

# 脉冲输入下基于输入整形法的起重机防摇摆方法

杜 芃, 牛王强, 陈 超

(上海海事大学 航运技术与控制工程交通部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 起重机在工业生产中有着广泛的应用, 在其装卸货物的过程中, 吊重产生的摇摆, 会影响码头的安全性及运输效率; 所以提出了一种适合工业环境, 成本最优, 摆角回零时间最优的起重机防摇摆的方法; 首先, 建立了吊重的动力学模型, 经过分析加速度输入和摆角输出后, 提出了脉冲加速度输入下一族基于输入整形法的起重机防摇摆方法; 在不同时刻, 让不同幅值的脉冲响应进行叠加, 当输入为二脉冲, 三脉冲, 四脉冲, …… $n$ 脉冲时, 摆角输出能在  $1/2, 2/3, 3/4, \dots, (n-1)/n$  个系统震荡周期内回到零; 最后, 以 Matlab 为仿真平台, 对该方法进行仿真, 仿真结果表明, 此控制方法具有良好防摇摆的效果。

**关键词:** 起重机; 防摇摆控制系统; 输入整形法

## Crane Anti Swing Method Based on Input Shaping with Pulse Input

Du Peng, Niu Wangqiang, Chen Chao

(Ministerial Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering,  
Shanghai Maritime Univ., Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Cranes have a wide range of applications in industry. In order to eliminate the swing caused by the operation and improve the loading efficiency, it is necessary to propose a crane anti-swing control method suitable for the industrial environment. At first, we built a dynamic model of crane load swing. Secondly, we proposed a series of crane anti-swing method based on input shaping with pulse input. We superposed different amplitude impulse responses at different moments. The swing angle returned to zero in  $1/2, 2/3, 3/4, \dots, (n-1)/n$  period of system oscillation, when the input was two, three, four, … $n$  impulses. Thus, we can control the angle of the crane load based on POSICAST control theory. Finally, we used Matlab as the simulation platform and set up the model of anti-swing control of overhead cranes. Numerical and experimental results indicated that the proposed shaper can effectively reduce residual vibrations of cranes.

**Keywords:** crane; anti-swing control system; input shaping method

## 0 引言

随着自动化港口的不断建设和船运业的飞速发展, 对于起重机的装卸效率的要求也越来越高。在起重机运送货物的过程中, 起重机的加减速, 风的阻力和负载自身升降都会让吊重产生摇摆<sup>[1]</sup>, 使货物无法及时到达指定位置, 这直接影响了起重机的装卸效率。目前, 大部分的吊车由人工操作, 负载的摇摆和起重机的运行也由司机手动控制, 运输的工作效率依赖司机的操作水平, 也与码头自动化的趋势相反。所以为了输送效率的提高及码头作业安全, 起重机自动防摇摆控制是十分必要的<sup>[2]</sup>。解决吊重的防摇摆问题对物流运输行业<sup>[3]</sup>的发展具有积极意义<sup>[4]</sup>。

国内外相关行业和学者已经对防摇摆控制做了大量的研究, 提出了许多方法。按照控制系统的不同进行分类<sup>[5]</sup>, 可将防摇摆控制方法分为两类: 机械式防摇摆控制法和电子式

防摇摆控制法。其中, 电子式防摇摆控制法又分为开环防摇摆控制和闭环防摇摆控制。其区别在于开环<sup>[6]</sup>控制指控制系统中没用使用反馈环节来控制摆角; 闭环控制<sup>[7]</sup>指控制系统中含有传感器来测量起重机的摆角, 通过反馈环节控制吊重摇摆的方法<sup>[8]</sup>。

闭环控制方法中需要利用传感器采集所需要的信息, 例如摆角, 加速度等。将数据传送至处理器的控制部分, 由电脑进行计算, 得出最佳参数后, 实时改变速度。然而此方法中的控制系统设计复杂, 参数也会受到工业环境的影响, 在实时改变速度时会加速小车零件的老化。并且该方法需要的测量传感器成本高昂, 在实际应用中不易实现, 因此限制了该方法在实际生产中的应用。

