

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G05D 3/12 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03826042.5

[45] 授权公告日 2009年3月18日

[11] 授权公告号 CN 100470433C

[22] 申请日 2003.4.11 [21] 申请号 03826042.5

[86] 国际申请 PCT/JP2003/004642 2003.4.11

[87] 国际公布 WO2004/092859 日 2004.10.28

[85] 进入国家阶段日期 2005.8.26

[73] 专利权人 三菱电机株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 寺田启 长野铁明 高桥和孝

矶田隆司

[56] 参考文献

CN1367887A 2002.9.4

JP6-30578A 1994.2.4

JP3-218503A 1991.9.26

JP10-116120A 1998.5.6

JP53-65916 1978.6.12

JP2001-22448A 2001.1.26

JP62-226206A 1987.10.5

JP9-244747A 1997.9.19

JP2001-100819A 2001.4.13

JP2000-69781A 2000.3.3

审查员 李彦琴

[74] 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司

代理人 何立波 张天舒

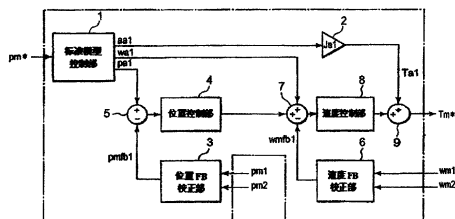
权利要求书4页 说明书21页 附图18页

[54] 发明名称

伺服控制器

[57] 摘要

在本发明的伺服控制器中，位置反馈校正部(3)利用作为本轴位置的第一轴位置(pm1)和作为另一轴位置的第二轴位置(pm2)，运算第一轴位置反馈信号(pmf1)，位置控制部(4)从减法器(5)输入模型位置(pa1)与第一轴位置反馈信号(pmf1)之间的偏差，进行位置控制，然后输出速度指令。速度反馈校正部(6)利用作为本轴速度的第一轴速度(wm1)和作为另一轴速度的第二轴速度(wm2)，运算第一轴速度反馈信号(wmfb1)，速度控制部(8)使模型速度(wa1)和从位置控制部(5)输出的速度指令相加，减去第一轴速度反馈信号(wmfb1)，然后根据校正后的速度指令，输出反馈的转矩指令(Tfb1)。



1. 一种伺服控制器，其特征在于，具有：

位置反馈校正部，其将使轴间位置偏差通过滤波器、然后乘以增益而得到的值和使另一增益与本轴位置相乘而得到的值相加，然后对位置反馈信号进行校正，所述轴间位置偏差是本轴位置与另一轴位置之间的差；

位置控制部，其利用从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号，进行位置控制，然后输出速度指令；以及

速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和本轴速度，输出反馈的转矩指令。

2. 根据权利要求1所述的伺服控制器，其特征在于，

在位置反馈校正部中，使与上述本轴位置与上述另一轴位置之间的差即轴间位置偏差相乘的增益在停止时为负，在动作时为正。

3. 一种伺服控制器，其特征在于，具有：

位置反馈校正部，其将使轴间位置偏差通过滤波器、然后乘以增益而得到的值和使另一增益与本轴位置相乘而得到的值相加，然后对位置反馈信号进行校正，所述轴间位置偏差是本轴位置与另一轴位置之间的差；

位置控制部，其利用从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号，进行位置控制，然后输出速度指令；

速度反馈校正部，其将使轴间速度偏差通过滤波器、然后乘以增益而得到的值和使另一增益与本轴速度相乘而得到的值相加，然后对速度反馈信号进行校正，所述轴间速度偏差是上述本轴速度与另一轴速度之间的差；以及

速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令。

4. 根据权利要求3所述的伺服控制器，其特征在于，
在位置反馈校正部中，使与上述本轴位置与上述另一轴位置之间的差即轴间位置偏差相乘的增益在停止时为负，在动作时为正。

5. 一种伺服控制器，其特征在于，具有：

位置反馈校正部，其将使本轴位置通过高通滤波器而得到的值和另一轴位置通过低通滤波器而得到的值相加，然后对位置反馈信号进行校正；

位置控制部，其利用从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号，进行位置控制，然后输出速度指令；以及

速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和本轴速度，输出反馈的转矩指令。

6. 一种伺服控制器，其特征在于，具有：

位置反馈校正部，其将使本轴位置通过高通滤波器而得到的值和另一轴位置通过低通滤波器而得到的值相加，然后对位置反馈信号进行校正；

位置控制部，其利用从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号，进行位置控制，然后输出速度指令；

速度反馈校正部，其将使本轴速度通过高通滤波器而得到的值和另一轴速度通过低通滤波器而得到的值相加，然后对速度反馈信号进行校正；以及

速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令。

7. 一种伺服控制器，其特征在于，具有：

标准模型控制部，其根据位置指令，针对本轴运算模拟机械的理想动作的模型位置、模型加速度；

位置控制部，其利用上述模型位置与本轴位置之间的差值，进行位置控制，然后输出速度指令；

速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和本轴速度，输出反馈的转矩指令；

模型转矩校正部，其利用上述本轴位置和另一轴位置，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩；以及

加法器，其根据上述模型转矩和上述反馈的转矩指令，运算转矩指令。

8. 根据权利要求7所述的伺服控制器，其特征在于，

上述标准模型控制部的构成方式为，根据位置指令，还运算模拟机械的理想动作的模型速度，并且

上述速度控制部的构成方式为，还根据上述模型速度，来输出反馈的转矩指令。

9. 根据权利要求8所述的伺服控制器，其特征在于，

在模型转矩校正部中，相应于时刻或速度指令波形，进行校正动作的开始 / 停止或校正增益的变更。

10. 根据权利要求9所述的伺服控制器，其特征在于，

在模型转矩校正部中，还利用上述模型加速度的符号，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩。

11. 根据权利要求7所述的伺服控制器，其特征在于，

在模型转矩校正部中，相应于时刻或速度指令波形，进行校正动作的开始 / 停止或校正增益的变更。

12. 根据权利要求11所述的伺服控制器，其特征在于，

在模型转矩校正部中，还利用上述模型加速度的符号，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩。

13. 根据权利要求7所述的伺服控制器，其特征在于，

在模型转矩校正部中，还利用上述模型加速度的符号，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩。

14. 一种伺服控制器，其特征在于，具有：

标准模型控制部，其根据位置指令，针对本轴运算模拟机械的理想动作的模型位置、模型加速度；

位置反馈校正部，其根据本轴位置和另一轴位置，对位置反馈信号进行校正；

位置控制部，其利用上述模型位置与从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号之间的差值，进行位置控制，然后输出速度指令；

速度反馈校正部，其根据本轴速度和另一轴速度，对速度反馈信号进行校正；

速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令；

模型转矩校正部，其利用另一轴模型加速度以及上述本轴位置、上述另一轴位置，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩；
以及

加法器，其根据上述模型转矩和上述反馈的转矩指令，运算转矩指令。

15. 根据权利要求 14 所述的伺服控制器，其特征在于，

上述标准模型控制部的构成方式为，根据位置指令，还运算模拟机械的理想动作的模型速度，并且

上述速度控制部的构成方式为，还根据上述模型速度，输出反馈的转矩指令。

伺服控制器

技术领域

本发明涉及一种对作为负载的电动机进行位置控制的伺服控制器，特别是涉及一种应用于多轴驱动机械的同步控制中的伺服控制器。

背景技术

有这样一种 2 轴驱动机械，其利用并排的 2 个滚轴丝杠支撑移动台，通过对分别与这 2 个滚轴丝杠连接的 2 个伺服电动机进行同步控制，来驱动移动台。2 轴驱动机械的移动台上一般安置有可动的上位结构体，借助于上位结构体的位置和由该上位结构体保持的负载等，移动台的重心发生变化。

此外，作为与驱动工作机械的工作台、电动式工业用机器人的臂这样的负载机械的电动机（直流电动机、感应电动机、同步电动机等）的位置控制装置相关的技术，有专利文献 1（特开平 6-30578 号公报）所公开的电动机位置控制装置。

专利文献 1 的目的是得到具有高速响应性能，同时不发生机械振动，并且即使负载机械的惯性力矩发生变化，也总是具有恒定响应频率的电动机位置控制装置，在专利文献 1 的电动机位置控制装置中，通过第一位置控制电路得到第一速度信号，通过将机械系统模拟电路作为控制对象的第二位置控制电路得到第二速度信号。此外，将第一和第二速度信号相加，得到第三速度信号，然后通过被输入了第三速度信号的第一速度控制电路，得到第一转矩信号。同样，从第二和第三速度控制电路，得到第二和第三转矩信号，然后以跟踪将第一～第三转矩信号相加而得到的最终转矩信号的方式，来控制电动机而发生转矩（第 5 页右栏的第 23 行～第 36 行）。

在专利文献 1 的电动机位置控制装置中，通过附加第二位置控制电路、第二速度控制电路和机械系统模拟电路，而具有能够改善位置控制对旋转角度指令信号变化的响应性能的效果。此外，通过附加第三速度控制电路，而具有能够改善位置控制对负载转矩变化的响应性能的效果。

此外，作为如下的技术，有专利文献 2（特开昭 62-226206 号公报）公开的同步位置控制方式，该技术是在具有门型等可动结构体的工作机械等中，与对其两侧脚部进行同步定位的控制方式相关的技术，其目的是得到不会产生由于干扰导致的非对称性的同步位置控制方式。

专利文献 2 是这样的技术，即，在可动结构体的两侧，分别设置根据位置指令值而使各侧移动的位置控制系统，通过该两位置控制系统来对可动结构体的两侧进行同步定位，在这样的方式中，求出可动结构体两侧的移动位置差值，然后对该差值施加补偿要素，求出补偿值，然后将该补偿值分别反馈给各位置控制系统，由此来消除由于干扰导致的非对称性的问题（第 2 页左下栏的第 3 行～第 10 行）。

在将上述专利文献 1 的电动机位置控制装置应用于 2 轴驱动机械的控制中时，在 2 轴的负载惯量（inertia）平衡的情况下，由于第一轴和第二轴进行同样的动作，所以能够进行正确的驱动。但是，存在如下问题，即，在 2 轴的负载惯量不平衡的情况下，由于第一轴和第二轴的动作不一致，所以在第一轴的实际位置和第二轴的实际位置之间产生偏差（轴间位置偏差），该轴间位置偏差使移动台的定位精度恶化，同时由于使机械产生应力，所以使机械的寿命下降，在最严重的情况下，将导致机械的损伤。

