



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115667704 A

(43) 申请公布日 2023. 01. 31

(21) 申请号 202180039941.4

(22) 申请日 2021.05.26

(30) 优先权数据

20382470.1 2020.06.02 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.12.02

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2021/063990 2021.05.26

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/244909 EN 2021.12.09

(71) 申请人 西门子歌美飒可再生能源创新与技术有限公司

地址 西班牙萨里乌伦

(72) 发明人 J·阿雷利亚诺阿瓜多

M·巴雷拉斯卡拉塞多

A·迪亚兹德科尔奎拉马丁内斯

J·埃尔索托拉尔瓦

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

专利代理师 邹龙辉 吴强

(51) Int.Cl.

F03D 7/04 (2006.01)

G05B 13/04 (2006.01)

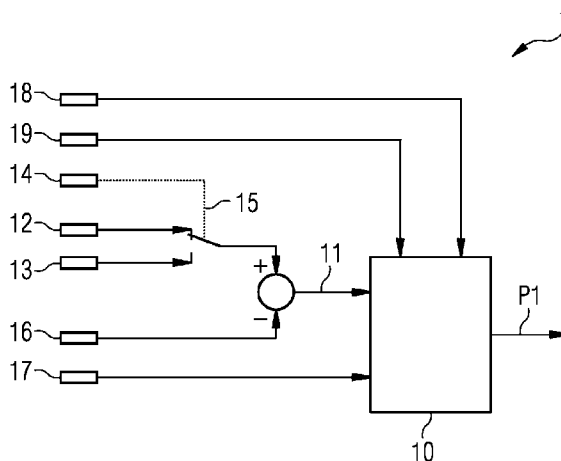
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

## (54) 发明名称

对具有柔性塔架的风力涡轮机的鲁棒控制

## (57) 摘要

描述了一种用于风力涡轮机的控制器,所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱,所述塔架具有接近于或低于所述转子的额定旋转频率的基频。所述控制器包括:转子速度控制模块(1),所述转子速度控制模块(1)包括适于基于转子速度误差信号(11)生成第一桨距控制信号(P1)的第一线性时不变控制系统(10);塔架阻尼模块(2),所述塔架阻尼模块(2)包括适于基于机舱加速度信号(17)生成第二桨距控制信号(P2)的第二线性时不变控制系统(20);以及输出模块,所述输出模块适于基于所述第一桨距控制信号和所述第二桨距控制信号输出桨距控制信号。此外,描述了一种风力涡轮机和一种控制风力涡轮机的方法。



1. 一种用于风力涡轮机的控制器,所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱,所述塔架具有接近于或低于所述转子的额定旋转频率的基频,所述控制器包括

转子速度控制模块(1),所述转子速度控制模块(1)包括第一线性时不变控制系统(10),所述第一线性时不变控制系统(10)适于基于转子速度误差信号(11)生成第一桨距控制信号(P1),

塔架阻尼模块(2),所述塔架阻尼模块(2)包括第二线性时不变控制系统(20),所述第二线性时不变控制系统(20)适于基于机舱加速度信号(17)生成第二桨距控制信号(P2),以及

输出模块,所述输出模块适于基于所述第一桨距控制信号和所述第二桨距控制信号输出桨距控制信号,

其中所述第一线性时不变控制系统(10)包括第一插值单元和多个第一线性时不变控制单元,其中所述第一插值单元适于基于所述第一线性时不变控制单元的相应输出的插值生成所述第一桨距控制信号。

2. 根据前述权利要求所述的控制器,其中所述第二线性时不变系统(20)包括第二插值单元和多个第二线性时不变控制单元,其中所述第二插值单元适于基于所述第二线性时不变控制单元的相应输出的插值生成所述第二桨距控制信号。

3. 根据权利要求1或2所述的控制器,其中所述第一插值单元和/或第二插值单元适于基于所述风力涡轮机的操作点、特别是基于所述桨距控制信号和/或风速信号应用插值。

4. 根据权利要求1至3中的任一项所述的控制器,其中所述多个第一线性时不变控制单元是多个第一状态空间控制单元,和/或其中所述多个第二线性时不变控制单元是多个第二状态空间控制单元。

5. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述机舱加速度信号(17)指示所述机舱的前后加速度。

6. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述塔架阻尼模块(2)适于阻尼所述塔架的第1前后本征模态。

7. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述输出模块适于将所述第一桨距控制信号(P1)和第二桨距控制信号(P2)相加以生成所述桨距控制信号。

8. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述塔架阻尼模块(2)进一步包括移动陷波滤波器(30),所述移动陷波滤波器(30)适于从所述第二桨距控制信号(P2)中滤除转子旋转频率的选定倍数。

9. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述塔架阻尼模块进一步包括相位延迟网络(35),所述相位延迟网络(35)适于根据所述风力涡轮机的操作点、特别是基于所述桨距控制信号和/或经滤波的风速信号将频率范围内的增益应用于所述第二桨距控制信号。

10. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述第一线性时不变控制系统(10)进一步适于基于机舱加速度信号(17)生成所述第一桨距控制信号(P1)。

11. 根据前述权利要求中的任一项所述的控制器,其中所述第一线性时不变控制系统(10)和所述第二线性时不变控制系统(20)利用H无穷方法和定量反馈理论生成。

12. 根据前述权利要求所述的控制器,其中所述H无穷和定量反馈理论方法被迭代地或

专门地用于针对多个选定操作点定义频域塔架负载规格并基于风力涡轮机线性模型综合控制器。

13. 一种风力涡轮机,其包括转子和布置在塔架上的机舱,所述塔架具有接近于或低于所述转子的额定旋转频率的基频,所述风力涡轮机进一步包括根据前述权利要求中的任一项所述的控制器。

14. 一种控制风力涡轮机的方法,所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱,所述塔架具有接近于或低于所述转子的额定旋转频率的基频,所述方法包括

在包括第一线性时不变控制系统(10)的转子速度控制模块(1)中基于转子速度误差信号(11)生成第一桨距控制信号(P1),

在包括第二线性时不变控制系统(20)的塔架阻尼模块(2)中基于机舱加速度信号(17)生成第二桨距控制信号,以及

基于所述第一桨距控制信号(P1)和所述第二桨距控制信号(P2)输出桨距控制信号,

其中所述第一线性时不变控制系统(10)包括第一插值单元和多个第一线性时不变控制单元,其中所述第一插值单元适于基于所述第一线性时不变控制单元的相应输出的插值生成所述第一桨距控制信号。

## 对具有柔性塔架的风力涡轮机的鲁棒控制

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风力涡轮机的领域,特别是涉及一种用于风力涡轮机的控制器,所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱,所述塔架具有接近于或低于转子的额定旋转频率的基频。

### 背景技术

[0002] 在过去的几年中,由于在通常具有低至中风速的地点处对更高电力生产机会的需求,因此高风力涡轮机塔架已经变得非常普遍。

[0003] 然而,高塔架在制造、构造和安装方面带来更高成本。于是,塔架高度的选择基于能量生产与构造成本之间的折衷以优化平准化能源成本(LCOE)。为此原因,材料减轻在高塔架设计中特别令人感兴趣,这导致可以显著降低生产成本的柔性塔架(soft-soft tower)解决方案。

[0004] 塔架通常基于相对固有频率被分类,这主要取决于总塔架高度和重量。因此,材料减少导致柔性塔架设计,其基本固有频率低于1P转子旋转频率。随着风力涡轮机大小的增加和重量的减少,其带来不仅与结构设计相关、而且与控制策略相关的挑战。塔架固有模式的频率下降,从而朝向风力涡轮机闭环控制操作以调节电力生产的频带移动。另外,柔性塔架结构模式的频率和nP转子旋转频率可能变得更接近,从而因其相互作用而增加结构机械负载。柔性塔架的此特定动态行为对在风力涡轮机中使用的经典控制策略施加重要限制。通过使用这些经典控制策略无法实现设计具有柔性塔架的风力涡轮机的所需控制性能值,因此可能无法保证这些风力涡轮机的结构完整性。