对于开环控制方法, 以加速度输入的种类不同可以分为阶跃输入法和脉冲输入法。对于阶跃输入法, 上海振华集团<sup>[9]</sup>提出了两段加速的控制方法, 假设小车系统为无阻尼的二阶系统, 输入二段阶跃, 在  $3T/4$  时刻系统摆角回到 0, 其中  $T$  为系统的振荡周期。在此基础上, 郁春丽<sup>[10]</sup>研究了阶跃输入下, 小车系统为有阻尼的二阶系统, 并且提出了该系统二段加速, 三段加速, …… $n$ 段加速控制方法, 其中时间最优解在二段加速下达到, 摆角在  $3T/4$  时刻回到 0。对于脉冲输入法, 河南卫华集团<sup>[11]</sup>的研究是: 对于起重机系统, 采用黑箱法, 不分析其具体的物理特征, 以小车

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-03-28。

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目[2016]26号。

作者简介: 杜芃(1994-), 女, 上海市人, 硕士研究生, 主要从事起重机电子防摇摆方向的研究。

牛王强(1977-), 男, 陕西省大荔县人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事混合动力船舶电力推进技术无线电能传输技术方向的研究。

的加速度作为输入，摆角作为输出，研究了当输入是二个，三个脉冲时，摆角在  $T/2, 2T/3$  时刻回到 0。

本文将河南卫华集团的二脉冲法、三脉冲法推广为  $n$  脉冲法，研究了不同脉冲下的二阶带阻尼系统的防摇控制性能，以便为用户提供更多的防摇方法选择。

### 1 起重机动态模型分析

考虑到起重机运行中的实际情况，将起重设备中的水平运行的小车，连接负载的绳索和吊重看成一个移动的单摆系统，如图 1 所示。

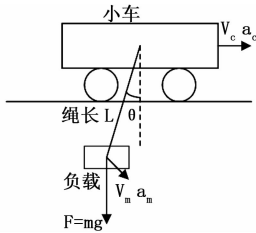


图 1 起重机吊重系统的动力学原理

对以上模型作如下假设：

假设 1：小车和负载看作是有一定质量的质点，且起重机静止不产生相对运动。

假设 2：绳索的质量忽略不计，且长度不可拉伸。

假设 3：不考虑风力和空气阻力对负载的影响。

根据牛顿运动定律可得：

$$mg \sin \theta + dL\dot{\theta} = ma_m \quad (1)$$

$$a_m + L\ddot{\theta} = a_c \quad (2)$$

其中： $d = 2m\xi\omega_n, \omega_n = \sqrt{\frac{g}{L}}$ ， $\omega_n$  为系统震荡频率， $\xi$  为阻尼比。

在实际情况下，负载摇摆的角度一般不会超过  $\pm 10^\circ$  以内<sup>[10]</sup>，因此可简化为  $\sin \theta \approx \theta$ 。将式 (2) 带入式 (1)，整理可得：

$$mg\theta + dL\dot{\theta} + mL\ddot{\theta} = ma_c \quad (3)$$

$$\frac{g}{L}\theta + \frac{d}{m}\dot{\theta} + \ddot{\theta} = \frac{1}{L}a_c \quad (4)$$

$$\omega_n^2\theta + 2\xi\omega_n\dot{\theta} + \ddot{\theta} = \frac{1}{L}a_c \quad (5)$$

将式 (5) 进行拉普拉斯变换得：

$$\frac{\theta(s)}{a(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

其中： $k = \frac{1}{L}$ ， $k$  为摆角最后稳定时的幅值。

该系统的脉冲响应是：

$$\theta(t) = k * \left[ \frac{\omega_n * \sin \omega_d t}{e^{\xi\omega_n t} * \sqrt{\xi^2 - 1}} \right] \quad (7)$$