因此，上述专利文献 1 的电动机位置控制装置存在如下问题，即其不能应用于存在较大负载不平衡的 2 轴驱动机械的控制中。

此外，上述专利文献 2 的同步位置控制方式，是将 2 个位置控

制系统的位置差值（轴间位置偏差）反馈给 2 个位置指令值，从而消除非对称性的技术，在应用于 2 轴驱动机械的控制中时，能够进行某一程度的轴间位置偏差的抑制，但为了抑制较大的轴间位置偏差，需要将位置指令校正部的响应（这里是系数 H1）设定得极大。在将该位置指令校正部的响应设定得极大的情况下，如果是高刚性的机械，则没有问题，但对于刚性低的机械，则存在引起机械的振动而变得不稳定的问题。

此外，如果将增益设定得较高，则会助长在存在位置检测误差等的情况下发生的轴间冲突现象。如果发生轴间冲突现象，则存在如下问题，即，由于在轴间互相作用的转矩，电动机发热，从而会妨碍高速、高精度控制，在最严重的情况下，由于轴间的互相作用，机械会受到损伤。

因此，存在如下问题，即不能将上述专利文献 2 的同步位置控制方式应用于低刚性的机械、存在位置检测误差的机械中。

本发明就是为了解决上述问题而提出的，其目的在于，提供一种能够应用于低刚性机械或存在位置检测误差的 2 轴驱动机械中的伺服控制器。

发明内容

本发明的伺服控制器具有：位置反馈校正部，其将使轴间位置偏差通过滤波器、然后乘以增益而得到的值和使增益与本轴位置相乘而得到的值相加，然后对位置反馈信号进行校正，所述轴间位置偏差是本轴位置与另一轴位置之间的差；位置控制部，其利用从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号，进行位置控制，然后输出速度指令；以及速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和本轴速度，输出反馈的转矩指令，因此，如果仅反馈轴间位置偏差的低频成分，就不会引起高频成分导致的振动，从而能够获得轴间位置偏差的抑制效果。

此外，在位置反馈校正部中，使与上述本轴位置与上述另一轴位置之间的差即轴间位置偏差相乘的增益在停止时为负，在动作时为正。

此外，本发明的伺服控制器具有速度反馈校正部，其将使轴间速度偏差通过滤波器、然后乘以增益而得到的值和使增益与上述本轴速度相乘而得到的值相加，然后对速度反馈信号进行校正，所述轴间速度偏差是上述本轴速度与另一轴速度之间的差，上述速度控制部根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令。

此外，本发明的伺服控制器具有速度反馈校正部，其将使轴间速度偏差通过滤波器、然后乘以增益而得到的值和使增益与上述本轴速度相乘而得到的值相加，然后对速度反馈信号进行校正，所述轴间速度偏差是上述本轴速度与另一轴速度之间的差，上述速度控制部根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令。

此外，本发明的伺服控制器具有：位置反馈校正部，其将使本轴位置通过高通滤波器而得到的值和另一轴位置通过低通滤波器而得到的值相加，然后对位置反馈信号进行校正；位置控制部，其利用从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号，进行位置控制，然后输出速度指令；以及速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和本轴速度，输出反馈的转矩指令。由于成为近似于主从的形式，即本轴按照另一轴的位置而进行定位，因此，即使是有位置检测误差的情况下，也不会发生轴间的冲突现象。

此外，本发明的伺服控制器具有速度反馈校正部，其将使上述本轴速度通过高通滤波器而得到的值和另一轴速度通过低通滤波器

而得到的值相加，然后对速度反馈信号进行校正，上述速度控制部根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令，因此，能够对应于高加减速指令的用途。

此外，本发明的伺服控制器，具有：标准模型控制部，其根据位置指令，运算模拟机械的理想动作的模型位置、模型加速度；位置控制部，其利用上述模型位置与本轴位置之间的差值，进行位置控制，然后输出速度指令；速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和本轴速度，输出反馈的转矩指令；模型转矩校正部，其利用上述本轴位置和另一轴位置，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩；以及加法器，其根据上述模型转矩和上述反馈的转矩指令，运算转矩指令，因此，通过模型转矩校正部进行轴间位置偏差的校正，能够利用前馈成分进行校正，即使增大增益，也不易变得不稳定，所以能够获得轴间位置偏差的大幅度抑制效果。

此外，上述标准模型控制部的构成方式为，根据位置指令，运算模拟机械的理想动作的模型位置、模型速度、模型加速度，并且上述速度控制部的构成方式为，根据从上述位置控制部输出的速度指令和上述模型速度、本轴速度，输出反馈的转矩指令，因此，能够对应于高加减速指令的用途。

此外，在模型转矩校正部中，相应于时刻或速度指令波形，进行校正动作的开始/停止或校正增益的变更，因此，在发生较大轴间位置偏差时变更高增益，在其余期间变更为低增益或停止校正，由此能够抑制噪声或干扰的影响，提高模型转矩校正的精度，从而提高轴间位置偏差的抑制性能。

此外，在模型转矩校正部中，利用上述本轴位置、另一轴位置、以及上述模型加速度的符号，对上述模型加速度进行校正，然后运算

模型转矩。

此外，在模型转矩校正部中，相应于时刻或速度指令波形，进行校正动作的开始 / 停止或校正增益的变更，因此，在发生较大轴间位置偏差时变更为高增益，在其余期间变更为低增益或停止校正，由此能够抑制噪声或干扰的影响，提高模型转矩校正的精度，从而提高轴间位置偏差的抑制性能。

此外，在模型转矩校正部中，利用上述本轴位置、另一轴位置、以及上述模型加速度的符号，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩。

此外，在模型转矩校正部中，利用上述本轴位置、另一轴位置、以及上述模型加速度的符号，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩。

此外，本发明的伺服控制器具有：标准模型控制部，其根据位置指令，运算模拟机械的理想动作的模型位置、模型加速度；位置反馈校正部，其根据本轴位置和另一轴位置，对位置反馈信号进行校正；位置控制部，其利用上述模型位置与从上述位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号之间的差值，进行位置控制，然后输出速度指令；速度反馈校正部，其根据本轴速度和另一轴速度，对速度反馈信号进行校正；速度控制部，其根据从上述位置控制部输出的速度指令和从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令；模型转矩校正部，其利用另一轴模型加速度以及上述本轴位置、上述另一轴位置，对上述模型加速度进行校正，然后运算模型转矩；以及加法器，其根据上述模型转矩和上述反馈的转矩指令，运算转矩指令。因此，通过模型转矩校正部进行轴间位置偏差的校正，能够利用前馈成分进行完全的校正，从而不会担心引起不稳定，获得轴间位置偏差的抑制效果。

此外，上述标准模型控制部的构成方式为，根据位置指令，运算模拟机械的理想动作的模型位置、模型速度、模型加速度，并且上述速度控制部的构成方式为，根据从上述位置控制部输出的速度指令、上述模型速度以及从上述速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令，因此，能够对应于高加减速指令的用途。

附图说明

图 1 是表示 2 轴驱动机械的构成的图。

图 2 是表示在本发明第一实施方式的 2 轴驱动机械中使用的伺服控制器的构成的图。

图 3 是表示伺服控制器的标准模型控制部 1 的构成的图。

图 4 是表示伺服控制器的标准模型控制部 1 的另一个构成的图。

图 5 是表示本发明第一实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的位置反馈校正部 3 的构成的图。

图 6 是表示本发明第一实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的速度反馈校正部 6 的构成的图。

图 7 是表示本发明第一实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的位置反馈校正部 3 的构成的图。

图 8 是用于说明本发明第一实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的位置反馈校正部 3 的增益切换例的图。

图 9 是表示本发明第一实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的速度反馈校正部 6 的构成的图。

图 10 是表示在本发明第二实施方式的 2 轴驱动机械中使用的伺服控制器的构成的图。

图 11 是表示本发明第二实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32a 的构成的图。

图 12 是用于说明在本发明第二实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32a 中，PI 校正器 46 对在 PI 校正中使用的

比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 进行增益切换的例子的图。

图 13 是用于说明在本发明第二实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32a 中, PI 校正器 46 对在 PI 校正中使用的比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 进行增益切换的例子的图。

图 14 是用于说明在本发明第二实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32a 中, PI 校正器 46 对在 PI 校正中使用的比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 进行增益切换的例子的图。

图 15 是表示在本发明第三实施方式的 2 轴驱动机械中使用的伺服控制器的构成的图。

图 16 是表示本发明第三实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32b 的构成的图。

图 17 是表示在本发明第四实施方式的 2 轴驱动机械中使用的伺服控制器的构成的图。

图 18 是表示本发明第四实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32c 的构成的图。

具体实施方式

第一实施方式

以下利用图 1, 对 2 轴驱动机械的构成和动作进行说明。

位置指令输出装置 101 将位置指令 pm^* 输出给第一轴伺服控制器 102a 和第二轴伺服控制器 102b。

第一轴伺服控制器 102a 根据从位置指令输出装置 101 输出的位置指令 pm^* 和第一轴实际位置 $pm1$, 将转矩指令 Tm^*1 输出给第一轴转矩控制单元 103a。第一轴转矩控制单元 103a 相应于转矩指令 Tm^*1 来控制第一轴伺服电动机 104a。

第二轴伺服控制器 102b 根据从位置指令输出装置 101 输出的位置指令 pm^* 和第二轴实际位置 $pm2$, 将转矩指令 Tm^*2 输出给第二轴转矩控制单元 103b。第二轴转矩控制单元 103b 相应于转矩指令 Tm^*2 , 来控制第二轴伺服电动机 104b。

第一轴伺服电动机 104a、第二轴伺服电动机 104b 分别与第一轴

滚轴丝杠 105a、第二轴滚轴丝杠 105b 连接，通过驱动两个轴，使移动台 106 移动。2 轴驱动机械的移动台 106 上安置有上位结构体 107，借助于上位结构体 107 的位置等，移动台 106 的重心发生变化。

此外， L 是轴间（第一轴滚轴丝杠 105a、第二轴滚轴丝杠 105b 间）的距离， x 是从轴间的中心位置到上位结构体 107 的中心位置的距离。

此外，采用这样的构成，即在两轴的伺服控制器之间，能够交换彼此的实际位置信息、实际速度信息。

此外，第一轴伺服控制器 102a 和第二轴伺服控制器 102b 的控制是相同的，以下以第一轴伺服控制器 102a 为例，对伺服控制器的控制进行说明。

以下，利用图 2，以第一轴伺服控制器 102a 为例，对第一实施方式中的伺服控制器的构成和处理进行说明。

标准模型控制部 1 输入从位置指令输出装置 101（未图示）输出的位置指令 pm^* ，运算并输出模型位置 $pa1$ 、模型速度 $wa1$ 和模型加速度 $aa1$ 。

