



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102795544 B

(45) 授权公告日 2014. 05. 07

(21) 申请号 201210292959. 8

(22) 申请日 2012. 08. 16

(73) 专利权人 南开大学

地址 300071 天津市南开区卫津路 94 号

(72) 发明人 方勇纯 孙宁 张一淳

(74) 专利代理机构 天津佳盟知识产权代理有限公司

公司 12002

代理人 侯力

(51) Int. Cl.

B66C 13/06 (2006. 01)

B66C 13/22 (2006. 01)

审查员 刘冬梅

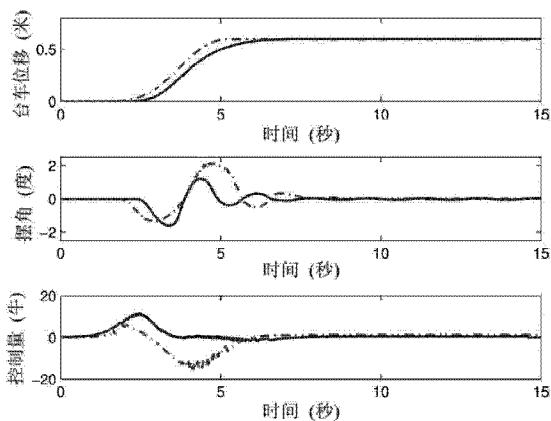
权利要求书2页 说明书12页 附图2页

(54) 发明名称

基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法

(57) 摘要

基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法。该方法包括：构造一个摆角消除环节，可有效地抑制负载的大幅度摆动，并快速地消除台车到达目标位置之后负载的残余摆角；将摆角消除环节与定位参考轨迹以线性方式组合在一起，生成最终轨迹，可保证台车的精确定位，同时能够有效地消除负载的摆角与残余摆角。相比已有的吊车轨迹规划技术，该方法可在线地生成消摆轨迹，其简单易行、在线运算量小、台车运送效率高、消摆速度快，非常适用于吊车系统的实时控制。



1. 一种基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法,其特征在于该方法包括:

第 1、轨迹规划方案

提出一种全新的桥式吊车在线轨迹规划方案;要规划的加速度轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 具有如下表达式:

$$\ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_r(t) + \rho(\theta, \dot{\theta}) \quad (4)$$

式中, t 表示时间, 变量后面 (t) 表示该变量为关于时间的变量, 第一部分 $\ddot{x}_r(t)$ 为定位参考加速度轨迹, 用来保证台车的精确定位; 第二部分 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 则表示摆角消除环节, 是关于负载摆角 $\theta(t)$ 及其角速度 $\dot{\theta}(t)$ 的函数, 用以抑制与消除负载的摆动, 其中负载摆角 $\theta(t)$ 简记为 θ , 角速度 $\dot{\theta}(t)$ 简记为 $\dot{\theta}$;

具体步骤包括:

第 1.1、摆角消除环节设计; 通过充分地分析台车与负载之间的动态耦合关系, 为台车运动设计一种新型的摆角消除环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$, 它具有如下结构:

$$\rho(\theta, \dot{\theta}) = \ddot{x}_e(t) = \kappa \dot{\theta}(t) \quad (6)$$

其中, $\ddot{x}_e(t)$ 为摆角消除环节, 同 $\rho(\theta, \dot{\theta})$, 为方便描述及统一表达而引进, $\kappa \geq 1$ 为正的消摆增益;

第 1.2、定位参考加速度轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 的选取; 主要考虑台车的运行效率、轨迹的光滑性, 在此应用常规的 S 形轨迹;

第 2、轨迹在线生成

在确定参考加速度轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 、摆角消除环节 $\ddot{x}_e(t)$ 的具体表达式后, 借助实时仿真或实验软件在线求解如下微分方程, 得到 $\theta(t)$ 与 $\dot{\theta}(t)$:

$$l\ddot{\theta}(t) + \cos\theta(t) \cdot \rho(\theta, \dot{\theta}) + g \sin\theta(t) = -\cos\theta(t) \cdot \ddot{x}_r(t) \quad (5)$$

式中, l 为吊绳长度, $\ddot{\theta}(t)$ 为摆角加速度, g 表示重力加速度; 将在线计算得到的负载摆角 $\theta(t)$ 及摆角速度 $\dot{\theta}(t)$ 代入式 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 的表达式(6), 再由式(4)获得规划加速度轨迹 $\ddot{x}_c(t)$, 进而通过在线积分运算得到速度轨迹 $\dot{x}_c(t)$ 及位移轨迹 $x_c(t)$ 如下:

$$\dot{x}_c(t) = \dot{x}_r(t) + \dot{x}_e(t) = \dot{x}_r(t) + \kappa \dot{\theta}(t) \quad (21)$$

$$x_c(t) = x_r(t) + x_e(t) = x_r(t) + \kappa \int_0^t \dot{\theta} d\tau \quad (22)$$

式中, $\dot{x}_r(t)$ 为 $\ddot{x}_r(t)$ 关于时间的积分, $x_r(t)$ 为 $\dot{x}_r(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_e(t)$ 为 $\ddot{x}_e(t)$ 关于时间的积分, $x_e(t)$ 为 $\dot{x}_e(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_c(t)$ 为 $\ddot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $x_c(t)$ 为 $\dot{x}_c(t)$ 关于时间的积分;

第 3、控制方法实现

借助传感器实时反馈的台车位移信号 $x(t)$ 与速度信号 $\dot{x}(t)$, 实时计算 $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 与轨迹 $x_c(t)$ 、 $\dot{x}_c(t)$ 之间的偏差, 利用常规的 PD 控制器产生相应的驱动电机控制指令, 实现吊车系统的高效消摆控制。

基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于欠驱动机器人的轨迹规划技术领域,特别是涉及一种通过轨迹在线规划消除桥式吊车摆动的方法。

背景技术

[0002] 现如今,机器人已广泛应用于工业加工、装配、家庭服务等领域。从机械学的角度看,机器人是由移动与旋转关节经有机组合而形成的系统。对于机器人而言,如果它的自由度与其独立的控制输入维数相等,则称其为完全驱动机器人(fully-actuated robots);若部分关节不可驱动,则称其为欠驱动机器人(underactuated robots) [1]。机器人的控制方式可分为镇定控制策略与轨迹跟踪控制策略两种。对于后者而言,可方便地将控制指标(如工作效率等)融入到轨迹规划中,然后设计合适的跟踪控制器使机器人关节跟踪这些轨迹,从而实现控制目标。合理的轨迹规划不仅可优化关节的运动,提高系统的工作效率,还能减轻控制器的负担,取得优于镇定策略的控制效果。

