

文章编号:1671-8879(2015)04-0145-08

# 堆垛机立柱动态挠度计算与控制仿真

惠记庄,陈兆鲁,宋 婷,刘 琼

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对堆垛机立柱在惯性力作用下会产生挠曲变形及摆动的问题,通过对堆垛机结构进行简化,建立立柱的二维模型受力分析图,利用工程力学和材料力学的有关知识详细分析了立柱的动态挠度特性及摆动特性,建立了堆垛机立柱的动态挠度数学模型及摆动方程,得出速度和加速度是影响堆垛机立柱动态挠度和摆动的主要因素;在此基础上借助 Matlab 软件,分别采用多档调速曲线控制方法和 S 型速度曲线控制方法对堆垛机的速度、加速度及振幅进行仿真分析。研究结果表明:采用多档调速曲线控制方法时,运行过程中会因速度和加速度的突变而引起堆垛机运行不稳定,而采用 S 型速度曲线控制方法能够有效减小堆垛机在运行过程中对立柱产生的不稳定冲击,可实现速度的平稳过渡,从而验证了采用 S 型速度曲线控制方法在减小立柱变形和冲击等方面具有明显的优势。

**关键词:**机械工程;堆垛机;立柱挠度;摆动方程;Matlab 仿真

**中图分类号:**TH12 **文献标志码:**A

## Dynamic deflection calculation and control simulation analysis of stacker column

HUI Ji-zhuang, CHEN Zhao-lu, SONG Ting, LIU Qiong

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To solve the problem that stacker column can produce flexure deformation and swing under the effect of inertia force, this paper simplified the structure of stacker and established the analysis diagram of two-dimensional model of column. Using the knowledge of engineering mechanics and material mechanics, it analyzed in detail characteristics of dynamic deflection and oscillation of columns, and established the dynamic deflection mathematical model and swing equation of stacker column. The results show that the speed and acceleration are main factors influencing the dynamic deflection and swinging of stacker column. On this basis and with the help of Matlab software, it simulated and analyzed the velocity, acceleration and amplitude of stacker by adopting multi-speed curve control method and S-curve speed control method respectively. Comparison between simulation results show that when multiple speed curve control method is adopted, stacker in running process will run unstably on account of velocity and acceleration mutation of stacker. However, adopting S-curve speed control method can effectively

收稿日期:2015-03-06

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM5216);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310825153403,2014G1251032)

作者简介:惠记庄(1963-),男,陕西富平人,教授,工学博士,硕士研究生导师,E-mail:huijz6363@chd.edu.cn.

reduce unstable shock on the column produced by the stacker in running process, which can realize smooth transition of speed. It indicates that S-curve speed control method has obvious superiority in reducing column deformation, impact and so on. 16 figs, 17 refs.

**Key words:** mechanical engineering; stacker; column deflection; swing equation; Matlab simulation

## 0 引言

在自动化立体仓库中,堆垛机不仅可以在仓库的巷道中往返运行存取货物,而且可以实现货物自动出入库作业,是立体仓库中必不可少的起重和搬运设备。堆垛机在出入库等寻址操作过程中,由于其在启动、加减速及停止运行时均存在惯性力的作用,使堆垛机立柱在纵向产生挠曲变形及摆动,导致堆垛机对仓库货架上货物的存取精度降低,严重时会发生货物掉落,使运送任务不能如期完成<sup>[1]</sup>。近年来,各国学者对堆垛机的动态特性进行了许多有价值的研究工作。针对堆垛机高速运动时各因素的因果关系及内在联系,重庆大学李坚教授对堆垛机进行了运动学和动力学模型的构建,并运用多体系统运动学、动力学和刚体接触动力学的方法对其动态特性进行了仿真分析研究<sup>[2]</sup>;针对研究堆垛机结构振动的影响因素,孙军艳等利用 ADAMS 软件基于模型绳索和柔性梁动态特性建立了堆垛机简化模型,并对其进行了动力学仿真研究<sup>[3]</sup>;国外学者 Randhawa 等对堆垛机存取车命令的执行顺序进行了研究<sup>[4]</sup>;Taboun 等对堆垛机的位置检测和自动认止进行了研究<sup>[5]</sup>。这些研究都取得了突破性的进展。还有一些国外学者对货架的承载能力及抗震能力进行了许多试验研究,大部分集中在对堆垛机的规划优化及控制系统等方面,并取得了许多有价值的研究成果<sup>[4]</sup>。基于此,针对堆垛机立柱动态挠度和摆动问题,本文着重从力学角度出发建立堆垛机的动态挠度方程和摆动方程,并运用 S 型速度曲线控制方法取代多档调速曲线控制方法,优化处理堆垛机立柱动态挠度及摆动问题,采用合理可行的控制方式可以有效减少立柱挠度和摆动的产生<sup>[6-17]</sup>。

