



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110937015 B

(45) 授权公告日 2023.06.23

(21) 申请号 201910886501.7
 (22) 申请日 2019.09.19
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 110937015 A
 (43) 申请公布日 2020.03.31
 (30) 优先权数据
 2018-177930 2018.09.21 JP
 (73) 专利权人 株式会社捷太格特
 地址 日本爱知县
 (72) 发明人 小路直纪
 (74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227
 专利代理师 杜诚 刘敏

(51) Int.Cl.
 B62D 5/04 (2006.01)
 B62D 6/00 (2006.01)
 B62D 113/00 (2006.01)
 审查员 史朝军

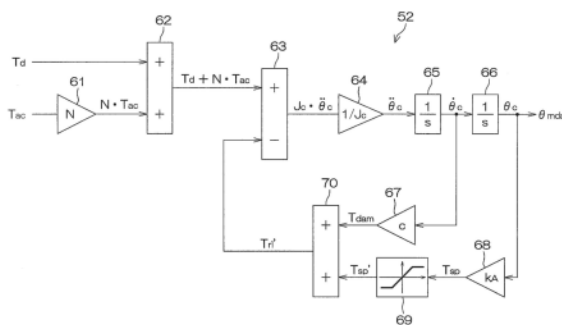
权利要求书1页 说明书9页 附图12页

(54) 发明名称

电机控制装置和电机控制方法

(57) 摘要

公开了电机控制装置和电机控制方法。一种用于控制电动机(18)的驱动的电机控制装置,该电动机控制转向装置的转向角,该电机装置包括:扭矩传感器(12)和电子控制单元(202)。扭矩传感器被配置成检测作用于转向构件(2)的转向扭矩。电子控制单元被配置成:通过使用作为转向装置的参考模型的运动方程,基于转向扭矩生成转向角命令值(手动转向命令值);控制电动机(18)的驱动,使得实际转向角遵循转向角命令值;以及限制作为运动方程的反作用力分量的虚拟反作用力。



1. 一种用于控制电动机(18)的驱动的电机控制装置,所述电动机(18)控制转向装置的转向角,所述电机控制装置的特征在于包括:

扭矩传感器(12),其被配置成检测作用于转向构件(2)的转向扭矩,以及

电子控制单元(202),其被配置成:

通过使用作为所述转向装置的参考模型的运动方程,基于所述转向扭矩生成转向角命令值;

控制所述电动机(18)的驱动,使得实际转向角遵循所述转向角命令值;

限制虚拟反作用力,所述虚拟反作用力是所述运动方程的反作用力分量;以及

限制所述运动方程中的所述虚拟反作用力,使得所述虚拟反作用力的绝对值变得小于驱动扭矩的绝对值的最大可能值,其中所述驱动扭矩是由所述转向扭矩产生的驱动分量。

2. 根据权利要求1所述的电机控制装置,其特征在于:

所述虚拟反作用力包括虚拟弹簧反作用力;以及

所述电子控制单元(202)被配置成将所述虚拟弹簧反作用力的绝对值限制为等于或小于第一预定值的值。

3. 根据权利要求1所述的电机控制装置,其特征在于:

所述虚拟反作用力是虚拟弹簧反作用力和虚拟阻尼器反作用力的总和;以及

所述电子控制单元(202)被配置成将所述虚拟弹簧反作用力和所述虚拟阻尼器反作用力的总和的绝对值限制为等于或小于第二预定值的值。

4. 根据权利要求1所述的电机控制装置,其特征在于:

所述虚拟反作用力包括虚拟弹簧反作用力,所述虚拟弹簧反作用力被计算为弹簧常数和所述转向角命令值的乘积;

所述电子控制单元(202)被配置成当所述转向角命令值的绝对值等于或小于第三预定值时将所述弹簧常数设置为第四预定值;以及

所述电子控制单元(202)被配置成当所述转向角命令值的绝对值大于所述第三预定值时将所述弹簧常数减小到小于所述第四预定值的值。

5. 一种控制电动机(18)的驱动的电机控制方法,所述电动机(18)控制转向装置的转向角,所述电机控制方法的特征在于包括:

由扭矩传感器(12)检测作用于转向构件(2)的转向扭矩;

由电子控制单元(202)通过使用作为所述转向装置的参考模型的运动方程基于转向扭矩来生成转向角命令值;

由所述电子控制单元(202)控制所述电动机(18)的驱动,使得实际转向角遵循所述转向角命令值;

由所述电子控制单元(202)限制虚拟反作用力,所述虚拟反作用力是所述运动方程的反作用力分量;以及

由所述电子控制单元(202)限制所述运动方程中的所述虚拟反作用力,使得所述虚拟反作用力的绝对值变得小于驱动扭矩的绝对值的最大可能值,其中所述驱动扭矩是由所述转向扭矩产生的驱动分量。

电机控制装置和电机控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及用于控制转向角的电动机的电机控制装置和电机控制方法。

背景技术

[0002] 日本专利申请公布第2006-175940号公开了一种控制器(电机控制装置)。该控制器包括下游侧参考模型,该下游侧参考模型基于由扭矩传感器检测的操作扭矩(转向扭矩)确定目标轮转向角。因此,该控制器控制电动机的驱动,使得实际轮转向角遵循目标轮转向角。

发明内容

[0003] 扭矩传感器能够检测的转向扭矩的范围受到限制。因此,在日本专利申请公布第2006-175940号描述的发明中,例如,即使驾驶员应用于方向盘的转向扭矩变为大于扭矩传感器的检测上限的值,检测到的扭矩也不会从检测上限改变,使得目标轮转向角固定为与转向扭矩的检测上限相对应的值。因此,驾驶员不能通过比对应于检测上限的目标轮转向角大的转向角来执行转向操作。类似地,当驾驶员施加到方向盘的转向扭矩达到驾驶员可以施加的最大值时,不能计算对应于该最大值的、比目标轮转向角大的值。因此,驾驶员不能执行任何进一步的转向操作。

[0004] 本发明提供电机控制装置和电机控制方法,其可以抑制转向角命令值的范围受到以下因素的限制:扭矩传感器的可检测范围,或者驾驶员可以施加到转向构件的转向扭矩的最大值。

[0005] 本发明的第一方面提供一种用于控制电动机的驱动的电机控制装置,该电动机控制转向装置的转向角。电机控制装置包括扭矩传感器和电子控制单元。扭矩传感器被配置成检测作用于转向构件的转向扭矩。电子控制单元被配置成:通过使用作为转向装置的参考模型的运动方程,基于转向扭矩生成转向角命令值;控制电动机的驱动,使得实际转向角遵循转向角命令值;以及限制虚拟反作用力,该虚拟反作用力是运动方程的反作用力分量。

[0006] 在这种配置中,用于生成转向角命令值的虚拟反作用力受到限制,以防止运动方程处于稳定状态。因此,可以抑制转向角命令值的范围受到以下因素限制:扭矩传感器的可检测范围,或驾驶员能够施加到转向构件的转向扭矩的最大值。

[0007] 在本发明的第一方面中,电子控制单元可以被配置成限制运动方程中的虚拟反作用力,使得虚拟反作用力的绝对值变得小于驱动扭矩的绝对值的最大可能值,其中该驱动扭矩是由转向扭矩产生的驱动分量。

[0008] 在本发明的第一方面中,虚拟反作用力可以包括虚拟弹簧反作用力,并且电子控制单元可以被配置成将虚拟弹簧反作用力的绝对值限制为等于或小于第一预定值的值。

[0009] 在本发明的第一方面中,虚拟反作用力可以是虚拟弹簧反作用力和虚拟阻尼器反作用力的总和,并且电子控制单元可以被配置成将虚拟弹簧反作用力和虚拟阻尼器反作用力的总和的绝对值限制为等于或小于第二预定值的值。

[0010] 在本发明的第一方面中,虚拟反作用力可以包括虚拟弹簧反作用力,该虚拟弹簧反作用力被计算为弹簧常数和转向角命令值的乘积,电子控制单元可以被配置成当转向角命令值的绝对值等于或小于第三预定值时将弹簧常数设置为第四预定值,并且电子控制单元可以被配置成当转向角命令值的绝对值大于第三预定值时将弹簧常数减小到小于第四预定值的值。

[0011] 本发明的第二方面是一种控制电动机的驱动的电机控制方法,该电动机控制转向装置的转向角。该电机控制方法包括:由扭矩传感器检测作用于转向构件的转向扭矩;由电子控制单元通过使用作为转向装置的参考模型的运动方程基于转向扭矩来生成转向角命令值;由电子控制单元控制电动机,使得实际转向角遵循转向角命令值;以及由电子控制单元限制虚拟反作用力,该虚拟反作用力是运动方程的反作用力分量。

附图说明

[0012] 下面将参照附图描述本发明的示例性实施方式的特征、优点以及技术和工业意义,在附图中,相似的附图标记表示相似的元件,并且在附图中:

[0013] 图1是示出应用了根据本发明实施方式的电机控制装置的电动转向系统的示意性配置的示意图;

[0014] 图2是示出电机控制电子控制单元(ECU)的电气配置的框图;

[0015] 图3是示出手动转向命令值生成单元的配置的框图;

[0016] 图4是示出针对转向扭矩 T_d 设置辅助扭矩命令值 T_{ac} 的示例的曲线图;

[0017] 图5是示出在命令值设置单元中使用的参考电动转向(EPS)模型的示例的示意图;

[0018] 图6是示出命令值设置单元的配置的框图;

[0019] 图7是示出虚拟弹簧反作用力限制单元的输入输出特性的曲线图;

[0020] 图8是示出角度控制单元的配置的框图;

[0021] 图9是示出扭矩控制单元的配置的示意视图;

[0022] 图10是示出命令值设置单元的第一修改例的框图;

[0023] 图11是示出针对下柱旋转角 θ_c 设置弹簧常数 k 的示例的曲线图;

[0024] 图12是示出第二积分单元计算的下柱旋转角 θ_c 与虚拟弹簧反作用力计算单元计算的受限虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' 之间的关系的曲线图;

