

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G11B 5/596 (2006.01)

G11B 21/10 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510091082.6

[45] 授权公告日 2007 年 11 月 7 日

[11] 授权公告号 CN 100347753C

[22] 申请日 2005.8.1

[21] 申请号 200510091082.6

[30] 优先权

[32] 2004.7.30 [33] JP [31] 2004-224749

[73] 专利权人 日立环球储存科技荷兰有限公司

地址 荷兰阿姆斯特丹

[72] 发明人 木坂正志

[56] 参考文献

US2003/0060905A1 2003.3.27

US6674601B1 2004.1.6

CN1460995A 2003.12.10

JP2001-126421A 2001.5.11

JP2002-352534A 2002.12.6

审查员 张明霞

[74] 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限责
任公司

代理人 杨林森 谷惠敏

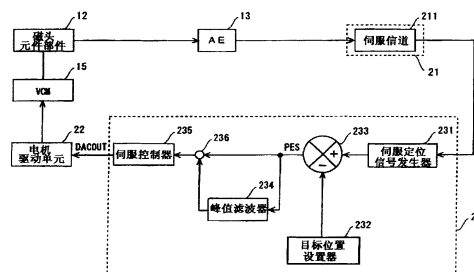
权利要求书 6 页 说明书 23 页 附图 9 页

[54] 发明名称

磁盘驱动器、磁头定位方法和伺服系统

[57] 摘要

本发明的目的是补偿可重复偏离误差而不引起伺服系统的不稳定。HDD1 在伺服系统的反馈路线上具有峰值滤波器 (234)。设计该峰值滤波器 (234) 以便磁盘的旋转频率、包含在该旋转频率中的高频成分以及峰值与旋转频率和高频成分相匹配。所需峰值滤波器在伺服系统中的插入允许补偿由例如偏离磁道圆的事件引起的可重复偏离 (RRO) 误差。同样, 因为系统的 Nyquist 曲线图满足了所需的特征, 可重复偏离误差可以得到补偿且没有因该峰值滤波器的使用而引起伺服系统的不稳定。



1. 一种磁盘驱动器，其具有用于通过使用记录磁盘上记录的伺服信号来执行磁头的定位控制的伺服系统，该伺服系统包括：

磁头定位信号发生器，用以根据从记录磁盘读出的伺服信号，来产生与该磁头的位置相关的磁头定位信号；

峰值滤波器，其在多个频率中的每一个处都具有峰值，该峰值滤波器补偿可重复偏离误差；以及

控制信号输出单元，其根据磁头定位信号、参考信号、以及峰值滤波器的输出，向驱动装置输出控制信号用以移动磁头；

其中，在根据伺服系统的开环传递函数的 Nyquist 曲线图中，当：对于峰值滤波器的除了 $\omega=0$ 之外的 ω_k 的所有峰值中的每一个，其中 k 是大于或等于 1 的整数，

Z_0 是点 $(-1, 0)$ ，

Z_{01} 是没有该峰值滤波器的情况下伺服系统的开环传递函数在 ω_k 处的点，以及

Z_k 是存在该峰值滤波器的情况下伺服系统的开环传递函数在 ω_k 处的点，

此时，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角为 90° 或以下。

2. 如权利要求 1 所述的磁盘驱动器，其中由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角为 60° 或以下。

3. 如权利要求 1 所述的磁盘驱动器，其中由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角为 45° 或以下。

4. 如权利要求 1 所述的磁盘驱动器，其中由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角是 0° 。

5. 如权利要求 1 所述的磁盘驱动器，其中峰值滤波器的每个峰值与记录磁盘的旋转频率的整数倍相匹配。

6. 如权利要求 1 所述的磁盘驱动器，其中：

所述记录磁盘包括多个磁道且每个磁道包括 M 个伺服扇区，以及所述峰值滤波器根据峰值滤波器在第 M 个在先的扇区处的输出与从预设的第 N 个在先的扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数获得的值之和产生输出信号。

7. 如权利要求 6 所述的磁盘驱动器，其中每个状态变量都是根据参考信号和磁头定位信号之间差值的偏差信号。

8. 如权利要求 7 所述的磁盘驱动器，其中：

所述峰值滤波器插在所述偏差信号的输出和控制信号输出单元的输入之间。

9. 如权利要求 7 所述的磁盘驱动器，其中：

所述峰值滤波器将所述偏差信号的输出做为输入，其中的控制信号输出单元的输出与所述峰值滤波器的输出相加。

10. 如权利要求 1 所述的磁盘驱动器，其中：

所述记录磁盘包括多个磁道且每个磁道包括 M 个伺服扇区，以及所述峰值滤波器根据下面的表达式执行处理：

$$u(n)=u(n-M)+\sum_{k=0}^N w_k X(n-k)$$

u: 峰值滤波器的输出，

M: 一个磁道中伺服扇区的数目，

w: 在先设置的实数，

X: 伺服系统中的状态变量，以及

N: 在先设置的自然数,
这里的 Σ 是从 $k=0$ 到 N 中选出的多个项之和。

11. 一种磁盘驱动器, 其具有用于通过使用记录磁盘上记录的伺服信号执行磁头位置控制的伺服系统, 该伺服系统包括:

磁头, 用以访问具有多个磁道且每个磁道包括 M 个伺服扇区的记录磁盘, 该磁头读取每个伺服扇区的伺服信号;

峰值滤波器, 根据从预设的第 N 个在前的扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数获得的值和在第 M 个在前的扇区处的输出值之和输出值; 以及

控制信号输出单元, 根据由每个伺服扇区的伺服信号确定的与磁头的位置相关的磁头定位信号、参考信号、以及峰值滤波器的输出, 向驱动装置输出控制信号用以移动磁头;

其中, 在根据伺服系统开环传递函数的 Nyquist 曲线图中, 当:

对于峰值滤波器的除了 $\omega=0$ 之外的所有极点 ω_k 中的每一个,

Z_0 是点 $(-1, 0)$,

Z_{01} 是没有峰值滤波器的情况下, 伺服系统的开环传递函数在点 ω_k 处的点,

Z_k 是存在峰值滤波器的情况下, 伺服系统的开环传递函数在点 ω_k 处的点,

此时, 由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 90° 或以下。

12. 如权利要求 11 所述的磁盘驱动器, 其中由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 60° 或以下。

13. 如权利要求 11 所述的磁盘驱动器, 其中由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 45° 或以下。

14. 如权利要求 11 所述的磁盘驱动器, 其中:

每个状态变量都是根据参考信号和磁头定位信号之间差值的偏差信号；以及

该峰值滤波器插在偏差信号的输出和控制信号输出单元的输入之间。

15. 如权利要求 11 所述的磁盘驱动器，其中：

每个状态变量都是根据参考信号和磁头定位信号之间差值的偏差信号；以及

所述峰值滤波器将偏差信号的输出做为输入，其中的控制信号输出单元的输出与所述峰值滤波器的输出相加。

16. 如权利要求 11 所述的磁盘驱动器，其中：

所述峰值滤波器根据下面表达式执行处理：

$$u(n)=u(n-M)+\sum_{k=0}^N \omega_k X(n-k)$$

u：峰值滤波器的输出，

M：一个磁道中伺服扇区的数目，

w：在先设置的实数，

X：伺服系统中的状态变量，以及

N：在先设置的自然数，

而这里的 Σ 则是从 $k=0$ 到 N 中选出的多个项之和。

17. 一种磁盘驱动器中的磁头定位控制方法，通过使用记录磁盘上记录的伺服信号来执行磁头的位置控制，该方法包括：

访问记录磁盘，该记录磁盘具有多个磁道且每个磁道包括 M 个伺服扇区；

读出每个伺服扇区的伺服信号；以及

依照由每个伺服扇区的伺服信号确定的与磁头的位置相关的磁头定位信号，参考信号，以及根据从预设的第 N 个在先的扇区到当前扇

区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数获得的值与在第 M 个在先的扇区处生成的峰值滤波器的输出之和的值，

向移动磁头的驱动装置提供控制信号的输出；

其中，在根据伺服系统的开环传递函数的 Nyquist 曲线图中，当：
对于峰值滤波器的除了 $\omega=0$ 之外的所有极点 ω_k ，

Z_0 是点 $(-1, 0)$ ，

Z_{01} 是没有上述的峰值滤波器的情况下，伺服系统的开环传递函数在点 ω_k 处的点，

Z_k 是上述的峰值滤波器存在的情况下，伺服系统的开环传递函数在点 ω_k 处的点，

此时，所述 Z_0 点位于从 Z_{01} 点的邻域经过 Z_k 点向 Z_{01} 点延伸的曲线的外部。

18. 如权利要求 17 所述的磁盘驱动器中的磁头定位控制的方法，其中由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 90° 或以下。

19. 一种伺服系统，用以在磁盘驱动器中定位磁头，该伺服系统包括：

伺服信号读出器，用以读出记录在磁盘上的伺服信号；以及

具有峰值滤波器的控制器，该峰值滤波器的增益在多个频率的每个频率等于该磁盘的旋转速度的整数倍处，等于或大于规定的值，该控制器依照伺服信号、参考信号、以及峰值滤波器的输出，产生控制信号用以控制该磁头的位置；

其中，在根据伺服系统的开环传递函数的 Nyquist 曲线图中，当
对于峰值滤波器的除了 $\omega=0$ 之外的所有峰值 ω_k ，

Z_0 是点 $(-1, 0)$ ，

Z_{01} 是没有峰值滤波器的情况下，伺服系统的开环传递函数在点 ω_k 处的点，以及

Z_k 是峰值滤波器存在的情况下，伺服系统的开环传递函数在点 ω_k

处的点，

此时，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 90° 或以下。

20. 如权利要求 19 所述的伺服系统，其中：

所述磁盘包括多个磁道且每个磁道包括 M 个伺服扇区；以及

所述峰值滤波器根据峰值滤波器在第 M 个在先的扇区处的输出与从预设的第 N 个在先的扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数获得的值之和，产生输出信号。

