

7-30-2020

Optimized Composite Input Shaping Based on Residual Oscillation Suppressing

Huasen Liu

Research Institute of Mechanical Engineering; Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Wenming Cheng

Research Institute of Mechanical Engineering; Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimized Composite Input Shaping Based on Residual Oscillation Suppressing

Abstract

Abstract: The optimized input shaping control method was proposed to reduce the under actuated overhead crane's oscillation caused via the inertia force. *The dynamic model of the overhead crane was proposed according to the physics structure of the crane. The probability distribution function of the crane's swing frequency was obtained. The optimized multi-model composite based on the probability distribution function of the crane's swing frequency was used as the feed-forward input to increase the frequency of robustness.* Simulation results indicate that the optimized multi-model composite input shaping can reduce the oscillation the overhead crane.

Keywords

under actuated, swing frequency, composite input shaping, residual oscillation

Recommended Citation

Liu Huasen, Cheng Wenming. Optimized Composite Input Shaping Based on Residual Oscillation Suppressing[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3044-3049.

抑制桥式起重机变频率摆动的优化复合输入整形器

刘华森, 程文明

(西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对桥式起重机欠驱动吊车在惯性力等作用下会产生残余摆动的问题, 提出基于起重机变频率摆动抑制的优化复合输入整形器主动控制方法。建立桥式起重机摆动的动力学模型, 并研究桥式起重机摆动频率的概率分布; 为增强桥式吊车残余摆动的抑制效果以及控制的鲁棒性, 根据桥式起重机的摆动概率分布有针对性地设计优化的多模态复合输入整形器作为前馈控制输入。将前馈控制与桥式吊车自身的摆动频率特性相结合, 从而提高桥式吊车控制系统的频率鲁棒性。经过优化的复合多模态复合输入整形器的控制, 桥式起重机的摆动幅度下降。

关键词: 欠驱动系统; 摆动概率分布; 复合输入整形; 摆动抑制

中图分类号: TH213.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 12-3044-06

Optimized Composite Input Shaping Based on Residual Oscillation Suppressing

Liu Huasen, Cheng Wenming

(Research Institute of Mechanical Engineering; Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The optimized input shaping control method was proposed to reduce the under actuated overhead crane's oscillation caused via the inertia force. The dynamic model of the overhead crane was proposed according to the physics structure of the crane. The probability distribution function of the crane's swing frequency was obtained. The optimized multi-model composite based on the probability distribution function of the crane's swing frequency was used as the feed-forward input to increase the frequency of robustness. Simulation results indicate that the optimized multi-model composite input shaping can reduce the oscillation the overhead crane.

Keywords: under actuated; swing frequency; composite input shaping; residual oscillation

引言

桥式起重机在工业生产中广泛地用于搬运及调度各种重型货物。桥式起重机的吊车是通过柔性钢丝绳与起重小车连接。这属于典型的欠驱动摆动系统。钢丝绳柔性系统具有使起升机构物理机构简单、占用空间较小等优点。但欠驱动柔性系统也削

弱了起重机吊具起升系统的刚度与稳定性。当起重小车加速起动或者减速制动的过程中, 由于惯性力的作用会使起重机吊车产生残余摆动。这种未控制的吊车摆动, 不但会为生产作业埋下安全隐患, 还严重制约起重小车的运行速度进而降低整个生产的效率。

为了抑制和减弱起重机欠驱动吊具产生的残余摆动, 国内外学者采用反馈控制^[1]、模糊控制^[2]以及前馈控制^[3]等技术对桥式起重机的摆动控制进行了广泛的研究。建立桥式起重机吊具的动力学模型, 是研究抑制吊具残余摆动的重要基础。



收稿日期: 2015-04-02 修回日期: 2015-07-02;
基金项目: 四川省应用基础研究计划项目 (2013JY0136);
作者简介: 刘华森(1988-), 男, 四川遂宁, 博士生, 研究方向为起重机自动控制; 程文明(1963-), 男, 浙江金华, 教授, 博导, 研究方向为数字物流装备与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 3044 •