[0005] 因此,可能存在对控制风力涡轮发电机以便克服上述问题的新方法的需求。

### 发明内容

[0006] 此需求可以由根据独立权利要求的主题满足。从属权利要求描述了本发明的有利实施例。

[0007] 根据本发明的第一方面,提供一种用于风力涡轮机的控制器,所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱,所述塔架具有接近于或低于转子的额定旋转频率的基频。所述控制器包括:(a) 转子速度控制模块,所述转子速度控制模块包括第一线性时不变控制系统,所述第一线性时不变控制系统适于基于转子速度误差信号生成第一桨距控制信号;(b) 塔架阻尼模块,所述塔架阻尼模块包括第二线性时不变控制系统,所述第二线性时不变控制系统适于基于机舱加速度信号生成第二桨距控制信号;以及(c) 输出模块,所述输出模块适于基于所述第一桨距控制信号和所述第二桨距控制信号输出桨距控制信号。

[0008] 本发明的此方面基于如下构思:第一线性时不变控制模块用于基于转子速度误差信号生成第一桨距控制信号,而第二线性时不变控制模块用于基于机舱加速度信号生成第二桨距控制信号。所产生的桨距控制信号由输出模块基于所述第一和第二桨距控制信号提供。从而,所产生的桨距控制信号考虑转子速度误差和由塔架振荡移动引起的机舱的移动。

通过使用第一和第二线性时不变控制系统,可以提供对风力涡轮机的鲁棒控制,而无来自具有接近于转子的额定旋转频率的频率的塔架振荡的干扰。这种鲁棒控制对于利用例如PI(比例-积分)和/或PID(比例-积分-微分)以及基于稳定性裕量、带宽和阶跃响应的传统规范的已知控制器来说是不可能的。

[0009] 在本上下文中,术语“桨距控制信号”可以特别表示可以用于控制风力涡轮机叶片的桨距角、优选地呈将应用于桨距角的改变或调整(递增/递减值)形式的信号。替代地,桨距控制信号可以指示待设定的桨距角。这同样适用于术语“第一桨距控制信号”和“第二桨距控制信号”。

[0010] 在本上下文中,术语“转子速度误差信号”可以特别表示指示所期望的转子速度(设定点值)与实际转子速度之间的差的信号。设定点值由风力涡轮机控制器确定,并且实际转子速度由诸如光学或磁性传感器系统的适当传感器系统测量。

[0011] 在本上下文中,术语“机舱加速度信号”可以特别表示指示一个或多个方向上的机舱加速度的信号。机舱加速度信号可以由布置在机舱处或机舱中的诸如加速度计的适当传感器提供。

[0012] 根据本发明的一实施例,所述第一线性时不变控制系统包括第一插值单元和多个第一线性时不变控制单元,其中所述第一插值单元适于基于所述第一线性时不变控制单元的相应输出的插值生成所述第一桨距控制信号。

[0013] 使用多个第一线性时不变控制单元和基于相应第一线性时不变控制单元的输出提供插值的第一插值单元使得可以改善所产生的控制,特别是当针对某些操作条件优化第一线性时不变控制单元中的每一者时。从而,针对落入相应第一线性时不变控制单元的最佳操作条件之间或之外的操作条件获得的输出(第一桨距控制信号)将更精确。

[0014] 根据本发明的另一个实施例,所述第二线性时不变系统包括第二插值单元和多个第二线性时不变控制单元,其中所述第二插值单元适于基于所述第二线性时不变控制单元的相应输出的插值生成所述第二桨距控制信号。

[0015] 使用多个第二线性时不变控制单元和基于相应第二线性时不变控制单元的输出提供插值的第二插值单元使得可以改善所产生的控制,特别是当针对某些操作条件优化第二线性时不变控制单元中的每一者时。从而,针对落入相应第二线性时不变控制单元的最佳操作条件之间或之外的操作条件获得的输出(第二桨距控制信号)将更精确。

[0016] 根据本发明的另一个实施例,第一和/或第二插值单元适于基于风力涡轮机的操作点、特别是基于桨距控制信号和/或(所测量或所估计的)风速信号应用插值。

[0017] 换句话说,第一和/或第二插值单元在针对插值选择和/或加权第一和/或第二线性时不变控制单元时考虑风力涡轮机的当前操作点。

[0018] 根据本发明的另一个实施例,所述多个第一线性时不变控制单元是多个第一状态空间控制单元,和/或所述多个第二线性时不变控制单元是多个第二状态空间控制单元。