磁盘驱动器、磁头定位方法和伺服系统

技术领域

本发明涉及磁盘驱动器，磁头的定位方法，以及伺服系统。更具体而言，本发明涉及用滤波处理来补偿重复误差的磁盘驱动器，以及相关的磁头定位方法和伺服系统。

背景技术

使用不同形式的介质如光盘和磁带构成的装置被视为是数据存储装置。在这些装置中，硬盘驱动器（HDD）做为存储装置在计算机中得到广泛的应用，是当前计算机系统中必不可少的存储装置之一。另外，HDD 不仅应用于计算机中；HDD 优良的性能逐渐扩大了它们的应用，例如其作为可移动存储器在动态图像记录/再现设备、汽车导航系统、数码相机或其他产品中的使用。

每个在 HDD 中使用的磁盘都有构成为同心圆形状的多个磁道，地址信息（伺服信息）和用户数据存储在每个磁道上。由薄膜元件构成的磁头通过根据地址信息访问所希望的区域（地址）来读或写数据。磁头固定在浮动块上，浮动块进一步固定在可摆动的托架上。托架由音圈电机(VCM)驱动摆动，这样磁头就能移动到磁盘上所希望的位置。VCM 由 VCM 驱动器驱动，VCM 驱动器根据控制器发出的控制数据通过提供电流来驱动 VCM。

正如上面提到的，每个磁道都有数据区用以存储数据，以及伺服区用以存储伺服信号。磁道 ID、伺服扇区 ID、脉冲模式（burst pattern）等都作为伺服数据存储于伺服区内。磁道 ID 和伺服扇区 ID 分别用来标识磁道和伺服扇区的地址。脉冲模式包含了磁头关于磁道的相对位置的信息，并在磁道跟踪期间使用。每个脉冲模式是一系列区域，在

所述区域中信号按固定间隔径向存储在磁盘上，一个脉冲模式由相位彼此不同的信号存储区的多个簇构成。

数据在磁盘上的读出和写入是在磁盘的旋转状态下通过用伺服信号确认磁头的位置来执行的。控制器计算已经被磁头读出的伺服信号。提供给 VCM 的电流值是根据磁头当前位置和它所希望的位置间的关系而确定的。控制器产生控制信号 DACOUT 以指示计算出的电流值，并提供该电流到 VCM 驱动器。在有偏差的情况下，托架被驱动用来补偿偏差并控制磁头的位置。

尽管通常是用伺服磁道写入器将伺服信号记录在磁盘上，但由于记录期间发生颤动等类似情况，伺服信号不总是能记录成完美的圆形。特殊的误差以可重复偏离(RRO)的形式在磁道跟随期间出现。如果 RRO 相当大，由于磁头（伺服系统）无法跟上该 RRO，其结果是产生磁道跟随误差。当可重复偏离误差的频率成分被限制的时候，例如，如果该偏离仅在磁盘的旋转频率成分处才变大，众所周知，偏离能通过向伺服系统中插入具有该频率峰值的滤波器而得到补偿(例如，这种方法可参考专利文献 1)。

可重复偏离能通过向过去已输入的状态变量进行积分而得到补偿是大家所熟知的。因为这个方法采用的滤波器具有与可重复偏离误差的频率相关的多个峰值，所以该滤波器可以除去所有的可重复偏离误差成分。

专利文献 2 公开了一种技术，用以从位置误差信号 (PES)，即磁头位置信号和目标信号之间的偏差中除去 RRO 成分。从 PES 信号中除去 RRO 成分使得磁头能沿着基本上圆的路线移动，而不是沿着磁道的形状移动。由于伺服系统的操作独立于 RRO，所以防止由 RRO 引起的磁道跟随误差的出现是可能的。

[专利文献 1]

日本专利公开号 Hei 08-328664

[专利参考文献 2]

PCT 专利申请号 2002-544639 的日文译文

发明内容

然而，如果记录格式在形状方面与圆形磁道有较大偏差时，专利文献 2 中的技术是不能够读出磁道伺服信号的。根据控制，有必要将 PES 与一函数相乘，该函数具有频率等于磁盘旋转频率的整数倍的零点。据此，如果存在与旋转频率同步的干扰，这个干扰是不能从 RRO 中分辨出来的。因此，跟随这样的距离是不可能的，这会导致位置误差。同时，正如上面提到的，RRO 成分和与旋转频率同步的干扰是可以通过在伺服系统中插入所需的峰值滤波器而被除去的。然而，这个峰值滤波器的插入，极可能导致伺服系统不稳定。如果系统变得不稳定，磁头就不能在同一位置停留，这样跟随磁道就变得不可能。例如，在专利参考文献 1 的技术中，相位项的选择有可能导致系统变得不稳定。同样，小增益定理作为使系统稳定的充分条件是众所周知的。可是这个定理仅是定义用于稳定系统的一般充分条件的抽象法则，并没有详细指出与满足该充分条件的系统相关的设计和计算方法。例如，系统设计所需要的峰值滤波器，或包括这个峰值滤波器的更具体的伺服系统并没有被描述。所以，在实际的系统设计期间，有必要确定不会引起系统不稳定的峰值滤波器以及包括该峰值滤波器的具体伺服系统的特征。

本发明是以上面的介绍为背景而做出的，本发明的目的是能够在伺服系统中跟随 RRO 而不会使伺服系统不稳定。本发明的前述的和其他目的以及新特点都将在说明书和附图的描述中更容易理解。

下面公开了解决问题的方法。在部分，若干个组成元件相关于以实施例的形式描述的组成元件。但是这些相关描述仅是用来使本发明

更容易理解的，单个的元件不仅仅限于实施例的相关元件。

本发明的第一个实施例是具有伺服系统的磁盘驱动器，该伺服系统通过使用记录在记录磁盘上的伺服信号执行磁头定位控制。在该磁盘驱动器中，伺服系统进一步被划分为：磁头定位信号发生器（例如，伺服定位信号发生器 231），用以从记录磁盘读出的伺服信号中产生与磁头位置相关的磁头定位信号；峰值滤波器（例如，峰值滤波器 234），在多个频率处具有峰值并补偿可重复偏离；以及控制信号输出单元（例如，加法单元 236 和伺服控制器 235 的结合），向驱动装置输出控制信号，该驱动装置根据磁头定位信号、参考信号（例如，目标位置信号）和峰值滤波器的输出来移动磁头；其中，在根据伺服系统开环传递函数的 Nyquist 图中，当对于峰值滤波器的除了“ $\omega=0$ ”之外的“ ω_k ”的所有峰值， Z_0 是点 $(-1, 0)$ ， Z_{01} 是没有上述峰值滤波器的情况下伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点， Z_k 是上述峰值滤波器存在的情况下伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点，此时，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角在 90 度或以下。伺服系统满足上述的条件，这能使 RRO 得到补偿。同样，由于由从 Z_{01} 点到 Z_k 点的直线构成的角度是 90 度或以下，系统的稳定性可以获得。

由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角优选为 60 度或以下。由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角进一步优选为 45 度或以下。当依照上述条件限制处理负载的时候，通过这种方式可保证相位余量，系统的稳定性可以获得。

由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角优选为 0 度或以下。在这种情况下伺服系统的稳定性可以进一步提高。另外，优选峰值滤波器的每个峰值应当与记录磁盘的旋转频率的整数倍数相一致。这样，对 RRO 的更可靠的补偿变为可能。

优选地，记录磁盘应当包括多个磁道且每个磁道都有 M 个伺服扇区，峰值滤波器将根据峰值滤波器在第 M 个在前的扇区处生成的输出与磁头从预设的第 N 个在前的扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数而获得的值之和，产生输出信号。通过提供这种处理，可以容易地实现在频率等于旋转频率的整数倍处具有峰值的峰值滤波器。

作为优选的例子，上面提到的记录磁盘应当包括多个磁道且每个磁道都有 M 个伺服扇区，峰值滤波器应当根据下面的表达式执行处理：

$$u(n)=u(n-M)+\sum_{k=0}^N w_k X(n-k)$$

这里 u：峰值滤波器的输出，M：一个磁道中的伺服扇区的数目，w：在先设置的实数，X：伺服系统中的状态变量，以及 N：在先设置的自然数。而 Σ 则是从“k=0 到 N”之间选出的多个项值之和。上面的状态变量可以是根据前面的参考信号和前面的位置信号之间的差值的偏差信号。

上面的状态变量可以是根据前面的参考信号和前面的位置信号之间的差值的偏差信号，峰值滤波器可以是插在前面偏差信号的输出和前面控制信号输出单元的输入之间的元件。可选地，上述的状态变量可以是根据前面的参考信号和前面的位置信号之间的差值的偏差信号，峰值滤波器可以将前面偏差信号的输出作为输入，以及将前面控制信号输出单元的输入和峰值滤波器的输出进行相加。

本发明的第二实施例是具有伺服系统的磁盘驱动器，伺服系统通过使用在记录磁盘上记录的伺服信号来执行磁头的定位控制。在该磁盘驱动器中，伺服系统进一步被划分为：磁头，用来访问包含多个磁道且每个磁道包含 M 个伺服扇区的记录磁盘，以及读取与每个伺服扇区相关的伺服信号；峰值滤波器，根据磁头从预先设置的第 N 个在先

的扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量（例如 PES）乘以加权系数获得的值与在第 M 个在先的扇区处生成的峰值滤波器的输出之和，输出值；以及控制信号输出单元，依照由每个伺服扇区的伺服信号确定的与磁头位置相关的磁头定位信号、参考信号、以及峰值滤波器的输出信号，向驱动装置输出控制信号用以移动磁头；其中，在根据伺服系统的开环传递函数的 Nyquist 图中，当对于峰值滤波器的除了“ $\omega_k=0$ ”之外的“ ω_k ”的所有峰值， Z_0 是点 (-1, 0)， Z_{01} 是没有上述的峰值滤波器的情况下，伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点， Z_k 是上述的峰值滤波器存在的条件下，伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点，此时，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 90 度或以下。伺服系统满足上述条件，而这能补偿 RRO 而不会使系统不稳定。

