

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 3 月 4 日 (04.03.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/036626 A1

- (51) 国际专利分类号:
B66C 17/04 (2006.01) *B66C 13/06* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/104565
- (22) 国际申请日: 2020 年 7 月 24 日 (24.07.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910818773.3 2019年8月30日 (30.08.2019) CN
- (71) 申请人: 五邑大学(WUYI UNIVERSITY) [CN/CN];
中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号,
Guangdong 529000 (CN)。
- (72) 发明人: 王天雷(WANG, Tianlei); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。

余焱江(YU, Yanjiang); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 伍智琴(WU, Zhiqin); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 张京玲(ZHANG, Jingling); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 张宪文(ZHANG, Xianwen); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 李汶杰(LI, Wenjie); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 邱炯智(QIU, Jiongzhì); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 郑宇杰(ZHENG, Yujie); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 黄锦涛(HUANG, Jintao); 中国广东省江门市蓬江区东成村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。

(54) **Title:** BRIDGE CRANE ANTI-SWING METHOD, APPARATUS, AND DEVICE BASED ON SLIDING MODE SURFACE, AND STORAGE MEDIUM

(54) 发明名称: 一种基于滑模面的桥吊防摆方法、装置、设备及存储介质

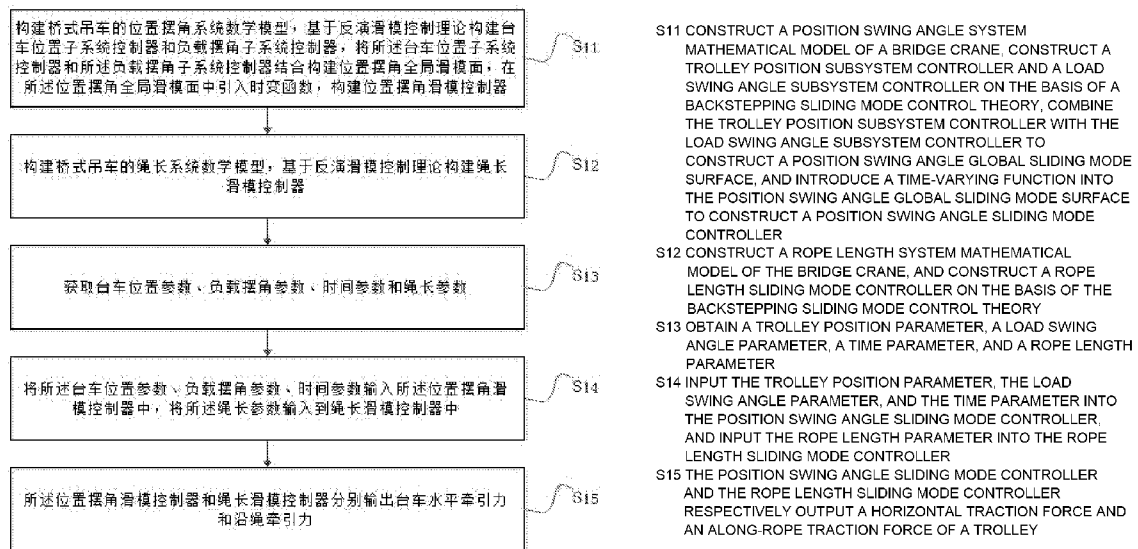


图 1

(57) **Abstract:** A bridge crane anti-swing method, apparatus, and device based on a sliding mode surface, and a storage medium. After a trolley position subsystem controller and a load swing angle subsystem controller are designed layer by layer on the basis of a backstepping control algorithm, the trolley position subsystem controller and the load swing angle subsystem controller are combined to construct a position swing angle global sliding mode surface; a time-varying function is introduced into the design of a sliding mode surface to construct a position swing angle controller; on the basis of a backstepping sliding mode control theory, a rope length controller is designed layer by layer by combining a state space function of a rope length with a Lyapunov function, and thus, the asymptotical stability of a lifting rope subsystem is realized. The present method not only can solve the unmatched uncertainty problem

(74) 代理人: 广州嘉权专利商标事务所有限公司 (JIAQUAN IP LAW); 中国广东省广州市天河区黄埔大道西100号富力盈泰广场A栋910, Guangdong 510627 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格 (细则4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

of a system and maximally eliminate a chattering phenomenon existing in a traditional sliding mode control algorithm, but also can improve the robustness of the anti-swing control of a crane system, and make the system have an anti-interference capability, thereby further improving the stability and control performance of a bridge crane system.

(57) 摘要: 一种基于滑模面的桥吊防摆方法、装置、设备及存储介质, 基于反演控制算法逐层设计台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器后, 将台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器进行结合, 构建一个位置摆角全局滑模面, 在滑模面设计中引入时变函数, 构建位置摆角控制器; 基于反演滑模控制理论对绳长的状态空间函数结合李雅普诺夫函数对绳长控制器进行逐层设计, 实现吊绳子系统的渐进稳定。本方法不仅可以处理系统非匹配不确定性问题, 最大限度消除传统滑模控制算法中存在的抖振现象, 而且可以提高吊车系统防摆控制的鲁棒性, 同时使系统具有抗干扰能力, 进一步提高桥式吊车系统的稳定性和控制性能。

一种基于滑模面的桥吊防摆方法、装置、设备及存储介质

技术领域

本发明涉及桥式起重机技术领域，特别是一种基于滑模面的桥吊防摆方法、装置、设备及存储介质。

背景技术

桥式吊车作为一种大型货物装卸机械装置，被广泛应用于港口、仓库、重工业车间、建筑工地等场所的装配运输过程。桥式吊车系统控制的主要目标是实现精确的吊车定位并尽可能地消除负载的摆角，以便在最短时间内将货物运输到指定位置而不产生摆动。滑模控制对非线性系统的有良好的控制性能，被广泛应用到桥式吊车的系统控制中，但是当前主流的桥式吊车滑模控制存在以下问题：

传统的一般滑模控制算法不能很好地处理系统非匹配不确定性的问题，因而会出现抖振现象，这一问题进而会影响到电机的使用寿命。此外，传统的滑模控制算法在大幅度改变系统参数时，吊车的防摆控制效果会变得较差，鲁棒性较差，当系统受到外部强烈干扰时，控制算法无法及时准确地做出响应，进一步削弱了桥吊防摆效果。

发明内容

为解决上述问题，本发明的目的在于提供一种基于滑模面的桥吊防摆方法、装置、设备及存储介质，利用反演滑模控制技术能处理系统非匹配不确定性的优点，同时引入时变滑模面使系统具有更强的鲁棒性，进一步提高桥式吊车系统的稳定性和控制性能。

本发明解决其问题所采用的技术方案是：

第一方面，本发明提供了一种基于滑模面的桥吊防摆方法，包括：

构建桥式吊车的位置摆角系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器；

构建桥式吊车的绳长系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器；

获取台车位置参数、负载摆角参数、时间参数和绳长参数；

将所述台车位置参数、负载摆角参数、时间参数输入所述位置摆角滑模控制器中，将所述绳长参数输入到绳长滑模控制器中；

所述位置摆角滑模控制器和绳长滑模控制器分别输出台车水平牵引力和沿绳牵引力。

进一步，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器包括：

构建台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数；

对台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

若所述台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于0，则求得台车位置子系统控制器；

若所述台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于0，则构建台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数；

对台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数进行一阶求导；

令台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零，求得台车位置子系统控制器。

进一步，所述基于反演滑模控制理论构建负载摆角子系统控制器包括：

构建负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数；

对负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

若所述负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于0，则求得负载摆角子系统控制器；

若所述负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于0，

则构建负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数；

对负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

令负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零，求得负载摆角子系统控制器。

进一步，所述将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模

面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器包括：

构建位置摆角全局系统滑模控制函数；

构建位置摆角全局系统时变滑模面；

构建位置摆角全局系统李雅普诺夫函数；

对位置摆角全局系统李雅普诺夫函数进行一阶求导；

构建一般指数趋近律求得位置摆角全局系统滑模控制的耦合开关控制律；

构建 S 型饱和函数为位置摆角全局系统滑模控制函数求得位置摆角滑模控制器。

进一步，所述基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器包括：

构建绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数；

对绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

若所述绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于 0，则求得绳长子系统控制器；

若所述绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于 0，

则构建绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数；

对绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

令绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零，求得绳长子系统控制器。

第二方面，本发明提供了一种基于滑模面的桥吊防摆装置，包括：

位置摆角滑模控制器构建单元，用于构建桥式吊车的位置摆角系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器；

绳长滑模控制器构建单元，用于构建桥式吊车的绳长系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器；

获取单元，用于获取台车位置参数、负载摆角参数、时间参数和绳长参数；

输入单元，用于将所述台车位置参数、负载摆角参数、时间参数输入所述位置摆角滑模控制器中，将所述绳长参数输入到绳长滑模控制器中；

输出单元，用于所述位置摆角滑模控制器和绳长滑模控制器分别输出台车水平牵引力和沿绳牵引力。

第三方面，本发明提供了一种基于滑模面的桥吊防摆设备，

包括至少一个控制处理器和用于与至少一个控制处理器通信连接的存储器；存储器存储有可被至少一个控制处理器执行的指令，指令被至少一个控制处理器执行，以使至少一个控制处理器能够执行如上所述的基于滑模面的桥吊防摆方法。

