



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103303797 B

(45)授权公告日 2016.12.28

(21)申请号 201310076824.2

(22)申请日 2013.03.11

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103303797 A

(43)申请公布日 2013.09.18

(30)优先权数据

102012004803.3 2012.03.09 DE

(73)专利权人 利勃海尔-韦尔克 嫩青有限公司

地址 奥地利嫩青

(72)发明人 克劳斯·施奈德尔

埃卡德·阿诺德

塞巴斯蒂安·库奇勒

奥利弗·萨沃德尼

(74)专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司 11240

代理人 余刚 吴孟秋

(51)Int.Cl.

B66C 13/18(2006.01)

(56)对比文件

CN 101585486 A, 2009.11.25, 说明书第2页第2-4段, 第4页第3段及图1.

US 6505574 B1, 2003.01.14, 全文.

CN 202054550 U, 2011.11.30, 全文.

US 20070272906 A1, 2007.11.29, 全文.

CN 102020199 A, 2011.04.20, 全文.

审查员 武衡科

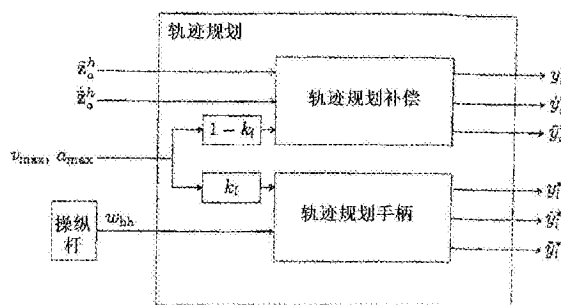
权利要求书2页 说明书17页 附图5页

(54)发明名称

具有驱动约束的起重机控制器

(57)摘要

本发明示出了具有驱动约束的起重机控制器。该起重机控制器用于包括用于提升挂在缆绳上的负载的提升机构的起重机。该起重机控制器具有主动升沉补偿, 主动升沉补偿通过驱动所述提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动, 其中当计算所述提升机构的驱动时, 所述升沉补偿考虑所述提升机构的至少一个约束。



1. 一种用于起重机的起重机控制器,所述起重机包括用于提升挂在缆绳上的负载的提升机构,所述起重机控制器包括

主动升沉补偿,通过驱动所述提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动,

其特征在于,

当计算所述提升机构的所述驱动时,所述升沉补偿考虑所述提升机构的至少一个约束,

其中,所述升沉补偿考虑最大容许急拉和/或最大可用加速度和/或最大可用速度和/或最大可用功率,和/或其中所述起重机控制器包括计算功能,所述计算功能计算所述提升机构的至少一个约束,特别地,计算所述提升机构的所述最大可用速度和/或加速度和/或功率,其中所述计算功能有利地考虑退绕缆绳的长度和/或缆绳力和/或用于驱动所述提升机构的可用功率。

2. 根据权利要求1所述的起重机控制器,其中,所述提升机构的驱动器与蓄能器连接。

3. 根据前述权利要求中任一项所述的起重机控制器,具有路径规划模块,所述路径规划模块参考所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测移动并通过考虑所述提升机构的约束来确定轨迹,其中,所述路径规划模块有利地包括最优化功能,所述最优化功能参考所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的所述预测移动并通过考虑所述提升机构的约束来确定轨迹,这最小化由于所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动引起的负载的残余移动。

4. 一种用于起重机的起重机控制器,所述起重机包括用于提升挂在缆绳上的负载的提升机构,特别地根据权利要求1至3中任一项所述的所述起重机控制器,包括

主动升沉补偿,通过驱动所述提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动,

其特征在于,

所述升沉补偿包括路径规划模块,所述路径规划模块参考所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测移动来计算所述提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹,其包括在用于所述提升机构的随后控制的设定点值中。

5. 根据权利要求4所述的起重机控制器,其中,所述提升机构的所述控制器有利地将测量值反馈回提升绞盘的位置和/或速度,和/或通过先导控制考虑所述提升绞盘的驱动器的动态。

6. 根据权利要求4所述的起重机控制器,操作员参考操作员规范控制所述起重机控制器来驱动所述提升机构,其中所述控制器有利地包括两个分开的路径规划模块,经由所述两个分开的路径规划模块,所述升沉补偿的轨迹和所述操作员控制的轨迹彼此分开计算,其中,此外更有利地,由所述两个分开的路径规划模块指定的轨迹被加起来,并作为所述提升机构的控制和/或调控的设定点值。

7. 根据权利要求6所述的起重机控制器,其中升沉补偿和操作员控制之间的至少一个运动学约束量的分割是可调节的,其中所述调节有利地通过至少一个加权因子实现,通过所述至少一个加权因子,在所述升沉补偿和所述操作员控制之间分割所述提升机构的最大可用功率和/或速度和/或加速度。

8. 根据权利要求3所述的起重机控制器,其中,所述升沉补偿的所述最优化功能确定包

括在所述提升机构的所述控制和/或调控中的目标轨迹，

其中，所述最优化可在所述缆绳悬挂点的移动的更新预测基础上在每个时间步上实现，和/或

其中，所述目标轨迹的第一值均用于所述控制和/或调控，和/或

其中，所述最优化功能以比控制更大的扫描时间工作，和/或

其中，在没有发现有效解决方案时，所述最优化功能利用紧急轨迹规划。

9. 根据权利要求4所述的起重机控制器，具有根据传感器数据确定当前升沉移动的测量装置，和参考所确定的当前升沉移动和所述升沉移动的模型来预测所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的未来移动的预测装置，其中，如在所述预测装置中使用的所述升沉移动的所述模型有利地独立于属性，且特别独立于所述起重机和/或所述负载沉积点布置于其上的浮舟的动态。

10. 根据权利要求9所述的起重机控制器，其中，所述预测装置由所述测量装置的数据特别地经由频率分析来确定所述升沉移动的占优模式，并参考所确定的所述占优模式创建升沉的模型，其中所述预测装置有利地参考所述测量装置的数据连续参数化所述模型，其中特别地参数化观测器，其中特别地参数化所述模式的幅度和相位和/或在升沉的所述占优模式改变的情况下更新所述模型。

11. 一种起重机，所述起重机具有根据前述权利要求中任一项所述的起重机控制器。

12. 一种起重机控制方法，所述起重机包括用于提升挂在缆绳上的负载的提升机构，

其中升沉补偿通过所述提升机构的自动驱动至少部分地补偿由于所述升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动，

其特征在于，

当计算所述提升机构的驱动时，所述升沉补偿考虑所述提升机构的至少一个约束，和/或所述升沉补偿参考所述缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测移动来计算所述提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹，其包括在用于所述提升机构的随后控制的设定点值中。

13. 根据权利要求12所述的方法，借助于根据权利要求1至10中任一项所述的起重机控制器。

14. 具有执行根据权利要求12或13所述的方法的代码的软件。

具有驱动约束的起重机控制器

技术领域

[0001] 本发明涉及起重机的起重机控制器,该起重机包括用于提升挂在缆绳上的负载的提升机构。该起重机控制器包括主动升沉补偿,其通过驱动提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动。

背景技术

[0002] 从DE102008024513A1中已知这种起重机控制器。本发明提供了一种参考所确定的当前升沉移动和升沉移动模型来预测缆绳悬挂点的未来移动的预测装置,其中负载的路径控制器至少部分地补偿缆绳悬挂点的预测移动。

[0003] 对于驱动提升机构,DE102008024513A1创建了液压操作的绞盘和挂在缆绳上的负载的动态模型,并通过倒置由其创建序列控制单元。为了实现状态控制,经由观测器根据力值测量来重建负载的未知状态。

[0004] 本发明的目的是提供一种改进的起重机控制器。

发明内容

[0005] 根据本发明,这个目的在根据第一方面的起重机控制器的和根据第二方面的起重机控制器中得以解决。

[0006] 在第一方面中,本发明示出用于起重机的起重机控制器,该起重机包括用于提升挂在缆绳上的负载。该起重机控制器包括主动升沉补偿,其通过驱动提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动。根据本发明,提供了当计算提升机构的驱动时,升沉补偿考虑提升机构的至少一个约束。通过考虑提升机构的约束,确保提升机构实际上可以遵循由于升沉补偿而计算的控制命令,和/或确保提升机构或起重机不被所述驱动损坏。

[0007] 根据本发明,升沉补偿考虑最大容许急拉。因此,可确保起重机的提升机构或结构不被由于升沉补偿引起的提升机构的驱动损坏。除了最大容许急拉,还可请求稳定过程的急拉。

[0008] 替代地或另外地,升沉补偿可考虑最大可用功率。

[0009] 替代地或另外地,升沉补偿可考虑最大可用加速度。该最大可用加速度例如可由以下因素引起:提升机构的驱动器的最大功率和/或还未退绕的缆绳的长度和从而作用于提升机构和/或由于要被提升的重力引起的提升机构的负载引起的缆绳的重力。

[0010] 此外替代地或另外,升沉补偿可考虑最大可用速度。也可以如上关于最大可用加速度描述来获得升沉补偿的最大可用速度。

[0011] 此外,起重机控制器可包括计算功能,其计算提升机构的至少一个约束。为此目的,计算功能可特别评估传感器数据和/或驱动信号。借助于计算功能,提升机构的当前适用的约束均可被通信至升沉补偿。

[0012] 特别地,提升机构的约束可在提升期间改变,其可通过根据本发明的升沉补偿而

被考虑。

[0013] 计算功能(function,函数)均可准确地计算提升机构的当前可用的至少一个运动约束量,特别是提升机构的最大可用功率和/或速度和/或加速度。有利的是,计算功能考虑未退绕的缆绳的长度和/或缆绳力和/或用于驱动提升机构的可用功率。

[0014] 根据本发明,起重机控制器可用于驱动提升机构,该提升机构的驱动器与蓄能器连接。存储在蓄能器中的能量实现用于驱动提升机构的可用功率。有利的是,存储在蓄能器中的能量的量或因此用于驱动提升机构的可用功率包括在根据本发明的计算功能中。

[0015] 特别地,根据本发明的提升机构可被液压驱动,其中液压蓄能器被设置在用于驱动提升机构的提升绞盘的液压回路中。

[0016] 可替代地,可以使用电力驱动器。其同样也可与蓄能器连接。

[0017] 有利的是,起重机控制器还包括路径规划模块,路径规划模块参考缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测移动并通过考虑提升机构的约束来确定轨迹。根据本发明,在规划轨迹时,可明确地考虑驱动器约束,特别是关于功率、速度、加速度和/或急拉方面的驱动器约束。特别地,轨迹可以是提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹。