### 2 POSICAST 输入整形开环控制方法

O. J. M. Smith 教授在 50 年代提出了 POSICAST 控制方法，理论的核心是相隔半周期的正弦函数可以相互抵消。输入整形法<sup>[12]</sup>是一种开环控制方法，其技术是将整形器中

的脉冲与初始输入进行卷积计算，将初始输入整形形成防摇需要的脉冲，然后控制整个系统。输入整形器<sup>[13]</sup>实际包含不同个数，不同幅值和时滞的序列。这些参数通过动力学模型得到的脉冲响应组成的超越方程求解获得，通过不同的时间点，给不同幅值的脉冲响应，叠加后的摆角为零。即解下列方程使  $\theta(t)$  为零：

$$\begin{aligned} \theta(t) = & A_0 * \left[ \frac{\omega_n * \sin \omega_d t}{e^{\xi\omega_n t} * \sqrt{\xi^2 - 1}} \right] + A_1 * \left[ \frac{\omega_n * \sin \omega_d (t - t_1)}{e^{\xi\omega_n (t - t_1)} * \sqrt{\xi^2 - 1}} \right] + \\ & A_2 * \left[ \frac{\omega_n * \sin \omega_d (t - t_2)}{e^{\xi\omega_n (t - t_2)} * \sqrt{\xi^2 - 1}} \right] + A_3 * \left[ \frac{\omega_n * \sin \omega_d (t - t_3)}{e^{\xi\omega_n (t - t_3)} * \sqrt{\xi^2 - 1}} \right] + \dots + \\ & A_n * \left[ \frac{\omega_n * \sin \omega_d (t - t_n)}{e^{\xi\omega_n (t - t_n)} * \sqrt{\xi^2 - 1}} \right] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中： $\omega_n$  为系统固有频率， $\xi$  为系统阻尼比， $n$  为整形器中脉冲的个数， $A_i$  为脉冲响应的幅值， $t_i$  为脉冲响应的延迟时间。

### 3 起重机防摇摆控制方法

本摇摆控制方法的控制原理来自 Smith 教授的半周期 POSICAST 方法，即当第一个脉冲输入系统后，延迟半个周期后再输入一个幅值特定的脉冲，去抵消前一个脉冲带来的摆动，在时刻系统的摆角为零。经过进一步的计算发现，脉冲的个数增加时，恰当的选择脉冲的幅值，也可以得到良好的防摇效果。下面给出这些控制方法的详细阐述和理论推导过程

推导过程中涉及到的一些等式如下：

$$\alpha = \omega_n * \xi \quad (9)$$

$$T = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n * \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (10)$$

#### 3.1 二脉冲法

具体方法：在整形器中包含两个脉冲，加速阶段，在 0 时刻，给正向加速度脉冲，幅值为 1，在  $\frac{T}{2}$  时刻再给正向加速度脉冲，幅值是  $e^{-\alpha^+}$ ，使摆角在  $\frac{T}{2}$  时刻回到 0；减速阶段，在刚进入减速阶段的时刻给加速度脉冲，幅值为 -1，经过  $\frac{T}{2}$  时刻再给加速度脉冲，幅值是  $-e^{-\alpha^+}$ ，使摆角在减速阶段后的  $\frac{T}{2}$  时刻回到 0。

理论解释：

将  $A_0 = 1, t_0 = 0, A_1 = e^{-\alpha^+}, t_1 = \frac{T}{2}$ ，代入式 (8)

中，基于式 (9)、(10) 的简化计算得到摆角值为 0，即在  $T/2$  时刻后摆角为零。在本方法的匀速段，小车的速度  $V = 1 + e^{-\alpha^+}$ 。

#### 3.2 三脉冲法

为了满足不同的工程需要，脉冲的数量应该更多，考虑输入为三个脉冲的情况。具体方法：加速阶段，在 0 时刻，给正向加速度脉冲，幅值为 1，在  $\frac{T}{3}$  时刻给正向加速

度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{T}{3}}}$ , 在  $\frac{2T}{3}$  时刻再给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{2T}{3}}}$ , 使摆角在  $\frac{2T}{3}$  时刻回到 0; 减速阶段, 在刚进入减速阶段的时刻给加速度脉冲, 幅值为  $-1$ , 经过  $\frac{T}{3}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{T}{3}}}$ , 经过  $\frac{2T}{3}$  时刻再给正向加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{2T}{3}}}$ , 使摆角在减速阶段后的时刻回到 0。

