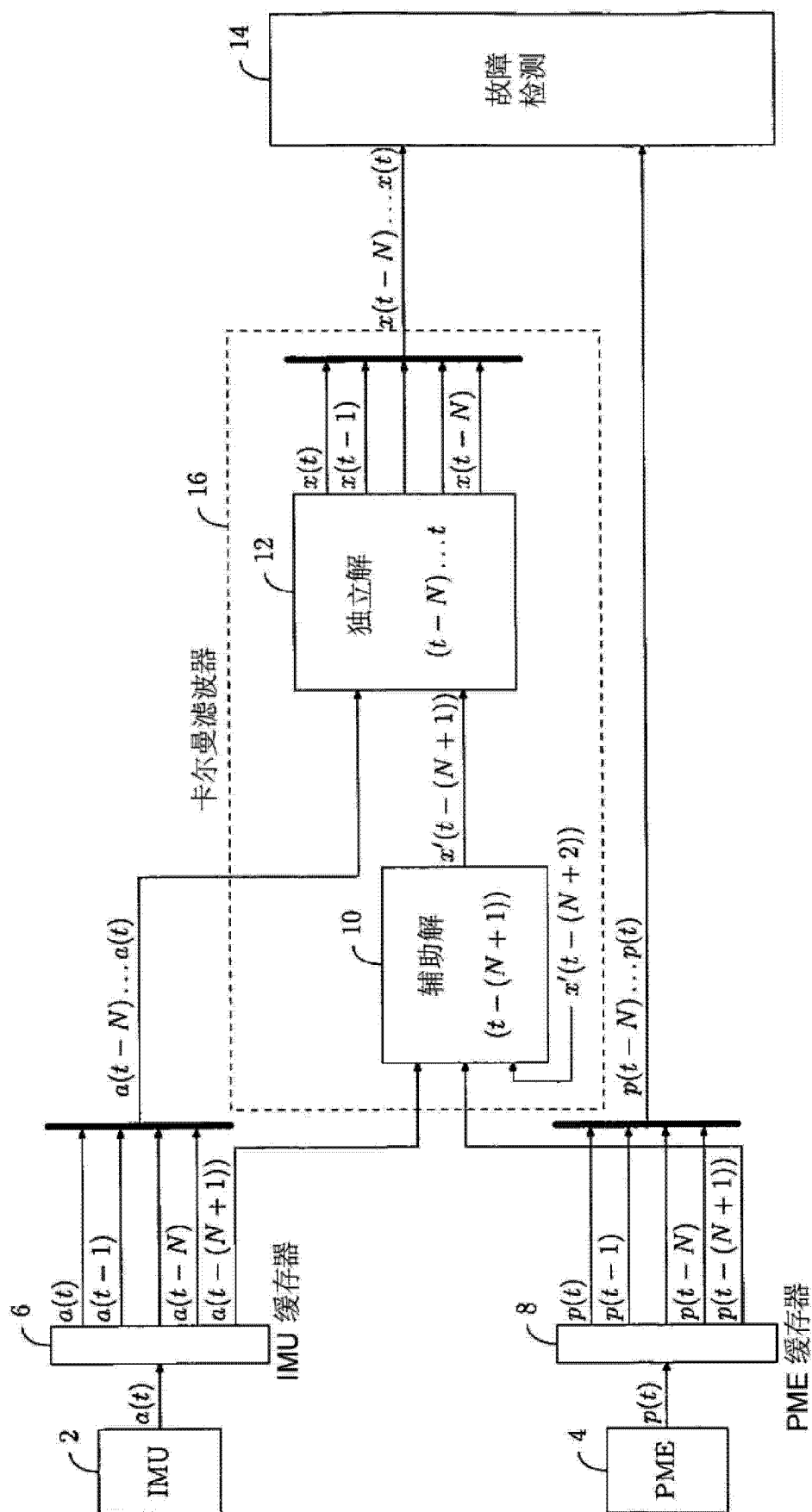


图 1