[0003] 桥式吊车可看作一种特殊的欠驱动机器人,其中,台车可看作是移动关节,吊绳可看作是旋转关节,负载则为相应的末端执行器。相应地,吊车的控制目标是将末端执行器(负载)运送到目标位置处。针对吊车系统,目前研究人员已经提出了大量的镇定控制方法 [2]-[5]。然而,根据上面分析知,轨迹规划能提高吊车系统的工作效率,比镇定策略有着更好的暂态与稳态控制效果,如运动超调小、负载消摆更为迅速等。遗憾的是,由于系统的欠驱动特性,我们只能对可驱动在台车进行轨迹规划。如果仅从台车高效运行的角度出发进行轨迹规划,则负载将出现大幅度摆动,因此,在进行台车轨迹规划时必须充分考虑负载的摆动。

[0004] 对于桥式吊车系统而言,已有的轨迹规划方法大多属于离线方式。如文献 [6] 设计了一种时间最优台车轨迹离线规划方法,但得到的加速度轨迹需不连续的切换,难以用于实际跟踪控制。随后,文献 [7] 提出了一种基于相平面分析的台车轨迹规划方法,该方法需要根据台车与目标位置之间的距离事先离线地计算轨迹参数。文献 [8] 则提出了一种基于迭代策略的台车运动规划方法,该方法需要进行离线的迭代优化以保证台车能准确地定位到目标位置。目前,已有的轨迹规划方法(如文献 [6]-[8])均需离线进行,在不同的运送过程中,当台车目标位置变化时,使用者需要重新计算轨迹参数或进行迭代优化,既繁琐又费时。

发明内容

[0005] 本发明目的是解决现有的台车轨迹离线规划方法在运送过程中,当台车目标位置变化时需要重新计算的问题,提供一种基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法,避免离线计算与迭代优化,实现在线轨迹规划,用于实时吊车控制,提高吊车系统的运送效率,有效地抑制并消除负载摆动。

[0006] 本发明提供的基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法,包括如下步骤:

[0007] 第 1、轨迹规划方案

[0008] 由于桥式吊车的欠驱动特性,无法为负载的运动进行规划,因而常规工业机器人的轨迹规划方法不适用于吊车系统;为此,提出一种全新的桥式吊车在线轨迹规划方案;要规划的加速度轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 具有如下表达式:

$$[0009] \quad \ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_r(t) + \rho(\theta, \dot{\theta}) \quad (4)$$

[0010] 式中, t 表示时间,变量后面 (t) 表示该变量为关于时间的变量,第一部分 $\ddot{x}_r(t)$ 为定位参考加速度轨迹,用来保证台车的精确定位;第二部分 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 则表示摆角消除环节,是关于负载摆角 $\theta(t)$ 及其角速度 $\dot{\theta}(t)$ 的函数,用以抑制与消除负载的摆动,其中负载摆角 $\theta(t)$ 简记为 θ ,角速度 $\dot{\theta}(t)$ 简记为 $\dot{\theta}$;

[0011] 具体步骤包括:

[0012] 第 1.1、摆角消除环节设计;通过充分地分析台车与负载之间的动态耦合关系,为台车运动设计一种新型的摆角消除环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$,它具有如下结构:

$$[0013] \quad \rho(\theta, \dot{\theta}) = \ddot{x}_c(t) = \kappa \dot{\theta}(t) \quad (6)$$

[0014] 其中, $\ddot{x}_c(t)$ 为摆角消除环节,同 $\rho(\theta, \dot{\theta})$,为方便描述及统一表达而引进, $\kappa \geq 1$ 为正的消摆增益;

[0015] 第 1.2、定位参考加速度轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 的选取;主要考虑台车的运行效率、轨迹的光滑性,在此应用常规的 S 形轨迹 [参见文献 10];

[0016] 第 2、轨迹在线生成

[0017] 在确定参考加速度轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 、摆角消除环节 $\ddot{x}_c(t)$ 的具体表达式后,借助实时仿真或实验软件在线求解如下微分方程,得到 $\theta(t)$ 与 $\dot{\theta}(t)$:

$$[0018] \quad l\ddot{\theta}(t) + \cos \theta(t) \cdot \rho(\theta, \dot{\theta}) + g \sin \theta(t) = -\cos \theta(t) \cdot \ddot{x}_r(t) \quad (5)$$

[0019] 式中, l 为吊绳长度, $\ddot{\theta}(t)$ 为摆角加速度, g 表示重力加速度;将在线计算得到的负载摆角 $\theta(t)$ 及摆角速度 $\dot{\theta}(t)$ 代入式 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 的表达式(6),再由式(4)获得规划加速度轨迹 $\ddot{x}_c(t)$,进而通过在线积分运算得到速度轨迹 $\dot{x}_c(t)$ 及位移轨迹 $x_c(t)$ 如下:

$$[0020] \quad \dot{x}_c(t) = \dot{x}_r(t) + \dot{x}_c(t) = \dot{x}_r(t) + \kappa \dot{\theta}(t) \quad (21)$$

$$[0021] \quad x_c(t) = x_r(t) + x_e(t) = x_r(t) + \kappa \int_0^t \theta d\tau \quad (22)$$

[0022] 式中, $\dot{x}_r(t)$ 为 $\ddot{x}_r(t)$ 关于时间的积分, $x_r(t)$ 为 $\dot{x}_r(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_c(t)$ 为 $\ddot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $x_c(t)$ 为 $\dot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_e(t)$ 为 $\ddot{x}_e(t)$ 关于时间的积分, $x_e(t)$ 为 $\dot{x}_e(t)$ 关于时间的积分;

[0023] 第 3、控制方法实现

[0024] 借助传感器实时反馈的台车位移信号 $x(t)$ 与速度信号 $\dot{x}(t)$,实时计算 $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 与轨迹 $x_c(t)$ 、 $\dot{x}_c(t)$ 之间的偏差,利用常规的 PD 控制器产生相应的驱动电机控制指令,实现吊车系统的高效消摆控制。

[0025] 本发明理论依据分析

[0026] 1、吊车系统模型

[0027] 二维桥式吊车系统的动力学特性可表示如下：

$$[0028] \quad (M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F_a(t) - f_r(t) \quad (1)$$

$$[0029] \quad ml^2\ddot{\theta} + ml \cos \theta \ddot{x} + mgl \sin \theta = 0 \quad (2)$$

[0030] 其中, M 表示台车质量, m 表示负载质量, $x(t)$ 为台车的位移, $\dot{x}(t)$ 为台车速度, $\ddot{x}(t)$ 为台车加速度, t 为时间, 变量后面 (t) 表示该变量为关于时间的变量, 为简明起见, 在公式中略去大部分变量中的 (t) ; $\theta(t)$ 为负载关于竖直方向的摆角, $\dot{\theta}(t)$ 为角速度, $\ddot{\theta}(t)$ 为角加速度; l 为吊绳的长度; g 为重力加速度; $F_a(t)$ 为驱动力; $f_r(t)$ 则为轨道摩擦力。由该动力学模型 (1)-(2) 可以看出, 二维桥式吊车系统具有 2 维自由度与 1 维控制量, 属于典型的欠驱动系统。对式 (2) 两边同除以 ml , 可得如下方程：

$$[0031] \quad l\ddot{\theta} + \cos \theta \ddot{x} + g \sin \theta = 0 \quad (3)$$