[0018] 有利的是,路径规划模块包括优化功能,优化功能参考缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测移动并通过考虑提升机构的约束来确定轨迹,这最小化由于缆绳悬挂点的移动和/或由于负载沉积点的移动所产生的负载与负载沉积点之间差动移动引起的残余移动。根据本发明,因此,所述至少一个驱动器约束可被考虑到最优控制问题中。在最优控制问题中,特别地关于功率和/或速度和/或加速度和/或急拉方面考虑了驱动器的约束。

[0019] 优化功能参考缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测垂直位置和/或垂直速度来有利地计算最佳路径,其中通过考虑移动约束来最小化负载的残余移动和/或差动移动。

[0020] 在第二方面中,本发明包括用于起重机的起重机控制器,该起重机提升挂在缆绳上的负载的提升机构。起重机控制器包括主动升沉补偿,主动升沉补偿通过驱动提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动。根据本发明,升沉补偿包括:路径规划模块,其参考缆绳悬挂点和/或负载沉积点的预测移动来计算提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹,其包括在用于提升机构的随后控制的设定点值中。由于升沉补偿的该结构,可获得特别稳定和容易实现的提升机构的驱动。特别地,未知负载位置不再必须通过极大的努力来重构。

[0021] 根据本发明,提升机构的控制器可将测量值反馈至提升绞盘的位置和/或速度。因此,路径规划模块将提升绞盘的位置和/或速度指定为设定值,其在随后的控制器中与实际值相匹配。

[0022] 此外,可提供:提升机构的控制器通过先导控制考虑提升绞盘的驱动器的动态。特别地,先导控制可基于描述提升绞盘的驱动器的动态的物理模型的倒置(inversion)。特别地,提升绞盘可以是液压操作的提升绞盘。

[0023] 本发明的第一和第二方面均单独受本申请的保护,且均可在没有相应的其它方面的情况下分开来实现。

[0024] 然而,特别优选地,根据本发明的两个方面彼此结合。特别地,可以提供:当确定轨迹时,根据本发明的第二方面的路径规划模块考虑提升机构的至少一个约束。

[0025] 此外,根据本发明的起重机控制器还可以包括参考操作员的规范来驱动提升机构

的操作员控制。

[0026] 有利的是,该控制器因此包括两个分开的路径规划模块,经由该路径规划模块,升沉补偿和操作员控制的轨迹彼此分开计算。特别地,这些轨迹可为提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹。

[0027] 此外,由两个分开的路径规划模块指定的轨迹可以相加并作为用于提升机构的控制和/或调控的设定点值。

[0028] 此外,可以根据本发明提供:升沉补偿和操作员控制之间的至少一种运动约束量的划分是可调节的,其中调节例如可通过加权因子实现,通过该加权因子,在升沉补偿和操作员控制之间分割(split up)提升机构的最大可用功率和/或速度和/或加速度。

[0029] 这样的划分很容易可能在根据本发明的升沉补偿中发生,其无论如何会考虑提升机构的约束。特别地,至少一个运动约束量的划分被作为提升机构的约束来考虑。有利的是,操作员控制也考虑驱动器的至少一个约束,特别是最高容许急拉和/或最大可用功率和/或最大可用加速度和/或最大可用速度。

[0030] 根据本发明,升沉补偿的优化功能可确定包括在提升机构的控制和/或调控中的目标轨迹。特别地,如上所述,优化功能可计算提升机构的位置和/或速度和/或加速度的目标轨迹,其包括在用于提升机构的随后控制的设定点值中。优化可经由离散化来实现。

[0031] 根据本发明,优化可在负载提升点的移动的更新预测的基础上在每个时间步上实现。

[0032] 根据本发明,目标轨迹的第一值均可用于控制提升机构。当更新目标轨迹然后是可使用时,仅其第一值又可用于控制。

[0033] 根据本发明,优化功能可以以比控制更低的扫描速度来工作。这提供了对于计算密集型优化功能、较小计算密集型控制选择更大扫描时间,另一方面,由于降低扫描时间而使精度更高。

[0034] 此外,可以提供:当没有发现有效的解决方案时,优化功能利用紧急轨迹规划。以此方式,当不能发现有效的解决方案时,也可确保适当的操作。

[0035] 根据本发明的起重机控制可包括根据传感器数据确定当前升沉移动的测量装置。例如,陀螺仪和/或倾角传感器可以用作传感器。传感器可以布置于起重机或其上布置起重机的浮舟,例如在起重机基座和/或其上布置负载沉积位置的浮舟上。

[0036] 起重机控制器此外还可包括参考所确定的当前升沉移动和升沉移动的模型来预测缆绳悬挂点和/或负载沉积点的未来移动的预测装置。

[0037] 有利的是,如在预测装置中使用的升沉移动的模型有利地独立于(independent of,无关于)属性,且特别独立于浮舟的动态。起重机控制器从而可独立于起重机和/或负载沉积位置布置在其上的浮舟而使用。

[0038] 预测装置可根据测量装置的数据确定升沉移动的当前模式。特别地,这可经由频率分析来实现。

[0039] 此外,预测装置可参考所确定的当前模式创建升沉的模型。参考这种模式,然后可预测未来升沉移动。

[0040] 有利的是,预测装置参考测量装置的数据连续参数化模型。特别地可使用观测器,其可被连续参数化。特别优选的是,模式的振幅和相位可被参数化。

[0041] 此外,可提供:在升沉的占优模式变化的情况下更新模式。

[0042] 特别优选的是,预测装置以及测量装置可以被构造为如在DE102008024531A1中所描述,其内容被充分作出本申请的主题。

[0043] 在根据本发明的控制构思中,此外有利地,由于缆绳的可延长能力,负载的动态可被忽略。这会使得控制器的结构明显变得更简单。

[0044] 本发明还包括具有如上面已经描述的起重机控制器的起重机。

[0045] 具体地,起重机可以被布置在浮舟上。特别地,起重机可以是甲板起重机。可选地,其也可以是海上起重机、港口起重机或缆绳挖掘机。

[0046] 本发明还包括具有根据本发明的起重机的浮舟,特别是具有根据本发明的起重机的船。

[0047] 此外,本发明包括使用根据本发明的起重机和用于提升和/或降低位于水中的负载的根据本发明的起重机控制器的使用,和/或根据本发明的起重机和用于提升和/或降低来自水中的负载和/或位于水中(例如船舶上)的负载沉积位置的根据本发明的起重机控制器的使用。特别地,本发明包括根据本发明的起重机和用于深海提升和/或用于装载和/或卸载船舶的根据本发明的起重机控制器的使用。

[0048] 此外,本发明还包括起重机控制方法,该起重机包括用于提升挂在缆绳上的负载的提升机构。升沉补偿通过提升机构的自动驱动来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点和/或负载沉积点的移动。根据本发明,根据第一方面,提供:当计算提升机构的驱动时,升沉补偿会考虑提升机构的至少一个约束。根据第二方面,另一方面,提供:升沉补偿参考缆绳悬挂点的预测移动来计算提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹,其包括在用于提升机构的随后控制的设定点值中。根据本发明的方法具有已经关于起重机控制器描述了的相同优点。

[0049] 此外,也可已如上所述来执行所述方法。特别地,根据本发明的两个方面也可以被结合在该方法中。

[0050] 此外,可借助于以如上所述的起重机控制器优选地实现根据本发明的方法。

[0051] 本发明还包括具有用于进行根据本发明的方法的代码的软件。特别地,软件可以被存储在机器可读的数据载体中。有利的是,可通过将软件安装在起重机控制器上来实现根据本发明的起重机控制器。

[0052] 有利的是,根据本发明的起重机控制器以电子方式实现,特别地,通过电子控制计算机实现。控制计算机有利地与传感器连接。特别地,控制计算机可与测定装置连接。有利的是,控制计算机产生用于驱动提升机构的控制信号。

[0053] 提升机构优选地可为液压驱动的提升机构。根据本发明,根据本发明的起重机控制器的控制计算机可驱动液压驱动系统的至少一个液压移位机器和/或液压驱动系统的至少一个阀的旋转角度。

[0054] 优选地,液压蓄能器设置在液压驱动系统中,当降低负载时,可经由该液压蓄能器来存储能量,然后当提升负载时,其可作为额外的功率。

[0055] 优选地,液压蓄能器的驱动由根据本发明的提升机构的驱动分开实现。

[0056] 可替代地,也可使用电动驱动器。其同样也可以包括蓄能器。

附图说明

- [0057] 现在将参考示例性实施例和附图详细说明本发明。
- [0058] 在附图中：
- [0059] 图1:示出布置在浮舟(pontoon)上的根据本发明的起重机，
- [0060] 图2:示出了用于升沉补偿和操作员控制的分开的轨迹规划的结构，
- [0061] 图3:示出了具有稳定急拉的规划轨迹的四阶积分链，
- [0062] 图4:示出了轨迹规划的非等距离离散，其在时程结束部分使用比时程的开始更大的距离，
- [0063] 图5:示出了使用速度的实例在时程结束部分如何首先考虑改变约束，
- [0064] 图6:示出了用于操作员控制的轨迹规划的三阶积分链，其参考急拉相加来工作，
- [0065] 图7:示出了操作员控制的路径规划的结构，其考虑驱动的约束，
- [0066] 图8:示出了与切换时间相关联的示例性急拉属性，根据该属性，可参考路径规划来计算提升机构的位置和/或速度和/或加速度的轨迹，
- [0067] 图9:示出了由急拉增加产生的轨迹的速度和加速度的过程，
- [0068] 图10:示出了主动升沉补偿和目标力模式(在这里被称为恒张力模式)的驱动概念的概述，
- [0069] 图11:示出了用于主动升沉补偿的驱动力的电路框图，以及
- [0070] 图12:示出了用于目标力模式的驱动力的电路框图。