[0019] 换句话说,每一(第一和/或第二)线性时不变控制单元可以利用基于以下形式的两个方程式的计算:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A \cdot x(k) + B \cdot u(k) \\p(k+1) &= C \cdot x(k) + D \cdot u(k)\end{aligned}$$

此处, $x(k+1)$ 是控制器状态的当前矢量, $x(k)$ 是控制器状态的先前矢量, $p(k+1)$ 是

当前桨距角控制信号,并且 $u(k)$ 是先前输入矢量(测量值,特别是转子速度误差和/或机舱加速度)。此外,A、B、C和D是状态空间矩阵。

[0020] 替代地,一些或所有线性时不变控制单元可以被实现为传递函数或零极增益单元(zero-pole-gain unit)。

[0021] 根据本发明的另一个实施例,机舱加速度信号指示机舱的前后加速度。

[0022] 换句话说,如果风力涡轮机不直接指向风,则机舱加速度信号指示机舱在风向上或至少在非常接近于风向的方向上的加速度。

[0023] 根据本发明的另一个实施例,塔架阻尼模块适于阻尼(抑制)塔架的第1前后本征模态(1st fore-aft eigen mode)。

[0024] 换句话说,塔架阻尼模块用于减少或理想地消除在机舱沿风的方向来回振荡时发生的有效风速的变化。

[0025] 根据本发明的另一个实施例,输出模块适于将第一和第二桨距控制信号相加以生成桨距控制信号。

[0026] 根据本发明的另一个实施例,塔架阻尼模块进一步包括移动陷波滤波器(moving notch filter),所述移动陷波滤波器适于从第二桨距控制信号中滤除转子旋转频率的选定倍数。

[0027] 从而,确保控制器将不在转子旋转频率的选定倍数下作出反应。

[0028] 根据本发明的另一个实施例,塔架阻尼模块进一步包括相位延迟网络,所述相位延迟网络适于根据所述风力涡轮机的操作点、特别是基于所述桨距控制信号和/或经滤波的风速信号将频率范围内的增益应用于第二桨距控制信号。

[0029] 根据本发明的另一个实施例,第一线性时不变控制系统进一步适于基于机舱加速度信号生成第一桨距控制信号。

[0030] 换句话说,第一线性时不变控制系统基于转子速度误差信号和机舱加速度信号两者生成第一桨距控制。

[0031] 通过还使用机舱加速度信号(即,驱动塔架阻尼模块的信号),可以实现转子速度控制与塔架阻尼控制之间的更好耦合(多输入多输出或MIMO(多输入多输出)控制)。

[0032] 根据本发明的另一个实施例,利用H无穷方法和定量反馈理论生成第一线性时不变控制系统和第二线性时不变控制系统。

[0033] 通过使用H无穷方法(即,基于数学优化来以所保证的性能实现稳定性的控制器综合的控制方法)和定量反馈理论(QFT)(即,允许在设备不确定性的指定区域内实现所期望的鲁棒设计的频域控制技术)来生成第一和第二线性时不变控制系统,可以获得非常有效的控制器,该控制器能够可靠地处理风扰动抑制、同时在借助常规基于PI/PID的控制器不可能达到的水平上阻尼第一塔架本征模态。

[0034] 根据本发明的另一个实施例,所述H无穷和定量反馈理论方法被迭代地或专门地用于针对多个选定操作点定义频域塔架负载规格并基于风力涡轮机线性模型综合控制器。

[0035] 针对所有相关操作点由风力涡轮机的空气弹性变形模型(aeroelastic model)获得风力涡轮机线性模型。

[0036] 虽然H无穷和定量反馈理论方法的专用可能是有效的,但是已经示出两种技术的迭代应用特别有利。在后一情况下,针对所有操作点使用H无穷数学优化来综合牵引控制器

(初始控制器, draft controller) (即, 初始控制单元)。然后, 针对所有操作点, 针对从桨距和风与转子速度、塔架负载和加速度以及桨距位置的关系使用QFT方法改进牵引控制器的规格。