模型转矩运算部 2 使第一轴的惯量设定值 $Je1$ 与模型加速度 $aa1$ 相乘，然后输出模型转矩 $Ta1$ 。

位置反馈校正部 3 利用作为本轴位置的第一轴位置 $pm1$ 和作为另一轴位置的第三轴位置 $pm2$ ，输出第一轴位置反馈信号 $pmfb1$ 。位置控制部 4 从减法器 5 输入模型位置 $pa1$ 与第一轴位置反馈信号 $pmfb1$ 之间的偏差，进行位置控制，输出速度指令。

速度反馈校正部 6 利用作为本轴速度的第一轴速度 $wm1$ 和作为另一轴速度的第二轴速度 $wm2$ ，输出第一轴速度反馈信号 $wmfb1$ 。运算器 7 将模型速度 $wa1$ 和从位置控制部 5 输出的速度指令相加，然后减去第一轴速度反馈信号 $wmfb1$ ，输出校正后的速度指令。速度控制部 8 根据从运算器 7 输出的速度指令，输出反馈的转矩指令 $Tfb1$ 。

加法器 9 将反馈的转矩指令 $Tfb1$ 和从模型转矩运算部 2 输出的模型转矩 $Ta1$ 相加，作为第一轴的转矩指令 Tm^*1 输出。

在第一实施方式的伺服控制器中，采用交换彼此的实际位置信息、实际速度信息的构成。在图 2 中，示出了在第一轴伺服控制器 102a 中使用第二轴位置 pm_2 和第二轴速度 wm_2 的例子。

接下来，利用图 3，对标准模型控制部 1 的构成和处理进行说明。标准模型控制部 1，是输出用于根据位置指令来模拟机械的理想动作的模型位置 pa_1 、模型速度 wa_1 、模型加速度 aa_1 的装置。

模型位置控制部 110 输入从位置指令输出装置 101（未图示）输出的位置指令 pm^* 与从机械系统模拟部 112 输出的模型位置 pa 之间的差值，生成模型速度指令，然后输出给模型速度控制部 111。模型速度控制部 111 输入模型速度指令与模型速度 wa 之间的差值，生成模型加速度 aa ，然后输出给机械系统模拟部 112。机械系统模拟部 112 输入模型加速度 aa ，运算模型速度 wa 、模型位置 pa 。

此外，利用图 4，对标准模型控制部 1 的另一个结构例和处理进行说明。

从位置指令输出装置 101（未图示）输出的位置指令 pm^* 被用作模型位置 pa ，速度前馈运算部 113 输入位置指令 pm^* ，运算模型速度 wa ，然后输出。加速度前馈运算部 114 输入模型速度 wa ，运算模型加速度 aa ，然后输出。

速度前馈运算部 113 和加速度前馈运算部 114，一般由微分器或高通滤波器构成。

接下来，利用图 5，对第一轴伺服控制器 102a 的位置反馈校正部 3 的构成和处理进行说明。

利用减法器 11 计算出第一轴实际位置 pm_1 与第二轴实际位置 pm_2 之间的偏差（=轴间位置偏差），然后利用系数乘法器 13 使系数 Gp_2 与通过滤波器 12 的值相乘。此外，利用加法器 15，将利用系数乘法器 14 使系数 Gp_1 与第一轴实际位置 pm_1 相乘得到的值和利用系数乘法器 13 乘以系数 Gp_2 而得到的值相加，计算出第一轴位置反

馈信号 $pmfb1$ 。

获得第一轴位置反馈信号 $pmfb1$ 与位置指令 $pa1$ 的差值，然后用于位置控制中。

用低通滤波器来构成输入轴间位置偏差的滤波器 12，由此能够防止高频成分的通过，与上述专利文献 2 相比，不易引起振动，因此能够进一步提高增益，从而能够提高轴间位置偏差的抑制性能。

接下来，利用图 6，对第一轴伺服控制器 102a 的速度反馈校正部 6 的构成和处理进行说明。

利用减法器 21 计算出第一轴实际速度 $wm1$ 和第二轴实际速度 $wm2$ 之间的偏差（=轴间速度偏差），然后利用系数乘法器 23，使系数 $Gw2$ 与通过滤波器 22 后得到的值相乘。此外，利用加法器 25，使利用系数乘法器 24 将系数 $Gw1$ 与第一轴实际速度 $wm1$ 相乘而得到的值和利用系数乘法器 23 乘以系数 $Gw2$ 而得到的值相加，计算出第一轴速度反馈信号 $wmfb1$ 。

获得第一轴速度反馈信号 $wmfb1$ 与速度指令 $wa1$ 的差值，然后用于速度控制中。

用低通滤波器来构成输入轴间速度偏差的滤波器 22，由此能够防止高频成分的通过，与上述专利文献 2 相比，不易引起振动，因此能够进一步提高增益，从而能够提高轴间速度偏差的抑制性能。

接下来，利用图 7，对位置反馈校正部 3 的另一个结构例和处理进行说明。如果将图 5 所示的系数乘法器 13 的系数 $Gp2$ 和系数乘法器 14 的系数 $Gp1$ 设定为 $Gp1 = -Gp2 > 0$ ，则位置反馈校正部的构成与图 7 的大致等价。

利用加法器 18，使第一轴实际位置 $pm1$ 通过高通滤波器 16 后得到的值和第二轴实际位置 $pm2$ 通过低通滤波器 17 后得到的值相加，输出第一轴位置反馈信号 $pmfb1$ 。

在图 7 的构成中，高频成分反馈本轴（第一轴）的实际位置，低频成分反馈另一轴（第二轴）的实际位置。其结果是，成为近似于

主从 (master slave) 的形式, 即本轴按照另一轴的位置而进行定位, 因此, 即使是有位置检测误差的情况下, 也不会发生轴间的冲突现象。

以下利用图 8, 对位置反馈校正部 3 中的系数乘法器 13 的系数 G_{p2} 和系数乘法器 14 的系数 G_{p1} 的切换例进行说明。图 8 (a) 是表示速度指令变化的图, 图 8 (b) 是表示系数乘法器 14 的系数 G_{p1} 的变化的图, 图 8 (c) 是表示系数乘法器 13 的系数 G_{p2} 的变化的图。

在速度指令生成中, 由于发生轴间位置偏差, 所以如图 8 (c) 所示, 通过系数乘法器 13 的系数 $G_{p2} > 0$, 来进行轴间位置偏差的抑制, 在停止期间和停止后, 使系数 $G_{p2} = -G_{p1} = -1$, 来切换为主从控制, 防止轴间的冲突。

通过使系数乘法器 13、14 的系数值可变, 能够容易地切换控制器的构成, 从而能够抑制轴间位置偏差, 同时防止轴间的冲突。

接下来, 利用图 9, 对速度反馈校正部 6 的另一个构成例和处理进行说明。如果将图 6 所述的系数乘法器 23 的系数 G_{w2} 和系数乘法器 24 的系数 G_{w1} 设定为 $G_{w1} = -G_{w2} > 0$, 则速度反馈校正部的构成与图 9 的大致等价。

利用加法器 28, 将第一轴实际速度 w_{m1} 通过高通滤波器 26 后得到的值和第二轴实际速度 w_{m2} 通过低通滤波器 27 后得到的值相加, 输出第一轴速度反馈信号 w_{mfb1} 。

在图 9 的构成中, 高频成分反馈本轴 (第一轴) 的实际速度, 低频成分反馈另一轴 (第二轴) 的实际速度。其结果是, 成为近似于主从 (master slave) 的形式, 即本轴按照另一轴的速度而决定速度, 因此, 即使是有速度检测误差的情况下, 也不会发生轴间的冲突现象。

由于第一实施方式的伺服控制器对位置偏差和速度偏差两者进行校正, 所以在应用于 2 轴驱动机械的控制中的情况下, 与上述专利文献 2 相比, 能够以低的增益获得同等程度的效果, 因此能够更稳定地进行机械的轴间位置偏差抑制。

此外, 由于采用防止轴间位置偏差的高频成分通过的构成, 所以与上述专利文献 2 相比, 不易引起振动, 从而也能够应用于低刚性

的机械。

此外，能够简单地切换为主从控制，能够防止轴间的冲突，从而也能够应用于有位置检测误差的机械。

由于第一实施方式的伺服控制器只要在现有的进行位置反馈和速度反馈的部分中加入了位置反馈校正部、速度反馈校正部即可，所以可以容易地替换现有的伺服控制器。此外，由于能够用1种构成来切换为多种控制构造，所以能够减轻软件的负担。

在上述第一实施方式中，对采用使用了根据位置指令来运算模型位置、模型速度、模型加速度的标准模型控制部这样的构成，位置控制部根据模型位置与从位置反馈校正部输出的校正位置反馈信号之间的差值，进行位置控制，然后输出速度指令，并且，速度控制部根据从位置控制部输出的速度指令、模型速度以及校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令的例子进行了说明，但也可以不使用标准模型控制部。但是，在指令脉冲不平滑，或者位置指令急剧变化的情况下，通过使用标准模型控制部，可以改善目标值响应性能。

第二实施方式

以下利用图10，以第一轴伺服控制器102a为例，对第二实施方式的伺服控制器的构成和处理进行说明。

标准模型控制部1输入从位置指令输出装置101（未图示）输出的位置指令 pm^* ，运算并输出模型位置 $pa1$ 、模型速度 $wa1$ 和模型加速度 $aa1$ 。

模型转矩校正部32a利用模型加速度 $aa1$ 和作为本轴位置的第一轴实际位置 $pm1$ 和作为另一轴位置的第二轴实际位置 $pm2$ ，输出模型转矩 $Ta1$ 。

位置控制部34从减法器35输入模型位置 $pa1$ 与作为本轴位置的第一轴实际位置 $pm1$ 之间的偏差，进行位置控制，输出速度指令。

运算器37使模型速度 $wa1$ 和从位置控制部34输出的速度指令相加，然后减去作为本轴速度的第一轴实际速度 $wm1$ ，输出校正后的

速度指令。

速度控制部 38 根据从运算部 37 输出的速度指令，输出反馈的转矩指令 T_{fb1} 。

加法器 39 使反馈的转矩指令 T_{fb1} 和从模型转矩校正部 32a 输出的模型转矩 T_{a1} 相加，然后作为第一轴的转矩指令 T_{m*1} 而输出。