具体实施方式

- [0071] 图1示出了根据本发明的用于驱动提升机构(hoisting gear)5的起重机控制器的起重机1的示例性实施例。提升机构5包括移动缆绳4的提升绞盘。缆绳4通过缆绳悬挂点2(在该示例性实施例中，通过起重机起重臂端部的转向滑轮)被引导。通过移动缆绳4，挂在缆绳上的负载3可以被提升或降低。
- [0072] 可以设置至少一个传感器，其测量提升机构的位置和/或速度，并将相应的信号发送到起重机控制器。
- [0073] 此外，可以设置至少一个传感器，其测量缆绳力并将相应的信号发送到起重机控制器。传感器可以被布置在起重机主体区域内，特别地布置在绞盘5的范围和/或缆绳轮2的范围内。
- [0074] 在示例性实施例中，起重机1被布置在浮舟6(这里为船)上。如同样如图1所示，由于升沉，浮舟6绕其六个自由度移动。布置在浮舟6以及缆绳悬挂点2上的起重机1也因此被移动。
- [0075] 根据本发明的起重机控制器可包括主动升沉补偿，其通过驱动提升机构来至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点2的移动。特别地，至少部分地补偿由于升沉引起的缆绳悬挂点的垂直移动。
- [0076] 升沉补偿可以包括根据传感器数据确定当前升沉移动的测量装置。测量装置可包括布置在起重机基地的传感器。特别地，其可为陀螺仪和/或倾角传感器。特别优选的是，设置三个陀螺仪和三个倾角传感器。

[0077] 此外,可以设置预测装置,其参考所确定的升沉移动和升沉移动的模型来预测缆绳悬挂点2的未来移动。特别地,预测装置仅预测缆绳悬挂点的垂直移动。与测量和/或预测装置相关,在测量装置的传感器的点处的船的移动会被转换成缆绳悬挂点的移动。

[0078] 预测装置和测量装置有利地被构造为如在DE102008024513A1中被更详细地描述。

[0079] 可替代地,根据本发明的起重机也可能为起重机,其用于将负载提升和/或降低自或至布置在浮舟上从而随起重机移动的负载沉积点。在这种情况下,预测装置必须预测负载沉积点的未来移动。这可以类似于上面描述的过程而受影响,其中,测量装置的传感器被布置在负载沉积点的浮舟上。起重机例如可以是港口起重机、海上起重机或缆绳挖掘机。

[0080] 在示例性实施例中,提升机构5的提升绞盘被液压驱动。特别地,设置液压泵和液压马达的液压回路,通过该液压回路来驱动提升绞盘。优选地,可以设置液压蓄能器,经由该液压蓄能器可将能量存储在降低的负载,所以当提升负载时该能量可用。

[0081] 可选地,可以使用电驱动器。同样也可能与蓄能器连接。

[0082] 在下文中,本发明的示例性实施例现在将被示出,其中本发明的多个方面被共同实现。然而,也可以分别单独使用各个方面,用于改进本发明的实施例,如本申请中的一般部分中所描述。

[0083] 1参考轨迹的规划

[0084] 为了实现主动升沉补偿的所需预测行为,采用由以两个自由度的结构的形式的先导控制和反馈组成的顺序控制。先导控制通过微分参数化来计算并需要参考轨迹稳定地二次可微。

[0085] 对于规划,决定性的是:驱动可以跟随指定的轨迹。因此,也必须考虑提升机构的约束。考虑的起点是缆绳悬挂点 $\tilde{z}_a^h$ 和 $\tilde{z}_a^h$ 的垂直位置和/或速度,其可在固定的时程内经由在DE102008024513中所描述的算法来预测。此外,起重机操作员的手柄信号(通过该信号,该操作员可在惯性坐标系中移动负载)也包括在轨迹规划中。

[0086] 出于安全的原因,必要的是:在主动升沉补偿发生故障的情况下,绞盘也仍然可以经由手柄信号来移动。通过使用轨迹规划的概念,从而实现补偿移动的参考轨迹的规划与手柄信号产生的轨迹规划之间的分离,如图2中所示。

[0087] 在图中, y_a^* 、 $\dot{y}_a^*$ 和 $\ddot{y}_a^*$ 指定为补偿规划的位置、速度和加速度,以及 y_l^* 、 $\dot{y}_l^*$ 和 $\ddot{y}_l^*$ 指定如在手柄信号的基础上规划的叠加退绕或卷绕的缆绳的位置、速度和加速度。在执行的其它过程中,用于提升绞盘的移动的规划参考轨迹常常分别由 y^* 、 $\dot{y}^*$ 和 $\ddot{y}^*$ 指定,因为它们作为驱动动力学的系统输出的参考。

[0088] 由于分离的轨迹规划,在升沉补偿被关闭或在手动操作中针对手动杆控制的升沉补偿完全失效的情况下(例如,由于IMU故障),可使用相同的轨迹规划和相同的顺序控制器,并由此在打开升沉补偿的情况下产生相同的操作行为。

[0089] 为了不违反速度 $v_{\max}$ 和加速度 $a_{\max}$ 的给定约束,尽管完全独立规划, $v_{\max}$ 和 $a_{\max}$ 借助于加权因子 $0 \leq k_1 \leq 1$ (参考图2)来分割。其同样由起重机操作员来指定,并因此提供单独分割可用于补偿和/或用于移动负载的电源。因此,补偿移动的最大速度和加速度是 $(1-k_1)v_{\max}$ 和 $(1-k_1)a_{\max}$,且缆绳的叠加退绕和卷绕的轨迹 $k_1 v_{\max}$ 和 $k_1 a_{\max}$ 。

[0090] 可在操作过程中进行 k_1 的变化。由于最大可能的行驶速度和加速度依取决于缆绳

和负载的总质量,所以 $V_{\max}$ 和 $a_{\max}$ 也可以在操作中改变。因此,各自适用值同样被转移至轨迹规划。

[0091] 通过分割电源,控制变量约束可能不会被完全利用,但是起重机操作员可以很容易地且直观地调整主动升沉补偿的影响。

[0092] $k_1=1$ 的加权等于关闭主动升沉补偿,由此补偿接通和关闭之间的平滑过渡成为可能。

[0093] 该章节的第一部分最初解释了用于补偿缆绳悬挂点的垂直移动的参考轨迹 y^* 、 $\dot{y}^*$ 和 $\ddot{y}^*$ 的生成。这里的重要方面是,利用规划的轨迹尽可能补偿垂直移动,由于由 k_1 设置的给定约束。

[0094] 因此,借助于在完整的时程上预测的缆绳悬挂点的垂直位置和速度 $\tilde{z}_a^h = [\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,K_p})]^T$ 和 $\tilde{z}_a^h = [\dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,K_p})]^T$,从而构想出(formulate,用公式表示出)最佳控制问题,该问题周期性地得以解决,其中 K_p 指定预测时间步的数目。随后将讨论相关的数字解决方案和实施。

[0095] 该章节的第二部分论述移动负载的轨迹的规划 y_l^* 、 $\dot{y}_l^*$ 和 $\ddot{y}_l^*$ 。轨迹的规划直接由起重机操作员 w_{hh} 的手柄信号产生。该计算通过最大容许急拉相加实现。

[0096] 1.1补偿的参考轨迹

[0097] 在提升绞盘的补偿移动的轨迹规划中,考虑到有效驱动器约束,必须由缆绳悬挂点的预测垂直位置和速度产生足够光滑的轨迹。此任务随后被视为受约束的优化问题,其可以在每个时间步在线解决。因此,这种方法类似于模型预测控制的草案,虽然在模型预测的轨迹生成的意义上。

[0098] 作为优化的设定值或参考,使用缆绳悬挂点的垂直位置和率 $\tilde{z}_a^h = [\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,K_p})]^T$ 和 $\dot{\tilde{z}}_a^h = [\dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,K_p})]^T$,其在时间步为 K_p 的完整的时程内在时间 t_k 时进行预测,并用对应的预测时间计算,例如借助于在DE102008024513中所描述的算法。

[0099] 通过 k_1 、 $V_{\max}$ 和 $a_{\max}$ 考虑约束有效,于是可针对补偿移动确定最佳时间序列。

[0100] 然而,类似于模型预测控制,仅由此计算的轨迹的第一值用于随后的控制。在接下来的时间步中,通过缆绳悬挂点的垂直位置和速度的更新和因此更准确的预测来重复优化。

[0101] 一方面,与经典的模型预测控制相比,具有连续控制的模型预测轨迹生成的优点在于:可以以与轨迹生成相比更长的扫描时间来计算控制部分和相关的稳定。因此,计算密集优化可以被转移到较慢的任务中。

[0102] 另一方面,在这个概念中,对于最优化不会求得有效接的情况,紧急功能可以独立于控制而实现。其由其中控制依赖于在这样的紧急情况下的简化轨迹规划组成,并进一步驱动绞盘。

[0103] 1.1.1规划补偿移动的系统模型

[0104] 为了满足补偿移动的参考轨迹的稳定性的要求,其最早的三阶导数 $\ddot{\ddot{y}}_a^*$ 可以视为跳

跃能力。然而,关于绞盘寿命,应在补偿移动中避免急拉中的跳跃,由此仅四阶导数 $\ddot{y}_a^{(4)}$ 可以视为跳跃能力。

[0105] 因此,急拉 $\ddot{y}_a^*$ 必须至少被稳定规划,且参考图3中所示的四阶积分链实现补偿移动的轨迹生成。在优化中,其相同作为系统模型,并在状态空间中可以表示为

$$[0106] \quad \dot{\mathbf{x}}_a = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_a} \mathbf{x}_a + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_a} u_a, \quad \mathbf{x}_a(0) = \mathbf{x}_{a,0},$$

$$\mathbf{y}_a = \mathbf{x}_a \quad (1.1)$$

[0107] 在这里,输出 $\mathbf{y}_a = [y_a^*, \dot{y}_a^*, \ddot{y}_a^*, \ddot{y}_a^*]^T$ 包括补偿移动的规划轨迹。为了构想出最优控制问题,以及关于未来实现,该时间连续模型在晶格上被最初离散

$$[0108] \quad \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_{K_p-1} < \tau_{K_p} \quad (1.2)$$

[0109] 其中, K_p 表示缆绳悬挂点的垂直移动的预测的预测步的数目。为了区分轨迹生成中的离散时间表示与离散系统时间 t_k ,其被指定为 $\tau_k = k \Delta \tau$,其中 $k=0, \dots, K_p$,以及 $\Delta \tau$ 是用于轨迹生成的时域 K_p 的离散间隔。

[0110] 图4示出所选择的晶格是非等距离的,所以在时域上的必要支撑点的数量减少。因此,能够保持最优控制问题的尺寸被解决为小。在时域结束时的粗略离散的影响对于规划的轨迹没有不利的影响,因为垂直位置和速度的预测在预测时域的结束时更加不准确。