[0037] 根据本发明的第二方面, 提供一种风力涡轮机, 其包括转子和布置在塔架上的机舱, 所述塔架具有接近于或低于转子的额定旋转频率的基频。所述风力涡轮机进一步包括根据第一方面或本文中描述的任一示例性实施例的控制器。

[0038] 本发明的此方面利用如上所述有利第一方面来提供对具有柔性塔架的风力涡轮机的鲁棒控制。

[0039] 根据本发明的第三方面, 提供一种控制风力涡轮机的方法, 所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱, 所述塔架具有接近于或低于转子的额定旋转频率的基频。所述方法包括: (a) 在包括第一线性时不变控制系统的转子速度控制模块中基于转子速度误差信号生成第一桨距控制信号; (b) 在包括第二线性时不变控制系统的塔架阻尼模块中基于机舱加速度信号生成第二桨距控制信号; 以及 (c) 基于所述第一桨距控制信号和所述第二桨距控制信号输出桨距控制信号。

[0040] 本发明的此方面总体基于与上述第一方面相同的构思。

[0041] 应注意, 已经参考不同主题描述了本发明的实施例。特别地, 已经参考方法类权利要求描述一些实施例, 而已经参考装置类权利要求描述其他实施例。然而, 所属领域的技术人员将从以上和以下描述得知, 除非另有说明, 否则除属于一种类型的主题的特征的任何组合以外, 与不同主题有关的特征的任何组合 (特别是方法类权利要求的特征和装置类权利要求的特征的组合) 也是此文件的公开内容的一部分。

[0042] 本发明的上文定义的方面和其他方面从将在下文中描述的实施例的示例显而易见并参考实施例的示例加以解释。将在下文中参考实施例的示例更详细地描述本发明。然而, 明确指出, 本发明并不限于所描述示例性实施例。

## 附图说明

[0043] 图1示出了根据本发明的一实施例的风力涡轮机控制器的转子速度控制模块。

[0044] 图2示出了根据本发明的一实施例的风力涡轮机控制器的塔架阻尼模块。

## 具体实施方式

[0045] 附图中的图解是示意性的。应注意, 在不同图中, 类似或相同元件设置有相同的附图标记或者带有仅第一个数字不同的附图标记。

[0046] 本发明提供一种用于风力涡轮机的控制器, 所述风力涡轮机包括转子和布置在塔架上的机舱, 所述塔架具有接近于或低于转子的额定旋转频率的基频。这种塔架通常称为柔性塔架。所述控制器包括两个控制模块, 即如图1中所示和下文论述的转子速度控制模块1以及如图2中所示和下文进一步论述的塔架阻尼模块2。转子速度控制模块1生成并输出第一桨距控制信号P1。塔架阻尼模块2生成并提供第二桨距控制信号P2。第一桨距控制信号P1和第二桨距控制P2由输出模块(未示出)组合、特别是相加, 并且被传递到风力涡轮机的桨距调节系统, 优选地作为指示将应用于所述桨距的有符号量的调整的增量信号被传递到风力涡轮机的桨距调节系统。

[0047] 图1示出了根据本发明的一实施例的风力涡轮机控制器的转子速度控制模块1。转子速度控制模块1包括(第一)线性时不变控制系统10,其经耦合以接收转子速度误差信号11作为输入,以及任选地接收机舱加速度信号17作为另一个输入,作为生成(第一)桨距控制信号P1的基础。转子速度误差信号11是作为经滤波的转子速度信号12或转子速度信号13与转子速度参考信号16之间的差获得的。是使用经滤波的转子速度信号12还是(未经滤波的)转子速度信号13,由控制该开关15的控制信号14确定。转子速度参考信号16是控制器的当前设定点。线性时不变控制系统10进一步接收用于在控制中产生抗饱和策略(anti-windup strategy)的电力环路桨距控制信号18和提供关于风力涡轮机的操作点的信息的经滤波的桨距控制信号19。