[0032] 该方程反映了台车运动与负载摆角之间的动态耦合关系, 是随后进行轨迹规划的基础。

[0033] 对于吊车系统而言, 最终的控制目标是将负载 (可看作末端执行器) 运送到目标位置, 且运送结束时负载无摆动。然而, 由于负载的欠驱动特性, 要实现该控制目标, 一般通过如下两步实现: 1) 将台车及负载运送到目标位置; 2) 控制台车的运动来抑制并最终消除负载的摆角。由于我们仅能规划台车的运动, 接下来, 将充分考虑台车精确定位与负载摆角消除这两方面的要求, 并将它们融入到台车的轨迹规划中。

[0034] 在轨迹规划之前, 鉴于吊车系统的实际工作情况, 做如下合理的假设。

[0035] 假设 1: 在整个负载运送过程中, 负载不会到达台车上方, 即负载摆角 $\theta(t)$ 始终保持在如下范围内 [2], [6]-[8]：

$$[0036] \quad -\pi / 2 < \theta(t) < \pi / 2, \forall t \geq 0$$

[0037] 2、轨迹规划方法

[0038] 本发明将充分分析台车运动与负载摆动之间的运动耦合关系, 规划一条新型的台车轨迹, 该轨迹能保证台车的快速精确定位, 并可有效地抑制负载摆角, 尤其是当台车到达目标位置之后的残余摆角。不同于已有轨迹规划方法 (如文献 [6]-[8]) 的是, 本发明所规划的轨迹具有更为简单易行的结构, 且无需迭代优化, 可在线生成并直接应用, 具有良好的实际应用价值。

[0039] 本发明提供的新型轨迹规划方法包括：

[0040] 第 1、轨迹规划的总体方案

[0041] 正如文献 [7]-[10] 中所述, 未考虑台车与负载之间的运动耦合而得到的台车轨迹 (如文献 [9], [10] 所规划的轨迹) 一般仅能保证台车的定位性能而不能有效地消除负载的摆动。要对负载摆角进行抑制与消除, 则必须通过合理地控制台车的水平运动来实现。为此, 本发明要规划的 (加速度) 轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 具有如下表达式：

$$[0042] \quad \ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_r(t) + \rho(\theta, \dot{\theta}) \quad (4)$$

[0043] 式中, 第一部分 $\ddot{x}_r(t)$ 为定位参考 (加速度) 轨迹, 其应保证台车的定位性能, 第二部分 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 则表示待设计的摆角消除环节, 其应能对负载摆角进行有效的抑制与消除, 且不影响台车的定位性能。接下来, 将首先构造一个摆角消除环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$, 然后选定一条合适的定

位参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$,最后将它们结合在一起,得到规划(加速度)轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 。相应的轨迹规划原理示意图如附图 1。其轨迹生成的基本原理如下。根据上述分析,可从台车的精确定位与运行效率角度事先选定一条定位参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$;同时,抗摆环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 的结构可由消摆的角度设计得到。此外,将式(4)代入式(3)并整理可得如下动态方程:

$$[0044] \quad l\ddot{\theta}(t) + \cos\theta(t) \cdot \rho(\theta, \dot{\theta}) + g\sin\theta(t) = -\cos\theta(t) \cdot \ddot{x}_r(t) \quad (5)$$

[0045] 因此,给定 $\ddot{x}_r(t)$ 的具体表达式与 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 的结构,可在线求解方程(5)得到 $\theta(t)$ 与 $\dot{\theta}(t)$,进而由式(4)在线得到规划(加速度)轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 。接下来,将设计摆角消除环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 并选取合理的定位参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$,得到最终的台车(加速度)轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 。

[0046] 第 2、摆角消除环节设计

[0047] 充分考虑台车与负载之间的动态耦合关系,设计摆角消除环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 如下:

$$[0048] \quad \rho(\theta, \dot{\theta}) = \ddot{x}_c(t) = \kappa\dot{\theta}(t) \quad (6)$$

[0049] 其中, κ 表示正的增益, $\ddot{x}_c(t)$ 为摆角消除环节(同 $\rho(\theta, \dot{\theta})$,为方便描述及统一表达而引进)。那么,摆角消除环节 $\ddot{x}_c(t)$ 能够有效地消除负载摆角,分析如下。

[0050] 选取如下正定函数 $V(t)$:

$$[0051] \quad V(t) = \frac{1}{2}l\dot{\theta}^2 + g(1 - \cos\theta) \geq 0 \quad (7)$$

[0052] 对式(7)两边关于时间求导,代入式(3)并整理,可得 $V(t)$ 的导数 $\dot{V}(t)$ 如下:

$$[0053] \quad \dot{V}(t) = \dot{\theta}(l\dot{\theta} + g\sin\theta) = -\dot{\theta}\cos\theta\ddot{x} \quad (8)$$

[0054] 由假设 1 知 $\cos\theta > 0$,因此,将式(6)代入式(8),有:

$$[0055] \quad \dot{V}(t) = -\kappa\dot{\theta}^2\cos\theta \leq 0 \quad (9)$$

[0056] 进一步,定义如下集合 Ω :

$$[0057] \quad \Omega = \{(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) : \dot{V}(t) = 0\} \quad (10)$$

[0058] 令 Φ 为 Ω 中的最大不变集。那么,由式(9)、(10)和 $\cos\theta > 0$,可知在 Φ 上:

$$[0059] \quad \dot{\theta}(t) = 0 \Rightarrow \ddot{\theta}(t) = 0 \quad (11)$$

[0060] 进一步由式(6)可知:

$$[0061] \quad \ddot{x}_c(t) = \kappa\dot{\theta} = 0 \quad (12)$$

[0062] 将式(11)与(12)代入式(3),并结合假设 1,可得如下结论:

$$[0063] \quad g\sin\theta = 0 \Rightarrow \theta = 0 \quad (13)$$

[0064] 可见,最大不变集 Φ 仅包含 $\theta(t) = 0, \dot{\theta}(t) = 0, \ddot{\theta}(t) = 0$,由拉塞尔不变性原理(LaSalle's invariance principle)[12]可知,在 $\ddot{x}_c(t)$ 的作用下,负载的摆角、角速度、角加速度收敛于零。

[0065] 第 3、轨迹生成与分析

[0066] 由前面分析知,摆角消除环节 $\ddot{x}_c(t)$ 能有效地消除负载摆动,然而它却不能保证台车在水平方向上的定位性能。为此,需要选取合适的定位参考轨迹与之相结合以生成最终的台车轨迹,从而既能保证台车的快速精确定位,又能实现对负载摆角(尤其是残余摆角)

的有效抑制与消除。

[0067] 为保证台车的平稳运行与定位情况,本发明选取满足如下条件的定位参考轨迹 [8]-[10]:

[0068] 1)台车定位参考轨迹 $x_r(t)$ 在有限时间内无超调地收敛于台车的目标位置 p_r (初始位置为 0),即 $x_r(t) \rightarrow p_r$ 。

