

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G05D 13/00 (2006.01)

G05D 1/08 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200780029846.6

[43] 公开日 2009年8月5日

[11] 公开号 CN 101501598A

[22] 申请日 2007.8.13

[21] 申请号 200780029846.6

[30] 优先权

[32] 2006.8.11 [33] US [31] 60/837,440

[86] 国际申请 PCT/US2007/075786 2007.8.13

[87] 国际公布 WO2008/022067 英 2008.2.21

[85] 进入国家阶段日期 2009.2.11

[71] 申请人 塞格威股份有限公司

地址 美国新罕布什尔州

[72] 发明人 J·M·史蒂文斯 D·鲁宾逊

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

代理人 李玲

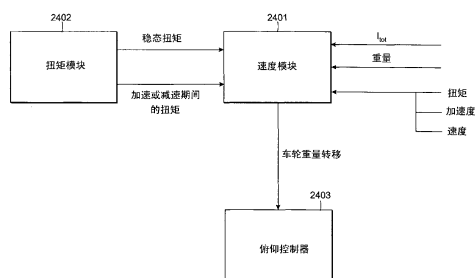
权利要求书 3 页 说明书 25 页 附图 26 页

## [54] 发明名称

电动车辆的速度限制

## [57] 摘要

本发明提供用于控制具有电动驱动器的车辆的速度的控制器和方法。在一个实施例中，一种方法涉及确定在底面上行进的车辆的稳态平均扭矩以及加速或减速期间的扭矩。基于稳态平均扭矩、加速或减速期间的扭矩、车辆与有效负载的重量、所测得的由车辆的电动驱动器产生的再生电流、车辆与有效负载的重量、施加到接地部件的扭矩、车辆的加速度以及车辆的速度，车辆的速度得到控制，其中车辆的电动驱动器向车辆的至少一个接地部件施加扭矩以便在地面上行进。



1. 一种用于控制具有电动驱动器的车辆的速度的方法，所述方法包括：  
    确定在底面上行进的所述车辆的稳态平均扭矩和加速或减速期间的扭矩；以及  
    基于以下控制所述车辆的速度：  
        所述稳态平均扭矩；  
        所述车辆加速或减速期间的所述扭矩；  
        所测得的由所述车辆的电动驱动器产生的致动器电流，所述电动驱动器向所述车辆的至少一个接地部件施加扭矩以便在所述底面上行进；  
        所述车辆与有效负载的重量；  
        施加到所述接地部件的所述扭矩；  
        所述车辆的加速度；以及  
        所述车辆的速度。
2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，控制所述车辆的速度包括确定加速补偿平均电流。
3. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，控制所述车辆的速度包括确定使所述车辆加速或减速所需的致动器电流的量。
4. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，确定使所述车辆加速或减速所需的所述致动器电流的量是基于所述车辆速度和所述底面的斜率的。
5. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述加速补偿平均电流通过从所测量的所述车辆致动器电流减去由减速产生的致动器电流来确定。
6. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述加速补偿平均电流通过从所测得的所述车辆致动器电流减去由加速产生的致动器电流来确定。
7. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述车辆是动态稳定运输装置并且通过调制所述车辆的俯仰组件控制所述车辆的最大允许速度。
8. 如权利要求 7 所述的方法，其特征在于，俯仰控制器基于所述加速补偿平均电流调制所述车辆最大允许速度。

9. 如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，还包括如果再生电流增大则减小所述车辆最大允许速度。

10. 如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，还包括如果再生电流减小则增大所述车辆最大允许速度。

11. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，至少主要通过操作所述电动驱动器来实现所述车辆的加速和减速。

12. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，当所测电流超过总电流阈值时控制所述车辆的速度。

13. 如权利要求 12 所述的方法，其特征在于，所述总电流阈值基于用户的经验水平。

14. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述车辆是静态稳定运输装置。

15. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述车辆和有效负载的重量是估计值。

16. 一种用于控制具有电动驱动器的车辆的速度的控制器，所述控制器包括：

    扭矩模块，其产生与其上有电动驱动车辆行进的底面相关联的稳态平均扭矩和加速或减速期间的扭矩；以及

    速度模块，其从所述扭矩模块接收所述稳态平均扭矩和加速或减速期间的扭矩，并且基于所述稳态平均扭矩、加速或减速期间的所述扭矩、所测得的由所述车辆的电动驱动器产生的电流、所述车辆和有效负载的重量、由所述电动驱动器施加的所述扭矩以及所述车辆速度来输出期望俯仰角，其中所述电动驱动器向所述车辆的至少一个接地部件施加扭矩以便使所述车辆在所述底面上行进。

17. 如权利要求 16 所述的控制器，其特征在于，当加速补偿平均电流低于阈值时所述控制器控制所述车辆的速度。

18. 如权利要求 16 所述的控制器，其特征在于，还包括俯仰控制器模块，其用于控制所述车辆俯仰以基于所述车辆速度命令调制所述车辆的速度。

19. 一种具有电动驱动器的车辆，包括：  
    支承有效负载的平台；  
    耦合到所述平台且包括用于在底面上行进的至少一个接地部件的接地模块；  
    用于向所述至少一个接地部件施加扭矩的电动驱动器；  
    用于向所述电动驱动器供电的电源；以及  
    基于所述车辆与所述有效负载的重量和所述底面的斜率限制所述接地部件速度的控制器。

20. 如权利要求 19 所述的车辆，其特征在于，还包括确定稳态平均扭矩和所述车辆加速或减速期间的扭矩的扭矩模块。

21. 如权利要求 20 所述的车辆，其特征在于，还包括速度模块，所述速度模块基于所述稳态平均扭矩、加速或减速期间的所述扭矩、所测得的由所述电动驱动器产生的电流、所述车辆与有效负载的所述重量、由所述电动驱动器施加的所述扭矩以及所述车辆的速度输出期望车辆速度命令。

22. 如权利要求 21 所述的车辆，其特征在于，还包括基于所述车辆速度命令控制所述车辆的速度的速度控制器。

23. 如权利要求 22 所述的车辆，其特征在于，所述车辆速度命令是所述车辆的期望俯仰，并且所述速度控制器是控制所述车辆的俯仰以基于所述期望俯仰角控制所述车辆速度的俯仰控制器。

24. 如权利要求 19 所述的车辆，其特征在于，所述车辆是动态稳定运输装置，并且所述车辆的最大允许速度通过调制所述车辆的俯仰组件控制。

## 电动车辆的速度限制

### 发明领域

本发明涉及控制电动车辆，尤其涉及控制和限制电动车辆速度。

### 发明背景

已知各种各样的用于运送人的运输装置和方法。通常，此类运输装置依赖于静态稳定性并且在对于底面放置它们的接地构件的所有预见状况下针对稳定性而设计。例如，作用于汽车重心的重力矢量在车轮的各接地点之间穿过并且汽车的悬架将所有车轮一直保持在地面上从而使得汽车稳定。尽管如此，仍然存在使稳定的运输装置变为不稳定的状况（例如，增速和急转弯）。

也称为平衡运输装置的动态稳定运输装置是一种具有控制系统的运输装置，该控制系统在运输装置运行时有效地维持运输装置的稳定性。控制系统通过不断地感测运输装置的方向、确定维持稳定所必要的校正动作、以及命令车轮马达做出校正动作来维持运输装置的稳定性。如果运输装置丧失维持稳定的能力，比如由于组件失效或缺少足够动力，则驾驶者可能经历突然失去平衡。

对于维持稳定轨迹的车辆，转向控制和对车辆前行的控制之间的耦合并不是所关注的问题。在典型路况下，依靠在整个转弯过程中车轮与地面接触来维持稳定性。然而，在平衡运输装置中，施加到一个或多个车轮的任何扭矩影响运输装置的稳定性。转向和平衡控制机构之间的耦合是美国专利 No. 6789640 的一个主题，该专利通过引用结合于此。

### 发明概述

在一个方面，本发明以用于控制具有电动驱动器的车辆的速度的计算机化方法为特征。该方法涉及确定在底面上行进的车辆的稳态平均扭矩以及加速与减速期间的扭矩。该方法还涉及基于稳态平均扭矩、加速与减速期间的扭矩、所测得的由车辆的电动驱动器产生的致动器电流来控制车辆速度，其中车辆的电动驱动器向车辆

的至少一个接地部件施加扭矩以便在底面上行进。控制车辆速度还基于车辆与有效负载的重量、向接地部件施加的扭矩、车辆的加速度以及车辆的速度来控制。

在一些实施例中，控制车辆速度涉及确定加速补偿平均电流。在一些实施例中，控制车辆速度涉及确定使车辆加速或减速所需的致动器电流量。在一些实施例中，基于车辆的速度和底面的斜率来确定使车辆加速或减速所需的致动器电流量。在一些实施例中，确定加速补偿平均电流涉及从所测量的车辆致动器电流中减去由加速或减速所产生的致动器电流。

在一些实施例中，车辆是具有通过调制车辆的俯仰（pitch）组件来控制的车辆允许速度的动态稳定运输装置。在一些实施例中，俯仰控制器基于加速补偿平均电流来调制最大车辆允许速度。在一些实施例中，该方法还涉及如果再生电流增大则减小车辆的最大允许速度。在一些实施例中，该方法还涉及如果再生电流减小则增大车辆的最大允许速度。在一些实施例中，至少主要通过操作电动驱动器来实现车辆的加速与减速。在一些实施例中，当所测得的电流超过总电流阈值时控制车辆的速度。在一些实施例中，总电流阈值以用户的经验水平为基础。在一些实施例中，车辆是静态稳定运输装置。在一些实施例中，车辆与有效负载的重量是估值。在一些实施例中，车辆与有效负载的重量是测量值。

在另一方面，本发明以用于控制具有电动驱动器的车辆的速度的控制器为特征。该控制器包括确定在底面上行进的车辆的稳态平均扭矩以及加速与减速期间的扭矩的扭矩模块。该控制器还包括从扭矩模块接收稳态平均扭矩和加速与减速期间的扭矩并输出期望车辆速度命令（例如俯仰角）的速度模块。期望俯仰角基于稳态平均扭矩、加速与减速期间的扭矩、车辆与有效负载的重量、所测得的由车辆的电动驱动器产生的电流、由电动驱动器所施加的扭矩以及车辆的速度，其中车辆的电动驱动器向车辆的至少一个接地部件施加扭矩以便在底面上行进。

在一些实施例中，当加速补偿平均电流低于阈值时控制器控制车辆的速度。在一些实施例中，控制器包括用于控制车辆俯仰的俯仰控制器模块以基于车辆速度命令（例如期望俯仰角）来调制车辆速度。

在又一方面，本发明以具有电动驱动器的车辆为特征。车辆包括支承有效负载的平台。车辆还包括耦合到平台的接地模块，该接地模块包括用于在底面上行进的至少一个接地部件。车辆还包括用于向至少一个接地部件施加扭矩的电动驱动器。车辆还包括用于向电动驱动器供电的电源。车辆还包括基于车辆与有效负载的重量和底面的斜率来限制接地部件的速度的控制器。

在一些实施例中，车辆包括确定车辆的稳态平均扭矩和加速与减速期间的扭矩的扭矩模块。在一些实施例中，车辆包括速度模块，该速度模块基于稳态平均扭矩、加速与减速期间的扭矩、所测得的由电动驱动器产生的电流、车辆与有效负载的重量、由电动驱动器所施加的扭矩以及车辆的速度来输出期望车辆速度命令。

在一些实施例中，车辆包括基于车辆速度命令控制车辆速度的速度控制器。在一些实施例中，在车辆中，车辆速度命令是车辆的期望俯仰角，并且速度控制器是基于期望俯仰角来控制车辆俯仰以控制车辆速度的俯仰控制器。在一些实施例中，车辆是动态稳定运输装置并且最大车辆允许速度通过调制车辆的俯仰组件来控制。

### 附图简述

根据附图并参考以下详细描述将更容易地理解本发明的上述特征，在附图中：

图 1 是如美国专利 No. 6302230 所详细描述运输装置的示意图，本发明可有利地对其应用。

图 2 是针对本发明的说明性实施例的用于动态地控制车辆在前后平面中的稳定性的控制回路的框图。

图 3 是示出根据本发明的说明性实施例的传感器、动力和控制的框图。

图 4 示出显示对其可有利地应用本发明的系统体系结构中的横摆（yaw）命令的基本输入与输出的框图。

图 5A 示出用于控制对根据本发明实施例的个人运输装置的输入的把手倾斜（handlebar lean）设备。

图 5B 示出控制杆挠曲耦合到接地模块的用于控制对根据本发明实施例的个人运输装置的输入的把手倾斜设备。

图 5C 示出具有分开把手的用于控制对根据本发明实施例的个人运输装置的输入的又一把手倾斜设备。

图 5D 示出用于控制对根据本发明实施例的个人运输装置的输入的旋转把手设备。

图 6 是根据本发明实施例的用于组合横摆输入和侧倾（roll）信息的混频器块的框图。

图 7 示出根据本发明实施例的个人运输装置。

图 8 示出根据本发明各个实施例的横摆控制系统的示意性框图。

图 9 示出根据本发明实施例的指令横摆与把手倾角的函数关系。

图 10 是根据本发明实施例的把手倾斜枢轴的分解图。

图 11 示出根据本发明实施例的用于向把手提供关于把手倾斜枢轴的定心扭矩的恒应力扭转衬套的视图。

图 12 是根据本发明实施例的供人类运输装置使用的数字水准仪的俯视图。

图 13A 是压板被去除的个人运输装置的平台俯视图，其指示根据本发明各个实施例的踏力压力传感器的放置。

图 13B 示出本发明实施例中用于检测驾驶者左右脚的放置的两个踏板。

图 14 是具有刚性车轮的理想化平衡运输装置在平面上匀速运动的示意图。

图 15 是提供驱动器接口组件的细节的框图。

图 16 是根据本发明实施例的平衡和正常运动期间的车轮马达控制的示意图。

图 17 示出示例性平衡运输装置的各种速度限制参数之间的关系。

图 18A 是理想化车轮沿零斜率的表面匀速运动的示意图。

图 18B 是理想化车轮沿负斜率的表面匀速运动的示意图。

图 19 是本发明实施例的动力驱动器模块的框图。

图 20 是根据本发明说明性实施例的马达的电动模型。

图 21 是根据本发明实施例的具有负载的串联电池的电路图。

图 22 是示出根据本发明说明性实施例的用于估计电池参数的方法的流程图。

图 23 示出根据本发明说明性实施例的示例性平衡运输装置的所测马达电流和车辆速度之间的关系。

图 24 是描绘根据本发明实施例的运输装置控制器的速度限制的示意图。

图 25 是描绘根据本发明实施例的运输装置控制器的速度限制的操作的流程图。

### 说明性实施例的详细描述

本发明的各个实施例可用于针对加速和减速两者将电动马达和驱动器用作向车轮施加力/扭矩以便在底面上行进的唯一或主要手段的车辆中。此类车辆在驱动前进时通常是马达驱动或消耗能量的。有时当从很陡峭的斜坡上向下行进时，驱动器致动器需要施加反向扭矩或再生以便维持稳定的速度而不加速。本发明的各实施例可用于其中马达驱动和刹车由同一车辆组件（例如，电动马达）完成的平衡和非平衡车辆。例如，本发明的各实施例可用于静态稳定车辆和动态稳定车辆（例如，动态稳定的平衡运输装置）。



对于电动马达车辆，应当了解上坡、下坡或平地行进期间减速所用的可用致动器能力的量。用于加速或减速的致动器能力的量限制车辆的刹车能力。知道多少致动器能力被用于加速或减速以及多少留下备用使系统能改变车辆运动以抑制非期望动态特性。同车辆在平地上行进相比，诸如降低的刹车能力之类的非期望动态特性可由车辆下坡行进产生。

如果运输装置能够对一个或多个车轮进行操作则其可被称为是“平衡的”，但是其不能依赖于车轮而是依赖对控制车轮操作的控制回路的操作。平衡运输装置缺乏静态稳定性但它是动态平衡的。运输装置可有利地用作移动工作平台或诸如高尔夫车之类的娱乐车辆，或者用作运输车辆。提供这种运输装置和地面或其它底面之间的接触并且在例行操作期间相对于倾翻最低限度地支撑运输装置的车轮或其它接地部件在本文中被称为“接地部件”。

图 1 示出作为本发明可有利地对其应用的设备的示例的、一般由数字 10 指示并且在美国专利 No. 6302230 中详细描述平衡个人运输装置。主体 8 站在支承平台 12 上并且握住附连到平台 12 的把手 16 的手柄 14。可设置控制回路使得主体的倾斜导致通过马达驱动器向车轮 20 施加关于轮轴 22 的扭矩。然而，运输装置 10 是静态不稳定的，并且如果没有操作控制回路来维持动态稳定性则运输装置 10 将不再能够在其典型的运行方向上运行。本文所使用的“稳定性”是指操作位置的机械状态，如果在任何方面中系统被扰动离开该操作位置则系统将相对于该操作位置自然地返回。

特别适于变化应用的不同数量的车轮或其它接地构件可有利地用于本发明的各个实施例中。通过引用结合于此的美国专利公开 No. 2006/0108156 在图 6 和图 7 中描述了平衡全地形车辆。该全地形车辆有两个前轮和两个后轮。每个后轮由其自己的致动器来驱动。因而，在本发明的范围内，接地构件的数量可以是等于或大于一的任何数量。

图 2 示出用于在前后平面中动态地维持车辆（设备 208）的稳定性从而车辆保持直立的控制回路 200。该控制回路 200 需要俯仰状态作为输入。美国专利 No. 5701965 和 No. 5791425 描述可使用图 2 的控制回路 200 来操作的车辆。车辆需要测量瞬时俯仰状态以主动控制车辆的稳定性。这些专利通过引用整体结合于此。图 2 的设备 208 等效于由单个马达驱动的运动系统的运动方程式。T 标识车辆扭矩。 $\theta$  标识前后倾角（即俯仰角），X 标识沿着表面相对于参考点的前后位移，而下标 r 表示相对于时间的可变微分。控制增益  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  与  $K_4$ ，微分器 212 与 216 以

及加法器 204 被用于实现平衡。为了实现动态控制并确保系统的稳定性，以及为了将系统保持在表面上参考点的邻域，将该实施例中的车轮扭矩  $T$  设置为满足以下方程式：

$$T = K_1\theta + K_2\dot{\theta}_r + K_3X + K_4\dot{X}_r \quad (\text{方程式 1})$$

增益  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  与  $K_4$  的值取决于控制回路的设置值、系统的物理参数以及诸如重力的其它效应。

图 3 的框图示出根据本发明说明性实施例的用于控制车辆的控制系统 31。在本发明的该实施例中，控制系统 31 用于控制车辆（例如图 1 的平衡运输装置 10）的马达驱动器和致动器。马达驱动器 331 和 332 分别控制运输装置 10 的左轮和右轮。控制系统 31 具有包括用户接口 361、用于感测前后俯仰的俯仰传感器 362、车轮旋转传感器 363 以及俯仰角速度传感器 364 的数据输入。俯仰角速度和俯仰可通过单独或结合使用各种传感器（例如，陀螺仪或倾斜仪）来导出。控制系统 31 还可包含平衡余量监视器（未示出），其组合有关当前电池参数的信息与有关马达参数的信息以计算运输装置的当前最大速度。例如，平衡余量监视器用于保证当使用车辆期间经历瞬变现象（例如碰撞）时有足够的电池电流可用于维持车辆的稳定性。如果提供轮组（例如，如关于美国专利 No. 6874591 的图 2），左组驱动器 341 和右组驱动器 342 分别用于驱动左组和右组。