理论解释:

$$\text{将 } A_0 = 1, t_0 = 0, A_1 = e^{-\alpha^{\frac{T}{3}}}, t_1 = \frac{T}{3}, A_2 = e^{-\alpha^{\frac{2T}{3}}}, t_2 = \frac{2T}{3},$$

代入式 (8) 中, 基于式 (9)、(10) 的简化计算得到摆角值为 0, 即在  $2T/3$  时刻后摆角为零。在本方法的匀速段, 小车的速度  $V = 1 + e^{-\alpha^{\frac{T}{3}}} + e^{-\alpha^{\frac{2T}{3}}}$ 。

### 3.3 四脉冲法

具体方法: 加速阶段, 在 0 时刻, 给正向加速度脉冲, 幅值为 1, 在  $\frac{T}{4}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{T}{4}}}$ , 在  $\frac{2T}{4}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{2T}{4}}}$ , 在  $\frac{3T}{4}$  时刻再给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{3T}{4}}}$ , 使摆角在  $\frac{3T}{4}$  时刻回到 0; 减速阶段, 在刚进入减速阶段的时刻给加速度脉冲, 幅值为  $-1$ , 经过  $\frac{T}{4}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{T}{4}}}$ , 经过  $\frac{2T}{4}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{2T}{4}}}$ , 经过  $\frac{3T}{4}$  时刻再给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{3T}{4}}}$ , 使摆角在减速阶段后的  $\frac{3T}{4}$  时刻回到 0。

理论解释:

$$\text{将 } A_0 = 1, t_0 = 0, A_1 = e^{-\alpha^{\frac{T}{4}}}, t_1 = \frac{T}{4}, A_2 = e^{-\alpha^{\frac{2T}{4}}}, t_2 = \frac{2T}{4}, A_3 = e^{-\alpha^{\frac{3T}{4}}}, t_3 = \frac{3T}{4} \text{ 代入式 (8) 中, 基于式 (9)、(10) 的简化计算得到摆角值为 0, 即在 } 3T/4 \text{ 时刻后摆角为零。在本方法的匀速段, 小车的速度 } V = 1 + e^{-\alpha^{\frac{T}{4}}} + e^{-\alpha^{\frac{2T}{4}}} + e^{-\alpha^{\frac{3T}{4}}}。$$

### 3.4 六脉冲法

具体方法: 加速阶段, 在 0 时刻, 给正向加速度脉冲, 幅值为 1, 在  $\frac{T}{6}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{T}{6}}}$ , 在  $\frac{2T}{6}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{2T}{6}}}$ , 在  $\frac{3T}{6}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{3T}{6}}}$ , 在  $\frac{4T}{6}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{4T}{6}}}$ , 在  $\frac{5T}{6}$  时刻再给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{5T}{6}}}$ , 使摆角在  $\frac{5T}{6}$  时刻回到 0; 减速阶段, 在刚进入减速

阶段的时刻给加速度脉冲, 幅值为  $-1$ , 经过  $\frac{T}{6}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{T}{6}}}$ , 经过  $\frac{2T}{6}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{2T}{6}}}$ , 经过  $\frac{3T}{6}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{3T}{6}}}$ , 经过  $\frac{4T}{6}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{4T}{6}}}$ , 经过  $\frac{5T}{6}$  时刻再给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{5T}{6}}}$ , 使摆角在减速阶段开始后的  $\frac{5T}{6}$  时刻回到 0。

理论解释:

$$\text{将 } A_0 = 1, t_0 = 0, A_1 = e^{-\alpha^{\frac{T}{6}}}, t_1 = \frac{T}{6}, A_2 = e^{-\alpha^{\frac{2T}{6}}}, t_2 = \frac{2T}{6}, A_3 = e^{-\alpha^{\frac{3T}{6}}}, t_3 = \frac{3T}{6}, A_4 = e^{-\alpha^{\frac{4T}{6}}}, t_4 = \frac{4T}{6}, A_5 = e^{-\alpha^{\frac{5T}{6}}}, t_5 = \frac{5T}{6}, \text{ 代入 (8) 中, 基于 (9), (10) 的简化计算得到摆角值为 0, 即在 } 5T/6 \text{ 时刻后摆角为零。在本方法的匀速段, 小车的速度 } V = 1 + e^{-\alpha^{\frac{T}{6}}} + e^{-\alpha^{\frac{2T}{6}}} + e^{-\alpha^{\frac{3T}{6}}} + e^{-\alpha^{\frac{4T}{6}}} + e^{-\alpha^{\frac{5T}{6}}}。$$