[0111] 可以参考解析解来精确计算对于该晶格有效的离散时间系统表示

$$[0112] \quad \mathbf{x}_a(t) = e^{\mathbf{A}_a t} \mathbf{x}_a(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_a(t-\tau)} \mathbf{B}_a u_a(\tau) d\tau \quad (1.3)$$

[0113] 对于图3的积分链,其如下:

$$[0114] \quad \mathbf{x}_a(\tau_{k+1}) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\tau_k & \frac{\Delta\tau_k^2}{2} & \frac{\Delta\tau_k^3}{6} \\ 0 & 1 & \Delta\tau_k & \frac{\Delta\tau_k^2}{2} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta\tau_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_a(\tau_k) + \begin{bmatrix} \frac{\Delta\tau_k^4}{24} \\ \frac{\Delta\tau_k^3}{6} \\ \frac{\Delta\tau_k^2}{2} \\ \Delta\tau_k \end{bmatrix} u_a(\tau_k), \quad \mathbf{x}_a(0) = \mathbf{x}_{a,0},$$

$$[0115] \quad y_a(\tau_k) = x_a(\tau_k), \quad k=0, \dots, K_p-1, \quad (1.4)$$

[0116] 其中 $\Delta \tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k$ 描述了有效用于各自时间步的离散化步长。

[0117] 1.1.2 最优控制问题的制定和解决方案

[0118] 通过解决最优控制问题,将规划轨迹,其尽可能密切地跟随缆绳悬挂点的预测的垂直移动,并在同一时间满足给定的约束。

[0119] 为了满足该要求,其优值函数如下:

[0120]

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{K_p} \left\{ [y_a(\tau_k) - w_a(\tau_k)]^T Q_w(\tau_k) [y_a(\tau_k) - w_a(\tau_k)] + u_a(\tau_{k-1}) r_u u_a(\tau_{k-1}) \right\} \quad (1.5)$$

[0121] 其中 $w_a(\tau_k)$ 指定在各个时间步的参考有效。由于在本文中仅缆绳悬挂点的预测位置 $\hat{z}_a^h(t_k + T_{p,k})$ 和速度 $\hat{\dot{z}}_a^h(t_k + T_{p,k})$ 可用,所以相关联的加速度和急拉被设置为零。然而,通过加速度和急拉偏差的相应加权,可使这种不一致规格的影响保持为较小。因此:

$$[0122] \quad w_a(\tau_k) = \begin{bmatrix} \hat{z}_a^h(t_k + T_{p,k}) & \hat{\dot{z}}_a^h(t_k + T_{p,k}) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad k = 1, \dots, K_p, \quad (1.6)$$

[0123] 在优值函数中正半定对角线矩阵与

$$[0124] \quad Q_w(\tau_k) = \text{diag}(q_{w,1}(\tau_k), q_{w,2}(\tau_k), q_{w,3}, q_{w,4}), \quad k = 1, \dots, K_p \quad (1.7)$$

[0125] 参考的偏差被加权。标量因子 r_u 评估校正效果。虽然 r_u 、 $q_{w,3}$ 和 $q_{w,4}$ 在整个预测时域是恒定的,但是依赖于时间步 τ_k 来选择 $q_{w,1}$ 和 $q_{w,2}$ 。因此预测时域开始时的参考值可以进行比结束时更强地加权。随着预测时间的增加而减小的垂直移动预测的精度可以在优值函数中描述。由于不存在加速度和急拉的参考,所以权重 $q_{w,3}$ 和 $q_{w,4}$ 仅惩罚与零的偏差,这就是为什么选择它们小于 $q_{w,2}(\tau_k)$ 的位置和速度的权重。

[0126] 最优控制问题的相关联的约束按照驱动器的可用功率和当前选择的加权因子 k_1 (参考图2)。因此,其适用于(1.4)的系统模型的状态:

$$[0127] \quad \begin{aligned} -\delta_a(\tau_k)(1 - k_1)v_{\max} &\leq x_{a,2}(\tau_k) \leq \delta_a(\tau_k)(1 - k_1)v_{\max}, \\ -\delta_a(\tau_k)(1 - k_1)a_{\max} &\leq x_{a,3}(\tau_k) \leq \delta_a(\tau_k)(1 - k_1)a_{\max}, \quad k = 1, \dots, K_p, \\ -\delta_a(\tau_k)j_{\max} &\leq x_{a,4}(\tau_k) \leq \delta_a(\tau_k)j_{\max} \end{aligned} \quad (1.8)$$

[0128] 和输入:

$$[0129] \quad -\delta_a(\tau_k) \frac{d}{dt} j_{\max} \leq u_a(\tau_k) \leq \delta_a(\tau_k) \frac{d}{dt} j_{\max}, \quad k = 0, \dots, K_p - 1. \quad (1.9)$$

[0130] 在这里, $\delta_a(\tau_k)$ 表示被选择为使得各自的约束在时域结束时占时域开始时的95%的减缩因子。对于中间时间步, $\delta_a(\tau_k)$ 由线性内插产生。沿着时域的约束的减少增加了方法相对于容许的解决方案的存在的稳定性。

[0131] 虽然可以在操作中速度和加速度约束可以改变,但是急拉 $j_{\max}$ 和急拉 $\frac{d}{dt} j_{\max}$ 的导数的约束是恒定的。为了增加提升绞盘和整个起重机的使用寿命,在最大允许冲击负载的方面来选择它们。对于位置状态,没有可适用的约束。

[0132] 由于在操作中最大速度 $v_{\max}$ 和加速度 $a_{\max}$ 以及功率 k_1 的加权因子由外部确定,所以,对于最优控制问题,速度和加速度约束也必然被改变。所提出的概念考虑如下相关的随时间变化的约束:只要约束改变了,首先会仅在时间步 τ_k 的预测时域结束时考虑更新值。随着时间推移,然后其被推到预测时域的开始。

[0133] 图5示出参考速度约束的此过程。当减少约束时,此外还应考虑其符合其最大容许导数。这意味着,例如,速度约束 $(1 - k_1)v_{\max}$ 最大可与当前加速度约束 $(1 - k_1)a_{\max}$ 所允许的一样快地减小。因为更新后的约束被努力完成(push through),所以总是存在约束中存在的

初始条件 $x_a(\tau_0)$ 的解决方案,这又不会违反更新后的约束。然而,其将占完整的预测时域,直到改变的约束最终影响时域开始的规划轨迹。

[0134] 因此,最优控制问题完全由二次优值函数(1.5)最小化,系统模型(1.4)和不等式由(1.8)和(1.9)以线性二次优化问题(二次规划问题的QP问题)的形式约束。当首次进行优化时,初始条件被选择为 $x_a(\tau_0)=[0,0,0,0]^T$ 。接着,最后的优化步骤中在针对时间步计算的值 $x_a(\tau_1)$ 用作初始条件。

[0135] 在每个时间步,QP问题的实际解决方案的计算经由被称为QP求解方程的数值方法而实现。

[0136] 由于优化的计算工作,补偿移动的轨迹规划的扫描时间大于主动升沉补偿的所有剩余分量的离散时间;所以: $\Delta\tau>\Delta t$ 。

[0137] 为了确保参考轨迹可用于以更快的速度控制,图3的积分链的模拟在优化以外以更快的扫描时间 Δt 发生。只要新值可通过优化而可用,状态 $x_a(\tau_0)$ 用作模拟的初始条件,且在预测时域 $u_a(\tau_0)$ 开始时的校正变量被写入积分链上,作为常数输入。

[0138] 1.2移动负载的参考轨迹

[0139] 类似于补偿移动,两次稳定可微参考轨迹对于叠加的手柄控制(参见图2)是必需的。至于由起重机操作员指定的这些移动,对于绞盘通常不期望方向的快速变化,稳定规划的加速度 $\ddot{y}_i^*$ 的最低要求也被发现相对于绞盘的使用寿命是足够的。因此,与针对补偿移动规划的参考轨迹相比,对应于急拉的第三导数 $\ddot{y}_i^*$ 已经可以被视为跳跃能力。

[0140] 如图6中所示,其也作为三阶积分链的输入。除了如关于稳定性的要求,所规划的轨迹还必须满足当前有效的速度和加速度约束,这对于手柄控制被发现为 $k_1v_{\max}$ 和 $k_1a_{\max}$ 。

[0141] 起重机操作员的手柄信号 $-100 \leq w_{hh} \leq 100$ 被解释为相对于当前最大容许速度 $k_1v_{\max}$ 的相对速度规格。因此,根据图7,由手柄指定的目标速度是

$$[0142] \quad v_{hh}^* = k_1 v_{\max} \frac{w_{hh}}{100} \quad (1.10)$$

[0143] 从其中可以看出,由手柄当前指定的目标速度取决于手柄位置 w_{hh} ,可变加权因子 k_1 和当前最大值容许绞盘速度 $v_{\max}$ 。

[0144] 手柄控制的轨迹规划任务现在可以表示如下:根据由手柄指定的目标速度,可生成稳定可微速度特性,使得加速度有稳定的过程。作为该任务的程序,所谓的急拉增加是可取的。

[0145] 基本的想法是:在第一阶段中,最大容许急拉 $j_{\max}$ 作用在积分链的输入上,直到达到最大容许加速度。在第二阶段中,速度以恒定加速度增加;且在最后阶段,增加最大容许负急拉,使得达到所需的最终速度。

[0146] 因此,在急拉增加中须仅确定各相位之间的切换时间。图8示出速度改变的急拉与切换时间的示例性过程。 $T_{1,0}$ 指定重新规划发生的时间。时间 $T_{1,1}$ 、 $T_{1,2}$ 和 $T_{1,3}$ 均指各个相位之间的所计算的切换时间。在下段中列出了它们的计算。

[0147] 只要针对手柄控制发生新情况,就会发生重新规划生成的轨迹。只要手柄控制的目标速度 v_{hh}^* 或当前有效的最大加速度 $k_1a_{\max}$ 发生改变,就会发生新情况。目标速度可由于新的手柄位置或由于 k_1 或 $v_{\max}$ 的新规格而改变(参见图7)。类似地,最大有效加速度变化 k_1 或

$a_{\max}$ 是可能的。

[0148] 当重新规划轨迹时,该速度最初根据当前规划速度 $\dot{y}_l^*(T_{l,0})$ 和相应的加速度 $\ddot{y}_l^*(T_{l,0})$ 来计算,其用加速度减少为零获得:

$$[0149] \quad \tilde{v} = \dot{y}_l^*(T_{l,0}) + \Delta T_1 \ddot{y}_l^*(T_{l,0}) + \frac{1}{2} \Delta T_1^2 \tilde{u}_{l,1}, \quad (1.11)$$

