



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106927366 A

(43)申请公布日 2017.07.07

(21)申请号 201710073155.1

(22)申请日 2017.02.10

(71)申请人 武汉港迪智能技术有限公司

地址 434000 湖北省武汉市东湖新技术开发
区武汉大学科技园武大航域二区
B3-19楼

(72)发明人 范沛 谢鸣 马铭 涂铮

(74)专利代理机构 武汉开元知识产权代理有限
公司 42104

代理人 潘杰 胡艺

(51)Int.Cl.

B66C 13/06(2006.01)

B66C 13/30(2006.01)

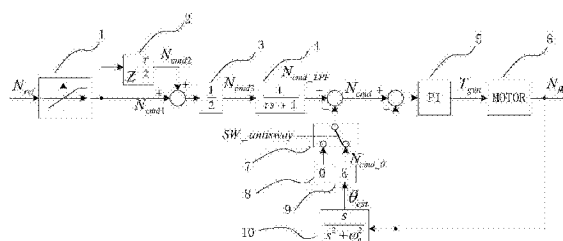
权利要求书2页 说明书6页 附图6页

(54)发明名称

一种桥门式起重机开环防摇方法

(57)摘要

本发明公开了一种桥门式起重机开环防摇方法,行走机构通过挂绳悬挂货物,行走机构由电机驱动行驶,通过电机编码器检测单摆的绳长,依据单摆绳长获取单摆的摇摆周期;获取人工输入的实时速度命令;实时速度命令经过速度命令斜坡发生器生成第一速度命令;延时单元依据摇摆周期 T 对第一速度命令进行延时,生成第二速度命令;第一速度命令与第二速度命令经过求和计算器相加,再经过平均单元生成第三速度命令;依据第三速度命令和电机实时速度 N_{fk} 生成电机速度环控制的输入信号,驱动电机行驶。本发明鲁棒性强、无需图像传感器,只需要检测单摆的绳长,能够在等效绳长检测误差存在的情况下保证货物的残余摆动较小,无论负载的大小,控制效果都较好。



1. 一种桥门式起重机开环防摇方法,行走机构通过挂绳悬挂货物,所述行走机构由电机(6)驱动行驶,其特征在于:通过电机(6)编码器检测单摆的绳长L,依据单摆绳长L获取单摆的摇摆周期T;获取人工输入的实时速度命令 N_{ref} ;所述实时速度命令 N_{ref} 经过速度命令斜坡发生器(1)生成第一速度命令 N_{cmd1} ;延时单元(2)依据所述摇摆周期T对所述第一速度命令 N_{cmd1} 进行延时,生成第二速度命令 N_{cmd2} ;所述第一速度命令 N_{cmd1} 与所述第二速度命令 N_{cmd2} 经过求和计算器相加,再经过平均单元(3)生成第三速度命令 N_{cmd3} ;依据所述第三速度命令 N_{cmd3} 和电机(6)实时速度 N_{fk} 生成电机(6)速度环控制的输入信号,驱动所述电机(6)行驶。

2. 根据权利要求1所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于,所述依据单摆绳长L获取单摆的摇摆周期T的方法为所述摇摆周期 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于,所述依据所述摇摆周期T对所述实时速度斜坡指令进行延时是指:将所述第一速度命令 N_{cmd1} 延时 $T/2$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于,所述依据所述第三速度命令 N_{cmd3} 和电机(6)实时速度 N_{fk} 生成电机(6)速度环控制的输入信号的方法包括:依据所述第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} ,所述第四速度命令 N_{cmd} 与所述电机(6)实时速度 N_{fk} 的差值经过速度PI调节器(5)之后生成的转矩给定信号 T_{gvn} 为电机(6)速度环控制的输入信号。

5. 根据权利要求4所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于,所述依据所述第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法包括:获取电机(6)实时速度 N_{fk} ,所述实时速度 N_{fk} 依次经过摇摆角度估计器(10)和防摇控制系数乘法器(9)之后生成防摇速度命令 N_{cmd_0} ,所述第三速度命令 N_{cmd3} 和所述防摇速度命令 N_{cmd_0} 输入第一差值计算器生成第四速度命令 N_{cmd} 。

6. 根据权利要求5所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于:通过所述摇摆角度估计器(10)计算出摇摆角度的估计值 θ_{est}

$$\theta_{est} = N_{fk} \frac{s}{s^2 + \omega_n^2}$$

其中, ω_n 为单摆的自然频率, $\omega_n = 1/T$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于:防摇控制系数乘法器(9)将所述摇摆角度的估计值 θ_{est} 的值乘以防摇控制系数K得到所述防摇速度命令 N_{cmd_0} 。

8. 根据权利要求5所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于:还包括防摇启动选择器(7),所述防摇启动选择器(7)的两个输入端分别接收常数0输入信号和所述防摇速度命令 N_{cmd_0} 输入信号,所述防摇启动选择器(7)将常数0或所述防摇速度命令 N_{cmd_0} 输出,所述防摇启动选择器(7)的输出信号和所述第三速度命令 N_{cmd3} 输入第一差值计算器生成第四速度命令 N_{cmd} 。

9. 根据权利要求4所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于,所述依据所述第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法包括:将所述第三速度命令 N_{cmd3} 输入带通滤波器(11)生成所述第四速度命令 N_{cmd} ;

所述带通滤波器(11)的计算公式包括 $\frac{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi_g \omega_n s + \omega_n^2}$,其中 ω_n 为单摆的自然频率, ξ_g 为带

通滤波器(11)的带通比。

10. 根据权利要求1-9任一项所述的一种桥门式起重机开环防摇方法,其特征在于:所述第三速度命令 N_{cmd3} 经过低通滤波器(4)4之后生成低通滤波速度命令 N_{cmd_LPF} ,依据所述低通滤波速度命令 N_{cmd_LPF} 和所述电机(6)实时速度 N_{fk} 生成所述电机(6)速度环控制的输入信号。

