

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G05B 19/04 (2006.01)

G05B 19/05 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910163503.X

[43] 公开日 2010年2月24日

[11] 公开号 CN 101655699A

[22] 申请日 2009.8.21

[21] 申请号 200910163503.X

[30] 优先权

[32] 2008.8.22 [33] US [31] 12/196839

[71] 申请人 通用电气公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 C·徐 A·M·里特 D·史密斯

L·J·加尔塞斯 R·A·西摩尔

M·E·谢泼德 J·M·诺瓦克

B·A·格里特森

P·M·什切斯尼

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 王岳 李家麟

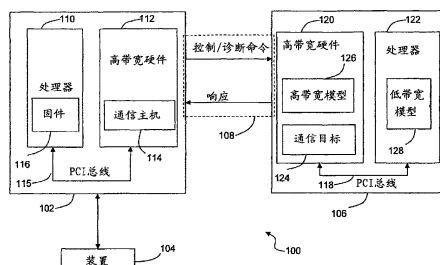
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

[54] 发明名称

用于模拟装置操作的系统和方法

[57] 摘要

本发明涉及用于模拟装置操作的系统和方法。提供了用于模拟装置(104)的系统(100)的方法 and 系统的实施例。根据本发明一示例性实施例，公开了用于模拟装置(104)的系统(100)。该系统(100)可以包括控制器(102)，其包括用于执行对该装置(104)的控制命令的装置操作逻辑的计算机可执行指令。该系统(100)还可以包括模拟器(106)，其与控制器(102)相通信，其中该模拟器(106)可以包括高带宽硬件(120)，其包括至少具有第一装置性状的至少一个高带宽模型(124)。该模拟器(106)还可以包括至少一个处理器(122)，其包括至少具有第二装置性状的至少一个低带宽模型(128)。



1.一种用于模拟装置(104)的系统(100),包括:

控制器(102),包括用于执行对该装置(104)的控制命令的装置(104)操作逻辑;以及

模拟器(106),与控制器(102)相通信,其中该模拟器(106)包括:

高带宽硬件(112),包括至少具有第一装置性状的至少一个高带宽模型(126);以及

至少一个处理器(110),包括至少具有第二装置性状的至少一个低带宽模型(128)。

2.如权利要求1所述的系统(100),其中:该高带宽硬件(112)包括至少一个现场可编程门阵列,所述至少一个现场可编程门阵列包括至少一个高带宽模型(126)。

3.如权利要求1所述的系统(100),其中该至少一个低带宽模型(126)包括具有第二装置性状的至少一个软件模拟模型。

4.如权利要求1所述的系统(100),其中该第一装置性状包括电性状、热性状、化学性状或者机械性状中的至少一个。

5.如权利要求1所述的系统(100),其中该第二装置性状包括机械速度、电场、风速或者流量中的至少一个。

6.如权利要求1所述的系统(100),其中该控制器(102)和模拟器(106)通过至少一个串行链路(108)进行通信。

7.如权利要求1所述的系统(100),其中该模拟器(106)还包括可用于促进高带宽硬件(112)与所述至少一个处理器(110)之间的通信的至少一个高速数字通信总线(115)。

8.如权利要求1所述的系统(100),其中该控制器(102)可用于将至少一个控制命令或者诊断命令发送到模拟器(106),以及其中该模拟器(106)可用于至少部分地响应于所述控制命令或者诊断命令并且至少部分地基于高带宽模型(126)或者低带宽模型(128)中的至少一个将对于所述控制命令或者诊断命令的至少一个响应输送到控制器(102)。

9.如权利要求1所述的系统(100),其中该装置(104)包括以下中的至少一个的机械部件或电部件:风轮机、气体管道泵站、油料

储存泵站、气体压缩机、发电机、电动机、电桥、连接电容、变压器、过滤器、机械传动装置或者控制器（102）的 I/O。

10.一种用于模拟装置（104）的方法（220），包括：

提供（202）控制器（102），该控制器（102）包括用于执行对该装置（104）的控制命令的装置操作逻辑；

提供（204）模拟器（106），该模拟器（106）与控制器（102）相通信，并包括高带宽硬件（112）和至少一个处理器（110）；

通过该高带宽硬件（112）对至少具有第一装置性状的高带宽模型（126）进行建模（206）；

通过所述至少一个处理器（110）对至少具有第二装置性状的低带宽模型（128）进行建模（208）；

将至少一个控制命令从控制器（102）发送（210）到模拟器（106）；
以及

至少部分地响应于发送控制命令并且至少部分地基于高带宽模型（126）或者低带宽模型（128）中的至少一个，在控制器（102）处从模拟器（106）接收（212）对所述至少一个控制命令的至少一个响应。