第四方面，本发明提供了一种计算机可读存储介质，计算机可读存储介质存储有计算机可执行指令，计算机可执行指令用于使计算机执行如上所述的基于滑模面的桥吊防摆方法。

第五方面，本发明还提供了一种计算机程序产品，所述计算机程序产品包括存储在计算机可读存储介质上的计算机程序，所述计算机程序包括程序指令，当所述程序指令被计算机执行时，使计算机执行如上所述的基于滑模面的桥吊防摆方法。

本发明实施例中提供的一个或多个技术方案，至少具有如下有益效果：基于反演控制算法逐层设计台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器后，将台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器进行结合，构建一个位置摆角全局滑模面，在滑模面设计中引入时变函数，大大减少状态变量到达滑模面的时间；基于反演滑模控制理论对绳长的状态空间函数结合李雅普诺夫函数对绳长控制器进行逐层设计，实现吊绳子系统的渐进稳定。本发明实施例方法不仅可以处理系统非匹配不确定性问题，最大限度消除传统滑模控制算法中存在的抖振现象，而且可以提高吊车系统防摆控制的鲁棒性，同时使系统具有抗干扰能力，进一步提高桥式吊车系统的稳定性和控制性能。

附图说明

下面结合附图和实施例对本发明作进一步说明。

图 1 是本发明实施例的方法流程图；

图 2 是本发明实施例的基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器的方法流程图；

图3是本发明实施例的基于反演滑模控制理论构建负载摆角子系统控制器的方法流程图；

图4是本发明实施例的将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器的方法流程图；

图5是本发明实施例的基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器的方法流程图；

图6是本发明实施例的仿真实验效果图；

图7是本发明实施例控制方法与时变滑模控制方法、反演滑模控制方法在仿真环境1中的仿真实验效果图；

图8是本发明实施例控制方法与时变滑模控制方法、反演滑模控制方法在仿真环境2中的仿真实验效果图；

图9是本发明实施例控制方法与时变滑模控制方法、反演滑模控制方法在仿真环境3中的仿真实验效果图；

图10是本发明实施例控制方法与时变滑模控制方法、反演滑模控制方法在仿真环境4中的仿真实验效果图；

图11是本发明实施例控制方法与时变滑模控制方法、反演滑模控制方法在仿真环境5中的仿真实验效果图；

图12是本发明实施例的装置中单元架构示意图；

图13是本发明实施例的设备中的连接示意图；

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

需要说明的是，如果不冲突，本发明实施例中的各个特征可以相互结合，均在本发明的保护范围之内。另外，虽然在装置示意图中进行了功能模块划分，在流程图中示出了逻辑顺序，但是在某些情况下，可以以不同于装置中的模块划分，或流程图中的顺序执行所示出或描述的步骤。

参照图1，本发明的一个实施例提供了一种基于滑模面的桥吊防摆方法，包括：

步骤S11, 构建桥式吊车的位置摆角系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器；

步骤S12, 构建桥式吊车的绳长系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器；

步骤S13, 获取台车位置参数、负载摆角参数、时间参数和绳长参数；

步骤S14, 将所述台车位置参数、负载摆角参数、时间参数输入所述位置摆角滑模控制器中，将所述绳长参数输入到绳长滑模控制器中；

步骤S15, 所述位置摆角滑模控制器和绳长滑模控制器分别输出台车水平牵引力和沿绳牵引力。

本发明实施例将原本复杂的桥式吊车动力学模型转换成一般状态空间函数形式，运用反演控制算法逐层设计台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器后，将台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器进行结合，构建一个位置摆角全局滑模面，在滑模面设计中引入时变函数，滑模面可随着时间的改变而改变，使滑模面的初始位置尽可能地接近状态变量，大大减少状态变量到达滑模面的时间；构建绳长子系统控制器，利用反演滑模控制理论对绳长的状态空间函数结合李雅普诺夫函数进行逐层设计，实现吊绳子系统的渐进稳定。

桥式吊车系统为欠驱动系统，台车位置和负载摆角两个状态量为同一个电机所驱动，也就是一个驱动量引起两个状态量同时改变，因此在位置摆角子系统控制器的设计中需要将台车位置和负载摆角的防摆控制器同时考虑进来，分别构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，再结合台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，引入时变函数，构建出位置摆角全局系统控制器。

参照图2，其中，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器还包括以下步骤：

步骤S21, 构建台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数；

步骤S22, 对台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

步骤S23, 若所述台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于0，则求得台车位置子系统控制器；

步骤S24, 若所述台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于0，则构建台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数；

步骤 S25, 对台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数进行一阶求导;

步骤 S26, 令台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零, 求得台车位置子系统控制器。

本发明实施例中, 基于反演滑模控制理论, 并结合李雅普诺夫函数进行稳定性设计, 构建台车位置子系统控制器, 第一层李雅普诺夫函数中仅包含台车位置参数, 对其求导得到台车运动速度参数, 这对于台车位置控制器设计来说是不够的, 因为不包含台车的运动加速度变量, 无法保证台车位置控制器渐进稳定, 所以需要台车位置子系统构建第二层李雅普诺夫函数, 使台车位置子系统趋于稳定, 增强系统的鲁棒性和控制性能。

参照图 3, 其中, 基于反演滑模控制理论构建负载摆角子系统控制器包括以下步骤:

步骤 S31, 构建负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数;

步骤 S32, 对负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导;

步骤 S33, 若所述负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于 0, 则求得负载摆角子系统控制器;

步骤 S34, 若所述负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于 0, 则构建负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数;

步骤 S35, 对负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导;

步骤 S36, 令负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零, 求得负载摆角子系统控制。

本发明实施例中, 基于反演滑模控制理论, 并结合李雅普诺夫函数进行稳定性设计, 构建负载摆角子系统控制器, 第一层李雅普诺夫函数中仅包含负载摆角角度参数, 对其求导得到负载摆角运动速度参数, 这对于负载摆角控制器设计来说是不够的, 因为不包含负载摆角的运动加速度变量, 无法保证负载摆角控制器渐进稳定, 所以需要负载摆角子系统构建第二层李雅普诺夫函数, 使负载摆角子系统趋于稳定, 增强系统的鲁棒性和控制性能。

参照图 4, 其中, 将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面, 在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数, 构建位置摆角滑模控制器包括以下步骤:

步骤 S41, 构建位置摆角全局系统滑模控制函数;

步骤 S42, 构建位置摆角全局系统时变滑模面;

步骤 S43, 构建位置摆角全局系统李雅普诺夫函数;

步骤 S44, 对位置摆角全局系统李雅普诺夫函数进行一阶求导;

步骤 S45, 构建一般指数趋近律求得位置摆角全局系统滑模控制的耦合开关控制律;

步骤 S46, 构建 S 型饱和函数为位置摆角全局系统滑模控制函数求得位置摆角滑模控制器。

反演滑模控制设计方法首先对复杂的驱动量缺失的不呈线性状态的系统分隔成不多于系统层数的子系统, 然后将李雅普诺夫函数与中间无实际物理含义的控制量相互结合引入到子系统设计中, 在最后一层系统的虚拟控制量引入滑模变结构控制, 利用滑模控制的不改变性来保证最后子系统的渐进平稳, 在本发明实施例中是先分成台车位置子系统和负载摆角子系统分别构建控制器, 在最后一层系统的构建中引入时变滑模面, 从而构建出位置摆角全局滑模控制器。

参照图 5, 其中, 基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器包括以下步骤:

步骤 S51, 构建绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数;

步骤 S52, 对绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导;

步骤 S53, 若所述绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于 0, 则求得绳长子系统控制器;

步骤 S54, 若所述绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于 0, 则构建绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数;

步骤 S55, 对绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导;

步骤 S56, 令绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零, 求得绳长子系统控制器。

本发明实施例中, 基于反演滑模控制理论, 并结合李雅普诺夫函数进行稳定性设计, 构建绳长子系统控制器, 第一层李雅普诺夫函数中仅包含绳长长度参数, 对其求导得到绳长运动速度参数, 这对于绳长控制器设计来说是不够的, 因为不包含绳长的运动加速度变量, 无法保证绳长控制器渐进稳定, 所以需要绳长子系统构建第二层李雅普诺夫函数, 使绳长子系统趋于稳定, 增强系统的鲁棒性和控制性能。

在一种优选的实施方式中, 基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器包括: 构建台车位置子系统数学模型, 桥式吊车的

数学模型公式考虑台车位置自由度改写成如下公式： $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = f_1 + b_1 \cdot u_x$, 其中, $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, x 为台