第二实施方式的第一轴伺服控制器的构成为，将第一实施方式的第一轴伺服控制器中的模型转矩运算部 2 替换为模型转矩校正部 32a。

在第二实施方式的伺服控制器中，采用交换彼此的实际位置信息的构成。在图 10 中，示出了在第一轴伺服控制器 102a 中使用第二轴位置 $pm2$ 的例子。

接下来，利用图 11，对模型转矩校正部 32a 的构成和处理进行说明。

使从标准模型控制部 1（未图示）输出的模型加速度 $aa1$ 通过高通滤波器 41 后，在符号检测器 42 中检测出模型加速度的符号。

利用乘法器 45，在使由减法器 43 求出的第一轴实际位置 $pm1$ 和第二轴实际位置 $pm2$ 之间的偏差通过高通滤波器 44 后得到的值上，附加由符号检测器 42 求出的模型加速度的符号，然后输出给 PI 校正器 46。

PI 校正器 46 利用比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 来进行 PI 校正，输出惯量校正值 ΔJ_{e1} 。

利用减法器 47，从由标称的系数乘法器 48 设定的模型惯量值 J_{e1} 中减去惯量校正值 ΔJ_{e1} 。

利用乘法器 49，使由减法器 47 求出的值与从标准模型控制部 1（未图示）输出的模型加速度 $aa1$ 相乘，从而得到校正后的模型转矩 T_{a1} 。

在第二实施方式的第一轴伺服控制器 102a 的模型转矩校正部 32a 中，如果由标称的系数乘法器 48 设定的模型惯量值 J_{e1} 与实际

的驱动惯量一致,则能够借助于模型转矩 T_{a1} 而使得实际的位置与模型位置大致一致地动作。

此外,在模型惯量值 J_{e1} 有误差的情况下,根据轴间位置偏差进行校正,使得与实际的惯量一致。例如,在上位结构体位于相反侧,实际的惯量由于负载不平衡而比模型惯量值 J_{e1} 小的情况下,如果加速度的变化为正,则产生正的轴间位置偏差,如果加速度的变化为负,则产生负的轴间位置偏差。因此,利用模型加速度 a_{a1} 通过高通滤波器后得到的值的极性,使轴间位置偏差校正输入反转,由此能够总是向使模型惯量值变小的方向,即与实际的惯量一致的方向校正。通过这样的校正,控制第一轴位置和第二轴位置使得它们一致,从而抑制了轴间位置偏差。

此外,根据控制器或机械的条件,有时在加速时产生正的轴间位置偏差,在减速时产生负的轴间位置偏差。在这样的情况下,如果将高通滤波器的增益设定为 0 等较小值,则同样能够总是对模型惯量值进行校正,从而抑制轴间位置偏差。

高通滤波器、PI 校正器 46 的增益是相应于标准模型控制部、位置控制部、速度控制部的响应、机械的构成而决定的,但高通滤波器的增益,根据条件,可以为 0,也可以为直达项。

以下利用图 12,对 PI 校正器 46 进行的用于 PI 校正的比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 的增益切换的例子进行说明。图 12 (a) 是表示速度指令变化的图,图 12 (b) 是表示比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 的变化的图。

由于轴间位置偏差在加减速中途和加减速开始点、结束点等产生较大的值,所以对于 PI 校正增益,在这些点的附近,进行可提高增益等的可变增益。

在图 12 中,示出了在停止时使 PI 增益为 0,在速度指令 w_m^* 进入的瞬间,使增益变为最大,然后单独减小,在某一恒定期间内,使其落到某一恒定值的例子。通过这样的构成,由于在校正中进入很多重要信号的期间,能够进行更多的校正,所以不易受噪声、干扰等的

影响，从而能够提高校正惯量运算的运算精度。

在上述图 12 中，示出了在发生较大轴间位置偏差的加减速中途和加减速开始点、结束点附近提高增益的例子，但在预先知道上位结构体等的动作时序的情况下，通过与沿该时序的时刻对应地来进行可变增益，同样能够提高运算精度。以下利用图 13、图 14，对另一个增益的可变例进行说明。图 13 (a) 是表示速度指令变化的图，图 13 (b) 是表示比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 的变化的图。此外，图 14 (a) 是表示速度指令变化的图，图 14 (b) 是表示比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 的变化的图。

图 13 中是在加速时和减速时轴间位置偏差变大情况下的增益的可变例，其对于校正运算的精度提高和轴间位置偏差的抑制是有效的。

此外，图 14 是在加减速开始点、结束点轴间位置偏差变大情况下的增益的可变例，其对于校正运算的精度提高和轴间位置偏差的抑制是有效的。

模型转矩校正部 32a 不限于上述方式，例如，可以使用如下方式来替代 PI 校正器 46，所述方式是利用以 P 控制或 PID 控制、相位前进补偿、逐次最小二乘法为代表的统计方法的方式。此外，在上述说明中，示出了使用轴间位置偏差通过高通滤波器后得到的值的例子，但也可以直接使用轴间位置偏差，并且对轴间位置偏差设置死区 (dead zone)。

在将第二实施方式的伺服控制器应用于 2 轴驱动机械的控制中的情况下，由于对轴间位置偏差的发生要因直接且实时地校正，所以即使在由于移动台的上位结构体的动作等而使得负载不平衡发生变化的情况下，也能够抑制轴间位置偏差。

此外，与上述专利文献 2 不同，由于是在前馈侧进行校正，所以不必将增益设定得很高，就能够稳定且高速地进行轴间位置偏差的

抑制，从而也能够应用于刚性不高的机械中。此外，在利用 PI 校正等的情况下，由于不必进行数学公式运算，所以能够以较少的运算量得到抑制效果，并且能够容易地应用于不能正确地得到 2 轴间距离或刚性、各部分的质量等机械常数的机械。

第二实施方式的伺服控制器，由于只要将现有的系数乘法器即模型转矩运算部分变更为模型转矩校正部即可，所以能够容易地替换现有的伺服控制器。

此外，通过相应于速度指令或时刻来进行可变增益，能够进一步提高校正惯量值的运算精度，从而能够提高轴间位置偏差的抑制性能。

在上述第二实施方式中，示出了标准模型控制部采用根据位置指令而运算模型位置、模型速度、模型加速度的构成，速度控制部根据从位置控制部输出的速度指令、模型速度以及本轴速度，输出反馈的转矩指令的例子，但也可以不使用模型速度。但是，在高加减速指令的用途中，通过使用模型速度，能够提高轴间位置偏差的抑制性能。

第三实施方式

以下利用图 15，以第一轴伺服控制器 102a 为例，对第三实施方式的伺服控制器的构成和处理进行说明。在图 15 中，1、34~39 与图 10 的相同，所以省略其说明。

模型转矩校正部 32b 利用从标准模型控制部 1 输出的第一轴模型加速度 $aa1$ 和从第二轴伺服控制器（未图示）的标准模型控制部输出的第二轴模型加速度 $aa2$ ，输出校正后的模型转矩 $Ta1$ 。

在第三实施方式的伺服控制器中，采用交换彼此的模型加速度信息的构成。在图 15 中，示出了在第一轴伺服控制器 102a 中使用第二轴模型加速度 $aa2$ 的例子。

以下利用图 16, 对模型转矩校正部 32b 的构成和处理进行说明。

利用加法器 53, 将利用系数乘法器 51 使系数 J11 与从标准模型控制部 31 输出的第一轴模型加速度 aa1 相乘而得到的值和利用系数乘法器 52 使系数 J12 与从第二轴伺服控制器 (未图示) 的标准模型控制部输出的第二轴模型加速度 aa2 相乘而得到的值相加, 输出校正后的模型转矩 Ta1。其中, J11 是为系数乘法器 51 设定的自身惯量, J12 是为系数乘法器设定的干涉惯量。

此外, 对于图 1 所示构成的 2 轴驱动机械的机械惯量, 如果设第一轴惯量为 J1, 第二轴惯量为 J2, 移动台惯量为 J3, 上位结构体的惯量为 J4, 从这 4 个惯量得到的重心附近的转动力矩为 J0, 建立运动方程式, 则能够由下式得到自身惯量 J11 和干涉惯量 J12。

$$J11 = J1 + J3 / 4 + (1 / 2 - x / L)^2 \cdot J4 + J0 / L^2$$

$$J12 = J1 + J3 / 4 + (1 / 2 - x / L)^2 \cdot J4 + J0 / L^2$$

其中, L 是轴间距离, x 是从轴间中心位置到上位结构体中心位置的距离。

因此, 通过将图 16 的系数乘法器 51 的 J11 和系数乘法器 52 的 J12 设定为上式的值, 可以与上述第二实施方式同样地, 得到使实际位置与模型位置一致的正确模型转矩, 向第一轴位置和第二轴位置一致的方向进行控制, 从而抑制轴间位置偏差。

在移动台的负载分配是固定的情况下, 只要将系数乘法器 51、系数乘法器 52 的设定值设定为常数即可, 但在例如上位结构体的位置发生变化等、负载分配变动的情况下, 只要从上位的控制器等变更设定值即可。例如, 可以考虑接受上式的 x (从轴间中心位置到上位结构体中心位置的距离) 的值, 然后进行运算并设定的方法, 或者在上位的控制器中运算惯量值, 然后接受并变更参数值的方法等。

在将第三实施方式的伺服控制器应用于 2 轴驱动机械的控制中的情况下, 能够利用上述动作抑制轴间位置偏差。此外, 有这样的优点, 即, 由于完全是借助于前馈部分来进行校正, 所以即使在增益设

定值错误等情况下，也不会变得不稳定。在预先知道机械常数的情况下，或从上位控制器等得到信息的情况下，第三实施方式的伺服控制器与第一实施方式和第二实施方式相比，能够减轻伺服控制器侧的软件负担。

此外，该伺服控制器与第二实施方式的情况相同，只要将现有的系数乘法器即模型转矩运算部分变更为校正前馈部即可，所以能够容易地替换现有实施例的伺服控制器。

在上述第三实施方式中，示出了标准模型控制部采用根据位置指令而运算模型位置、模型速度、模型加速度的构成，速度控制部根据从位置控制部输出的速度指令、模型速度以及从速度反馈校正部输出的校正速度反馈信号，输出反馈的转矩指令的例子，但也可以不使用模型速度。但是，在高加减速指令的用途中，通过使用模型速度，能够提高轴间位置偏差的抑制性能。