一种桥门式起重机开环防摇方法

技术领域

[0001] 本发明本属于应用在桥门式起重设备行走机构上的控制方法,防止悬挂货物摇摆的控制方法。

背景技术

[0002] 在某些桥门式起重设备上,例如轨道式龙门吊、轮胎式龙门吊、桥梁式起重机,行走机构会在钢丝绳悬挂货物的情况下做水平方向的运行,如控制不当,悬挂的货物会形成摇摆。这种摇摆会对机械及周边的环境造成损害,也会降低工作效率。控制这种摇摆通常有防摇、机械防摇和电子防摇三类方法,防摇对操作人员的熟练程度要求较高,且需要操作人员距离设备较近操作,在远程控制的应用中,当图像信号以通信的方式传送且有时间上的延迟时,防摇无法进行;机械防摇是从起重机的设计角度出发,让货物不会摇摆起来,如振华重工的八绳防摇,其缺点是设备的复杂程度增加,维护成本加大;电子防摇能够应用于远程操作,其方法很多,现有方法中西子公司的方法需要安装复杂的图像传感器来采集摇摆的角度并进行摇摆的控制,容易受环境条件影响且成本较高;ABB公司的方法无需传感器,只需检测单摆的绳长,可允许操作人员在任何时刻改变速度命令的大小和方向,但是由于其需要精确的等效绳长参与控制,在等效绳长检测误差存在时,残余摆动较大;安川公司的方法无需传感器,且能防止初始的摇摆,但是由于其原理是用摇摆的货物在行走机构上产生的负载转矩来近似等效摇摆的角度,在负载较轻时效果较差。

发明内容:

[0003] 本发明要针对上述背景技术存在的问题,提供一种防摇控制效果更好的桥门式起重机开环防摇方法。

[0004] 为解决上述技术问题,本发明的技术方案为

[0005] 一种桥门式起重机开环防摇方法,行走机构通过挂绳悬挂货物,行走机构由电机驱动行驶,通过电机编码器检测单摆的绳长 L ,依据单摆绳长 L 获取单摆的摇摆周期 T ;获取人工输入的实时速度命令 N_{ref} ;实时速度命令 N_{ref} 经过速度命令斜坡发生器1生成第一速度命令 N_{cmd1} ;延时单元2依据摇摆周期 T 对第一速度命令 N_{cmd1} 进行延时,生成第二速度命令 N_{cmd2} ;第一速度命令 N_{cmd1} 与第二速度命令 N_{cmd2} 经过求和计算器相加,再经过平均单元3生成第三速度命令 N_{cmd3} ;依据第三速度命令 N_{cmd3} 和电机实时速度 N_{fk} 生成电机速度环控制的输入信号,驱动电机行驶。

[0006] 较佳地,依据单摆绳长 L 获取单摆的摇摆周期 T 的方法为摇摆周期 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ 。

[0007] 较佳地,依据摇摆周期 T 对实时速度斜坡指令进行延时是指:将第一速度命令 N_{cmd1} 延时 $T/2$ 。

[0008] 较佳地,依据第三速度命令 N_{cmd3} 和电机实时速度 N_{fk} 生成电机速度环控制的输入信号的方法包括:依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} ,第四速度命令 N_{cmd} 与电机实时速度 N_{fk} 的差值经过速度PI调节器之后生成的转矩给定信号 T_{gvn} 为电机速度环控制的输入

信号。

[0009] 较佳地,依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法包括:获取电机实时速度 N_{fk} ,实时速度 N_{fk} 依次经过摇摆角度估计器10和防摇控制系数乘法器9之后生成防摇速度命令 N_{cmd_0} ,第三速度命令 N_{cmd3} 和防摇速度命令 N_{cmd_0} 输入第一差值计算器生成第四速度命令 N_{cmd} 。

[0010] 较佳地,通过摇摆角度估计器10计算出摇摆角度的估计值 θ_{est}

$$[0011] \quad \theta_{est} = N_{fk} \frac{s}{s^2 + \omega_n^2}$$

[0012] 其中, ω_n 为单摆的自然频率, $\omega_n = 1/T$ 。

[0013] 较佳地,防摇控制系数乘法器9将摇摆角度的估计值 θ_{est} 的值乘以防摇控制系数 K 得到防摇速度命令 N_{cmd_0} 。

[0014] 较佳地,还包括防摇启动选择器,防摇启动选择器的两个输入端分别接收常数0输入信号和防摇速度命令 N_{cmd_0} 输入信号,防摇启动选择器将常数0或防摇速度命令 N_{cmd_0} 输出,防摇启动选择器的输出信号和第三速度命令 N_{cmd3} 输入第一差值计算器生成第四速度命令 N_{cmd} 。

[0015] 较佳地,依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法包括:将第三速度命令 N_{cmd3} 输入带通滤波器生成第四速度命令 N_{cmd} ;

[0016] 带通滤波器的计算公式包括 $\frac{s^2 + 2\xi_1\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi_2\omega_n s + \omega_n^2}$,其中 ω_n 为单摆的自然频率, ξ_2 为带通滤波器的带通比。

[0017] 较佳地,第三速度命令 N_{cmd3} 经过低通滤波器4之后生成低通滤波速度命令 N_{cmd_LPF} ,依据低通滤波速度命令 N_{cmd_LPF} 和电机实时速度 N_{fk} 生成电机速度环控制的输入信号。

[0018] 本发明的有益效果在于:本发明允许操作人员任何时候改变行走机构的速度命令的大小和方向,当行走机构转速稳定或者停止之后,行走机构下悬货物没有残余摆动或残余摆动较小。本发明允许在等效绳长计算出现较大偏差时,保证行走机构下悬货物的残余摆动较小。本发明的能够在防摇功能未开启时实现摆角跟踪,当防摇功能开启时,将行走机构下悬货物的摆动消除。本发明鲁棒性强、无需图像传感器,只需要检测单摆的绳长,且能够在等效绳长检测误差存在的情况下保证货物的残余摆动较小,无论负载的大小,控制效果都较好。