桥式起重机常用倒立摆^[4]、复摆^[5]、两模态摆动的复摆^[6]以及多自由度欠驱动^[7-9]等动力学模型来研究吊具的参与摆动。输入整形器^[10-11]作为一种主动前馈控制技术也逐步应用于起重机的消摆控制中。通过预整形技术对理想的系统的开环和闭环控制进行研究,产生整形控制命令减弱或消除系统的残余摆动。董明晓等^[12]基于起重机运动参数分布规律,以基于载荷摆动幅值最小及优化时滞的思想设计最优输入整形器。复合型的多模态输入整形器^[13]也被用于桥式吊车的控制中。除此之外,将输入整形器与传统的控制方法相结合也取得较多的研究进展。线性二次型调节器(LQR)^[14-15]被用于小车的定位以及消除负载的残留振荡。PD 结合输入整形控制策略^[16]也用于定量分析输入整形对系统响应、控制力和能耗的作用规律。

为进一步提高桥式吊车摆动抑制的鲁棒性、改善控制系统的性能,本文提出优化的复合输入整形器来抑制桥式吊车的变频率摆动。首先建立桥式吊车的动力学模型,并分析桥式吊车的摆动频率影响因素以及桥式吊车摆动频率的概率分布情况,设计复合输入整形器来抑制桥式吊车的摆动,从而提高桥式吊车控制系统的鲁棒性。

1 桥式吊车动力学摆动模型

桥式吊车系统的物理模型如图 1 所示。在惯性参考系下的水平光滑主梁上,起重小车可以沿水平方向上自由移动。吊车通过一根柔性钢丝绳与起重小车连接,吊车在惯性力等作用下可以绕固定点 O 不记摩擦的摆动。起升钢丝绳的长度随着吊车的起升高度变化而变化。起重小车的质量为 m_1 ,小车的水平运动速度为 v 。起升钢丝绳的长度为 l 。吊车的质量为 m_2 。吊车绕 O 点摆动,摆动的角度记为 θ 。在建立动力学模型时做如下假设:(1)钢丝绳无质量,钢丝绳张紧状态对吊具产生作用力;(2)将桥式吊车视为质点,不考虑其体积与转动惯量;(3)桥式吊车在运动中受到的空气阻力与摆动的速度成正比。

由图 1 可知,起重机运行小车的运动位移坐标为 $(x,0)$,运行小车的速度记为 $v = \dot{x}$,集装箱吊具的摆动 θ 较小时,可以线性化得到吊具摆动的动力学方程:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\dot{v} + m_2 l \ddot{\theta} - m_2 l \dot{\theta} = F_x \\ m_2 l^2 \ddot{\theta} + m_2 l \dot{v} + m_2 l g \theta = F_\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_x 为运行小车在 x 运行方向上的阻力; F_θ 为集装箱吊具在摆动过程中受到垂直于钢丝绳方向的阻力; $\dot{\theta}$ 为吊具摆动的角速度, $\ddot{\theta}$ 为吊车摆动的角加速度。 \dot{v} 为起重小车运行的加速度。

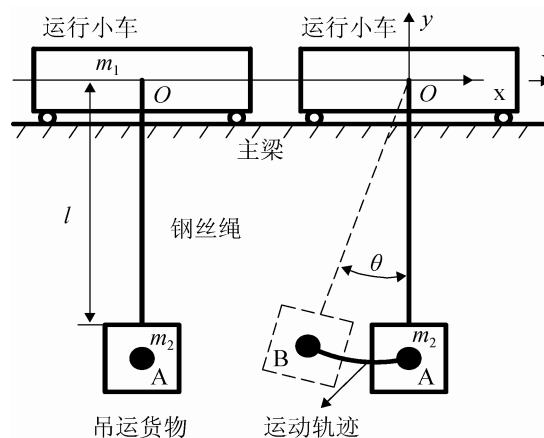


图 1 桥式吊车残余摆动模型

2 桥式吊车摆动频率影响因素

钢丝绳的升降运动与起重小车的水平运动是分别独立控制。吊车在摆动过程中受到的垂直钢丝绳方向的阻力 F_θ 与吊具摆动的角速度成比例,令 $F_x = C, F_\theta = -\zeta\theta$, ζ 为阻尼系数, C 是起重小车在水平方向的阻力,由方程(1)线性化求解可得桥式吊车系统吊具摆动的二阶微分方程:

$$\ddot{\theta} + \frac{\zeta(m_1 + m_2)}{m_1 m_2 l} \dot{\theta} + \frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 l} \theta = -\frac{C}{m_1 l} \quad (2)$$

输入整形器对系统的摆动频率参数十分敏感,准确找出系统摆动频率的分布区间并加以针对性的控制,能够有效地提高输入整形器控制的鲁棒性。由方程(2)可以得到桥式吊车摆动频率 ω 的函数:

$$\omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 l} - \left(\frac{\zeta(m_1 + m_2)}{2m_1 m_2 l^2}\right)^2} \quad (3)$$