优选地，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角为 60 度或以下。更加优选地，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线所形成的夹角为 45 度或以下。当依照上述条件限制处理负载的时候，通过在这种方式下保证相位余量，系统的稳定性可以获得。

上面的状态变量可以是根据前面的参考信号和前面的位置信号之间的差值的偏差信号。峰值滤波器可以是前面偏差信号的输出和前面控制器的输入之间插入的元件。可选地，上述的状态变量可以是根据前面的参考信号和前面的位置信号之间的差值的偏差信号，峰值滤波器可以将前面偏差信号的输出作为输入，以及将前面控制器的输出和峰值滤波器的输出进行相加。

作为优选的例子，上述的峰值滤波器应当根据下面的表达式执行处理：

$$u(n)=u(n-M)+\sum_{k=0}^N w_k X(n-k)$$

这里 u : 峰值滤波器的输出, M : 一个磁道中的伺服扇区数目, w : 在先设置的实数, X : 伺服系统中的状态变量, 以及 N : 在先设置的自然数。而 Σ 则是从“ $k=0$ 到 N ”之间选出的多个项值之和。

本发明的第三个实施例是一种磁盘驱动器中的磁头定位控制方法, 旨在通过使用在记录磁盘上记录的伺服信号来执行磁头的定位控制。该方法包括: 访问记录磁盘, 该磁盘具有多个磁道且每个磁道包含 M 个伺服扇区; 读出与每个伺服扇区相关的伺服信号; 以及, 依照三个因素, (1) 由每个伺服扇区的伺服信号确定的与磁头位置相关的磁头位置信号, (2) 参考信号, 以及 (3) 根据磁头从预先设置的第 N 个在先扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数获得的值与在第 M 个在先的扇区处生成的峰值滤波器的输出之和的值, 向驱动装置提供控制信号的输出用以移动磁头; 其中, 在根据伺服系统的开环传递函数的 Nyquist 曲线图中, 当对于峰值滤波器的除了“ $\omega_k=0$ ”之外的所有极点“ ω_k ”, Z_0 是点 $(-1, 0)$, Z_{01} 是没有上述的峰值滤波器的情况下伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点, Z_k 是上述的峰值滤波器存在的情况下伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点, 此时, Z_0 点是位于从 Z_{01} 点的邻域经过 Z_k 点向 Z_{01} 点延伸的曲线外的一点。依据本实施例, 通过使用在第 M 个在先的扇区处生成的输出值和多个状态变量乘以加权系数而获得的乘积, 有效补偿 RRO 的峰值滤波器可以在磁盘驱动器中构成。同样, 传递函数满足上述条件就能获得系统的稳定性。在方便系统稳定性设计方面, 优选由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角设定为 90 度或以下。

本发明的第四实施例是一个伺服系统, 用以在旋转体上定位被控制的物体, 其中的伺服系统包括: 伺服信号读出器, 用以读出记录在旋转体上的伺服信号; 以及具有峰值滤波器的控制器, 该峰值滤波器的增益在各个等于旋转体的旋转速度的整数倍的频率处等于或大于规

定的值，根据上面读出的伺服信号、参考信号、以及峰值滤波器的输出，控制器产生控制信号，用来控制要被控制的物体的位置；其中，在根据伺服系统的开环传递函数的 Nyquist 曲线图中，当对于峰值滤波器的除了“ $\omega_k=0$ ”之外的所有“ ω_k ”峰值中的每一个， Z_0 是点 $(-1, 0)$ ， Z_{01} 是没有上述的峰值滤波器的情况下伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点， Z_k 是上述的峰值滤波器存在的情况下伺服系统的开环传递函数在“ ω_k ”处的点，此时，由 Z_0 点延伸到 Z_{01} 点的直线和 Z_{01} 点延伸到 Z_k 点的直线形成的夹角为 90 度或以下。伺服系统满足上述条件，并且这能补偿 RRO 而不会使系统不稳定。

优选地，前面的旋转体包括多个磁道且每个磁道包括 M 个伺服扇区，并且前面的峰值滤波器，根据峰值滤波器在第 M 个在先的扇区处生成的输出与从预设的第 N 个在先的扇区到当前扇区的移动期间输入的多个状态变量乘以加权系数获得的值之和，产生输出信号。通过提供这种处理，可以方便地实现在等于旋转频率整数倍的频率处具有峰值的峰值滤波器。

依照本发明，RRO 可以被跟踪而不引起伺服系统的不稳定。

附图说明

图 1 是显示依照本发明的硬盘驱动器的示意性结构的方框图；

图 2 是显示依照本发明的伺服系统的结构的方框图；

图 3 是显示依照本发明伺服系统的另一结构的方框图；

图 4 是显示依照本发明的伺服系统处理流程的流程图；

图 5A、5B、5C 显示的是依照本发明的伺服系统开环传递函数的 Nyquist 曲线图；

图 6 显示的是依照本发明的伺服系统的开环传递函数的极点；

图 7 是显示依照本发明的伺服系统的开环传递函数所满足的条件 Nyquist 曲线图；

图 8A 和 8B 是其他的 Nyquist 曲线图，显示了依照本发明的伺服

系统的开环传递函数所满足的条件；

图 9 仍是另一个 Nyquist 曲线图，显示的是依照本发明的伺服系统的开环传递函数满足的条件。

具体实施方式

下面描述用于本发明的一个实施例。下面的描述涉及本发明的一个实施例，本发明不限于也不受限于下面描述的实施例。为了说明书的简明和清楚，下面的描述和附图做了适当的省略和简化。同样，下面实施例中的每个部件由本领域技术人员可以容易地修改、添加、以及在本发明范围内替换都将是理解的。在每个附图中，同一部件被分配相同的标号，为了说明书的简明和清楚，重复的描述已经按要求省略。

本实施例的硬盘驱动器(HDD)在伺服系统的反馈路线上有峰值滤波器。该峰值滤波器的设计，使磁盘旋转速度处和旋转速度中包含的高频成分中的增益采取规定的值或以上，尤其设计成使旋转速度、其高频成分、以及峰值相匹配。所需的峰值滤波器在伺服系统的插入允许补偿由于例如磁道圆度的偏差事件而导致的可重复偏离(RRO)误差。同样，使用具有所需特征的峰值滤波器允许补偿可重复偏离误差而不会引起由于峰值滤波导致的伺服系统的不稳定。

在此略述安装伺服系统的 HDD 的总体结构，用以说明依照本实施例的伺服系统。图 1 是显示依照本实施例的 HDD1 的示意性结构的方框图。HDD1 在其方框 10 中具有：磁盘 11，其实例为旋转磁盘（记录磁盘）；磁头元件部件 12，其实例为磁头；臂电子元件（AE）13；主轴电机（SPM）14；以及音圈电机（VCM）15。HDD1 同样有电路板 20 固定在方框 10 外面。在电路板 20 的上面具有：读/写信道（R/W 信道）21；电机驱动单元 22；硬盘控制器（HDC）/MPU 集成电路（HDC/MPU）23；以及 RAM24。这些组成元件仅是示例；例如，它们同样可以组装在一个芯片上。

从外部主机（未在图中示出）中得到的准备写入的数据由 HDC/MPU23 来接收，然后经 R/W 信道 21 和 AE13 由磁头元件部件 12 写到磁盘 11 上面。另外，存储在磁盘 11 中的数据由磁头元件部件 12 读出，这样读出的数据经由 AE13 和 R/W 信道 21 从 HDC/MPU 输出到外部主机。

接着，在下面描述 HDD1 的结构元件。首先概述磁盘 11 和磁头元件部件 12 的驱动机制。磁盘 11 固定在 SPM 14 的旋转轴上面。该 SPM 14 由电机驱动单元 22 驱动，SPM 14 按所需的速度旋转磁盘 11。磁盘 11 的双面都有记录表面用来记录数据，以及与每个记录表面相关的磁头元件部件 12。每个磁头元件部件 12 固定在浮动块（未示出）上面。同样，该浮动块固定在托架（未示出）上。托架固定在 VCM 15 上，并摆动使浮动块和磁头元件部件 12 在磁盘 11 的表面径向移动，磁头元件部件 12 由此可以访问所希望的区域。

典型地，记录磁头将电信号转换成与存储在磁盘 11 上的数据相一致的磁场，而再现磁头将从磁盘 11 提供的磁场重新恢复为电信号，它们一起组成了磁头元件部件 12。磁盘 11 的数目可以是一个或多个，记录表面可以仅由每个磁盘 11 的一面组成或者双面组成。另外，本发明的伺服系统可以应用于或是仅具有再现磁头或是仅具有记录磁头的装置。

接着，下面描述电路结构。AE 13 从多个磁头元件部件 12 中选择一个要进行数据访问的磁头元件部件 12，以固定的增益预先放大由选中的磁头元件部件 12 再现的信号，并将该再现信号发送至 R/W 信道 21。AE 13 同样发送从 R/W 信道 21 中接收的记录信号至选中的磁头元件部件 12。

R/W 信道 21 对从主机获得的数据执行写处理。在写处理期间，

R/W 信道 21 将 HDC/MPU 23 提供的写数据调制成代码,进一步将经代码调制过的写数据转换为写信号(电流),并将这些数据提供到 AE 13。同样,当分配数据到主机的时候,R/W 信道 21 执行读处理。R/W 信道 21 在读处理期间,从 AE 13 接收读出信号后,放大这个信号以获得固定的幅度,然后从获得的读出信号中提取数据,并解码该数据。这样读出的数据包括用户数据和伺服数据。经解码的读出数据被分配给 HDC/MPU 23。