[0025] 图13是示出命令值设置单元的第二修改例的框图;以及

[0026] 图14是示出虚拟反作用力限制单元的输入输出特性的曲线图。

具体实施方式

[0027] 图1是示出应用了根据本发明实施方式的电机控制装置的电动转向系统的示意性配置的示意图。电动转向系统1包括作为使车辆转向的转向构件的方向盘2,根据方向盘2的转动使转向轮3转向的转向操作机构4,以及辅助驾驶员的转向操作的转向辅助机构5。方向盘2和转向操作机构4经由转向轴6和中间轴7机械地耦接。

[0028] 转向轴6包括耦接至方向盘2的输入轴8和耦接至中间轴7的输出轴9。输入轴8和输出轴9经由扭杆10耦接以便能够相对于彼此旋转。扭矩传感器12设置在扭杆10附近。扭矩传感器12基于输入轴8与输出轴9之间的相对旋转位移来检测施加到方向盘2的转向扭矩(扭

杆扭矩) T_d 。例如,在本实施方式中,由扭矩传感器12检测的转向扭矩 T_d (以下也称为“检测扭矩”)在作为向左转向的扭矩时取正值,并且在作为向右转向的扭矩时取负值。转向扭矩 T_d 的绝对值越大,转向扭矩 T_d 的量级越大。

[0029] 转向操作机构4由齿条齿轮机构形成,该齿条齿轮机构包括小齿轮轴13和齿条轴14作为转向轴。转向轮3经由拉杆(tie rod)15和转向节臂(knuckle arm)(未示出)耦接至齿条轴14的端部。小齿轮轴13耦接至中间轴7。小齿轮轴13根据方向盘2的转向操作而旋转。小齿轮16耦接至小齿轮轴13的末端。

[0030] 齿条轴14在车辆的横向方向上笔直地延伸。齿条轴14在轴向方向上在中间部分具有齿条17。齿条17与小齿轮16啮合。小齿轮16和齿条17将小齿轮轴13的旋转转换成齿条轴14的轴向运动。当齿条轴14沿轴向移动时,转向轮3可以转向。

[0031] 当方向盘2转向(转动)时,方向盘2的这种转动经由转向轴6和中间轴7传递至小齿轮轴13。小齿轮轴13的旋转通过齿轮16和齿条17转换成齿条轴14的轴向运动。因此,转向轮3被转向。转向辅助机构5包括电动机18和减速齿轮19。电动机18生成转向辅助力(辅助扭矩),并且减速齿轮19将电动机18的输出扭矩放大,以将放大的输出扭矩传递至转向操作机构4。减速齿轮19由蜗轮机构形成,该蜗轮机构包括蜗杆(worm gear)20和与蜗杆20啮合的蜗轮(worm wheel)21。

[0032] 减速齿轮19容纳在作为传动机构壳体的齿轮壳体22中。减速齿轮19的减速比(齿轮比)在下文中有时用N表示。减速比N被定义为蜗杆20的角速度 ω_{wg} 与蜗轮21的角速度 ω_{ww} 的比率 ω_{wg}/ω_{ww} 。蜗杆20由电动机18旋转地驱动。蜗轮21耦接至输出轴9,以便能够与其一起旋转。

[0033] 当蜗杆20被电动机18旋转地驱动时,蜗轮21被旋转地驱动,从而使电机扭矩被施加到转向轴6,并且转向轴6(输出轴9)相应地旋转。转向轴6的旋转经由中间轴7传递至小齿轮轴13。小齿轮轴13的旋转被转换为齿条轴14的轴向运动。因此,转向轮3被转向。

[0034] 也就是说,可以通过电动机18辅助转向操作,并且可以通过由电动机18旋转地驱动蜗杆20来使转向轮3转向。电动机18设置有用于检测电动机18的转子的旋转角的旋转角传感器23。施加到输出轴9的扭矩包括来自电动机18的电机扭矩和除电机扭矩之外的干扰扭矩。除电机扭矩之外的干扰扭矩 T_{ic} 包括转向扭矩 T_d 、路面负载扭矩(路面反作用力扭矩) T_{r1} 、摩擦扭矩 T_f 等。

[0035] 转向扭矩 T_d 是通过驾驶员施加到方向盘2的力、由转向惯性生成的力等从方向盘2侧施加到输出轴9的扭矩。路面负载扭矩 T_{r1} 是通过在轮胎上生成的自对准扭矩、由悬架和车轮对准生成的力、齿轮齿条机构的摩擦力等从转向轮3侧经由齿条轴14施加到输出轴9的扭矩。

[0036] 摩擦扭矩 T_f 是施加到输出轴9的摩擦扭矩中的、不包括在转向扭矩 T_d 和路面负载扭矩 T_{r1} 中的摩擦扭矩。摩擦扭矩 T_f 主要包括由减速齿轮19生成的摩擦扭矩(在蜗轮21与蜗杆20之间生成的摩擦扭矩)。车辆配备有电荷耦合器件(CCD)摄像机25、全球定位系统(GPS)26、雷达27和地图信息存储器28。CCD摄像机25捕获车辆行驶方向的前方道路的图像。GPS 26检测车辆的位置。雷达27检测道路轮廓和障碍物。地图信息存储器28中存储有地图信息。

[0037] CCD摄像机25、GPS 26、雷达27和地图信息存储器28被连接至上电子控制单元(ECU)201,用于执行驾驶员辅助控制和自动驾驶控制。上位ECU(upper ECU)201基于地图信

息和CCD摄像机25、GPS 26和雷达27获得的信息来感知周围环境、估计车辆的位置、计划路线等,并且确定驱动致动器和转向操作的控制目标值。

[0038] 在本实施方式中,上位ECU 201设置用于自动转向的自动转向命令值 θ_{adac} 。在本实施方式中,自动转向控制是例如用于使车辆沿目标路径移动的控制。自动转向命令值 θ_{adac} 是用于使车辆沿目标路径自主地移动的转向角的目标值。由于设置这样的自动转向命令值 θ_{adac} 的处理在本领域中是公知的,因此将省略其详细描述。

[0039] 由上位ECU 201设置的自动转向命令值 θ_{adac} 经由车载网络输入至电机控制ECU 202。由扭矩传感器12检测的转向扭矩 T_d 和旋转角传感器23的输出信号被输入至电机控制ECU 202。电机控制ECU 202基于这些输入信号和从上位ECU 201接收的信息来控制电动机18。

[0040] 图2是示出电机控制ECU 202的电气配置的框图。电机控制ECU 202包括微计算机40、驱动电路(逆变器电路)31和电流检测电路32。驱动电路(逆变器电路)31由微计算机40控制以向电动机18供应电力。电流检测电路32检测在电动机18中流动的电流(以下称为“电机电流I”)。

[0041] 微计算机40包括中央处理单元(CPU)和存储器(只读存储器(ROM)、随机存取存储器(RAM)、非易失性存储器等),并且通过执行预定程序而用作多个功能处理单元。该多个功能处理单元包括手动转向命令值生成单元41、整合角度命令值计算单元42和控制单元43。设置手动转向命令值生成单元41,以便在驾驶员操作方向盘2时将根据方向盘操作的转向角(更准确地说,输出轴9的旋转角 θ)设置为手动转向命令值 θ_{mdac} 。手动转向命令值生成单元41通过使用由扭矩传感器12检测的转向扭矩 T_d 来生成手动转向命令值 θ_{mdac} 。手动转向命令值 θ_{mdac} 是本发明的转向角命令值的示例。

[0042] 整合角度命令值计算单元42将手动转向命令值 θ_{mdac} 与上位ECU 201所设置的自动转向命令值 θ_{adac} 相加,以计算整合角度命令值 θ_{acmd} 。控制单元43基于整合角度命令值 θ_{acmd} 控制电动机18的角度。更具体地,控制单元43控制驱动电路31的驱动,使得转向角 θ (输出轴9的旋转角 θ)变得更接近整合角度命令值 θ_{acmd} 。

[0043] 控制单元43包括角度控制单元44和扭矩控制单元(电流控制单元)45。角度控制单元44基于整合角度命令值 θ_{acmd} 计算电机扭矩命令值 T_m ,电机扭矩命令值 T_m 是电动机18的电机扭矩的目标值。扭矩控制单元45驱动该驱动电路31,使得电动机18的电机扭矩变得更接近电机扭矩命令值 T_m 。图3是示出手动转向命令值生成单元41的配置的框图。

[0044] 手动转向命令值生成单元41包括辅助扭矩命令值设置单元51和命令值设置单元52。辅助扭矩命令值设置单元51设置辅助扭矩命令值 T_{ac} ,该辅助扭矩命令值 T_{ac} 是手动操作所需的辅助扭矩的目标值。辅助扭矩命令值设置单元51基于由扭矩传感器12检测的转向扭矩 T_d 来设置辅助扭矩命令值 T_{ac} 。在本实施方式中,辅助扭矩命令值 T_{ac} 是用于电动机18的旋转轴的扭矩命令值。图4中示出了针对转向扭矩 T_d 设置辅助扭矩命令值 T_{ac} 的示例。

[0045] 当电动机18应该生成用于向左转向的转向辅助力时辅助扭矩命令值 T_{ac} 取正值,而当电动机18应该生成用于向右转向的转向辅助力时辅助扭矩命令值 T_{ac} 取负值。辅助扭矩命令值 T_{ac} 对于正转向扭矩 T_d 取正值,对于负转向扭矩 T_d 取负值。辅助扭矩命令值 T_{ac} 被设置为使得转向扭矩 T_d 的绝对值越大,辅助扭矩命令值 T_{ac} 的绝对值越大。

[0046] 辅助扭矩命令值设置单元51可以通过将转向扭矩 T_d 乘以预设常数来计算辅助扭

矩命令值 T_{ac} 。返回参照图3,命令值设置单元52基于转向扭矩 T_d 和辅助扭矩命令值 T_{ac} 设置手动转向命令值 θ_{mdac} 。命令值设置单元52基本上通过使用图5中的参考电动转向(EPS)模型来设置手动转向命令值 θ_{mdac} 。