附图说明

[0019] 图1为本发明控制对象的原理图一;

[0020] 图2为本发明控制对象的原理图二;

[0021] 图3为本发明实施例一的控制原理图;

[0022] 图4为在操作人员进行点动指令时未作任何防摇处理和绳长检测准确的情况下仅采用摆角计算反馈进行防摇效果的仿真对比图;

[0023] 图5为在操作人员进行点动指令时在绳长检测比实际等效绳长多2米时的情况下仅采用摆角计算反馈进行防摇和采用本发明第一个实施例进行防摇效果的仿真对比图;

[0024] 图6为在操作人员进行点动指令时在绳长检测比实际等效绳长少2米时的情况下

仅采用摆角计算反馈进行防摇和采用本发明第一个实施例进行防摇效果的仿真对比图；

[0025] 图7为采用本发明实施例一开启低通滤波器和未开启滤波器时防摇效果及行走机构输出转矩的仿真对比图；

[0026] 图8为采用本发明实施例一，在操作人员进行点动指令时不开启防摇，在点动指令结束后开启防摇的仿真波形图；

[0027] 图9为本发明实施例二的控制原理图。

[0028] 图中：1.速度命令斜坡发生器，2.延时单元，3.平均单元，4.低通滤波器，5.速度PI调节器，6.电机，7.防摇启动选择器，8.常数0单元，9.防摇控制系数乘法器，10.摇摆角度估计器，11.带通滤波器。

具体实施方式

[0029] 由图1所示，行走机构的运行速度为 v ，水平运行导致的下悬货物摆动角度为 θ 。仅考虑行走机构下悬货物在行走平面的摆动，有的行走机构下悬货物的型式可等效为一个起升机构钢丝绳卷筒缠绕一根钢丝绳下悬货物，下悬货物的高度为 L_1 ，当钢丝绳的卷筒转动时，货物的高度发生改变，如图1所示。

[0030] 有的行走机构下悬货物的型式可等效为一个起升机构的两个钢丝绳卷筒各缠绕一根钢丝绳接在下悬货物上，当钢丝绳卷筒转动时，货物的高度发生改变，如图2所示。

[0031] 通常等效摆长 L_{eff} 是用钢丝绳的长度 L 来近似的，在图1中这种近似带来的误差为 $L_1/2$ ，在图2中假设货物的高度可忽略，这种近似带来的误差为 $L(1-\cos\alpha)$ 。

[0032] 本发明所采用的技术方案为：利用起升电机6编码器检测单摆的绳长，计算出单摆的摇摆周期 T ，对于操作人员的实时速度斜坡指令，延时 $T/2$ 生成第二个速度斜坡指令，将实时速度斜坡指令与第二个速度斜坡指令的实时平均值作为第三个速度斜坡指令，第三个速度斜坡指令减去行走机构实际运行速度通过单摆数学模型得到的角度乘以一个系数的值作为行走机构电机6速度环控制的输入；第二种方法是第三个速度斜坡指令经过带通频率为单摆自然频率的带通滤波器11后作为行走机构电机6速度环控制的输入。

[0033] 下面结合附图和实施例对本发明做进一步的说明。

[0034] 实施例一

[0035] 一种桥门式起重机开环防摇方法，行走机构通过挂绳悬挂货物，行走机构由电机6驱动行驶，通过电机6编码器检测单摆的绳长 L ，依据单摆绳长 L 获取单摆的摇摆周期 T ；获取人工输入的实时速度命令 N_{ref} ；实时速度命令 N_{ref} 经过速度命令斜坡发生器1生成第一速度命令 N_{cmd1} ；延时单元2依据摇摆周期 T 对第一速度命令 N_{cmd1} 进行延时，生成第二速度命令 N_{cmd2} ；第一速度命令 N_{cmd1} 与第二速度命令 N_{cmd2} 经过求和计算器相加，再经过平均单元3生成第三速度命令 N_{cmd3} ；依据第三速度命令 N_{cmd3} 和电机6实时速度 N_{fk} 生成电机6速度环控制的输入信号，驱动电机6行驶。

[0036] 作为本实施例的一个优化方案还可以设置一个低通滤波器4，第三速度命令 N_{cmd3} 经过低通滤波器4之后生成低通滤波速度命令 N_{cmd_LPF} ，依据低通滤波速度命令 N_{cmd_LPF} 和电机6实时速度 N_{fk} 生成电机6速度环控制的输入信号。

[0037] 依据单摆绳长 L 获取单摆的摇摆周期 T 的方法为摇摆周期 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ 。依据摇摆周期 T 对实时速度斜坡指令进行延时是指将第一速度命令 N_{cmd1} 延时 $T/2$ 。

[0038] 本实施例中依据第三速度命令 N_{cmd3} 和电机6实时速度 N_{fk} 生成电机6速度环控制的输入信号的方法为:依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} ,第四速度命令 N_{cmd} 与电机6实时速度 N_{fk} 的差值经过速度PI调节器5之后生成的转矩给定信号 T_{gvn} 为电机6速度环控制的输入信号。

[0039] 依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法为:获取电机6实时速度 N_{fk} ,实时速度 N_{fk} 依次经过摇摆角度估计器10和防摇控制系数乘法器9之后生成防摇速度命令 N_{cmd_0} ,第三速度命令 N_{cmd3} 和防摇速度命令 N_{cmd_0} 输入第一差值计算器生成第四速度命令 N_{cmd} 。

[0040] 通过摇摆角度估计器10计算出摇摆角度的估计值 θ_{est} 的方法为: $\theta_{est} = N_{fk} \frac{g}{\omega_n^2}$,其中, ω_n 为单摆的自然频率, $\omega_n = 1/T$ 。