在其它实施例中，控制系统 31 可具有两个以上车轮马达驱动器。附加的车轮马达驱动器可用于具有两个以上车轮的车辆，如美国专利 No. 6874591 中的图 2 所示，该专利的全部内容通过引用结合于此。

在其它实施例中，控制系统 31 可限制运输装置的速度以保证有足够的速度保留可用于保持平衡或者保存特定量的加速或减速能力，如关于图 17 所讨论的。保存扭矩和速度两者是合乎需要的，它们的特定量取决于很多因素。控制系统 31 还可包含逻辑来减小运输装置的速度以避免由于产生过电压而损坏电池，如关于图 20-23 所讨论的。例如，如果运输装置设置有在刹车期间以及当下坡行进时电池已被完全充电的情况下给电池重新充电的能力，则可发生过电压状态。

本文所使用的术语“倾斜”是指在给定时刻地面上穿过系统的质心和支承系统的接地部件的旋转中心的线相对于本地垂直方向的角度。术语“系统”是指由于接地部件相对于其上有车辆运动的表面的运动而发生运动的所有物质。

本文所使用的“俯仰状态”包括前后平面中的俯仰和车辆的俯仰角速度两者（即， $\theta$  和  $\dot{\theta}_r$ （或  $\dot{\theta}$ ），其中  $\dot{\theta}_r$  是  $\theta$  的时间变化率）。

美国专利 No. 6789640 中详细描述了一种向个人运输装置的横摆控制系统提供用户输入的机制。如本文所述，乘在运输装置上的用户可通过旋转横摆手柄组件来向横摆控制器 402（图 4 所示）提供横摆控制输入。

图 4 描绘了在加法器 401 中当前横摆值  $\psi$  相对于期望横摆值  $\psi_{期望}$  的差分以获得当前横摆误差  $\psi_{误差}$ 。从用户输入获得期望横摆值  $\psi_{期望}$ ，其中已描述了用户输入的各个实施例。从诸如车轮速度微分、惯性感测等各种状态估值导出当前横摆值  $\psi$ 。从横摆误差导出横摆命令是根据例如美国专利 No. 6288505 描述的各种处理算法由马达控制器 405 提供的，并且横摆命令分别施加到左马达 403 和右马达 404。

良好的定向输入设备的主要性能之一是其在操纵横向加速度时提供定向输入的能力。大的横向加速度转弯要求用户向转弯处倾斜以防止从运输装置上跌落或翻倒。最佳的定向输入设备要求用户在命令定向输入时正确地安置自己的身体。诸如以上关于美国专利 No. 6789640 讨论的扭转手柄横摆输入装置通过定向其旋转轴和设计旋钮与把手组合来鼓励正确的身体姿势。然而，有可能做出不协调的输入，这取决于驾驶者的技术。

鼓励正确的身体姿势的另一方法是将一个或多个把手做成操纵杆。通过旋转机器底部附近的棒，用户可高速移动他或她的身体而仅仅拉住把手并命令输入。在正确调整的情况下，用户的身体已处于适当的位置以对抗开始转弯时的横向加速度，从而减小不正确协调转弯的可能性。

在把手倾斜机器中，横摆输入与把手相对于底盘的角度成比例。优选地，旋转轴被安装到运输装置接地模块上尽可能低的位置以允许棒的运动自然地跟随用户的身体运动，因为人可通过脚踝处的旋转最为稳定地倾斜。换言之，低的旋转把手可追踪身体的运动。在该实施例中，使用标准个人运输装置算法将横摆输入转换成横摆命令，其在低速时将固定增益施加到横摆输入，但是在较高速度时增减增益以使横摆输入对应于横向加速度而不是横摆角速度。这适用于把手倾斜设备，因为期望倾斜角与横向加速度大致成比例。结果是很自然的输入方法，其中用户通过倾斜“想”向右或向左，机器则随动。

$$\dot{\psi}_{cmd} = K(\Phi_{HB} - \Phi_{Roll}) \quad (\text{方程式 2})$$

其中 K 是常数；

$\Phi_{HB}$  是把手相对于平台的角度；

$\Phi_{Roll}$  是平台相对于重力的倾斜；

$\dot{\psi}_{cmd}$  是横摆命令。

本发明的其它实施例可具有倾斜或水平安装的旋转把手。在具有倾斜枢轴的机器中，枢轴相对于接触片及表面的角度提供有趣的转弯动态特性。具体地，旋转轴可影响在斜坡上或在平面上转弯的动态特性。优选地，机器具有低的水平枢轴。水平枢轴可容易地追踪转弯期间身体的动态特性。

根据本发明的另外其它实施例，在行进方向作为参考点的情况下，旋转把手可安装在运输装置的前部或后部。后部安装的旋转把手的配置使用户除使用耦合到把手的臂之外还能够利用诸如膝之类的身体其它部分来使运输装置转向。此外，运输装置可包括当用户乘上或下来时使倾斜转向失效的特征部件。当运输装置确定用户部分地乘上/离开平台时可激活该特征部件，使得运输装置在用户乘上或下来时不会撞向或离开用户。

在适于提供把手倾斜的各种机构中，其中第一个参考图 5A 进行描述。通过旋转地耦合到平台 12 和把手 500 两者的平行连杆 502 将把手 500 的运动限制在与个人运输装置 10 的前进运动方向基本横向成直角的平面上。把手的运动还可被偏置到中心位置和/或通过弹簧 504 或减震器衰减。在图 5B 所示的替换实施例中，把手 500 通过挠曲部件 508 耦合到运输装置 10 的平台 12，从而又将把手的运动基本上限制在与前进运动方向横向成直角的平面上并且使把手按照以平台 12 的平面上或附近的虚拟枢轴为中心的弧倾斜。在图 5A 和图 5B 的实施例的任一个中，一个或多个传感器 510 相对于垂线或相对于关于接地模块固定的方向来检测把手 500 或将把手耦合到运输装置的构件 502 的位置。例如，传感器 510 可以是沿车辆的控制轴（例如，图 1 的把手 16）设置的测力传感器。此外，如果需要，耦合到把手的弹簧或减震器可用于限制运输装置的转弯角速度。

在一个实施例中，把手的运动并不偏置到中心位置。在把手并不偏置到中心位置的实施例中，在中心周围没有预加负载，因而用户可准确地且精确地使运输装置转向。

根据图 5C 所描绘的实施例，通过用户 8 的倾斜可相对于运输装置的平台 12 独立地移动两个分开的把手部分 520 和 522。在所示出的实施例中，通过弹簧或以其它方式将每个把手部分的位置偏置到相应套管 524 和 526 内的指定“中间”高度。相对高度偏移被发送到横摆控制器以控制转弯，如结合其它用户输入形式所描述的。

图 5D 描绘了本发明的又一实施例，其中感测把手 500 相对于支承杆 16 的顺时针方向的旋转 530 和逆时针方向的旋转 532 以产生将用户输入发送到横摆控制器（例如，图 4 的横摆控制器 402）的信号。优选地将减震器 534 内置到把手 500 关于杆 16 的旋转耦合中。

把手倾斜控制中必须解决的一个问题是地形灵敏度的影响。如果在障碍物或不平坦的地形上驱动机器，则侧倾干扰被强加在机器/驾驶者系统上，因为所产生的用户位置的变化可使非预期的横摆输入进入系统。取决于站立人整个身体倾斜的横摆控制形式相比例如通过扭转手柄的横摆控制倾向于对地形比更敏感。

为了对抗该侧倾灵敏性，可使用侧倾补偿算法。在这种算法中，修正横摆输入来补偿底盘的侧倾角，从而将把手相对于重力的角度作为横摆输入。因为对用户而言相对重力而非平台可更容易地保持身体位置，所以这便于抑制侧倾干扰。

根据本发明的某些实施例，一种降低地形灵敏度的方法使用基于底盘的侧倾角速度滤除横摆输入的算法。被称为侧倾角速度的瞬时侧倾角速度可容易地从诸如在例如美国专利 No. 6332103（通过引用结合于此）中描述的俯仰状态估计器获得，其基于一个或多个陀螺仪、倾斜仪或以上的组合导出运输装置的方向。大的侧倾瞬变现象使驾驶者被加速，并且如果侧倾瞬变通过驾驶者刚性地耦合到横摆控制机构则它们将会导致非预期的横摆输入。

解决方案有两个不同的部分：直线驾驶时抵制地形和转弯时抵制地形；前者是后者的特殊情况。尽管在大侧倾角速度的周期期间使横摆失效可解决固定方向上运动的问题，但是需要更多的输入以便从转向运动去耦侧倾。

未知输入是对来自用户的“预期”横摆输入（例如，用户意欲围绕 20'（6.1m）直径的圆周驾驶）的估值。尽管预期的横摆输入信息不可直接获得，但是它可从横摆输入的历史中有效地推断出。将数据简单地低通滤波提供了横摆输入的估值。然而，这导致可被用户察觉的响应延迟。另一方面，如果仅在出现大侧倾角速度时使用经低通滤波的数据，则驾驶者注意到延迟的可能性比较小。根据本发明的一个实施例，随后该算法使用在直接横摆输入和经重滤波（heavily filtered）形式之间的、根据侧倾角速度控制的混频器。

传递函数模拟了耦合到横摆信号中的侧倾角速度的量。它是各种因素的函数，包括横摆输入装置的设计、驾驶者的能力以及驾驶者如何握住横摆输入装

置（例如，图 1 的把手 16）。通过使用该混频方法，通过调整可在很大程度上忽略或至多最小化传递函数。

四个主要的调整点是：混频器多快回转经过滤的形式，混频器多快地回转回来，在什么阈值开始和结束混频，以及低通滤波器（LPF）对横摆输入的转角频率。对未指令横摆的量有限制，通过设置最大阈值可将其去除。将其设置得高则有更多未指令横摆，将其设置得低则有更多错误的行程且驾驶者开始注意横摆信号上的时滞。设置 LPF 频率也有折衷。如果横摆被过重地过滤，则存在可察觉的延迟和过去的横摆瞬变耦合进来的可能性。将其设置得过低则降低混频器去除瞬变的能力。

现在参考图 7，混频器块被定义为：

$$\text{横摆命令} = F * \text{横摆输入} + (1 - F) * \text{横摆过滤}, \quad (\text{方程式 3})$$

其中 F 是混频器函数，其是在 0.0 和 1.0 之间不断改变的信号。有利地提供所感测的侧倾角速度的低通滤波（经过滤的侧倾角速度）以便在不平坦表面上的行进不会产生不规则的横摆响应。

图 7 示出根据本发明各实施例且一般由数字 10 指示的个人平衡运输装置。现有技术中的平衡个人运输装置已在例如美国专利 No. 6302230 中详细描述，该专利通过引用结合于此。主体（未示出）站在支承平台 12 上并且握住附连到平台 12 的把手 16 的手柄 14。运输装置 10 包括至少一个接地部件，在本发明的该实施例中是车轮 20。运输装置 10 还包括位于平台 12 中的至少一个致动器（未示出），该致动器向接地部件施加扭矩以相对于表面推进运输装置。

把手 16 还可被称为“转向柱”、“构件”或“杆”，这些术语在本文中可互换使用。在本发明的该实施例中，支承平台 12 包括分开的左踏板 18 和右踏板 19，如以下所进一步讨论的。

控制回路被设置成使得主体的倾斜导致通过本文所讨论的马达驱动器（未示出）向车轮 20 施加关于轮轴 22 的扭矩，从而导致运输装置 10 加速。利用定位于运输装置 10 之上或之内的控制器（未示出）来实现控制回路。控制器包括至少一个处理器以及用于控制运输装置 10 的操作的输入和输出装置。然而，运输装置 10 是静态不稳定的，并且如果控制回路不运行以维持动态稳定性则运输装置 10 不能在其典型的运行方向上运行。

图 8 示出根据本发明实施例的横摆反馈控制系统的框图。从用户接口获得横摆输入 80，如以下所讨论的。一个优选的用户输入由构件关于表示为  $\hat{z}$  的基准旋转轴的位置提供，该构件由把手 16（图 7 所示）例示。

可以理解，尽管在一个优选的实施例中提供横摆输入的用户是在个人运输装置上的驾驶者，但是本发明在这方面并不受限制。例如，在一个替换实施例中，横摆输入由用户在运输装置 10 的一侧或前方走动时改变把手 16 的位置而提供。

横向加速度增减 (LateralAccelScale) 函数 82 减小横摆输入 80 在较高车轮速度时以及在较高向心加速度时的影响。用于调节指令横摆速度的反馈 84 包含保持横摆位置的横摆位置项 85、试图将横摆速度调节到零的速度平方项 86 以及用于向用户提供更好的横摆命令响应的前馈项 89。

前馈项 89 控制快速机动以便提供响应系统。速度平方反馈 86 是背离线性控制理论的示例并且具有提供非线性横摆速度衰减的作用。

与横摆输入（诸如把手关于基准轴  $\hat{z}$  的角度，典型的是运输装置侧倾轴，如以下所讨论的）相关联的变量的变化率也可用作附加的横摆命令，并且可通过微分器 81 获得。横摆输入变量 80 的变化率产生横摆命令的分量，其“预期”驾驶者倾斜并且更有可能使把手 16 与驾驶者保持协调且使运输装置 10 感觉起来响应度更大。

例如，与横摆输入的变化率分量相关联的增益 87 可在用户的经验水平的基础上改变。这样，基于把手 16 的位置和在用户经验水平的基础上加权的把手 16 位置的变化率而产生横摆命令信号。在一个实施例中，针对熟练者的增益 87 的值被设置为是与初学者相关联的值的 130%。本发明的替换实施例可实现不同的增益值。在一些实施例中，运输装置可被配置为允许用户设置多个经验水平。

在一些实施例中，通过例如在运输装置 10 的初学者、中级和熟练者模式之间进行切换而响应于用户选择或指定用户熟练程度或经验水平来加权把手 16 的位置的变化率。每个模式可对运输装置 10 强加不同的、指定的操作限制。在一些实施例中，用户通过使用置于运输装置 10 上的控件或按钮来选择模式。在一些实施例中，用户通过使用置于控制设备（未示出）上的按钮来选择模式。在一些实施例中，加权把手 16 的位置的变化率来减小它对针对初学者用户的横摆命令信号的影响。在一些实施例中，加权把手 16 的位置的变化率来增大

它对针对有经验用户的横摆命令信号的影响。因而，对于初学者，变化率项被有利地减小或消除，从而使横摆命令主要或完全基于横摆输入变量，比如把手关于基准轴 $\hat{z}$ 的角度。

而且，可相对于频率过滤变化率分量，使得横摆命令可被特制为更易响应于由更有经验的驾驶者执行的突然机动，而更易忽略由能力较弱的驾驶者执行的突然机动。

在一些实施例中，取决于用户是初学者还是熟练者，用户的经验水平被用于提供运输装置的不同操作特性。这样，对于初学者模式可减小低速灵敏度和最大指令横摆角速度，而对于熟练者模式则保存运输装置可在其中运行的稳态操作。

此外，在本发明的一些实施例中，例如当反向操作运输装置时和/或在上下运输装置的平台期间，不同的控制增益被用于控制初学者模式对熟练者模式的运输装置的操作。

美国专利申请 S/N. 10/939955 描述了指定用户方向或速度输入的若干替换形式，该专利申请已通过引用结合于此。本文讨论了以把手倾斜为基础接收横摆命令输入的优选技术，并且在图 5A-5D 中描绘了实现把手倾斜的若干实施例。

在一些实施例中，在把手倾斜形式中，横摆输入与把手相对于底盘的角度的某函数成比例，其中该函数相关性可在指定操作环境的基础上改变。或者，横摆输入可与把手相对于设备无关框架的角度的某函数成比例，比如相对于本地地表/惯性参考系（即相对于本地垂线—本地重力矢量）的角度。

图 9 示出把手倾斜与指令横摆的优选关系。在示出的关系中，指令横摆相对于把手 16 关于旋转轴 $\hat{z}$ 的角位移（倾斜）比线性更快地增大。

再一次参考图 7，现在描述本发明的替换实施例，其中用户通过把手 16 关于旋转轴 $\hat{z}$ 的旋转提供横摆输入，其中旋转轴是运输装置 10 的侧倾轴使得把手的旋转处于相对于运输装置前进运动的侧向平面中。图 10 示出把手 16 关于其旋转的枢轴组件 100 的分解图。

轴 102 沿旋转轴 $\hat{z}$ （见图 7）对准。轴 102 穿过轴承组件 104 并由轴承组件 104 支承，使得轴 102 能够相对于底部挤压件 106 和扭转衬套 103 关于旋转轴 $\hat{z}$ 旋转。底部 106 耦合到图 7 的运输装置 10 的平台 12。



轴 102 的方向从而把手 16 的方向被包含冗余传感器 101 的旋转角传感器组件 118 感测,这些传感器可以是本领域已知的用于感测旋转的任何传感器(例如,霍尔效应传感器)。还可使用其它传感器(例如,光学传感器或磁性传感器),因而其也在本发明的范围内。

用于提供对抗不断增加的横摆命令以及将横摆输入恢复到其中心位置的力的任何机制都在本发明的范围内。一优选实施例包括恒应力扭转衬套 113。

图 11 中更详细地示出了扭转衬套 103。弹性材料膜 114 刚性地耦合到轴 112 和相对于平台 12 固定的罩 116,从而当轴 112 相对于罩 116 同心地旋转(关于  $z$  轴)时由表征膜的弹性张量的切变分量向轴 112 施加恢复扭转力。恢复扭矩相对于轴 112 的左/右旋转是对称的。弹性材料膜 114 耦合到轴 112 的长度超过膜 114 耦合到罩 116 的长度以维持膜的每单位截面积的剪应力基本相等,从而有利地增大膜 114 的耐用性和寿命。膜 114 可以是厚度均匀或锥形的。

图 12 是供运输装置(例如,图 7 的运输装置 10)使用的数字水准仪 120 的俯视图。在运输装置的倾斜是对控制回路的导致向车轮 20 施加扭矩的输入的范围,在驾驶者乘上运输装置的过程期间将运输装置设置在基本直立的位置并因而处于零扭矩状态中是有利的。

优选地在被设置于相对于平台 12 的固定位置(在横向设置的车轮 20 之间)的控制台 124 上设置五个灯的阵列 122(例如,发光二极管(LED)),以便在驾驶者被安置到运输装置上或乘上运输装置时可由其容易地观看。在一个实施例中,当 LED 所显示的颜色均以单种颜色(例如,绿色)照亮时,其指示平台 12 是水平的且处于乘坐的正确方向。以另一颜色(例如,红色)照亮 LED 指示在对应于该 LED 的方向上倾斜。

数字水准仪 120 的灯还可用于指示运输装置的其它状态。例如,闪烁红灯的状态可指示诸如故障、需要减速以及下车之类的报警状态。在一些实施例中,闪烁的灯表示涉及未经许可使用运输装置的状态。

根据本发明的另一实施例,分开的踏板 18 和 19(图 7 所示)被设置为分别感测用户的左脚和右脚的重量。图 13A 和图 13B 示出平台和踏板(例如,图 7 的平台 12 和踏板 18 与 19)。图 13A 是压板被去除的运输装置的平台俯视图,其示出根据本发明说明性实施例的踏力压力传感器的放置。图 13B 是用于检测用户的左脚和右脚的放置的两个踏板 18 和 19 的立体图。