车移动的位置, $\dot{x}$ 为台车移动的速度, u_x 为台车位置子系统控制器, 基于桥式吊车的数学模型公式推导得出

$$f_1(x) = [lx_4^2 \sin(x_3) + mg \sin(x_3) \cos(x_3)] / [M + m \sin^2(x_3)],$$

$b_1(x) = 1 / [M + m \sin^2(x_3)]$, 其中, f_1 为台车位置子系统的状态变量, b_1 为台车位置子系统的输入变量, l 为吊绳的绳长, M 为吊车质量, m 为负载质量, g 为重力加速度, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$, θ 为负载的摆角, $\dot{\theta}$ 为负载摆角的角速度; 定义台车位置跟踪误差 $e_1 = x_1 - x_{1d}$, 其中, x_{1d} 为台车目标位置; 对 $e_1 = x_1 - x_{1d}$ 求导数得到 $\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = x_2 - \dot{x}_{1d}$; 构建台车位置子系统的第二层李雅普诺夫函数为 $V_1 = e_1^2 / 2$; 对 $V_1 = e_1^2 / 2$ 进行一阶求导得到 $\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1$; 令 $e_2 = \dot{e}_1 + \alpha_1$, 其中 α_1 为虚拟中间变量, 在反演滑模控制算法中构建稳定项 $\alpha_1 = k_1 e_1$, 其中 k_1 为台车位置子系统的误差稳定系数; 将 $\alpha_1 = k_1 e_1$ 代入 $\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1$ 式子中得到 $\dot{V}_1 = e_1 (e_2 - \alpha_1) = e_1 e_2 - k_1 e_1^2$, 当 $e_2 = 0$ 时, $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0$, 由李雅普诺夫函数稳定性判断系统趋于稳定, 但一般情况下由于系统处在运动过程中, 状态量是不稳定的, 只有到达目标位置才会稳定下来, 因此当 $e_2 \neq 0$, 需要对台车位置子系统进一步设计, 定义第二层李雅普诺夫函数为 $V_2 = V_1 + S_1^2 / 2$, 其中, $S_1 = c_1 e_1 + e_2$, S_1 为台车位置子系统滑模面, c_1 为台车位置子系统的误差系数; 对台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数进行一阶求导包括: 对 $V_2 = V_1 + S_1^2 / 2$ 进行一阶求导得到 $\dot{V}_2 = e_1 e_2 - k e_1^2 + S_1 (c_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2)$; 令 $\dot{V}_2 \leq 0$, 构建台车位置子系统控制器 u_x 为 $u_x = b_1^{-1} \{-c_1 \dot{e}_1 - f_1 + \ddot{x}_{1d} - \dot{\alpha}_1 - h_x [S_1 + \beta_x \operatorname{sgn}(S_1)]\}$, 其中, h_x 为台车位置子系统滑模面系数, β_x 为台车位置子系统切换增益。

在本发明实施例中, 基于反演滑模控制理论构建负载摆角子系统控制器包括: 桥式吊车的数学模型公式负载摆角自由度改写成如下公式: $\dot{x}_3 = x_4$, $\dot{x}_4 = f_2 + b_2 \cdot u_\theta$, 其中, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$, θ 为负载的摆动角度, $\dot{\theta}$ 为负载的摆动角速度, u_θ 为台车位置子系统控制器, 基于桥式吊车的数学模型公式推导得出 $f_2(x) = [lx_4^2 \sin(x_3) \cos(x_3) - mg \sin(x_3) - Mg \sin(x_3)] / \{[M + m \sin^2(x_3)]l\}$, $b_2(x) = [-\cos(x_3)] / \{[M + m \sin^2(x_3)]l\}$, 其中, f_2 为摆角子系统的状态变量, b_2 为摆角子系统的输入变量; 定义负载摆角跟踪误差 $e_{\theta 1} = x_3 - \theta_d$, θ_d 为目标负载摆角大小, 理想状态应为 0; 对 $e_{\theta 1} = x_3 - \theta_d$ 求导数得到 $\dot{e}_{\theta 1} = \dot{x}_3 - \dot{\theta}_d = x_4 - \dot{\theta}_d$; 构建负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数为 $V_{\theta 1} = e_{\theta 1}^2 / 2$; 对 $V_{\theta 1} = e_{\theta 1}^2 / 2$ 进行一阶求导得到 $\dot{V}_{\theta 1} = e_{\theta 1} \dot{e}_{\theta 1}$; 令 $e_{\theta 2} = \dot{e}_{\theta 1} + \alpha_\theta$, 在反演滑模控制算法中构建稳定项 $\alpha_\theta = k_{\theta 1} e_{\theta 1}$, 其中 $k_{\theta 1}$ 为负载摆角子系统的误差稳定系数; 将 $\alpha_\theta = k_{\theta 1} e_{\theta 1}$ 代入 $\dot{V}_{\theta 1} = e_{\theta 1} \dot{e}_{\theta 1}$ 式子中得到 $\dot{V}_{\theta 1} = e_{\theta 1} (e_{\theta 2} - \alpha_\theta) = e_{\theta 1} e_{\theta 2} - k_{\theta 1} e_{\theta 1}^2$, 当 $e_{\theta 2} = 0$ 时, $\dot{V}_{\theta 1} = -k_{\theta 1} e_{\theta 1}^2 \leq 0$, 由李雅普诺夫函数稳定性判断系统趋于稳定, 但一般情况下由于系统处在运动过程中, 状态量是不稳定的, 只有到达目标位置才会稳定下来, 因此当 $e_{\theta 2} \neq 0$, 需要对负载摆角子系统进一步设计, 定义负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数为 $V_{\theta 2} = V_{\theta 1} + S_\theta^2 / 2$, 其中, $S_\theta = c_\theta e_{\theta 1} + e_{\theta 2}$, S_θ 为负载摆角子系统滑模面, c_θ 为负载摆角子系统的误差系数; 对负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导包括: 对

$V_{\theta 2} = V_{\theta 1} + S_{\theta}^2 / 2$ 进行一阶求导得到 $\dot{V}_{\theta 2} = e_{\theta 1} e_{\theta 2} - k_{\theta} e_{\theta 1}^2 + S_{\theta} (c_{\theta} \dot{e}_{\theta 1} + \dot{e}_{\theta 2})$ ；令 $\dot{V}_{\theta 2} \leq 0$ ，构建负载摆角子系统控制器 u_{θ} 为 $u_{\theta} = b_2^{-1} \{-c_{\theta} \dot{e}_{\theta 1} - f_2 + \ddot{\theta}_d - \dot{\alpha}_{\theta} - h_{\theta} [S_{\theta} + \beta_{\theta} \operatorname{sgn}(S_{\theta})]\}$ ，其中， h_{θ} 为台车位置子系统滑模面系数， β_{θ} 为台车位置子系统切换增益。

值得注意的是，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器包括：因为位置和摆角两自由度皆由一个控制输入，所以需要将台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器结合，构建一个全局滑模控制器 u 为 $u = u_x + u_{\theta} + u_c$ ，其中 u_c 为耦合开关控制律；构建位置摆角全局系统时变滑模面为 $S = aS_1 + S_2 + \omega e^{-qt}$ ，其中， a 为滑模面权重系数， ω 为指数函数加权系数， e^{-qt} 为时变指数函数， q 为指数函数时变系数， t 为系统运行时间变量；构建位置摆角全局系统李雅普诺夫函数为 $V = S^2 / 2$ ；对位置摆角全局系统李雅普诺夫函数进行一阶求导包括：对 $V = S^2 / 2$ 进行一阶求导并化简得到

$$\dot{V} = S \{ ab_1(u_{\theta} + u_c) + b_2(u_x + u_c) - \omega q e^{-qt} h_x [S_1 + \beta_x \operatorname{sgn}(S_1)] - h_{\theta} [S_2 + \beta_{\theta} \operatorname{sgn}(S_2)] \} ;$$

由于台车位置子系统控制器 u_x 和负载摆角子系统控制器 u_{θ} 中均包含了滑模变结构的趋近律控制，因此对位置摆角全局系统李雅普诺夫函数的一阶导数进行化简，得到 $\dot{V} = S [(ab_1 u_2 + b_2 u_1) + u_c (ab_1 + b_2) - \omega q e^{-qt}]$ ，根据滑模控制算法，选择一般指数趋近律

作为全局滑模控制律，一般指数趋近律具体公式为 $\dot{S} = -\eta \operatorname{sgn}(S) - kS$ ， $\eta > 0$ ，其中， $-kS$ 为指数趋近项， k 为趋近律， η 是增益系数，由此得到 $(ab_1 u_{\theta} + b_2 u_x) + u_c (ab_1 + b_2) - \omega q e^{-qt} = -\eta \operatorname{sgn}(S) - kS$ ，继而求得耦合开关控制律 u_c 为 $u_c = -[b_2 u_x + ab_1 u_{\theta} + \eta \operatorname{sgn}(S) + kS - \omega q e^{-qt}] / (ab_1 + b_2)$ ；位置摆角全局系统的切换控制函数选用 S 型饱和函数，得到位置摆角全局系统控制器 $u = -[ab_1 u_x + b_2 u_{\theta} + \eta \operatorname{sat}(S) + kS] / (ab_1 + b_2)$ 。