第四实施方式

以下利用图 17，对第四实施方式的第一轴伺服控制器的构成和处理进行说明。在图 17 中，1、3~9 与图 2 的相同，所以省略其说明。

模型转矩校正部 32c 利用从标准模型控制部 1 输出的第一轴模型加速度 $aa1$ 、从第二轴伺服控制器（未图示）的标准模型控制部输出的第二轴模型加速度 $aa2$ 以及作为本轴位置的第一轴位置 $pm1$ 和作为另一轴位置的第二轴位置 $pm2$ ，输出校正后的模型转矩 $Ta1$ 。

以下利用图 18，对模型转矩校正部 32c 的构成和处理进行说明。在图 18 中，41~46 与图 11 的相同，所以省略其说明。

PI 校正器 46 利用比例增益 G_{jp} 和积分增益 G_{ji} 来进行 PI 校正，输出惯量校正值 $\Delta Je1$ 。

利用减法器 54，从自身惯量 $J11$ 中减去惯量校正值 $\Delta Je1$ ，然后利用乘法器 55，使由减法器 54 求出的值与从标准模型控制部 1（未图示）输出的模型加速度 $aa1$ 相乘。利用减法器 56，从干涉惯量 $J12$

中减去惯量校正值 ΔJ_{e1} ，然后利用乘法器 57，使由减法器 56 求出的值与从第二轴伺服控制器（未图示）的标准模型控制部输出的第二轴模型加速度 aa_2 相乘。其中，自身惯量 J_{11} 和干涉惯量 J_{12} ，使用与在图 16 中为标称的系数乘法器 51、标称的系数乘法器 52 设定的数值相同的数值。

利用加法器 58，使由乘法器 55 求出的值和由乘法器 57 求出的值相加，从而得到校正后的模型转矩 T_{a1} 。

在第四实施方式的第一轴伺服控制器的模型转矩校正部 32c 中，通过从自身惯量 J_{11} 中减去由 PI 校正器 46 得到的惯量校正值 ΔJ_{e1} 来进行校正，并且将由 PI 校正器 46 得到的惯量校正值 ΔJ_{e1} 与干涉惯量 J_{12} 相加来进行校正，然后将这些校正后的值分别与模型加速度 aa_1 、 aa_2 相乘而得到的值相加，作为模型转矩 T_{a1} 。

在第四实施方式的第一轴伺服控制器中，作为机械常数而预先得到的负载不平衡，与第三实施方式同样地，通过由标称的系数乘法器 51、52 设定的自身惯量 J_{11} 、干涉惯量 J_{12} 来进行校正。但是，对于机械常数有偏差时产生的不平衡量，与第二实施方式同样地，通过由 PI 校正器 46 得到的惯量校正值 ΔJ_{e1} 来进行校正。通过这些惯量校正，能够有效地抑制轴间位置偏差。对于即使如此也没有完全抑制的轴间位置偏差，与第一实施方式同样地，通过位置反馈校正部 3 和速度反馈校正部 6 来抑制。由此，能够得到非常大的轴间位置偏差的抑制效果。

在将第四实施方式的第一轴伺服控制器应用于 2 轴驱动机械的控制中的情况下，对于作为机械常数而预先得到的负载不平衡，与第三实施方式同样地进行前馈校正，对于该常数有偏差时产生的不平衡量，与第二实施方式同样地进行校正，对于即使如此也没有完全抑制的轴间位置偏差，与第一实施方式同样地通过反馈来进行校正，所以能够得到非常大的轴间位置偏差的抑制效果。

此外，通过同时使用第一～第三实施方式的技术，不必将模型转矩校正部的 PI 校正增益或位置反馈校正部、速度反馈校正部的增益设定得很大，所以能够稳定地得到所希望的轴间位置偏差的抑制效果。

在上述第四实施方式的第一轴伺服控制器中，对同时使用上述第一～第三实施方式所示的技术的例子进行了说明，但可以根据用途，仅同时使用上述第一～第三实施方式所示的技术中的 2 个。此外，也可以对应于速度指令或时刻，切换使用上述第一～第三实施方式所示的技术。

此外，在上述说明中，对将本发明的伺服控制器应用于 2 轴驱动机械的例子进行了说明，但本发明的适用对象不限于 2 轴驱动机械，在 3 轴或 3 轴以上的多个轴的情况下，也可以利用例如本轴以外的多个轴的平均位置与本轴位置之间的位置偏差等来应用本发明。此外，构成 2 轴驱动机械的 2 轴的同步不仅限于 1:1，在 1:N 的情况下，将该比值作为系数相乘，同样能够应用本发明。