## 1 堆垛机的结构及工作原理

堆垛机基本结构是由立柱和下横梁或者上下横梁组成,整体成 L 型或者 H 型,其上加入导轨,起升质量一般在 2 000 kg 以下,起升高度一般为 8~25 m<sup>[5]</sup>。基本结构如图 1 所示。

堆垛机的工作原理:电机通过驱动轴带动钢轮

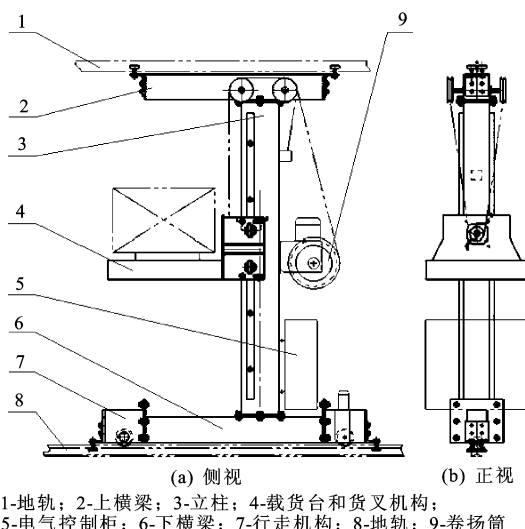


图 1 巷道式堆垛机的基本结构

Fig. 1 Structure of rail roadway stacker

沿着仓库内设置的轨道水平运行,提升电机驱动卷扬筒转动,此时在钢丝绳的牵引下,载货平台沿着立柱做上升下降运动,在伸缩机构的作用下,载货平台的货叉可以向平台的左右往复运动,运用上述运动可实现将货物送入目标货位或将目标货位的货物取出。

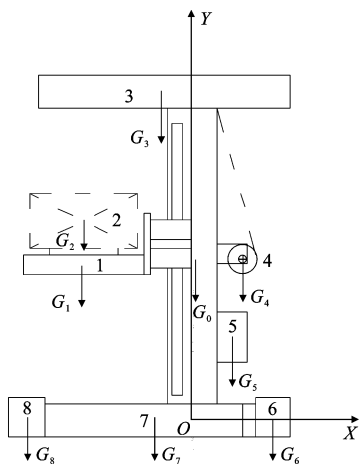
## 2 堆垛机立柱动态挠度数学建模

基于堆垛机的基本结构建立直角坐标系:设堆垛机水平运行方向为  $X$  轴,即将下横梁设为  $X$  轴;设载货平台起升方向为  $Y$  轴,即将立柱设为  $Y$  轴; $X$  轴和  $Y$  轴相交处即为原点  $O$ ,则  $Z$  轴通过  $O$  点且垂直于  $XOY$  平面, $XOY$  平面上各受力点的坐标为  $(X,Y)$ 。堆垛机结构简化如下页图 2 所示。

### 2.1 运动中立柱的动态挠度

由于下横梁位于基座位置,因此可不考虑其对立柱顶端挠度的影响,即下横梁为刚性体,而立柱相当于竖起的悬臂梁,立柱顶端挠度可采用叠加法进行计算。根据简化堆垛机结构图得到立柱弯矩图,如下页图 3 所示。

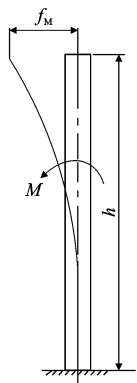
堆垛机在运行时各个质点重量对立柱轴线产生力矩而导致立柱发生挠曲变形,该部分质点重量包



注:  $G_0$ -立柱重量;  $G_1$ -载货台重量;  $G_2$ -货物重量;  $G_3$ -上横梁重量;  
 $G_4$ -起升电机重量;  $G_5$ -控制柜重量;  $G_6$ 、 $G_8$ -行走机构重量;  
 $G_7$ -下横梁重量