应理解，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器包括：绳长子系统的数学模型公式改写为 $\dot{x}_5 = x_6$ ， $\dot{x}_6 = f_3 + b_3 \cdot u_l$ ，其中， $x_5 = l$ ， $x_6 = \dot{l}$ ， l 为吊车的绳长， $\dot{l}$ 为吊车的绳长变化速度， u_l 为台车位置子系统控制器，基于桥式吊车的数学模型公式推导得出 $f_3(x) = -x_5 D / m + g$ ， $b_3(x) = 1 / m$ ，其中， f_3 为绳长子系统的状态变量， b_3 为绳长子系统的输入变量， D 为吊绳运动伸缩的阻尼系数；定义绳长跟踪误差 $e_{l1} = x_5 - l_d$ ，其中 l_d 为目标绳长；对绳长子系统跟踪误差进行一阶求导，对 $e_{l1} = x_5 - l_d$ 求导数得到 $\dot{e}_{l1} = \dot{x}_5 - \dot{l}_d = x_6 - \dot{l}_d$ ；构建绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数为 $V_{l1} = e_{l1}^2 / 2$ ；对 $V_{l1} = e_{l1}^2 / 2$ 进行一阶求导得到 $\dot{V}_{l1} = e_{l1} \dot{e}_{l1}$ ；令 $e_{l2} = \dot{e}_{l1} + \alpha_l$ ，在反演滑模控制算法中构建稳定项 $\alpha_l = k_l e_{l1}$ ，其中 k_l 为绳长子系统的误差稳定系数；将 $\alpha_l = k_l e_{l1}$ 代入 $\dot{V}_{l1} = e_{l1} \dot{e}_{l1}$ 式子中得到 $\dot{V}_{l1} = e_{l1} (e_{l2} - \alpha_l) = e_{l1} e_{l2} - k_l e_{l1}^2$ ，当 $e_{l2} = 0$ 时， $\dot{V}_{l1} = -k_l e_{l1}^2 \leq 0$ ，由李雅普诺夫函数稳定性判断系统趋于稳定，但一般情况下由于系统处在运动过程中，状态量是不稳定的，只有到达目标位置才会稳定下来，因此当 $e_{l2} \neq 0$ ，需要对绳长子系统进一步设计，定义绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数为 $V_{l2} = V_{l1} + S_l^2 / 2$ ，其中， $S_l = c_l e_{l1} + e_{l2}$ ， S_l 为绳长子系统滑模面， c_l 为绳长子系统的误差系数；对 $V_{l2} = V_{l1} + S_l^2 / 2$ 进行一阶求导得到 $\dot{V}_{l2} = e_{l1} e_{l2} - k_l e_{l1}^2 + S_l (c_l \dot{e}_{l1} + \dot{e}_{l2})$ ；令 $\dot{V}_{l2} \leq 0$ ，构建绳长子系统控制器 u_l 为 $u_l = b_3^{-1} \{-c_l \dot{e}_{l1} - f_3 + \ddot{l}_d - \dot{\alpha}_l - h_l [S_l + \beta_l \operatorname{sgn}(S_l)]\}$ ，其中， h_l 为绳长子系统滑模面系数， β_l 为绳长子系统切换增益。

根据本发明实施例的方法，通过仿真实验来检验本发明实施例的防摆效果，仿真时长设置为 15 秒，参照图 6，其中，台车位置从

0 米运动到 3 米目标位置所花费时间为 7 秒, 负载摆角的最大幅度小于 0.03 弧度, 同时在 7 秒收敛到 0 弧度, 吊绳从 1 米伸长到 4 米长度所花费时间为 1 秒, 吊绳驱动力产生后很快收敛到 0 牛顿, 收敛时间为 1 秒, 吊车驱动力从一开始约 45 牛顿驱动吊车运动, 随后快速收敛到 0 牛顿, 所花费时间为 7 秒, 之后再无抖振现象产生。本发明实施例不仅克服了时变滑模出现的驱动力抖振问题, 而且克服了反演滑模出现残余摆动现象, 使桥式吊车的控制效果达到最优。

为了进一步检验本发明实施例控制方法对桥式吊车的控制效果, 接下来设置了五种仿真环境实验, 分别对比本发明实施例控制方法与时变滑模控制方法、反演滑模控制方法在相应仿真环境中对桥式吊车的控制效果, 其中实线代表本发明实施例控制方法的仿真结果情况, 方点虚线代表时变滑模控制方法的仿真结果情况, 短虚线代表反演滑模控制方法的仿真结果情况, 五种仿真环境条件如下:

仿真环境 1: 轻型负载条件下, 将台车位移目标值和绳长目标值分别设定为 3 米和 4 米, 台车质量和负载质量分别设定为 10 千克和 5 千克, 其他系统模型参数不改变。

仿真环境 2: 重型负载条件下, 将台车位移目标值和绳长目标值分别设定为 3 米和 4 米, 台车质量和负载质量分别设定为 500 千克和 100 千克, 其他系统模型参数不改变。

仿真环境 3: 大目标值条件下, 将台车位移目标值和绳长目标值分别设定为 10 米和 6 米, 台车质量和负载质量分别设定为 500 千克和 100 千克, 其他系统模型参数不改变。

仿真环境 4: 系统模型改变条件下, 将台车位移目标值和绳长目标值分别设定为 10 米和 6 米, 台车质量和负载质量分别设定为 500 千克和 100 千克, 对二维桥式吊车系统模型参数进行改变, 吊车空气阻力系数从 0.5 变为 0.2, 负载空气阻力系数从 0.5 变为 0.6, 吊车摩擦系数从 0.5 变为 0.3。

仿真环境 5: 有外界干扰条件下, 将台车位移目标值和绳长目标值分别设定为 10 米和 6 米, 台车质量和负载质量分别设定为 500 千克和 100 千克, 吊车空气阻力系数从 0.5 变为 0.2, 负载空气阻力系数从 0.5 变为 0.6, 吊车摩擦系数从 0.5 变为 0.3, 桥式吊车由初始位置运动到目标位置, 待其收敛稳定后, 对负载突然施加一个长达 1 秒的力使其从 0.15 弧度的角度开始摆动。

参照图 7, 仿真环境 1 实验结果为: 采用本发明实施例控制方法的仿真结果中, 负载摆角幅度小于 0.031 弧度, 并且在收敛后无残余摆动, 而时变滑模控制方法的仿真结果为负载摆动幅度较大, 反演滑模控制方法的仿真结果为负载摆角有残余摆动; 在台车位置控制性能方面, 本发明实施例 7 秒到达指标位置且没有摆动, 而反演滑模控制方法的仿真结果有轻微摆动; 在绳长控制方面, 本发明实施例吊绳从 1 米伸长到 4 米耗时为 1 秒, 而时变滑模控制方法耗时 4 秒, 本发明实施例控制效果较好。以上结果表明, 本发明实施例控制方法在仿真环境 1 中对比其他两种滑模控制算法, 负载摆角幅度较小, 更快达到稳定, 控制效果较佳。

参照图 8, 仿真环境 2 实验结果为: 当台车质量与负载质量大幅度增加时, 采用本发明实施例控制方法的仿真结果中, 负载摆角幅度小于 0.03 弧度, 收敛后无残余摆动, 而时变滑模控制方法的仿真结果为负载摆动幅度较大, 反演滑模控制方法的仿真结果为负载摆动幅度较大并且有残余摆动; 在台车位置控制性能方面, 本发明实施例较其他两种控制方法更快达到指定位置, 并且没有摆动; 在绳长控制方面, 本发明实施例吊绳从 1 米伸长到 4 米耗时为 1 秒, 而时变滑模控制方法耗时 4 秒, 本发明实施例控制效果较好。以上结果表明, 本发明实施例控制方法在仿真环境 2 中对比其他两种滑模控制算法, 负载摆角幅度较小, 更快达到稳定, 控制效果较佳。

参照图 9, 仿真环境 3 实验结果为: 当改变台车位移目标值和绳长目标值时, 采用本发明实施例控制方法的仿真结果为负载摆角为 0.1 弧度, 收敛后无残余摆动, 而时变滑模控制的负载摆角幅度超过 0.15 弧度, 反演滑模控制的负载摆角幅度超过 0.1 弧度并且收敛后存在残余摆动, 以上结果表明, 本发明实施例控制方法在仿真环境 3 中对比其他两种滑模控制算法, 负载摆角幅度较小, 更快达到稳定, 控制效果较佳。

参照图 10, 仿真环境 4 实验结果为: 当改变改变二维桥式吊车系统模型上的空气阻力系数和摩擦系数时, 采用本发明实施例控制方法的仿真结果为负载摆角为 0.1 弧度, 收敛后无残余摆动, 而时变滑模控制的负载摆角幅度超过 0.15 弧度, 反演滑模控制的负载摆角幅度超过 0.1 弧度并且收敛后存在残余摆动, 以上结果表明, 本发明实施例控制方法在仿真环境 4 中对比其他两种滑模控制算法, 负载摆角幅度较小, 更快达到稳定, 控制效果较佳。

参照图 11, 仿真环境 5 实验结果为: 在施加外界干扰条件下, 采用本发明实施例控制方法的台车位置恢复超调比其他两种滑模控制算法小, 并且输出的吊绳驱动力明显小于其他两种滑模控制算法, 吊绳驱动力接近于 0。以上结果表明, 本发明实施例控制方法在仿真环境 5 中对比其他两种滑模控制算法, 在控制力矩输出方面优于其他两种滑模控制算法。

本发明实施例还提供了一种基于滑模面的桥吊防摆装置, 在该基于滑模面的桥吊防摆装置 1000 中, 包括但不限于: 位置摆角滑模

控制器构建单元 1100、绳长滑模控制器构建单元 1200、获取单元 1300、输入单元 1400 和输出单元 1500。

其中，位置摆角滑模控制器构建单元 1100，用于构建桥式吊车的位置摆角系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器；

绳长滑模控制器构建单元 1200，用于构建桥式吊车的绳长系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器；