进一步的研究发现, 输入任意个数的脉冲, 摆角都可以在适当的时刻回到 0。

### 3.5 n 脉冲法

具体方法: 加速阶段, 在 0 时刻, 给正向加速度脉冲, 幅值为 1, 在  $\frac{T}{n}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{T}{n}}}$ , 在  $\frac{2T}{n}$  时刻给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{2T}{n}}}$ , 在  $\frac{3T}{n}$  时刻再给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{3T}{n}}}$ , …… , 在  $\frac{(n-1)T}{n}$  时刻再给正向加速度脉冲, 幅值是  $e^{-\alpha^{\frac{(n-1)T}{n}}}$ , 使摆角在  $\frac{(n-1)T}{n}$  时刻回到 0; 减速阶段, 在刚进入减速阶段的时刻给负向加速度脉冲, 幅值为  $-1$ , 经过  $\frac{T}{n}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{T}{n}}}$ , 经过  $\frac{2T}{n}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{2T}{n}}}$ , 经过  $\frac{3T}{n}$  时刻给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{3T}{n}}}$ , …… , 经过  $\frac{(n-1)T}{n}$  时刻再给加速度脉冲, 幅值是  $-e^{-\alpha^{\frac{(n-1)T}{n}}}$ , 使摆角在减速阶段开始后的  $\frac{(n-1)T}{n}$  时刻回到 0。

理论解释:

当  $n=2, 3, 4, 6, \dots, 2k, 3k$ , 即  $n$  为 2 或 3 的整数倍时, 将  $A_0 = 1, t_0 = 0, A_1 = e^{-\alpha^{\frac{T}{n}}}, t_1 = \frac{T}{n}, A_2 = e^{-\alpha^{\frac{2T}{n}}}, t_2 = \frac{2T}{n}, A_3 = e^{-\alpha^{\frac{3T}{n}}}, t_3 = \frac{3T}{n}, \dots, A_n = e^{-\alpha^{\frac{(n-1)T}{n}}}, t_n = \frac{(n-1)T}{n}$ , 代入式 (8) 中, 基于式 (9)、(10) 的简化计算得到摆角值为 0, 即在  $(n-1) * T/n$  时刻后摆角为零。在本方法的匀速段, 小车的速度:  $V = 1 + e^{-\alpha^{\frac{T}{n}}} + e^{-\alpha^{\frac{2T}{n}}} + e^{-\alpha^{\frac{3T}{n}}} + \dots +$

$e^{-\alpha \frac{(n-1)T}{n}}$ 。其中,当  $k=1$  时的二脉冲法及三脉冲法已经由卫华集团提出过。

当  $n=5, 7, 11, \dots$ , 即  $n$  不是 2 或 3 的倍数时, 理论计算无法验证摆角是否最终为 0, 但是通过 Matlab 进行仿真可以证明当输入整形器中脉冲的幅值和输入时间为  $A_0 = 1, t_0 = 0, A_1 = e^{-\alpha \frac{T}{n}}, t_1 = \frac{T}{n}, A_2 = e^{-\alpha \frac{2T}{n}}, t_2 = \frac{2T}{n}, A_3 = e^{-\alpha \frac{3T}{n}}, t_3 = \frac{3T}{n}, \dots, A_n = e^{-\alpha \frac{(n-1)T}{n}}, t_n = \frac{(n-1)T}{n}$ , 摆角在  $(n-1) * T/n$  时刻为零。