图2 堆垛机结构简化

Fig. 2 Simplified structure of stacker



注:  $f_M$ -立柱挠度;  $h$ -立柱高度;  $M$ -重量对立柱产生的力矩

图3 立柱弯矩

Fig. 3 Column bending moment

括载货台  $G_1$ 、货物  $G_2$ 、上横梁  $G_3$ 、起升电机  $G_4$ 、控制柜  $G_5$ ,由此得到立柱挠度  $f_M$  为

$$f_M = \frac{\sum_{i=1}^5 M_i y_i (h - y_i)}{EI} \quad (1)$$

式中:  $M_i = m_i g x_i$ , 为各个质点重量对立柱产生的力矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ),  $m_i$  为各质点质量 ( $\text{kg}$ ),  $g$  为重力加速度 ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ );  $x_i$ 、 $y_i$  为各质点对应的坐标 ( $\text{m}$ );  $E$  为立柱的弹性模量 ( $\text{MPa}$ );  $I$  为立柱截面的惯性矩 ( $\text{m}^4$ )。

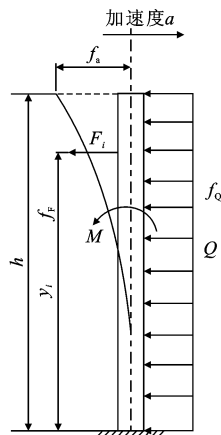
不仅各质点重力对立柱产生影响,而且在载货平台加速垂直上升时,其对立柱产生一个纵向压力,也会导致立柱发生弯曲变形,因此该部分产生的动态挠度为

$$f_{aM} = \frac{\sum_{i=1}^2 m_i a_M x_i y_i (h - y_i)}{EI} \quad (2)$$

式中:  $a_M$  为载货平台上升加速度。

## 2.2 质点惯性力产生的挠度

由质点惯性力引起的立柱动态挠度一般由两大部分组成:①堆垛机在加速或减速运行时由各个质点惯性力引起的挠度  $f_F$ ;②立柱自身惯性力引起的挠度  $f_Q$ 。这两部分挠度之和即为堆垛机在惯性力作用下立柱因变形产生的总挠度  $f_a$ ,如图4所示。



注:  $Q$ -立柱自身惯性力;  $F_i$ -各质点惯性力

图4 立柱挠度

Fig. 4 Column deflection

由图4分析可得如下结果。

(1)堆垛机运行时,各质点惯性力  $F_i$  引起的立柱动态挠度  $f_F$

$$f_F = \frac{\sum_{i=1}^5 F_i y_i^2 (3h - y_i)}{6EI} = \frac{\sum_{i=1}^5 m_i a_H y_i^2 (3h - y_i)}{6EI} \quad (3)$$

式中:  $F_i$  为各质点加速度的惯性力 ( $\text{kN}$ ),  $F_i = m_i a$ ;  $a_H$  为堆垛机水平加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

(2)立柱自身惯性力  $Q$  产生的挠度  $f_Q$

由挠度公式

$$w'' = \frac{M}{EI}$$

可得

$$\frac{d^2 w}{dy^2} = \frac{q a_H (h - y)^2}{2EI} \quad (4)$$

对式(4)两边同时积分可获得挠度方程

$$w = -\frac{q a_H}{24EI} (6h^2 y^2 - 4h y^3 + y^4) \quad (5)$$

将  $y = h$  代入式(5)可得立柱自身惯性力引起的挠度  $f_Q$

$$f_Q = \frac{q h^4}{8EI} a_H \quad (6)$$

式中:  $q$  为立柱均匀分布单位质量(kg/m)。

将式(3)和式(6)结合即为质点惯性力引起的立柱动态总挠度

$$f_a = f_F + f_Q = \frac{\sum_{i=1}^5 m_i a_H y_i^2 (3h - y_i)}{6EI} + \frac{qh^4}{8EI} a_H \quad (7)$$

将式(1)、式(2)和式(7)结合即可获得立柱动态总挠度  $f$

$$f = f_M + f_{aM} + f_a = \frac{\sum_{i=1}^5 M_i y_i (h - y_i)}{EI} + \frac{\sum_{i=1}^2 m_i a_M x_i y_i (h - y_i)}{EI} + \frac{\sum_{i=1}^5 m_i a_H y_i^2 (3h - y_i)}{6EI} + \frac{qh^4}{8EI} a_H \quad (8)$$