HDC/MPU 23 是将 HDC 和 MPU 集成为一块芯片的电路。MPU 依照装载在 RAM 24 中的微代码来操作,除了例如磁头元件部件 12 的定位控制、接口控制、以及缺陷管理的全部 HDD1 控制之外,还执行必要的数据处理。当 HDD1 开始运行时,除了在 MPU 上运行的微代码之外,从磁盘 11 或 ROM(未示出)装载控制所需和数据处理所需的数据到 RAM 24 中。

由 R/W 信道 21 读出的数据包括伺服数据以及用户数据。HDC/MPU 23 执行使用伺服数据的磁头元件部件 12 的定位控制。从 HDC/MPU 23 发出的控制信号(数字信号)输出到电机驱动单元 22。电机驱动单元 22 依照控制信号的特定级别向 VCM 15 提供驱动电流。

接着,下面描述本实施例的 HDD1 中的伺服系统。图 2 是显示本实施例中伺服系统结构的方框图。R/W 信道 21 包括伺服信道 211,用以从 AE 13 的信号输出中提取伺服信号。HDC/MPU 23 包括:伺服定位信号发生器 231,用以产生伺服定位信号;目标位置设置器 232,为磁头元件部件设置目标位置;位置误差信号发生器 233,根据伺服定位信号和作为参考信号从目标位置设置器 232 发出的目标位置信号产生位置误差信号(PES);峰值滤波器 234;以及伺服控制器 235,向电机驱动单元 22 输出数字控制信号(DACOUT),用以控制 VCM 15(亦即控制 VCM15 的电流)。

每个 HDC/MPU 23 的内部组元都可以由硬件结构或由 MPU 上的微代码操作来实现。合适的硬件/软件结构根据设计而选择。执行必要处理的逻辑模块同样可以依照适当的设计由任意的硬件结构组装而成。

伺服信号径向记录在磁盘 11 上。每个伺服信号（伺服再现信号）包括间隔、伺服 AGC(自动增益控制)信息、伺服地址、以及脉冲模式。该间隔消除了由例如转速的变化因素引起的定时误差。伺服 AGC 信息是用来确定受 AGC 控制的伺服信号增益的。伺服地址包括柱面 ID、伺服扇区号、以及其他地址信息。通过数字化特定的再现信号的幅度或其他因素的变化，脉冲模式用来执行磁头元件部件 112 的磁道控制（磁道跟踪），或者类似的控制。

在磁盘 11 上的每个伺服信号都是从磁头元件部件 12 中读出，通过 AE 13 放大，然后输入至伺服信道 211。伺服信道 211 在所需的控制期间内被激活并从 AE 13 获取伺服信号。伺服信道 211，在从 AE 13 获取模拟伺服信号后，同样以所要求的采样频率将模拟信号转换为数字信号。伺服信道 211 进一步将 A/D 转换后的信号解码为伺服地址。这样解码得到的地址以及经 A/D 转换后的脉冲串信号都被传送到伺服位置信号发生器 231 中。

根据从伺服信道 211 发出的伺服信号，伺服定位信号发生器 231 产生伺服定位信号，用以指示磁头元件部件 12 的当前位置。目标位置设置器 232 输出目标位置信号，用以指示磁头元件部件 12 将移动到的目标位置。位置误差信号发生器 233 比较伺服定位信号和目标位置信号并产生信号（PES），用以指示当前位置相对于目标位置的偏差的大小和方向。PES 信号指示磁头元件部件 12 在磁盘 11 的径向方向的内部或外部与目标位置偏了多远。

由位置误差信号发生器 233 产生的 PES 信号被输入到峰值滤波器

234 中。峰值滤波器 234 在频率等于磁盘 11 的旋转频率的整数倍（包括 $\times 1$ ）处有多个峰值。当来自 AE13 的模拟信号转换成数字信号时，峰值滤波器 234 在所有频率小于 Nyquist 频率且等于旋转的整数倍处存在峰值。

从位置误差信号发生器 233 产生的信号 PES，和峰值滤波器 234 的输出由加法单元 236 加在一起。加法单元 236 这样产生的信号随后输入到伺服控制器 235 中。根据信号 PES 以及峰值滤波器 234 的输出信号，伺服控制器 235 产生用以控制 VCM 15 的控制信号 DACOUT。该 DACOUT 信号即到电机驱动单元 22 的 DAC 的输出信号，被输入到电机驱动单元 22，然后 DA 转换 DACOUT 并提供所需值的电流至 VCM 15。

正如上面所述，在本实施例的伺服系统中，根据位置误差信号发生器 233 的 PES 信号和从过滤信号 PES 的峰值滤波器 234 发出的输出信号，伺服控制器 235 产生用于 VCM 15 的控制信号。峰值滤波器 234 具有多个峰值，同时在频率等于旋转频率的整数倍处，还具有等于或大于规定值的增益。具体地，在当前的例子中，优选实施例中的峰值滤波器 234 在多个等于旋转频率整数倍的频率处具有峰值。伺服信号中的可重复偏离误差通过在伺服系统的反馈电路中插入峰值滤波器 234 可以得到有效补偿。

在这种情况下，峰值滤波器的插入位置不限于位置误差信号发生器 233 的输出和伺服控制器 235 的输入之间的部分。代替上面的情况，如图 3 所示，峰值滤波器 237 可插在 PES 信号的输出部分和 DACOUT 的输入部分之间。根据从位置误差信号发生器 233 接收的 PES 信号，伺服控制器 235 产生控制信号。同样，位置误差信号发生器 233 发出的 PES 信号被输入到峰值滤波器 237 中。峰值滤波器 237 发出的输出信号和伺服控制器 235 发出的控制信号都被输入到加法单元 238 中，加法单元 238 产生的信号随后作为控制信号 DACOUT 输入到电机驱动

单元 22。

如上所述，可重复偏离误差可以通过在伺服系统的反馈信道中插入所需的峰值滤波器 234 或 237 而得到补偿。下面将描述峰值滤波器 234 和 237 以及包括峰值滤波器的伺服系统的特征。本实施例中的峰值滤波器计算在第 M 个在先的扇区（M 是一个磁道中伺服扇区的数目，等于磁头之前的一整周）处生成的峰值滤波器的输出，与在移动到当前伺服扇区之前被读出的选出的多个伺服扇区的状态变量乘以加权系数而获得的值之和。这就是说，峰值滤波器按照下面的数字表达式执行运算处理：

$$u(n)=u(n-M)+\sum_{k=0}^N w_k X(n-k) \quad (1)$$

在上面的数字表达式（1）中，“u”是峰值滤波器输出，M 是在一个磁道中伺服扇区的数目，“w”是在先设置的实数，X 是在伺服系统中的状态变量，以及 N 是在先设置的自然数。而在上面表达式中的 Σ 则是从“k=0 到 N”中选出的多个峰值之和。所选出的多个项的个数或哪一项将要选出在设计时确定。PES 信号或输出到电机驱动单元 22 的输出信号 DACOUT 作为状态变量 X 来使用。

下面描述的是元件的例子，其功能相当于峰值滤波器 234 或 237 对在第 M 个在先的扇区处生成的滤波器输出，和从 M 个在先扇区的需要数目的状态变量（亦即在磁头的前面的一整周的结尾处），具体地即误差成分 PES 进行积分。亦即，在前面的描述中，PES 信号就相当于状态变量 X。峰值滤波器 234 或 237 执行由下面的表达式确定的运算处理：

$$u(n)=u(n-M)+\sum_{k=0}^K w_k PES(n-(M-k)) \quad (2)$$

这里的 K 是在设计时就预设的自然数。同样，不同于数字表达式

(1), Σ 表示从 “k=0” 到 “K” 的各个项之和。

这些数字表达式的 Z 变换被表达为 “ $f(z)/(z^M-1)$ ”, 其中的 “ $f(z)$ ” 是 “z” 的所要求的函数, 这个传递函数在 “z” 满足 “ $z^M=1$ ” 处有极点。如上所述, 峰值滤波器 234 或 237 在磁盘 11 的旋转频率和高阶频率的所有位置都有峰值, 因此可以在所有的频率处除去可重复偏离误差成分。

执行上述数字表达式 (2) 的运算处理的峰值滤波器 234 或 237, 根据与从第 M 个在先扇区到当前扇区的多个扇区相关的状态变量乘以加权系数获得的值与在第 M 个在先的扇区处生成的滤波器的输出之和, 确定输出值。与从第 M 个在先扇区到当前扇区的多个连续扇区相关的 PES 信号 [PES (n-M)到 PES(n-M+k)] 在数字表达式 (2) 的例子中使用。然而, 如数字表达式 (1) 所示, 具体使用与从第 M 个在先扇区到当前扇区的多个扇区相关的信号 PES 的那些部分根据设计确定。例如, 可以使用与从当前扇区开始的一定数目的在先扇区 [PES(n)到 PES(n-N)] 相关的信号, 其在上面表达式的积分中相当于等式 (2) 中 “M-k” 到 “k” 的变化。伺服系统通过数字处理确定控制信号 DACOUT, 并且在比旋转频率更高阶的频率中, 仅那些低于 Nyquist 频率的才会成为问题。

在 $M>3$ 的系统中具有 $K=3$ 的值的峰值滤波器 234 或 237 在下面示出作为依照上述表达式 (2) 的元件的例子。峰值滤波器 234 依照下面的数字表达式 (3) 执行运算处理:

$$u(n)=u(n-m)+W_{M,3}PES(n-M+3)+W_{M,2}PES(n-M+2) \quad (3) \\ +w_{M,1}PES(n-M+1)+w_M P E S (n - M)$$