[0047] 该参考EPS模型是包括下柱(lower column)的单个惯性模型。下柱对应于输出轴9和蜗轮21。在图5中, J_c 表示下柱的惯性、 θ_c 表示下柱的旋转角、 T_d 表示由扭矩传感器12检测的转向扭矩。转向扭矩 T_d 、从电动机18施加到输出轴9的扭矩 $N \cdot T_m$ 和路面负载扭矩 T_{r1} 被施加到下柱。在下面的描述中,转向扭矩 T_d 和从电动机18施加到输出轴9的扭矩 $N \cdot T_m$ 的总和有时被称为“驱动扭矩”,作为由转向扭矩 T_d 产生的驱动分量,并且路面负载扭矩 T_{r1} 有时被称为“虚拟反作用力”,作为反作用力分量。

[0048] 使用弹簧常数 k 和粘性阻尼系数 c ,路面负载扭矩 T_{r1} 由下面的表达式(1)给出。

$$T_{r1} = k \cdot \theta_c + c \cdot (d\theta_c/dt) \cdots (1)$$

[0050] 在以下描述中, $k \cdot \theta_c$ 有时被称为虚拟弹簧反作用力(虚拟弹簧载荷) T_{sp} ,并且 $c \cdot (d\theta_c/dt)$ 有时被称为虚拟阻尼器反作用力(虚拟阻尼器载荷) T_{dam} 。

[0051] 在本实施方式中,弹簧常数 k 和粘性阻尼系数 c 被设置为通过实验、分析等而预先获得的预定值。

[0052] 该参考EPS模型的运动方程由下面的表达式(2)给出。

$$J_c \cdot d^2\theta_c/dt^2 = T_d + N \cdot T_m - T_{r1} \cdots (2)$$

[0054] 因此,可以通过将扭矩传感器12检测到的转向扭矩 T_d 代入 T_d 、并将辅助扭矩命令值设置单元51所设置的辅助扭矩命令值 T_{ac} 代入 T_m ,通过求解由表达式(2)给出的微分方程,来计算下柱的旋转角 θ_c 。这种方法在本文中称为“比较方法”。通过比较方法获得的下柱的旋转角 θ_c 可以被设置为手动转向命令值 θ_{mdac} 。

[0055] 但是,比较方法可能会导致以下现象。能够由扭矩传感器12检测的转向扭矩 T_d 的范围受到限制。驾驶员能够施加到方向盘2的转向扭矩 T_d 也受到限制。如果驾驶员施加到方向盘2的转向扭矩 T_d 变为大于扭矩传感器12的检测上限的值,则扭矩传感器12的检测值不会从检测上限改变。此时,图5中的参考EPS模型处于驱动扭矩和虚拟反作用力平衡的稳定状态。因此,手动转向命令值 θ_{mdac} 被固定为与驱动扭矩相对应的值(检测上限和对应于检测上限的辅助扭矩 $N \cdot T_{ac}$ 的总和),并且不能计算大于该值的手动转向命令值 θ_{mdac} 。类似地,如果驾驶员施加到方向盘2的力达到驾驶员可以施加的转向扭矩 T_d 的最大值(下文中也称为“转向扭矩最大值”),则不能计算比对应于驱动扭矩(转向扭矩最大值和对应于转向扭矩最大值的辅助扭矩 $N \cdot T_{ac}$ 的总和)的手动转向命令值 θ_{mdac} 大的手动转向命令值 θ_{mdac} 。

[0056] 即,在比较方法中,手动转向命令值 θ_{mdac} 的范围基本上受到扭矩传感器12的可检测范围或转向扭矩最大值限制。因此,方向盘2不能以大于受限范围的量而转向。发明人认为,为了使手动转向命令值 θ_{mdac} 的范围不受扭矩传感器12的可检测范围或转向扭矩最大值限制,路面负载扭矩 T_{r1} (虚拟反作用力)的绝对值应当小于表达式(2)给出的驱动扭矩的绝对值的最大可能值(在本实施方式中,扭矩传感器12的检测上限和对应于检测上限的辅助扭矩 $N \cdot T_{ac}$ 的总和的绝对值)。在本实施方式中,虚拟反作用力受到限制,以便使虚拟反作用力(绝对值)小于驱动扭矩的最大值(绝对值)。具体地,在本实施方式中,虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 的绝对值被限制为等于或小于限制值的值。

[0057] 图6是示出命令值设置单元52的配置的框图。命令值设置单元52在每个预定计算

时段中计算手动转向命令值 θ_{mdac} 。命令值设置单元52包括减速比乘法单元61、第一加法单元62、减法单元63、惯性除法单元64、第一积分单元65、第二积分单元66、虚拟阻尼器反作用力计算单元67、虚拟弹簧反作用力计算单元68、虚拟弹簧反作用力限制单元69和第二加法单元70。为了便于说明,预设弹簧常数由 k_A 表示。

[0058] 减速比乘法单元61通过将辅助扭矩命令值设置单元51所设置的辅助扭矩命令值 T_{ac} 乘以减速齿轮19的减速比 N ,来将电动机18的旋转轴的辅助扭矩命令值 T_{ac} 转换为输出轴9的辅助扭矩命令值 $N \cdot T_{ac}$ 。第一加法单元62通过将扭矩传感器12检测到的转向扭矩 T_d 与输出轴9的辅助扭矩命令值 $N \cdot T_{ac}$ 相加,来计算等同于表达式(2)右侧中的“ $T_d + N \cdot T_m$ ”的驱动扭矩($T_d + N \cdot T_{ac}$)。

[0059] 减法单元63通过从驱动扭矩($T_d + N \cdot T_{ac}$)减去下面描述的受限虚拟反作用力 T_{r1}' 来计算等同于表达式(2)左侧的“ $J_c \cdot d^2\theta_c/dt^2$ ”的惯性矩。惯性除法单元64通过将由减法单元63计算的惯性矩 $J_c \cdot d^2\theta_c/dt^2$ 除以下柱的惯性 J_c 来计算下柱旋转角 θ_c 的二阶导数 $d^2\theta_c/dt^2$ 。

[0060] 第一积分单元65通过对下柱旋转角 θ_c 的二阶导数 $d^2\theta_c/dt^2$ 进行积分来计算下柱旋转角 θ_c 的一阶导数 $d\theta_c/dt$ 。第二积分单元66通过对下柱旋转角 θ_c 的一阶导数 $d\theta_c/dt$ 进行积分来计算下柱旋转角 θ_c 。该下柱旋转角 θ_c 作为手动转向命令值 θ_{mdac} 输出。

[0061] 虚拟阻尼器反作用力计算单元67通过将第一积分单元65计算的下柱旋转角 θ_c 的一阶导数 $d\theta_c/dt$ 乘以预设的粘性阻尼系数 c 来计算虚拟阻尼器反作用力 $T_{dam} (=c \cdot d\theta_c/dt)$ 。虚拟弹簧反作用力计算单元68通过将第二积分单元66计算的下柱旋转角 θ_c (手动转向命令值 θ_{mdac})乘以预设的弹簧常数 k_A 来计算虚拟弹簧反作用力 $T_{sp} (=k_A \cdot \theta_c)$ 。

[0062] 虚拟弹簧反作用力限制单元69将虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 的绝对值限制为等于或小于预定限制值 A ($A > 0$)的值。在图7中示出虚拟弹簧反作用力限制单元69的输入和输出特性。当接收的虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 在 $-A \leq T_{sp} \leq A$ 的范围内时,虚拟弹簧反作用力限制单元69按原样输出所接收的虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 。当接收的虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 大于 A 时,虚拟弹簧反作用力限制单元69输出限制值 A 。当接收的虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 小于 $-A$ 时,虚拟弹簧反作用力限制单元69输出 $-A$ 。

[0063] 第二加法单元70通过将虚拟弹簧反作用力限制单元69的限制处理产生的虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' 与虚拟阻尼器反作用力 T_{dam} 相加来计算受限的虚拟反作用力 $T_{r1}' (=T_{dam} + T_{sp}')$ 。该受限虚拟反作用力 $T_{r1}' (=T_{dam} + T_{sp}')$ 被输入至减法单元63。限制值 A 被设置为通过实验、分析等预先获得的预定值,使得受限虚拟反作用力 T_{r1}' 的绝对值变得小于驱动扭矩的绝对值的最大可能值。

[0064] 图8是示出角度控制单元44的配置的框图。角度控制单元44基于整合角度命令值 θ_{acmd} 计算电机扭矩命令值 T_m 。角度控制单元44包括低通滤波器(LPF)81、反馈控制单元82、前馈控制单元83、扭矩加法单元84、第一减速比除法单元85、旋转角计算单元86和第二减速比除法单元87。

[0065] 旋转角计算单元86基于旋转角传感器23的输出信号来计算电动机18的转子旋转角 θ_m 。第二减速比除法单元87通过将旋转角计算单元86计算的转子旋转角 θ_m 除以减速比 N ,来将转子旋转角 θ_m 转换为输出轴9的旋转角(实际转向角) θ 。低通滤波器81执行对整合角度命令值 θ_{acmd} 的低通滤波。由低通滤波产生的整合角度命令值 θ_{cmd} 被输入至反馈控制单元82和前馈控制单元83。

[0066] 设置反馈控制单元82,以便使第二减速比除法单元87计算的转向角 θ 更接近由低通滤波产生的整合角度命令值 θ_{cmd} 。反馈控制单元82包括角度偏差计算单元82A和比例微分(proportional-derivative,PD)控制单元82B。角度偏差计算单元82A计算整合角度命令值 θ_{cmd} 与实际转向角 θ 之间的偏差 $\Delta\theta(=\theta_{\text{cmd}}-\theta)$ 。

[0067] PD控制单元82B通过对角度偏差计算单元82A计算的角度偏差 $\Delta\theta$ 执行比例-微分计算(PD计算)来计算反馈控制扭矩 T_{fb} 。反馈控制扭矩 T_{fb} 被输入至扭矩加法单元84。设置前馈控制单元83以便补偿由于电动转向系统1的惯性而引起的响应的延迟,以改善控制响应。前馈控制单元83包括角加速度计算单元83A和惯性乘法单元83B。角加速度计算单元83A通过计算整合角度命令值 θ_{cmd} 的二阶导数来计算目标角加速度 $d^2\theta_{\text{cmd}}/dt^2$ 。