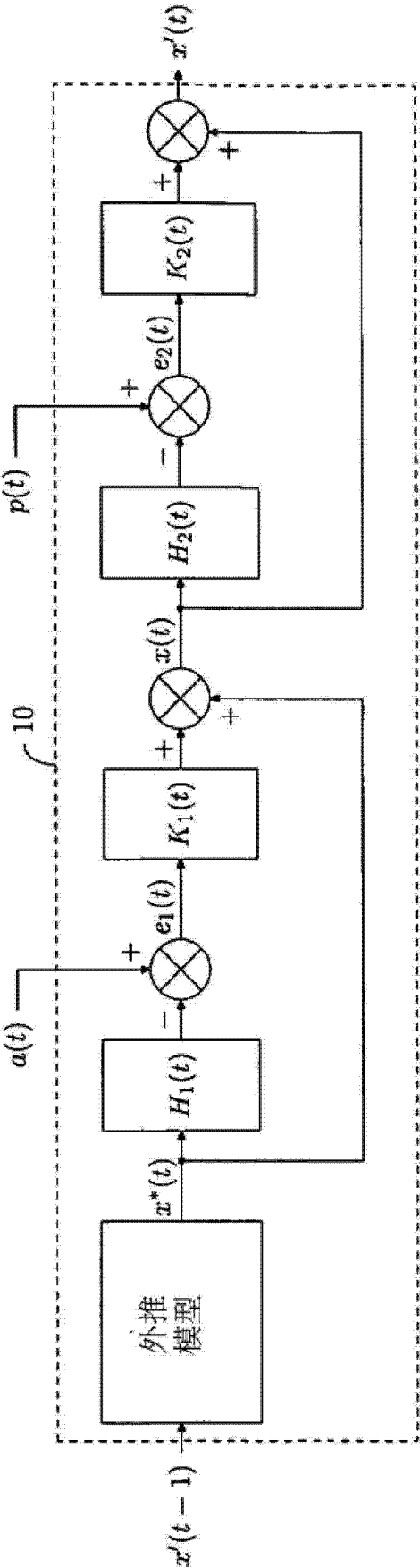


图 2