获取单元 1300，用于获取台车位置参数、负载摆角参数、时间参数和绳长参数；

输入单元 1400，用于将所述台车位置参数、负载摆角参数、时间参数输入所述位置摆角滑模控制器中，将所述绳长参数输入到绳长滑模控制器中；

输出单元 1500，用于所述位置摆角滑模控制器和绳长滑模控制器分别输出台车水平牵引力和沿绳牵引力。

需要说明的是，由于本实施例中的一种基于滑模面的桥吊防摆装置与上述的一种基于滑模面的桥吊防摆方法基于相同的发明构思，因此，方法实施例中的相应内容同样适用于本装置实施例，此处不再详述。

本发明实施例还提供了一种基于滑模面的桥吊防摆设备，该基于滑模面的桥吊防摆设备 2000 可以是任意类型的智能终端，例如手机、平板电脑、个人计算机等。

具体地，该基于滑模面的桥吊防摆设备 2000 包括：一个或多个控制处理器 2010 和存储器 2020，图 13 中以一个控制处理器 2010 为例。

控制处理器 2010 和存储器 2020 可以通过总线或者其他方式连接，图 13 中以通过总线连接为例。

存储器 2020 作为一种非暂态计算机可读存储介质，可用于存储非暂态软件程序、非暂态性计算机可执行程序以及模块，如本发明实施例中的基于滑模面的桥吊防摆方法对应的程序指令/模块，例如，图 12 中所示的位置摆角滑模控制器构建单元 1100、绳长滑模控制器构建单元 1200、获取单元 1300、输入单元 1400 和输出单元 1500。控制处理器 2010 通过运行存储在存储器 2020 中的非暂态软件程序、指令以及模块，从而执行基于滑模面的桥吊防摆装置 1000 的各种功能应用以及数据处理，即实现上述方法实施例的基于滑模面的桥吊防摆方法。

存储器 2020 可以包括存储程序区和存储数据区，其中，存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需要的应用程序；存储数据区可存储根据基于滑模面的桥吊防摆装置 1000 的使用所创建的数据等。此外，存储器 2020 可以包括高速随机存取存储器，还可以包括非暂态存储器，例如至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他非暂态固态存储器件。在一些实施方式中，存储器 2020 可选包括相对于控制处理器 2010 远程设置的存储器，这些远程存储器可以通过网络连接至该基于滑模面的桥吊防摆设备 2000。上述网络的实例包括但不限于互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

所述一个或者多个模块存储在所述存储器 2020 中，当被所述一个或者多个控制处理器 2010 执行时，执行上述方法实施例中的基于滑模面的桥吊防摆方法，例如，执行以上描述的图 1 中的方法步骤 S11 至 S15，实现图 12 中的单元 1100-1500 的功能。

本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有计算机可执行指令，该计算机可执行指令被一个或多个控制处理器执行，例如，被图 13 中的一个控制处理器 2010 执行，可使得上述一个或多个控制处理器 2010 执行上述方法实施例中的基于滑模面的桥吊防摆方法，例如，执行以上描述的图 1 中的方法步骤 S11 至 S15，实现图 12 中的单元 1100-1500 的功能。

以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。

通过以上的实施方式的描述，本领域技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加通用硬件平台的方式来实现。本领域技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成，所述的程序可存储于一计算机可读存储介质中，该程序在执行时，可包括如上述方法的实施例的流程。其中，所述的存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体 (Read Only Memory, ROM) 或随机存储记忆体 (Random Access Memory, RAM) 等。

以上是对本发明的较佳实施进行了具体说明，但本发明并不局限于上述实施方式，熟悉本领域的技术人员在不违背本发明精神的前提下还可作出种种的等同变形或替换，这些等同的变形或替换均包含在本申请权利要求所限定的范围内。

权 利 要 求 书

1. 一种基于滑模面的桥吊防摆方法，其特征在于包括以下步骤：

构建桥式吊车的位置摆角系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器；

构建桥式吊车的绳长系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器；

获取台车位置参数、负载摆角参数、时间参数和绳长参数；

将所述台车位置参数、负载摆角参数、时间参数输入所述位置摆角滑模控制器中，将所述绳长参数输入到绳长滑模控制器中；

所述位置摆角滑模控制器和绳长滑模控制器分别输出台车水平牵引力和沿绳牵引力。

2. 根据权利要求1所述的一种基于滑模面的桥吊防摆方法，其特征在于：基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器包括：

构建台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数；

对台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

若所述台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于0，则求得台车位置子系统控制器；

若所述台车位置子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于0，则构建台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数；

对台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数进行一阶求导；

令台车位置子系统的第二层台车位置子系统李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零，求得台车位置子系统控制器。

3. 根据权利要求1所述的一种基于滑模面的桥吊防摆方法，其特征在于：所述基于反演滑模控制理论构建负载摆角子系统控制器包括：

构建负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数；

对负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

若所述负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于0，则求得负载摆角子系统控制器；

若所述负载摆角子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于0，

则构建负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数；

对负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

令负载摆角子系统的第二层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零，求得负载摆角子系统控制器。

4. 根据权利要求1所述的一种基于滑模面的桥吊防摆方法，其特征在于：所述将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器包括：

构建位置摆角全局系统滑模控制函数；

构建位置摆角全局系统时变滑模面；

构建位置摆角全局系统李雅普诺夫函数；

对位置摆角全局系统李雅普诺夫函数进行一阶求导；

构建一般指数趋近律求得位置摆角全局系统滑模控制的耦合开关控制律；

构建S型饱和函数为位置摆角全局系统滑模控制函数求得位置摆角滑模控制器。

5. 根据权利要求1所述的一种基于滑模面的桥吊防摆方法，其特征在于：所述基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器包括：

构建绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数；

对绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

若所述绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于0，则求得绳长子系统控制器；

若所述绳长子系统的第一层李雅普诺夫函数的一阶导数大于0，

则构建绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数；

对绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数进行一阶求导；

令绳长子系统的第二层李雅普诺夫函数的一阶导数不大于零，求得绳长子系统控制器。

6. 一种基于滑模面的桥吊防摆装置，其特征在于：包括：

位置摆角滑模控制器构建单元，用于构建桥式吊车的位置摆角系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建台车位置子系统控制器和负载摆角子系统控制器，将所述台车位置子系统控制器和所述负载摆角子系统控制器结合构建位置摆角全局滑模面，在所述位置摆角全局滑模面中引入时变函数，构建位置摆角滑模控制器；

绳长滑模控制器构建单元，用于构建桥式吊车的绳长系统数学模型，基于反演滑模控制理论构建绳长滑模控制器；

获取单元，用于获取台车位置参数、负载摆角参数、时间参数和绳长参数；

输入单元，用于将所述台车位置参数、负载摆角参数、时间参数输入所述位置摆角滑模控制器中，将所述绳长参数输入到绳长滑模控制器中；

输出单元，用于所述位置摆角滑模控制器和绳长滑模控制器分别输出台车水平牵引力和沿绳牵引力。

7. 一种基于滑模面的桥吊防摆设备，其特征在于：包括至少一个控制处理器和用于与所述至少一个控制处理器通信连接的存储器；所述存储器存储有可被所述至少一个控制处理器执行的指令，所述指令被所述至少一个控制处理器执行，以使所述至少一个控制处理器能够执行如权利要求 1-5 任一项所述的基于滑模面的桥吊防摆方法。

8. 一种计算机可读存储介质，其特征在于：所述计算机可读存储介质存储有计算机可执行指令，所述计算机可执行指令用于使计算机执行如权利要求 1-5 任一项所述的基于滑模面的桥吊防摆方法。