#### 4 基于 POSICAST 控制方法的仿真验证

根据以上的理论计算, 在 Matlab 中进行仿真, 对小车的速度, 加速度, 摆角进行分析, 具体参数<sup>[10]</sup>为: 设绳长  $L=15\text{ m}$ , 阻尼比  $\xi$  取 0.016, 所以  $\omega_n = \sqrt{\frac{g}{L}} = 0.8, \frac{1}{L} = 0.067$ 。将这些参数带入式, 可得:

$$\frac{\theta(s)}{\alpha(s)} = \frac{0.043}{s^2 + 0.026s + 0.64}$$

其中:  $T=7.8\text{ s}, \alpha = \omega_n * \xi = 0.0128$ 。

##### 4.1 二脉冲法

在 0 时刻, 对脉冲输入给 1 倍的增益, 在  $\frac{T}{2}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{T}{2}}$  倍的增益。

该方法中, 小车在加速和减速阶段时, 负载产生摇摆, 在匀速行驶和静止时, 负载不产生摇摆。系统的加速度曲线, 速度和摆角曲线见图 2。本次仿真中, 在加速阶段, 输入整形器中加速度脉冲的个数为 2, 脉冲输入的时间间隔相等, 脉冲的幅值递减, 小车运行中进行两次加速。小车从静止到匀速运动, 即从吊重开始摇摆到摆角为零所需时间为 3.9 s, 等于最后一次脉冲输入的时刻  $T/2$ , 符合理论计算, 运动中产生的最大摆角为  $6.18^\circ$ 。减速阶段小车和吊重的情况与加速阶段一致。

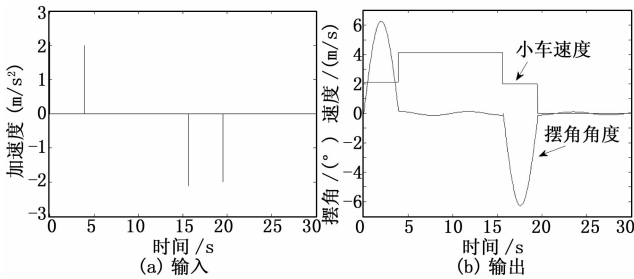


图 2 二脉冲法

##### 4.2 三脉冲法

在 0 时刻, 对脉冲输入给 1 倍增益, 在  $\frac{T}{3}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{T}{3}}$  倍增益, 在  $\frac{2T}{3}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{2T}{3}}$  倍增益。系统的加速度曲线, 速度和摆角曲线见图 3。本次仿真中, 在加速阶段, 输入整形器中加速度脉冲的个数为 3, 脉冲输入的时间间隔相等, 脉冲的幅值递减, 小车运行中进行三次加速。小车从

静止到匀速运动, 即从吊重开始摇摆到摆角为零所需时间为 5.2 s, 等于最后一次脉冲输入的时刻  $2T/3$ , 符合理论计算, 运动中产生的最大摆角为  $4.18^\circ$ 。减速阶段小车和吊重的情况与加速阶段一致。

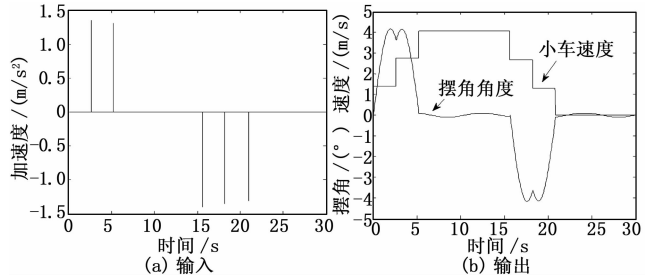


图 3 三脉冲法

##### 4.3 四脉冲法

在 0 时刻, 对脉冲输入给 1 倍增益, 在  $\frac{T}{4}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{T}{4}}$  倍增益, 在  $\frac{2T}{4}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{2T}{4}}$  倍增益, 在  $\frac{3T}{4}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{3T}{4}}$  倍增益。系统的加速度曲线, 速度和摆角曲线见图 4。本次仿真中, 在加速阶段, 输入整形器中加速度脉冲的个数为 4, 脉冲输入的时间间隔相等, 脉冲的幅值递减, 小车运行中进行四次加速。小车从静止到匀速运动, 即从吊重开始摇摆到摆角为零所需时间为 5.85 s, 等于最后一次脉冲输入的时刻  $3T/4$ , 符合理论计算, 运动中产生的最大摆角为  $4.42^\circ$ 。减速阶段小车和吊重的情况与加速阶段一致。