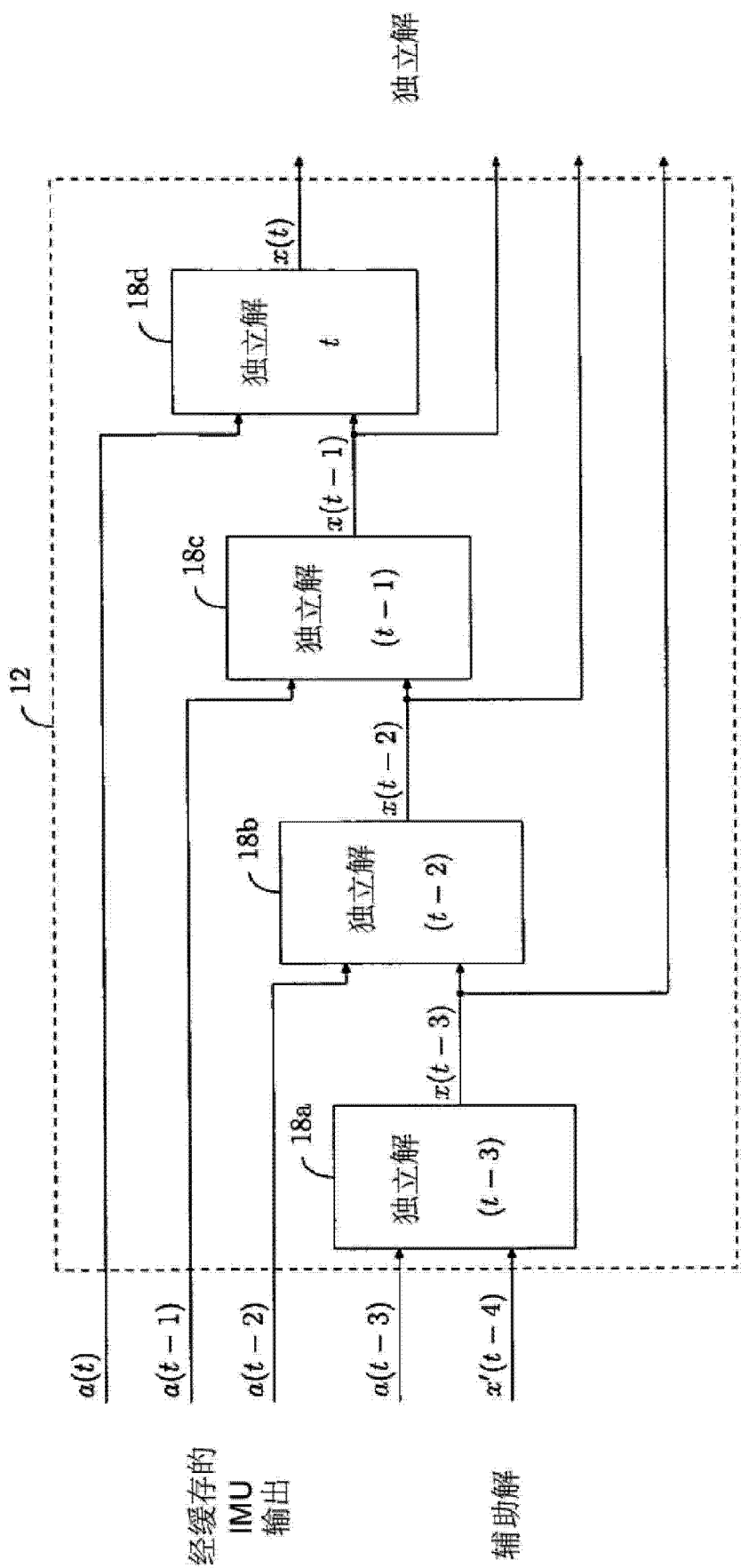


图 3