输入整形器对系统的摆动频率参数十分敏感。摆动的频率 ω 的主要参数有起重运行小车质量 m_1 、吊具和货物质量 m_2 以及柔性钢丝绳长度 l 等。根据桥式吊车系统参数的变化范围,可以得到桥式吊车系统摆动频率的概率分布函数 $f(\omega)$ 。根据吊车系统的摆动频率特点,为输入整形器前馈控制的设计参数提供重要的依据。

3 复合输入整形器优化设计

3.1 输入整形器

输入整形器是指由一系列脉冲序列与输入的控制信号进行卷积,所形成的新指令作为控制系统的运动输入。对于在系统特定摆动频率为 ω_0 下典型的二脉冲 ZV 输入整形器输入参数为:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & 0.5T_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: t_i 为整形器输入的时间; A_i 为在时间 t_i 时输入整形器输入的幅值; T_d 为吊具在摆动周期; K 为输入整形器输入的幅值参数,且

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}}, \quad K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}.$$

ZV 输入整形器与系统的阻尼比以及系统的摆动频率有关,对已知频率为 ω_0 有阻尼二阶系统的残余摆动能够实现零抑制。但 ZV 输入整形器对二阶系统频率的鲁棒性很差,当系统的摆动频率受到干扰而发生改变时,ZV 输入整形器对系统的残余摆动抑制效果大大减弱。为提高 ZV 输入整形器对系统摆动频率的敏感度,增加整形器的约束条件,即通过 ZV 整形器对摆动频率的偏导数为零,可以得到在系统特定频率 ω_0 情况下典型的三脉冲 ZVD 输入整形器。其输入参数为:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ (1+K)^2 & (1+K)^2 & (1+K)^2 \\ 0 & 0.5T_d & T_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

传统的 ZV 整形器与 ZVD 整形器具有对系统特定频率的输出响应零抑制的优点,但是这两种整形器对系统频率的鲁棒性较差,尤其是 ZV 整形器。

3.2 复合输入整形器

桥式吊车由于起升负载质量的不同以及起升钢丝绳长度的变化,会引起桥式吊车负载摆动的频率发生改变。为了提高输入整形器对系统频率的抗摄动能力,将单模态输入整形器进行卷积得到复合的多模态输入整形器,从而提高系统的控制性能。选取 n 个单模态输入整形器进行卷积复合,得到的复合多模态整形器,如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} A_n \\ t_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\omega_1} \\ t_{\omega_1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_{\omega_2} \\ t_{\omega_2} \end{bmatrix} \dots * \begin{bmatrix} A_{\omega_n} \\ t_{\omega_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: t_{ω_i} , A_{ω_i} ($i=1 \dots n$) 为针对特定频率 ω_i 的单模态整形器的输入时间和输入幅值参数; * 为卷积符号,在输入整形器中为离散卷积; t_n , A_n 是复合后得到多模态输入整形器的输入时间和输入幅值参数。

3.3 优化整形器设计

输入整形器不需要知道精确的系统模型,只需要系统的阻尼比和系统的摆动频率。当 n 个脉冲组成的脉冲输入 $f(t)$ 作用于二阶阻尼振动系统,则系统的单位脉冲输出响应振幅 $V(A, t)$ 为:

$$V(A, t) = e^{-\zeta\omega_n t} \sqrt{[C(\omega_n, \zeta)]^2 + [S(\omega_n, \zeta)]^2} \quad (7)$$

式(7)中, ω_n 为桥式吊车有阻力摆动频率, t_n 为第 n 次摆动输入的时间。其中 ω_n , $C(\omega_n, \zeta)$ 以及 $S(\omega_n, \zeta)$ 的计算如下:

$$\omega_n = \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}$$

$$C(\omega_n, \zeta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \cos(\omega_0 t_i)$$

$$S(\omega_n, \zeta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta \omega_n t_i} \sin(\omega_0 t_i)$$

吊车的质量和起升高度的变化使得载荷摆动频率也在变化。为找到合适的单模态整形器来设计成优化的复合多模态整形器, 以桥式吊车吊具在整个摆动频率范围内的残余摆动值和达到最小为目标函数, 即:

$$Y = \int_0^{\omega} V(A, t) f(\omega) d\omega \quad (8)$$

具体优化计算过程:

Step 1: 根据桥式吊车的结构参数, 计算吊车吊具摆动频率的分布函数式(3), 找出桥式吊车吊具摆动频率的影响因素以及摆动规律。

Step 2: 根据初步选定的吊具摆动频率 ω_i , 分别计算 ZV 整形器的输入整形参数 (A_1, A_2, t_2) 以及 ZVD 整形器的输入整形参数 (A_1, A_2, A_3, t_2, t_3)。

Step 3: 根据整形器复合计算的原则, 分别离散卷积生成复合整形器 ZV_ZV, ZV_ZVD 以及 ZVD_ZVD 三种复合输入整形器。

Step 4: 以式(8)为优化目标函数、吊具摆动的频率分布函数(3)~(7)为约束条件, 对生成的复合整形器在整个吊具摆动频率范围内的残余摆动进行计算, 求解优化的单模态输入整形器的卷积组合, 从而找出最优的复合输入控制频率。

4 仿真算例

以箱型双梁集装箱门式起重机为例, 参数取值: 运行小车的质量 $m_1=10.8 \times 10^3$ kg, 吊具与货物的质量变化范围 $m_2=5 \times 10^3 \sim 32 \times 10^3$ kg, 重力加速度 $g=9.8$ m/s², 钢丝绳长度变化范围 $l=2 \sim 18$ m。

4.1 吊车摆动频率的概率分布

吊具的质量 m_2 、钢丝绳的长度 l 等参数对吊车残余摆动的频率产生影响, 找出吊车摆动周期的概率分布函数 $f(\omega)$ 。吊具和负载质量与钢丝绳的长度对吊车摆动频率的影响如图 2 所示。吊车的摆动频率随着吊具质量 m_2 的增大而增大。同时, 减少钢丝绳的长度也能增加吊车的摆动频率。吊车的最大

摆动频率发生在钢丝绳长度为 2 m 并且吊具的质量为 32 t 时, 最大频率为 4.41 rad/s。钢丝绳长度这一变量对吊车的摆动频率有更高的敏感度。在吊具质量一定的情况下, 钢丝绳长度由 2 m 增加至 18 m, 吊车的摆动频率增加约 200%。而吊具质量参数改变引起的吊车摆动频率增加约 75%。相对而言钢丝绳长度对吊具的摆动频率有更高的敏感度, 故在抑制吊车摆动的控制中, 应较多的考虑如何抑制主要由钢丝绳长度变化而引起的频率改变。

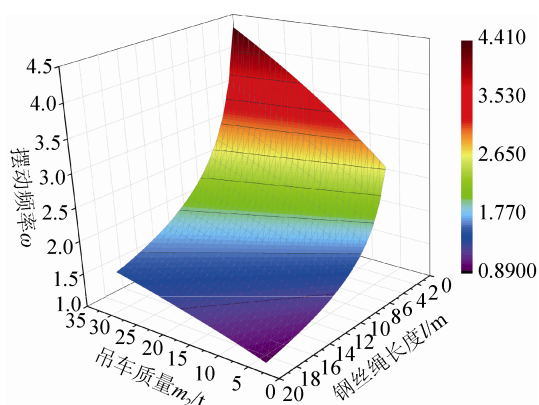


图 2 钢丝绳长度以及吊车质量对系统摆动频率影响

桥式吊车的吊具质量 m_2 对吊具的摆动频率影响较为明显。吊具的摆动频率主要分布在 1~2 rad/s 区间, 最大概率的频率为 1.14 rad/s。这是输入整形器主要抑制的频率区间。随着吊具与负载质量 m_2 的增加, 吊具最大概率的摆动频率也随之逐步增大, 并且概率分布趋于更分散的区域。这也使得输入整形器对吊具与负载摆动频率的鲁棒性变差。因此, 对于负载质量变化较大的吊车系统, 需要设计鲁棒性更强的输入整形器来抑制吊具与负载的残余摆动。

4.2 优化控制方案设计

根据吊车摆动频率概率分布以及输入整形器的约束条件, 以式(8)为优化目标函数, 求解优化的单模态输入整形器。然后将两个对应频率的单模态输入整形器进行卷积复合, 得到 ZV_ZV, ZV_ZVD, ZVD_ZVD 三种多模态复合整形器。3 种复合多模态整形器输入参数如表 1 所示。