[0150] 其中由下式给出最小所需的时间

$$[0151] \quad \Delta T_1 = -\frac{\ddot{y}_l^*}{\tilde{u}_{l,1}}, \quad \tilde{u}_{l,1} \neq 0 \quad (1.12)$$

[0152] 且 $\tilde{u}_{l,1}$ 指定积分链的输入,即增加的急拉(参见图6):根据当前规划的加速度 $\ddot{y}_l^*(T_{l,0})$,其被求得为

$$[0153] \quad \tilde{u}_{l,1} = \begin{cases} j_{\max}, & \text{for } \ddot{y}_l^* < 0 \\ -j_{\max}, & \text{for } \ddot{y}_l^* > 0 \\ 0, & \text{for } \ddot{y}_l^* = 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

[0154] 取决于理论上计算出的速度和所需的目标速度,现在可指示输入的过程。如果 $v_{hh}^* > \tilde{v}$ 、 $\tilde{v}$ 没有达到所需的值 v_{hh}^* ,并能够进一步提高加速度。然而,如果 $v_{hh}^* < \tilde{v}$ 、 $\tilde{v}$ 太快,则加速度必须立刻减小。

[0155] 根据这些考虑,可以针对三个阶段导出急拉的下面切换序列:

$$[0156] \quad \mathbf{u}_l = \begin{cases} \begin{bmatrix} j_{\max} & 0 & -j_{\max} \end{bmatrix}, & \text{for } \tilde{v} \leq v_{hh}^* \\ \begin{bmatrix} -j_{\max} & 0 & j_{\max} \end{bmatrix}, & \text{for } \tilde{v} > v_{hh}^* \end{cases} \quad (1.14)$$

[0157] 其中 $\mathbf{u}_l = [u_{l,1}, u_{l,2}, u_{l,3}]$ 和输入信号 $u_{l,i}$ 加入各相位中。阶段的持续时间被求得为 $\Delta T_i = T_{1,i} - T_{1,i-1}$ 与 $i=1,2,3$ 。因此,在第一阶段结束时的规划的速度和加速度为:

$$[0158] \quad \dot{y}_l^*(T_{l,1}) = \dot{y}_l^*(T_{l,0}) + \Delta T_1 \ddot{y}_l^*(T_{l,0}) + \frac{1}{2} \Delta T_1^2 u_{l,1}, \quad (1.15)$$

$$[0159] \quad \ddot{y}_l^*(T_{l,1}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,0}) + \Delta T_1 u_{l,1} \quad (1.16)$$

[0160] 且在第二阶段之后为:

$$[0161] \quad \dot{y}_l^*(T_{l,2}) = \dot{y}_l^*(T_{l,1}) + \Delta T_2 \ddot{y}_l^*(T_{l,1}), \quad (1.17)$$

$$[0162] \quad \ddot{y}_l^*(T_{l,2}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,1}), \quad (1.18)$$

[0163] 其中,假定 $u_{l,2}$ 为0。最后,在第三阶段之后,如下:

$$[0164] \quad \dot{y}_l^*(T_{l,3}) = \dot{y}_l^*(T_{l,2}) + \Delta T_3 \ddot{y}_l^*(T_{l,2}) + \frac{1}{2} \Delta T_3^2 u_{l,3}, \quad (1.19)$$

$$[0165] \quad \ddot{y}_l^*(T_{l,3}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,2}) + \Delta T_3 u_{l,3}. \quad (1.20)$$

[0166] 对于切换时间 $T_{1,i}$ 的精确计算,加速度约束最初被忽略,由此 $\Delta T_2=0$ 。由于这种简化,的两个剩余时间间隔的长度可以表示为如下:

$$[0167] \quad \Delta T_1 = \frac{\tilde{a} - \tilde{y}_l^*(T_{1,0})}{u_{l,1}}, \quad (1.21)$$

$$[0168] \quad \Delta T_3 = \frac{0 - \tilde{a}}{u_{l,3}}, \quad (1.22)$$

[0169] 其中 $\tilde{a}$ 代表所实现的最大加速度。通过将(1.21)和(1.22)插入到(1.15)、(1.16)和(1.19)中,获得方程系统,其可针对 $\tilde{a}$ 而求解。考虑到 $\dot{y}_l^*(T_{l,3}) = v_{lh}^*$,最终获得下式:

$$[0170] \quad \tilde{a} = \pm \sqrt{\frac{u_{l,3} [2\tilde{y}_l^*(T_{l,0})u_{l,1} - \tilde{y}_l^*(T_{l,0})^2 - 2v_{lh}^*u_{l,1}]}{u_{l,1} - u_{l,3}}}. \quad (1.23)$$

[0171] 符号 $\tilde{a}$ 由(1.21)和(1.22)中的 ΔT_1 和 ΔT_3 必须是正数的条件产生。

[0172] 在第二步骤中, $\tilde{a}$ 和最大容许加速度 $k_1 a_{\max}$ 导致实际最大加速度:

$$[0173] \quad \tilde{a} = \tilde{y}_l^*(T_{l,1}) = \tilde{y}_l^*(T_{l,2}) = \min\{k_1 a_{\max}, \max\{-k_1 a_{\max}, \tilde{a}\}\}. \quad (1.24)$$

[0174] 同样,最终可以计算出实际发生的时间间隔 ΔT_1 和 ΔT_3 。它们由其中 $\tilde{a} = \tilde{a}$ 的(1.21)和(1.22)产生。现在仍未知的时间间隔 ΔT_2 由(1.17)和(1.19)确定为下式,其中, ΔT_1 和 ΔT_3 由(1.21)和(1.22)确定

$$[0175] \quad \Delta T_2 = \frac{2v_{lh}^*u_{l,3} + \tilde{a}^2 - 2\tilde{y}_l^*(T_{l,1})u_{l,3}}{2\tilde{a}u_{l,3}}, \quad (1.25)$$

[0176] 其中由(1.15)产生 $\dot{y}_l^*(T_{l,1})$ 。切换时间可直接取自时间间隔:

$$[0177] \quad T_{l,i} = T_{l,i-1} + \Delta T_i, \quad i=1,2,3. \quad (1.26)$$

[0178] 可以用各自切换时间解析地计算要规划的速度和加速度特性 $\dot{y}_l^*$ 和 $\ddot{y}_l^*$ 。应当提到的是,由切换时间规划的轨迹经常不完全运行,因为在到达切换时间 $T_{l,3}$ 之前,会发生新的情况,从而发生重新规划,且必须计算新的切换时间。如前所述,通过 W_{hh} 、 $v_{\max}$ 、 $a_{\max}$ 或 k_1 的变化,会发生新的情况。

[0179] 图9示出了通过示例的方式借助于所提出的方法产生的轨迹。轨迹的过程包括两种情况:其可由于(1.24)而发生。在第一种情况下,在时间 $t=1s$ 时达到最大容许加速度,接着具有恒定定加速度的阶段。在时间 $t=3.5s$ 时发生第二种情况。在这里,由于手柄位置,不会完全达到最大容许加速度。其结果是,第一和第二切换时间重合,且 $\Delta T_2=0$ 应用。根据图6,通过速度曲线的整合来计算相关联的位置过程,其中在系统启动时的位置由当前从提升绞盘退绕的缆绳长度初始化。

[0180] 2提升绞盘的动驱动概念

[0181] 原则上,该驱动由两种不同的操作模式组成:主动升沉补偿,用于从具有自由悬挂负载的船移动中解耦垂直负载移动;和恒张力控制,用于在负载沉积在海床上时避免松弛的缆线。在深海提升期间,升沉补偿最初是主动的。参考沉积操作的检测,驱动切换至恒张力控制的切换。图10示出了具有相关的参考和控制变量的整体概念。

[0182] 然后,两种不同的操作模式中的每个也可能被实现,其中每个没有其它操作模式。此外,如将在下面描述的,也可独立于在船舶上使用起重机且独立于主动升沉补偿来使用恒张力模式。

[0183] 由于主动升沉补偿,提升绞盘应被驱动,使得绞盘移动补偿缆绳悬挂点 z_{ah} 的垂直移动,且起重机操作员借助于在被认为惯性的 h 坐标系中的手柄来移动负载。为了确保驱动具有用于最小化补偿误差的所需预测行为,其以两个自由度的结构形式通过先导控制和稳定部分来实施。先导控制借助于绞盘的平坦输出由微分参数化来计算,并由用于移动负载的规划轨迹 y_l^* 、 $\dot{y}_l^*$ 和 $\ddot{y}_l^*$ 以及负补偿移动的负轨迹 $-y_a^*$ 、 $-\dot{y}_a^*$ 和 $-\ddot{y}_a^*$ 引起(参考图10)。用 y_h^* 、 $\dot{y}_h^*$ 和 $\ddot{y}_h^*$ 指定驱动动力和绞盘动力的系统输出的所得目标轨迹。它们代表用于绞盘移动的目标位置、速度和加速度,从而用于缆绳的卷绕和退绕。

[0184] 在恒张力方面,负上的缆绳力载 F_{s1} 被控制为恒定量,以便避免松弛缆绳。因此,在此操作模式下手柄被停用,且在手柄信号基础上规划的轨迹不再被增加。绞盘的驱动反过来通过具有先导控制和稳定部分的两个自由度结构实现。

[0185] 确切的负载位置 z_1 和负载上的缆绳力 F_{s1} 作为用于控制的测量量不可用,因为由于长的缆绳长度和较大深度,起重机吊钩未配备传感器单元。此外,没有信息存在于悬浮负载的种类和形状。因此,单个负载特定的参数(诸如负载质量 m_1 、质量的流体动力增加的系数 C_a 、阻力系数 C_d 和浸渍的体积 ∇_1)一般不是已知的,因此负载位置的可靠估计在实践中几乎是不可能的。

[0186] 因此,仅退绕的缆绳长度 l_s 和相关联的速度 $\dot{l}_s$ 以及在缆绳悬挂点 F_c 上的力作为用于控制的测量量是可用的。长度 l_s 由取决于卷绕层 j_1 的绞盘半径 $r_h(j_1)$ 和用增量编码器测量的绞盘角度 φ_h 来间接地获得。相关联的缆绳速度 $\dot{l}_s$ 可以由具有合适的低通滤波的数值微分来计算。借助于力测量引脚来检测施加于缆绳悬挂点的缆绳力 F_c 。