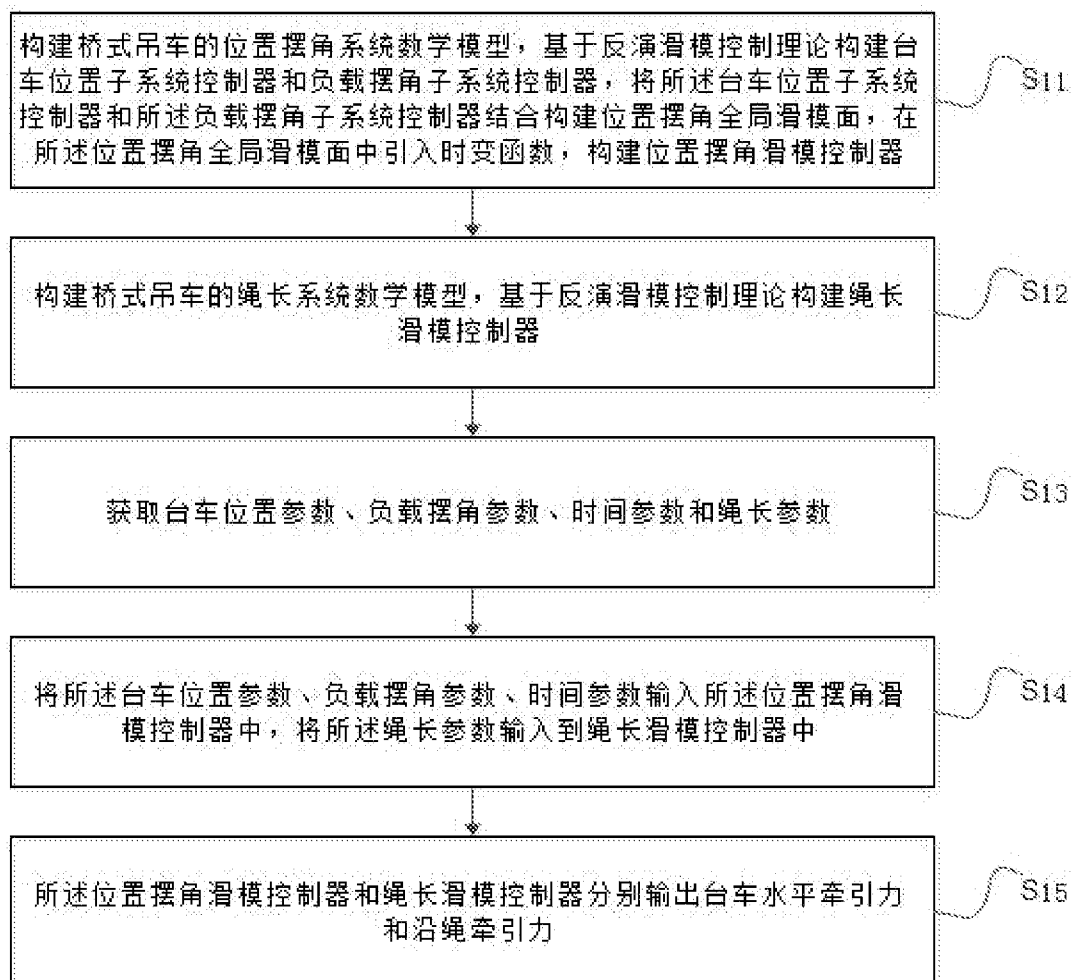


图 1

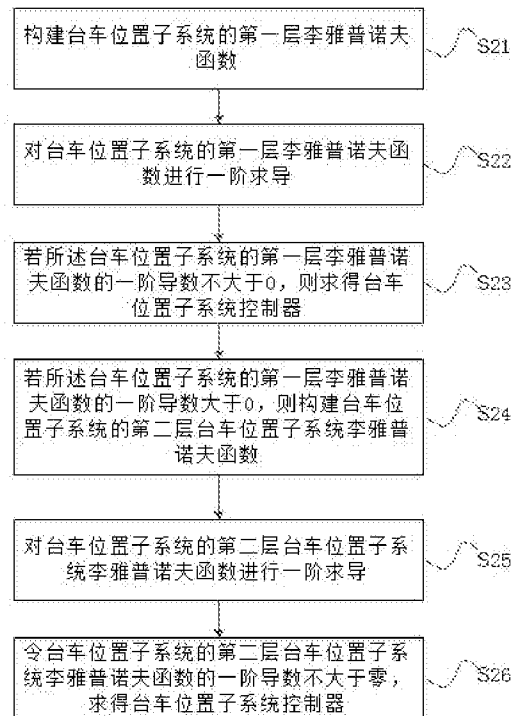


图 2

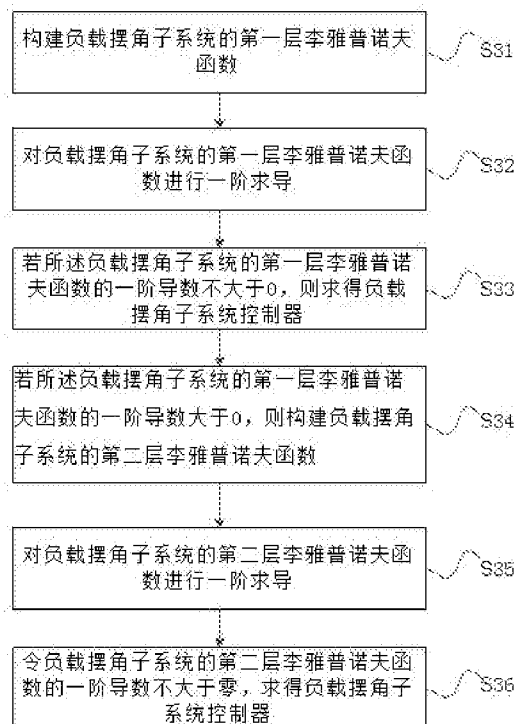


图 3

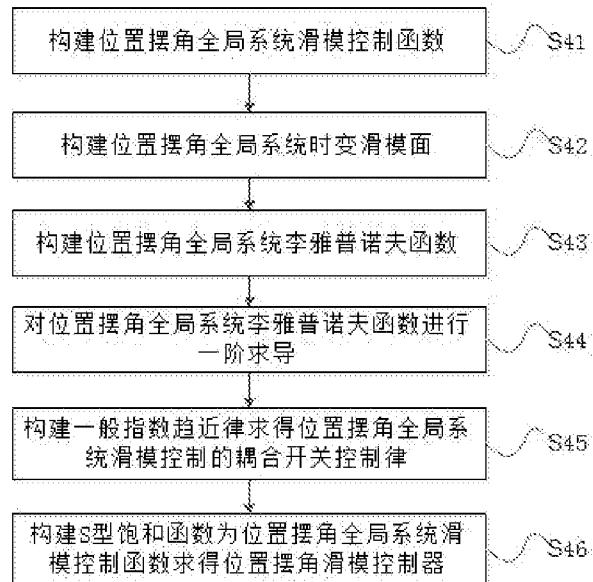


图 4

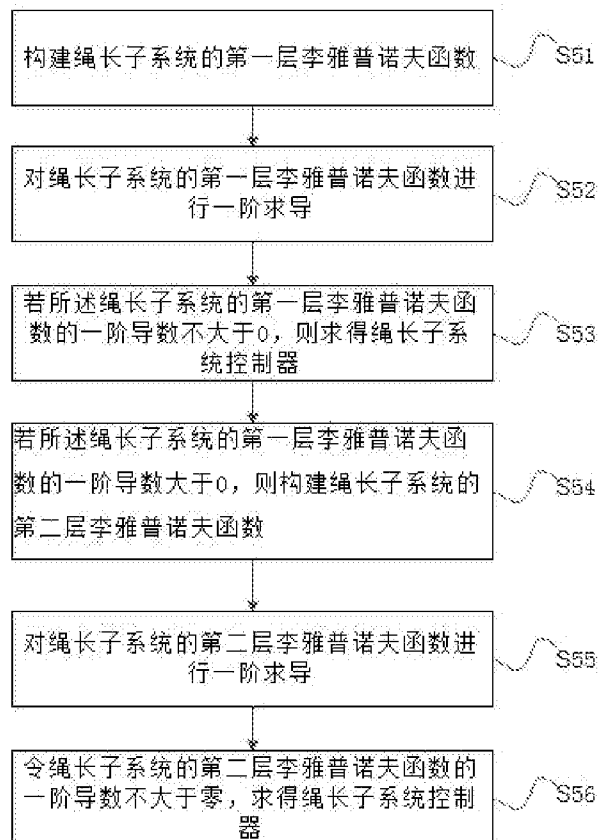


图 5

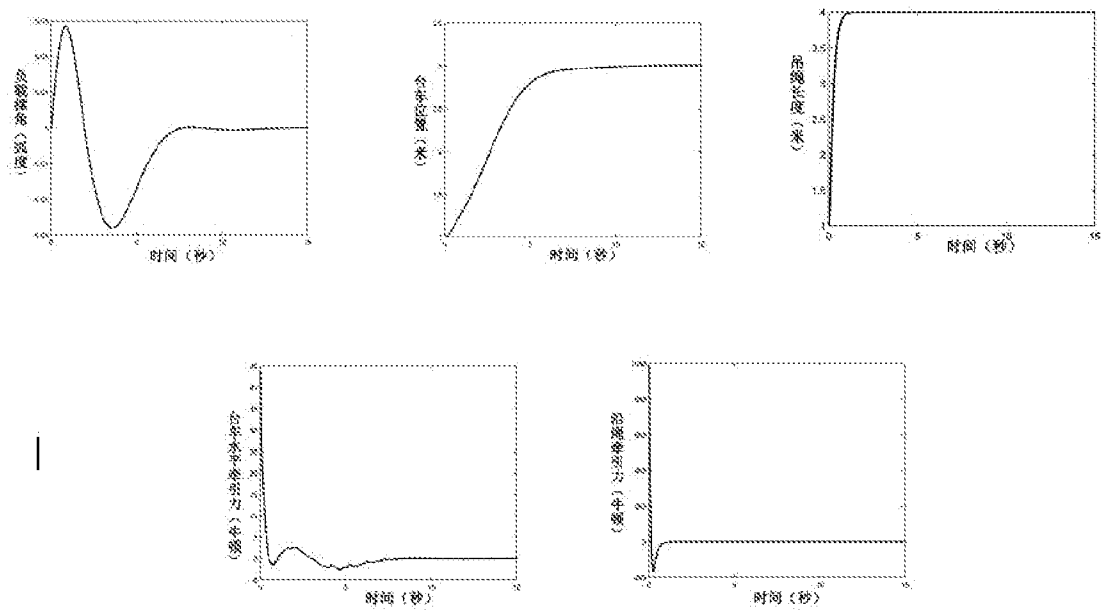


图 6

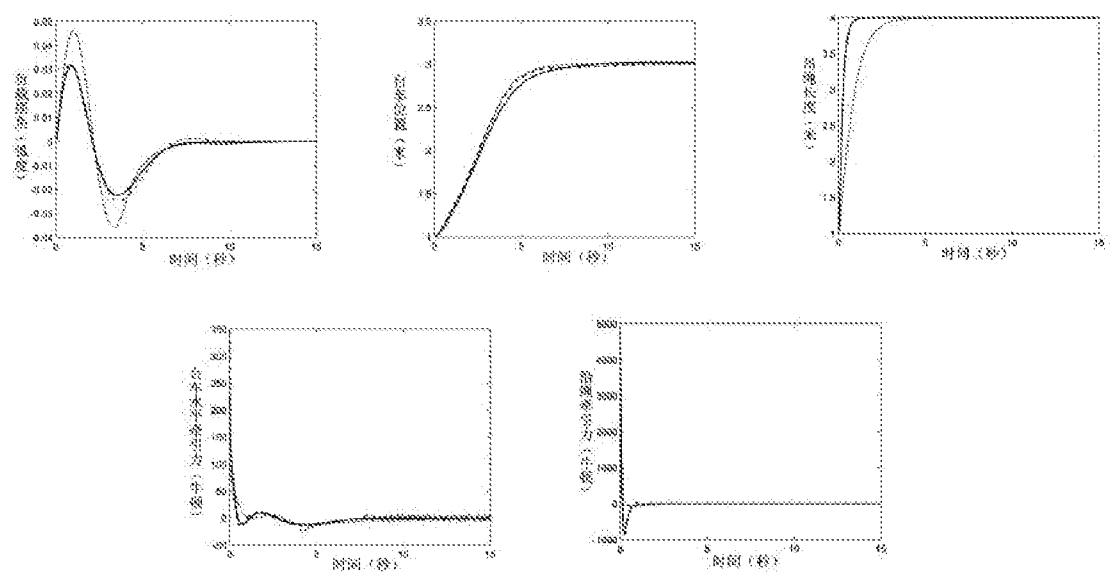


图 7

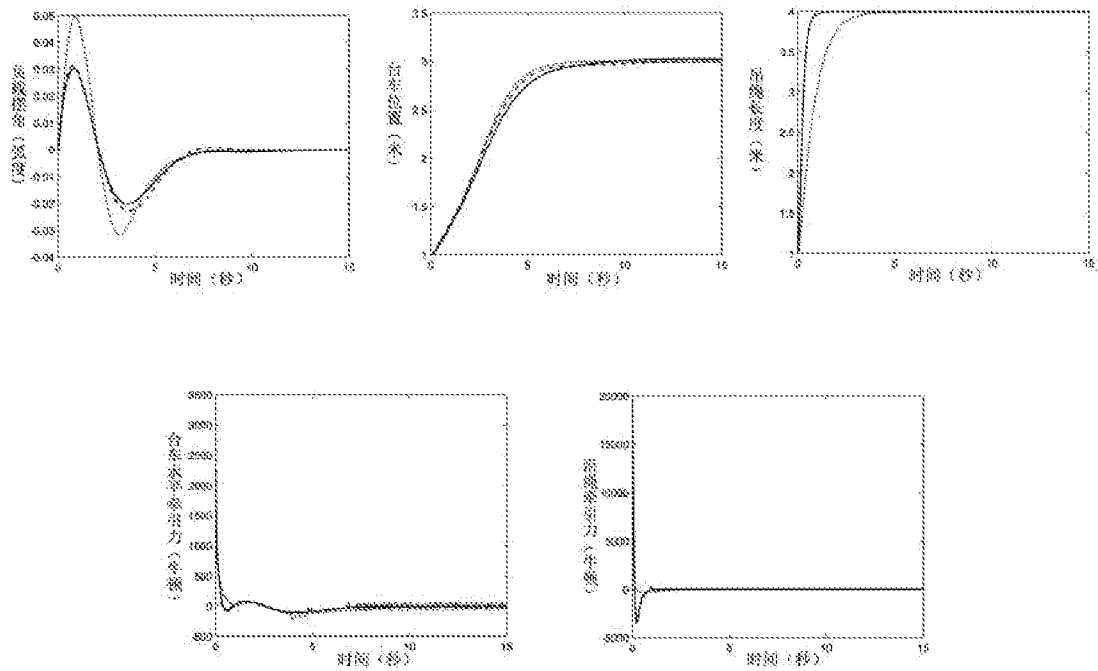


图 8

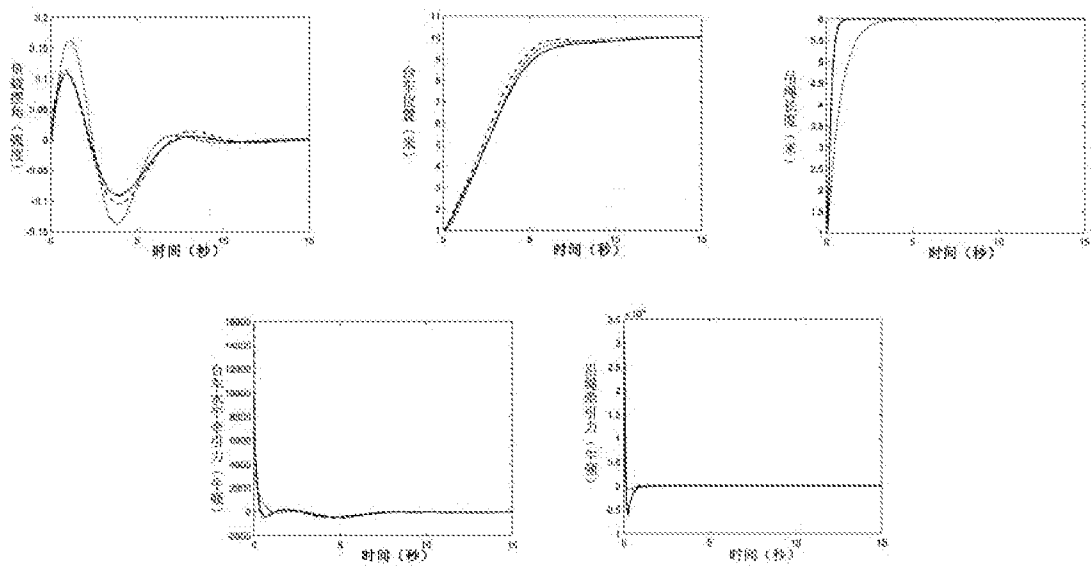


图 9

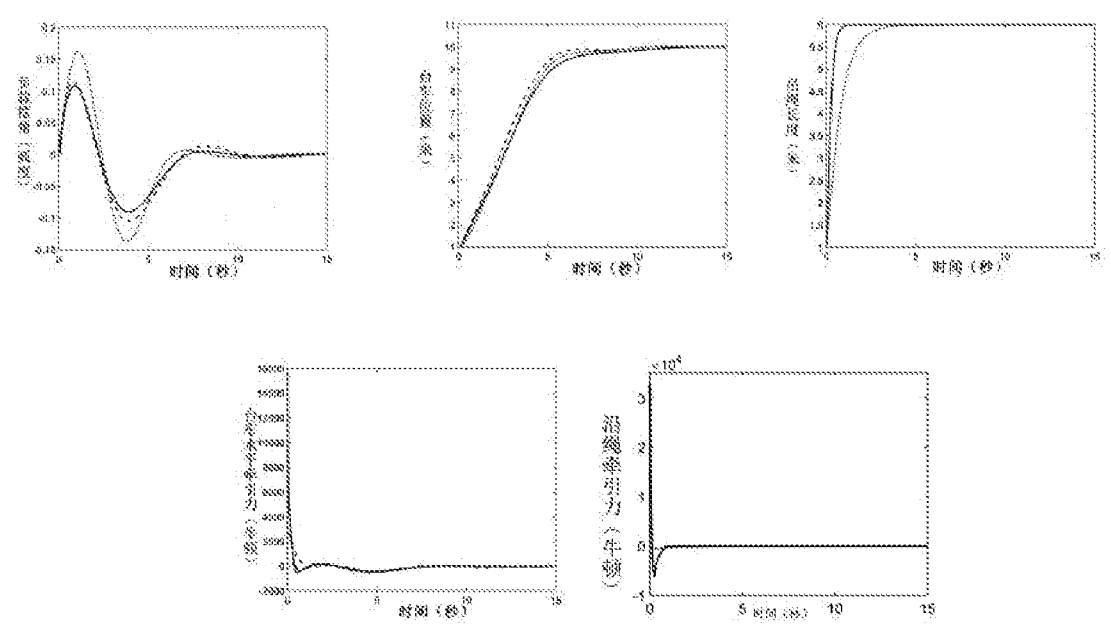


图 10

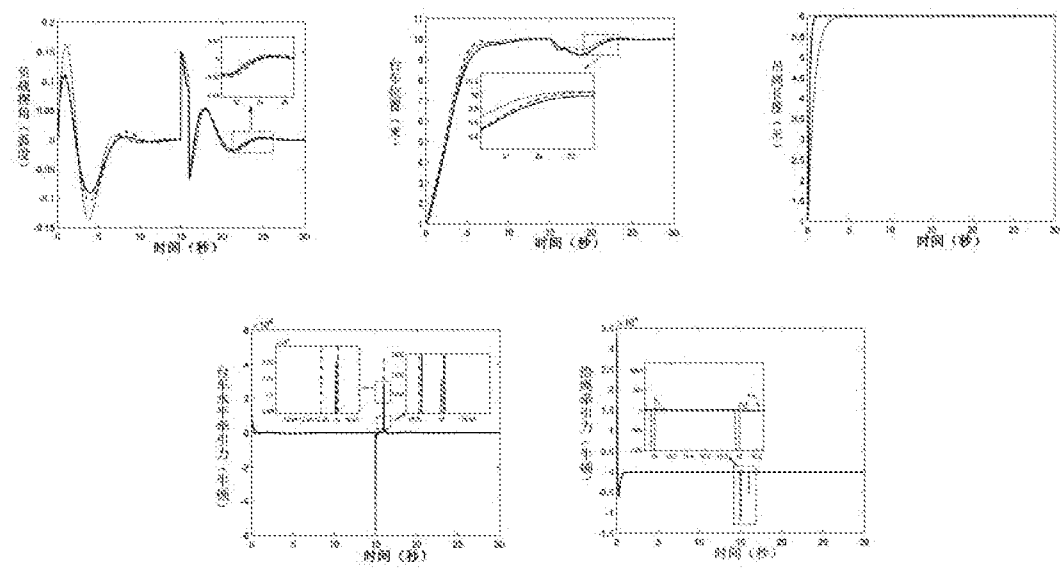


图 11

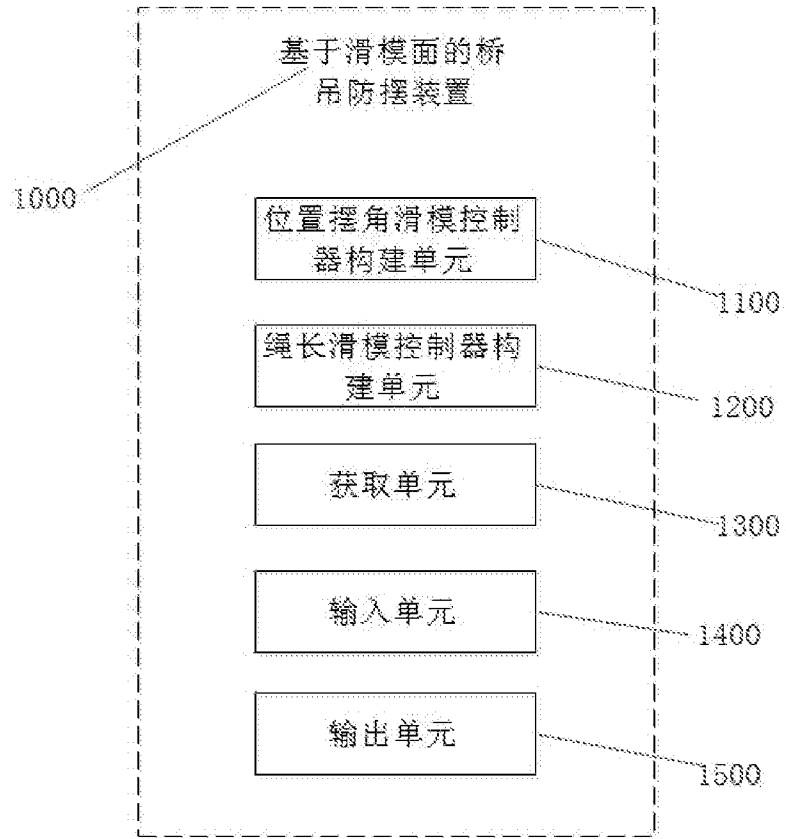


图 12

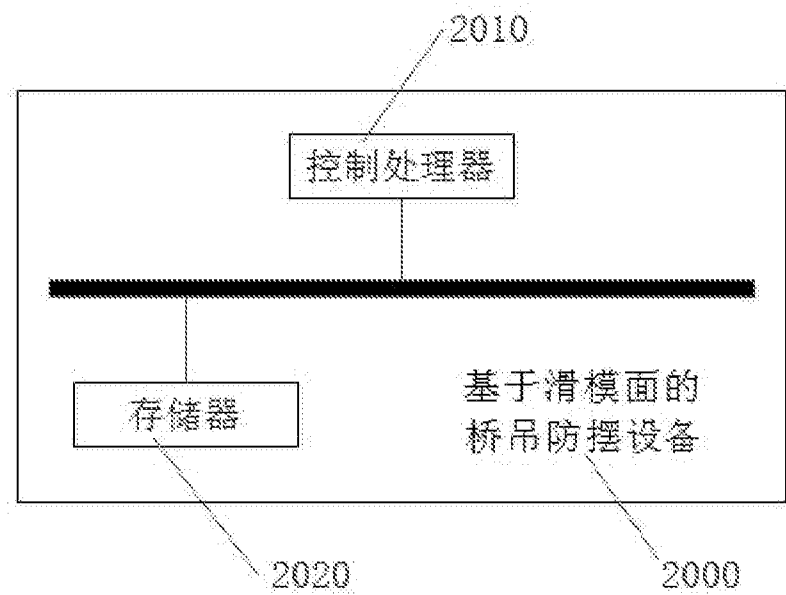


图 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/104565

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B66C 17/04(2006.01)i; B66C 13/06(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B66C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNKI, DWPI, SIPOABS: 起重, 吊车, 吊机, 滑模, 摇, 摆, 晃, 绳, crane, hoist, derrick, sliding, mode, swing, sway, rock, vibrate, rope, cable, wire

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 108303883 A (WUYI UNIVERSITY) 20 July 2018 (2018-07-20) see description, paragraphs 46-76 and figures 1-2	1-8
Y	CN 108227504 A (HOHAI UNIVERSITY, CHANGZHOU) 29 June 2018 (2018-06-29) see description, page 5, line 20 to page 13 last line, and figures 1-4	1-8
PX	CN 110526124 A (WUYI UNIVERSITY) 03 December 2019 (2019-12-03) claims 1-8	1-8
A	CN 108427280 A (NANJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS) 21 August 2018 (2018-08-21) see entire document	1-8