表 1 3 种命令整形控制器前馈输入

ZV_ZV		ZV_ZVD		ZVD_ZVD	
模态 1	模态 2	模态 1	模态 2	模态 1	模态 2
1.66	1.66	1.13	0.84	1.21	0.84
rad/s	rad/s	rad/s	rad/s	rad/s	rad/s
时间 t	幅值 A	时间 t	幅值 A	时间 t	幅值 A
0	0.266	0	0.137	0	0.071
1.897	0.250	1.607	0.258	0.951	0.133
1.897	0.250	2.772	0.129	1.902	0.063
3.794	0.235	3.214	0.121	2.145	0.133
		4.379	0.242	3.095	0.250
		5.986	0.116	4.046	0.117
				4.289	0.062
				5.240	0.117
				6.191	0.055

ZV_ZVD 整形器是由频率为 1.13 rad/s 的 ZV 整形器和频率为 0.84 rad/s 的 ZVD 整形器复合生成。ZV_ZV 整形器的输入时间最短，ZVD_ZVD 整形器的输入时间最长，约为 ZV_ZV 整形器输入时间的两倍。三种复合脉冲输入的脉冲幅值和都为单位 1。ZV_ZV 整形器对系统摆动抑制时间较短，因而对系统的输入影响较弱，从而导致吊具的摆动时间比 ZVD_ZVD 整形器更长。

4.3 鲁棒性分析

ZV_ZV 复合输入整形器在优化前后的控制输出响应基本相似。而 ZV_ZVD 复合输入整形器在优化前后的输出响应效果最为明显。当系统摆动到的频率 < 1 rad/s 时，优化前的 3 种控制方案抑制效果相差不大。而优化后 ZV_ZV 复合整形器和 ZV_ZVD 复合整形器对吊车残余摆动的抑制能力得到增强。当桥式吊车摆动的频率 > 2 rad/s 时，ZVD_ZVD 复合整形器对吊车的残余摆动抑制效果最优。

图 3 是 3 种复合整形器控制在桥式吊车最大概率摆动频率下抑制残余摆动的效果图。当桥式吊车是最大概率的摆动频率时，ZV_ZV 复合整形器输入的时间较短，但系统的超调量很大，调整时间也超过 50 s。ZVD_ZVD 复合整形器虽然前期的输入

时间最长，但由于 ZVD_ZVD 复合整形器对吊车的残余摆动抑制效果明显，故 ZVD_ZVD 复合整形器总体的响应时间比 ZV_ZV 复合整形器和 ZV_ZVD 复合整形器都短。图 4 是中点摆动频率下抑制残余摆动的效果图。ZV_ZV 复合整形器的最大摆动幅度明显大于 ZV_ZVD 复合整形器和 ZVD_ZVD 复合整形器。ZVD_ZVD 复合整形器对残余摆动的抑制效果略好于 ZV_ZVD 复合整形器。对比图 3 和图 4，可知优化后的输入整形器在桥式吊车最大概率摆动频率的抑制效果比优化前的控制性能得到提升。

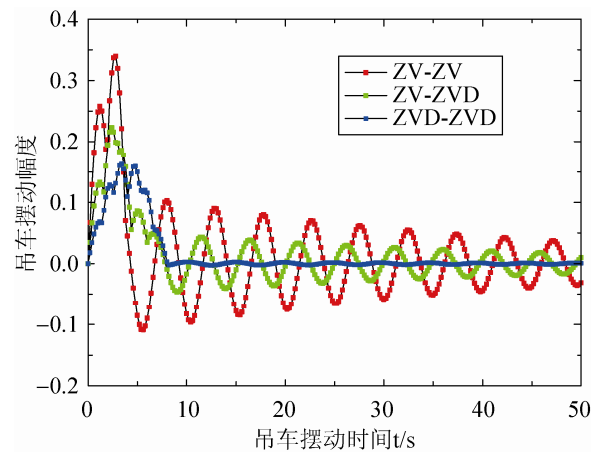


图 3 最大概率频率处吊具的残余摆动

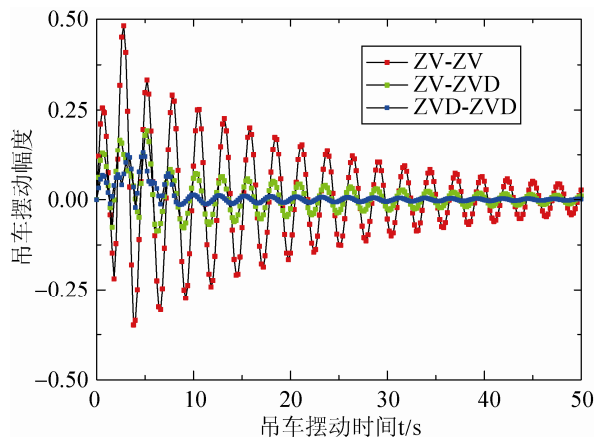


图 4 中点频率处吊具的残余摆动

优化的多模态整形器的优点在于使得吊具系统在最大摆动概率附近有较好的抑制能力，克服单模态整形器对系统频率鲁棒性差的缺点，能更好地适应桥式吊车频率扰动变化带来的影响。优化的