这相当于 $M>3$ 以及 $f(z)$ 被赋值给三次多项式的情况。更具体地, 上面数字表达式 (3) 的 Z 变换给出 $f(z)$ 如下:

$$\begin{aligned}
 U(z) &= z^{-M}U(z) + w_{M-3}z^{3-M}PES(z) + \dots + w_M z^{-M}PES(z) \\
 U(z) &= (w_{M-3}z^3 + \dots + w_M)PES(z)/(z^M - 1) \\
 f(z) &= w_{M-3}z^3 + w_{M-2}z^2 + w_{M-1}z + w_M
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

下面参考图 4 的流程图来描述处理的例子，在该例中，峰值滤波器 234 在图 2 的系统中执行数字表达式 (3) 的运算。在第 S11 步等待移动到扇区(i)之后，系统在第 S12 步中获取在扇区(i)被读出的 PES(n)。通过执行在第 S13 步数字表达式中表达的运算处理，峰值滤波器 234 使用获取到的 PES(n)来计算 U(n)。在步骤 S14 中，加法单元 256 将峰值滤波器 234 的 U(n)输出与 PES(n)相加，然后输出 Y(n)。在步骤 S15 中，伺服控制器 235 从 Y(n)生成控制信号 DACOUT 并将该信号输出至电机驱动单元 22。

这个时候防止峰值滤波器 234 执行上面的运算处理而使伺服系统变得不稳定是有必要的。任何滤波器的插入有可能会使系统变得不稳定。为了保证伺服系统稳定，有必要插入所需特征的峰值滤波器。为了像在本例中那样添加过去的状态变量，峰值滤波器 234 或 237 中添加的项的数目 (K 的值) 和每项的系数 “w” 需要适当设置以便满足所需的特征。保持系统稳定的峰值滤波器 234 或 237，设计包括这个峰值滤波器的伺服系统的方法，以及伺服系统和峰值滤波器应满足的特征将在下面描述。

通过使用 Nyquist 曲线图可以确定峰值滤波器 234 或 237 应满足的特性。取峰值滤波器 234 或 237 的传递函数为 F(z)，伺服控制器 235 的传递函数为 C(z)，以及从伺服控制器 235 的输出到伺服定位信号发生器 231 的输出的传递函数为 P(z)。图 2 的伺服系统中的开环传递函数 H1 被表达为 $H1=PC(1+F)$ ，以及图 3 的伺服系统中的开环传递函数 H2 被表达为 $H2=P(C+F)$ 。

在没有插入峰值滤波器 234 或 237 的伺服系统中，开环传递函数

H 表达为 $H_3=PC$ 。当“z”如图 5A 所示从 0 变为 2π 时，开环传递函数 $H_3(=PC)$ 的 Nyquist 曲线图（矢量轨迹）得到了例如这样的曲线，其看起来就像是如图 5B 所示（这条曲线仅是例中轨迹的部分）。在具有插入本实施例中的峰值滤波器 234 或 237 的系统中，开环传递函数 H_1 或 H_2 的 Nyquist 曲线图发生改变，例如，从如图 5B 所示的 H_3 的曲线，变为图 5C 所示的这样的曲线。

因为峰值滤波器 234 或 237 在每个频率等于磁盘 11 旋转频率整数倍处具有峰值，在每个频率等于旋转频率的整数倍处的邻域内该 Nyquist 曲线图发生改变。由峰值滤波器 234 或 237 生成的一个频率值（极点值“ Z_{01} ”）处的矢量轨迹在图 5C 中显示。实际上，Nyquist 曲线图在每个频率等于旋转频率整数倍的邻域内都发生改变。

峰值滤波器 234 或 237 的传递函数 F ，在单位圆上具有等于旋转频率的整数倍频率“ ω_i ”的多个极点“ Z_i ”。当这样的每一个极点被视为是稳定的极点时，如果开环传递函数 H_1 或 H_2 （或峰值滤波器 234、237 的传递函数）生成的矢量轨迹环绕复平面上的点 $Z_0(-1, 0)$ 的次数没有增加，那么系统可以是稳定的。在图 5C 的例子中，环绕在 $Z_0(-1, 0)$ 点的矢量轨迹的计数没有增加。在每个频率等于旋转频率的整数倍处，满足上述所需条件时系统是稳定的。

稳定系统的上述条件可以从幅角原理或从向控制系统应用该原理的 Nyquist 稳定性判据推导得出。根据幅角原理，当圆周 C 中的函数 $Q(z)$ 的零点的数目（亦即在 H 变为零处的“z”点的数目）和 $Q(z)$ 的极点的数目（亦即在 $1/Q$ 发散处的“z”点的数目）分别取为 Z 和 P 时，并且两者都包括重复次数，借助于 Q 通过重复圆周 C 生成的曲线在前向方向上（顺时针）旋转 $(P-Z)$ 周。

当频率从 0 变化到 2π 时， z 变换的“z”围绕单位圆旋转一整周。依据 Nyquist 的稳定性判据，当“z”绕单位圆旋转一整周时，零点的

数目和极点的数目之间的差别，在系统的特征方程 $[1+H(z)]$ 的单位圆中，是依照 $H(z)$ 绕点 $(-1, 0)$ 的次数来确定的。当预先知道极点的位置，从旋转的次数确定了单位圆中的极点的数目，假定和以度数确定的一样多的所有的零点都存在于单位圆中时，该系统是稳定的。

在本实施例中，峰值滤波器 234 或 237 的传递函数 F 在单位圆上具有多个极点“ z_i ”，并且每个极点“ z_i ”都被视为是稳定的极点。这就是说，当传递函数 F 如下表达时

$$F = \frac{f(z)}{z^M - 1} \quad (5)$$

峰值滤波器 234 的传递函数 F 的每个极点“ z_i ”处的矢量轨迹依下获得：

$$F(z_i) = \frac{f(z)}{z^{M-r}} \quad (\text{从 } r < 1 \text{ 到 } r \rightarrow 1) \quad (6)$$

作为例子，图 6 显示了在单位圆上的一个极点“ Z_0 ”。如图 6 所示，在单位圆中，极点“ Z_0 ”是作为无限接近单位圆的值（从 $r < 1$ 到 $r \rightarrow 1$ ）来计算的。

如果极点在“ z ”的矢量轨迹（单位圆）内，为了使系统稳定，通过峰值滤波器 234 或 237 的插入，使开环传递函数关于 $(-1, 0)$ 的旋转次数应当保持不变是有必要的。换句话说，如图 5C 所示， $H(z)$ 关于 $(-1, 0)$ 点的旋转次数不应当随“ z ”在单位圆上的轨迹增加是有必要的。 $1/(z^M - 1)$ 的矢量轨迹在频率满足 $z^M = 1$ 处趋向无穷远。所以，即使矢量轨迹从远离 $(-1, 0)$ 点开始，由于存在轨迹接近点 $(-1, 0)$ 的可能性，系统易于变得不稳定。在本实施例的设计方法中，在数字表达式 (2) 中表达的多项式中的项的数目，以及每个项的系数“ w ”都

被设定，这样峰值滤波器 234 或 237 或包括滤波器的系统满足了上述的特征。

如上所述，通过使用峰值滤波器 234 或 237 生成的 $H(z)$ 的轨迹不应当围绕 $Z_0(-1, 0)$ 是稳定的条件。这里，对于峰值滤波器的中心频率“ z_k ”，在峰值滤波器 234 或 237 没有插入的情况下，取传递函数（例如上面提到的 H_3 ）的值为 Z_{01} ，以及在峰值滤波器 234 或 237 插入的情况下，取传递函数（例如上述的 H_1 或 H_2 ）的值为 Z_k 。如图 7 所示，在由点 Z_0 和 Z_{01} 确定的直线上，如果点 Z_k 位于 Z_0 点穿过 Z_{01} 点另一端，在峰值滤波器 234 或 237 插入的情况下，传递函数生成远离 Z_0 方向的矢量轨迹。因此，当 Z_k 处在满足上述条件的位置上时，可以可靠地形成稳定的系统。

下面描述满足如图 7 所示条件的峰值滤波器 234 的传递函数，作为例子使用图 2 所示的组件（传递函数 H_1 ）。下面的数字表达式参考图 2 和图 7 得到满足：

$$Z_k = PC(1+F) = Z_{01}(1+F) = Z_{01} + \lambda(Z_{01} - Z_0) \quad (7)$$

$$\lambda > 0$$

因此：

$$F = \lambda \frac{(Z_{01} - Z_0)}{Z_{01}} \quad (8)$$

是峰值滤波器 234 的所期望的传递函数。

峰值滤波器 234 的相位可以在下面指定。这里，峰值滤波器 234 的传递函数 F 如下表达：

$$F = \frac{f(Z)}{Z^M - 1} \quad (9)$$

考虑峰值的在下面中心频率处的相位：

$$Z_k = \exp(j\omega_0 k) \left(\omega_0: \frac{2\pi}{M}, k: \text{从 } 1 \text{ 到 } M/2 \text{ 的整数} \right) \quad (10)$$

为了计算传递函数 F 的幅角，如下面取代数字表达式 (9) 的分母

$$Z^M - 1 \rightarrow Z^M - r \quad (11)$$

然后计算经 $r \rightarrow 1$ 在中心频率处获得的收敛值，在中心频率处得到

$$\angle F(Z_k) \approx \angle f(Z_k) \quad (12)$$

在这个数字表达式中， $\angle F$ 表示 F 的幅角。从数字表达式 8 和 12 之间的关系得出下面的表达式：

$$\angle f(Z_k) = \angle \frac{(Z_{01} - Z_0)}{Z_{01}} \quad (13)$$

具有插入的峰值滤波器 234 的稳定系统可以通过确定函数 “ $f(z)$ ” 来构成，以便数字表达式 (13) 在磁盘 11 的旋转频率和所有它的高次谐波处应当保留。关于增益，可以假设为例如小的值，在这种情况下，滤波器在窄频率波段中操作并显示所期望的特性。尽管 “ $\omega=0$ ” 的相位不是由上面的表达式确定的，由于仅通过 NFB(负反馈)来稳定积分项，因此相位是可以为零的。