例如，为方便和安全起见，踏板 18 和 19 的使用可在上下运输装置的过程中期间有利地用于控制或限制运输装置的转弯。例如，在驾驶者仅有单脚在平台上的情况下可限制操作运输装置（例如，图 3 的运输装置 10）的控件的使运输装置转向的灵敏度。表 1 根据本发明的实施例指定了基于用户是一只脚还是两只脚在运输装置平台（例如，图 7 的平台 12 的踏板 18 与 19）上运输装置的转向行为。转向行为还基于运输装置的操作速度。

表 1：转向行为

驾驶者检测	速度	机器响应
只有左脚在运输装置上	低速( $\leq 3$ 英里 / 小时 / 1.34 米/秒)	限制全部向左的横摆运动并且当横摆命令被忽略时发出报警声音
只有右脚在运输装置上	低速( $\leq 3$ 英里 / 小时 / 1.34 米/秒)	限制全部向右的横摆运动并且当横摆命令被忽略时发出报警声音
只有左脚在运输装置上	中等全速 (12.5 英里 / 小时 / 5.59 米/秒)	保持横摆控制但是将速度限值设置为中等 (5 英里 / 小时 / 2.24 米/秒)
只有右脚在运输装置上	中等全速 (12.5 英里 / 小时 / 5.59 米/秒)	保持横摆控制但是将速度限值设置为中等 (5 英里 / 小时 / 2.24 米/秒)
两脚都在运输装置上	全速	正常操作

在本发明的替换实施例中可指定替换转向行为。例如，可指定替换运输装置速度。此外，可基于用户向踏板 18 和 19 之一或两者所施加力的量改变转向行为。在一些实施例中，用户的经验水平（与本文所讨论相类似的）是被用于指定运输装置的转向行为的因素。

在本发明的一些实施例中，运输装置（例如图 7 的运输装置 10）被提供经由例如遥测单元对数据进行无线控制和无线遥测的能力。可单向或双向地提供对数据的无线控制和无线遥测。在一些实施例中，提供远程输入设备，其可由用户携带或者可被设置在运输装置上或远距离位置处。在一个实施例中，运输装置 10 包括在输入设备和运输装置 10 的控制器之间创建无线远程通信的收发器。无线地控制某些功能的能力有利地使运输装置 10 的制造能够将所有电子设备完全包含在平台 12 之下，并且更具体地，控制杆 16 不承载电子设备。

在本发明的各个实施例中，通过提供控制回路（例如，如以上在图 2 中所讨论的）可实现前后稳定性。当包括一个或多个马达用于结合接地构件操作电动驱动器时可使用控制回路。例如，一对接地构件可以是一对车轮或一对轮组。

在轮组的情况下，每个组可包括多个车轮。然而，每个接地构件可替代地是多个（通常为—对）轴向相邻的、径向支承的以及可旋转地安装的弧形部件。在这些实施例中，接地构件由控制回路中的电动驱动器驱动，使得当运输装置不运动时将运输装置的质心保持在接地构件与地面的接触区域之上，而与作用于运输装置上的扰动和力无关。在其它实施例中，接地构件由控制回路中的电动驱动器驱动以保持全地形车辆的适当平衡。

接地构件通常具有与车辆（例如，运输装置）在其上行进或站立的表面相接触或毗连的“点”（实际上是区域）。由于接地构件的柔性，接触“点”实际上是区域，其中接触区域还可被称为触片。例如，运输装置的重量分布在接触区域上，从而导致压力在该区域上的分布，其中在前进运动期间压力中心前移。压力分布是车轮的成分与结构两者、车轮的旋转速度、施加到车轮的扭矩以及因而作用于车轮上的摩擦力的函数。

需要运动方向上的力来克服滚动摩擦（以及其它摩擦力，包括空气阻力）。在本发明的一些实施例中，重力可被用于提供关于与表面的接触点的、在具有期望运动意义上的分量的方向上的扭矩。图 14 示出作用于以匀速  $v$  在平面上行进的单个车轮上的力。现在讨论的原理可容易地适用于斜面上的操作并且适应可能出现的任何其它外力。半径为  $R_w$  的车轮 140 关于轮轴 144 相对于底盘 142 旋转并且在点 P 接触底面。仅仅出于说明性目的，假定车轮 140 在一个点接触表面。

车轮由扭矩  $T$ （例如由马达提供）相对于运输装置驱动，车轮又对运输装置产生反扭矩  $-T$ 。因为扭矩关于轮轴 144 作用，所以反扭矩对应于作用于包括运输装置和有效负载的系统的重心（CG）的力  $F_b$ ，其中  $F_b = T/R_{CG}$ ，其中  $R_{CG}$  是轮轴与系统的 CG 之间的距离。从 CG 到点 P 的线 143 相对于垂线 146 的角度为  $\theta_s$ 。

作用车轮于点 P 的滚动摩擦力  $f$  与车轮边缘的速度  $v$  成比例，其比例表达为  $f = \mu v$ 。为保持匀速，该力  $f$  必需精确地消除。因此，在重力提供该力的情况下，必须满足的条件是：

$$F_b \cos \theta_s = f_b \quad (\text{方程式 4}),$$

其中  $f_b$  是横向作用于 CG 与点 P 之间的轴 141 的反作用力的分量。为了保持稳定（例如，防止运输装置倒下），还必须存在稳定条件，即在与线 143 横向垂直的方向上没有净力作用在 CG 上。在匀速（即，在点 P 固定的惯性参考系中）

运动期间必须不存在关于接触点 P 的净扭矩。该条件可被表达为：

$$F_g \sin \theta_s = f_b \quad (\text{方程式 5}),$$

其中  $F_g \sin \theta_s$  是重力的“倾翻”分量，并且  $f_b$  是由车轮旋转引起的对车辆（例如运输装置）的反作用力的反倾翻分量（ $f_b = F_b \cos \delta$ ），并且其中  $\delta$  是在线 143 和线 141 之间示出的角度。

可组合方程式 4 和 5 得到  $F_g \sin \theta_s \cos \theta_s = f = \mu v$ ，因而，在小角度的极限情况下（其中  $\sin \theta$  近似为  $\theta$ ），

$$\theta_s = \left( \frac{\mu}{F_g} \right)^{\nu} \quad (\text{方程式 6}),$$

显示出对于运输装置，增大速度需要增大倾斜来克服摩擦作用。另外，将稳定性强加于系统的控制回路将通过增大系统速度对增大的倾斜作出响应。超过克服摩擦作用所需的额外倾斜导致加速，因为有额外的前向力作用于车辆的 CG。相反，为了实现运输装置的加速（或减速），必须按以下更详细讨论的方式提供额外的倾斜（前向或后向）。

图 15 是提供车轮驱动器接口组件 153 的细节的框图。外围微型计算机板 155 从操纵杆 152 以及从倾斜仪 153 接收用户输入。在其它实施例中，倾斜仪 153 是另一类型的倾斜传感器（例如，悬摆基准传感器）。倾斜仪 153 提供俯仰角（ $\theta$ ）和俯仰角速度（ $\theta_r$ ）的信息信号。为了允许运输装置受控倾斜进入转弯，从而在转弯时增大稳定性，也可行的是利用第二倾斜仪提供关于侧倾角（ $\Phi$ ）和侧倾角速度（ $\Phi_r$ ）的信息。或者，系统重力和离心力的合力在转弯时可用于增加稳定性。外围微型控制器板 155 从电池组 151 接收输入信号，例如电池电压、电池电流和电池温度。外围微型控制器板 155 还接收其它驱动器输入 154（例如，由用于平台调节且用于确定操作模式的开关（旋钮和按钮）选通的信号）。外围微型控制器板 155 通过总线 159 与可用于控制车轮马达的中心微型控制器板（未示出）通信，如以下结合图 16 所描述的。

图 16 是示出适于与图 15 的控制组件一起使用以便为例如图 1 的运输装置 10 的运输装置和其它车辆提供稳定性的控制算法的框图。其它实施例包括运输装置，其中该运输装置和有效负载在运动期间和在固定位置上都依靠两个接地构件平衡。以下约定结合后面的描述使用：

1. 使用大写字母形式的单个下标来命名以全局坐标定义的变量。全局坐标

是固定在地表的坐标（惯性）。

2. 非下标的  $r$  标识车轮半径。

3. 小写下标用于指示例如左/右等的其它属性： $r$  = 右； $l$  = 左； $ref$  = 参考； $f$  = 结束； $s$  = 开始。

4. 所有角度在顺时针方向均为正，其中正行进是在正  $x$  方向上。

5. 变量上的点指示时间微分，例如  $\dot{\theta}$ 。

如图所示，控制算法 1660 用于车辆的左轮和右轮的马达，例如图 1 的运输装置的车轮 20 和 21。控制算法 1660 具有左轮相对于全局坐标系统的线速度  $\dot{\theta}$ 、 $r\dot{\theta}_{wl}$  以及右轮的线速度  $r\dot{\theta}_{wr}$  的输入。控制算法 1660 还具有由沿参考坐标系的 X 轴和 Y 轴放置的操纵杆确定的方向输入 1600。输入  $\theta$ 、 $\dot{\theta}$  以及误差信号  $x$  和  $\dot{x}$ （以下所描述的）分别受到增益  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  和  $K_2$  并且变成对加法器 1619 的输入。加法器 1619 产生针对右轮和左轮的基本平衡扭矩命令，如以上结合图 2 所描述的。加法器 1619 的输出与横摆 PID 回路 1616（以下所描述的）的输出在加法器 1620 中组合。加法器 1620 的输出在除法器 1622 中被除分。加法器 1620 的输出在产生左轮扭矩命令的饱和限幅器 1624 中受到限制。类似地，加法器 1619 的输出与 PID 回路 1616 的输出在加法器 1621 中组合。加法器 1621 的输出在除法器 1623 中被除分。除法器 1623 的输出在产生右轮扭矩命令的饱和限幅器 1625 中受到限制。

控制算法 1660 识别沿 X 轴的方向输入相对于全局坐标系统（其表示所行进的表面）沿其 X 轴以与操纵杆的位移成比例的速度移动图 1 所示的参考坐标系统。沿 Y 轴的方向输入关于其 Z 轴以与操纵杆的位移成比例的角速度旋转图 1 所示的参考坐标系统。操纵杆在正 X 方向上的运动在这里被解释为表示前进运动。操纵杆在负 X 方向上的运动表示反向运动。类似地，操纵杆在正 Y 方向上的运动表示左向转弯，从上面看是逆时针方向。操纵杆在负 Y 方向上的运动表示右向转弯，从上面看是顺时针方向。因此分别经由静带块 1601 和 1602 给予方向输入 Y 和 X 静带以加宽操纵杆的中间位置。1601 和 1602 的输出分别受到增益  $K_{11}$  和  $K_{10}$ 。增益  $K_{11}$  和  $K_{10}$  的输出分别是速度限幅器 1603 和 1604 的输入。速度限幅器 1603 和 1604 分别限制参考坐标系统的角加速度和线加速度。来自速度限幅器 1603 和 1604 的速度受限输出是对加法器 1605 的输入。加法器 1605 的输出是参考速度  $x_{r\ ref}$  且加法器 1606 的输出是参考速度  $x_{l\ ref}$ ，在加法器 1608 和 1607 中从左轮和右轮的补偿线速度输入信号  $r\dot{\theta}_{wl}$  和  $r\dot{\theta}_{wr}$  中减去

$x_{r\_ref}$  和  $x_{l\_ref}$  以获得参考坐标系统内左轮和右轮的速度误差信号  $x_l$  和  $x_r$ 。经由加法器 1617 和除法器 1618 确定的速度误差信号  $x_l$  和  $x_r$  的平均值产生线速度误差信号。通过在积分器 1610 和 1609 中将  $r\dot{\theta}_{wl}$  和  $r\dot{\theta}_{wr}$  积分得到位移误差信号  $x$ 。积分器 1610 和 1609 的输出是对饱和限幅器 1612 和 1611 的输入。饱和限幅器 1612 和 1611 的输出由加法器 1613 和除法器 1615 平均。经由加法器 1614 确定的这些位移之间的差异产生横摆误差信号  $\Psi$ 。

横摆误差信号  $\Psi$  被输入到标准的比例加积分加微分 (PID) 控制回路 1616。PID 控制回路 1616 的输出与加法器 1619 的基本平衡扭矩命令组合以产生单个车轮扭矩命令。单个车轮扭矩命令使车轮保持前后稳定性并且还使运输装置将其自身与参考坐标系统的轴对准且跟随其原点，如方向输入 1600 所指导的。

在本发明的又一实施例中，速度限制被用于保持平衡和控制，否则如果接地部件（例如车轮）被允许达到运输装置的最大运行速度则可能失去平衡和控制。本文所用的术语“最大运行速度”是指车辆（例如运输装置）目前能够被推进的最大速度。该最大运行速度通常是运输装置瞬时能力的函数。例如，最大运行速度可以是驱动系统的能力和/或所提供的用来给驱动系统供电的能量存储设备的能力的函数。能力存储设备可以是电池。能量存储设备的“瞬时能力”是可由该设备传递的瞬时功率的量度。能量存储设备的“最大能力”是该设备可在任何时候提供的最大功率的量度。本文所使用的术语“速度干涉带”、“干涉速度”以及“速度限制”是指从下端的“干涉速度”延伸到上端的“速度限值”的速度的范围或带。干涉速度是可使用手段来减小运输装置的速度的阈值速度。通常将在最大运行速度和速度限值之间具有余量的情况下操作运输装置，如图 17 所示。该余量帮助确保运输装置在一定范围的操作条件下保持平衡。

可通过将运输装置俯仰回与当前行进方向相反的方向来完成减速，这导致运输装置减速。（如上所述，系统倾斜的程度和方向确定运输装置的加速。）在该实施例中，通过将俯仰修正添加到倾斜仪俯仰值来俯仰回运输装置。只要运输装置的运输装置速度超过干涉速度就发生减速。通过查看运输装置速度和干涉速度之间的随着时间积分的差异来确定俯仰修正。可保持自动俯仰修正序列直至运输装置减慢到期望回动（dropout）速度（干涉速度之下的某速度），并且随后俯仰角可平稳地返回其原始值。

连接到支持有效负载的车轮的电动马达施加一些作用来保持稳态状态。对于斜坡上的静止车辆，电源经由马达提供该作用。当机器开始在斜坡上行进时，

随着势能转换为动能，其速度增大。一旦达到稳态速度，势能不再转换成动能从而速度不再增大。相反地，势能可经由马达转换成电能。势能减去系统中的任何损耗后转换成电能。例如，电能可为用于驱动马达的电池充电。

马达电流与车辆和所支承的有效负载的组合重量以及底面的斜率成比例。这两个参数共同确定重力可对系统做多少功。如果表面斜率为零，则重力不做功。图 18A 示出车轮 180 在零斜率表面上行进。必须将前进扭矩  $T_F$  施加到车轮 180 以便车轮在前进方向  $V$  上行进。重力  $F_g$  不增大或减小将车轮 180 在零斜率表面上向前推进所需的功的量。图 18B 示出在斜面（斜率为  $\alpha$ ）上行进的车轮 180。重力  $F_g$  投入将车轮向前（ $V$  方向）推进所需的功的量。因为车轮 180 在斜面上向下行进，必须施加与重力( $F_g$ ) 和期望恒定速度成比例的反扭矩  $T_r$  以保持车轮 180 匀速行进。在其它实施例中，车轮 180 可在斜坡上向上行进。其它力（例如摩擦力）对将车轮向前推进所需的扭矩  $T$  的量有贡献，如以上关于图 14 所讨论的。出于简化的目的，在以上讨论中已将其忽略。对于给定的表面斜率，车辆和有效负载的重量越大，重力对系统所做的功就越多，其形式为在加速或减速时产生更多电流。在加速或减速时产生的电流的量因旋转损耗减少，使得对于小的斜坡或轻的有效负载可能没有马达驱动或再生。

给定的致动器系统通常在可处理的电流的量上受到限制。诸如马达驱动器硬件、电池容量和热约束之类的考虑影响了该限制。

图 19 示出本发明的一个实施例的电源模块 1900 的框图。平衡控制器 1910 产生命令信号，该命令信号被提供给马达放大器 1920。马达放大器 1920 基于命令信号将合适的功率施加到马达 1930。平衡控制器 1910 从用户和系统传感器接收输入，并且应用如以下详细讨论的控制律来保持平衡且根据用户命令控制运输装置的运动。马达 1930 旋转以角速度  $\omega$  向一个或多个车轮（例如，图 1 所示的车轮 20 和 21）提供扭矩  $T$  的轴 1932，这些车轮附连在轴 1932 上。在本发明的实施例中，马达 1930 是三线圈无电刷的 DC 马达。在该实施例中，尽管可使用任何数量的线圈，但是马达 1930 有三组定子线圈。定子线圈通过能够传导大电流或高电压的线圈引线 1937 电连接到功率级 1924。

马达放大器 1920 包含放大器控制器 1922 和功率放大级 1924 两者。放大器控制器 1922 可被配置为控制施加到马达 1930 的电流或电压。这些控制模式可被分别称为电流控制模式和电压控制模式。功率级 1924 将电源 1940 切换为与每个线圈连接或断开，这基于功率级 1924 的切换。功率级 1924 由放大器控

制器 1922 控制。内部回路 1826 感测功率级 1924 的输出是否等于指令值并且以优选地大约为 500Hz 的数量级的闭合回路带宽将误差信号反馈回放大器控制器 1922。放大器控制器基于误差信号改变功率级 1824 的输出。另外，通过放大器控制器 1922 的控制部分地基于来自轴反馈传感器(SFS)1935 的反馈信号。

轴反馈传感器 1935 耦合到平衡控制器 1910。轴反馈传感器 1935 向平衡控制器 1910 提供与轴位置或运动有关的信息。轴反馈传感器 1935 可以是传感器领域中已知的任何能够感测旋转轴的角坐标或角速度的传感器，并且包括转速计、编码器和分解器。为了根据轴反馈传感器 1935 所提供的位置信号获得轴旋转速度的测量值，位置信号由微分器 1908 求微分。外部反馈回路 1942 以平衡控制器 1910 所提供的平衡控制的带宽特性操作并且可以低到 20-30Hz。

尽管在某些应用中电流和电压可以是等效的，但是电压控制有利地应用于运输装置控制的实施例中，其中外部回路带宽比内部闭合回路带宽慢不止 3-4 倍。图 20 示出马达的电动模型 2010。马达具有一对端子 2011、2012，其上施加电压 V。马达 2010 还具有由轴速度  $\omega$  和扭矩 T 表征的旋转轴 2020。马达 2010 可由运载电流 i、电阻为 R 与具有电压降  $V_{emf}$  的理想马达 1935 串联的电阻器 1930 建模。对于理想马达：

$$V_{emf} = k_v \omega \quad (\text{方程式 7})$$

$$T = k_c * i \quad (\text{方程式 8})$$

其中  $k_v$  和  $k_c$  是马达常数。串联电阻器 2030 建模马达 2010 的损耗。

在本发明的又一实施例中，提供一种估计电池的瞬时能力的方法。如图 21 所示，简化模型 2100 用于电池，其包括具有“开路”电压  $V_{oc}$  的“完美”DC 电压源 2110、电池的串联电阻  $R_{bat}$ 、电流  $I_{bat}$  和电池电压  $V_{bat}$ ， $V_{oc}$  和  $R_{bat}$  不能测量但是可根据  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  的测量估计出。理想地，这些变量应当遵循线性关系：

$$V_{bat} = V_{oc} - (I_{bat} * R_{bat}) \quad (\text{方程式 9})$$

因为该线性关系是理想的，所以  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  的测量值将可能呈现“散布图”。注意，本文所使用的“统计的”涉及以时间上或按照另一尺度相对于样本的分布规则或不规则的间隔测量基于采样参数值关于该参数值的推论的绘制。本文所使用的动词“过滤”涉及从可在后续采样中获得且可受到随机波动或系统波动之一或两者的多个数据中提取可归于单个时间点的值的过程。本领域中已知的过滤技术对数据的应用使得可以得到  $V_{oc}$  和  $R_{bat}$  的估计值。例如，使用最小二乘法的回归分析可用于从  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  的测量值得到  $V_{oc}$  和  $R_{bat}$  的估计值。例如， $V_{oc}$