[0187] 2.1主动升沉补偿的驱动

[0188] 图11用电路框图在频率范围内示出了主动升沉补偿的提升绞盘的驱动。正如可以看到的,仅存在影响来自驱动 $G_h(s)$ 的部分系统的缆绳长度和速度 $y_h=l_s$ 和 $\dot{y}_h=\dot{l}_s$ 的反馈。结果,作用于缆绳系统 $G_{s,z}(s)$ 的缆绳悬挂点的垂直移动的补偿 $Z_a^h(s)$ 作为输入干扰纯粹发生,作为先导控制;缆绳和负载动力可被忽略。由于输入干扰或绞盘移动的非完整补偿,激励了固有的缆绳动态,但在实践中,可以假设所产生的负载移动在水中大大衰减,且衰减非常快。

[0189] 从校正变量 $U_h(s)$ 到退绕缆绳长度 $Y_h(s)$ 的驱动系统的传递函数可以近似为IT₁系统,且结果为

$$[0190] \quad G_h(s) = \frac{Y_h(s)}{U_h(s)} = \frac{K_h r_h(j_1)}{T_h s^2 + s} \quad (2.1)$$

[0191] 其中,绞盘半径为 $r_h(j_1)$ 。由于在相同的时间的系统输出 $Y_h(s)$ 表示平面输出,所以反相的先导控制 $F(s)$ 将为

$$[0192] \quad F(s) = \frac{U_g(s)}{Y_h^*(s)} = \frac{1}{G_h(s)} = \frac{T_h}{K_h r_h(j_1)} s^2 + \frac{1}{K_h r_h(j_1)} s \quad (2.2)$$

[0193] 并可以以如下的微分参数化的形式被写入时域中

$$[0194] \quad u_{ff}(t) = \frac{T_h}{K_h r_h(j\omega)} \ddot{y}_h^*(t) + \frac{1}{K_h r_h(j\omega)} \dot{y}_h^*(t) \quad (2.3)$$

[0195] (2.3)示出先导控制的参考轨迹必须是至少两次稳定微分。

[0196] 由稳定性 $K_a(s)$ 和绞盘系统 $G_h(s)$ 组成的闭合电路的传递函数可以由图11获得

$$[0197] \quad G_{AHC}(s) = \frac{K_a(s)G_h(s)}{1 + K_a(s)G_h(s)} \quad (2.4)$$

[0198] 通过忽略补偿移动 $Y_a^*(s)$,参考变量 $Y_h^*(s)$ 可以被近似为具有恒定或固定的手柄偏转的斜坡形信号,因为在这种情况下,存在恒定的目标速度 v_{hh}^* 。为了避免这样的参考变量的固定控制偏差,开链 $K_a(s)G_h(s)$ 因此必须示出 I_2 行为[9]。这可通过PID控制器实现,其中:

$$[0199] \quad K_a(s) = \frac{T_h}{K_h r_h(j\omega)} \left(\frac{\kappa_{AHC,0}}{s} + \kappa_{AHC,1} + \kappa_{AHC,2}s \right), \quad \kappa_{AHC,i} > 0 \quad (2.5)$$

[0200] 因此,闭合电路如下:

$$[0201] \quad G_{AHC}(s) = \frac{\kappa_{AHC,0} + \kappa_{AHC,1}s + \kappa_{AHC,2}s^2}{s^3 + \left(\frac{1}{T_h} + \kappa_{AHC,2}\right)s^2 + \kappa_{AHC,1}s + \kappa_{AHC,0}}, \quad (2.6)$$

[0202] 其中, $\kappa_{AHC,i}$ 的精确值取决于各自的时间常数 T_h 来选择。

[0203] 2.2沉积操作的检测

[0204] 只要负载撞击海床,就应当实现从主动升沉补偿到恒张力控制的切换。为了该目的,沉积操作的检测是必要的(参考图10)。对于相同的和随后的恒张力控制,缆绳被近似为简单的弹簧质量元件。因此,作用在缆绳悬挂点上的力被近似计算如下:

$$[0205] \quad F_c = k_c \Delta l_c, \quad (2.7)$$

[0206] 其中, k_c 和 Δl_c 指定相当于缆绳的弹性的弹簧常数和弹簧的偏差。对于后者,其适用于:

$$[0207] \quad \Delta l_c = \int_0^1 \varepsilon_s(\bar{s}, t) d\bar{s} = \bar{z}_{s,stat}(1) - \bar{z}_{s,stat}(0) - l_s = \frac{gl_s}{E_s A_s} \left(m_c + \frac{1}{2} \mu_s l_s \right). \quad (2.8)$$

[0208] 可以根据以下定态观测来确定等效弹簧常数 k_c 。对于加载质量 m_f 的弹簧,它在固定的情况下适用于:

$$[0209] \quad k_c \Delta l_c = m_f g. \quad (2.9)$$

[0210] (2.8)的变换结果如下

$$[0211] \quad \frac{E_s A_s}{l_s} \Delta l_c = \left(m_c + \frac{1}{2} \mu_s l_s \right) g. \quad (2.10)$$

[0212] 其中,参考(2.9)和(2.10)之间的系数比较,等效弹簧常数可以被读取为

$$[0213] \quad k_c = \frac{E_s A_s}{l_s} \quad (2.11)$$

[0214] 在(2.9)中,也可以看出:在定态情况下,弹簧的偏差 Δl_c 受有效负载质量 m_c 和缆绳

的质量 $\frac{1}{2}\mu_s l_s$ 的影响。这是由于这样的事实引起：在弹簧中，悬挂质量 m_f 被假定为集中在一个点上。然而，缆绳质量沿缆绳长度均匀分布，因此没有完全加载弹簧。然而，缆绳的全部重量 $\mu_s l_s g$ 包括在缆绳悬挂点上的力测量中。

[0215] 通过缆绳系统的该近似，现在可以得出在海床上的沉积操作的检测条件。在休息时，作用在缆绳悬挂点上的力由退绕缆绳的重量 $\mu_s l_s g$ 和负载质量 $m_e g$ 的有效重量力组成。因此，具有位于海床上的负载的所测量的力 F_c 约为

$$[0216] \quad F_c = (m_e + \mu_s l_s)g + \Delta F_c \quad (2.12)$$

[0217] 其中

$$[0218] \quad \Delta F_c = -k_c \Delta l_s, \quad (2.13)$$

[0219] 其中， Δl_s 指定在到达海床之后缆绳退绕。从(2.13)中，随后 Δl_s 与测量的力的变化成比例，因为在到达地面后负载位置是恒定的。参考(2.12)和(2.13)，现在可导出检测的以下条件，其必须同时满足：

[0220] • 负弹簧力的减少必须小于阈值：

$$[0221] \quad \Delta \hat{F}_c < \Delta \hat{F}_{c,0} \quad (2.14)$$

[0222] • 弹簧力的时间导数必须小于阈值：

$$[0223] \quad \dot{\hat{F}}_c < \dot{\hat{F}}_{c,0} \quad (2.15)$$

[0224] • 起重机操作员必须降低负载。参考由手柄信号规划的轨迹来检查此条件：

$$[0225] \quad \ddot{w} \geq 0. \quad (2.16)$$

[0226] • 为了避免沉浸到水中的错误检测，最小缆绳长度必须退绕：

$$[0227] \quad l_s > l_{s,\min}.$$

$$[0228] \quad (2.17)$$

[0229] 负弹簧力 ΔF_c 的减少均相对于所测量的力信号 F_c 中的最后高点 $\bar{F}_c$ 来计算。为了抑制测量噪声和高频干扰，力信号由相应的低通滤波器进行预处理。

[0230] 由于必须同时满足条件(2.14)和(2.15)，所以可排除由动态固有缆绳振荡引起的错误检测：由于动态固有缆绳振荡的结果，力信号 F_c 振荡，因此相对于最后高点 $\bar{F}_c$ 的弹簧力的变化 ΔF_c 和弹簧力的时间导数 $\dot{F}_c$ 具有移相。因此，通过阈值 $\Delta \hat{F}_c$ 和 $\dot{\hat{F}}_c$ 的合适选择，在动态固有缆绳振荡的情况下，这两个条件不能同时得到满足。为了该目的，缆绳力的静态部分必须下降，如同沉浸在水中或沉积到海床的情况下一样。然而，通过条件(2.17)来防止对沉浸在水中的错误检测。

[0231] 弹簧力的变化的阈值取决于如下的所测量的力信号的最后高点来计算：

$$[0232] \quad \Delta \hat{F}_c = \min \left\{ -x_1 \bar{F}_c, \Delta \hat{F}_{c,\max} \right\}, \quad (2.18)$$

[0233] 其中 $x_1 < 1$ 和最大值 $\Delta \hat{F}_{c,\max}$ 被实验性地确定。可根据(2.7)的时间导数和如下的最大容许手柄速度 $k_1 v_{\max}$ 来确定力信号 $\dot{\hat{F}}_c$ 的导数的阈值：

$$[0234] \quad \hat{F}_c = \min \left\{ -\chi_2 k_c k_v v_{\max}, \hat{F}_{c,\max} \right\} \quad (2.19)$$

[0235] 两个参数 $\chi_2 < 1$ 和 $\hat{F}_{c,\max}$ 同样被实验性地确定。

[0236] 由于在恒张力控制中,施加力控制而不是位置控制,所以依赖作用于负载上的所有静力 $F_{l,\text{stat}}$ 的总和来将目标力 F_c^* 指定为参考变量。为了该目的,考虑已知的缆绳质量 $\mu_s l_s$,在升沉补偿的相位中计算 $F_{l,\text{stat}}$:

$$[0237] \quad F_{l,\text{stat}} = F_{c,\text{stat}} - \mu_s l_s g. \quad (2.20)$$

[0238] $F_{c,\text{stat}}$ 指定在缆绳悬挂点 F_c 所测量的力的静力分量。其起源于所测量的力信号的相应低通滤波。过滤得到的群延迟是没有问题的,只是静力分量受到关注,且时间延迟对其没有显着的影响。由作用于负载上的所有静态的力的总和,考虑到额外作用在缆绳悬挂点上的缆绳的重量力,导出目标力,如下所示:

$$[0239] \quad F_c^* = p_s F_{l,\text{stat}} + \mu_s l_s g, \quad (2.21)$$

[0240] 其中,在缆绳中产生的张力由起重机操作员指定为 $0 < p_s < 1$ 。为了避免参考变量的设定点跳跃,在沉积操作的检测之后,实现从在检测时当前测量的力到实际目标力 F_c^* 的斜坡形的过渡。