由式(8)可知,当堆垛机处于最大运行加减速且载货平台位于立柱顶端时,堆垛机立柱产生的动态挠度相对最大。因此影响堆垛机立柱动态挠度的直接因素是加速度。

### 3 堆垛机摆幅数学建模

在自动化立体仓库中,因为堆垛机是尤为重要的搬运设备,所以要求其运行过程平稳且应当避免立柱挠度过大,进而避免立柱摆动过大。本节基于立柱动态挠度数学模型建立其摆动数学模型,并对该模型进行仿真分析研究,选择合适的控制方法以寻求提高堆垛机工作效率和保障作业安全的有效措施<sup>[6]</sup>。

由于堆垛机是一个由无穷多个质点构成的弹性系统,并且在构件的连接处均采用弹性阻尼隔振技术,因此增加了建立这种多自由度系统摆动模型的难度。针对上述问题,为了便于对堆垛机进行求解建模,可将其摆动问题转化为理想状态下单质点悬臂梁的振动问题,如图 5 所示。

由此可知,悬臂梁的静变形曲线方程为

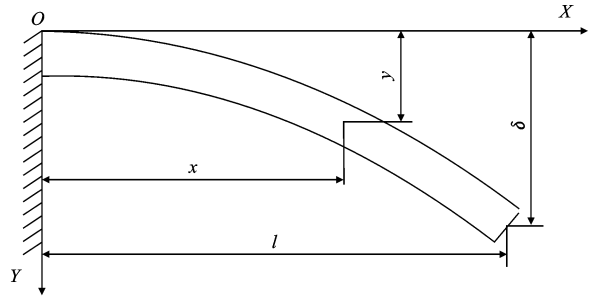
$$y = \delta \frac{3x^2 l - x^3}{2l^3} \quad (9)$$

式中:  $\delta = \frac{mgl^3}{3EI}$ , 为该梁自由端静力挠度。

假设悬臂梁做简谐运动,其挠度  $\delta$  可表示为

$$\delta = A \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (10)$$

式中:  $\omega_n$  为悬臂梁固有频率;  $A$  为摆幅;  $\varphi$  为相位角;



注:  $x$ 、 $y$ -质心点处的坐标;  $\delta$ -梁自由端静力挠度;  $l$ -梁产生挠度变形后的立柱长度

图 5 立柱简化

Fig. 5 Simplified column

$t$  为时间。

该悬臂梁对应各个点的位移方程为

$$y = \delta \frac{3x^2 l - x^3}{2l^3} = \frac{3x^2 l - x^3}{2l^3} A \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (11)$$

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{m_K}} \quad (12)$$

式中:  $m_K$  为悬臂梁单位长度质量;  $K$  为  $y$  方向的弯曲变形刚度,  $K = \frac{F}{y}$ 。

对式(9)求导可得该梁对应各个点的运动速度  $v$ 。则其自由端的摆幅  $A$  为

$$A = \sqrt{x^2 + \left| \frac{v}{\omega_n} \right|^2} = \sqrt{f^2 + \left| \frac{v}{\omega_n} \right|^2} = \sqrt{(\gamma_1 a_H + \gamma_2 a_M + \gamma_3)^2 + \left( \frac{v}{\omega_n} \right)^2} \quad (13)$$

式中:  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  为常数。

由于初始相位角  $\varphi = 0$ , 则将  $\varphi = 0$  和式(13)代入式(10)可获得立柱的摆动方程

$$y(t) = \sqrt{(\gamma_1 a_H + \gamma_2 a_M + \gamma_3)^2 + \left( \frac{v}{\omega_n} \right)^2} \sin(\omega_n t) \quad (14)$$

由式(14)可知,对立柱摆幅产生影响的主要因素是堆垛机的运行速度和加速度。

根据式(8)和式(14)可知,影响立柱动态挠度和摆幅大小的主要因素是堆垛机水平方向加速度  $a_H$ 。通常加速度  $a_H$  通过 2 种方式对立柱的动态挠度和摆动产生影响:①加速度的大小,随着堆垛机加速度的不断增大,其立柱惯性力也随之增大,因而导致立柱的动态挠度及摆幅的增加;②加速度的平顺程度,加速度不断突变不仅使堆垛机产生的惯性力不稳定,而且使立柱动态挠度及摆幅急剧增大。

### 4 系统建模仿真分析

基于摆幅数学模型,采用 Matlab/Simulink 软件建立堆垛机控制系统仿真模型,仿真模型如图 6

和图 7 所示。

以建立的系统模型为基础,分别采用多档调速曲线控制方法与 S 型速度曲线控制方法对堆垛机速度、加速度及振幅进行仿真分析,对比在采用 2 种运动控制方法的情况下堆垛机运动性能的变化。