[0041] 防摇控制系数乘法器9将摇摆角度的估计值 θ_{est} 的值乘以防摇控制系数 K 得到防摇速度命令 N_{cmd_0} 。

[0042] 作为本实施例的一种改进方案,本方法还包括一个防摇启动选择器7,防摇启动选择器7的两个输入端分别接收常数0输入信号和防摇速度命令 N_{cmd_0} 输入信号,防摇启动选择器7将常数0或防摇速度命令 N_{cmd_0} 输出,防摇启动选择器7的输出信号和第三速度命令 N_{cmd3} 输入第一差值计算器生成第四速度命令 N_{cmd} 。

[0043] 如图3所示,来自操作人员的速度命令 N_{ref} 经过带限幅的速度命令斜坡发生器1生成第一速度命令 N_{cmd1} ,该速度命令经过延时单元2生成第二速度命令 N_{cmd2} ,第一速度命令 N_{cmd1} 与第二速度命令 N_{cmd2} 相加后经过平均单元3生成第三速度命令 N_{cmd3} ,该速度命令经过低通滤波器4生成滤波后的速度命令 N_{cmd_LPF} ,该速度命令与由SW_antisway控制的防摇启动选择器7输出值相减生成第四速度命令 N_{cmd} ,该速度命令与电机6的实际速度 N_{fk} 相减得到的差值经过速度PI调节器5后产生转矩给定信号 T_{gvn} 并驱动电机6。电机6的实际速度 N_{fk} 经过摇摆角度估计器10生成摇摆角度的估计值 θ_{est} ,该角度估计值与防摇控制系数乘法器9相乘后进入防摇启动选择器7,防摇启动选择器7的另一个输入为常数0单元8。

[0044] 这其中,延时单元2的作用是将第一速度命令 N_{cmd1} 延时 $T/2$, T 为单摆的摇摆周期,其计算公式为:

$$[0045] \quad T = 2\pi\sqrt{L/g} \quad (1)$$

[0046] 该延时单元2的作用为增强在等效摆长检测误差大时的防摇效果的鲁棒性,即等效摆长检测出现误差时,也能保证货物的残余摆动较小。

[0047] 摇摆角度估计器10为单摆角度的数学模型,其计算公式为:

$$[0048] \quad \theta_{est} = N_{fk} \frac{g}{\omega_n^2} \quad (2)$$

[0049] 其中 ω_n 为单摆的自然频率,其计算公式为:

$$[0050] \quad \omega_n = 1/T \quad (3)$$

[0051] 摇摆角度估计器10的作用就是通过数学模型来计算出货物所形成单摆的摇摆角度,从速度指令中减去前述摇摆角度乘以一个消摆系数就形成了对摇摆角度的抑制作用,摇摆角度越大,抑制作用越强,摇摆角度减小,抑制作用则减小,直到将摇摆抑制为0。

[0052] 如图4所示,该图为操作人员进行点动指令时未作任何防摇处理和绳长检测准确的情况下仅采用摆角计算反馈进行防摇效果的仿真对比图。绳长为10米,操作人员在0.5s给出速度命令并且在5s时停止速度指令。第一行的两个波形实线表示的是仅经过斜坡

限幅的速度指令,破折线表示的是未做延时和平均处理,但在速度斜坡指令上减去摇摆角度估计值乘以一个防摇控制系数后得到的速度指令,其计算摇摆角度用到的绳长为10米,即与实际绳长一致;第二行的两个波形实线表示的是未做防摇处理的速度波形导致的货物摇摆角度,破折线表示的是前述做了防摇处理的速度指令导致的货物摇摆角度,可以看出,未做防摇处理时,在该点动指令下,货物摇摆的角度最大为 6° ,在计算绳长与实际绳长一致的情况下,做了前述的防摇处理时货物摇摆的角度最大为 2° ,且最后衰减为 0° ,摇摆被消除。

[0053] 如图5所示,该图为操作人员进行点动指令时,在实际绳长比检测绳长多2米的情况下仅采用摆角计算反馈进行防摇和采用本发明进行防摇效果的仿真对比图。绳长为10米,操作人员在0.5s给出速度命令并且在5s时停止速度指令。从图中第二行实线表示的波形可以看出,仅采用摆角计算反馈进行防摇时,货物摇摆最大角度为 2° ,但是由于检测绳长出现误差,最终稳定的货物摇摆角度仍有 1° 。如果将仅采用摆角计算反馈进行防摇的速度指令延时单摆的摇摆周期一半发出时,会得到第二行的破折线表示的波形,货物摇摆最大角度为 2° ,最终稳定的货物摇摆角度仍有 1° ,不过比较实线和破折线波形可以看出,两者摇摆的最大角度虽然相同,但是相位却几乎相反。因此采用本发明进行防摇时,将速度指令延时单摆的摇摆周期一半,将延时前后的速度指令相加平均后得到的货物最终摇摆角度约为 0.2° ,用点线表示,比不采用本发明的方法减少了80%残余摆动。另外,从图4和图5的第三行可以看出,无论进行何种防摇处理,行走机构行走的距离都是一样的。

[0054] 图6为操作人员进行点动指令时在实际绳长比检测绳长少2米的情况下仅采用摆角计算反馈进行防摇和采用本发明进行防摇效果的仿真对比图,从该图中可以得出与图5的分析基本一致的结论。

[0055] 如图7所示,该图为采用本发明第一实施例时开启低通滤波器4和未开启滤波器时防摇效果及行走机构加速度的仿真对比图,从该图的第一行至第三行可以看出,开启低通滤波器4的防摇效果及行走机构的行走距离与未开启低通滤波器4时基本一致,但是从第四行可以看出,未开启低通滤波器4时,行走机构输出加速度(实线表示)的变化较为剧烈,而开启低通滤波器4后,行走机构输出加速度(破折线表示)平滑了许多,这对于行走机构的转矩冲击较小,有利于行走机构机械部分的维护减少。