和  $R_{bat}$  可由于周围温度、电池温度、电池年龄、电池使用（使用的总量和使用模式两者）以及电池电荷耗尽（和/或再生）所用的时间而改变。因此，如果用作回归或更新值的  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  的更新测量值比更早的值更重地加权，则可获得更准确的估值。

在本发明的另一个具体实施例中，如图 22 所示（步骤 2200），通过使用低通滤波算法将  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  的新测量值用于校正  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  的估计值。这些变量被初始化（步骤 2210），其中  $V_{oc}$  和  $R_{bat}$  被设置为典型值。周期性地测量  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$ （步骤 2220）。为确保信号足够“富裕”（即，在数据点之间有统计上的显著差异），计算  $V_{bat}$  和  $I_{bat}$  离  $V_{prev}$  和  $I_{prev}$  这些变量的最后接受值的自乘距离  $D$ （步骤 2230）。

离先前接受测量值的距离标识可提供附加信息的数据点，根据这些信息可改善对当前电池参数的估计。例如，当运输装置静止时，产生很少电流并且一系列这种测量值可使电池参数的估计值自它们的真值扭曲，如过滤过程。对  $D$  适当设置的阈值可用于减轻这种数据点对估值的影响。

随后可执行以下计算：

(1) 计算更新增益  $K_{voc}$  和  $K_{rbat}$ （步骤 2240）：

$$\begin{bmatrix} K_{voc} \\ K_{rbat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_a & p_b \\ p_b & p_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -I_{bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_a - p_b * I_{bat} \\ p_b - p_c * I_{bat} \end{bmatrix} \quad (\text{方程式 10})$$

其中， $p_a$  是直接  $V_{oc}$  协方差矩阵元素， $p_b$  是交叉耦合协方差矩阵元素，并且  $p_c$  是直接  $R_{bat}$  协方差矩阵元素，（注意： $p_a$ 、 $p_b$  和  $p_c$  表示状态估计中的不确定性）；

(2) 计算电池状态估计和新的数据点之间的误差（步骤 2250）：

$$\text{Err} = V_{bat} - (V_{oc} - I_{bat} * R_{bat}) \quad (\text{方程式 11})$$

(3) 更新电池状态估计（步骤 2270）：

（如果  $D$  小于阈值（步骤 2260），则将  $K_{rbat}$  设置为零（步骤 2265）以使  $R_{bat}$  不被更新。）

$$V_{oc} = V_{oc} + K_{voc} * \text{Err} \quad (\text{方程式 12})$$

$$R_{bat} = R_{bat} + K_{rbat} * \text{Err} \quad (\text{方程式 13})$$

(4) 如果  $D$  大于阈值（步骤 2275），则更新信号内容变量（步骤 2280）

$$V_{prev} = V_{bat} \quad (\text{方程式 14})$$

$$I_{\text{prev}} = I_{\text{bat}} \quad (\text{方程式 15})$$

该过程可继续重复测量  $V_{\text{bat}}$  和  $I_{\text{bat}}$  (步骤 2220), 从而继续地更新  $V_{\text{bat}}$  和  $I_{\text{bat}}$  的估值。

在本发明的另一实施例中, 基于电池的状态和诸如马达电流之类的其它运输装置参数将电池参数的估计值用于计算运输装置的最大运行速度。例如, 运输装置的最大运行速度  $Y$  可由以下形式的线性方程来建模:

$$Y = M * I_{\text{max}} + B \quad (\text{方程式 16})$$

$M$  和  $B$  的值可随着时间而改变, 并且  $M$  或  $B$  可以是诸如电池开路电压与内阻之类的运输装置操作参数和诸如反 EMF 增益与马达电阻之类的马达参数的当前值的函数。

致动器系统对它们可提供的扭矩的量以及系统中电流的量有物理限制。致动器系统中输出的扭矩量和电流量是相关的, 扭矩是电流的函数 (并且反之亦然), 如以上结合图 19 和图 20 在方程式 8 中所示。调节扭矩量可调节致动器系统中的总电流。类似地, 电流限值限制了致动器系统可输出的扭矩量。这样, 如果致动器具有最大扭矩, 则电流能力也具有最大值。对致动器系统中的电流总量的物理限制适用于所有形式的电流 (例如, 周围温度、电池年龄、通过加速或减速产生的电流)。通过车辆驱动器的任何电流利用整个驱动器的一些给定部分并且对总电流限制有贡献。例如, 再生电流 (通过在行进方向的反方向上施加扭矩所产生的电流) 减小可用于刹车的电流量。这是因为再生电流和刹车电流两者都是负的并且向总电流限制增加。通常, 致动器系统可监控多少电流 (即, 可响应于可用电流施加的扭矩量) 能力正被用于加速或减速, 并且随后估计剩余的电流处理能力。通过估计剩余电流处理能力, 系统可限制车辆性能或通过一些其它手段提供附加的刹车力。

诸如以上所述的动态稳定运输装置可操作以便保持余量以供其驱动器致动器处理可能出现的各种马达驱动瞬变 (例如, 需要使车轮加速越过小的障碍)。即, 对于一些操作条件, 车轮需要加速以保持质心之下以便保持车辆平衡。类似地, 可能存在需要保持一些致动器余量的操作限制以便在系统完全故障的情况下使车辆安全停下。当上坡或在平面上行进时, 通过加速车轮使其不再在质心前面从而使系统向后俯仰而使车辆停下。向后俯仰导致扭矩减小, 随后使速度减小。

运输装置性能被限制并且通过调制运输装置的俯仰来减小其速度。该性能的降低可与总电流有关。即，车辆与有效负载的重量越大且斜坡越陡，产生的电流越多。例如，当上坡时可产生额外的电流，这是由于在车辆停止前将其俯仰回所需的扭矩增大。或者，当下坡时可产生额外的电流，这归因于刹车时所产生的再生电流。额外的电流对总电流有贡献，这可导致达到总电流限值（即，物理电流限值），从而降低速度限值。较低的速度限值降低了持续减速的可能量。降低速度限值不增大刹车能力，而是使系统进入不太可能需要使用刹车能力且与较高的初始速度相比使用刹车能力时间较短的操作状态。因为运输装置使用电动马达来产生刹车力，所以减速这样的动作也再生电流。

对测量可在本发明各实施例中使用的车辆的速度和加速度而言存在各种方法。例如，旋转编码器可用于测量车辆的一个或多个车轮的速度。车辆速度相对于时间的微分可用于确定车辆的加速度。此外，加速度计可用于确定车辆的速度。

图 23 示出针对本发明说明性实施例的所测马达电流和速度限值之间的关系。当所测量的马达电流大于或等于-2(A)时，将车辆速度设置为 5.558 (m/s)。当所测量的马达电流小于或等于-20(A)时，将车辆速度设置为 1.178 (m/s)。当所测量的马达电流在-2(A)和-20(A)之间时，速度受沿着-2(A)和-20(A)之间的细线限制。取决于例如特定用户的经验水平，这些限值的值（电流值和/或速度限值）可以改变。

在一些实施例中，总电流限值以运输装置上坡的操作特性为基础。在一些实施例中，总电流限值以运输装置下坡的操作特性为基础。在一些实施例中，必须达到所测量的马达电流阈值（例如，如图 23 所示的 2(A)）以便启动速度限制。

在未结合本发明原理的车辆中，在加速或减速期间产生正反馈，其导致运输装置错误地减速。正反馈导致额外的不必要的减速，因为速度响应于超过的电流限值被进一步限制。在上坡时较低的速度限值需要加速，而在下坡时其需要减速。加速或减速导致电流进一步增大，因为必须施加比最初导致总电流限值被超过的扭矩更大的扭矩来使车辆进一步加速或减速。总电流限值随后被进一步超过，因为扭矩越大所产生的电流越多。该总电流增大—减速循环（除最后导致完全的非期望停止之外）进一步减小用于响应于瞬变和故障的可用性能余量。在结合本发明的原理的车辆中，解决了来自加速或减速的额外电流，因

此没有将其视为来自斜坡和有效负载的额外电流。为了使与斜坡和车辆与有效负载的重量相关联的电流的作用最小化，并且为了避免不必要的速度限制且改善瞬态动态特性，控制算法将上坡或下坡所需的致动器电流从加速或减速所需的电流中分出。对归因于加速或减速的所测量电流的估计量可从所测量的总电流中去除。去除归因于加速或减速的电流量允许基于仅由斜面 and 有效负载产生的电流来设置速度限值，这是最初的意图。

图 24 是描绘根据本发明实施例的运输装置控制器的速度限制的示意图。扭矩模块 2402 确定在底面上行进的车辆的稳态平均扭矩以及加速与减速期间的扭矩。将稳态平均扭矩和加速与减速期间的扭矩提供给速度模块 2401。速度模块 2401 还接收表示所测总电流 ( $I_{tot}$ )、车辆及其有效负载（例如，驾驶者或负载）的系统的总重量、车辆扭矩、车辆加速度以及车辆速度的输入信号。在该实施例中，速度模块 2401 的输出是期望俯仰角，因为俯仰角确定运输装置的速度。将期望俯仰角提供给控制运输装置俯仰的俯仰控制器 2303。

一些车辆的速度并不通过控制车辆的俯仰来控制。在这些车辆中，例如通过改变施加于车辆节流阀的节流阀命令信号而不是通过改变施加到车辆马达的指令俯仰角，将速度控制器用于控制车辆速度。

图 25 是描绘根据本发明实施例的下坡时的运输装置控制器的速度限制的操作的流程图。图 24 的扭矩模块 2402 感测并确定其上有车辆行进的底面的斜率（步骤 2501）。当车辆下坡时（步骤 2502），再生电流 ( $I_{reg}$ ) 产生并被测量（步骤 2503）。如果再生电流增大（步骤 2504），则基于如以上所述的补偿再生电流信号用于车辆加速来降低车辆的最大允许速度限值（步骤 2505）。产生加速补偿平均电流信号（步骤 2506），其导致通过俯仰控制器 2503 来调制（步骤 2507）运输装置的俯仰。俯仰控制器 2503 通过控制对车轮的重量转移来控制运输装置的俯仰（步骤 2508）。

实际上，加速补偿平均电流是对斜坡和有效负载的综合影响的估计。在动态稳定运输装置中实现的本发明的实施例中，对车辆和有效负载质量的一般化估计（例如，车辆控制系统中的固定增益）可用于确定加速补偿平均电流。例如，在一个实施例中，估计使车辆减速一米每秒需要 5 安培。在其它实施例中，测量或估计系统总重量。

本发明的原理可供各种其它类型的车辆使用。在本发明的一些实施例中，本发明的原理用于静态稳定车辆（例如，汽车、全地形车辆）。例如，在本发

明的一个实施例中，本发明的原理应用于四轮静态稳定汽车。该汽车包括耦合到汽车车轮的两个或更多个电动马达。电动马达被用作汽车加速和减速的主要装置。参考图 24 和图 25，代替使用汽车的俯仰来控制汽车速度，基于例如加速补偿平均电流信号使用独立的控制器和/或致动器来控制汽车速度。例如，可将加速补偿平均电流信号提供给控制汽车引擎节流阀的致动器，从而控制汽车速度。用于控制车辆速度的替换装置和方法也在本发明的范围内。

在一个实施例中，加速补偿平均电流取决于系统总重量。通过测量或估计转移到车轮的重量可准确地反映系统总重量。

在一个实施例中，可基于扭矩、加速度和速度的测量值来估计表面的斜率和有效负载的重量。基于扭矩、加速度和速度的测量值的斜率和有效负载估值一般还可应用于对与爬坡的性能限制相关的车辆性能的监控和限制。

在一些实施例中，当再生电流减小时最大允许速度限值（例如，图 25 的步骤 2505 中）增大。当再生电流减小时总致动器能力增大，从而使得有更多的致动器能力用于刹车。这导致最大允许速度限值的增大。在一些实施例中，再生电流限值基于用户体验可以更高。更有经验的用户可能知道如何驾驶车辆使得在某些操纵期间刹车或使车辆减速的需要最小化。例如，用户可知道用于急转弯的适当身体姿势和通过各种地形的适当速度。该经验可允许传动系统被设置在较高的电流限制阈值，因为需要较少的致动器能力用于刹车和瞬变。因而，各实施例提供对下坡的电动车辆速度的平稳控制，即使在下坡期间速度限值被降低。另外，速度和扭矩的增大余量被保留以供响应于瞬变或系统故障。

本发明所述的实施例旨在仅仅是示例性的，并且对本领域的技术人员而言许多变型和修改将是显而易见的。特别地，本文所述的方向和速度控制的许多控制器和方法可有利地应用于不是平衡个人运输装置的电动车辆中。平衡运输装置提出了用于控制车辆的特定要求，如前面描述以及美国专利 No. 6789640 所讨论的。所有这些变型和修改都旨在落入任何所附权利要求所限定的本发明的范围内。