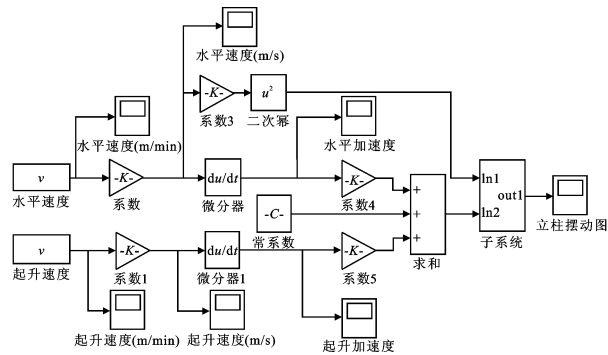


图 6 立柱摆幅仿真模型

Fig. 6 Simulation model of column swing

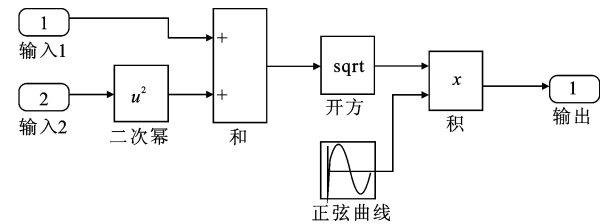


图 7 子系统仿真模型

Fig. 7 Unit subsystem simulation model

4.1 采用多档调速曲线控制方法仿真分析

针对当堆垛机在水平运行方向的速度和载货台起升运行方向的速度从 0 达到最大值时,其对立柱摆幅的影响,采用多档调速曲线控制,以在此过程中获得的离散试验数据为依据,并通过摆幅数学模型计算堆垛机运行时的相关参数,将参数信息输入到系统仿真模块中,分别对堆垛机水平运行方向和载货平台起升方向各个时间段的速度及加速度进行仿真分析,仿真结果如图 8~图 11 所示。

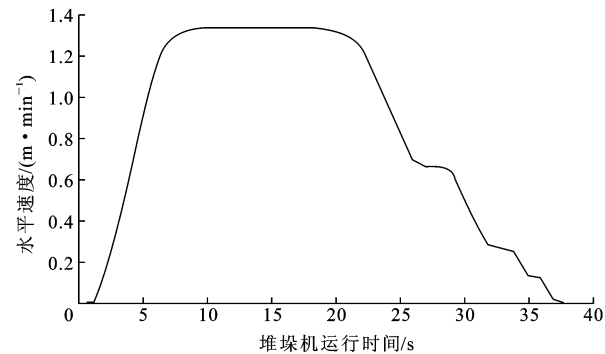


图 8 堆垛机水平运行速度曲线

Fig. 8 Horizontal running speed curve of stacker

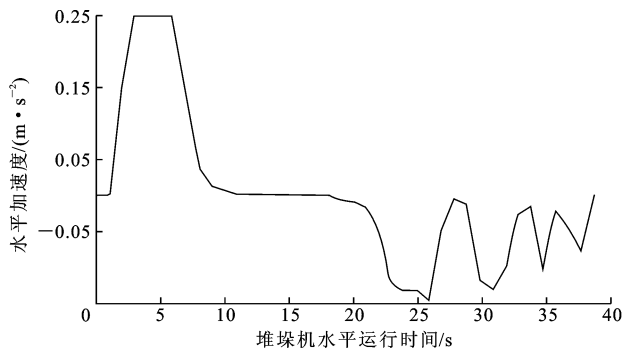


图 9 堆垛机水平运行加速度曲线

Fig. 9 Horizontal running acceleration curve of stacker

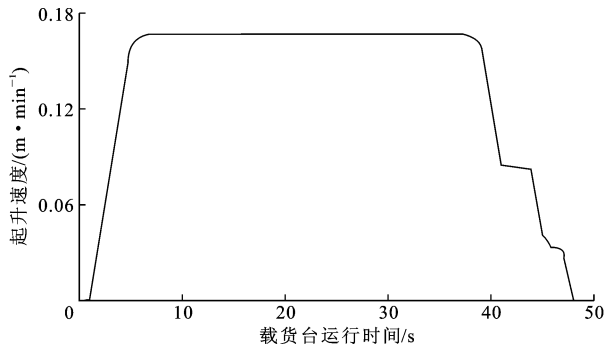


图 10 载货平台起升运行速度曲线

Fig. 10 Lifting speed curve of loading platform

从图 9 可知,堆垛机水平运行加速度在 1~3 s 时间段内达到最大值  $0.25 \text{ m/s}^2$ ,当其在减速段运行至约 26 s 时,加速度最大值达到  $-0.0146 \text{ m/s}^2$ 。