[0068] 惯性乘法单元83B通过将角加速度计算单元83A计算的目标角加速度 $d^2\theta_{\text{cmd}}/dt^2$ 乘以电动转向系统1的惯性 J 来计算前馈控制扭矩 $T_{\text{ff}}(=J \cdot d^2\theta_{\text{cmd}}/dt^2)$ 。例如,从电动转向系统1的物理模型(未示出)获得惯性 J 。前馈控制扭矩 T_{ff} 作为惯性补偿值输入至扭矩加法单元84。

[0069] 扭矩加法单元84通过将前馈控制扭矩 T_{ff} 与反馈控制扭矩 T_{fb} 相加来计算转向扭矩命令值 $T_{\text{cmd}}(=T_{\text{fb}}+T_{\text{ff}})$ 。转向扭矩命令值 T_{cmd} 是输出轴9的扭矩命令值。转向扭矩命令值 T_{cmd} 被输入至第一减速比除法单元85。第一减速比除法单元85通过将转向扭矩命令值 T_{cmd} 除以减速比 N 来计算电机扭矩命令值 T_{m} 。该电机扭矩命令值 T_{m} 被输入至扭矩控制单元45(参见图2)。

[0070] 图9是示出扭矩控制单元45的配置的示意图。扭矩控制单元45(参照图2)包括电机电流命令值计算单元91、电流偏差计算单元92、比例积分(PI)控制单元93和脉冲宽度调制(PWM)控制单元94。电机电流命令值计算单元91通过将角度控制单元44(参见图2和图8)计算的电机扭矩命令值 T_{m} 除以电动机18的扭矩常数 K_t 来计算电机电流命令值 I_{cmd} 。

[0071] 电流偏差计算单元92计算电机电流命令值计算单元91计算的电机电流命令值 I_{cmd} 与电流检测电路32检测的电机电流 I 之间的偏差 $\Delta I(=I_{\text{cmd}}-I)$ 。PI控制单元93通过对电流偏差计算单元92计算的电流偏差 ΔI 执行比例积分计算(PI计算),来生成用于使在电动机18中流动的电机电流 I 更接近电机电流命令值 I_{cmd} 的驱动命令值。PWM控制单元94生成与驱动命令值相对应的占空比的PWM控制信号,并将PWM控制信号提供给驱动电路31。因此,将与驱动命令值相对应的电力提供给电动机18。

[0072] 在上述实施方式中,手动转向命令值 θ_{mdac} 与自动转向命令值 θ_{adac} 相加以计算整合角度命令值 θ_{acmd} ,并且基于整合角度命令值 θ_{acmd} 控制电动机18。因此,可以实现协作控制,其使得能够在主要通过自动转向控制执行转向控制的同时执行手动转向,而无需在手动转向控制与自动转向控制之间切换转向控制。由于转向控制可以在手动转向控制与自动转向控制之间无缝转换,因此驾驶员在手动转向期间不会感到不适。

[0073] 在上述实施方式中,用于计算手动转向命令值 θ_{mdac} 的虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 的绝对值被限制为等于或小于预定限制值 A 的值,由此受限虚拟弹簧反作用力 T_{r1} 的绝对值被限制为比驱动扭矩的绝对值的最大可能值小的值(扭矩传感器12的检测上限和对应于该检测上限的辅助扭矩 $N \cdot T_{\text{ac}}$ 的总和的绝对值)。因此,即使比扭矩传感器12的检测上限大的转向扭矩 T_{d} 已经施加到方向盘2并且扭矩传感器12的检测值没有从检测上限改变,图5的参考EPS模型也不处于驱动扭矩和虚拟反作用力平衡的稳定状态。也就是说,由于手动转向命令值

θ_{mdac} 不被固定为与驱动扭矩相对应的值 (检测上限和对应于检测上限的辅助扭矩 $N \cdot T_{\text{ac}}$ 的总和), 因此驾驶员的转向操作不受限制。

[0074] 图10是示出命令值设置单元52的第一修改例的框图。在图10中, 与图6中的部分对应的部分用与图6中相同的附图标记来表示。在图10的命令值设置单元52中, 由图6中的虚拟弹簧反作用力计算单元68和虚拟弹簧反作用力限制单元69形成的配置被替代为由弹簧常数设置单元68A和虚拟弹簧反作用力计算单元69A形成的配置。虚拟弹簧反作用力计算单元69A计算受限虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' 。

[0075] 弹簧常数设置单元68A基于由第二积分单元66计算的下柱旋转角 θ_c (手动转向命令值 θ_{mdac}) 和预设的弹簧常数 k_A 来设置弹簧常数 k 。在图11中示出针对下柱旋转角 θ_c 设置弹簧常数 k 的示例。当下柱旋转角 θ_c 在 $-\theta_A \leq \theta_c \leq \theta_A$ 的范围内时, 弹簧常数 k 被设置为预设的预定值 k_A 。当下柱旋转角 θ_c 小于 $-\theta_A$ 或大于 θ_A 时, 弹簧常数 k 被设置成使得下柱旋转角 θ_c 的绝对值越大, 弹簧常数 k 的绝对值越小。更具体地, 当下柱旋转角 θ_c 小于 $-\theta_A$ 或大于 θ_A 时, 基于表达式 $k = k_A \cdot \theta_A / |\theta_c|$ 来计算弹簧常数 k 。

[0076] 虚拟弹簧反作用力计算单元69A通过将第二积分单元66计算的下柱旋转角 θ_c 乘以弹簧常数设置单元68A计算的弹簧常数 k 来计算受限虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' ($=k \cdot \theta_c$)。图12是示出第二积分单元66计算的下柱旋转角 θ_c 与虚拟弹簧反作用力计算单元69A计算的受限虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' 之间的关系的曲线图。

[0077] 当下柱旋转角 θ_c 在 $-\theta_A \leq \theta_c \leq \theta_A$ 的范围内时, 受限虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' 为 $k_A \cdot \theta_c$ 。即, 在这种情况下, 虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' ($=k_A \cdot \theta_c$) 不受限制。另一方面, 当下柱旋转角 θ_c 小于 $-\theta_A$ 或大于 θ_A 时, 受限虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' 的绝对值被固定为由 $k_A \cdot \theta_A$ 表示的预定值。即, 在这种情况下, 虚拟弹簧反作用力 T_{sp}' ($=k_A \cdot \theta_c$) 的绝对值被限制为等于或小于预定值的值。弹簧常数 k_A 和下柱旋转角 θ_A 被设置为通过实验、分析等预先获得的预定值, 使得受限虚拟反作用力 T_{r1}' 变得小于驱动扭矩的绝对值的最大可能值。因此, 第一修改例具有与上述实施方式类似的效果。

[0078] 图13是示出命令值设置单元52的第二修改例的框图。在图13中, 与图6中的部分对应的部分用与图6中相同的附图标记来表示。图13的命令值设置单元52不包括图6的虚拟弹簧反作用力限制单元69。相反, 图13的命令值设置单元52包括在第二加法单元70之后的级中的虚拟反作用力限制单元71。

[0079] 第二加法单元70通过将虚拟弹簧反作用力计算单元68计算的虚拟弹簧反作用力 T_{sp} 与虚拟阻尼器反作用力计算单元67计算的虚拟阻尼器反作用力 T_{dam} 相加来计算虚拟反作用力 T_{r1} ($=T_{\text{dam}} + T_{\text{sp}}$)。虚拟反作用力限制单元71将第二加法单元70计算的虚拟反作用力 T_{r1} 的绝对值限制为等于或小于预定限制值 B ($B > 0$) 的值。在图14中示出虚拟反作用力限制单元71的输入输出特性。当接收的虚拟反作用力 T_{r1} 在 $-B \leq T_{\text{r1}} \leq B$ 的范围内时, 虚拟反作用力限制单元71按原样输出所接收的虚拟反作用力 T_{r1} 。当接收的虚拟反作用力 T_{r1} 大于 B 时, 虚拟反作用力限制单元71输出限制值 B 。当接收的虚拟反作用力 T_{r1} 小于 $-B$ 时, 虚拟反作用力限制单元71输出 $-B$ 。限制值 B 被设置为通过实验、分析等预先获得的预定值。通过虚拟反作用力限制单元71的限制处理产生的虚拟反作用力 T_{r1}' 被输入至减法单元63。限制值 B 被设置为通过实验、分析等预先获得的预定值, 使得受限虚拟反作用力 T_{r1}' 变得小于驱动扭矩的绝对值的最大可能值。

[0080] 在第二修改例中,虚拟反作用力的绝对值被限制为等于或小于预定值的值。因此,第二修改例具有与上述实施方式类似的效果。尽管上面描述了本发明的一个实施方式,但是本发明可以以其他形式实现。例如,尽管在上述实施方式中角度控制单元44(参见图6)包括前馈控制单元83,但是可以省略前馈控制单元83。

[0081] 尽管在上述实施方式中手动转向命令值生成单元41包括辅助扭矩命令值设置单元51,但是可以省略辅助扭矩命令值设置单元51。在这种情况下,从参考EPS模型中省略了从电动机18施加到输出轴9的扭矩 $N \cdot T_m$,并且驱动扭矩仅包括由扭矩传感器12检测的转向扭矩 T_d 。

[0082] 尽管上述实施方式中描述了关于本发明被应用到柱型EPS的电机控制的示例,然而,本发明也适用于除柱型EPS之外的EPS的电机控制。本发明还适用于以下电动机的控制:该电动机用于控制线控转向系统(steer-by-wire system)的转向角。在不脱离权利要求的精神和范围的情况下,可以对本发明进行各种设计修改。