A	JP 2000219482 A (HITACHI SERVICE & ENGINEERING) 08 August 2000 (2000-08-08) see claims 1-8	1-8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 October 2020

Date of mailing of the international search report

30 October 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/104565

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108303883	A	20 July 2018	WO	2019140830	A1	25 July 2019
CN	108227504	A	29 June 2018	None			
CN	110526124	A	03 December 2019	None			
CN	108427280	A	21 August 2018	None			
JP	2000219482	A	08 August 2000	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/104565

A. 主题的分类 B66C 17/04(2006.01)i; B66C 13/06(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) B66C 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNABS, CNKI, DWPI, SIPOABS:起重, 吊车, 吊机, 滑模, 摇, 摆, 晃, 绳, crane, hoist, derrick, sliding, mode, swing, sway, rock, vibrate, rope, cable, wire																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Y</td> <td>CN 108303883 A (五邑大学) 2018年 7月 20日 (2018 - 07 - 20) 参见说明书第46-76段及图1-2</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 108227504 A (河海大学常州校区) 2018年 6月 29日 (2018 - 06 - 29) 参见说明书第5页第20行至第13页最后一行及图1-4</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 110526124 A (五邑大学) 2019年 12月 3日 (2019 - 12 - 03) 权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108427280 A (南京邮电大学) 2018年 8月 21日 (2018 - 08 - 21) 参见全文</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2000219482 A (HITACHI SERVICE & ENGINEERING) 2000年 8月 8日 (2000 - 08 - 08) 