[0069] 2)定位参考轨迹 $x_r(t)$ 关于时间的一阶导数 $\dot{x}_r(t)$ 、二阶导数 $\ddot{x}_r(t)$ 及三阶导数 $x_r^{(3)}(t)$ 满足:

$$[0070] \quad 0 \leq \dot{x}_r(t) \leq k_v, |\ddot{x}_r(t)| \leq k_a, |x_r^{(3)}(t)| \leq k_j \quad (14)$$

$$[0071] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_r(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}_r(t) = 0 \quad (15)$$

[0072] 其中, $k_v, k_a, k_j > 0$ 分别代表相应的上界值。

[0073] 3) 初始条件满足:

$$[0074] \quad x_r(0) = 0, \dot{x}_r(0) = 0 \quad (16)$$

[0075] 其中, $x_r(0) = 0$ 表示 $t = 0$ 时刻 $x_r(t)$ 的取值, $\dot{x}_r(0) = 0$ 表示 $t = 0$ 时刻 $\dot{x}_r(t)$ 的取值。

[0076] 满足上述约束条件的定位参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 能实现对台车的精确定位,却不能抑制负载摆动 [9]-[10]。为此,根据式 (4),将定位参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 与摆角消除环节 $\ddot{x}_e(t)$ 相结合,得如下合成的台车(加速度)轨迹:

$$[0077] \quad \ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_r(t) + \ddot{x}_e(t) = \ddot{x}_r(t) + \kappa \dot{\theta}(t) \quad (17)$$

[0078] 在此, κ 选取如下:

$$[0079] \quad \kappa > \frac{1}{\cos(\theta_{\max})} \Rightarrow \kappa \cos(\theta_{\max}) - 1 > 0 \quad (18)$$

[0080] 其中, θ_{\max} 表示负载的最大摆幅。由于 $\cos \theta \geq \cos(\theta_{\max}) > 0$, 根据式 (18) 可得如下结论:

$$[0081] \quad \kappa \cos \theta - 1 > \kappa \cos(\theta_{\max}) - 1 > 0 \quad (19)$$

[0082] 值得说明的是,对于实际中应用的桥式吊车系统而言,为了保证台车的平稳运行,其台车加速度满足 [7], [8], [11]:

$$[0083] \quad |\ddot{x}_r(t)| \leq k_a \ll g$$

[0084] 其中, g 为重力加速度, \ll 表示远小于。在这种情况下,负载摆角保持在较小的范围内,一般满足 $\theta_{\max} \leq 10^\circ$ [6]-[8], 即有如下近似关系成立:

$$[0085] \quad \sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1 \quad (20)$$

[0086] 因此,可以选取 $\kappa > 1 \geq \cos(10^\circ) = 0.9848$, 使得式 (18) 成立。

[0087] 进一步结合式 (6) 与 (16), 由式 (17) 可得台车速度与位移轨迹分别为(同文献 [7], [8], 在此考虑零初始条件的情况,即台车初始位置 $x(0)$ 、初始速度 $\dot{x}(0)$ 、负载初始摆角 $\theta(0)$ 、初始摆角速度 $\dot{\theta}(0)$ 满足 $x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0, \theta(0) = 0, \dot{\theta}(0) = 0$):

$$[0088] \quad \dot{x}_c(t) = \dot{x}_r(t) + \dot{x}_e(t) = \dot{x}_r(t) + \kappa \theta(t) \quad (21)$$

$$[0089] \quad x_c(t) = x_r(t) + x_e(t) = x_r(t) + \kappa \int_0^t \theta d\tau \quad (22)$$

[0090] 式中, $\dot{x}_c(t)$ 为 $\ddot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $x_c(t)$ 为 $\dot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_e(t)$ 为 $\ddot{x}_e(t)$ 关于时间的积分, $x_e(t)$ 为 $\dot{x}_e(t)$ 关于时间的积分。经过理论分析可证明台车的(速度、加速度)轨迹 $x_c(t)$ ($\dot{x}_c(t)$, $\ddot{x}_c(t)$) 光滑、一致连续, 能保证负载的摆角 $\theta(t)$ 、角速度 $\dot{\theta}(t)$ 及角加速度 $\ddot{\theta}(t)$ 渐近收敛为零, 即:

$$[0091] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [\theta(t), \dot{\theta}(t), \ddot{\theta}(t)] = [0, 0, 0] \quad (23)$$

[0092] 并且, $x_c(t)$ 能保证台车准确地到达目标位置 p_r , 同时, 其速度与加速度衰减为零, 即:

$$[0093] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [x_c(t), \dot{x}_c(t), \ddot{x}_c(t)] = [p_r, 0, 0] \quad (24)$$

[0094] 为证明这些结论, 我们进行如下分析。

[0095] 首先, 分析 $x_c(t)$ 对负载摆动的抑制性能。对式 (7) 关于时间求导数, 代入式 (3), 可得式 (8)。将式 (17) 代入式 (8) 并整理后可得:

$$[0096] \quad \dot{V}(t) = -\dot{\theta} \ddot{x}_r \cos \theta - \kappa \dot{\theta}^2 \cos \theta \quad (25)$$

[0097] 根据不等式的性质对式 (25) 进行放缩后, 有:

$$[0098] \quad \dot{V}(t) \leq \frac{1}{4} \ddot{x}_r^2 \cos^2 \theta - [\kappa \cos(\theta_{\max}) - 1] \dot{\theta}^2 \quad (26)$$

[0099] 对式 (26) 两边关于时间求积分, 可得:

$$[0100] \quad V(t) \leq \frac{1}{4} \int_0^t \ddot{x}_r^2 \cos^2 \theta d\tau - [\kappa \cos(\theta_{\max}) - 1] \int_0^t \dot{\theta}^2 d\tau + V(0) \quad (27)$$

[0101] 其中, $V(0)$ 表示 $V(t)$ 在 $t = 0$ 时刻的取值。对于式 (27) 中第一项进行分步积分, 并结合约束条件 (14) 与 (16), 可以得到如下结论:

[0102]

$$\frac{1}{4} \int_0^t \ddot{x}_r^2 \cos^2 \theta d\tau \leq \int_0^t \ddot{x}_r^2 d\tau = [\ddot{x}_r \dot{x}_r]_0^t - \int_0^t \dot{x}_r \ddot{x}_r d\tau \leq \ddot{x}_r(t) \dot{x}_r(t) + k_j \int_0^t \dot{x}_r d\tau \quad (28)$$

[0103]

$$= \ddot{x}_r(t) \dot{x}_r(t) + k_j x_r(t) \in \mathcal{L}_\infty$$

[0104] 此外, 由式 (19) 知:

$$[0105] \quad -[\kappa \cos(\theta_{\max}) - 1] \int_0^t \dot{\theta}^2 d\tau \leq 0 \quad (29)$$

[0106] 因此, 由式 (27)、(28)、(29), 并进一步由式 (7) 与 (25) 可得:

[0107]

$$V(t) \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \dot{V}(t) \in \mathcal{L}_\infty \quad (30)$$

[0108] 根据式 (27)、(28)、(30), 有:

[0109]

$$[\kappa \cos(\theta_{\max}) - 1] \int_0^t \dot{\theta}^2 d\tau \leq \frac{1}{4} \int_0^t \ddot{x}_r^2 \cos^2 \theta d\tau + V(0) - V(t) \in \mathcal{L}_\infty \Rightarrow \dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_2 \quad (31)$$

[0110] 进一步, 将式 (17) 代入式 (3) 并整理可得:

$$[0111] \quad \ddot{\theta}(t) = -\frac{1}{l} g \sin \theta - \frac{1}{l} \cos \theta \ddot{x}_r - \frac{\kappa}{l} \cos \theta \dot{\theta} \quad (32)$$

[0112] 由结论 $\dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ 与 $\ddot{x}_r(t) \in \mathcal{L}_\infty$, 有:

[0113]

$$\ddot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty \quad (33)$$

[0114] 因此, 由式 (30)、(31) 与 (33) 可知, $\dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ 并且 $\ddot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$, 由芭芭拉定理 [13] 可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta}(t) = 0 \quad (34)$$

[0116] 接下来, 分析负载摆角 $\theta(t)$ 与其角加速度 $\ddot{\theta}(t)$ 的收敛性。将式 (32) 分解为如下两部分:

[0117]

$$\ddot{\theta}(t) = \underbrace{-\frac{1}{l}g \sin \theta}_{\varphi_1(t)} - \underbrace{\left(\frac{1}{l} \cos \theta \ddot{x}_r + \frac{\kappa}{l} \cos \theta \dot{\theta} \right)}_{\varphi_2(t)} \quad (35)$$

[0118] 其中, $\varphi_1(t)$ 与 $\varphi_2(t)$ 为式 (35) 中定义的辅助函数。结合式 (15)、(30) 和 (34), 经分析可知, 式 (35) 中 $\varphi_1(t)$ 关于时间的导数 $\dot{\varphi}_1(t)$ 及 $\varphi_2(t)$ 满足:

[0119]

$$\dot{\varphi}_1(t) = -\frac{1}{l}g \cos \theta \dot{\theta} \in \mathcal{L}_\infty, \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_2(t) = 0 \quad (36)$$

[0120] 结合式 (34) 并引用扩展的芭芭拉定理 [13] 可得如下结论:

[0121]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_1(t) = -\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{l}g \sin \theta = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{\theta}(t) = 0 \quad (37)$$

[0122] 再根据假设 1, 知 $\theta(t) \in (-\pi/2, \pi/2)$, 故有 $\sin \theta(t) = 0 \Rightarrow \theta(t) = 0$ 。因此, 由式 (37), 易得如下结论:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = 0 \quad (38)$$

[0124] 至此, 由式 (34)、(37) 与 (38) 知 $x_c(t)$ 能有效地抑制负载摆角。接下来, 分析台车(速度、加速度)轨迹 $x_c(t)$ ($\dot{x}_c(t), \ddot{x}_c(t)$) 的光滑、一致连续性。对式 (17) 关于时间求导, 可得:

$$x_c^{(3)}(t) = x_r^{(3)}(t) + \kappa \ddot{\theta}(t) \quad (39)$$

[0126] 其中, $x_c^{(3)}(t)$ 为 $x_c(t)$ 关于时间的三阶导数。结合式 (17) 与 (21) 易知 $x_c(t)$, $\dot{x}_c(t)$, $\ddot{x}_c(t)$ 光滑可导。根据式 (14), 显然有 $\dot{x}_r(t), \ddot{x}_r(t), x_r^{(3)}(t) \in \mathcal{L}_\infty$, 再由假设 1、式 (30) 以及 (33) 可得 $\theta(t), \dot{\theta}(t), \ddot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$, 故从式 (14)、(17)、(21) 及 (39) 可得到如下的结论:

[0127]

$$\dot{x}_c(t), \ddot{x}_c(t), x_c^{(3)}(t) \in \mathcal{L}_\infty \quad (40)$$

[0128] 因此, $x_c(t), \dot{x}_c(t), \ddot{x}_c(t)$ 一致连续。

[0129] 最后, 分析台车的定位性能。根据式 (20), 可将式 (3) 改写如下:

$$l\ddot{\theta} + \dot{x} + g\theta = 0 \quad (41)$$

[0131] 将式 (17) 代入式 (41), 有 :

$$[0132] \quad l\ddot{\theta} + \ddot{x}_c + g\theta = 0 \quad (42)$$

[0133] 对式 (42) 两边关于时间求极限, 并利用结论 (37)、(38), 易得 :

$$[0134] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}_c(t) = -\lim_{t \rightarrow \infty} l\ddot{\theta}(t) - \lim_{t \rightarrow \infty} g\theta(t) = 0 \quad (43)$$

[0135] 同理, 将式 (15) 和 (38) 代入式 (21), 可得如下结论 :

$$[0136] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_c(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{x}_r(t) + \kappa\theta(t)] = 0 \quad (44)$$

[0137] 为进一步分析 $x_c(t)$ 的收敛情况, 对式 (42) 两边关于时间求积分, 将式 (21) 代入, 并移项, 可得 :

$$[0138] \quad \int_0^t \theta d\tau = -\frac{1}{g} \{ l[\dot{\theta}(t) - \dot{\theta}(0)] + [\dot{x}_c(t) - \dot{x}_c(0)] \} = -\frac{1}{g} [l\dot{\theta}(t) + \dot{x}_r(t) + \kappa\theta(t)] \quad (45)$$

[0139] 那么, 对式 (45) 两边关于时间求极限, 并利用式 (34) 与 (44) 的结论, 可得如下结果 :

$$[0140] \quad \int_0^\infty \theta d\tau = -\frac{1}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} [l\dot{\theta}(t) + \dot{x}_r(t) + \kappa\theta(t)] = 0 \quad (46)$$

[0141] 在此基础之上, 对式 (22) 两边取极限, 有如下结论 :

$$[0142] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} x_c(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_r(t) + \kappa \int_0^\infty \theta d\tau = p_r \quad (47)$$

[0143] 因此, $x_c(t)$ 能保证台车到达目标位置 p_r , 同时其速度 $\dot{x}_c(t)$ 与加速度 $\ddot{x}_c(t)$ 衰减为零, 证明完成。

[0144] 本发明的优点和有益效果 :

[0145] 本发明所设计的摆角消除环节 $\ddot{x}_c(t)$ (见式 (6)) 在结构上要远比已有方法 (如文献 [8]) 中所设计的抗摆环节简单, 且需要调节的参数更少 (本方法只需要调整 1 个参数 k 即可, 而文献 [8] 中的方法则有 4 个需要调整的参数), 即本方法更易于实现。此外, 已有方法 (如文献 [8]) 中所规划的轨迹需要反复迭代优化来保证台车的精确定位, 而由上述分析知, $\ddot{x}_c(t)$ 不影响最终规划 (加速度) 轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 的定位性能, 因此本方法无需优化。此外, 对于常规轨迹规划方法而言, 一旦台车的目标位置发生变化, 轨迹参数需重新离线计算以保证台车的精确定位; 相比之下, 对于本发明提出的方法, 使用者可方便地修改轨迹中台车目标位置 p_r , 而无需重新计算任何轨迹参数。综上, 本发明所提出的控制方法在保证台车精确定位与有效抑制并消除负载摆角的同时, 简化了整个轨迹规划流程, 且可用于在线规划, 具有更好的实际应用价值。