此外，以上对使用滚轴丝杠作为执行机构的例子进行了说明，但不限于滚轴丝杠。

此外，对于使用本发明的伺服控制器的机械，不仅适合直线运动系统的同步控制，也同样适合转动系统的同步控制。

工业实用性

如上所述，本发明的伺服控制器，能够应用于低刚性机械或存在位置检测误差这样的 2 轴驱动机械，所以适用于多轴驱动机械的同步控制。

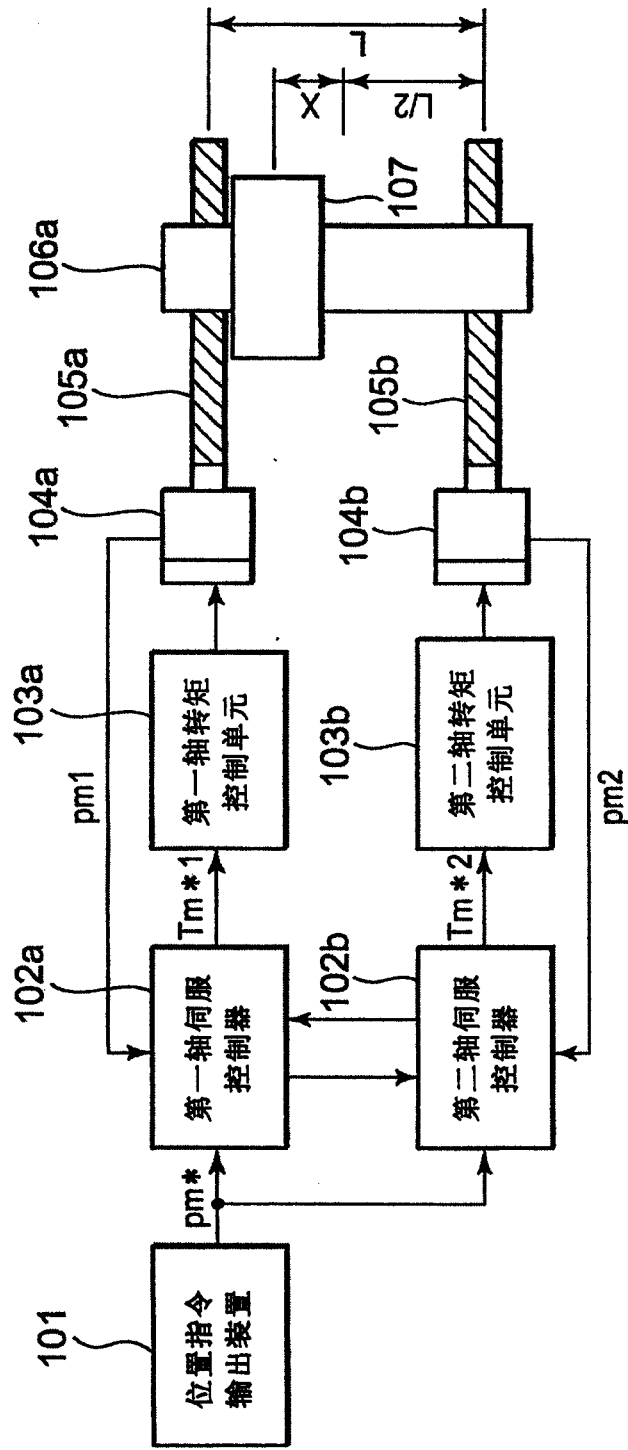


图 1

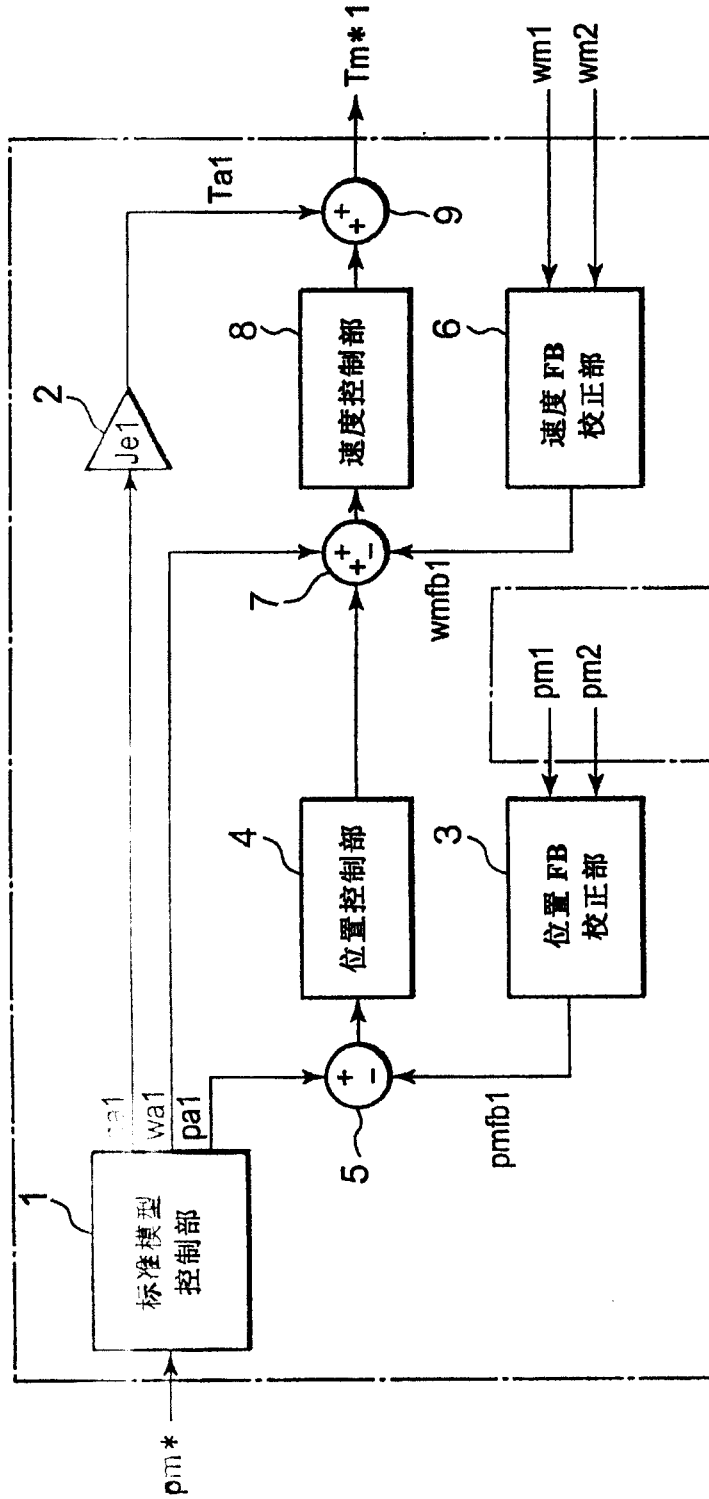


图 2

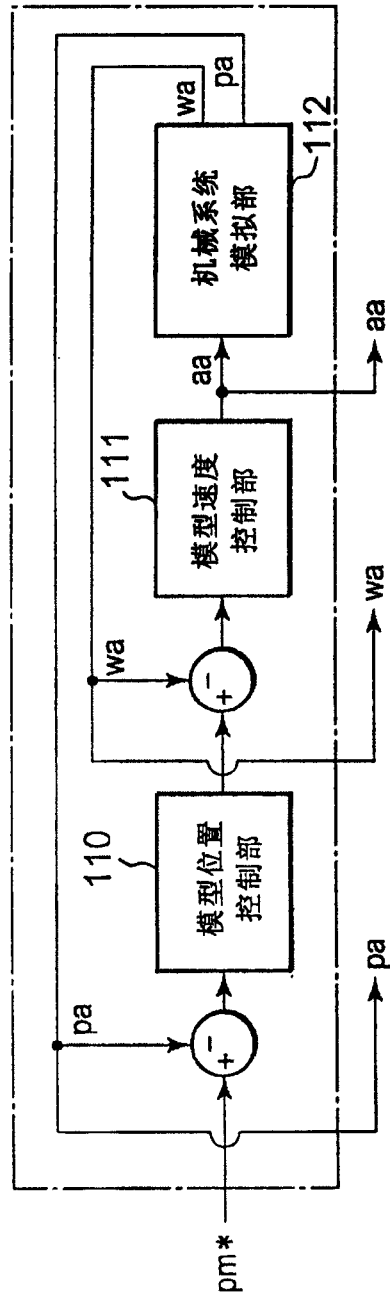


图 3

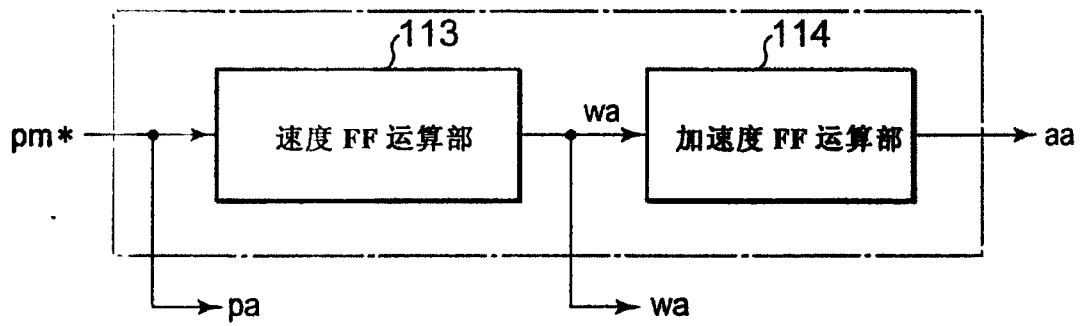


图 4

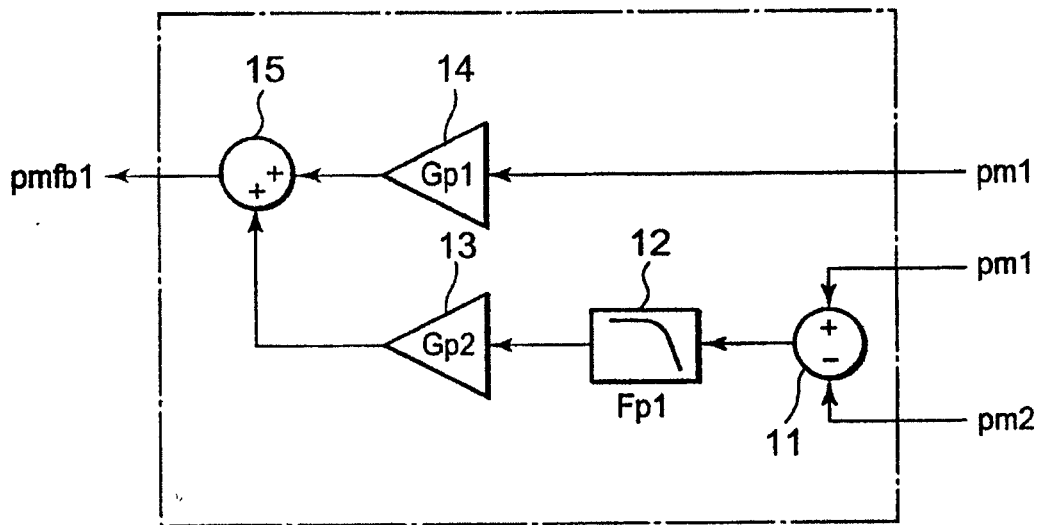


图 5

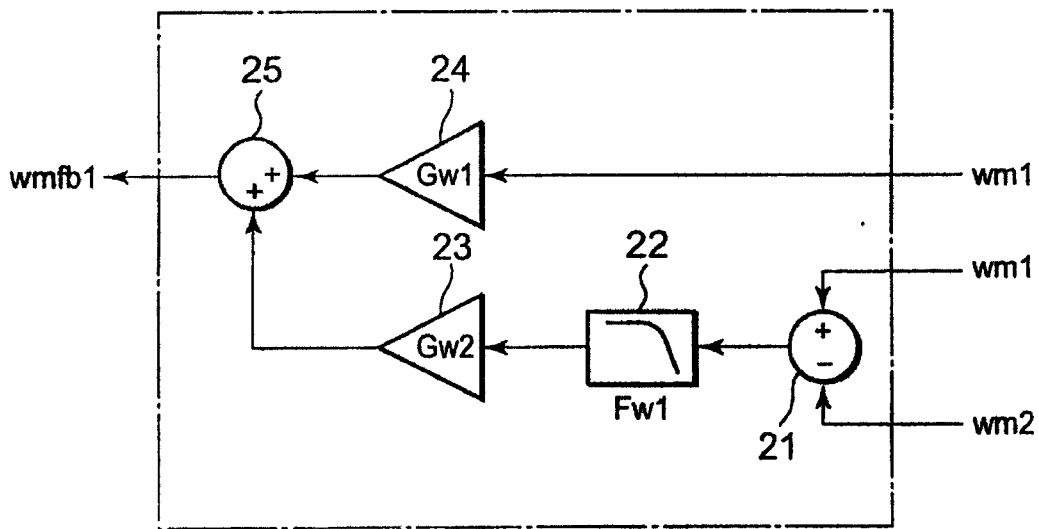


图 6

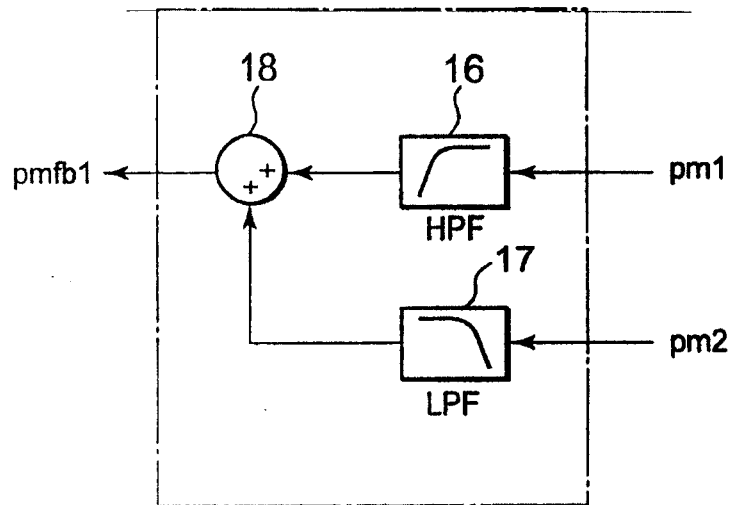


图 7

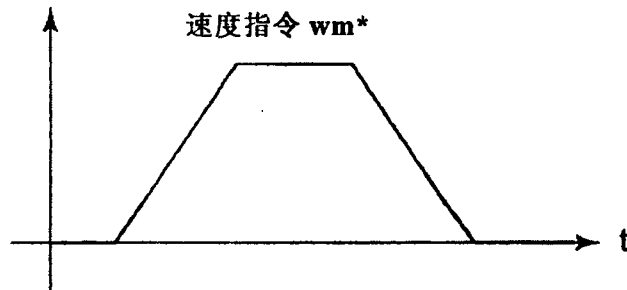


图 8 (a)

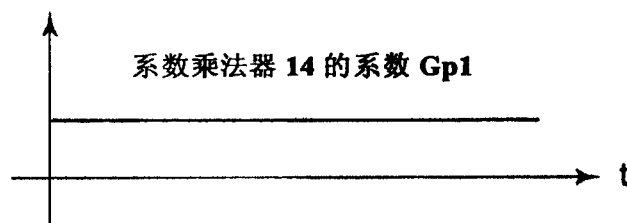


图 8 (b)

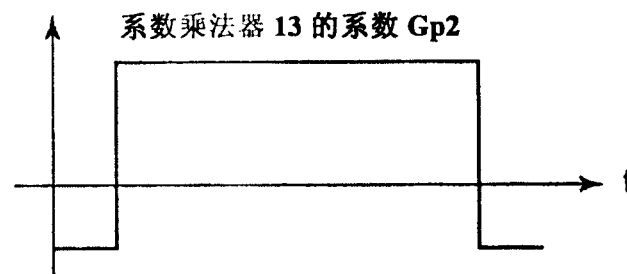


图 8 (c)