[0056] 如图8所示,该图为采用本发明第一实施例时,在操作人员进行点动指令时不开启防摇,在点动指令结束后开启防摇的仿真波形图。从0.5s-5s期间,未开启防摇,操作人员给出一个点动指令,可以看出摇摆的角度最大为 3° ,且不会衰减,但是摇摆的角度被实时计算出来。在10s时刻,防摇功能开启,可以从图8中第一行看出,立即有一个消除摆动的速度给定产生,从图8中第二行看出,经过5s之后,摇摆得以消除。

[0057] 实施例二

[0058] 本实施例与实施例一的区别在于依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法,其他部分与实施例一相同。

[0059] 本依据第三速度命令 N_{cmd3} 生成第四速度命令 N_{cmd} 的方法为:将第三速度命令 N_{cmd3} 输入带通滤波器11生成第四速度命令 N_{cmd} ;带通滤波器11的计算公式包括 $\frac{s^2 + 2\xi_1\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi_2\omega_n s + \omega_n^2}$,其中

ω_n 为单摆的自然频率， $\frac{1}{Q}$ 为带通滤波器11的带通比。

[0060] 由图9所示，来自操作人员的速度命令 N_{ref} 经过带限幅的速度命令斜坡发生器1生成第一速度命令 N_{cmd1} ，该速度命令经过延时单元2生成第二速度命令 N_{cmd2} ，第一速度命令 N_{cmd1} 与第二速度命令 N_{cmd2} 相加后经过平均单元3生成第三速度命令 N_{cmd3} ，该速度命令经过低通滤波器4生成滤波后的速度命令 N_{cmd_LPF} ，该速度命令经过带通滤波器11生成第四速度命令 N_{cmd} ，该速度命令与电机6的实际速度 N_{fk} 相减得到的差值经过速度PI调节器5后产生转矩给定信号 T_{gvn} 并驱动电机6。

[0061] 应当理解的是，对本领域普通技术人员来说，可以根据上述说明加以改进或变换，而所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