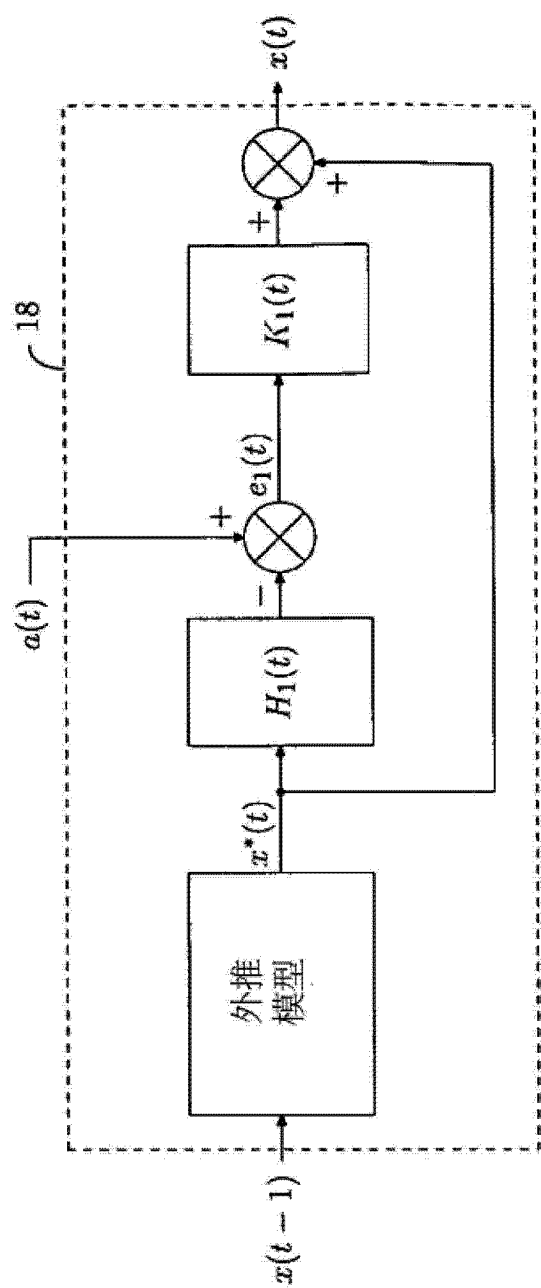


图 4

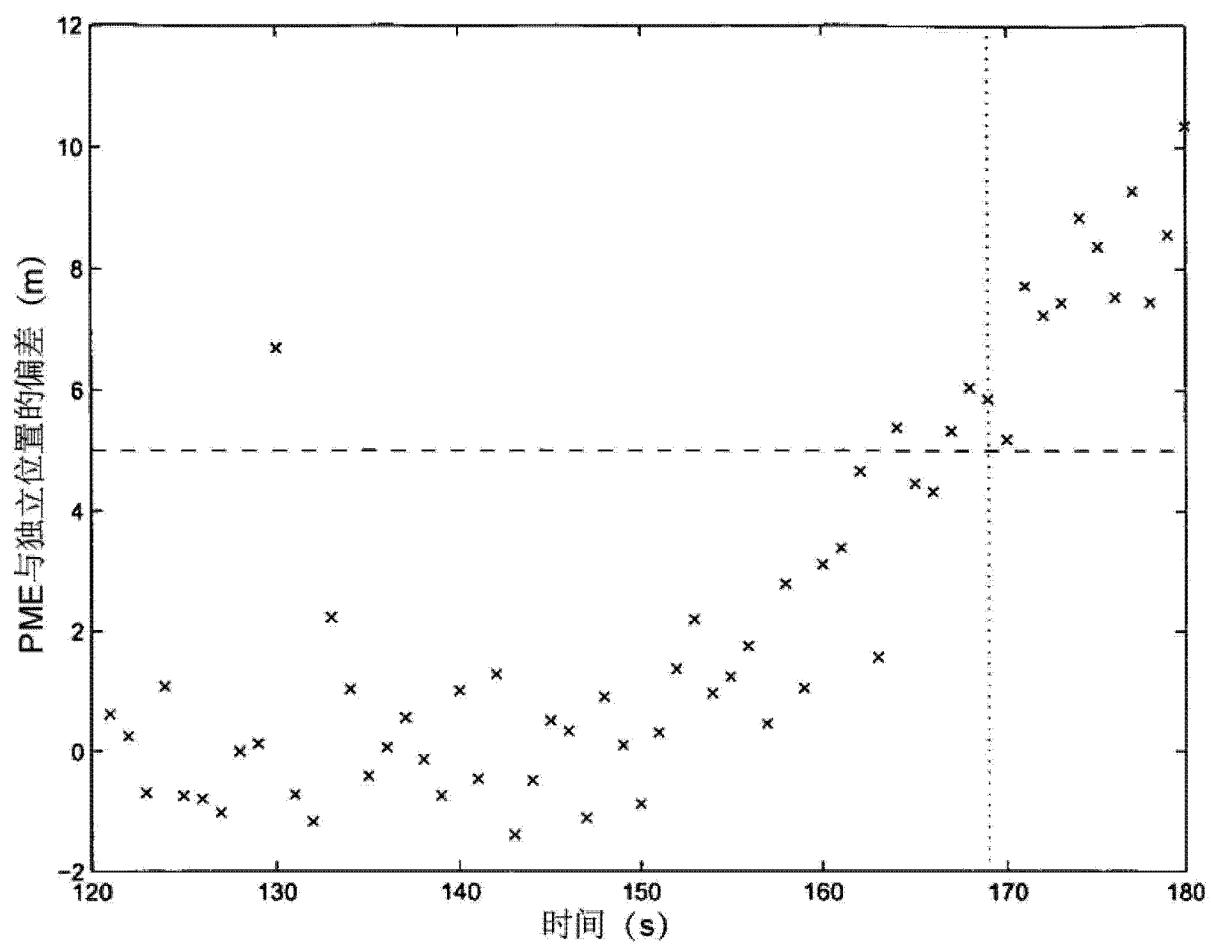