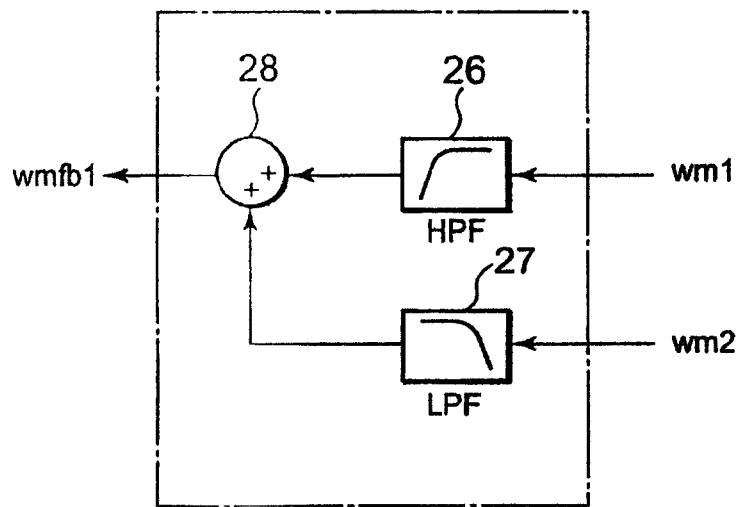


图 9

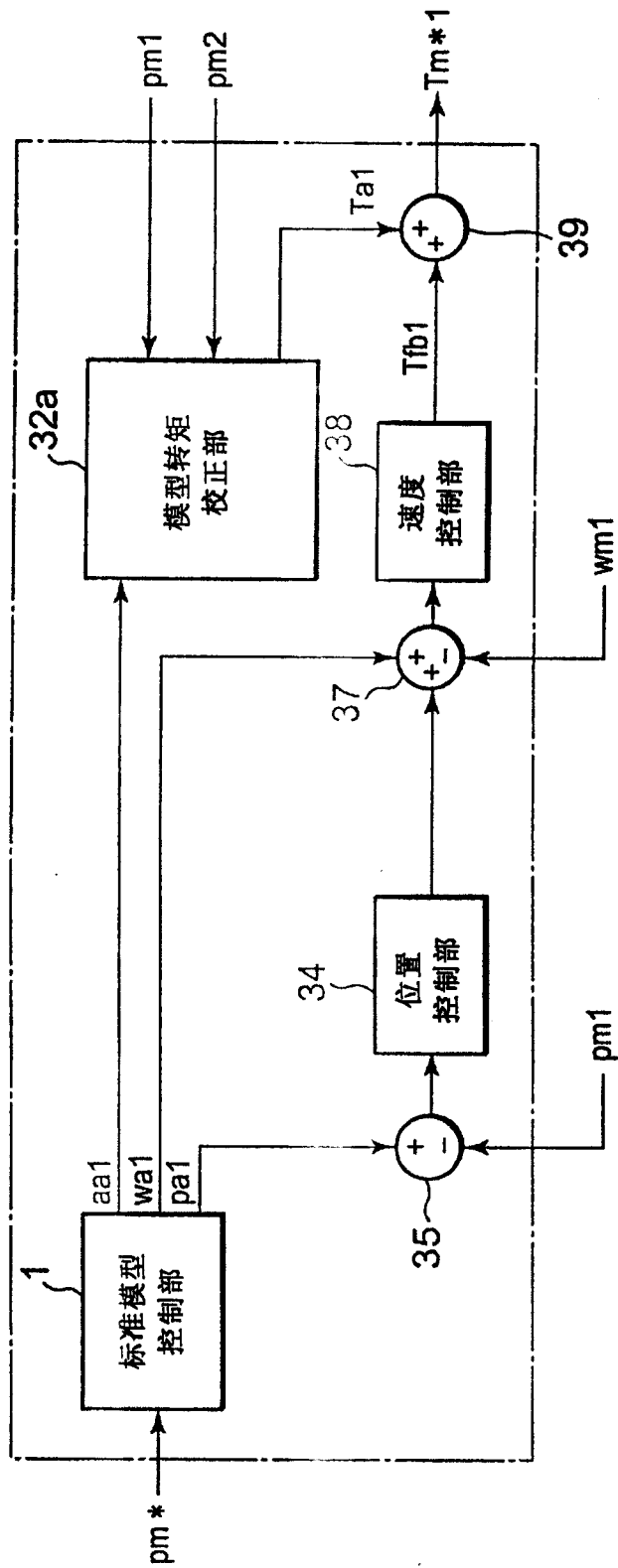


图 10

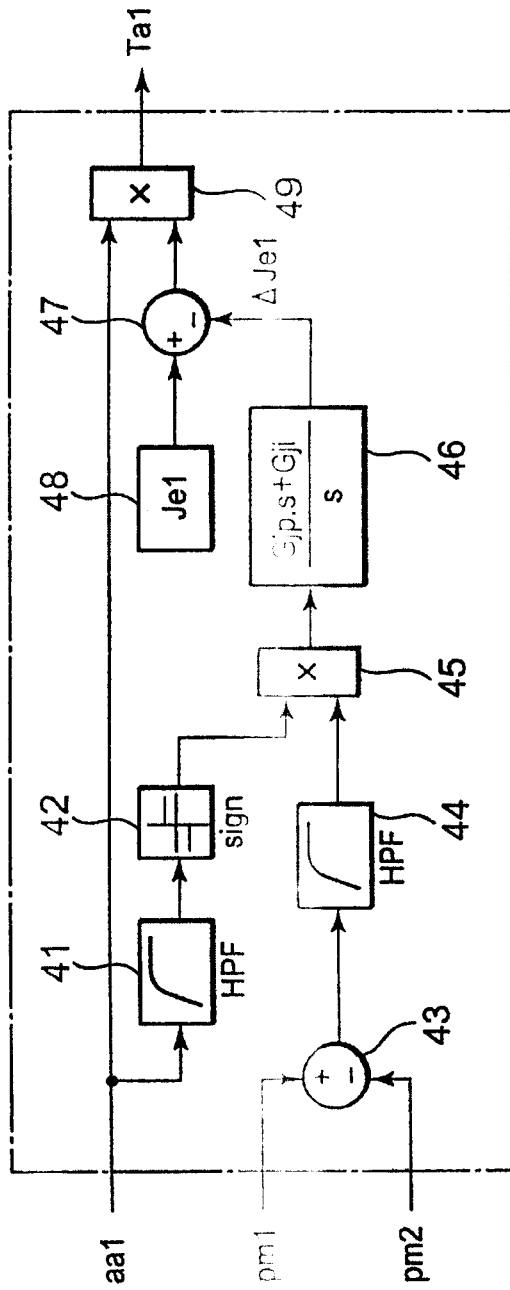


图 11

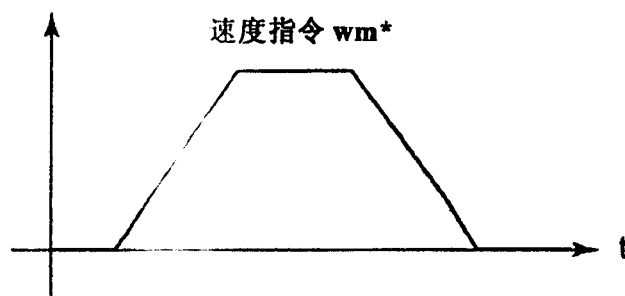


图 12 (a)

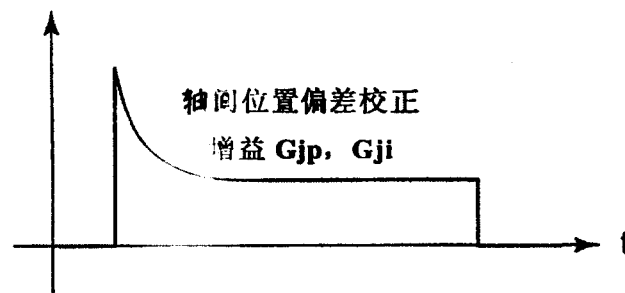


图 12 (b)

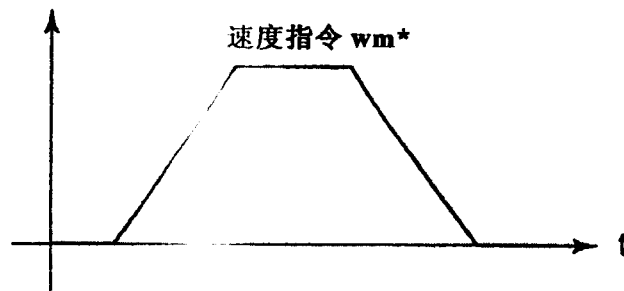
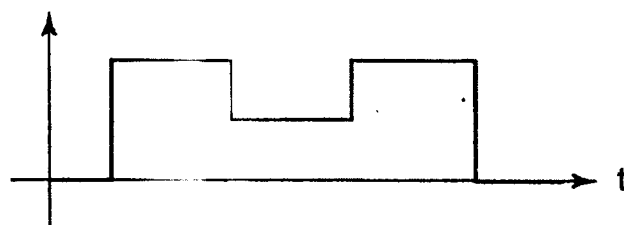


图 13 (a)



轴间位置偏差校正

增益 G_{jp} , G_{ji}

图 13 (b)

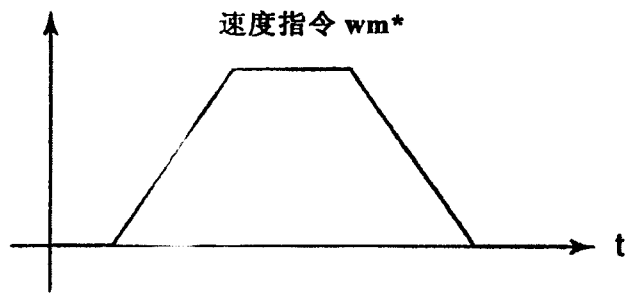


图 14 (a)

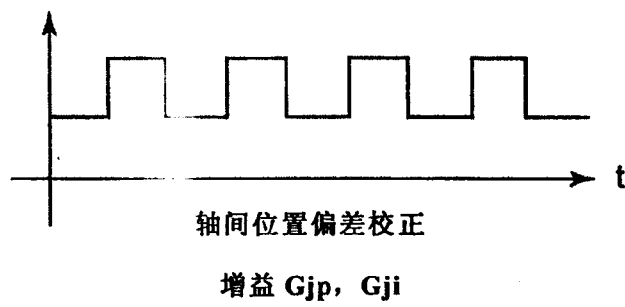


图 14 (b)