[0241] 为了从海床拾取负载,起重机操作员对自由悬挂的负载手动执行从恒张力模式到主动升沉补偿的变化。

[0242] 2.3恒张力模式的驱动

[0243] 图12以电路框图示出频率范围内的恒张力模式中的提升绞盘的实现的驱动。与图11中所示的控制结构相比,在这里缆绳系统的输出 $F_c(s)$ (即在缆绳悬挂点上测量的力)被反馈而不是绞盘系统的输出 $Y_h(s)$ 被反馈。根据(2.12),所测量的力 $F_c(s)$ 由力的变化 $\Delta F_c(s)$ 和静态重量力 $m_{\text{eg}} + \mu_s l_s g$ 组成,这在图中被指定为 $M(s)$ 。对于实际控制,缆绳系统又反过来为弹簧质量系统。

[0244] 两个自由度的结构的先导控制 $F(s)$ 与主动升沉补偿中的一个相同的且分别由(2.2)和(2.3)给出。然而,在恒张力模式中,不添加手柄信号,这也就是为什么参考轨迹仅由用于补偿移动的负目标速度和加速度 $-\dot{y}_a^*$ 和 $-\ddot{y}_a^*$ 组成。先导控制部最初又补偿缆绳悬挂点的垂直移动 $Z_a^h(s)$ 。然而,绞盘位置的直接稳定性不受 $Y_h(s)$ 的反馈影响。这受所测量的力信号的反馈的间接影响。

[0245] 从图12中获得所测量的输出 $F_c(s)$ 如下

$$[0246] \quad F_c(s) = G_{CT,1}(s) \underbrace{\left[Y_a^*(s) F(s) G_h(s) + Z_a^h(s) \right]}_{E_c(s)} + G_{CT,2}(s) F_c^*(s) \quad (2.22)$$

[0247] 其中,具有两个传递函数

$$[0248] \quad G_{CT,1}(s) = \frac{G_{s,F}(s)}{1 + K_s(s) G_h(s) G_{s,F}(s)}, \quad (2.23)$$

$$[0249] \quad G_{CT,2}(s) = \frac{K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)}{1 + K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)}, \quad (2.24)$$

[0250] 其中,用于站立在地面上的负载的缆绳系统的传递函数由(2.12)产生:

$$[0251] \quad G_{s,F}(s) = -k_c. \quad (2.25)$$

[0252] 如可由(2.22)得到,补偿误差 $E_a(s)$ 可由稳定的传递函数 $G_{CT,1}(s)$ 校正,且绞盘位置被间接稳定。还是在这种情况下,控制器 $K_s(s)$ 的要求由预期的参考信号 $F_c^*(s)$ 引起,这在由来自(2.21)的恒定目标力 F_c^* 给出的过渡阶段之后发生。为了避免与恒定参考变量的固定控制偏差,开链 $K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)$ 必须有I行为。由于绞盘的传递函数 $G_h(s)$ 已经隐含具有这样的行为,所以这个要求可以通过P反馈实现,因此,它适用于:

$$[0253] \quad K_s(s) = -\frac{T_h}{K_h r_h(j)} K_{CT}, \quad K_{CT} > 0. \quad (2.26)$$