图 5

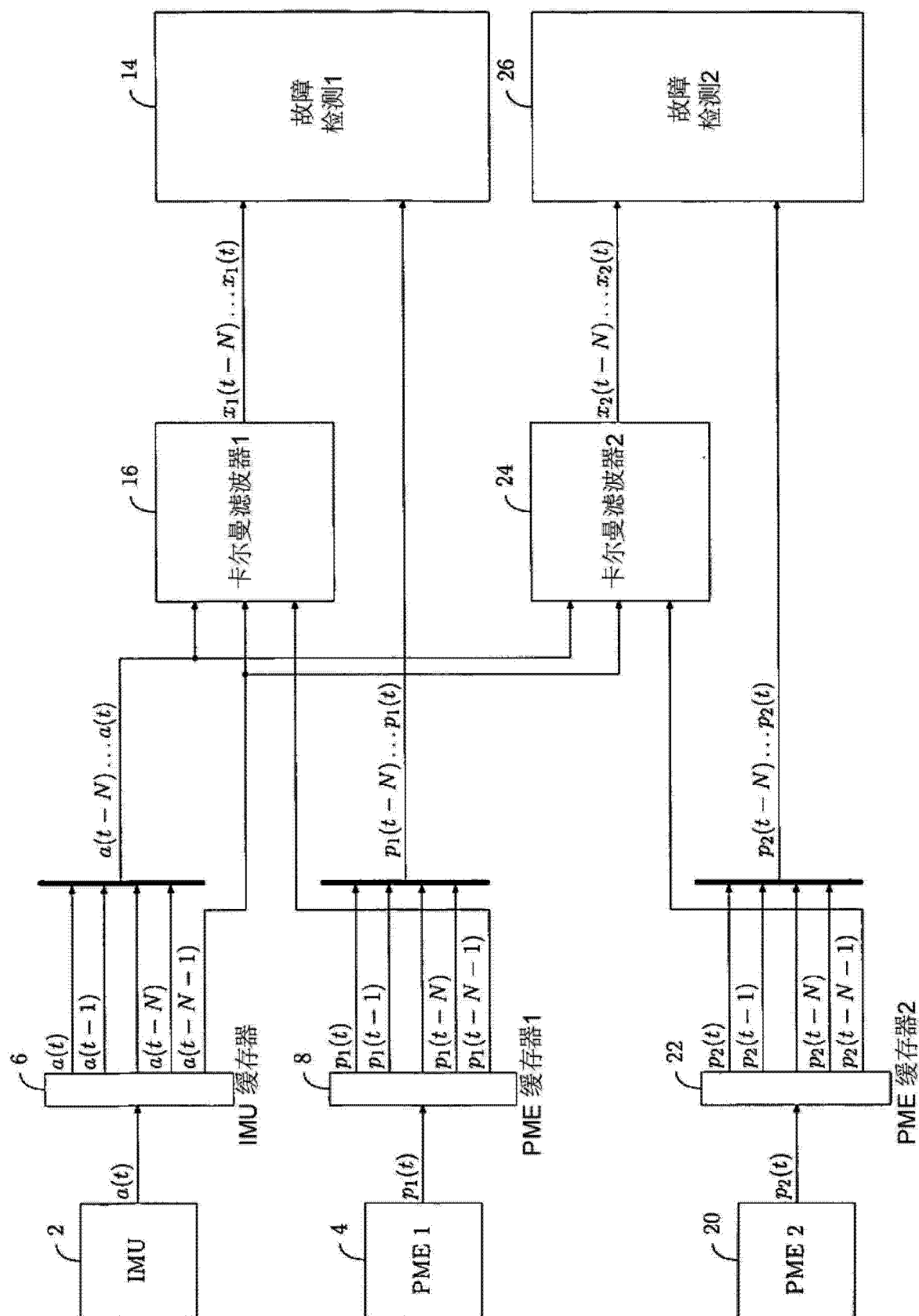