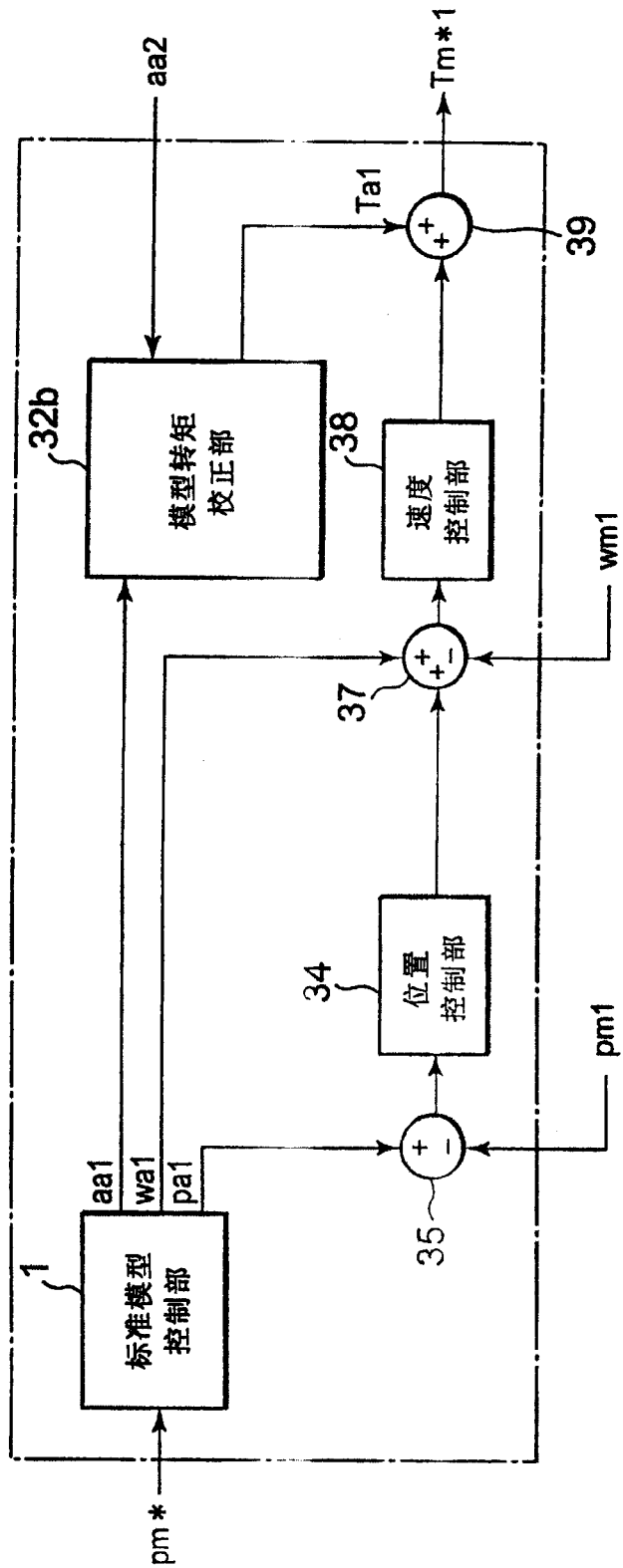


图 15

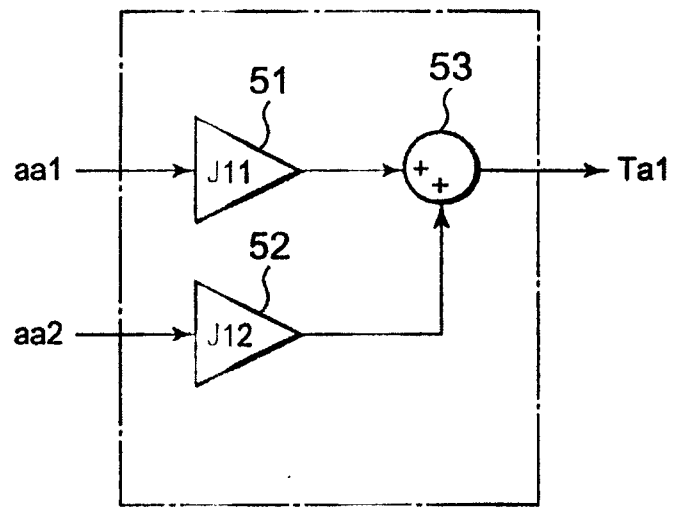


图 16

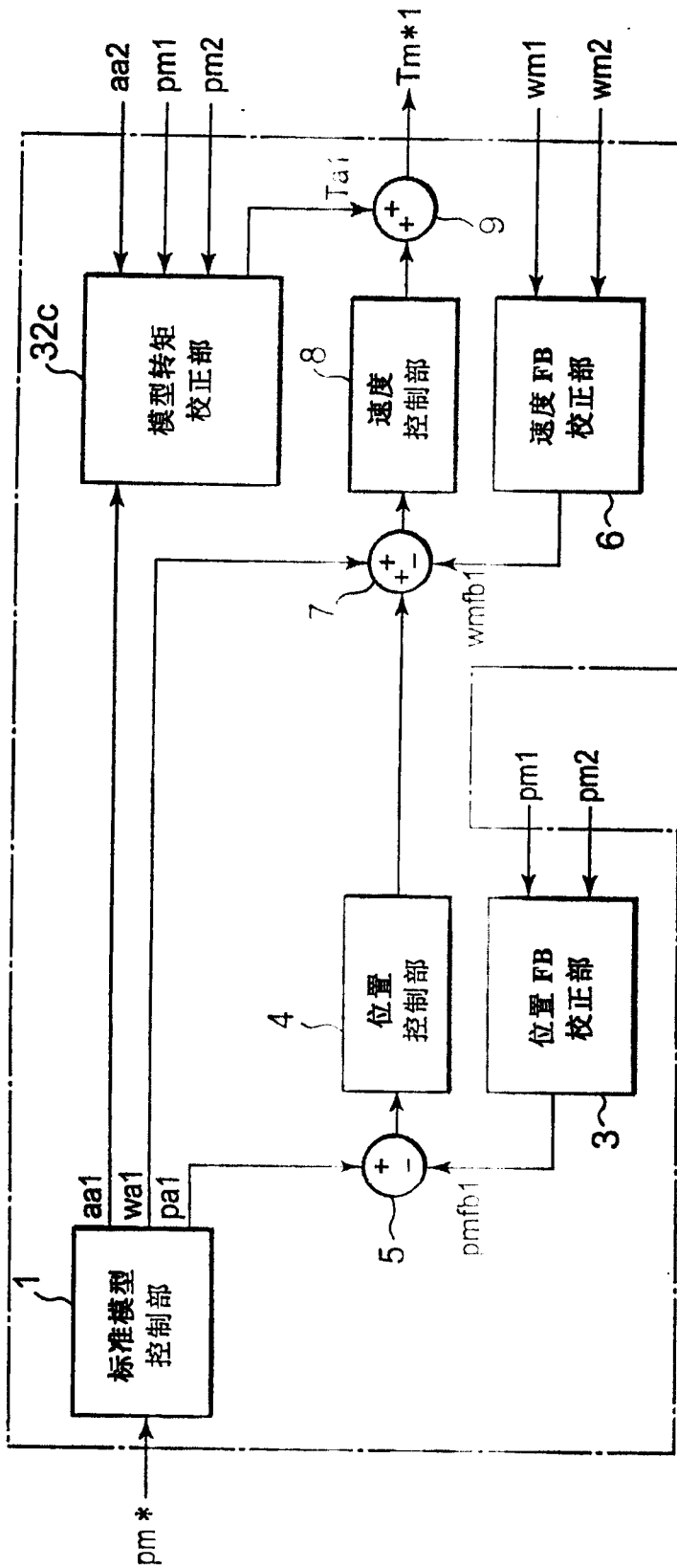


图 17

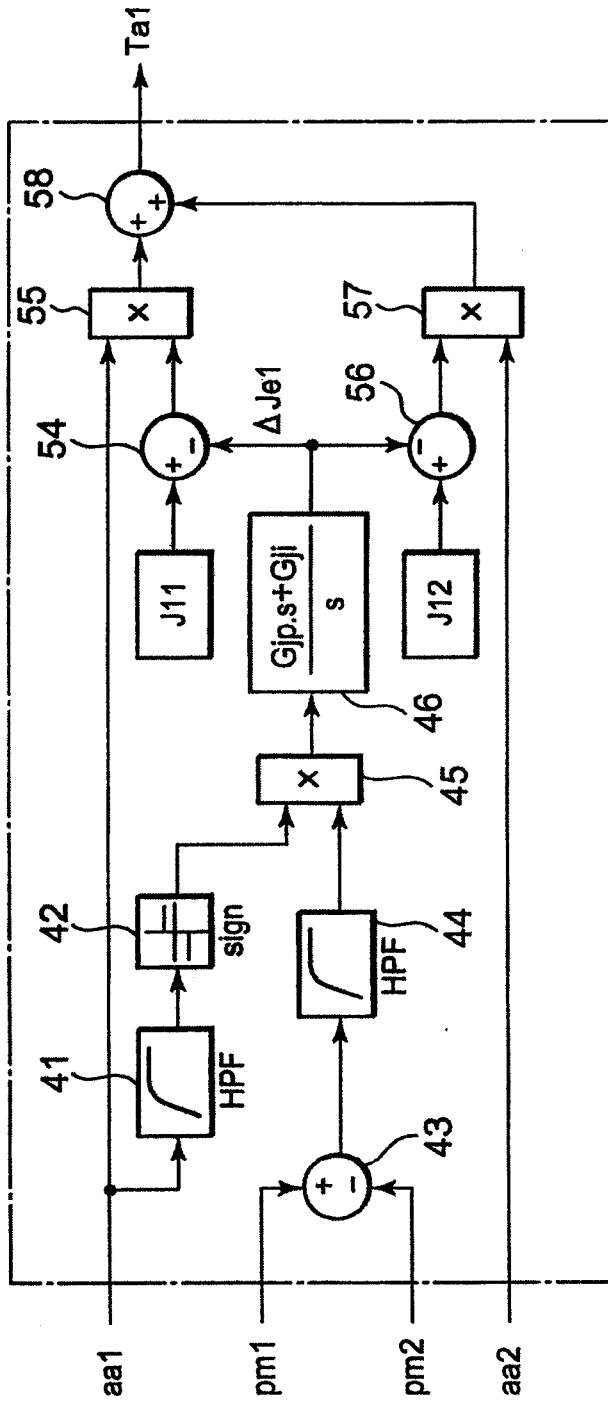


图 18