附图说明 :

[0146] 图 1 为在线轨迹生成原理示意图 ;

[0147] 图 2 为定位参考轨迹对应的仿真结果 ;

[0148] 图 3 为本发明控制方法及文献 [8] 中方法对应的仿真结果 ;

[0149] 图 4 为本发明控制方法及文献 [8] 中方法对应的实验结果。

具体实施方式：

[0150] 实施例 1：

[0151] 第 1、轨迹规划

[0152] 由于桥式吊车的欠驱动特性,无法为负载的运动进行规划,因而常规工业机器人的轨迹规划方法不适用于吊车系统;为此,提出一种全新的桥式吊车在线轨迹规划方案;要规划的轨迹包含两部分,第一部分应保证台车的定位性能,第二部分则需对负载摆角进行有效的抑制与消除,且其不能影响台车的定位性能;基于此,最终规划得到的(加速度)轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 具有如下表达式:

$$[0153] \quad \ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_r(t) + \rho(\theta, \dot{\theta}) \quad (4)$$

[0154] 其中, t 表示时间,变量后面 (t) 表示该变量为关于时间的变量,第一部分 $\ddot{x}_r(t)$ 为定位参考(加速度)轨迹,用来保证台车的精确定位;第二部分 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 则表示摆角消除环节,它是关于负载摆角 $\theta(t)$ (简记为 θ) 及其角速度 $\dot{\theta}(t)$ (简记为 $\dot{\theta}$) 的函数,用以抑制与消除负载的摆动;

[0155] 其步骤包括:

[0156] 第 1.1、摆角消除环节设计;通过充分地分析台车与负载之间的动态耦合关系,为台车运动设计一种新型的摆角消除环节 $\rho(\theta, \dot{\theta})$,它具有如下结构:

$$[0157] \quad \rho(\theta, \dot{\theta}) = \ddot{x}_e(t) = \kappa \dot{\theta}(t) \quad (6)$$

[0158] 其中, $\ddot{x}_e(t)$ 为摆角消除环节(同 $\rho(\theta, \dot{\theta})$,为方便描述及统一表达而引进), $\kappa > 1$ 为正的消摆增益;

[0159] 第 1.2、定位参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ 的选取;主要考虑台车的运行效率、轨迹的光滑性,可应用常规的 S 形轨迹,在此选用文献 [8], [10] 中所应用的轨迹:

$$[0160] \quad x_r(t) = \frac{p_r}{2} + \frac{1}{2k_2} \ln \left(\frac{\cosh(k_1 t - \varepsilon)}{\cosh(k_1 t - \varepsilon - k_2 p_r)} \right) \quad (48)$$

[0161] 其中, p_r 表示台车的目标位置, k_1, k_2, ε 为相应的轨迹参数,根据实际要求(如台车最大速度、加速度)进行选取,具体物理含义见文献 [10], $\ln(\cdot)$ 表示自然对数函数, $\cosh(\cdot)$ 表示双曲余弦函数。

[0162] 第 2、轨迹在线生成

[0163] 根据已确定的参考(加速度)轨迹 $\ddot{x}_r(t)$ (见式 (48)),摆角消除环节 $\ddot{x}_e(t)$ (见式 (4)),借助 Matlab 等实时仿真或实验软件在线求解如下微分方程,得到 $\theta(t)$ 与 $\dot{\theta}(t)$:

$$[0164] \quad l\ddot{\theta}(t) + \cos \theta(t) \cdot \rho(\theta, \dot{\theta}) + g \sin \theta(t) = -\cos \theta(t) \cdot \ddot{x}_r(t) \quad (5)$$

[0165] 式中, l 为吊绳长度, $\ddot{\theta}(t)$ 为摆角加速度, g 表示重力加速度;将在线计算得到的负载摆角 $\theta(t)$ 及摆角速度 $\dot{\theta}(t)$ 代入式 $\rho(\theta, \dot{\theta})$ 的表达式,即可获得规划(加速度)轨迹 $\ddot{x}_c(t)$,进而通过在线积分运算得到速度轨迹 $\dot{x}_c(t)$ 及位移轨迹 $x_c(t)$ 如下:

$$[0166] \quad \dot{x}_c(t) = \dot{x}_r(t) + \dot{x}_e(t) = \dot{x}_r(t) + \kappa \dot{\theta}(t) \quad (21)$$

$$[0167] \quad x_c(t) = x_r(t) + x_e(t) = x_r(t) + \kappa \int_0^t \theta d\tau \quad (22)$$

[0168] 式中, $\dot{x}_r(t)$ 为 $\ddot{x}_r(t)$ 关于时间的积分, $x_r(t)$ 为 $\dot{x}_r(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_c(t)$ 为 $\ddot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $x_c(t)$ 为 $\dot{x}_c(t)$ 关于时间的积分, $\dot{x}_e(t)$ 为 $\ddot{x}_e(t)$ 关于时间的积分, $x_e(t)$ 为 $\dot{x}_e(t)$ 关于时间的积分。

[0169] 第 3、控制方法实现

[0170] 借助传感器实时反馈的台车位移信号 $x(t)$ 与速度信号 $\dot{x}(t)$, 实时计算 $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 与轨迹 $x_c(t)$ 、 $\dot{x}_c(t)$ 之间的偏差, 在此使用如下引入摩擦力前馈补偿的 PD (比例—微分) 跟踪控制器:

$$[0171] \quad F_a(t) = -k_p e(t) - k_d \dot{e}(t) + f_{r0} \tanh(\dot{x} / \xi) - k_r |\dot{x}| \dot{x} \quad (49)$$

[0172] 其中, k_p, k_d 代表正的控制增益; $e(t) = x(t) - x_p(t)$ 为跟踪误差, $x(t)$ 表示台车位移, $x_p(t)$ 表示待跟踪的台车轨迹 (即本方法规划的轨迹 $x_c(t)$ 或文献 [8] 中规划的轨迹), $\dot{e}(t)$ 为 $e(t)$ 关于时间的导数; $f_{r0} \tanh(\dot{x} / \xi) - k_r |\dot{x}| \dot{x}$ 为轨道摩擦前馈补偿项, f_{r0}, ξ, k_r 为轨道摩擦参数, $\tanh(\cdot)$ 为双曲正切函数。

[0173] 第 4、仿真与实验效果描述

[0174] 为了验证本方法在吊车控制方面的实际性能, 本发明进行了数值仿真与实际实验。

[0175] 第 4.1、仿真验证。在此将从运动规划的角度验证本方法的有效性, 即不考虑台车的动力学方程部分, 仅考虑式 (3), 将规划得到的 (加速度) 轨迹 $\ddot{x}_c(t)$ 作为式 (3) 的输入, 分析其摆角输出情况 [8]。此外, 在仿真中选取文献 [8] 中提出的轨迹规划方法作为对比。