用于模拟装置操作的系统和方法

技术领域

本发明总体上涉及硬件模拟，更具体地涉及提供用于模拟装置操作（plant operation）的系统和方法。

背景技术

通常，针对模拟的装置模型来测试装置的控制系统。出于成本和安全的因素，激发了模拟的装置模型的使用。对于真实装置或者样机的测试成本更高，这是由于需要真正的硬件部件。对于真实装置的重复模拟来说，真实装置部件的软件模型通常更便宜并且更容易处理。此外，控制系统在某些测试条件下的行为响应会导致真实装置的一个或多个部件的故障，由此会危害到该装置的安全。除了低成本以及更加安全的优点之外，该模拟的装置模型还在以边界条件测试该系统时提供了灵活性而不会损害该真实装置。控制系统与模拟的装置模型通过一组用于模拟控制系统响应的输入-输出（I/O）命令的接口连接可以称作半实物（Hardware-In-The-Loop, HIL）模拟。

通常，控制系统包括实时运行的控制器。然而，到控制器和模拟的装置模型的模拟 I/O 可以不实时操作。因此，由装置模型提供给控制器的响应可能与控制器工作的频率不匹配。因此，该 HIL 模拟可能与具有真实装置的控制器的实际响应产生分歧。

与模型计算时间相耦合的 I/O 存取时间会在受控装置的闭环响应中引入延迟。此外，市场上可以买到的用于模拟装置模型的软件建模包具有不会使针对某些建模命令的等待时间最小化的响应时间。

因此，需要减少装置模型中的响应时间和等待时间的、用于模拟装置操作以及使装置模型更适于实时或者接近实时模拟的系统和方法。还需要一种考虑到基于装置的需要而实施高速和低速模拟的系统。

发明内容

根据本发明的示例性实施例，公开了一种用于模拟装置的系统。

该系统可以包括控制器，该控制器包括用于执行对该装置的控制命令的装置操作逻辑。该系统还可以包括与控制器通信的模拟器，该模拟器可以包括具有至少一个高带宽模型的高带宽硬件，该高带宽模型至少具有第一装置性状（behavior）。该控制器还可以包括具有至少一个低带宽模型的至少一个处理器，该低带宽模型至少具有第二装置性状。

根据本发明的另一个示例性实施例，公开了一种用于模拟装置的方法。该方法可以包括提供包含用于执行对该装置的控制命令的装置操作逻辑的控制器。该方法还包括提供与控制器通信的模拟器。与模拟器通信的该控制器可以包含高带宽硬件和至少一个处理器。该方法还可以包括通过高带宽硬件对至少具有第一装置性状的高带宽模型进行建模。而且，控制器中的至少一个处理器可以对至少具有第二装置性状的低带宽模型进行建模。该方法还可以包括将至少一个控制命令从控制器发送到模拟器，并且至少部分地响应于发送控制命令以及至少部分地基于高带宽模型或者低带宽模型中的至少一个，在控制器处从模拟器接收对所述至少一个控制命令的至少一个响应。

根据本发明的又一个示例性实施例，公开了一种用于模拟装置的系统。该系统可以包括具有用于执行对装置的控制命令的装置操作逻辑的控制器。该系统还可以包括与控制器相通信的模拟器。该控制器可以包括至少一个现场可编程门阵列，其由至少具有第一装置性状的至少一个高带宽模型构成，以及包括至少一个处理器，其由至少具有第二装置性状的至少一个低带宽软件模型构成。此外，控制器和模拟器可以借助至少一个串行链路进行通信，由此控制器可用于向模拟器发送至少一个控制命令或者诊断命令。模拟器还至少部分地响应于控制命令或者诊断命令并且至少部分地基于高带宽模型或低带宽模型中的至少一个，使用串行链路将对于所述控制命令或者诊断命令的至少一个响应输送到控制器。