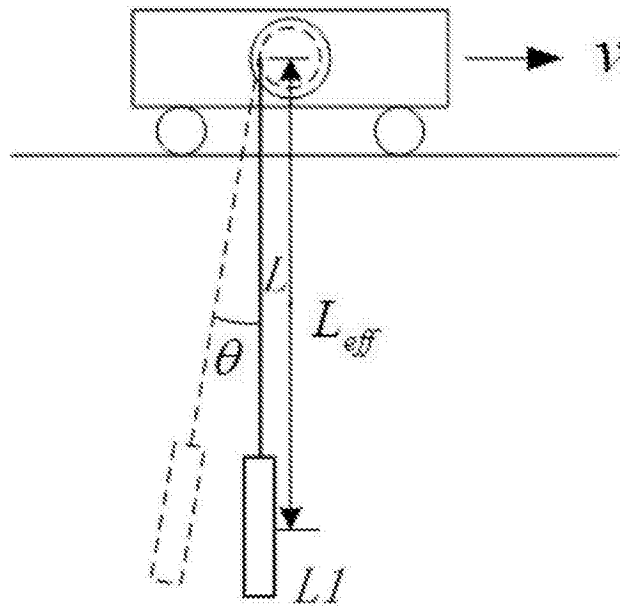


图1

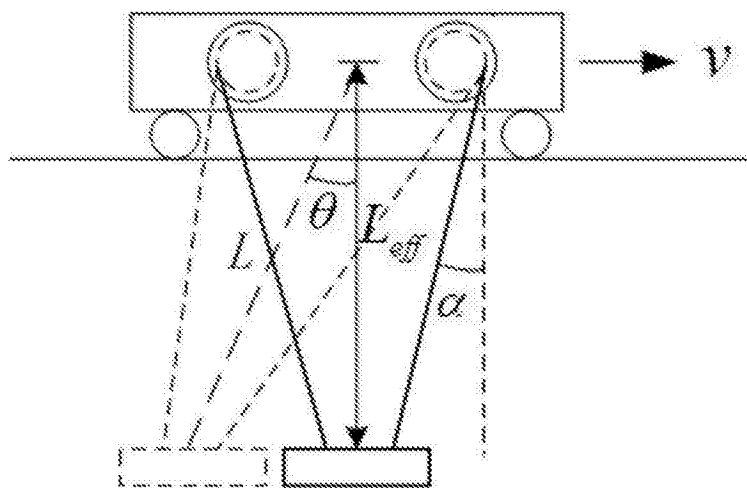


图2

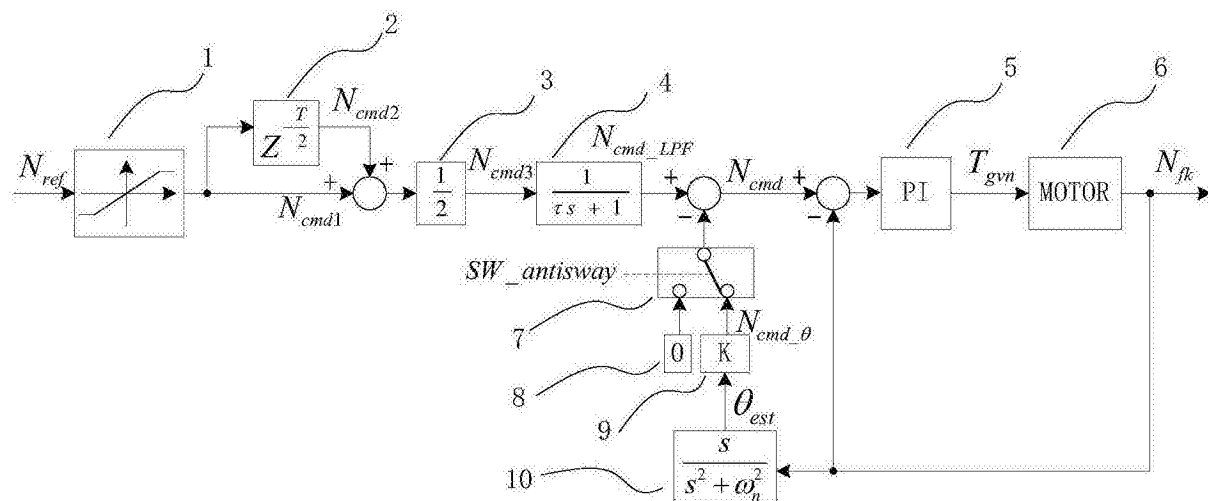


图3