[0048] 在此示例性实施例中,(第一)线性时不变控制系统10是包括多个状态空间控制单元的状态空间控制系统,每一状态空间控制单元针对特定操作点而被开发,所述特定操作点是诸如低风速、额定风速和高风速。状态空间控制系统10包括调度控制情形,所述调度控制情形根据预先确定的插值控制法则对不同的状态空间控制单元(或状态空间表示的控制器)进行插值以生成非线性桨距控制动作。以下公式示出了在状态空间控制系统10中插值的这些控制单元中的一者的状态空间表示。

$$\begin{aligned} X_{SControl}(k+1) &= A_{dSControl}X_{SControl}(k) + B_{dSControl} \begin{bmatrix} GenSpeedError(k) \\ NaxXAcc(k) \end{bmatrix} \\ Pitch_{SControl}(k+1) &= C_{dSControl}X_{SControl}(k) + D_{dSControl} \begin{bmatrix} GenSpeedError(k) \\ NacXAcc(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

[0049] 此处,k+1是当前样本,并且k是上一个样本。 $A_{dSControl}$ 、 $B_{dSControl}$ 、 $C_{dSControl}$ 和 $D_{dSControl}$ 是表示控制器动态的离散化状态空间矩阵。 $X_{SControl}(k+1)$ 是控制器状态的当前矢量,并且 $X_{SControl}(k)$ 是上一个样本的状态的矢量。 $Pitch_{SControl}(k+1)$ 是来自控制系统10的输出P1。 $GenSpeedError(k)$ 是转子速度误差,并且 $NacXAcc(k)$ 是机舱加速度(在前后方向上)。

[0050] 图2示出了根据本发明的一实施例的风力涡轮机控制器的塔架阻尼模块2。塔架阻尼模块2包括(第二)线性时不变控制系统20,其经耦合以接收机舱加速度信号17、桨距控制信号21(等于图1中的P1)和操作状态信号22作为输入。基于这些输入,线性时不变控制系统20确定输出信号23,输出信号23指示将应用于由转子速度控制模块1(如上所述)确定的第一桨距控制信号P1以便减少或消除来自振荡塔架移动的不期望影响的桨距控制校正量。输出23通过移动陷波滤波器30以滤除转子旋转频率的选定倍数。所述移动陷波滤波器从倍增器25接收关于特定频率的信息,倍增器25将经低通滤波的转子速度信号26乘以因子27(诸如例如1或3),并且将所产生频率输入到滤波器30。经滤波的输出信号32被传递到相位延迟网络35,相位延迟网络35根据作为风力涡轮机的操作点的指示的经滤波的风速信号36将频率范围内的增益应用于经滤波的输出信号32。来自相位延迟网络35的所产生的输出P2是(第二)桨距控制信号P2,其用于减少或消除塔架振荡移动对风力涡轮机的桨距控制的影响。

[0051] 在此示例性实施例中,(第二)线性时不变控制系统20是包括多个状态空间控制单元的状态空间控制系统,每一状态空间控制单元针对特定操作点而被开发,所述特定操作点是诸如低风速、额定风速和高风速。状态空间控制系统20包括调度控制情形,所述调度控

制情形根据预先确定的插值控制法则对不同状态空间控制单元(或状态空间表示的控制器)进行插值以生成非线性桨距控制动作。以下公式示出在状态空间控制系统20中插值的这些控制单元中的一者的状态空间表示。

$$\begin{aligned} X_{ATD}(k+1) &= Ad_{ATD}X_{ATD}(k) + Bd_{ATD}NacXAcc(k) \\ Pitch_{ATD}(k+1) &= Cd_{ATD}X_{ATD}(k) + Dd_{ATD}NacXAcc(k) \end{aligned}$$

[0052] 此处,  $k+1$  是当前样本, 并且  $k$  是上一个样本。 $Ad_{ATD}$ 、 $Bd_{ATD}$ 、 $Cd_{ATD}$  和  $Dd_{ATD}$  是表示控制器动态的离散化状态空间矩阵。 $X_{ATD}(k+1)$  是控制器状态的当前矢量, 并且  $X_{ATD}(k)$  是上一个样本的状态的矢量。 $Pitch_{ATD}(k+1)$  是来自控制系统20的输出23。 $NacXAcc(k)$  是机舱加速度(在前后方向上)。

[0053] 应注意, 术语“包括”并不排除其他元件或步骤, 并且冠词“一(a)”或“一(an)”的使用并不排除多个。而且, 可以组合与不同实施例相关联描述的元件。应进一步注意, 权利要求书中的附图标记不应被解释为限制权利要求书的范围。