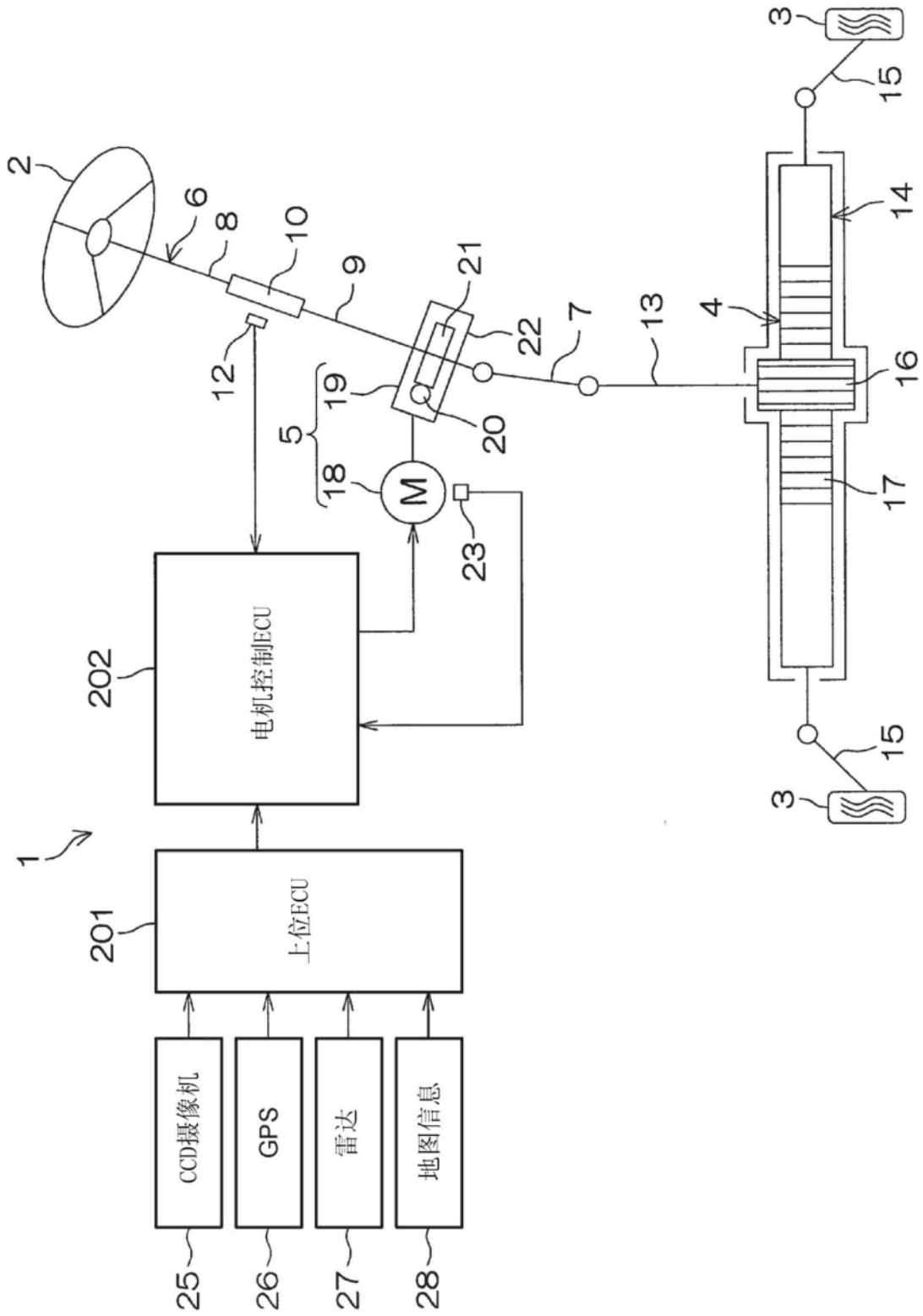


图1

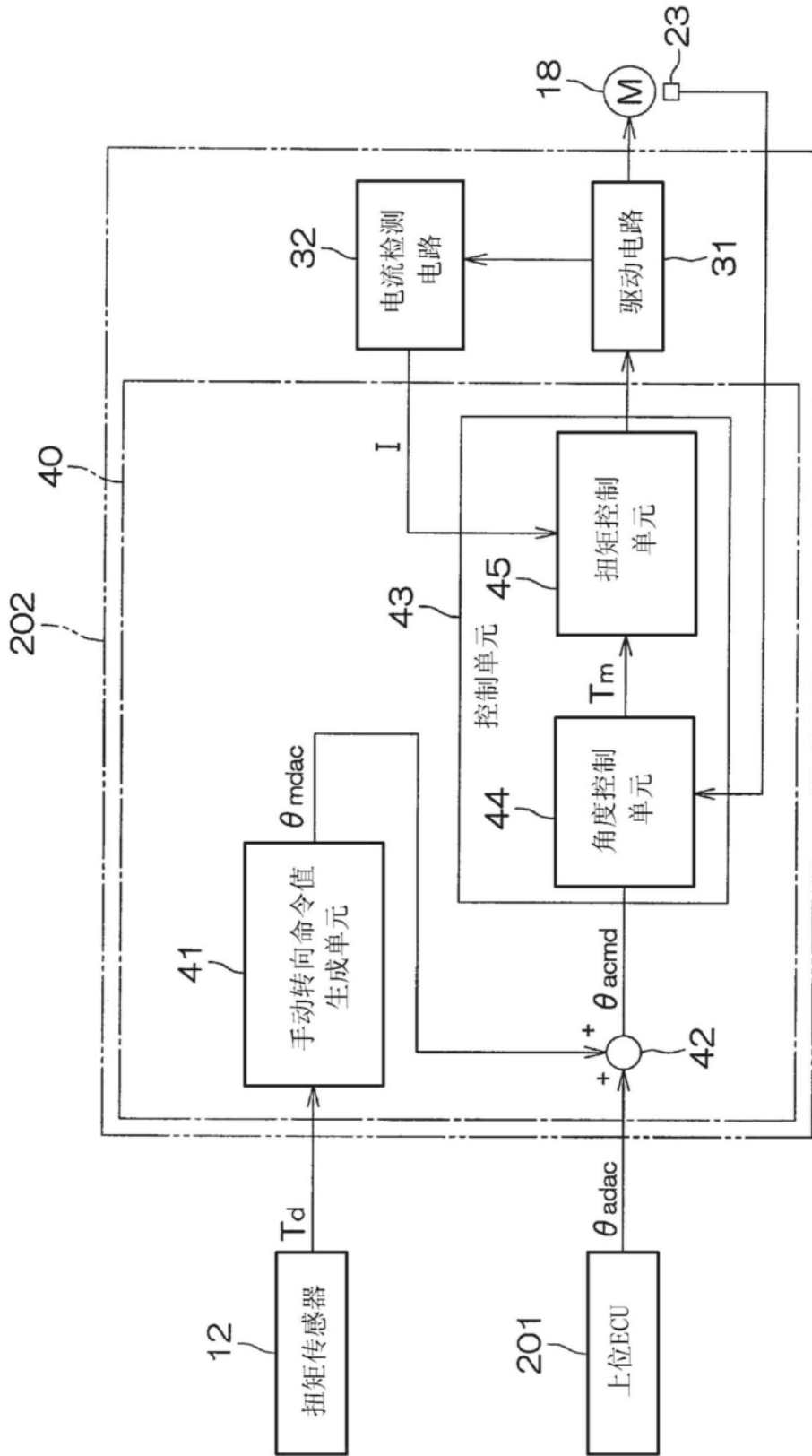


图2

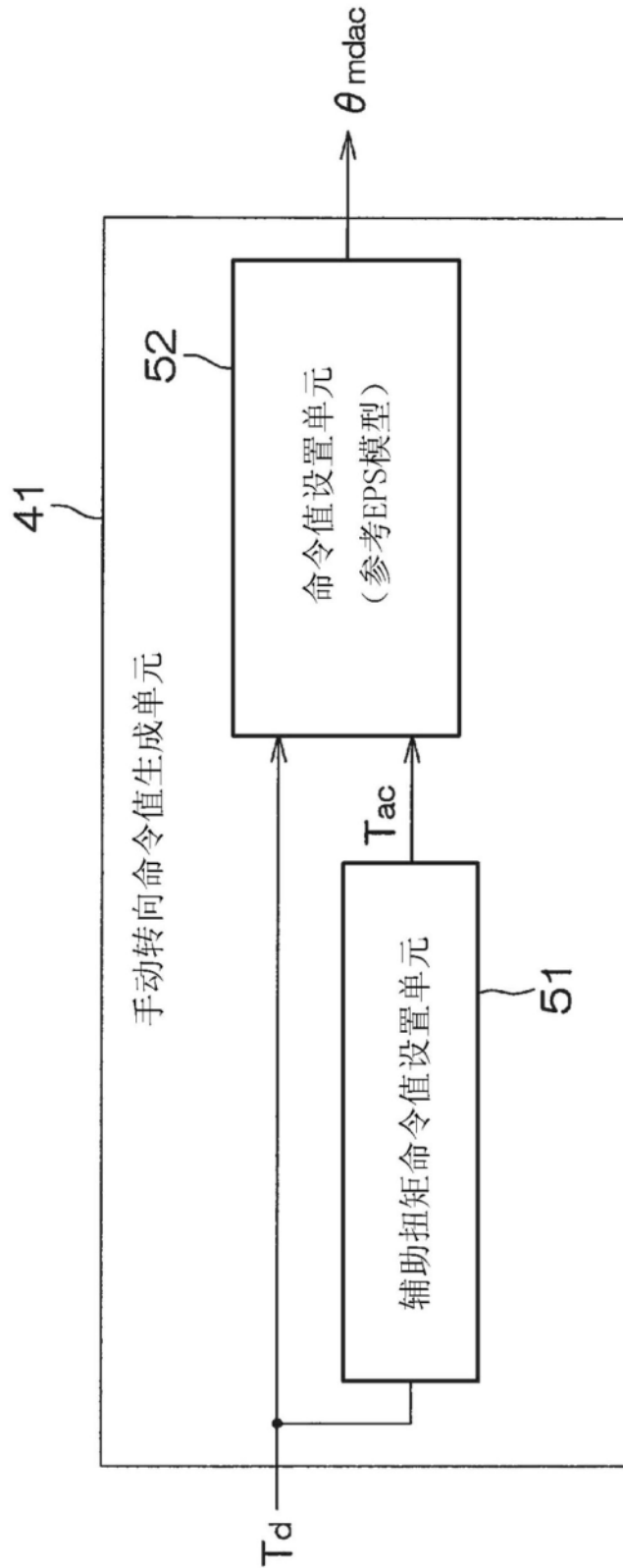


图3

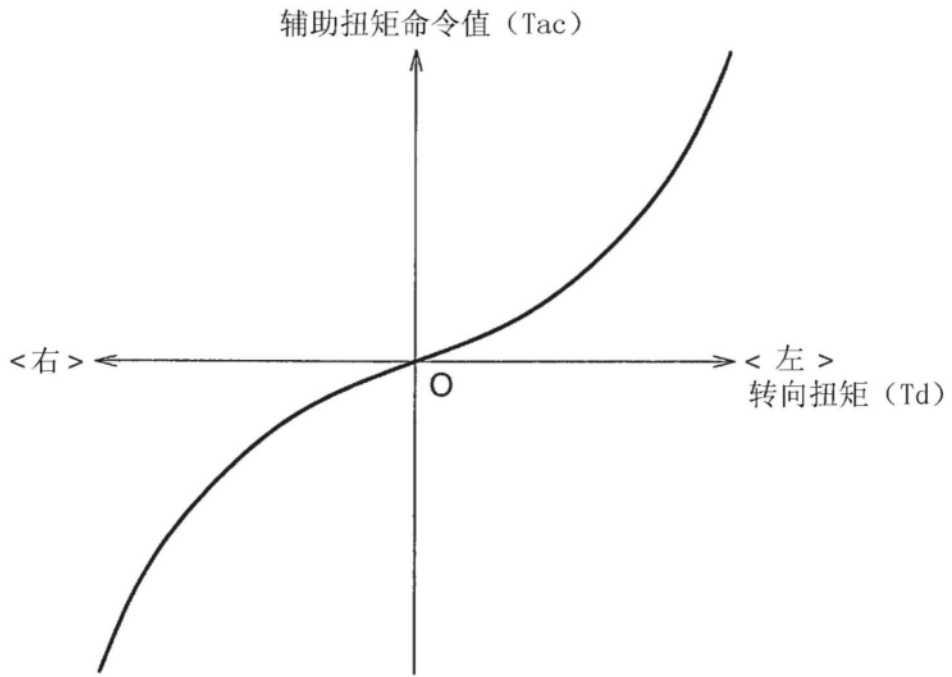