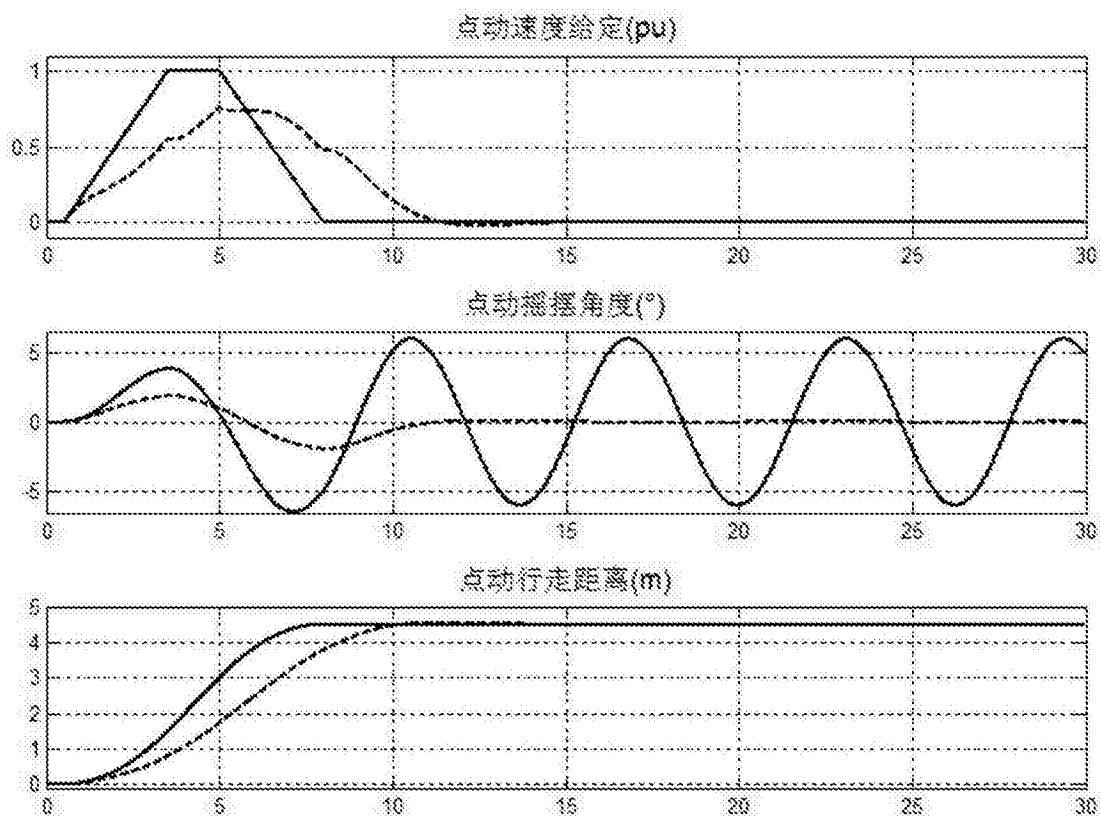


图4

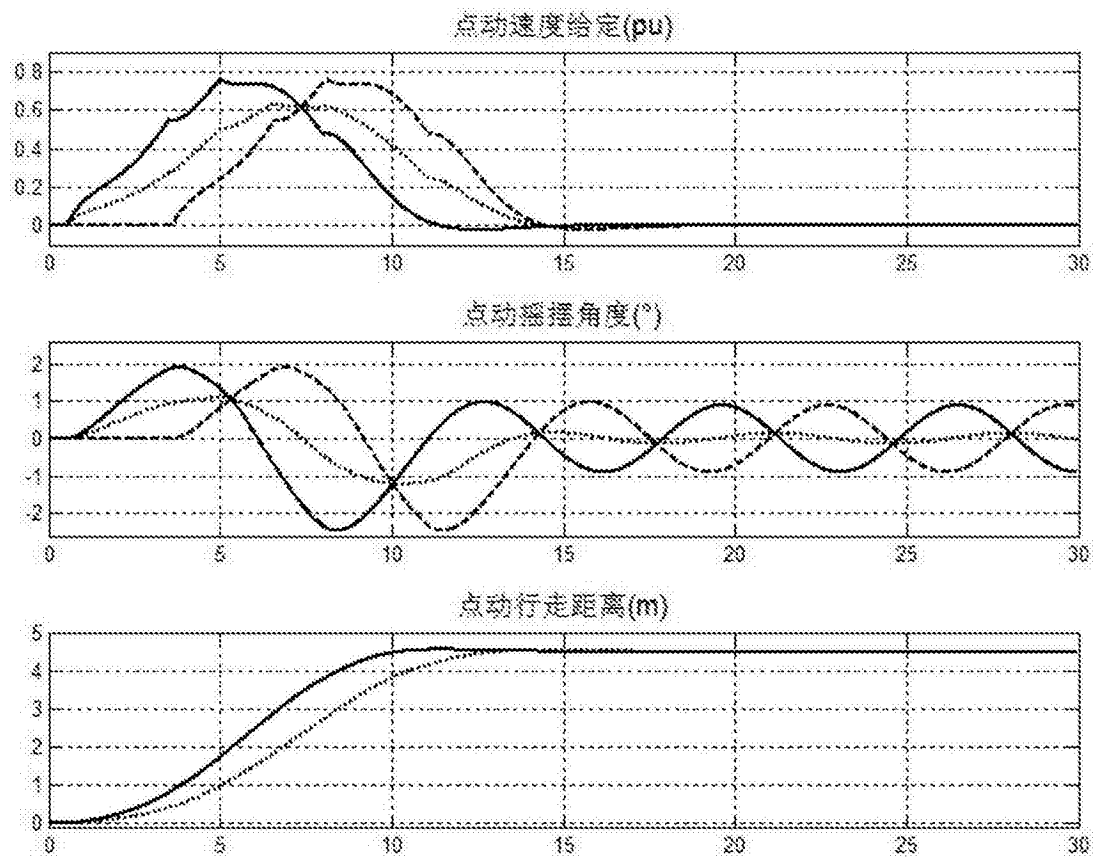


图5

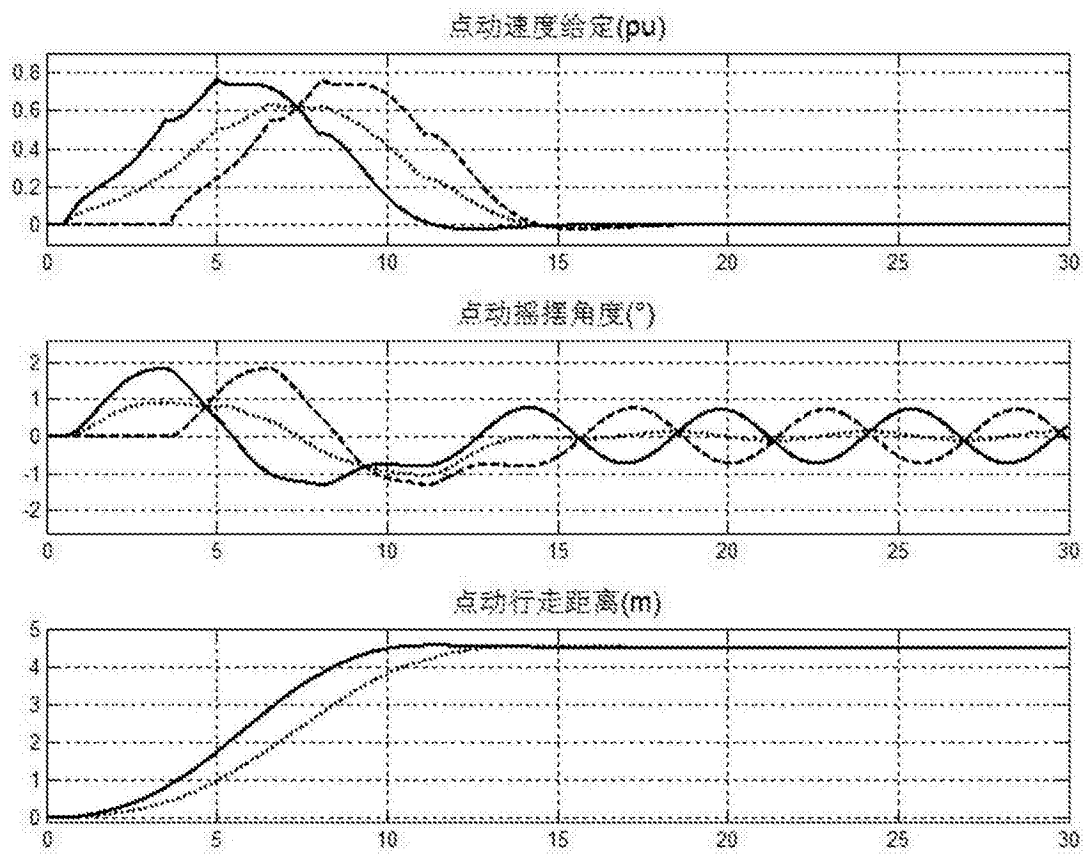


图6