由图 11 可知,载货平台起升加速度在 1~3 s 时间段可达到最大值  $0.04 \text{ m/s}^2$ ,当载货台在减速段起升运行至 41 s 时,加速度达到最大值  $-0.038 \text{ m/s}^2$ 。

由堆垛机水平运行加速度和载货平台起升运行加速度相应值以及堆垛机的固有频率值,可得到当各参数都为最大值时,其立柱振幅曲线如下页图 12 所示。

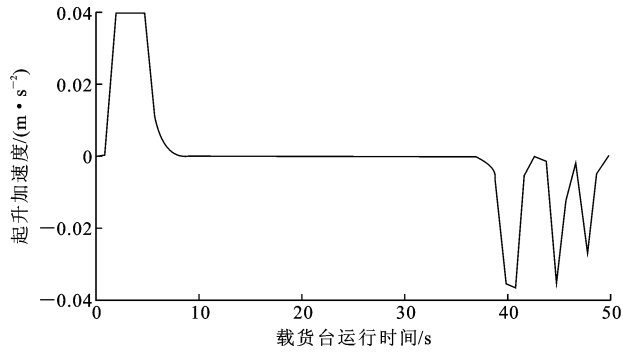


图 11 载货平台起升运行加速度曲线

Fig. 11 Lifting acceleration curve of loading platform

由图 12 可知,在 1~3 s 加速段,堆垛机立柱摆幅最大可达  $0.05 \text{ m}$ ;在 40~50 s 减速段,摆幅最大可达  $0.0253 \text{ m}$ 。

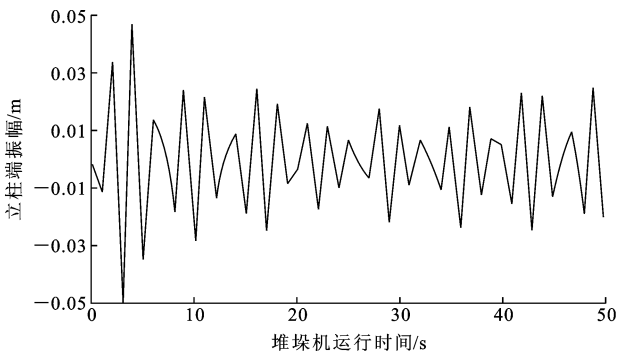


图 12 堆垛机立柱的振幅曲线

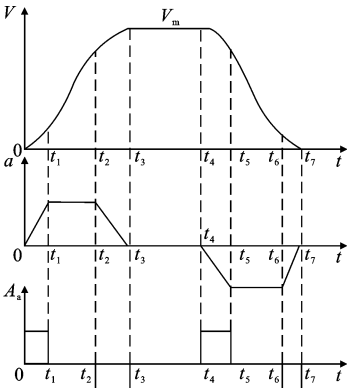
Fig. 12 Column amplitude curve of stacker

由此可知,摆幅最大值常产生在堆垛机运行速度及加速度突然增加或减少的时刻,此时加速度的突变会直接导致堆垛机水平运行方向和载货台起升方向惯性力的突变,引起堆垛机立柱上力矩发生变化,导致立柱因受到较大惯性力冲击使摆幅不断增大。

多档调速曲线控制的最大缺点是当运行速度加速到稳定速度时和从稳定运行速度到减速段时,加速度会有一个跳跃,此时在惯性力的作用下会因堆垛机运行不稳定而产生不良后果<sup>[6]</sup>。由此可知,若想将立柱摆幅大小控制在适当范围内,需控制堆垛机运行速度大小及加速度大小,使堆垛机速度变化平稳,立柱摆幅以及冲击随之得到减小。

4.2 优化控制——S 型速度曲线控制

针对采用多档调速曲线控制方法对堆垛机在水平运行方向和载货平台起升方向上的速度和加速度进行仿真时存在诸多缺点,提出一种可行的控制方法——S 型速度曲线控制,如图 13 所示,其加速度变化连续且加减速过渡平滑,可使系统运行更加平稳,有效减小惯性力对系统的冲击及立柱的振动,改善堆垛机的运行状况,该曲线如图 13 所示。