本领域技术人员通过以下的详细说明、附图和所附的权利要求将进一步理解本发明的其它实施例、方面和特征。

附图说明

以上已经概括地描述了本发明，现在将参照附图，这些附图不一

定是按照比例画出的，在附图中：

图 1 是根据本发明一个实施例示出在控制器与实时模拟的装置模型之间的接口的示例性装置模拟系统的示意图示；

图 2 是根据本发明一个实施例示出用于实时模拟装置模型的方法的一个实例的流程图。

具体实施方式

现在将在下文中参照附图更完整地描述本发明的示例性实施例，在附图中示出了本发明的一些实施例而不是全部。实际上，本发明可以具体化为许多不同的形式，并且不应认为限于本文中提出的实施例；而是，所提供的这些实施例是为了使本说明书满足适用的法律要求。贯穿本文相同的附图标记表示相同的元件。

公开的是例如通过半实物（HIL）系统对装置进行实时模拟的方法和系统。根据本发明的一个示例性实施例，控制器与该系统的模拟器/装置模型相接口连接。该控制器可以包括用于实时或近实时地执行高速任务以及通用的低速任务的独立的专用硬件部件。高带宽硬件可以包括内置现场可编程门阵列（FPGA）或者特定用途集成电路（ASIC），并且可以在硬件本身上执行任务。然而，可以由控制器的处理器中的低带宽固件来执行通用的低速任务。该控制器还与模拟装置的模拟器相连。模拟器的配置可以是控制器的镜像。该模拟器可以包括具有内置 FPGA 或者 ASIC 的高带宽硬件。FPGA 或者 ASIC 可以包括用于实时或者近实时地实施模拟的高带宽模型。模拟器还可以包括具有用于实施通用的低速模拟的低带宽模型的处理器。响应于来自控制器的控制或者诊断命令，模拟器可以至少根据第一装置性状或者第二装置性状至少在高带宽模型或者低带宽软件模型之一中来实施模拟。因此，该系统和方法允许协调组合的高带宽和低带宽模型的不同部分的时序执行，从而使它们能够尽可能接近实时地工作。

图 1 是示出控制器 102 与实时模拟的装置模型之间的接口的示例性装置模拟系统 100 的示意图。而且，图 1 示出了本发明的示例性实施例，其中控制器 102 可以通过串行链路 108 与至少一个模拟器 106 相连。在示例性实施例中，该串行链路 108 可以是高速串行链路（HSSL）。该 HSSL 有助于控制器 102 与模拟器 106 之间的高速通信。

而且,该串行链路 108 可以用于将来自控制器 102 的至少一个控制或者诊断命令发送到模拟器 106。类似的是,还可以通过串行链路 108 将模拟器 106 对于控制器命令的响应传递至控制器 102。

参照图 1,控制器 102 可以包括两个主要的硬件部件:处理器 110 和高带宽硬件 112。在示例性实施例中,控制器 102 中的高带宽硬件 112 可以用作通信主机 114。处理器 110 和高带宽硬件 112 可以包括用于执行对于装置 104 和模拟器 106 的控制命令的装置操作逻辑的计算机可执行指令。高带宽硬件 112 可以被配置用于控制器 102 的实时操作,并且处理器 110 可以被配置用于基于装置 104 性状的低速或者伪实时操作。在本发明的示例性实施例中,高带宽硬件 112 可以包括 FPGA,同时处理器 110 至少可以包括固件 116。处理器 110 和高带宽硬件 112 可以通过高速数字通信总线 118 相互通信。在本发明的示例性实施例中,高速数字通信总线 115 可以是外部部件互连 (PCI) 总线。

与控制器 102 相连的模拟器 106 还可以包括两个部件:高带宽硬件 120 和处理器 122。在示例性实施例中,模拟器 106 中的高带宽硬件 120 可以用作通信目标 124。高带宽硬件 120 可以是 I/O 板的一部分(图中未示出)并且可以包括至少一个 FPGA,该 FPGA 实现至少针对第一装置性状的高带宽模型 126。在本发明的示例性实施例中,第一装置性状可以是电性状、热性状、化学性状或者机械性状中的至少一个,其本质上可以是实时的或者近实时的。FPGA 中实现的高带宽模型 126 可以存储用于模拟实时或近实时装置性状的逻辑。在示例性实施例中,为了减少等待时间,实时或者近实时模拟中的采样速率可以在纳秒(nanosecond)数量级,例如在一个实例中约为 50-100 纳秒。尽管传统的处理器设计根据一组指令按顺序操作,但是 FPGA 处理器能够并行地执行操作。因此,FPGA 非常适于通过减少软件模型中存在的等待时间来进行快速模拟。因此,可以在 FPGA 卡上实现高速模拟。