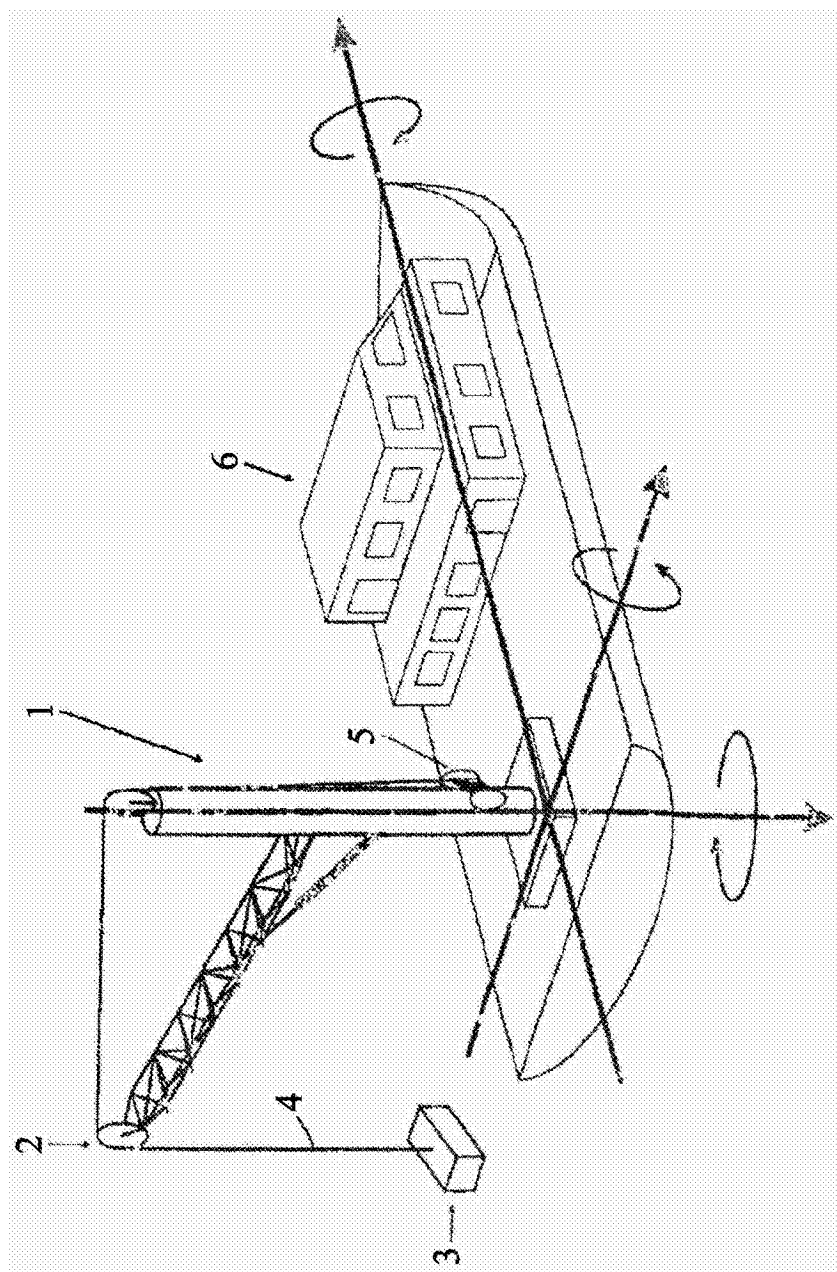


图1

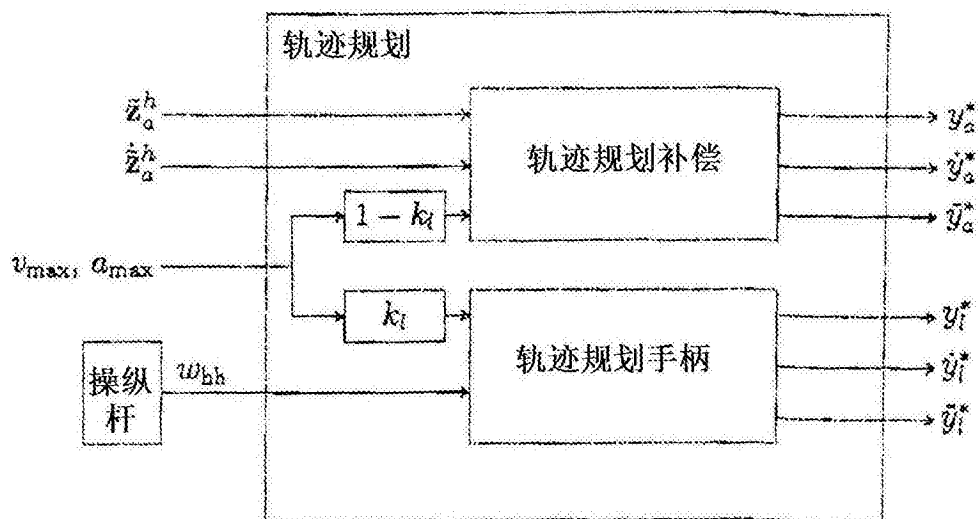


图2

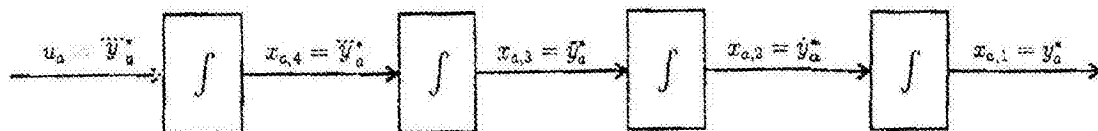


图3

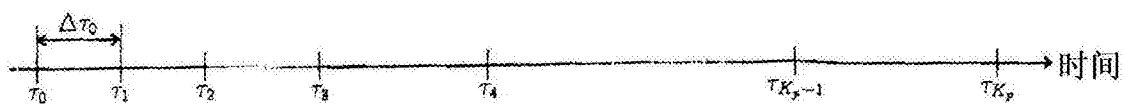


图4

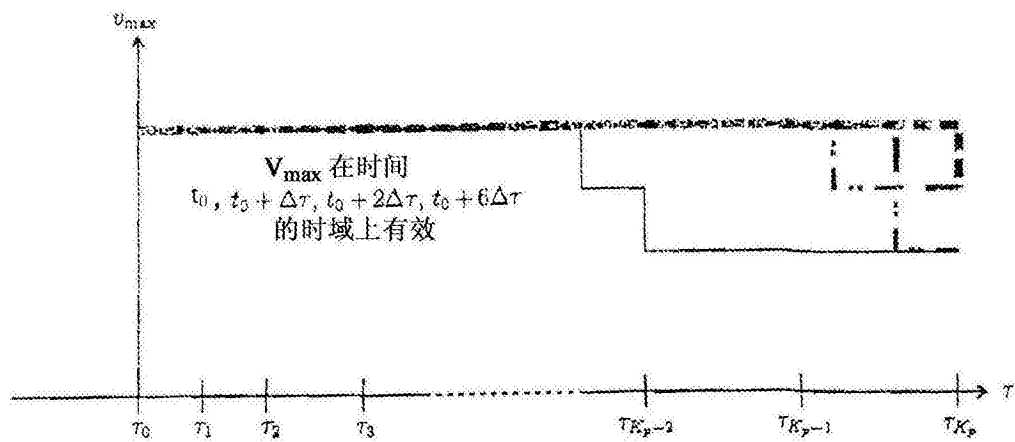


图5

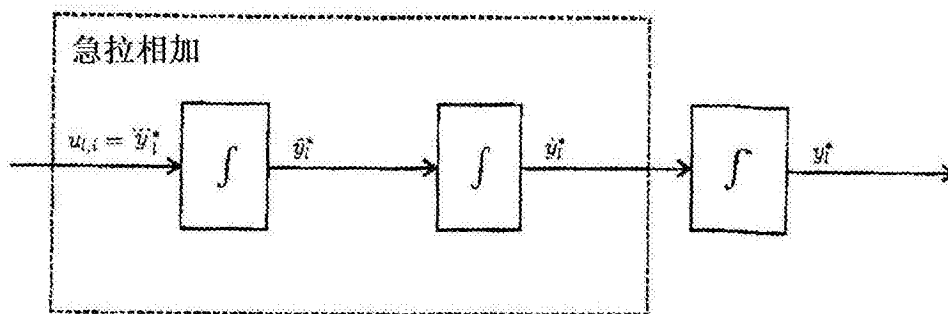


图6

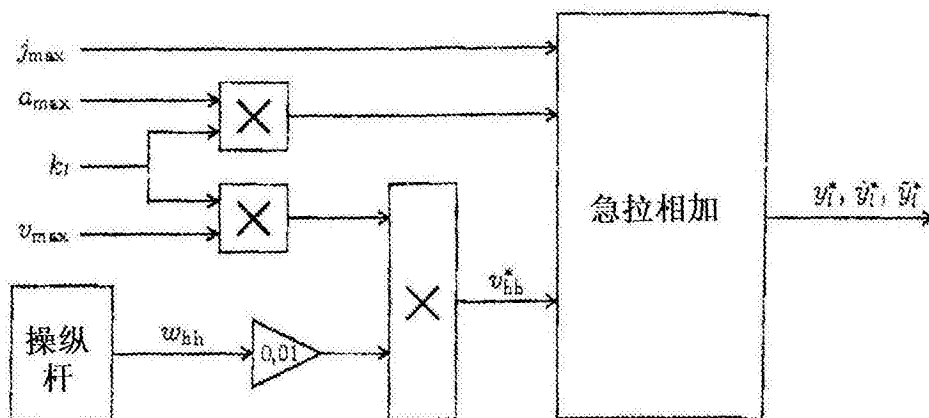


图7

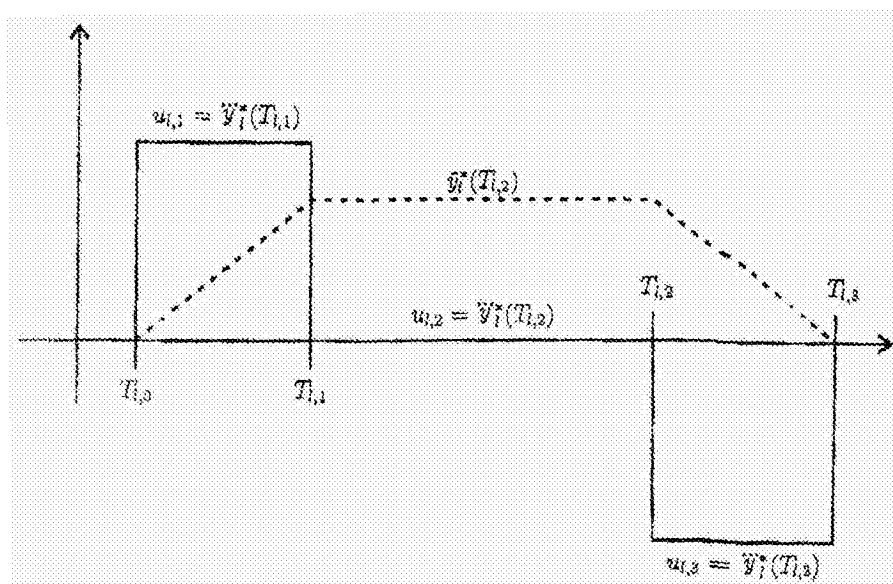


图8

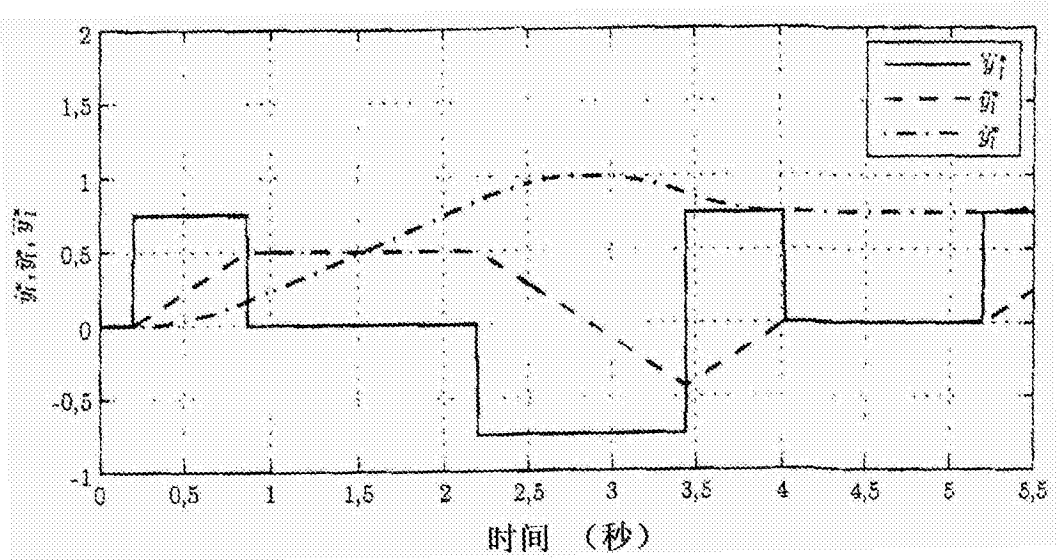


图9

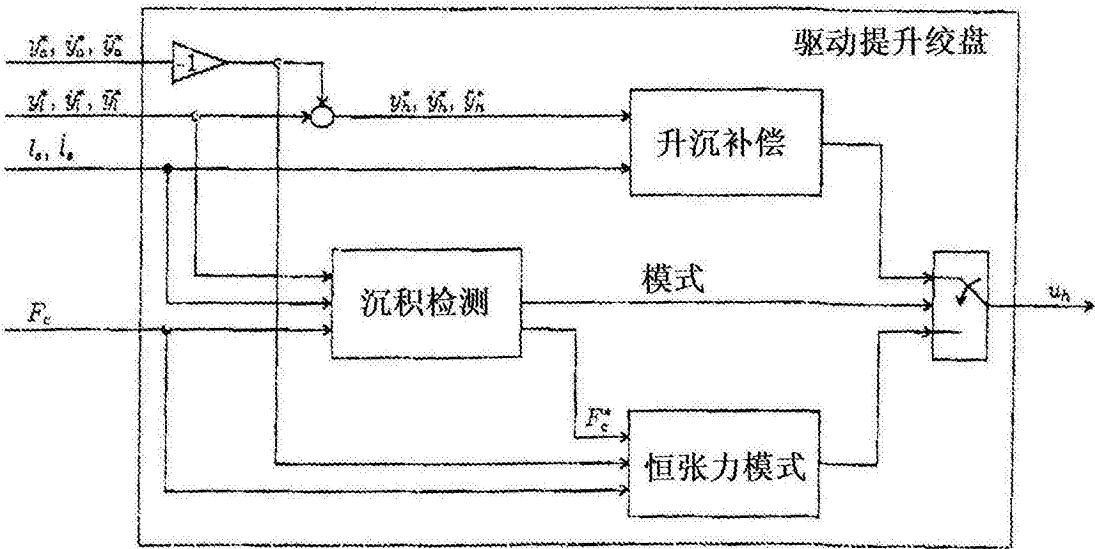


图10

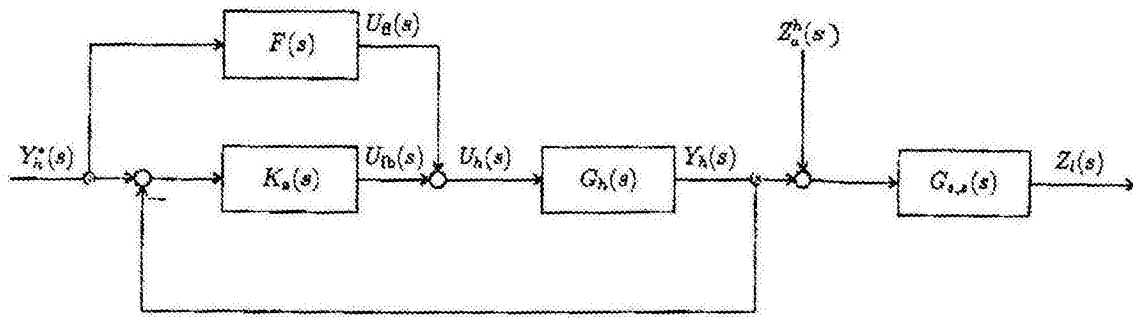


图11

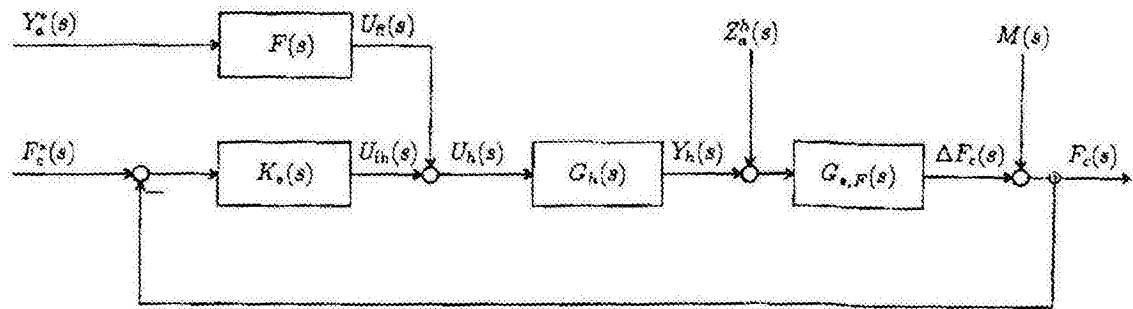


图12