注:  $V_m$ -最大速度;  $a$ -加速度;  $A_s$ -加速度变化率;  $t$ -时间。

图 13 S 型速度控制曲线

Fig. 13 S type speed control curve

S 型速度曲线在 1 个运动周期中包含下列几个阶段:

(1)加速阶段:  $0 \sim t_3$ ; ( $0 \sim t_1$ : 初加速度段;  $t_1 \sim t_2$ : 恒加速度段;  $t_2 \sim t_3$ : 终加速度段)。

(2)等速运行阶段:  $t_3 \sim t_4$ 。

(3)减速阶段:  $t_4 \sim t_7$ ; ( $t_4 \sim t_5$ : 初减速度段;  $t_5 \sim t_6$ : 恒减速度段;  $t_6 \sim t_7$ : 终减速度段)。

由于堆垛机起升机构在运行时速度较小且加速度的突变值很小,因而在运动中惯性力的突变对立柱的冲击也较小。为了验证在堆垛机运行中采用 S 型速度曲线控制方法的优越性,假设在载货台起升方向的控制方式不变,主要在堆垛机水平运行方向采用 S 型速度曲线控制方法。对堆垛机水平运行方向各个时间段的速度及加速度进行仿真,仿真结果如图 14、图 15,下页图 16 所示。

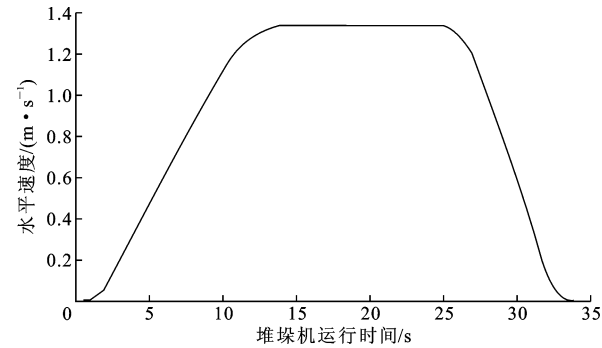


图 14 堆垛机水平运行速度曲线

Fig. 14 Horizontal running speed curve of stacker

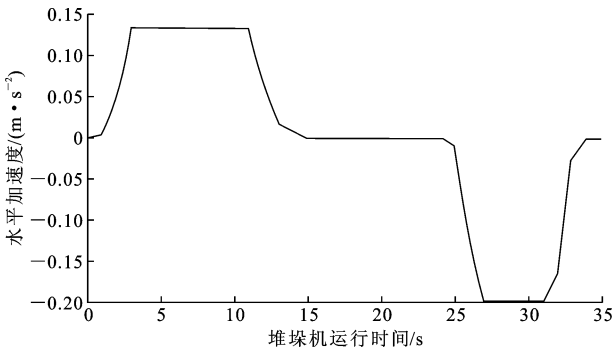


图 15 堆垛机水平运行加速度曲线

Fig. 15 Horizontal running acceleration curve of stacker

由图 15 可知,堆垛机水平运行加速度在 3 s 时达到加速段最大值  $0.135 \text{ m/s}^2$ ,而在 27 s 时达到减速段最大值  $-0.2 \text{ m/s}^2$ 。

从图 16 中可以看出,立柱的摆幅明显减小,堆垛机在加速段立柱最大摆幅可达  $0.0375 \text{ m}$ ,约减小 25%;在堆垛机运行速度达到最大值过程中,立柱摆幅最大可达  $0.0189 \text{ m}$ ,约减小 23%;在减速段