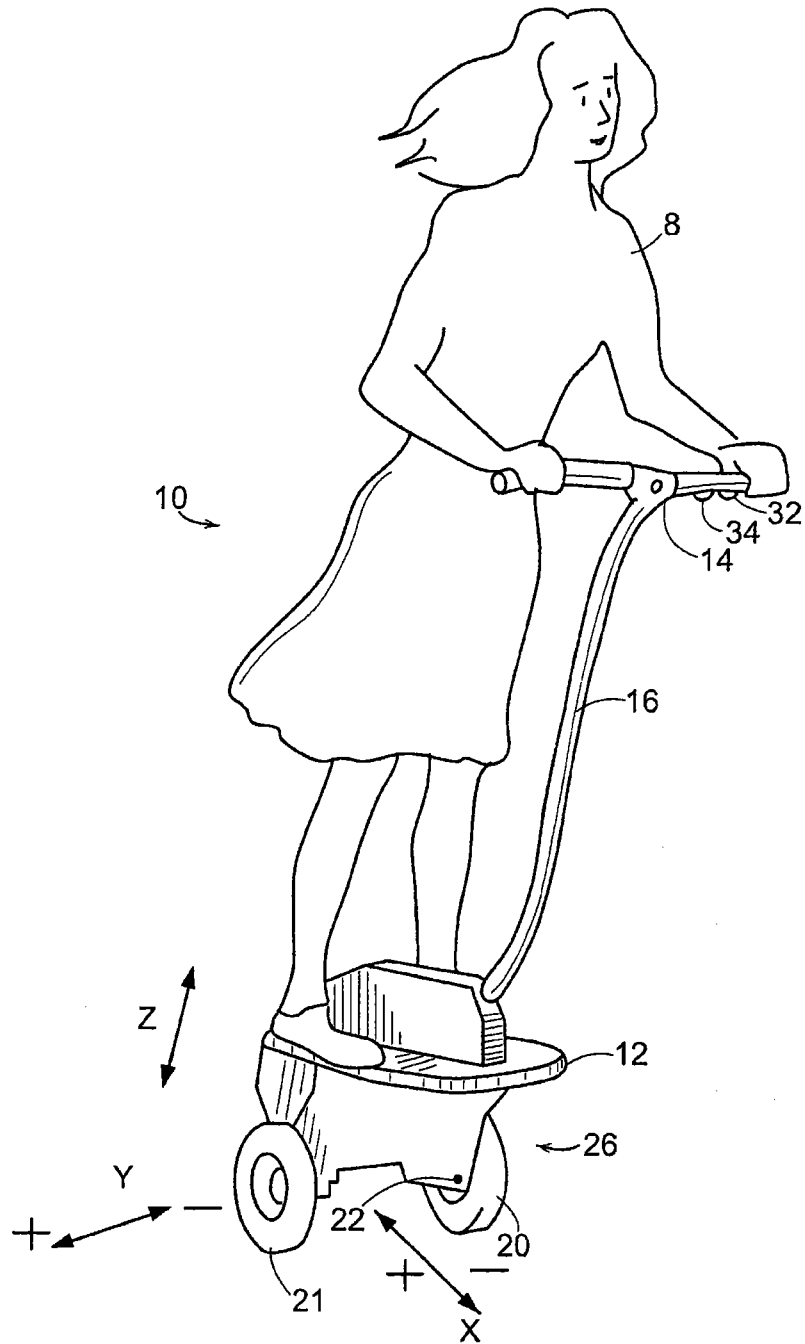


图 1

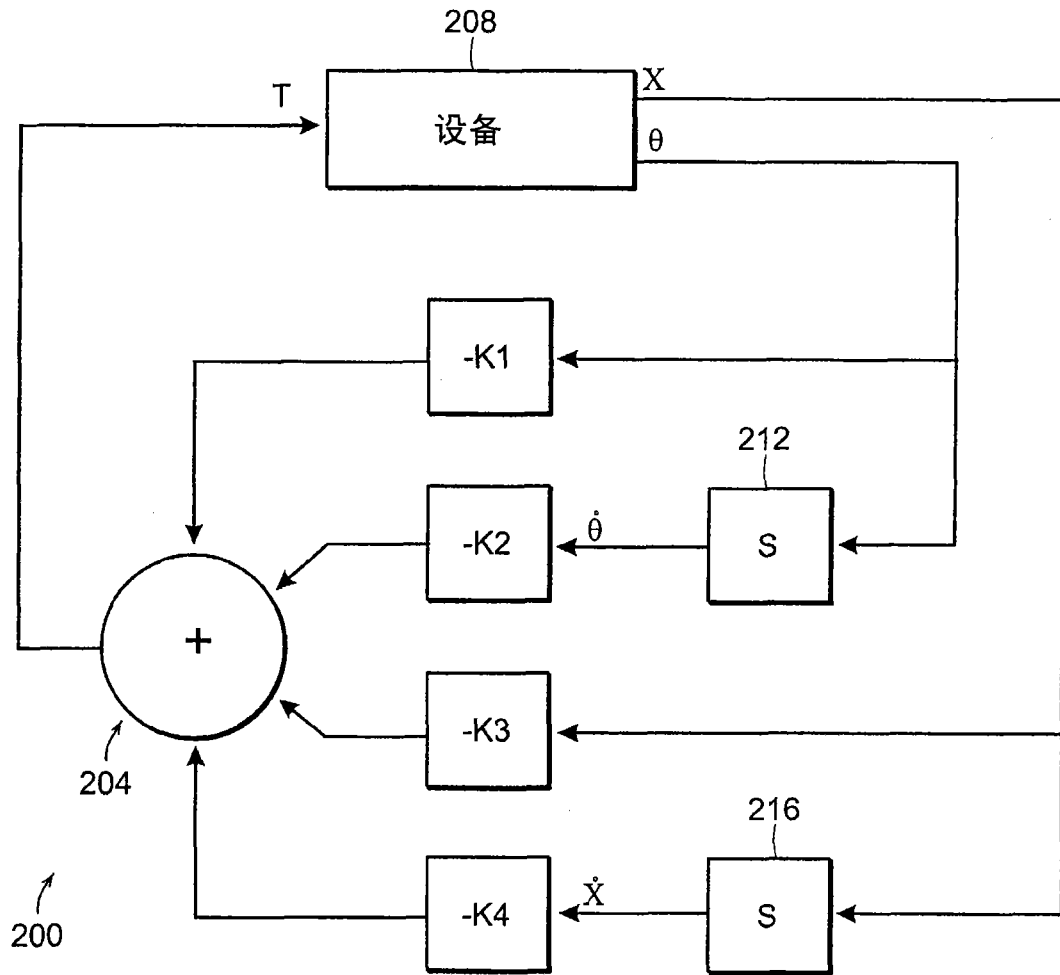


图 2

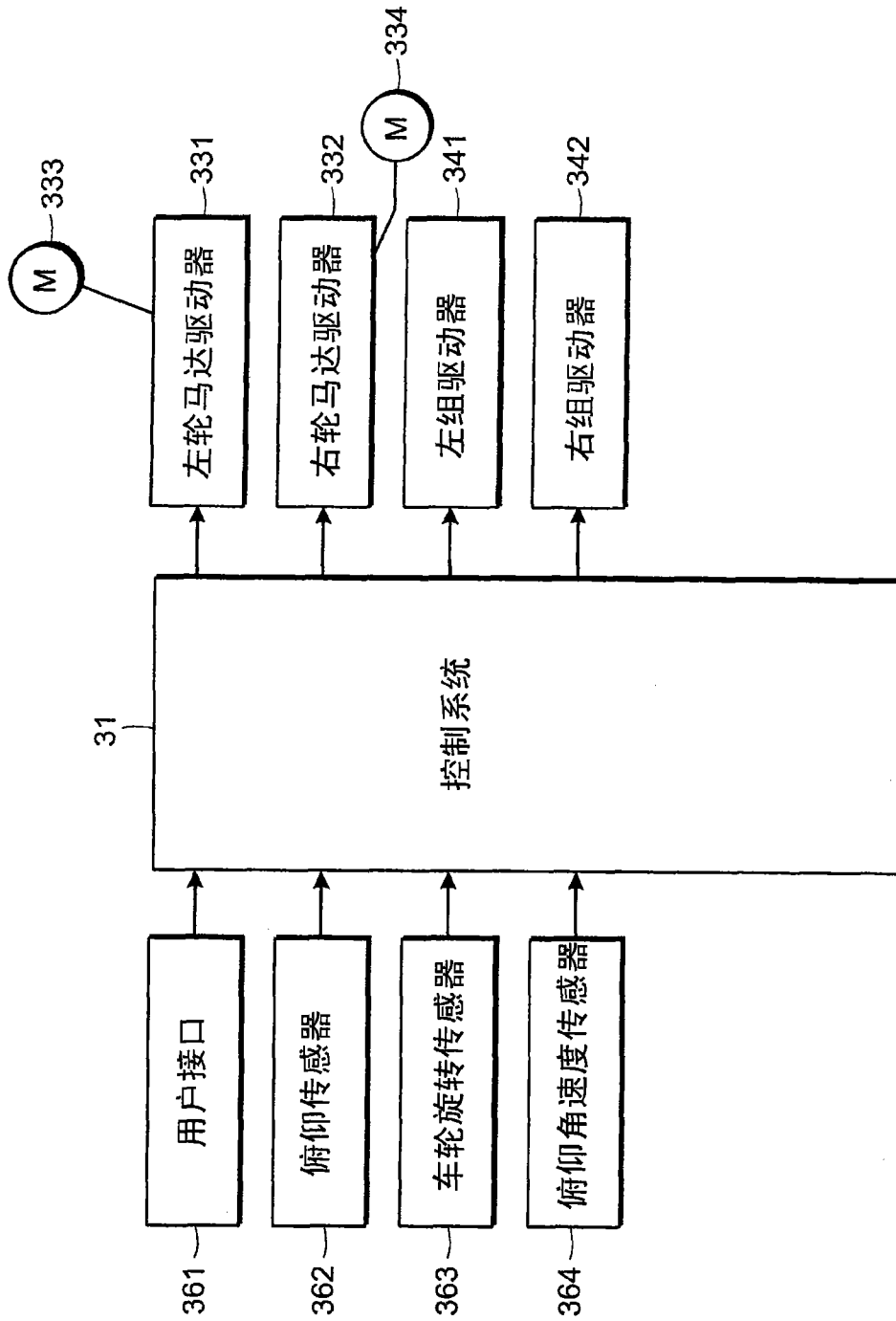


图 3



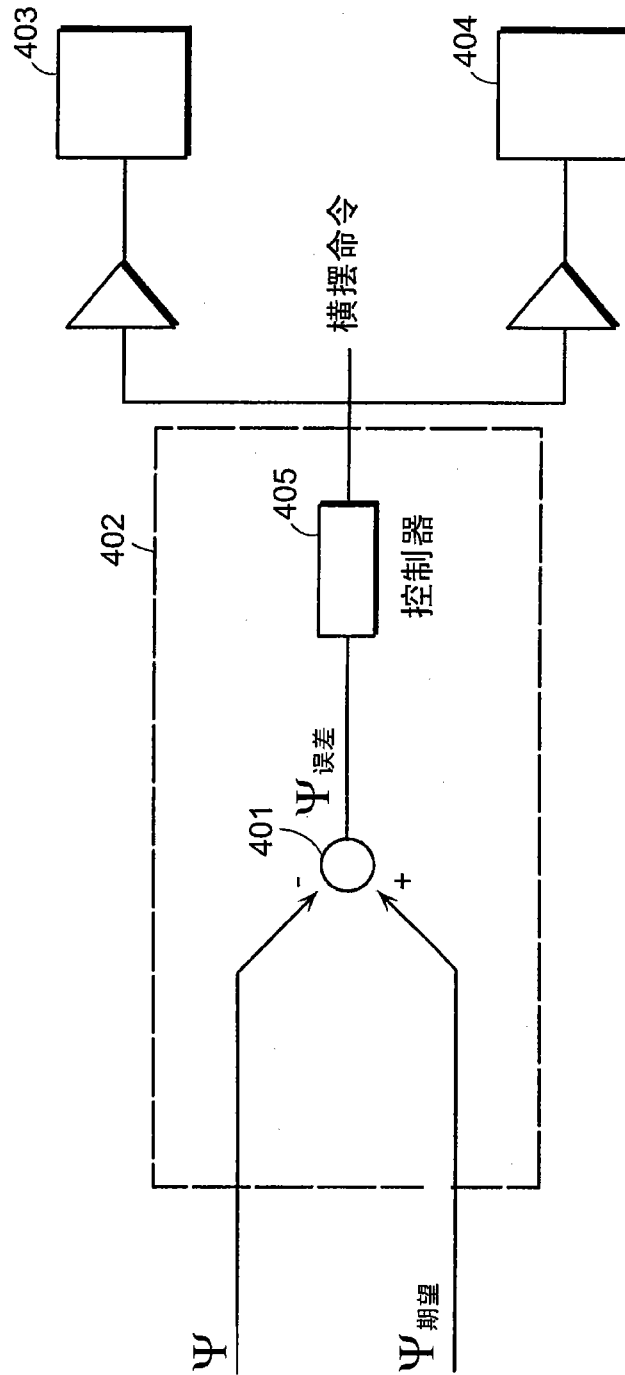


图 4

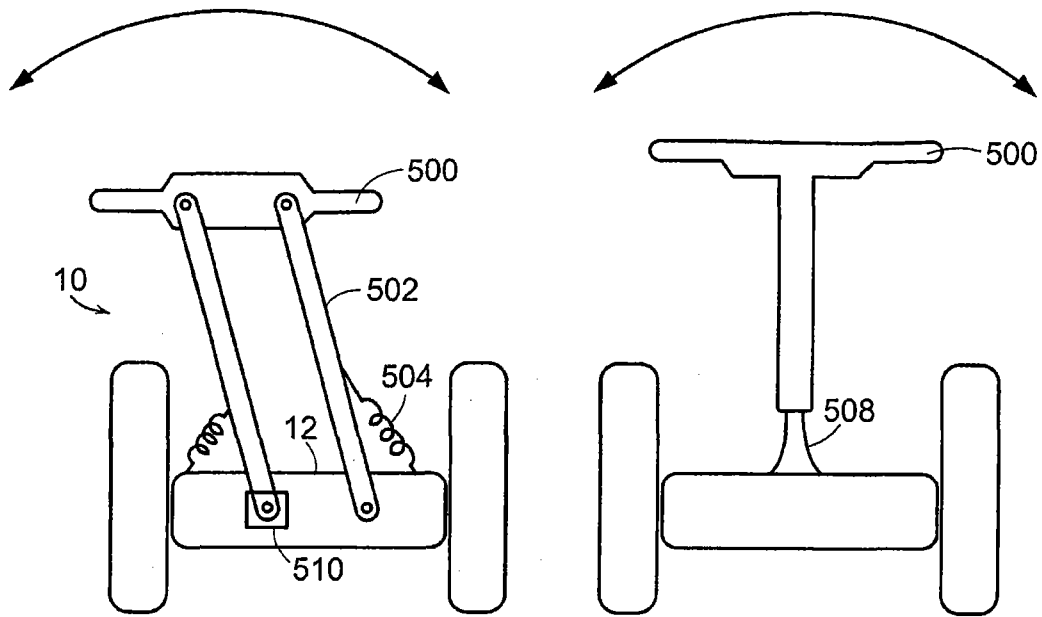


图 5A

图 5B

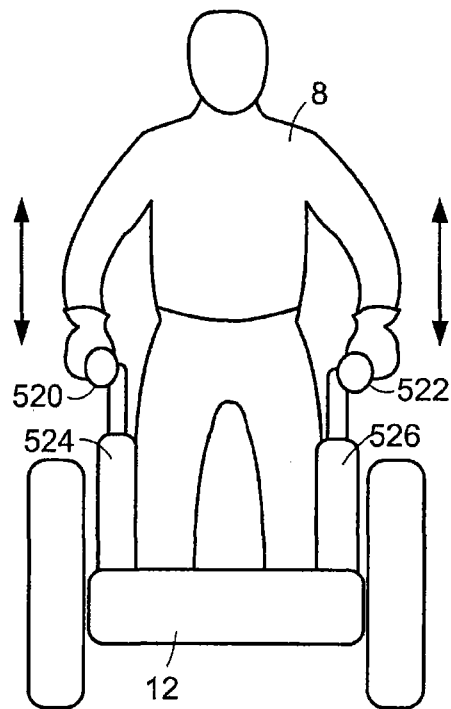


图 5C

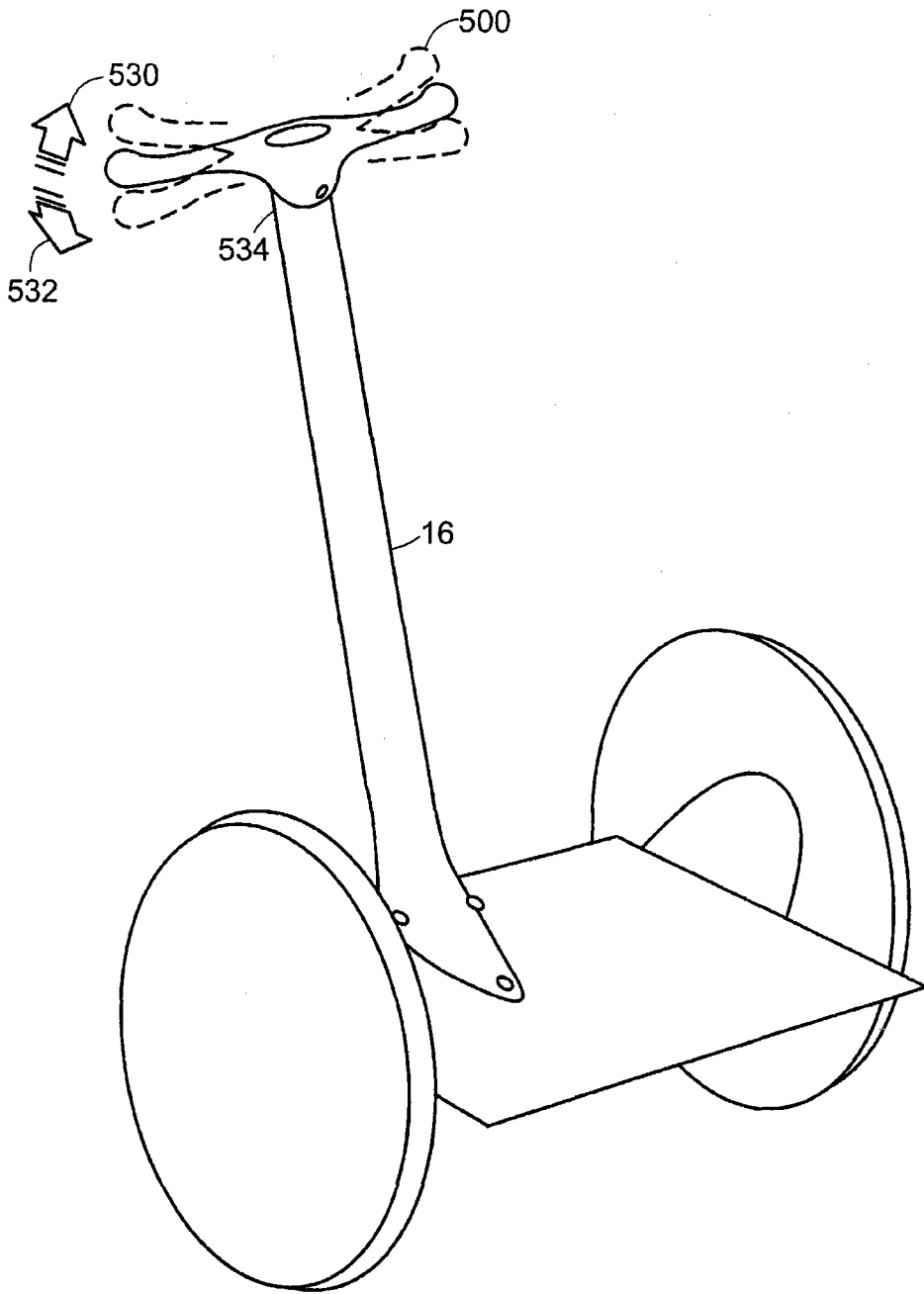


图 5D