相应地,在所提出的配置中,可以通过将仅除了 I/O 之外的装置计算任务置于相同的 FPGA 卡上来实现基于 FPGA 的对装置的实时模拟。该布置可以使 FPGA 目标代码被包括为更大的实时模拟模型的一部分。可以在 FPGA 卡中执行 C 代码和 FPGA 硬件描述语言(HDL)

代码。在另一个实施例中，可以由用于实现实时或者近实时模拟的 ASIC 来取代该 FPGA 卡。

然而，在不同的测试条件下，装置模型可能表现得不同。在示例性实施例中，可以在处理器 122 中执行不需要实时操作的模拟器 106 的通用低速任务。而且，在本发明的示例性实施例中，第二装置性状可能基本上不需要实时执行的计算/任务，或者需要更低处理带宽的任务，并且因此可以在处理器 122 中执行该第二装置性状。而且，处理器 122 可以包括低带宽模型 128，该低带宽模型 128 可以包括至少一个具有第二装置性状的软件模拟模型。该软件模拟模型可以使用如 MATLAB、Simulink、Saber 以及 Opal-RT 的软件包来实现通用的低速模拟。在本发明的一个实施例中，通用的低速任务的实例至少可以包括家用空调的温度控制、电动机的速度控制、永磁体同步电机(PMSM)的位置控制或者不需要像某些高带宽建模要求那样要快速或者作出响应地(responsively)完成控制动作的任何控制动作。在一个实例中，低带宽模型可以具有 10 - 100 微秒数量级的采样速率。而且，在本发明的一个实施例中，第二装置性状可以是例如机械速度、电场、风速或者流量(flow)中的至少一个。高速和低速单元之间的专用高速数字通信总线 118 协调数据通信，并且实现模拟的定序。在处理器 122 中实现了低速模拟之后，通过高速数字通信总线 118 和高带宽硬件 120 将反馈引导到控制器 102。

高速模拟可以应用在多个领域。利用基于 FPGA (或者其它高带宽硬件) 的模拟的应用的一些实例是风轮机、气体管道泵站、油料储存泵站、气体压缩机、PV 或者燃料电池发电机，其可以包括电动机、电桥(power bridge)、连接电容(link capacitor)、变压器、过滤器、机械传动装置(mechanical gear)、电路板、控制器的 I/O 以及许多其它电气和/或机械部件。

实时或近实时模拟的应用的广泛实例可以是风电场(wind farm)中的风轮机。风电场通常包括相同位置处的多个风轮机，用于产生电力并且向电网供电。大的风电场可以包括与中电压电网互连的几十个到近百个单独的风轮机。可以响应于模拟诸如风电场电网性状、电网连接、调度以及电力波动控制之类的性状，来模拟和/或控制各种风轮机和/或风电场性状。在一个实例中，风轮机中的电压波动可能会是关

注点，因为风轮机产生取决于风速变化的电力，将未经调节的电力注入电网中。电压波动会影响电子设备的敏感度，从而导致许多设备的寿命减少。

因此，在不同测试条件下测试控制器的过程中，该控制器会由于来自对变速发电机性状（或者其它风轮机或风电场性状）进行建模的装置的实时反馈/响应而受益，从而准确地追踪控制器的性状。可以至少部分地在风轮机系统或者至少其构成部件的模拟器上实现由控制器至少部分地基于装置模型所提供的反馈/响应而发出的控制或者诊断命令。相应地，可以按照与图 1 所示的控制器 102 和模拟器 106 相同的方式布置风轮机系统中的控制器和模拟器/装置模型，其中高带宽硬件 120 实现高速模拟和其它高带宽性状。对于低风速和/或较低带宽性状而言，反馈/响应可能不是实时的，并且可以在模拟器 106 的低速处理器 122 中对其进行模拟。

在另一个实例中，可以模拟与电网相连的风脉宽调制器（PWM）转换器或者放大器。该 PWM 转换器必须以 50 - 100 纳秒数量级的时间解析度（timing resolution）操纵电力开关，在 FPGA 或者其它高带宽硬件中使用 HDL 语言能够容易地对这进行建模。将转换器的输出，即电流和电压，作为反馈信号发送回硬件控制器，以闭合适当的环路。这些信号能够在相同的 FPGA 或者其它高带宽硬件内使用，以对发电机进行建模或者对电网的部分（例如变压器和线路滤波器）进行建模。表示这些部件所需的采样时间根据转换器的速率可以在 50 - 250 微秒数量级。因此，所建模的系统能够充分地模拟感兴趣的带宽内的大部分驱动动态（drive dynamic）（在一个实例中，对于电流和转矩环路而言近似约 3000Rad/sec，对于频率环路近似约 1000Rad/sec 以及对于其它受控变量为更低的带宽）。