图 6

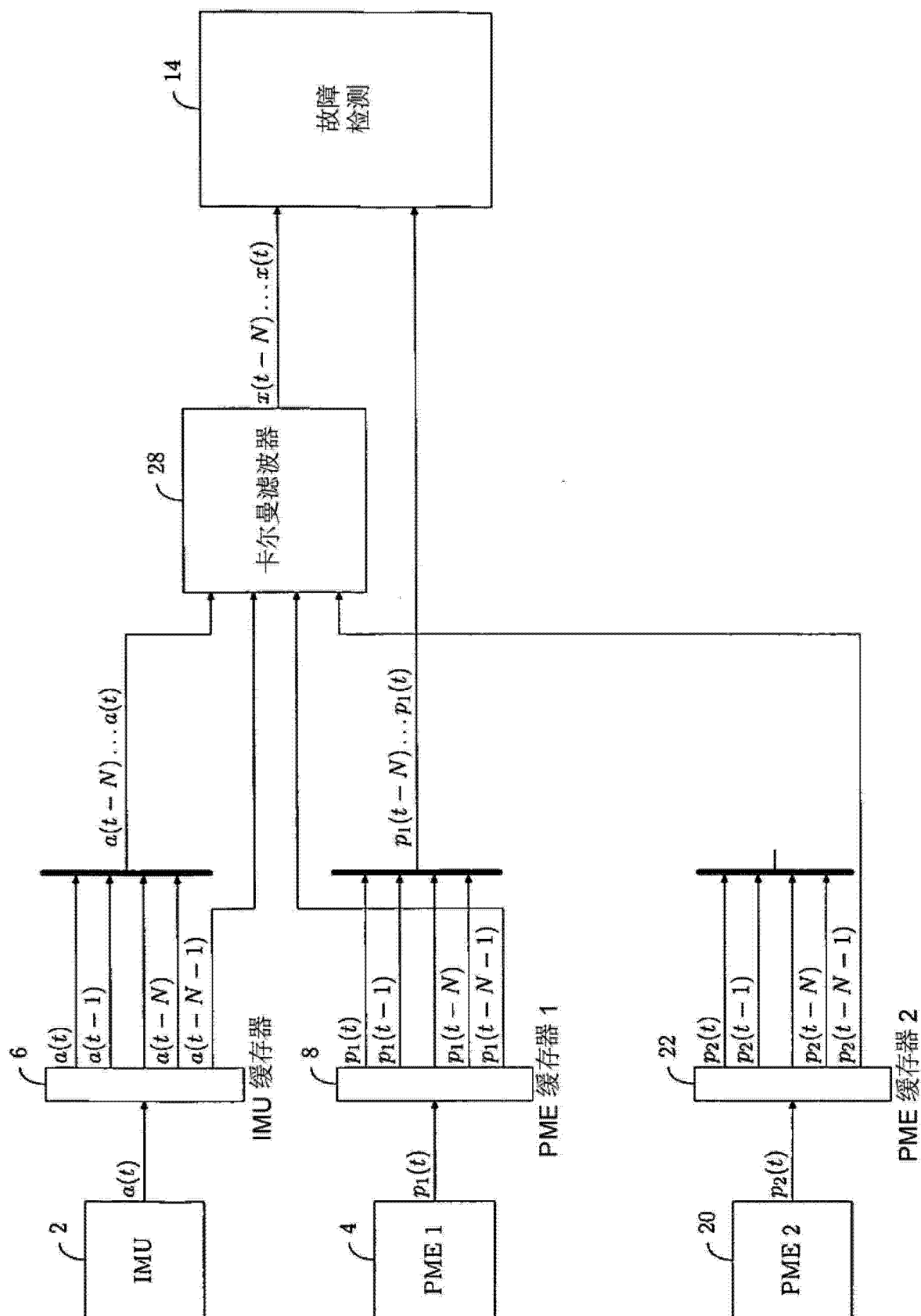