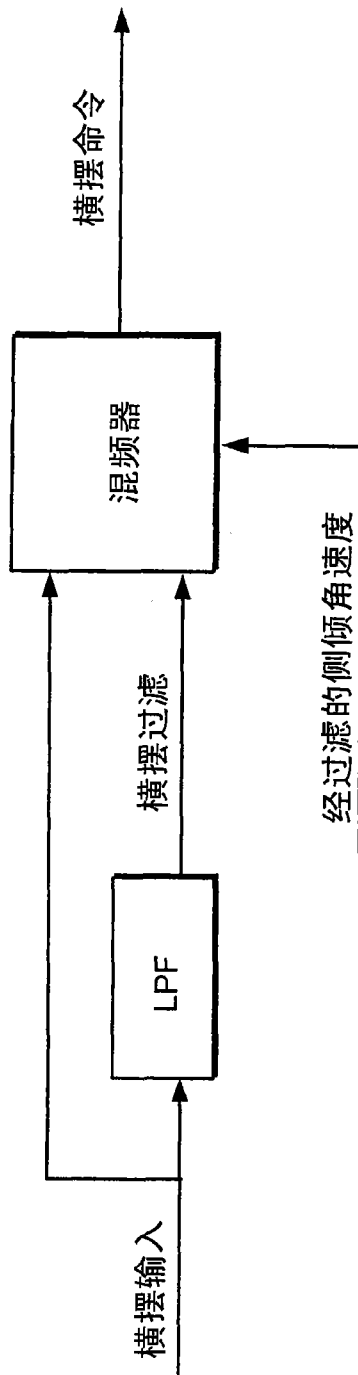


图 6

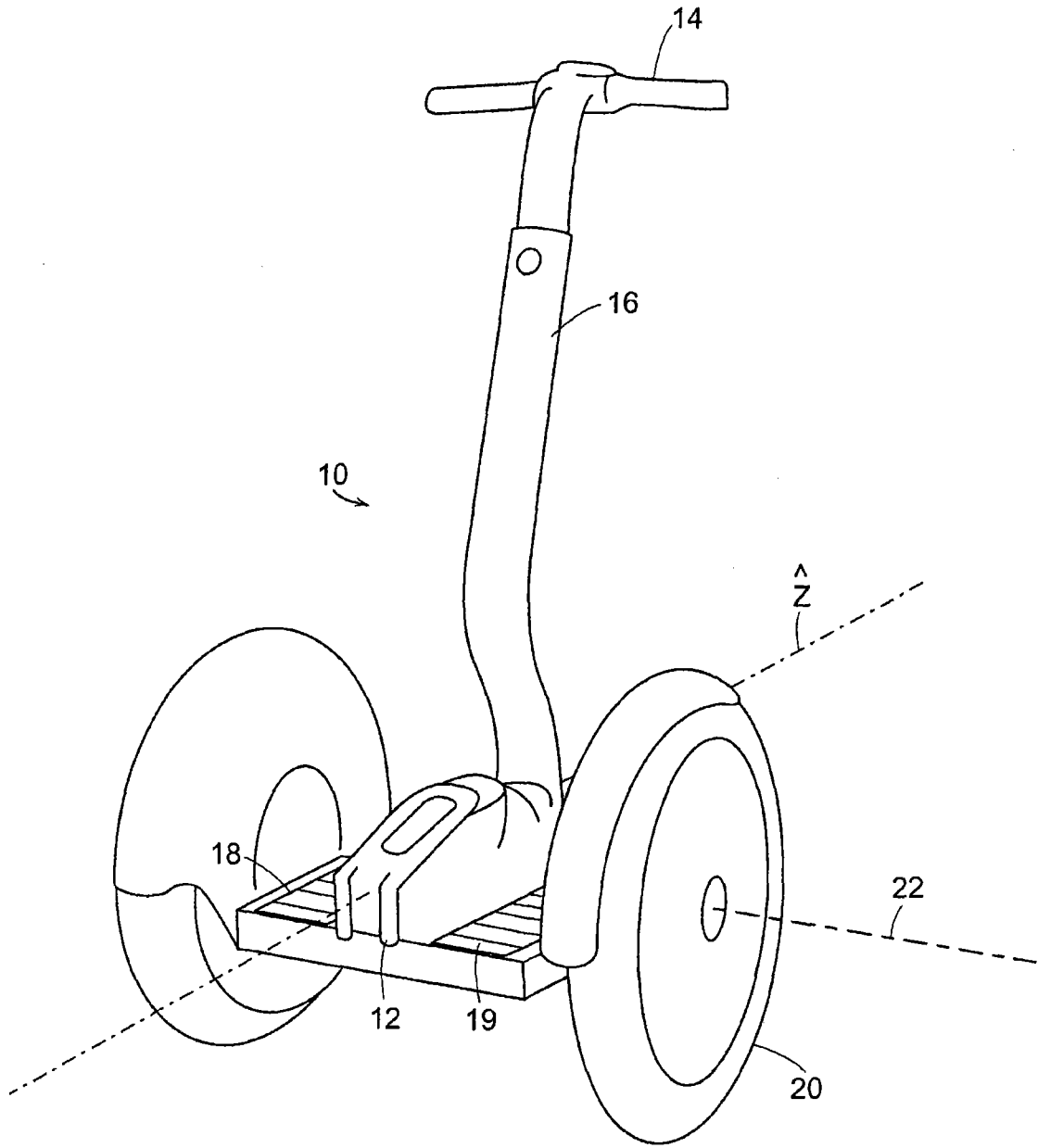


图 7

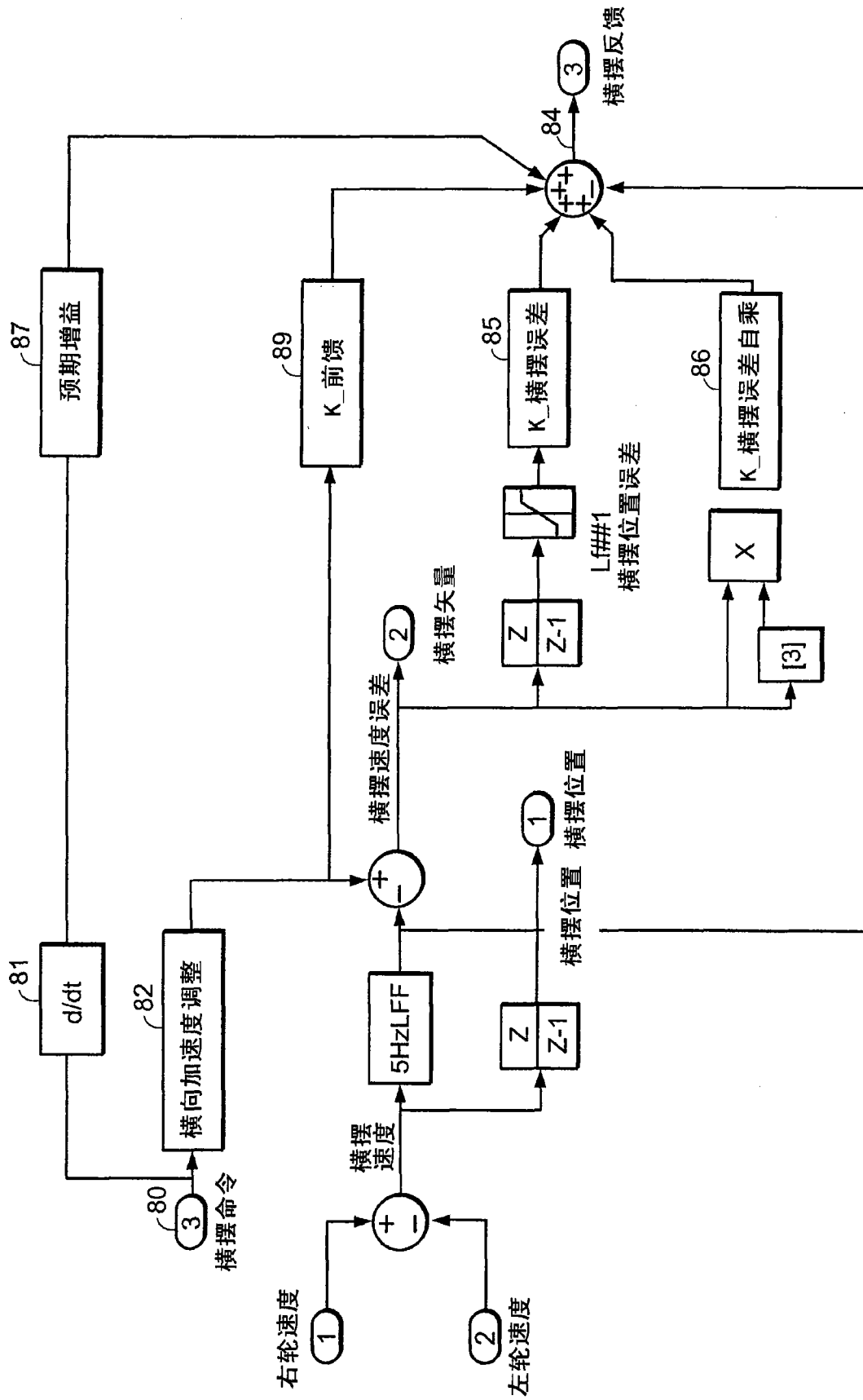


图 8

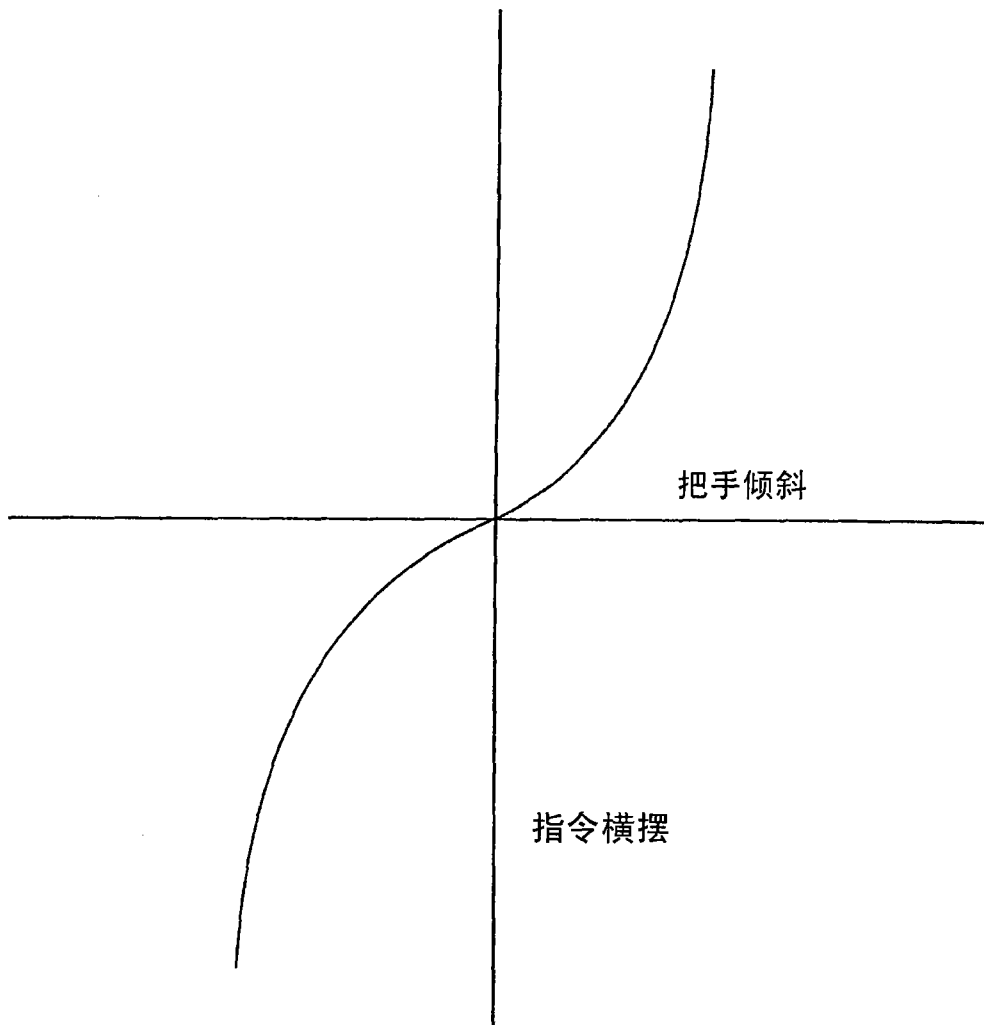


图 9

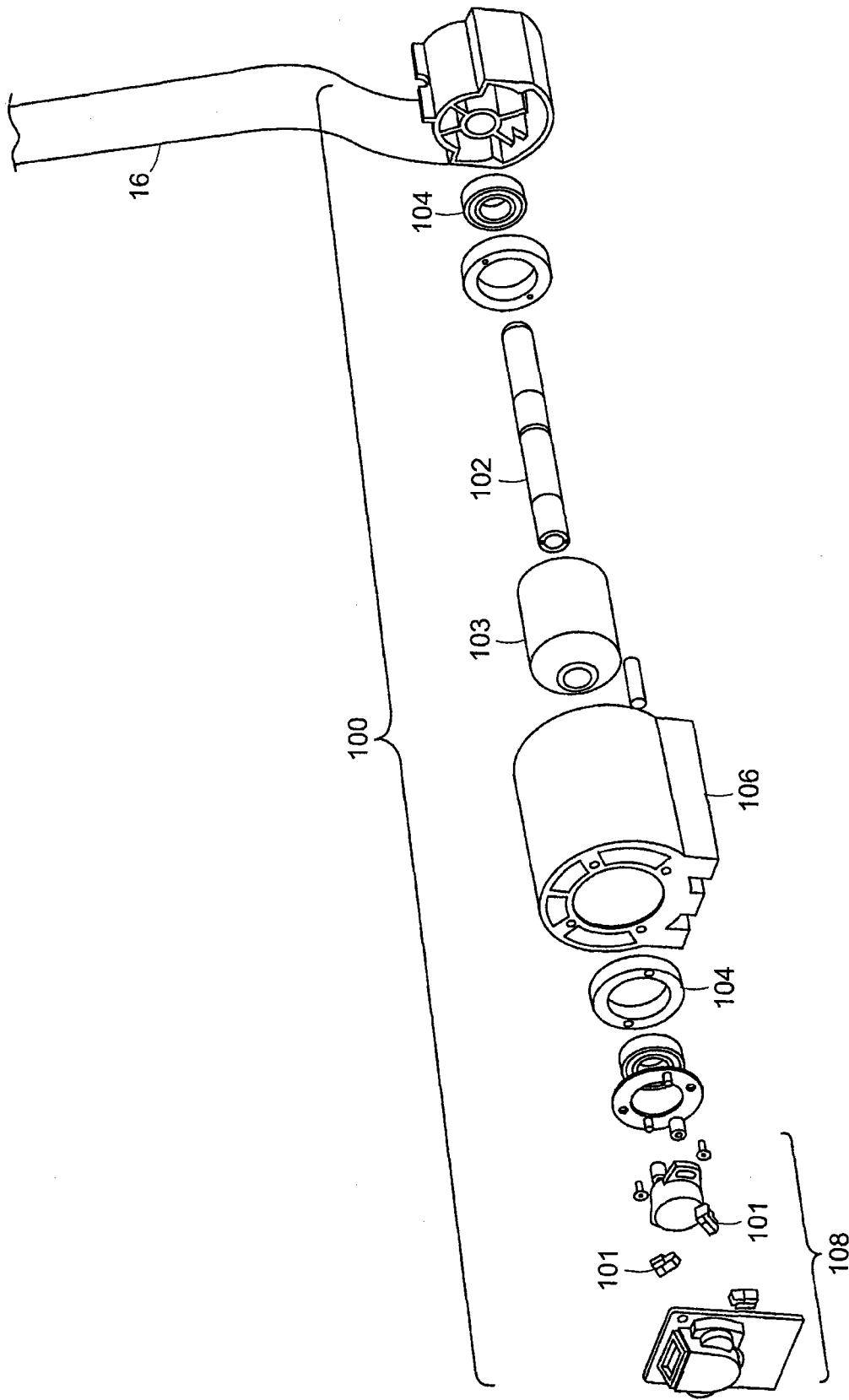


图 10



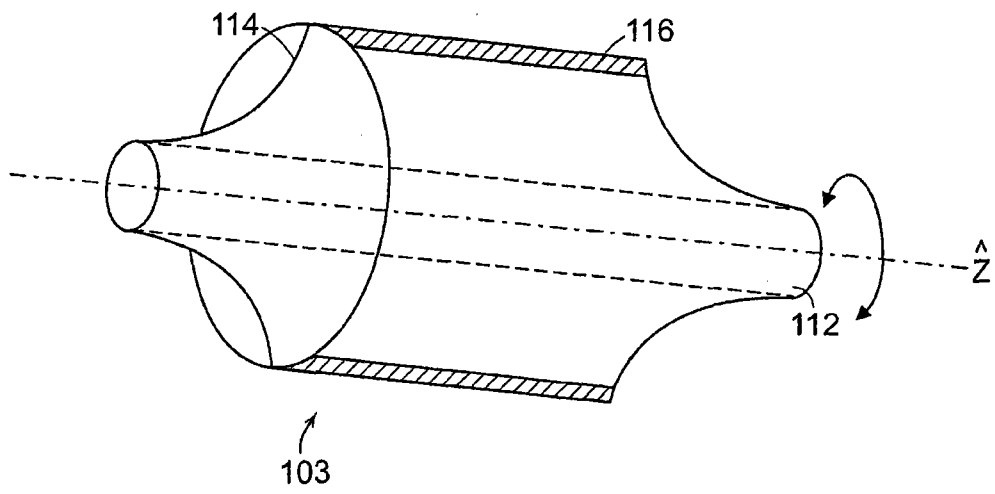


图 11

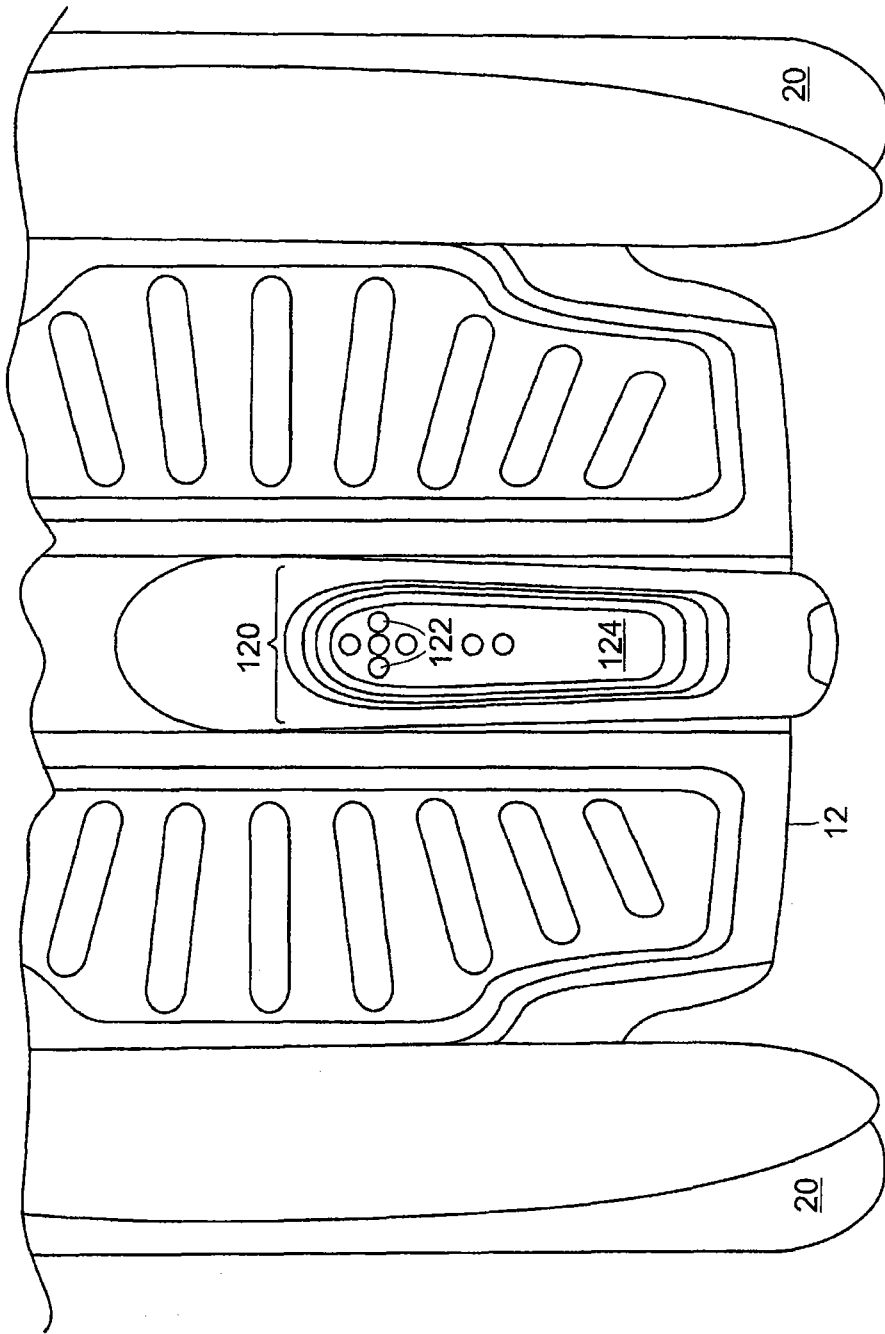


图 12

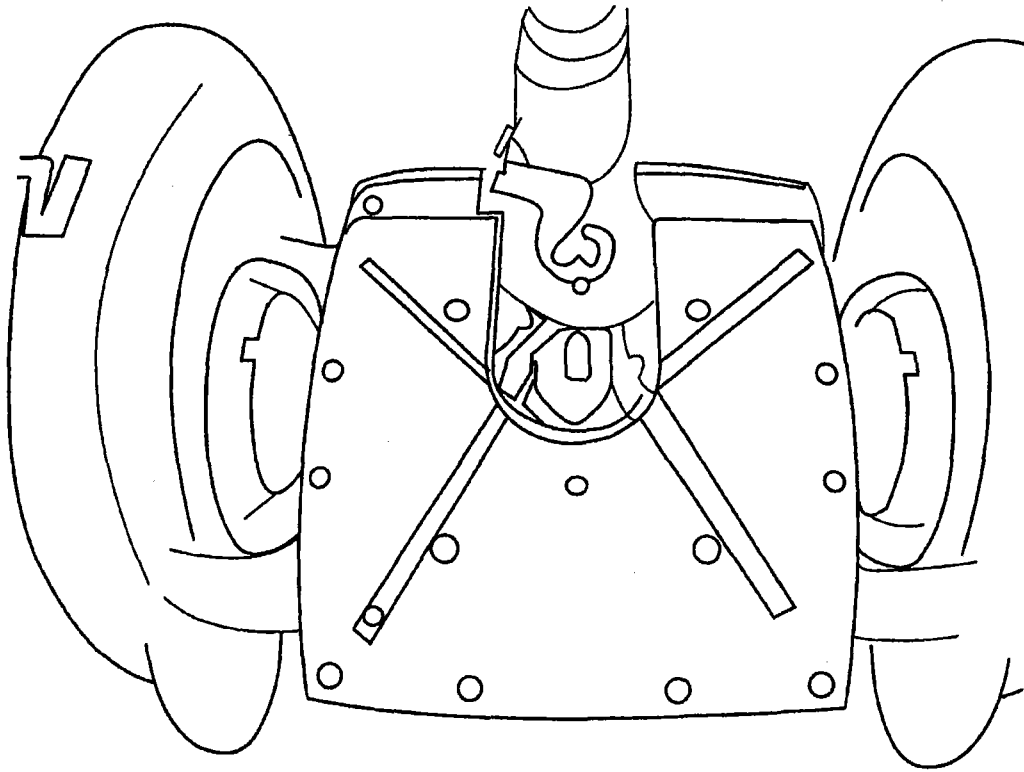