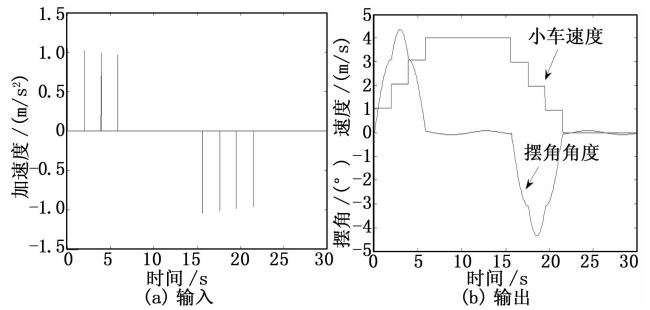


图 4 四脉冲法

##### 4.4 五脉冲法

五脉冲法的理论计算复杂, 所以用 Matlab 进行仿真, 证明本方法可行。在 0 时刻, 对脉冲输入给 1 倍增益, 在  $\frac{T}{5}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{T}{5}}$  倍增益, 在  $\frac{2T}{5}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{2T}{5}}$  倍增益, 在  $\frac{3T}{5}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{3T}{5}}$  倍增益, 在  $\frac{4T}{5}$  时刻, 给  $e^{-\alpha \frac{4T}{5}}$  倍增益。系统的加速度曲线, 速度和摆角曲线见图 5。本次仿真中, 在加速阶段, 输入整形器中加速度脉冲的个数为 5, 脉冲输入的时间间隔相等, 脉冲的幅值递减, 小车运行中进行五次加速。小车从静止到匀速运动, 即从吊重开始摇摆到摆角为零所需时间为 6.24 s, 等于最后一次脉冲输入的时刻  $4T/5$

5, 运动中产生的最大摆角为  $4.08^\circ$ 。减速阶段小车和吊重的情况与加速阶段一致。

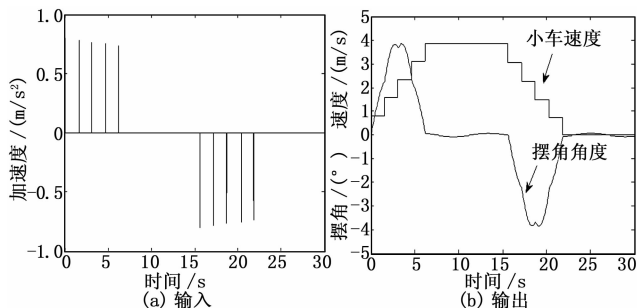


图 5 五脉冲法

### 4.5 六脉冲法

在 0 时刻, 对脉冲输入给 1 倍增益, 在  $\frac{T}{6}$  时刻, 给  $e^{-\alpha\frac{T}{6}}$  倍增益, 在  $\frac{2T}{6}$  时刻, 给  $e^{-\alpha\frac{2T}{6}}$  倍增益, 在  $\frac{3T}{6}$  时刻, 给  $e^{-\alpha\frac{3T}{6}}$  倍增益, 在  $\frac{4T}{6}$  时刻, 给  $e^{-\alpha\frac{4T}{6}}$  倍增益, 在  $\frac{5T}{6}$  时刻, 给  $e^{-\alpha\frac{5T}{6}}$  倍增益。系统的加速度曲线, 速度和摆角曲线见图 6。本次仿真中, 在加速阶段, 输入整形器中加速度脉冲的个数为 6, 脉冲输入的时间间隔相等, 脉冲的幅值递减, 小车运行中进行六次加速。小车从静止到匀速运动, 即从吊重开始摇摆到摆角为零所需时间为 6.5 s, 等于最后一次脉冲输入的时刻  $5T/6$ , 符合理论计算, 运动中产生的最大摆角为  $4.17^\circ$ 。减速阶段小车和吊重的情况与加速阶段一致。