图4

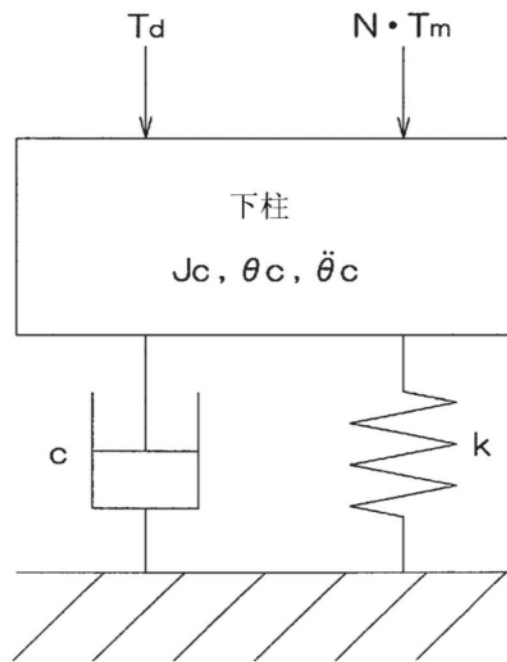


图5

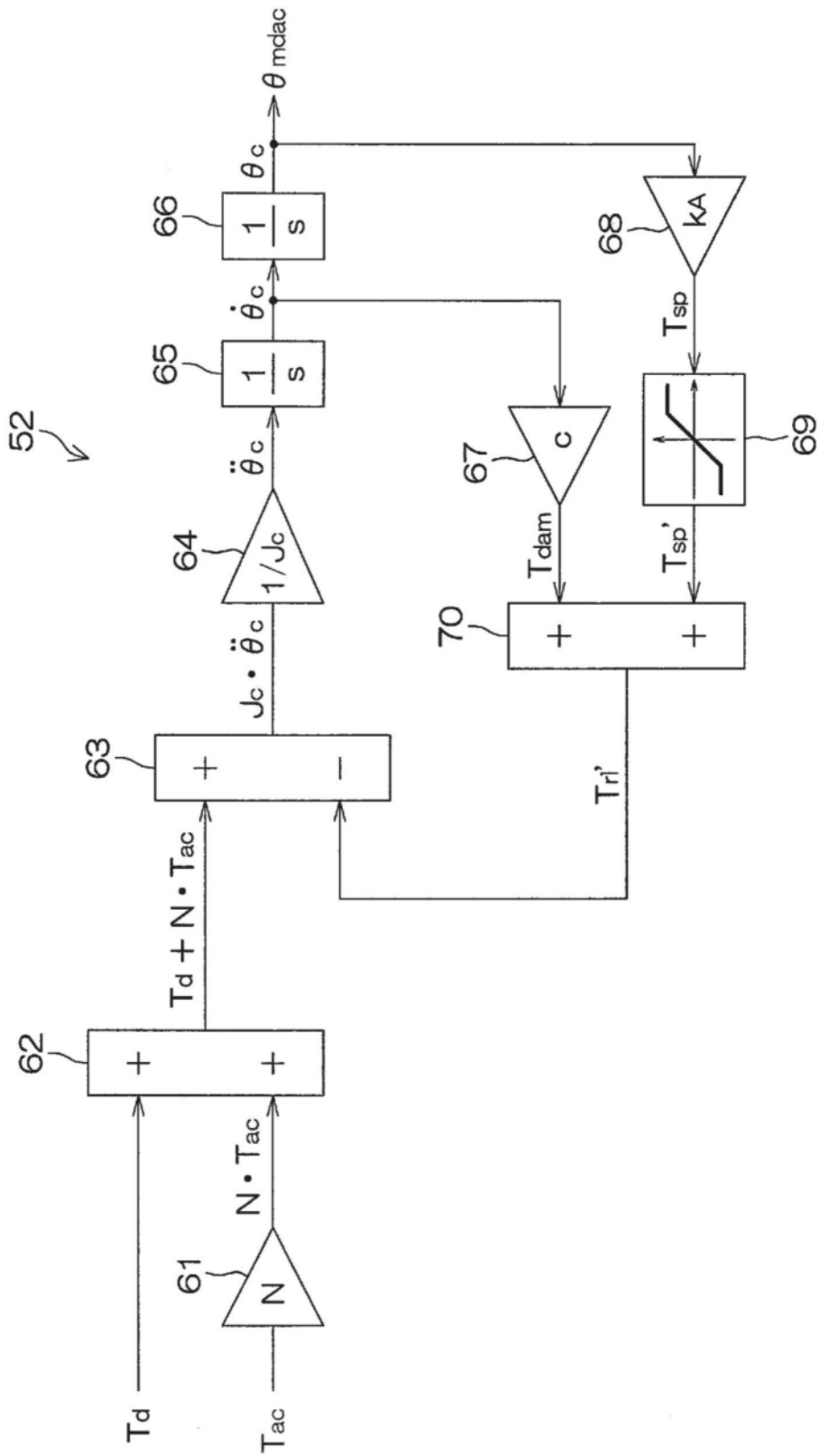


图6

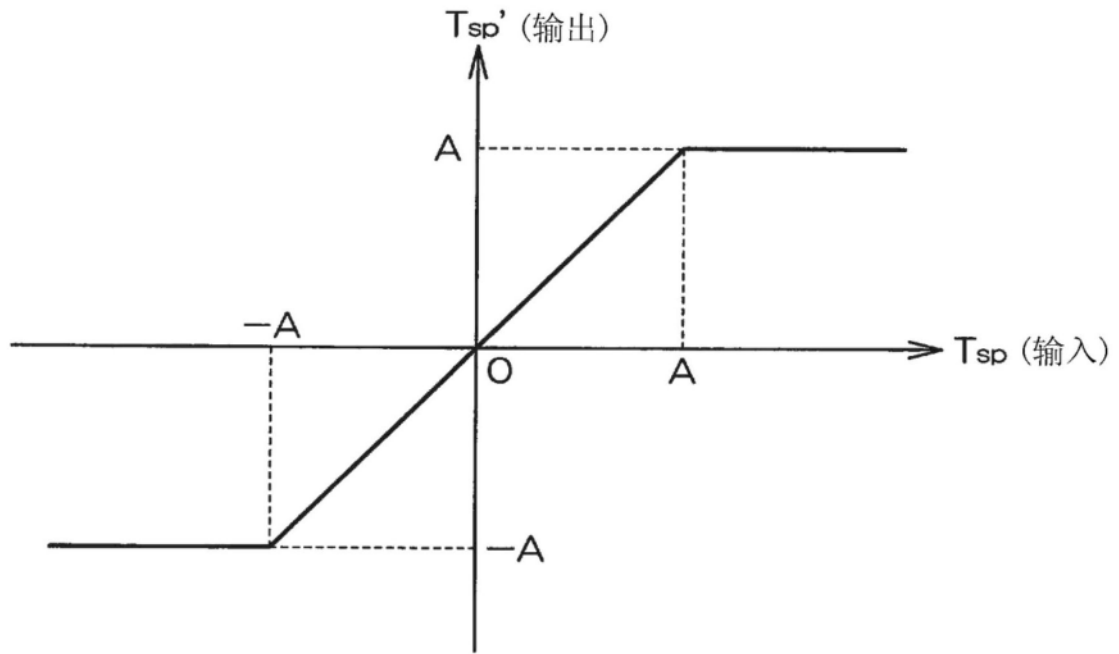


图7