参见权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	Y	CN 108303883 A (五邑大学) 2018年 7月 20日 (2018 - 07 - 20) 参见说明书第46-76段及图1-2	1-8	Y	CN 108227504 A (河海大学常州校区) 2018年 6月 29日 (2018 - 06 - 29) 参见说明书第5页第20行至第13页最后一行及图1-4	1-8	PX	CN 110526124 A (五邑大学) 2019年 12月 3日 (2019 - 12 - 03) 权利要求1-8	1-8	A	CN 108427280 A (南京邮电大学) 2018年 8月 21日 (2018 - 08 - 21) 参见全文	1-8	A	JP 2000219482 A (HITACHI SERVICE & ENGINEERING) 2000年 8月 8日 (2000 - 08 - 08) 参见权利要求1-8	1-8
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
Y	CN 108303883 A (五邑大学) 2018年 7月 20日 (2018 - 07 - 20) 参见说明书第46-76段及图1-2	1-8																		
Y	CN 108227504 A (河海大学常州校区) 2018年 6月 29日 (2018 - 06 - 29) 参见说明书第5页第20行至第13页最后一行及图1-4	1-8																		
PX	CN 110526124 A (五邑大学) 2019年 12月 3日 (2019 - 12 - 03) 权利要求1-8	1-8																		
A	CN 108427280 A (南京邮电大学) 2018年 8月 21日 (2018 - 08 - 21) 参见全文	1-8																		
A	JP 2000219482 A (HITACHI SERVICE & ENGINEERING) 2000年 8月 8日 (2000 - 08 - 08) 参见权利要求1-8	1-8																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																		
2020年 10月 9日		2020年 10月 30日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																		
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		刘安琦 电话号码 86-(010)-62085279																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/104565

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	108303883	A	2018年 7月 20日	WO 2019140830 A1	2019年 7月 25日
CN	108227504	A	2018年 6月 29日	无	
CN	110526124	A	2019年 12月 3日	无	
CN	108427280	A	2018年 8月 21日	无	
JP	2000219482	A	2000年 8月 8日	无	