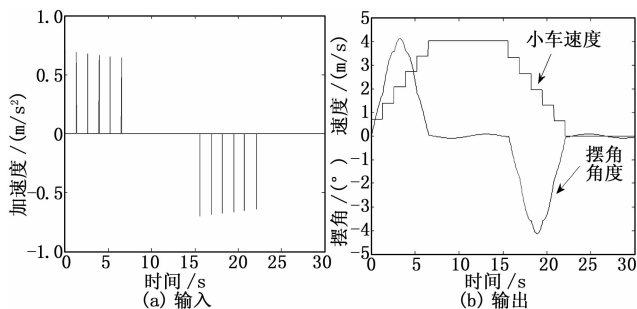


图 6 六脉冲法

从以上的仿真可以看出, 二脉冲法的摆角回零时间最短, 为  $T/2$ , 但是产生的最大摆角也最大。

### 4.6 小结

当输入为二脉冲到十脉冲, 速度最大值和小车摆角最大值及摆角回零时间见表 1。

从表 1 可以看出二脉冲输入时, 负载产生的摆角最大, 摆角回到 0 的时间最短。随着脉冲个数的增加, 最大摆角稳定在  $4^\circ$  左右, 总体的趋势是缓慢减少, 而回到摆角的时间渐渐增大, 越来越趋近于  $T$ 。在阶跃输入控制法<sup>[10]</sup>中最优解是, 摆角在  $3T/4$  时刻回到 0, 此时摆角的值最大为  $7.5^\circ$ ; 本方法中的最优解是, 摆角回零时间缩短为  $T/2$ , 此时摆角最大为  $6^\circ$ 。所以相比于阶跃输入法, 脉冲输入法的回零时间减少, 最大摆角变小。在实际应用时, 可以根据需

表 1 二脉冲法到十脉冲法的防摇特性参数

脉冲个数	最大速度 / (m/s)	最大摆角 / ( $^\circ$ )	摆角回到 0 的时间 $t$
2	4	6.18	3.9
3	4	4.18	5.2
4	4	4.42	5.85
5	4	4.08	6.24
6	4	4.17	6.5
7	4	4.011	6.7
8	4	3.86	6.8
9	4	3.925	6.9
10	4	3.856	7.0

求和实际情况, 选择不同个数的脉冲对应的脉冲输入法, 控制摆角在相应时间回到 0。

## 5 总结

本文研究了起重机小车运行时吊重的摇摆问题, 通过分析小车的动力模型, 分析了加速度与摆角的关系, 基于输入整形法, 提出了一族脉冲输入下起重机的电子防摇方法。除了理论计算, 还在 Matlab 中进行了仿真验证。仿真结果表明, 本方法具有良好的防摇效果。

### 参考文献:

- [1] Alhazza K A. Adjustable maneuvering time wave form command shaping control with variable hoisting speeds [J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 1-11.
- [2] 郭立观. 港口集装箱起重机智能防摇控制系统研究与仿真 [D]. 太原: 太原科技大学, 2009.
- [3] 展敏. 起重船吊物系统的控制研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [4] 杨春燕. 桥式起重机先进控制研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [5] 熊伟. 基于输入整形的龙门吊车系统的防摆控制研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2011.
- [6] Potter J J, Adams C J, Singhose W. A planar experimental remote-controlled helicopter with a suspended load [J]. IEEE/ASME Transactions Mechatronics, 2015 (5): 2496-2503.
- [7] 耿睿, 徐为民, 周贤文. 基于自适应方法的桥式吊车的防摇定位控制器的设计 [J]. 工业控制计算机, 2012, 25 (3): 62-64.
- [8] 王广超. 起重机主动防摇控制策略研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [9] 单磊, 费国. 防摇控制系统在集装箱起重设备中的研究与应用 [J]. 起重运输机械, 2011 (10): 51-55.
- [10] 郁春丽, 牛王强. 基于输入整形法的码头装卸起重机防摇研究 [J]. 计算机仿真, 2016 (11): 233-238.
- [11] 龚志明, 常玉军, 王贺, 等. 起重机防摇摆控制方法 [P]. 中国: CN 102502403 A, 2012-06-20.
- [12] 李兵, 谢里阳, 魏玉兰, 等. 基于输入整形法的一个 3 自由度机器人抑制残余振动的灵敏度分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010 (5): 26-30.
- [13] 蔡力钢, 许博, 杨建武, 等. 基于粒子群优化的输入整形器参数自整定算法 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18 (10): 87-94.