ZVD_ZVD 整形器在桥式吊车变摆动频率残余摆动抑制方面的综合性能比另外两种控制方法好。

5 结论

根据桥式起重机吊车的物理结构特点, 通过建立欠驱动吊车的椭圆摆动力学模型, 得到桥式吊车摆动频率的影响因素以及概率分布, 并基于此来设计优化的复合多模态输入整形器。通过仿真分析, 得到了以下结论:

(1) 起重小车质量 m_1 、吊车质量 m_2 以及柔性钢丝绳长度 l 等参数变化会直接影响到桥式吊车的摆动频率, 钢丝绳长度 l 对吊车系统频率的敏感度相对最大。

(2) 复合多模态输入整形器对系统特定的摆动频率具有更好的控制鲁棒性。合理的选择单模态整形器进行卷积生成复合多模态整形器, 能够提高系统的控制性能并较少系统的响应时间。

(3) 优化的 ZVD_ZVD 整形器在桥式吊车变摆动频率的残余摆动抑制方面的综合性能比另外两种控制方法更好。将系统的摆动频率的概率分布与输入整形器相结合, 能更有效的设计具有系统针对性的前馈控制输入。这在一定程度上弥补了传统输入整形器没有系统反馈信息的缺点, 从而提高对桥式吊车残余摆动的控制性能。

参考文献:

- [1] 付主木, 高爱云, 费树岷, 等. 集装箱桥吊多模型参考切换双闭环防摇控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 161-166.
- [2] Mun-Soo Park, Dongyoung Chwa, Suk-Kyo Hong. Antisway Tracking Control of Overhead Cranes with System Uncertainty and Actuator Nonlinearity Using an Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2008, 55(11): 3972-3984.
- [3] Singer NC, Seering WP. Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of The ASME (S0022-0434), 1990, 112(1): 76-82.
- [4] 吴楠. 单级倒立摆系统角运动控制方案建模及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9): 1333-1336.
- [5] Vaughan Joshua, Kim Dooroo, Singhose William. Control of Tower Cranes with Double-Pendulum Payload Dynamics[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2010, 18(6): 1345-1358.
- [6] Masoud Ziyad N, Alhazza Khaled A. Frequency-Modulation Input Shaping Control of Double-Pendulum Overhead Cranes [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME (S0022-0434), 2014, 136(2): 1-11.
- [7] 钟斌, 程文明, 吴晓, 等. 桥门式起重机吊重防摇状态反馈控制系统设计 [J]. 电机与控制学报, 2007, 11(5): 492-496.
- [8] Le Tuan Anh, Kim Gook-Hwan, Kim Min Young. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing (S2234-7593), 2012, 13(4): 501-507.
- [9] 刘华森, 程文明, 易嘉伟. 欠驱动的倒三角铁路集装箱门式起重机吊具动力学建模与分析 [J]. 中国铁道科学, 2015, 36(02): 103-110.
- [10] Singhose W, Seering W, Singer N. Residual Vibration Reduction Using Vector Diagrams to Generate Shaped Inputs [J]. Journal of Mechanical Design (S1050-0472), 1994, 116(2): 654-659.
- [11] Quang Hieu Ngo, Hong Keum-Shik. Skew control of a quay container crane [J]. Journal of Mechanical Science and Technology (S1738-494X), 2009, 23(12): 3332-3339.
- [12] 董明晓, 脱建智, 任意翔, 等. 最优输入整形抑制变参数桥式起重机载荷摆动 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 207-209.
- [13] 李兵, 谢里阳, 魏玉兰, 等. 基于时间优化的多模态输入整形法抑制柔性系统的振动 [J]. 东北大学学报自然科学版, 2010, 31(9): 1337-1340.
- [14] 赵志刚, 游斌弟, 赵阳. 改进型负输入整形与最优控制结合的振动抑制方法 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 202-208.
- [15] 王晓军, 邵惠鹤. 基于输入整形的线性二次型调节器及其应用 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(5): 848-851.
- [16] 董明晓, 宋传增, 梅雪松. PD 结合输入整形抑制单模态弹性机构振动仿真研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 135-140.