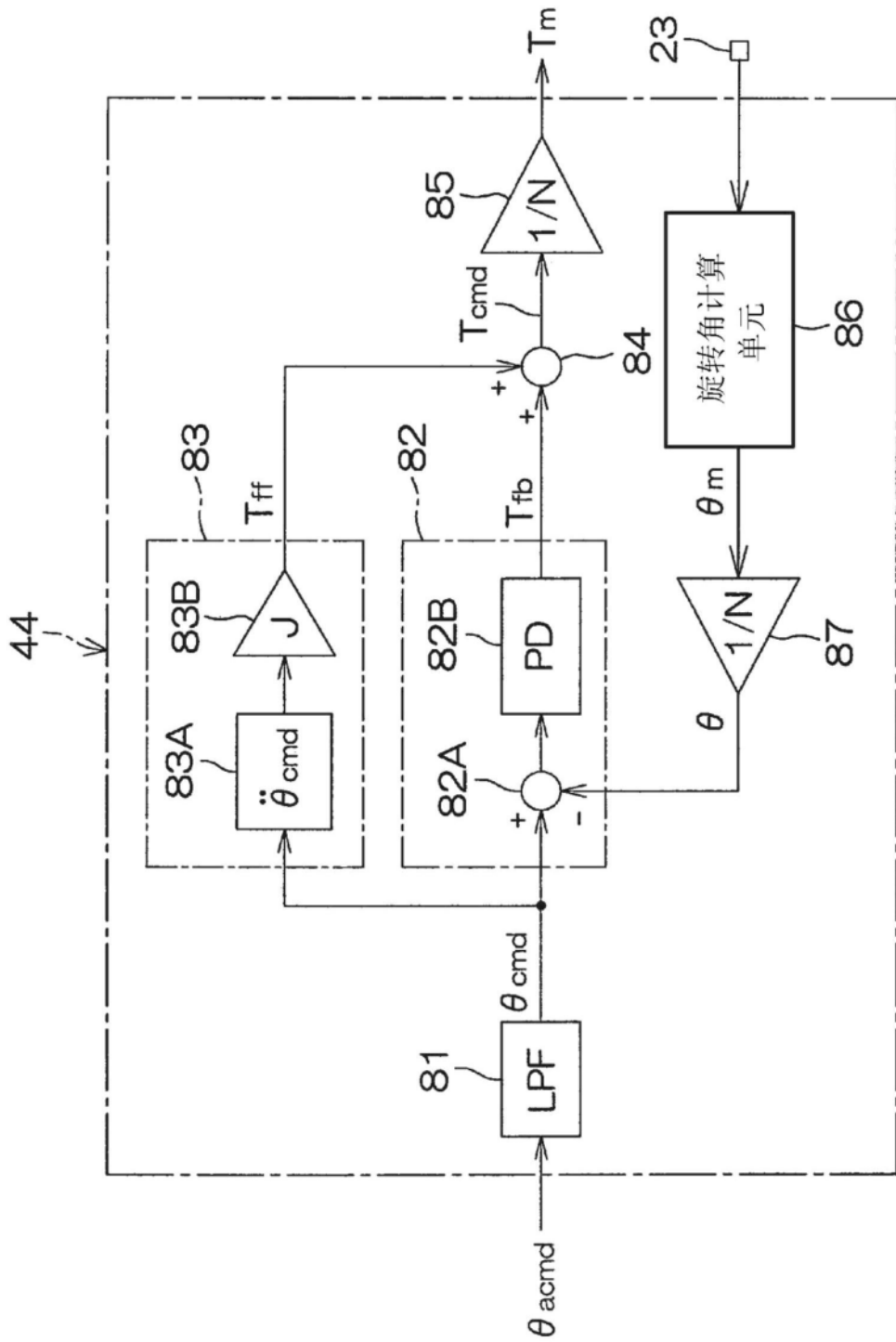


图8

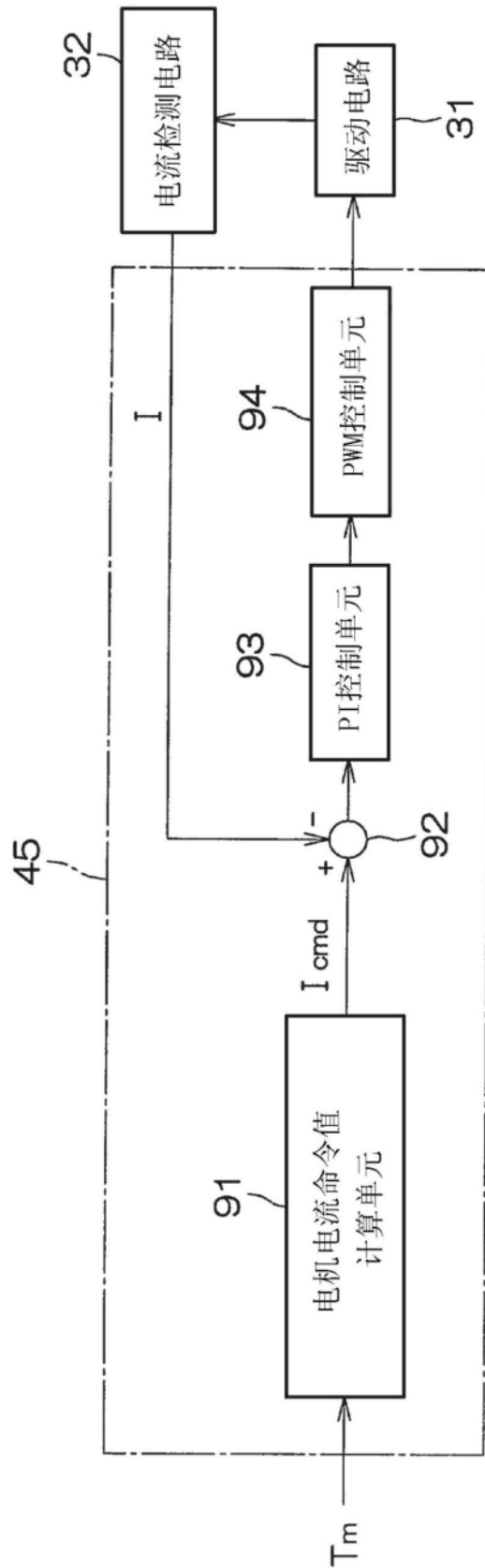


图9

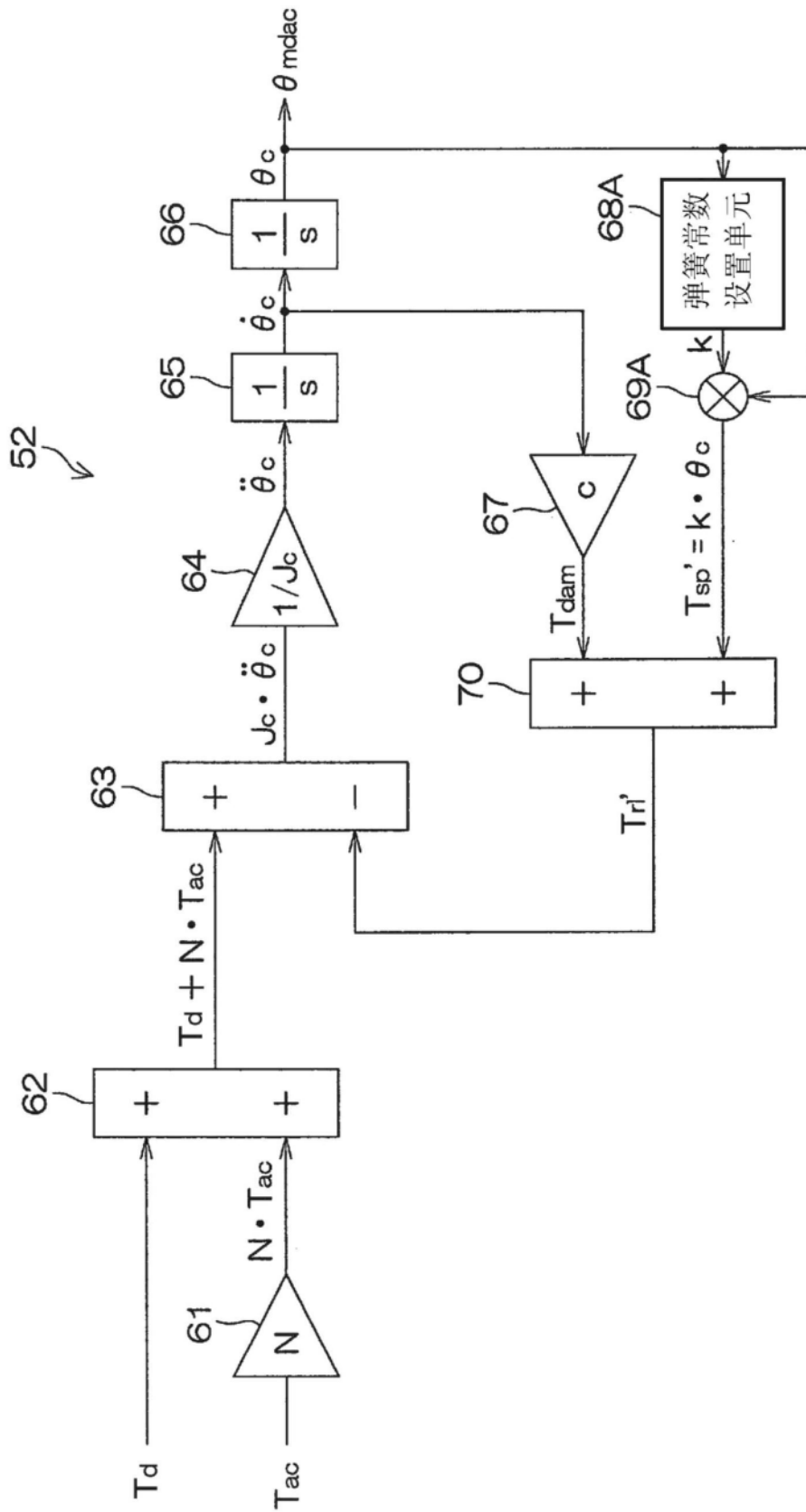


图10

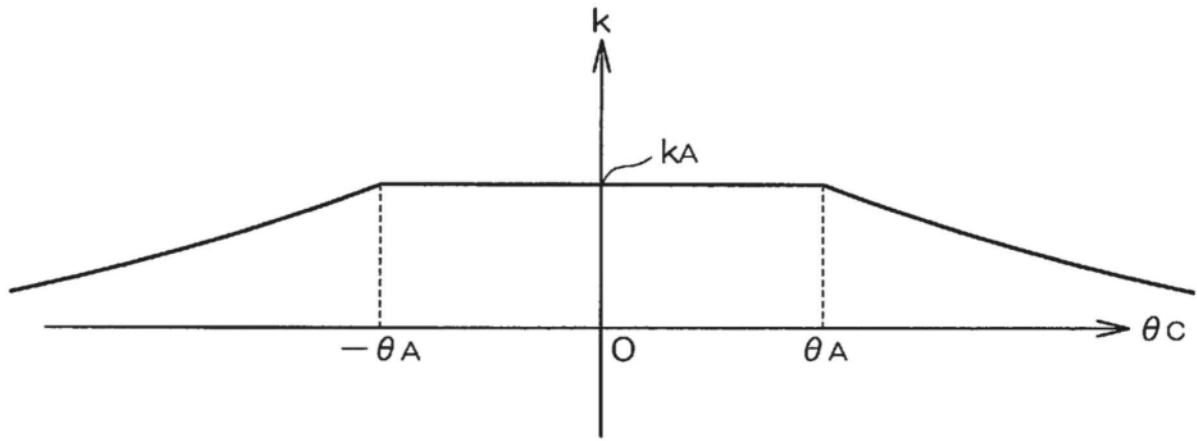