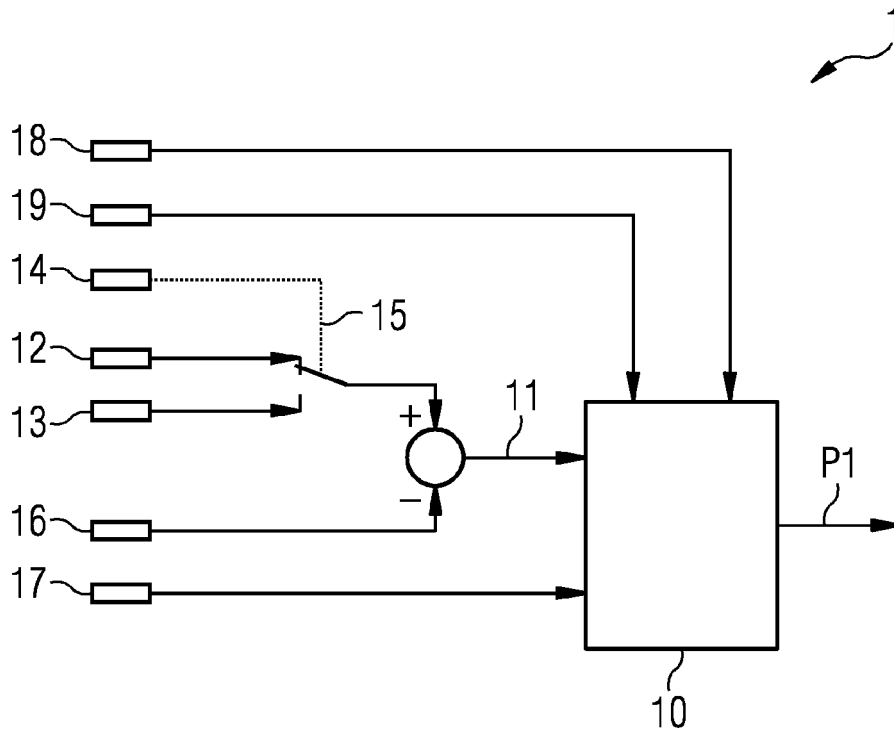


图 1

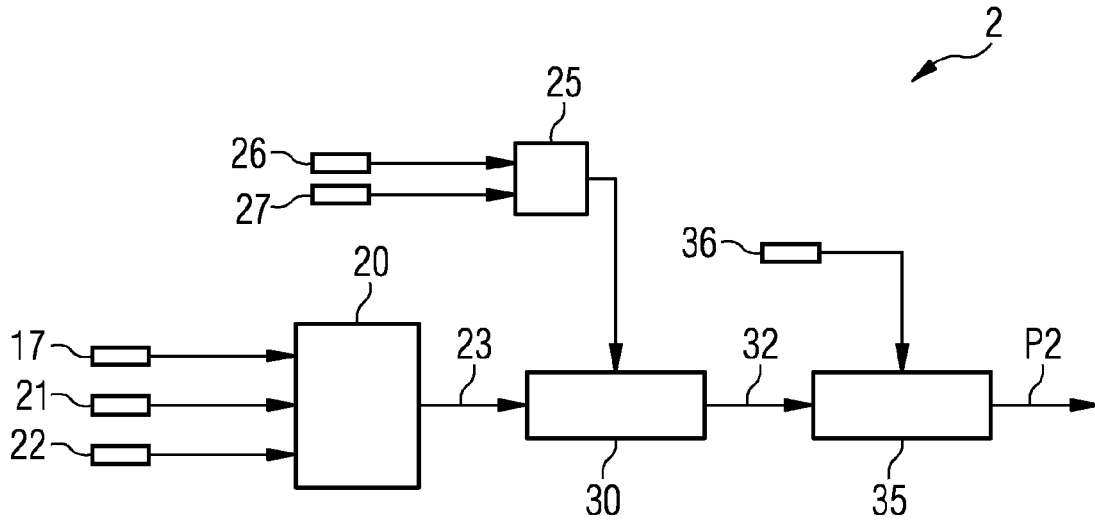


图 2