图 13A

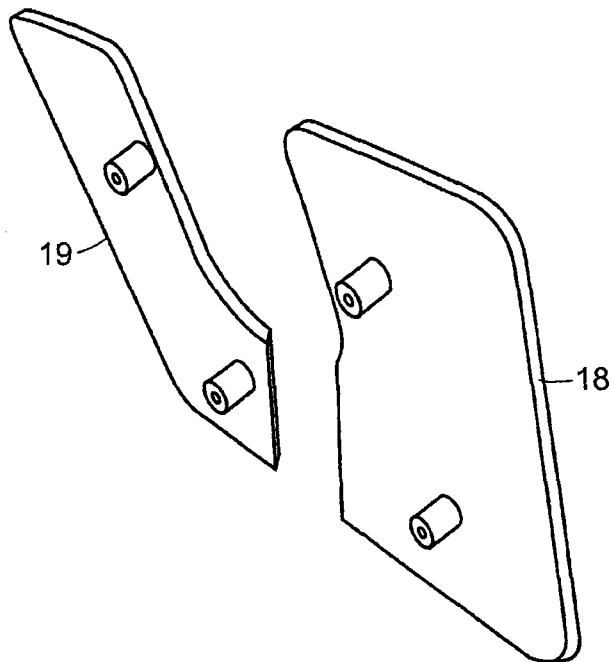


图 13B

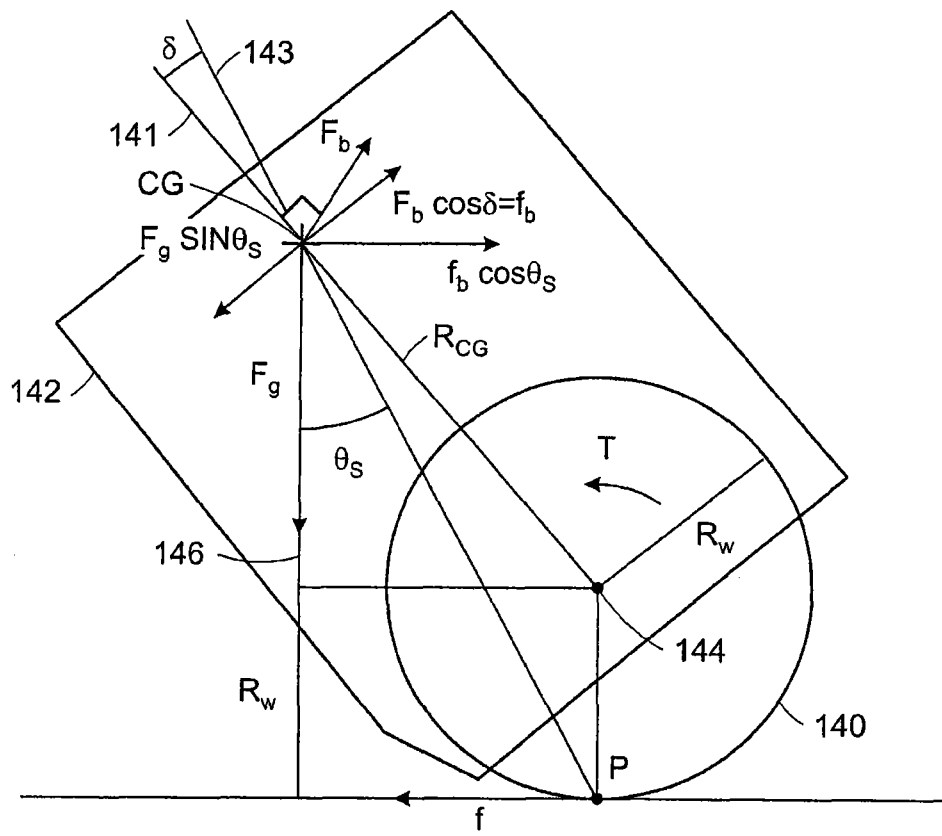


图 14

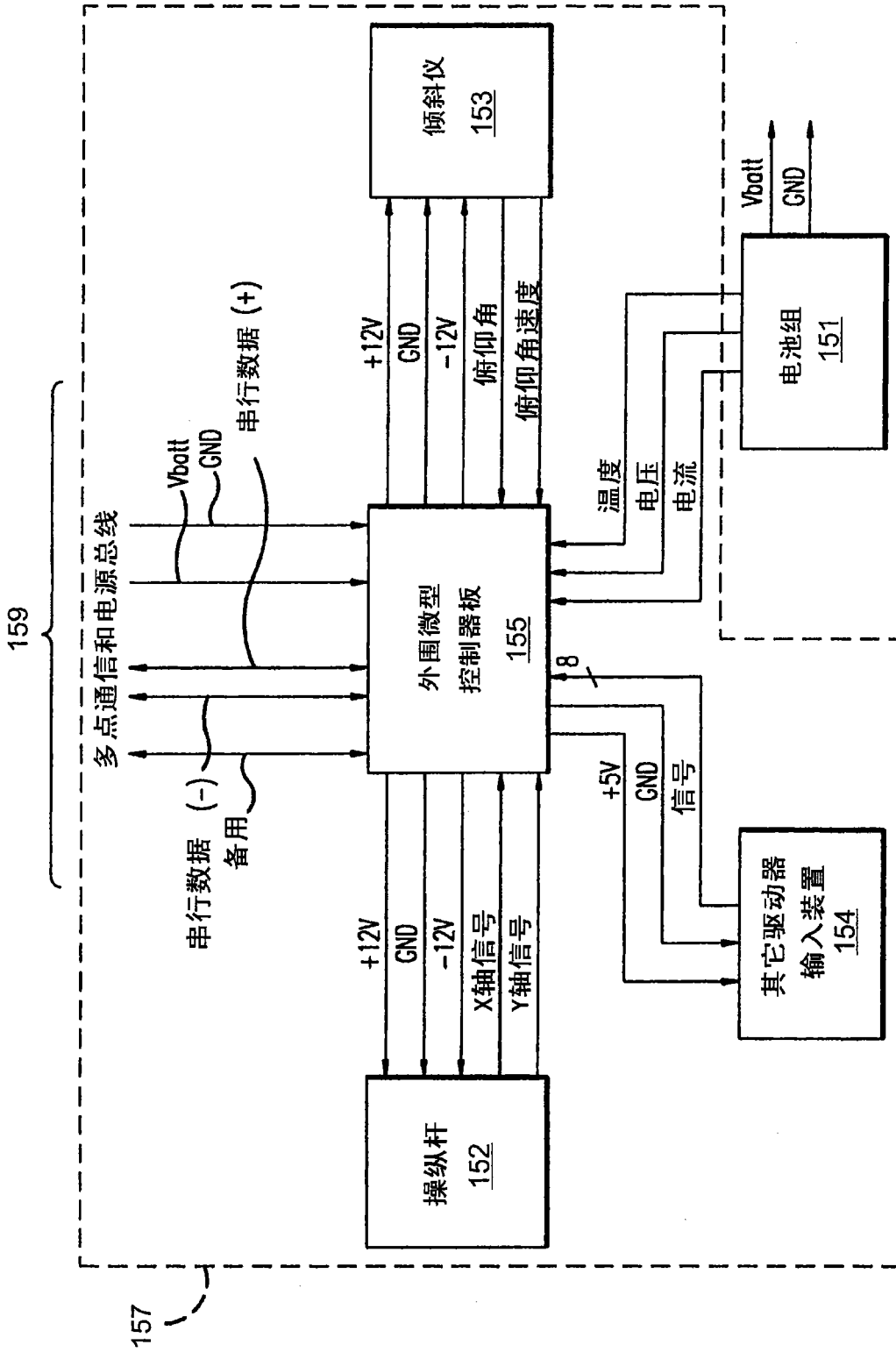


图 15

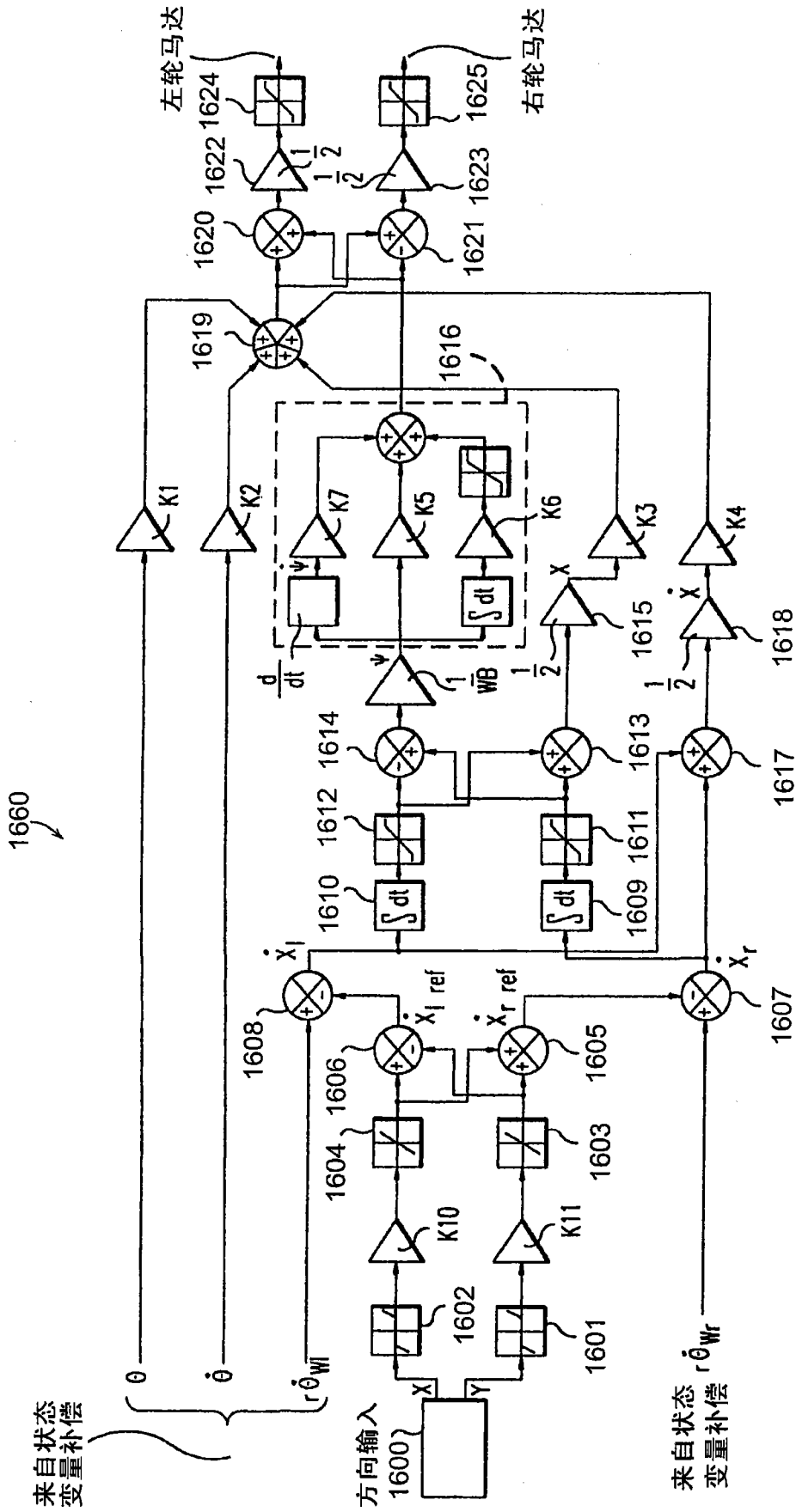


图 16

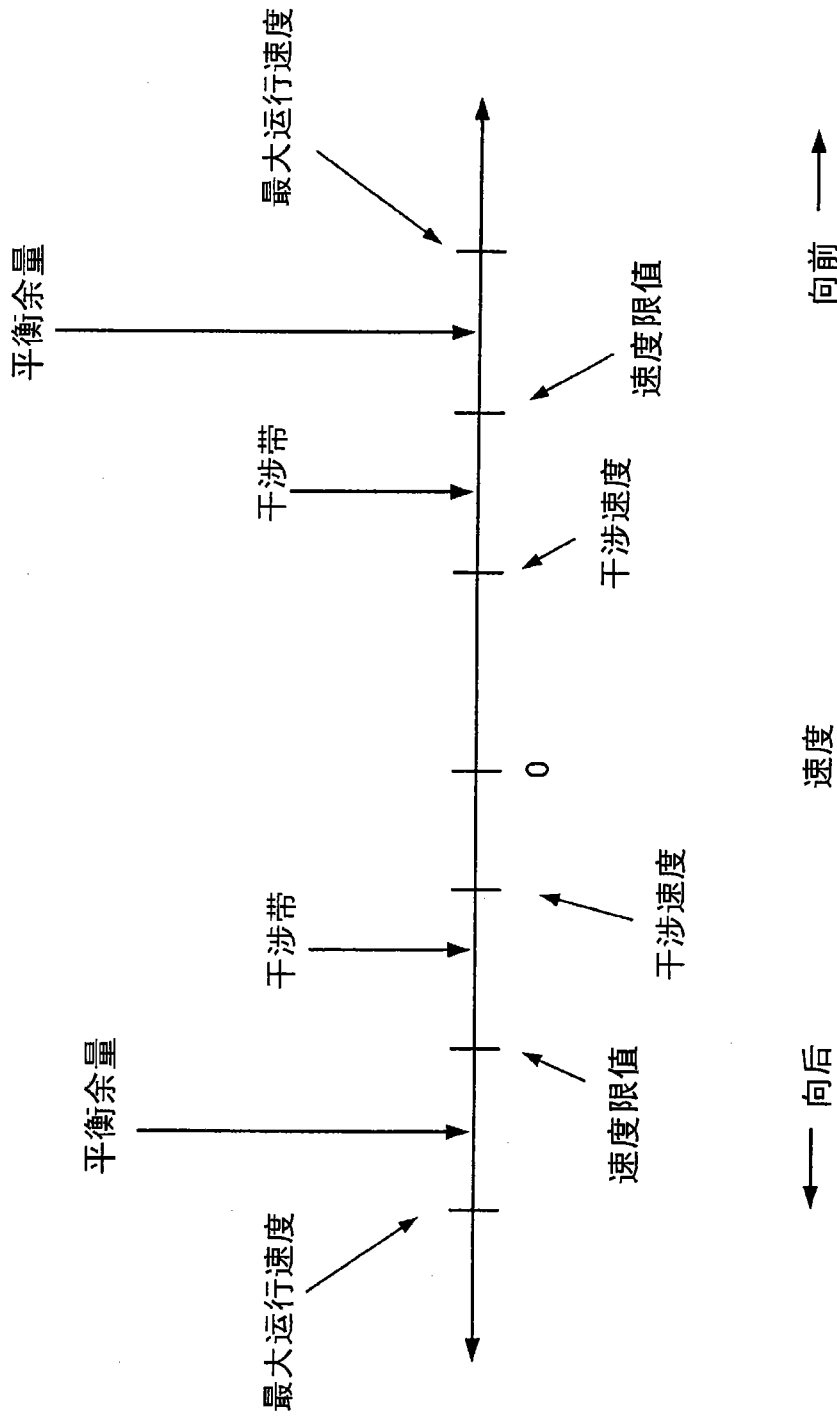


图 17

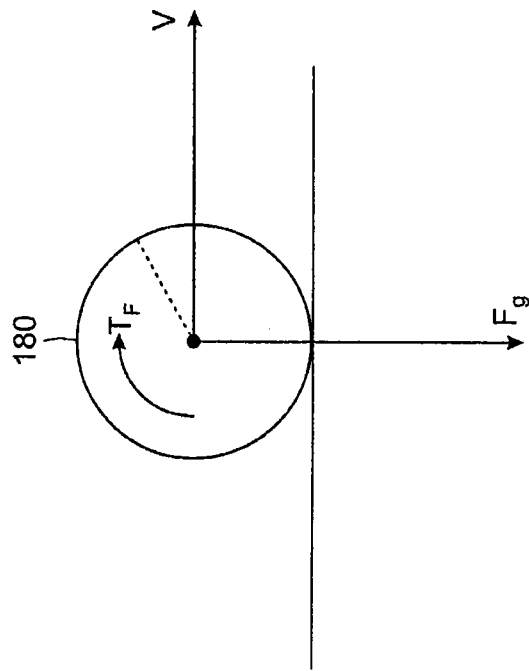


图 18A

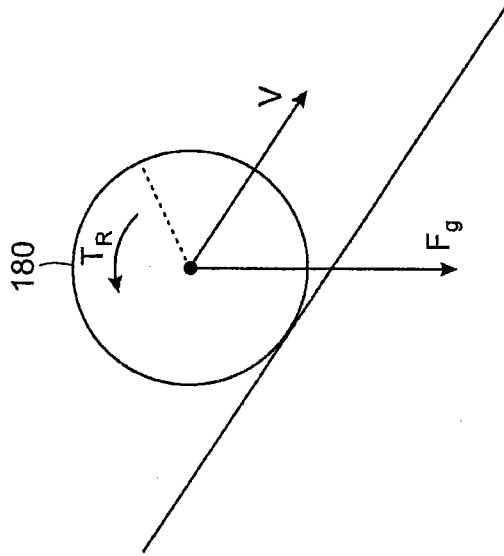