在低带宽建模的另一个实例中，功率放大器（例如上述的 PWM 转换器）的低带宽热模型能够用于根据功率设备温度确定最大电流的极限。在本实例中，该低带宽模型可以以 10 - 100 微秒的采样速率工作，其刚好在控制器的采样时间内。

图 2 是根据本发明的一个示例实施例例示用于实时模拟装置模型的方法 200 的一个实例的流程图。

该示例方法始于框 202。在框 202 处，提供控制器，该控制器包

含用于执行对装置的控制命令的装置操作逻辑的计算机可执行指令。该控制器可以利用用于向装置发送控制命令的算法，其中该算法可以至少部分地决定在不同测试条件下要发送到装置的控制命令。

框 202 之后是框 204，在框 204 处提供与控制器相通信的模拟器，该模拟器包括高带宽硬件（例如 FPGA 或者 ASIC）以及至少一个处理器，其可以是低带宽硬件，并且可选地可以包括低带宽软件。该模拟器模拟不同测试条件和/或装置性状下的装置。根据装置的性状，该模拟器至少在高带宽硬件或者低带宽硬件（例如处理器）之一中处理数据。

框 204 之后是框 206，在框 206 处在高带宽硬件中对具有第一装置性状的高带宽模型进行建模。在测试条件下的第一装置性状可以是电或机械性状中的至少一个，并且可能需要高速响应/模拟。高带宽硬件包含高带宽模型，其有助于并行处理数据，从而显著减少等待时间，并且能够实时或者近实时地模拟装置模型。高带宽硬件可以是一个或多个 FPGA 或者 ASIC 卡，从而通过生成自动码（auto code）并且在硬件自身上实现模拟来促进该高速模拟，由此将与装置模型相关联的等待时间减小到纳秒数量级。

框 206 之后是框 208，在框 208 处在处理器中模拟具有第二装置性状的低带宽模型。在测试条件下的第二装置性状可以是例如机械速度、电场、风速或者流量中的至少一个，并且可以仅需要低速响应/模拟。处理器中可以存在用于实施这种通用低速模拟的软件模块，其包含市场上可以买到的灵活软件包。在一个实施例，模拟器上的高带宽硬件和低带宽硬件可以通过 PCI 总线通信。

框 208 之后是框 210，在框 210 处至少一个控制或诊断命令从控制器发送到模拟器。该控制器向模拟器发送命令，根据该命令通过高带宽模型和低带宽模型中的一个或两个在模拟器中实现模拟。该模拟产生反馈，该反馈继而反馈回控制器。

框 210 之后是框 212，在框 212 处部分基于控制器发送的命令以及部分基于以其执行装置操作逻辑的高带宽或低带宽模型，在控制器处接收来自模拟器的至少一个响应。模拟器中生成的反馈是控制器发送的控制命令和通过模拟器中的高带宽模型和低带宽模型中的一个或两个而实现的装置操作逻辑二者的函数。控制器与模拟器之间的传

输可以通过串行链路，例如 HSSL。

框 212 之后是框 214，在框 214 处控制器基于从模拟器接收的响应生成经调整的控制命令。将来自模拟器的反馈馈送到控制器，并且由控制器生成的随后的控制或诊断命令可以是从模拟器接收的至少一个响应/反馈的函数。经调整的控制命令可以用于控制装置，或者用于示出像在工作中一样的装置性状和控制器性状。

以上参照根据本发明实施例的方法和系统的框图和示意图示描述了本发明的实施例。可以理解，能够通过计算机程序指令实现示图的每个框以及框的组合。可以将这些计算机程序指令装载到一个或多个通用的计算机、专用的计算机或者其它可编程数据处理装置上，以制造诸如参照图 1 所述的控制器 102 的机器，从而使得在计算机或者其它可编程数据处理装置上执行的指令生成用于实现在一个或多个框中指定的功能的装置。还可以将这些计算机程序指令存储在能够指引计算机或者其它可编程数据处理装置按照特定方式工作的计算机可读存储器中，从而使得存储在计算机可读存储器中的指令产生包含实现在一个或多个框中指定的功能的指令装置的制品。