图11

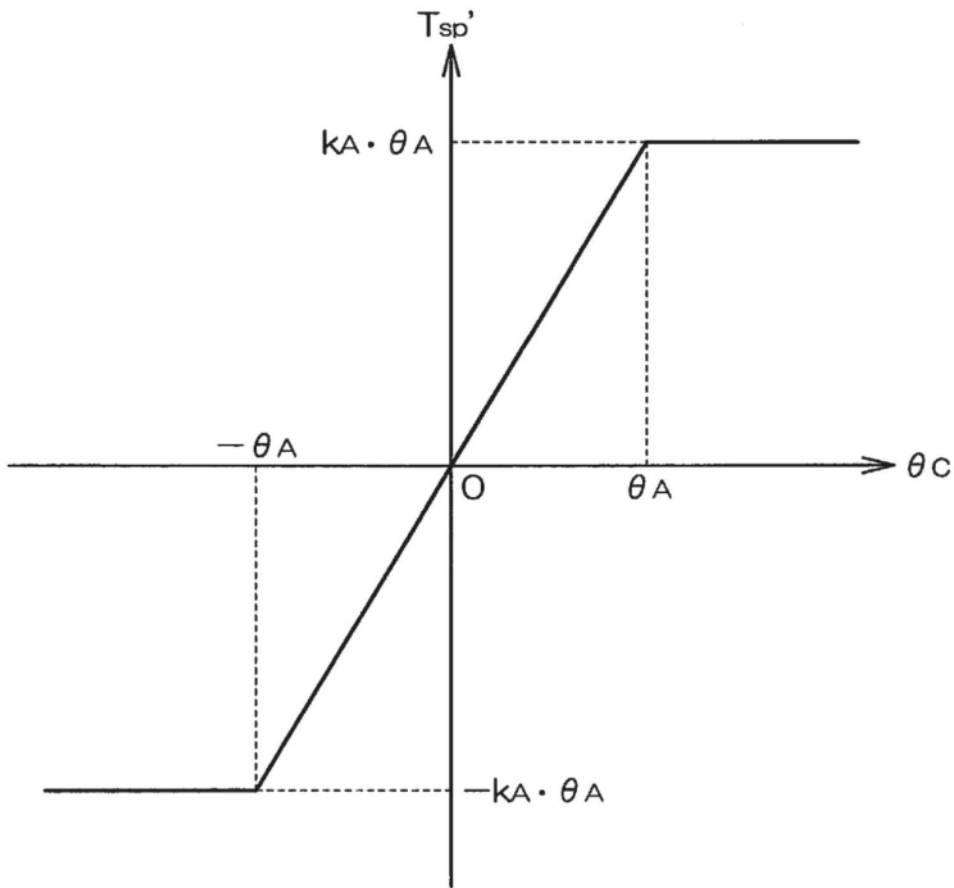


图12

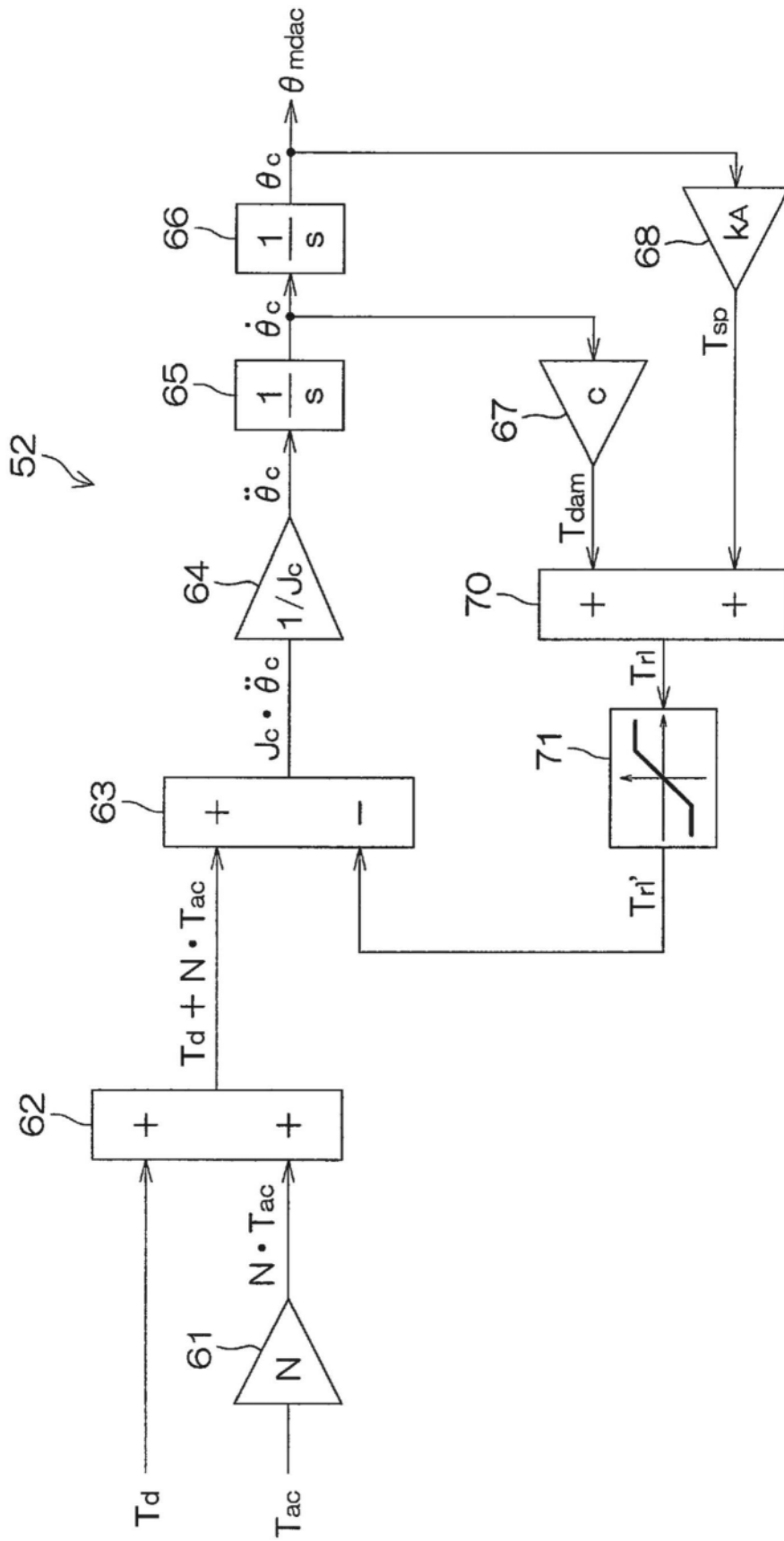


图13

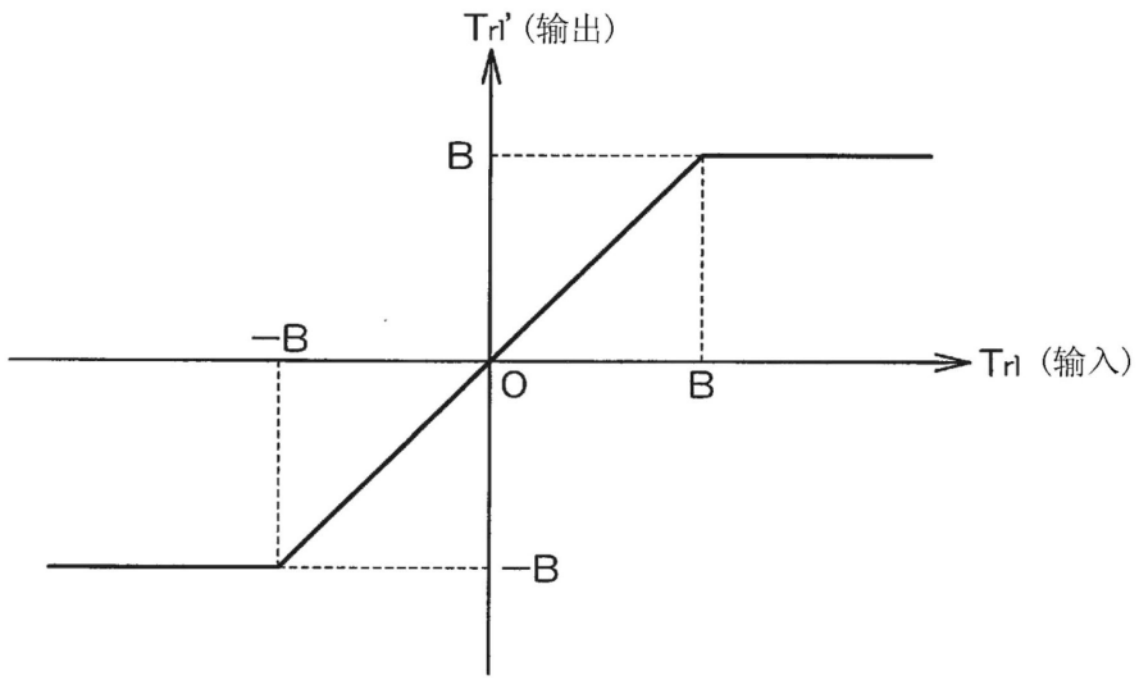


图14