图 18B



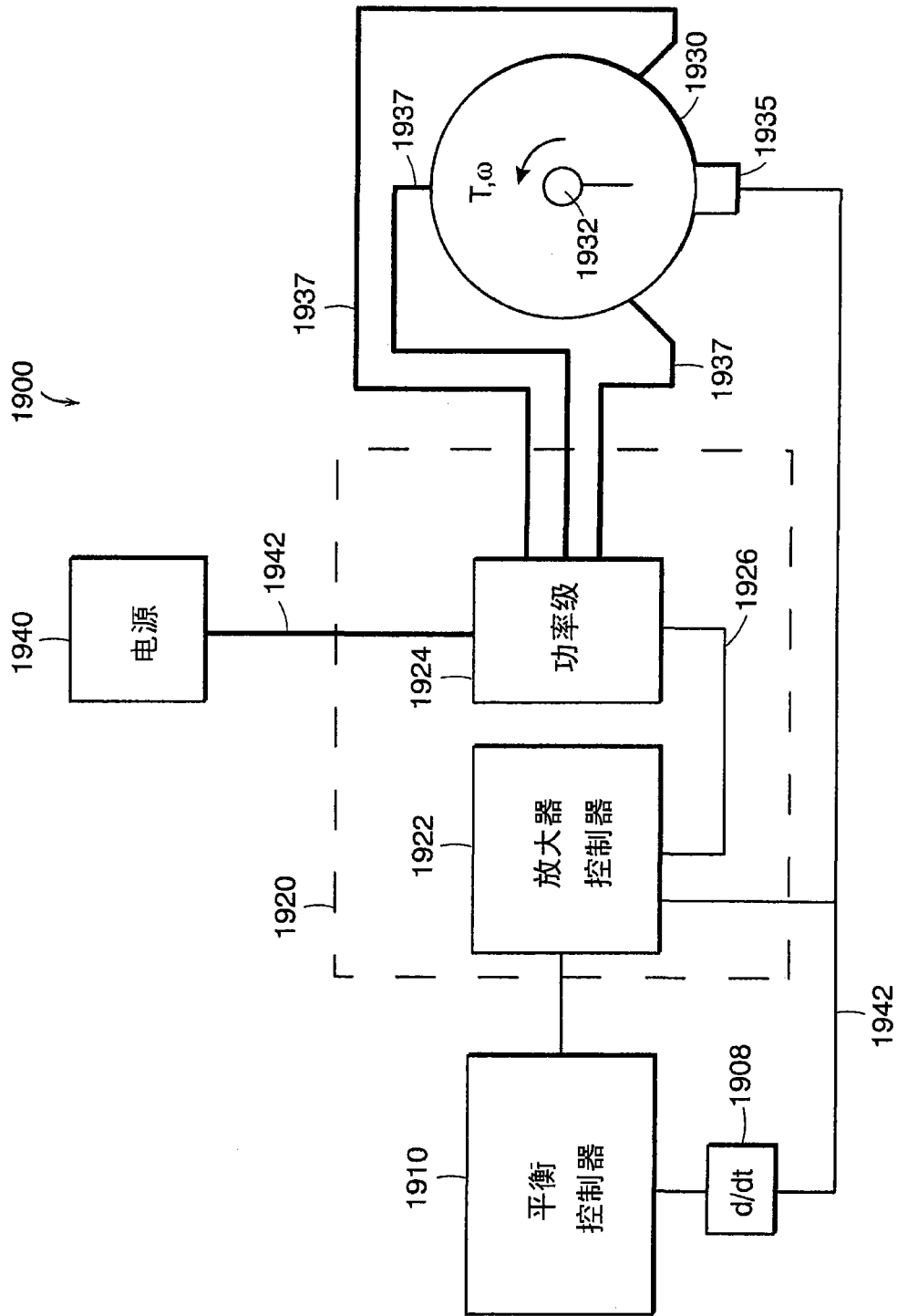


图 19

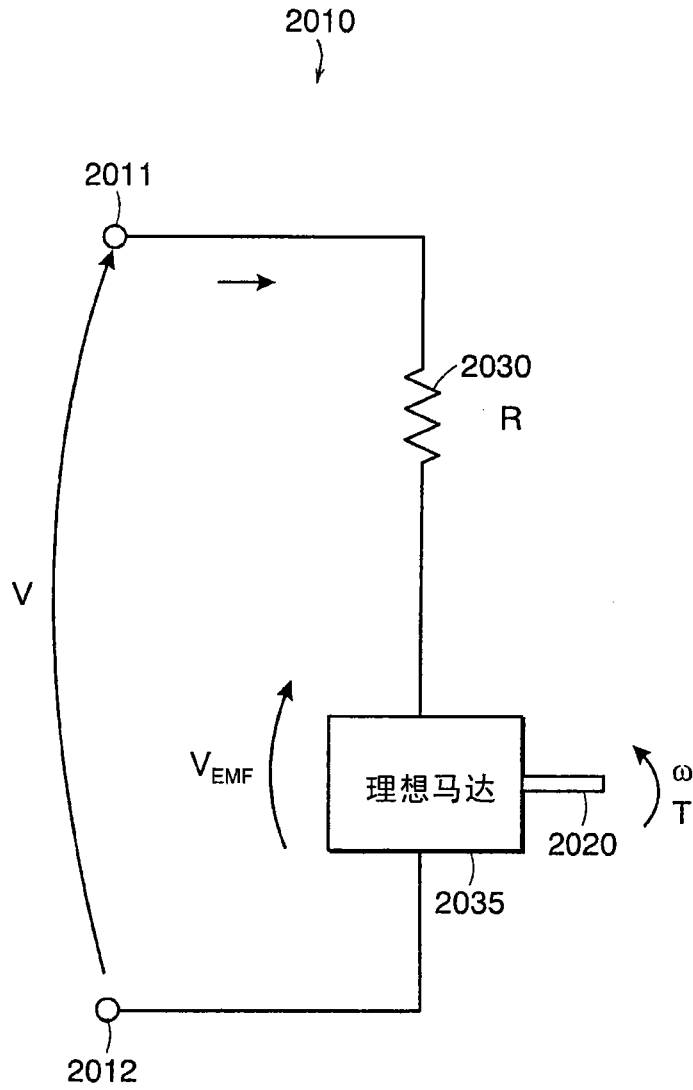


图 20

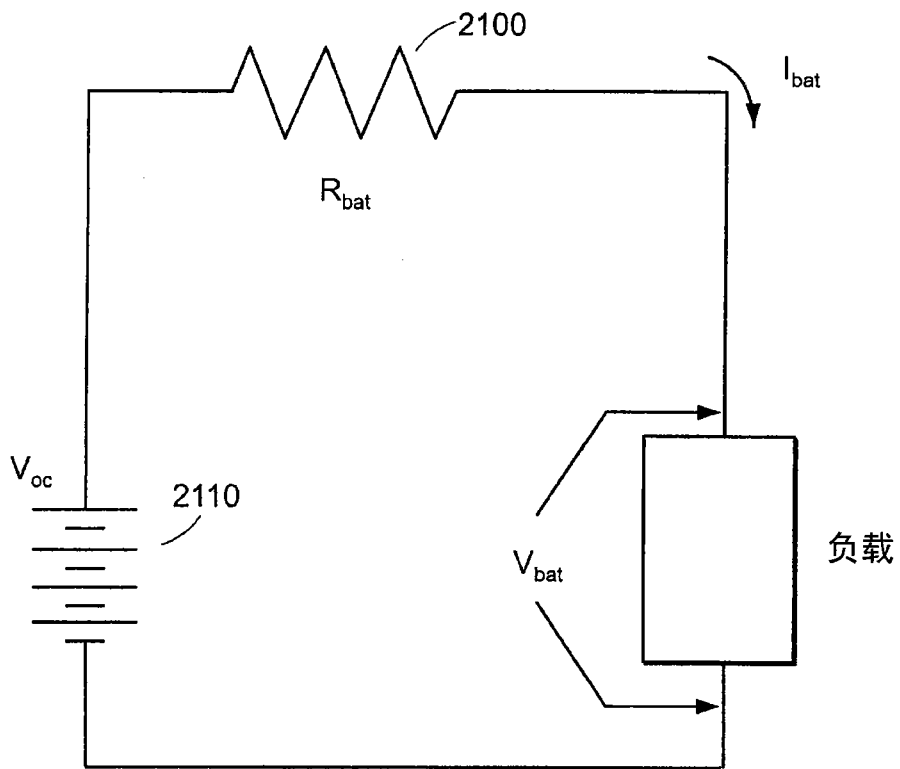


图 21

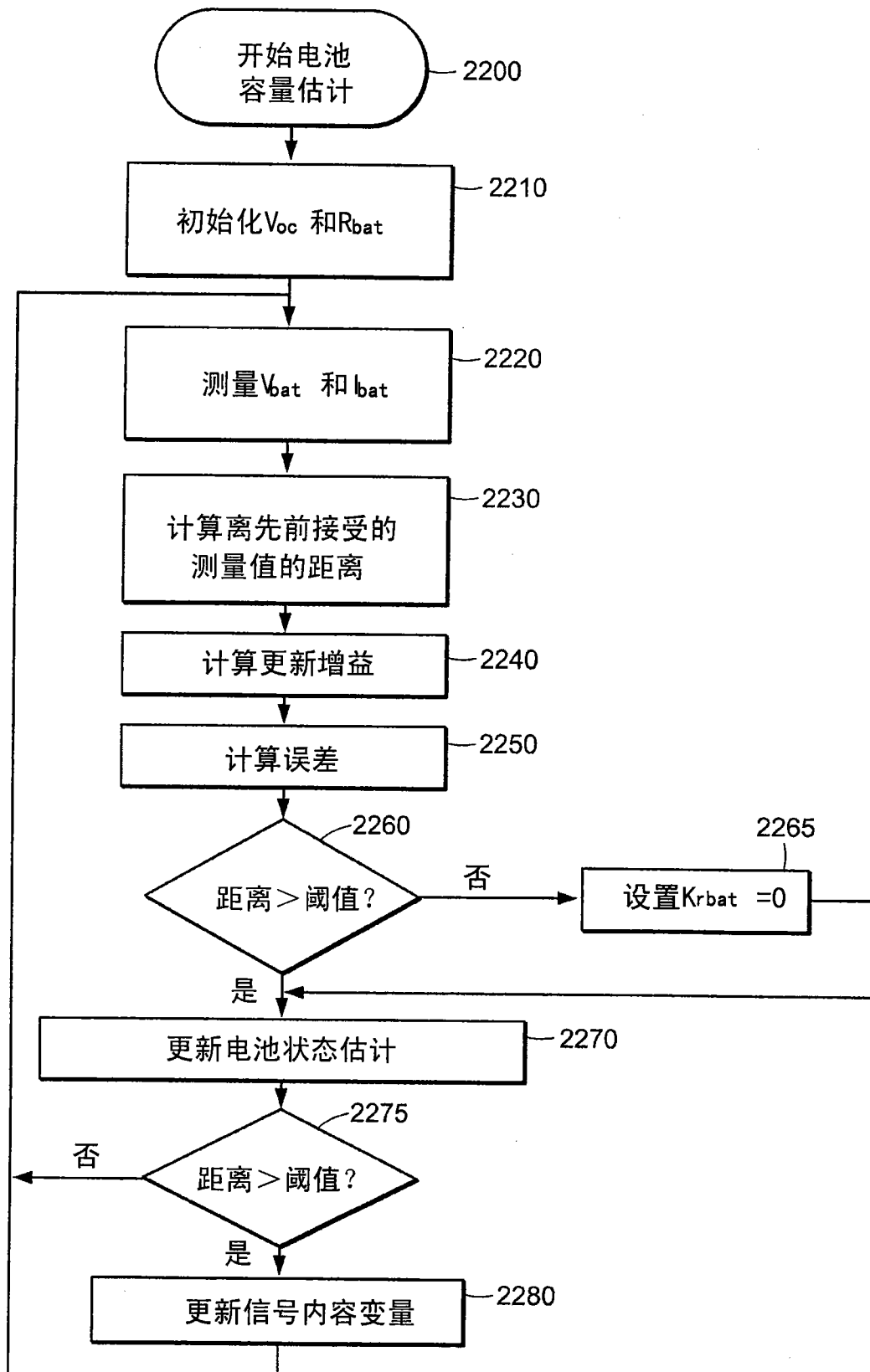


图 22

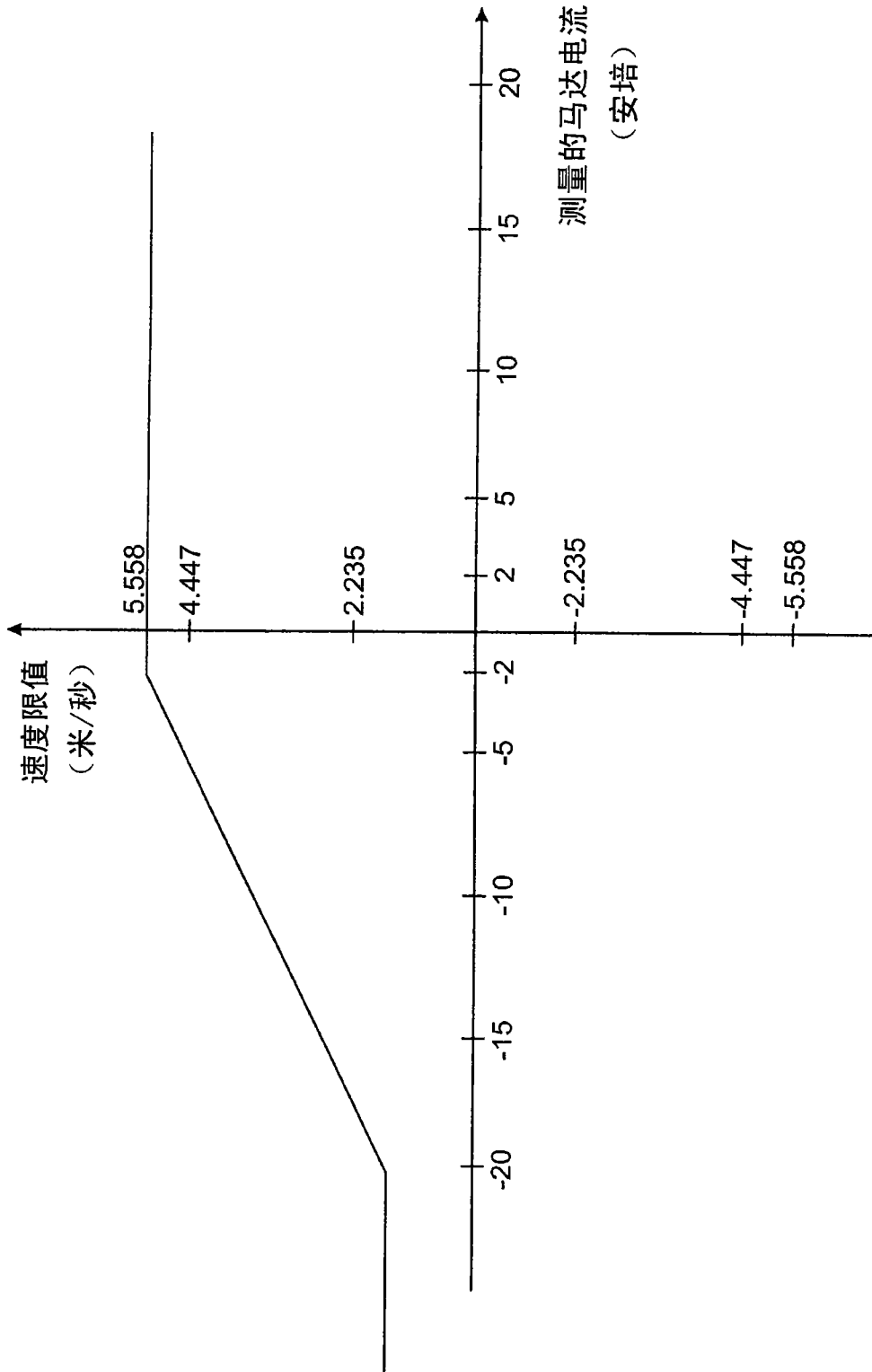


图 23

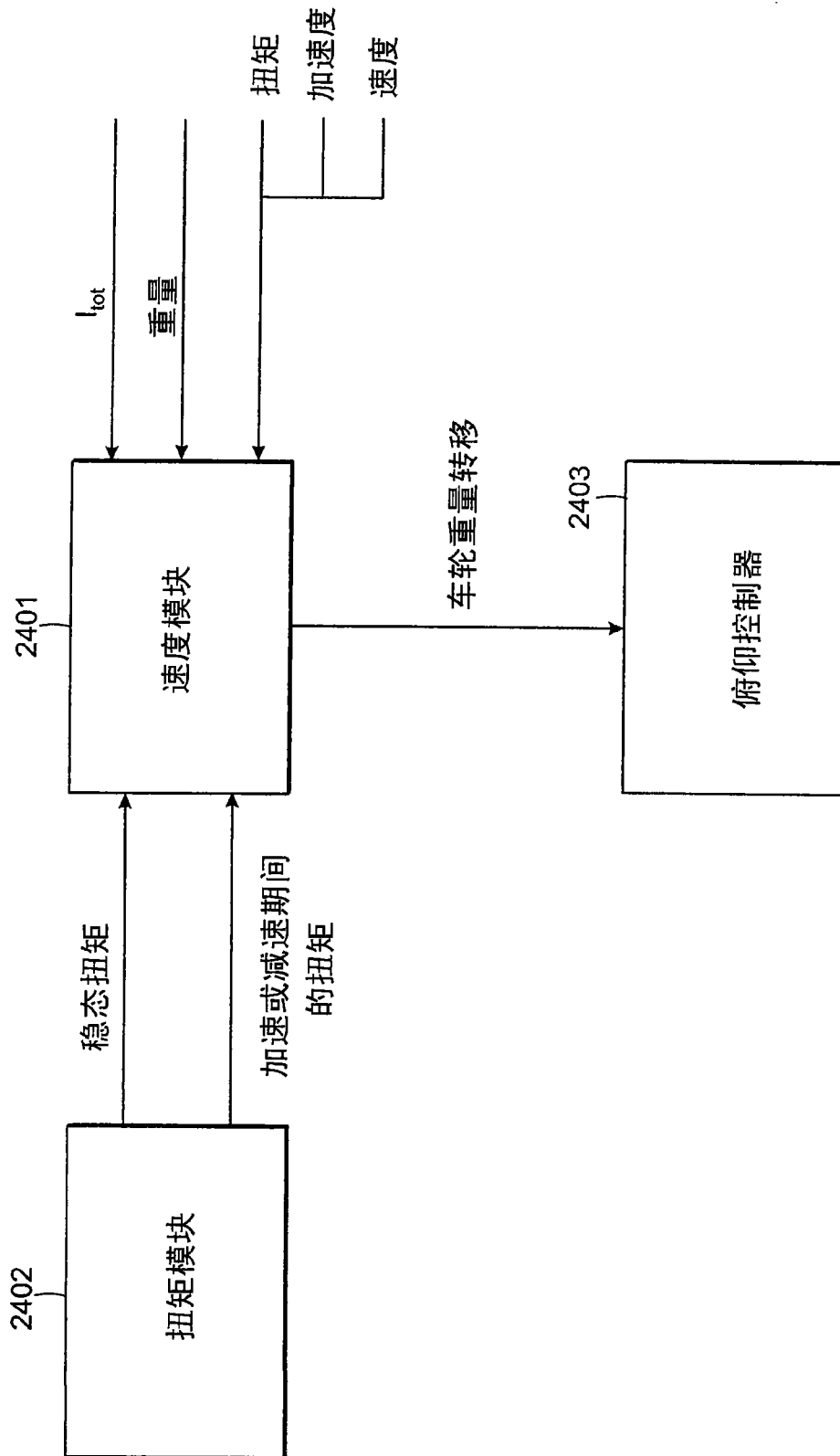


图 24

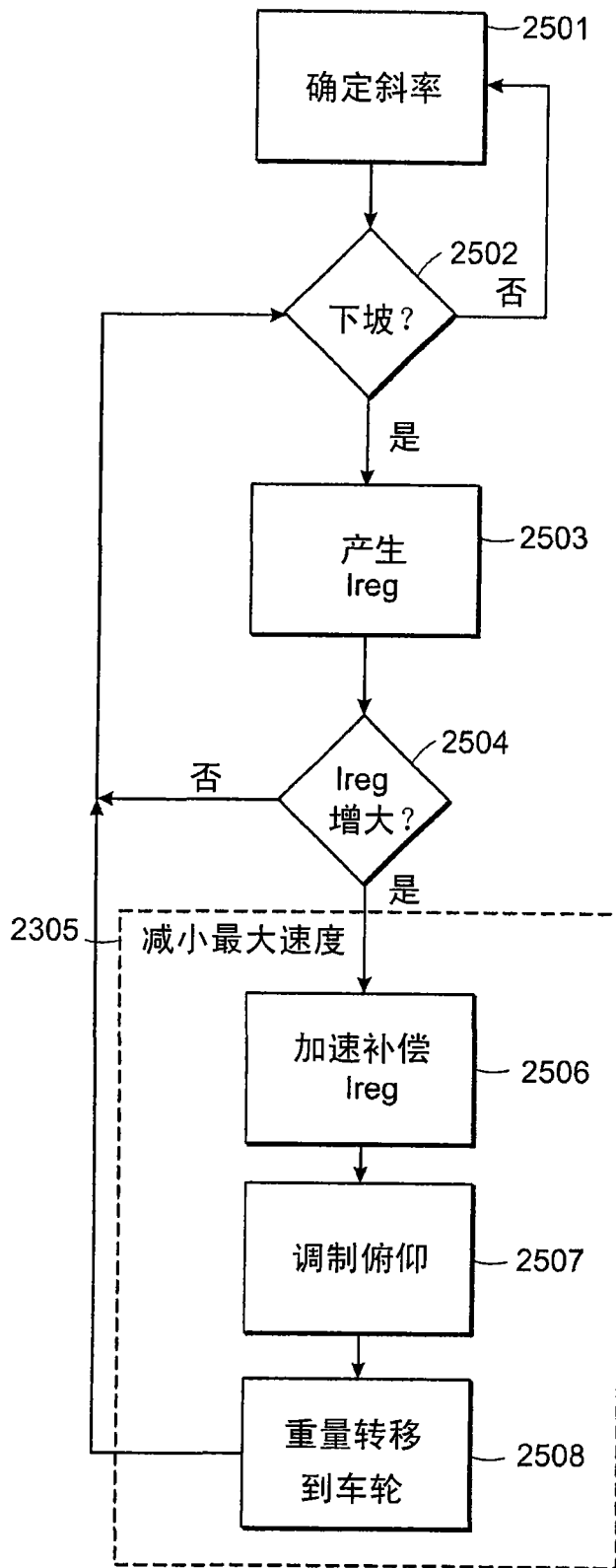


图 25