本文中所述的方法和系统具有提供对装置的实时或近实时模拟的技术效果。这些方法和系统产生了实现独立的对装置的高速和/或高带宽模拟以及低速和/或低带宽模拟的其它技术效果。使用专用硬件来实施实时或近实时模拟产生了减小对于定制软件模块的需求的技术效果，从而削减了等待时间并且提供了用于各种应用的改善的实时模拟。

尽管已经结合目前认为最实际的方式和各个实施例描述了本发明，但是应当理解，本发明不限于所公开的实施例，相反意在覆盖包含在所附权利要求的精神和范围内的各种修改和等同装置。

本说明书使用实例公开了本发明，包括最佳方式，并且还能够使本领域技术人员实现本发明，包括制造并使用任何设备或系统并且实施任何所包含的方法。权利要求书中限定了本发明的可专利的范围，并且可以包括本领域技术人员可想到的其它实例。如果这些其它的实例具有未不同于权利要求书的文字语言的结构元件或者如果它们包括与权利要求书的文字语言无实质不同的等价结构元件，则这些实例也在权利要求书的范围之内。

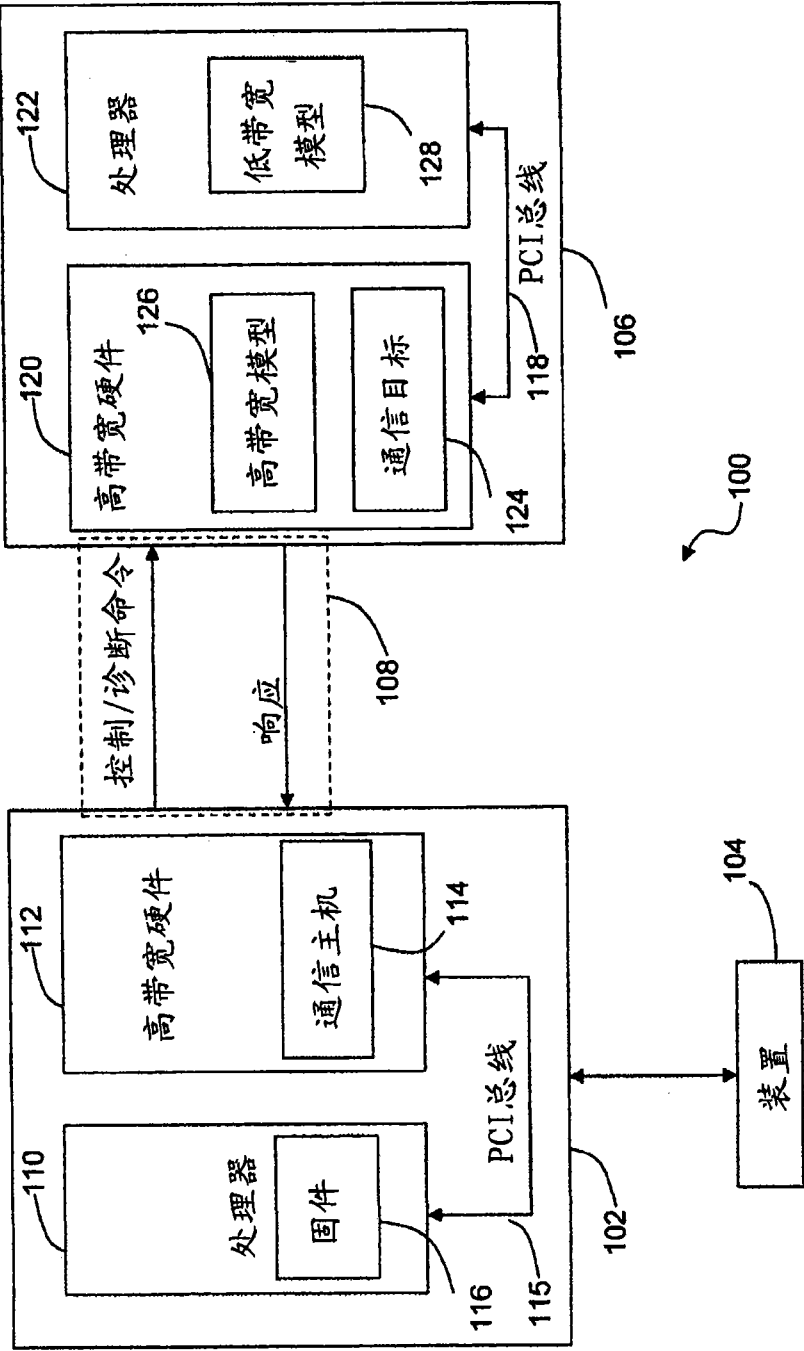


图 1

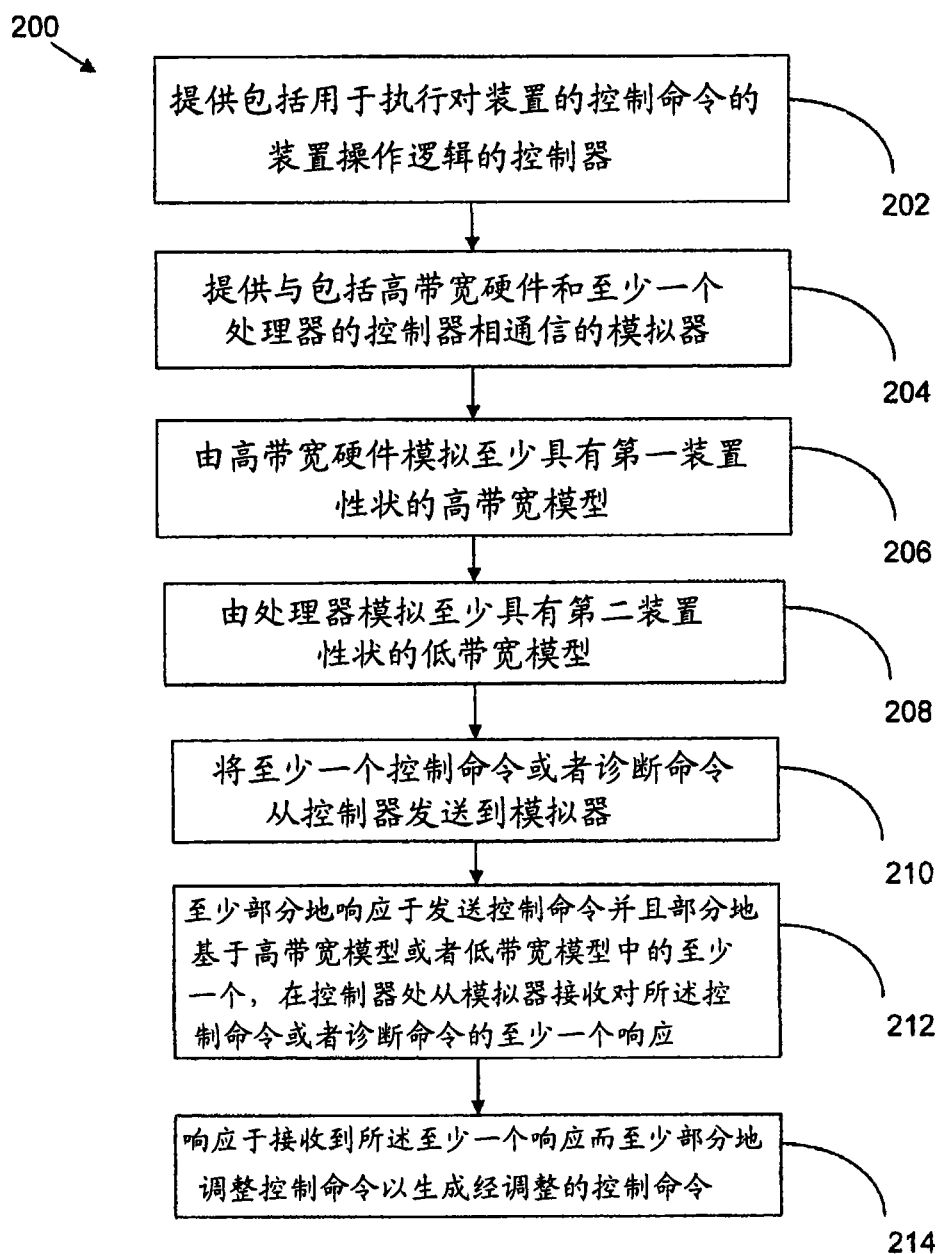


图 2