尽管足够稳定的系统可以在磁盘 11 的旋转频率以及所有它的高频谐波处保留数字表达式 (13) 来构成，但是函数 “ $f(z)$ ” 的阶数需要增加才能满足上面的条件。增加阶数使得运算处理复杂并且电路规模或计算的时间增加。为了构成稳定系统，上述的条件是最优选的。然而并不是必须的，上述条件不总是被满足来保证系统的稳定性。假定峰值滤波器 234 满足下面的条件，尽管系统稳定性降低，系统所需的稳定性还是可以满足的。

关于峰值滤波器 234 的中心频率“ $k\omega_0$ ”，当“ $k\omega_0+q$ ”($q \rightarrow 0$) 得到渐进性质时，考虑由峰值滤波器 234 的传递函数 F 生成的矢量轨迹允许

$$\begin{aligned} \angle F(k\omega_0+q) &= \angle \frac{f(Z_k)}{z^{M-1}} = \angle \frac{f(Z_k)}{e^{j(k\omega_0+q)M} - 1} \\ &\approx \angle \frac{f(Z_k)}{jqM} = \angle F(k\omega_0) - \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (14)$$

从数字表达式 (12) 和“ j (虚数) = $\exp(j\pi/2)$ ”之间的关系获得。这就是说，在中心频率“ $k\omega_0$ ”邻域内的峰值滤波器 234 的传递函数 F 的幅角是 90 度偏离于中心频率“ $k\omega_0$ ”处的传递函数 F 的幅角。图 8 显示的是在“ $k\omega_0$ ”邻域内开环传递函数 H 的矢量轨迹的延伸方向。在“ $k\omega_0$ ”的邻域内，该开环传递函数 H 的矢量轨迹（开环传递函数 F 在“ $k\omega_0$ ”邻域内生成的矢量轨迹）在垂直于连接 Z_{01} 和 Z_k 的直线的方向上从 Z_{01} 的邻域延伸。

为了使系统稳定，有必要使开环传递函数 H 的矢量轨迹不围绕 Z_0 (-1, 0) 点并且 Z_0 应当在曲线（轨迹）的外部，该曲线从 Z_{01} 邻域内的点延伸经过 Z_k 到另一个邻近的点。如果如图 8A 所示，在连接 Z_{01} 和 Z_k 的直线的垂直方向上，从 Z_{01} 延伸的直线位于 Z_0 下面，即，在 Z_0 和 Z_k 之间，则这个条件是能得到满足的。相反地，如果如图 8B 所示，在连接 Z_{01} 和 Z_k 的直线的垂直方向上，从 Z_{01} 延伸的直线位于 Z_0 上面，则系统变得不稳定。如果如图 9 所示，由从 Z_0 延伸到 Z_{01} 的直线“c”和从 Z_{01} 延伸到 Z_k 的直线“a”构成的角“ ϕ ”是 90 度或以下，系统可以因此而稳定。换句话说，改变数字表达式 (7) 为

$$\begin{aligned} Z_k &= PC(1+F) = Z_{01}(1+F) = Z_{01} + \lambda(Z_{01} - Z_0) e^{j\phi} \\ \lambda &> 0 \end{aligned} \quad (15)$$

然后计算在 F 的“ $k\omega_0$ ”处的幅角得到：

$$\angle F(z_k) = \angle \frac{(z_{01} - z_0)}{z_{01}} + \phi \quad (16)$$

如果 ϕ 是 90 度或以下，系统是可以稳定的。假设下面的数字表达式 (17) 被满足，取数字表达式 (13) 的右边为 “a”，能使系统稳定：

$$|\angle F(k\omega_0) - a| \leq 90^\circ \quad (17)$$

可是，如果开环传递函数 H 的矢量轨迹接近 $Z_0(-1, 0)$ ，系统的稳定性将减少。另外，在伺服系统中存在相位余量是很重要的。在伺服系统的设计期间，将相位余量设定为 30 度是优选方案。因此，优选地，由连接 Z_{01} 和 Z_k 的直线 “a” 和连接 Z_0 和 Z_{01} 的直线 “c” 组成的角 “ ϕ ” 应当是 60 度或以下 ($|\angle F(k\omega_0) - a| \leq 60$ 度)。更进一步，这种需求有可能发生：扩展峰值宽度以加快峰值滤波器的收敛。如果是这种情况，则因为初始频率特性受到影响，30 度的相位余量有可能减少。保留较大的相位余量因此更为优选。因此，进一步优选地，由连接 Z_{01} 和 Z_k 的直线 “a” 和连接 Z_0 和 Z_{01} 的直线 “c” 组成的角 “ ϕ ” 应当是 45 度或以下 ($|\angle F(k\omega_0) - a| \leq 45$ 度)。这些条件在磁盘 11 的旋转频率以及所有它的高次谐波 (“ $k\omega_0$ ”) 处被满足。由点 Z_0 和 Z_{01} 确定的直线上，如果点 Z_k 穿过点 Z_{01} 在点 Z_0 的另一端，角 “ ϕ ” 则是 0 度。正如上面描述的，当幅角的条件表达式用联立不等式表达时，峰值滤波器 234 的项的数目以及每项的系数可以用 LMI(线性矩阵不等式)确定。峰值滤波器 234 根据这样预定的值执行滤波处理。因为是公知技术而省略 LMI 的说明，例如，[Stephen Boyd, 等, “系统与amp;控制理论中的线性矩阵不等式”, 1994, SIAM]。

尽管上面的描述已经作为例子与开环传递函数 $H1[PC(1+F)]$ 一同给出，系统的稳定性在相似条件下可以通过使用开环传递函数 $H2[P(C+F)]$ 同样地获得。对于开环传递函数 $H2$ ，下面的表达式保留：

$$Z_k = P(C+F) = Z_{01} + \lambda(Z_{01} - Z_0) \quad (18)$$

$$\lambda > 0$$

因此：

$$F = \lambda \frac{(Z_{01} - Z_0)}{P} \quad (19)$$

是峰值滤波器 234 的最优选的传递函数。在这种情况下幅角的要求是：

$$\angle f(Z_k) = \angle \frac{(Z_{01} - Z_0)}{P} \quad (20)$$

如上所述，根据本实施例中的 HDD，在保持伺服系统稳定性的同时有效补偿 RRO 是有可能的。虽然，在本实施例中，HDD 可以执行数据的读和写处理，但是本发明同样可提供给再现装置用来仅执行再现操作。尽管本发明特别地用于磁盘存储装置，但它仍可以应用于其他形式的存储装置，例如用于光处理存储数据的光学存储装置，或应用于被控制的其他物体的伺服系统。