[0176] 仿真中, 台车质量、负载质量、吊绳长度与重力加速度分别设置为:

$$[0177] \quad M = 7\text{kg}, m = 1.025\text{kg}, l = 0.75\text{m}, g = 9.8\text{m} / \text{s}^2 \quad (50)$$

[0178] 台车的目标位置 p_r 、参考轨迹 (48) 及轨迹 (22) 中的参数分别设为:

$$[0179] \quad p_r = 0.6\text{m}, k_1 = 1, k_2 = 2.5, \varepsilon = 2.2, k = 8 \quad (51)$$

[0180] 文献 [8] 中的轨迹参数 (具体定义见文献 [8]) 选择如下:

$$[0181] \quad \alpha = \beta = 50, \Gamma = 0.015, \eta = 3.0, p_r(1) = 0.6\text{m} \quad (52)$$

[0182] 并使用其经过 10 次迭代以后生成的轨迹为最终的对比轨迹。仿真环境选为 Matlab/Simulink, 采用 Ode3 算法, 步长为 5 毫秒。

[0183] 仿真结果为附图 2 与 3, 其中, 图 2 刻画了在定位参考轨迹 (48) 的作用下, 台车的位移及相应的负载摆角随时间变化的曲线; 图 3 中实线刻画了在本发明所规划的轨迹作用下, 台车的位移及相应的负载摆角随时间变化的曲线, 点画线刻画了在文献 [8] 中方法所规划的轨迹作用下, 台车的位移及相应的负载摆角随时间变化的曲线, 为方便对比, 在图 3 中再次绘出了定位参考轨迹 (48) 对应的台车位移曲线 (虚线), 此外, 为直观表示, 已在图中将负载摆角的单位由弧度 (rad) 转换为角度 ($^\circ$)。由附图 2 可以看出, 仅考虑台车定位性能而未充分分析台车与负载之间运动耦合关系的定位参考轨迹 (48) 无法抑制与消除负载摆角, 当台车到达目标位置之后, 负载摆动呈现出类似于单摆的等幅震荡特性, 极大地降低了系统工作效率。相比之下, 由附图 3 可见, 本发明提出的改进型轨迹 (实线) 在无需迭代优化的情况下, 取得了与文献 [8] 中方法 (点画线) 类似 (在消摆方面更优) 的控制性能, 不仅保证了台车的精确定位, 几乎在负载到达目标位置的同时, 将负载摆角完全消除, 无残余摆角, 具有良好的控制性能。指的指出的是, 本发明方法不需事先计算轨迹参数, 无需迭代优

化,因而比文献 [8] 中的方法更具实用性。

[0184] 第 4.2、实验验证。为了进一步验证本方法的实际应用性能,本发明又在桥式吊车实验平台 [14] 上进行了实验验证。实验平台参数与仿真中设置的参数值一致(见式 (50))。同样地,对于本方法,选用式 (48) 中 $x_r(t)$ 为定位参考轨迹,并设定轨迹参数同式 (51)。对于文献 [8] 中的方法,其参数的选取与仿真中保持一致。经过充分调试后,本发明所设计轨迹对应的跟踪控制器 (49) 中的增益选取为 $k_p = 250, k_d = 30$, 文献 [8] 中所规划轨迹对应的跟踪控制器 (49) 中的增益设为 $k_p = 160, k_d = 50$, 此外,经离线标定,得式 (49) 中轨道摩擦参数为 $f_{r0} = 4.4, \xi = 0.01, k_r = -0.5$ 。

[0185] 实验结果为附图 4, 其中,实线刻画了使用本发明所规划的轨迹时,台车位移、负载摆角及控制量随时间变化的曲线;点画线则刻画了使用文献 [8] 中方法规划的轨迹时,台车位移、负载摆角及控制量随时间变化的曲线,为直观表示,已在图中将负载摆角的单位由弧度(rad)转换为角度($^{\circ}$)。由附图 4 可以发现,实验结果与仿真结果(附图 3) 具有较高的一致性。此外,可以看出,相比文献 [8] 的方法,本发明所提出的方法能更好地抑制负载摆角,且需要更少的控制量。本发明所提出的方法可实时地规划台车轨迹,无需离线地计算轨迹参数与迭代优化,缩短了台车轨迹的开发周期,且能取得良好的控制性能,因此,具有更好的实际应用价值。

[0186] 参考文献

[0187] 1. 孙宁, 方勇纯. 一类欠驱动系统的控制方法综述 [J]. 智能系统学报, 2011, 6(3):200-207.

[0188] 2. Fang Y, Dixon W E, Dawson D M, and Zergeroglu E. Nonlinear Coupling Control Laws for an Underactuated Overhead Crane System[J]. IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(3):418-423.

[0189] 3. Le T A, Kim G-H, Kim M Y, Lee S G. Partial feedback linearization control of overhead cranes with varying cable lengths[J]. International Journal Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(4):501-507.

[0190] 4. 马博军, 方勇纯, 王宇韬, 姜钟平. 欠驱动桥式吊车系统自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6):1105-1109.

[0191] 5. Sun N, Fang Y C. New Energy Analytical Results for the Regulation of Underactuated Overhead Cranes: An End-Effector Motion-Based Approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12):4723-4734.

[0192] 6. Yoshida Y. Tabata Y. Visual Feedback Control of an Overhead Crane and Its Combination with Time-Optimal Control[C] // Proceedings of the IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2008:1114-1119.

[0193] 7. Sun N, Fang Y C, Zhang X B, Yuan Y H. Phase Plane Analysis Based Motion Planning for Underactuated Overhead Cranes[C] // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011:3483-3488.

[0194] 8. Sun N, Fang Y C, Zhang Y D, Ma B J. A Novel Kinematic Coupling Based Trajectory Planning Method for Overhead Cranes[J]. IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1):166-173.