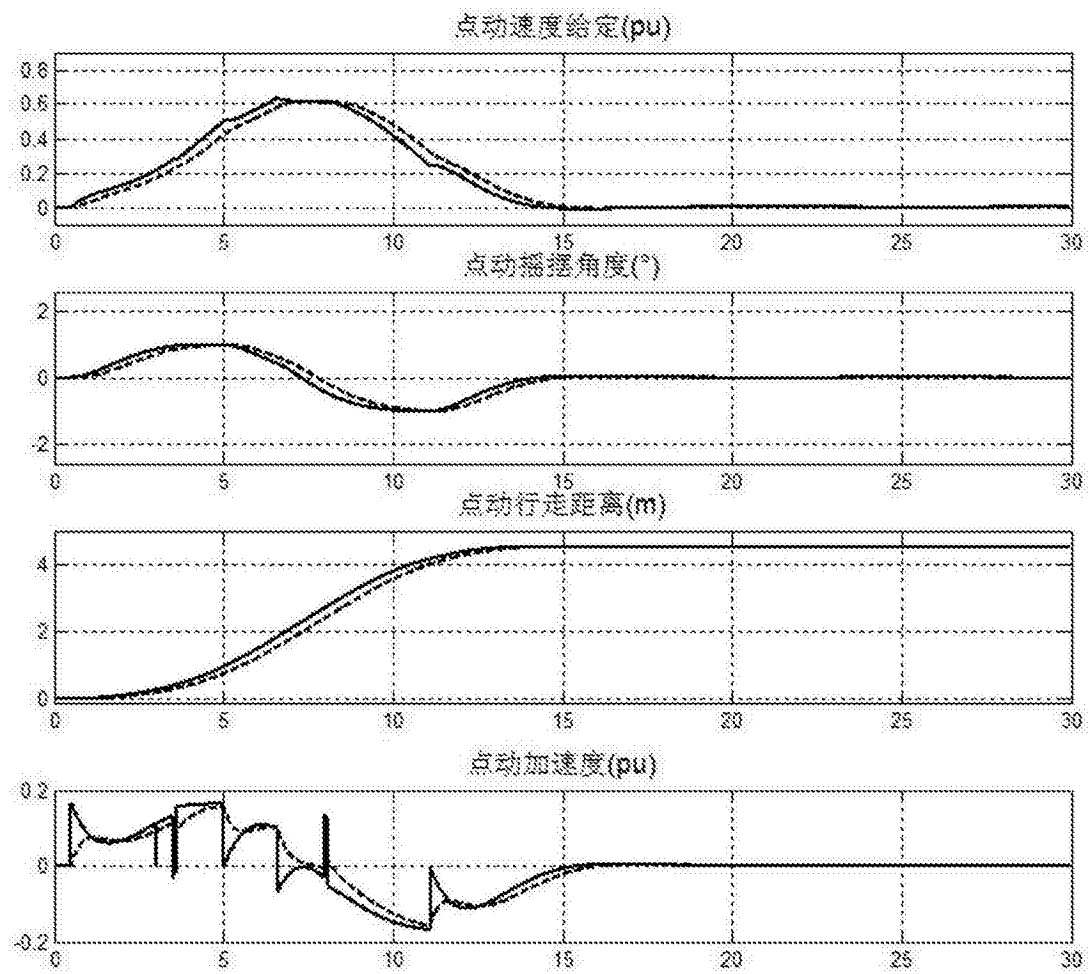


图7

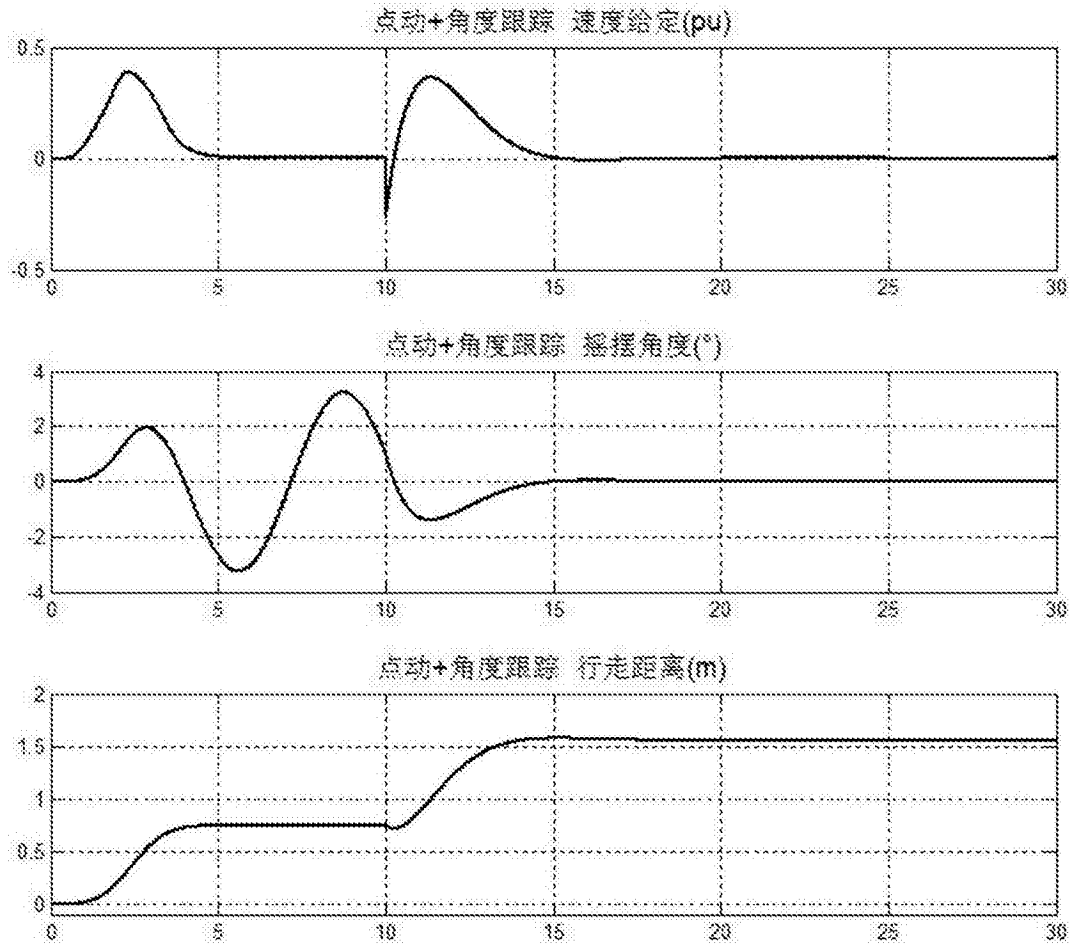


图8

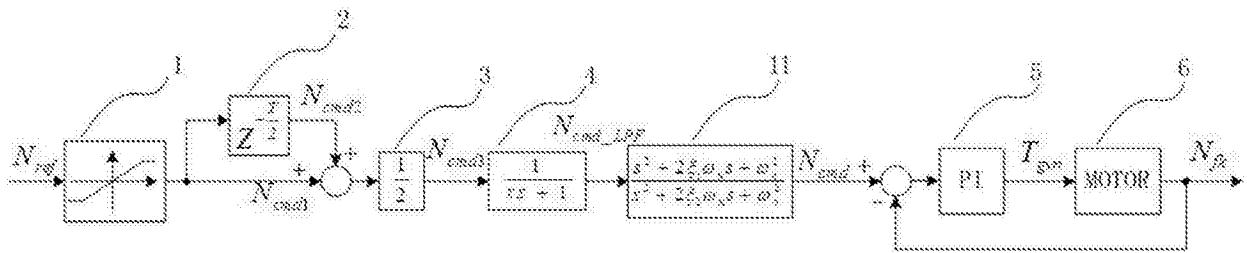


图9