图 7

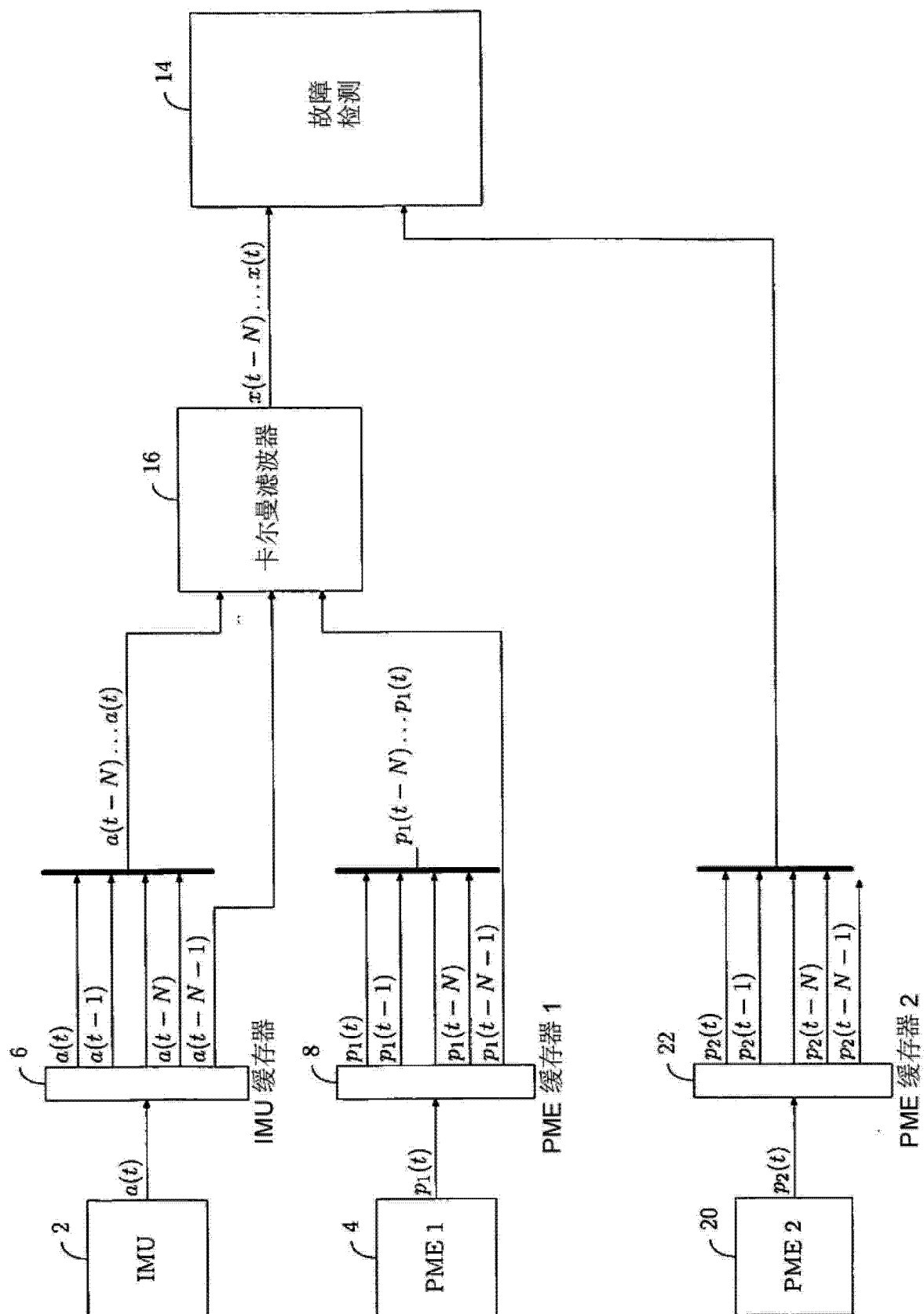


图 8