- [0195] 9. Ma B J, Fang Y C, Zhang X B. Adaptive Tracking Control for an Overhead Crane System[C] // Proceedings of the 17th IFAC World Congress. 2008:2194-12199.
- [0196] 10. Fang Y C, Ma B J, Wang P C, Zhang X B. A Motion Planning-Based Adaptive Control Method for an Underactuated Crane System[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(1):241-248.
- [0197] 11. Cho S K, Lee H H. An Anti-Swing Control of a 3-Dimensional Overhead Crane[C] // Proceedings of the American Control Conference. 2000, 1037-1041.
- [0198] 12. Khalil H K. Nonlinear Systems[M]. New Jersey:Prentice-Hall, 2002.
- [0199] 13. 方勇纯, 卢桂章. 非线性系统理论 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [0200] 14. 马博军, 方勇纯, 王鹏程, 苑英海. 三维桥式吊车自动控制实验系统 [J]. 控制工程, 2011, 18(2):239-243。

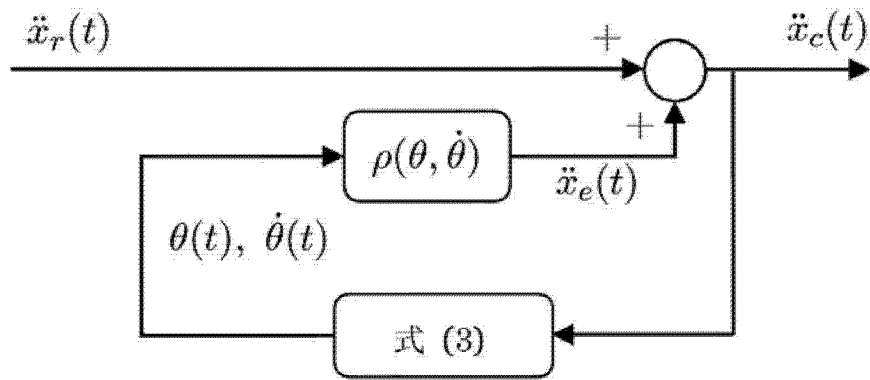


图 1

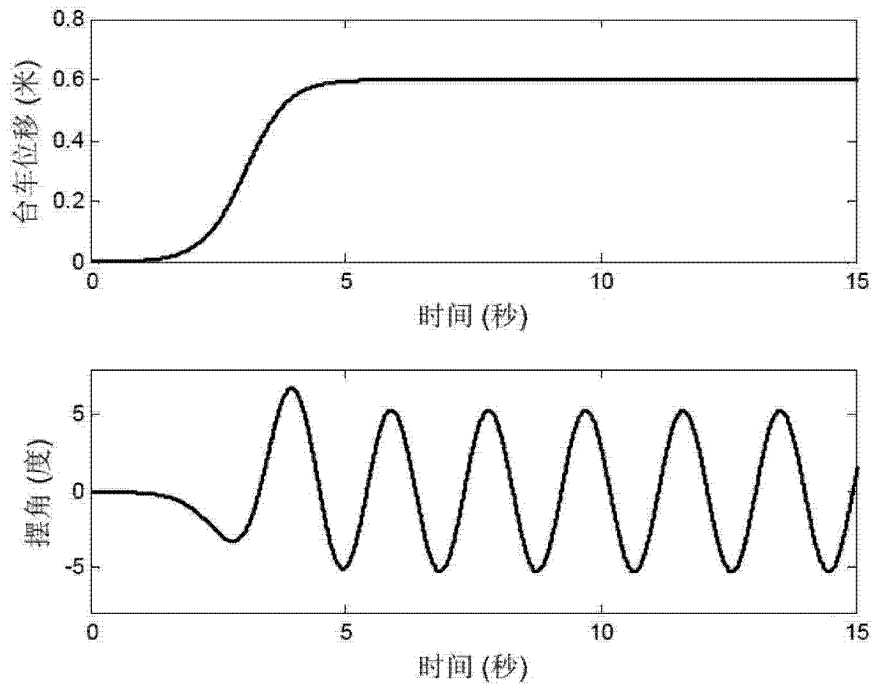


图 2

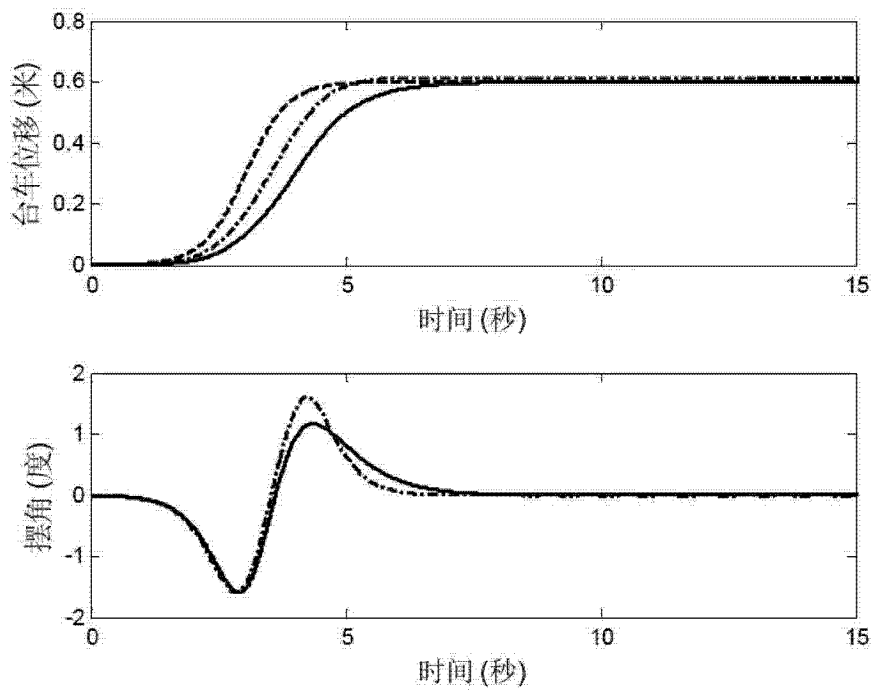


图 3

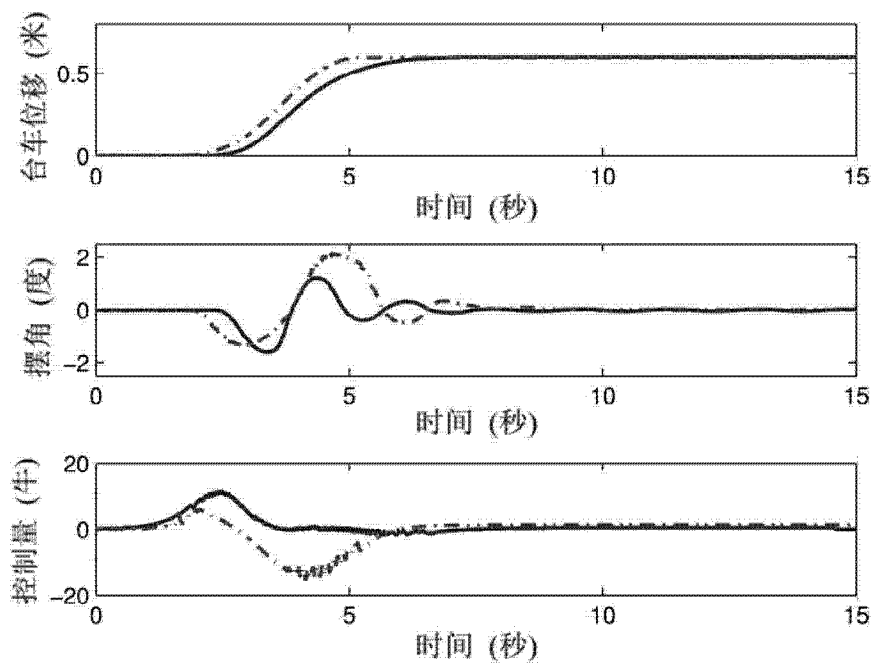


图 4