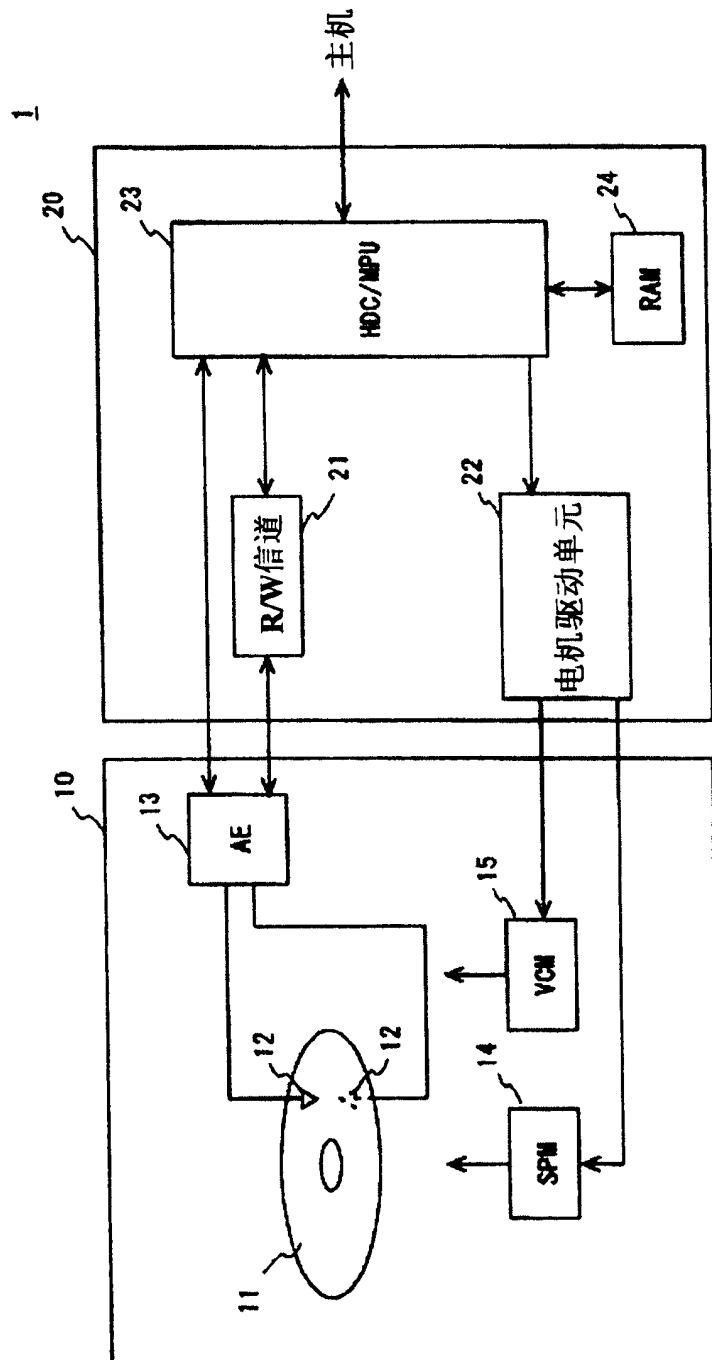


图1

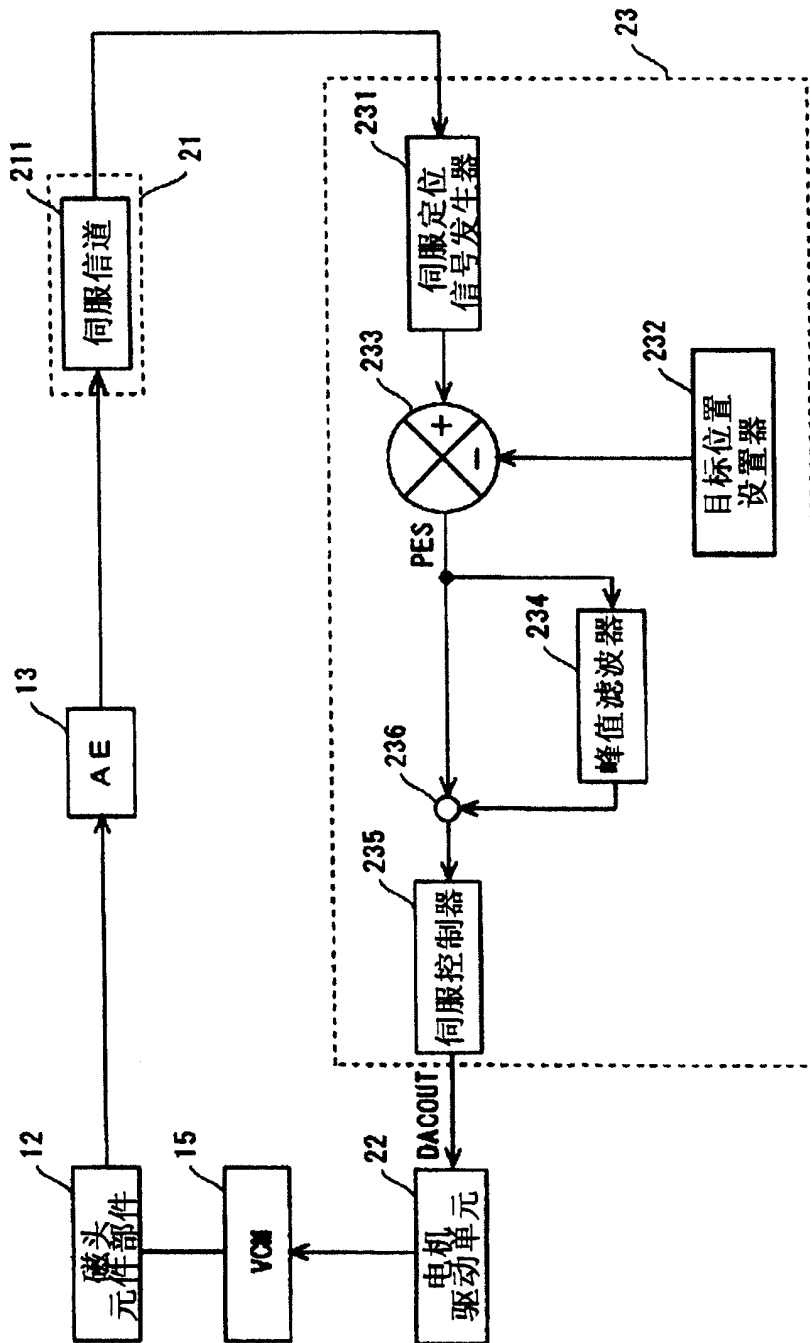


图2

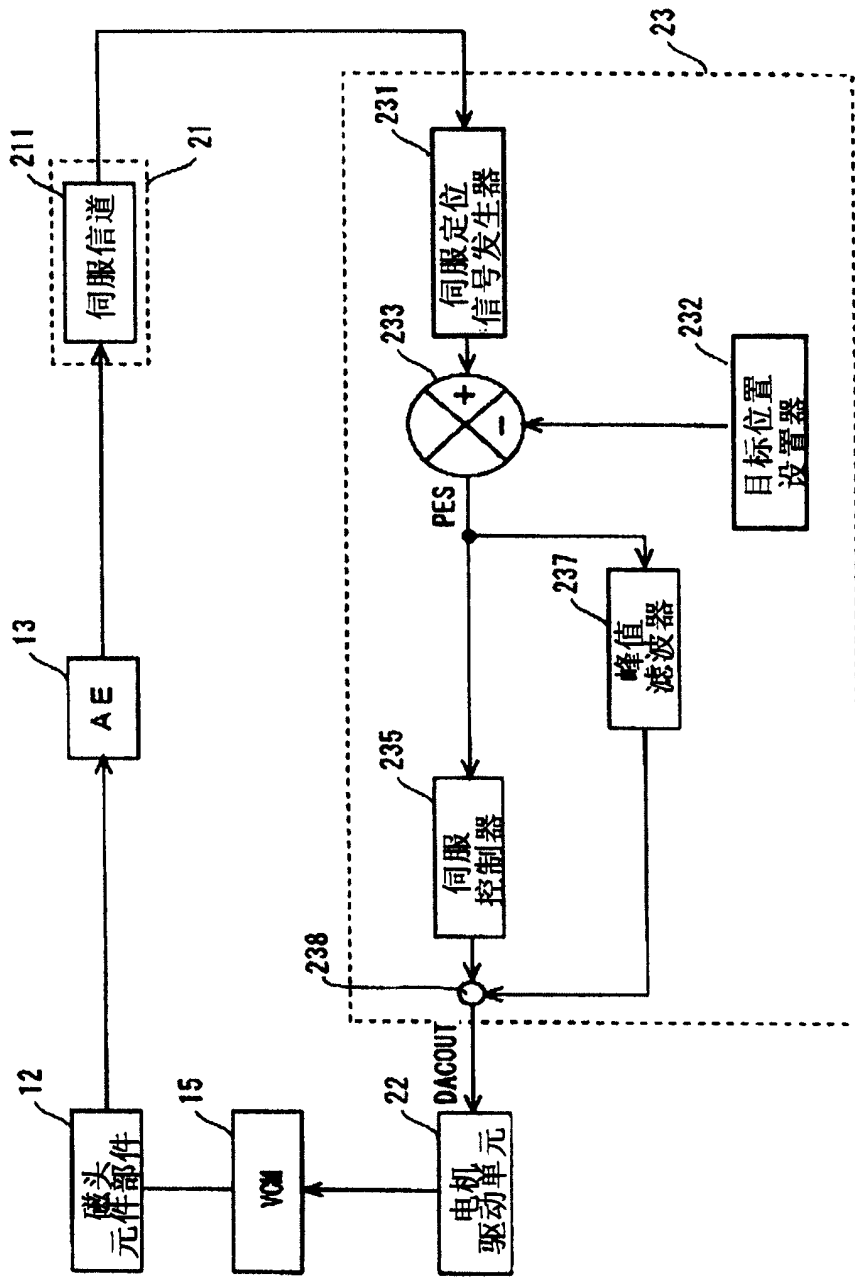


图3

图4

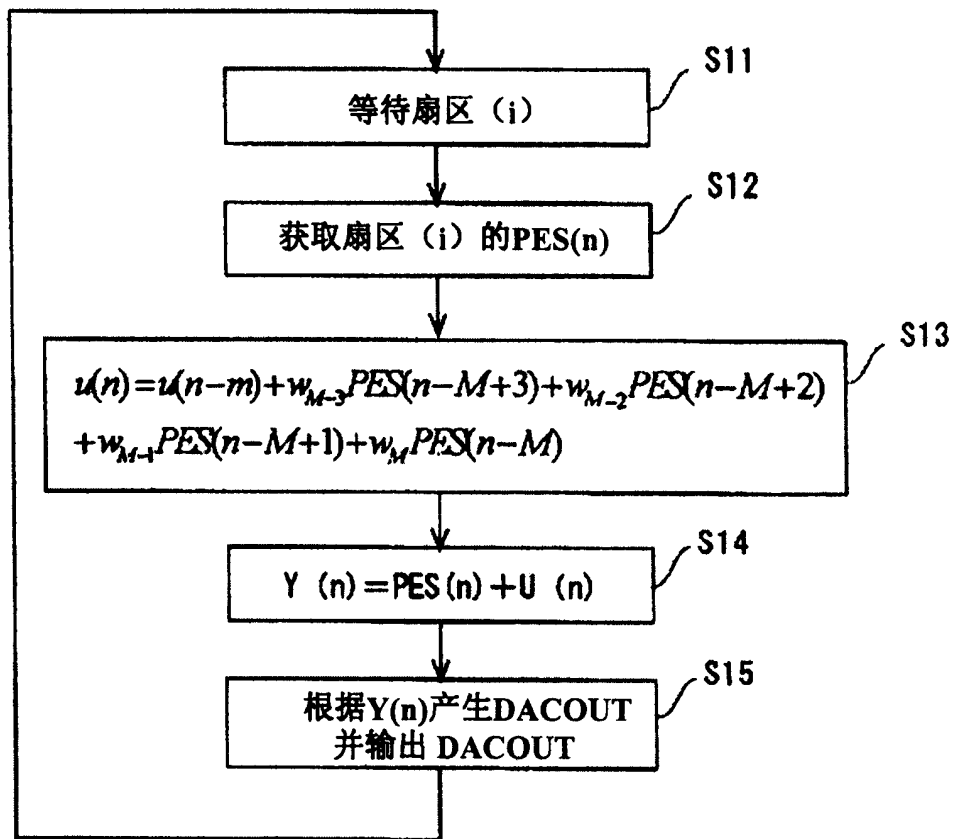


图5

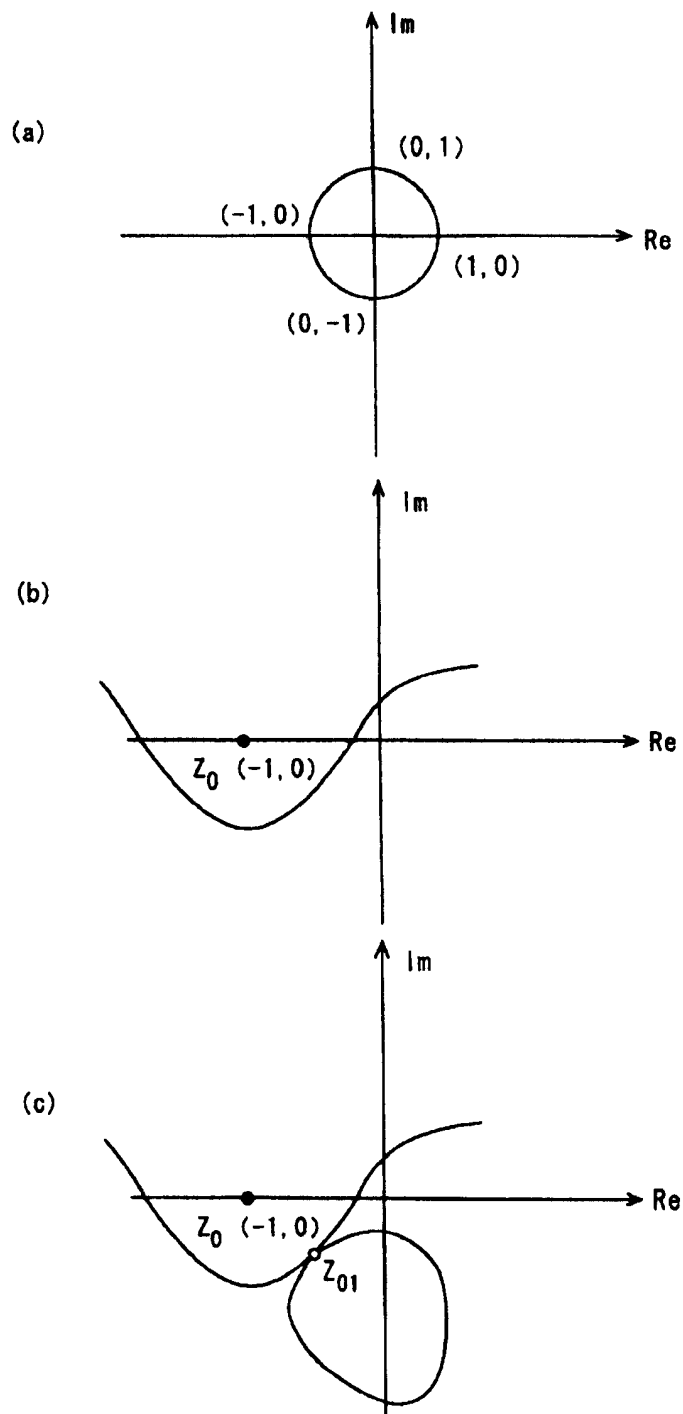


图6

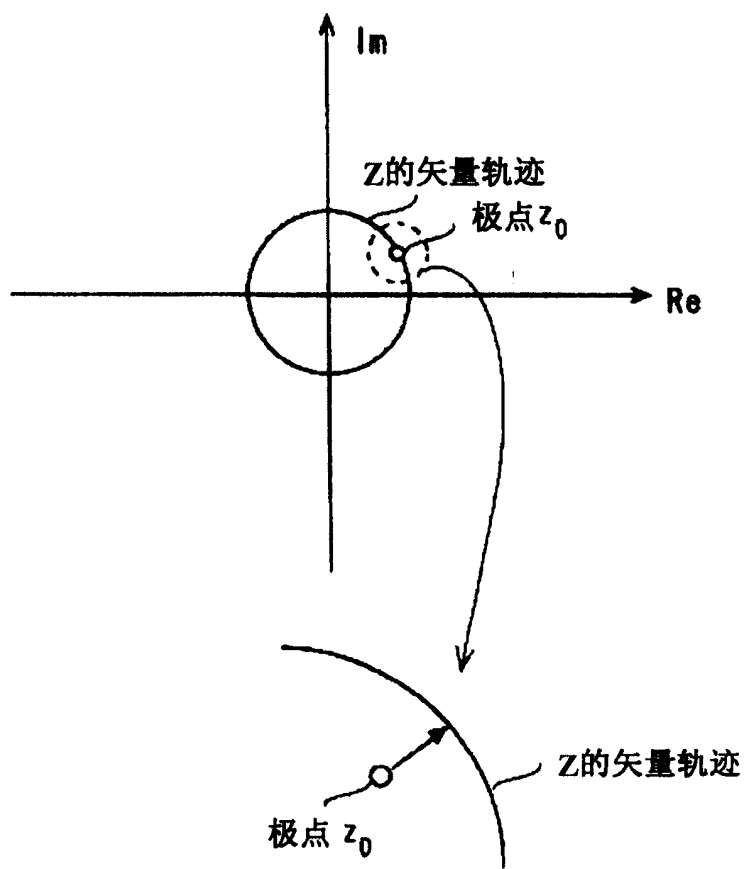


图7

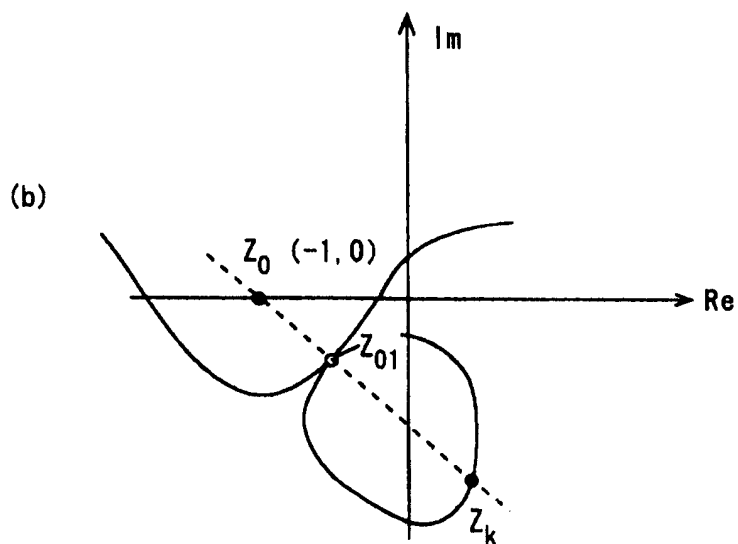


图8

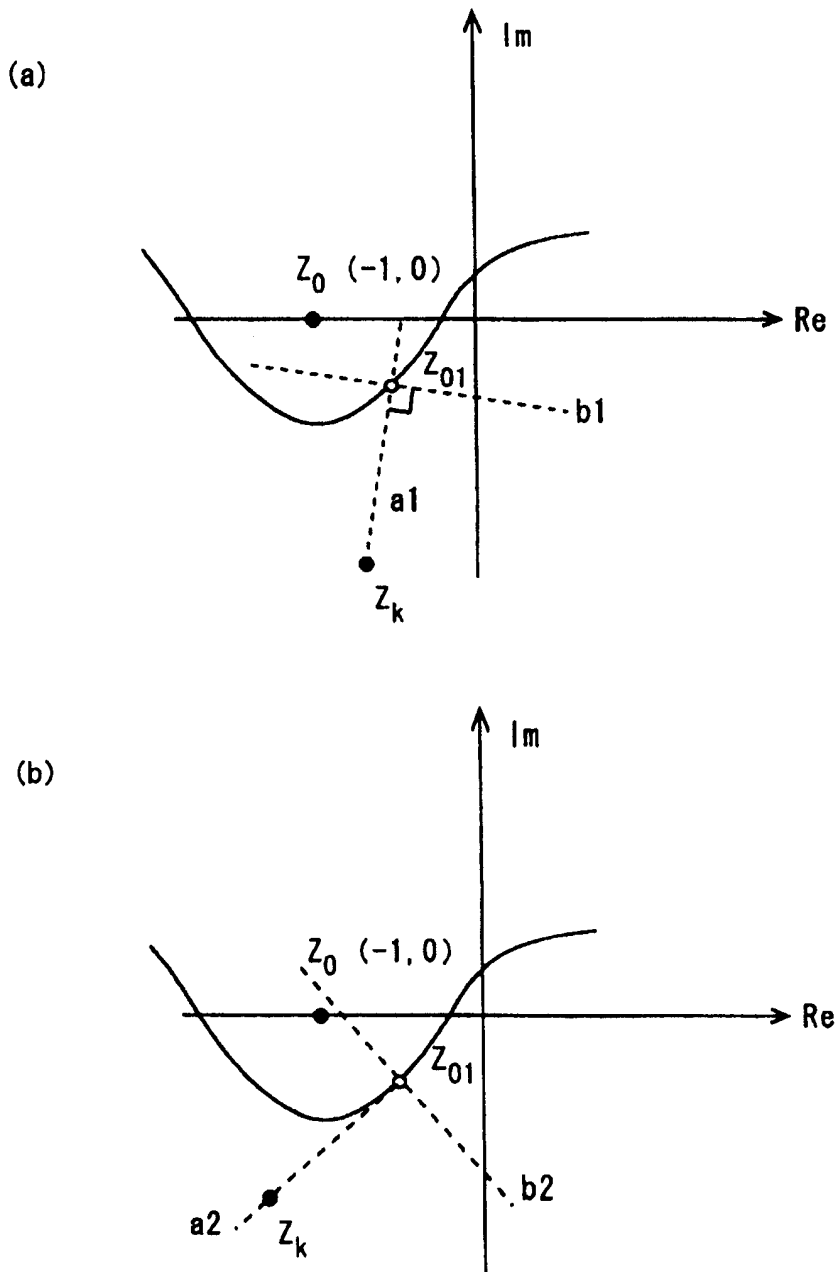


图9