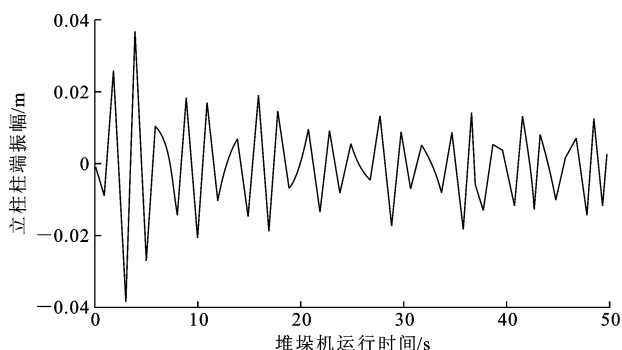


图16 堆垛机立柱振幅曲线

Fig. 16 Column amplitude curve of stacker

最大摆幅约为 0.017 8 m,约减小 30%。

当运用 S 型速度曲线控制时,在加速和减速阶段速度过渡平稳顺滑,降低了由于惯性力变化不稳定而对立柱产生的冲击。在 1 个运行周期中 S 型速度曲线只有 1 个加速段和减速段,极大的减小了惯性力对立柱的冲击次数。在堆垛机水平运行加速段,其加速度最大值由原来的  $0.25 \text{ m/s}^2$  降低至  $0.135 \text{ m/s}^2$ ,减小了立柱产生的惯性力。虽然在减速阶段加速度的值有不同程度的增加,但对立柱摆幅的大小几乎没有影响。堆垛机运行周期从原来的 50 s 减少到 35 s,使堆垛机的运行效率在一定程度上得到了提高。

与多档调速曲线控制方法相比,S 型速度曲线控制方法具有以下优点:

(1)堆垛机运行速度曲线平滑,可有效减少速度和加速度突变对立柱产生的不稳定冲击,实现了速度的平稳过渡,使堆垛机水平运行更加平稳,同时也提高了机械的使用寿命<sup>[7]</sup>;

(2)在堆垛机运行加速段,随着加速度的不断减小,惯性力对立柱挠度和摆幅的影响随之减小;

(3)堆垛机运行周期的减小,极大地提高了其运行效率。

## 5 结 语

(1)基于堆垛机结构的简化模型,详细分析了其立柱的动态挠度特性,建立了堆垛机立柱的动态挠度数学模型及摆动方程,得出影响立柱动态挠度和摆动的主要因素是速度和加速度。

(2)采用多档调速曲线控制方法和 S 型速度曲线控制方法,分别对堆垛机运行速度、加速度及摆幅进行仿真研究,验证了运用 S 型速度曲线控制方法能够有效减小堆垛机运行过程中立柱的动态挠度及摆动,提高了堆垛机对货物的存取精度及工作效率,

同时保障了系统的工作安全,极大地改善了堆垛机的运行状况。

(3)本文对堆垛机立柱的动态挠度和摆动进行了分析和研究,但对于特殊的运行环境,堆垛机的工作效率及工作安全性仍然会受到立柱挠度和摆动的影响,所以对堆垛机立柱挠度和摆动的优化问题进行更进一步的研究是十分必要的。

## 参考文献:

## References:

- [1] 鲁晓春. 现代物流基础设施与设备[M]. 北京:中国物资出版社,2006.  
LU Xiao-chun. Modern logistics infrastructure and equipment[M]. Beijing:China Material Press,2006. (in Chinese)
- [2] 李 坚. 单立柱有轨巷道式堆垛机结构及多体系统动态仿真分析[D]. 重庆:重庆大学,2006.  
LI Jian. Structure and multibody system simulation analysis of the single mast stacker crane [D]. Chongqing:Chongqing University,2006. (in Chinese)
- [3] 孙军艳,曹西京,汤建明,等. 堆垛机的有限元模态分析[J]. 轻工机械,2005(2):46-48.  
SUN Jun-yan, CAO Xi-jing, TANG Jian-ming, et al. Finite element modal analysis on stacker[J]. Light Industry Machinery,2005(2):46-48. (in Chinese)
- [4] Randhawa S U, Shroff R. Simulation-based design evaluation of unit load automated storage/retrieval systems[J]. Computers & Industrial Engineering,1995, 28(1):71-79.
- [5] Taboun S M, Bhole S D. A simulator for an automated warehousing system[J]. Computers & Industrial Engineering,1993,24(2):281-290.
- [6] 李 晶. 高速高加速巷道堆垛机仿真设计与控制研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2011.  
LI Jing. Simulation analysis and control research of the high-acceleration & high-speed mast stacker[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011. (in Chinese)
- [7] 张岩军,王忠宾. 新型有轨巷道式单立柱堆垛机的设计[J]. 起重运输机械,2011(3):12-15.  
ZHANG Yan-jun, WANG Zhong-bin. Design of new type rail roadway single column stacker[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2011(3):12-15. (in Chinese)
- [8] Marin R M, Gampos J G, Trillo J L, et al. Design and simulation of an industrial automated overhead warehouse[J]. Integrated Manufacturing System, 1998, 9

- (5);308-313.
- [9] 贾启芬,刘习军. 工程力学[M]. 天津:天津大学出版社,2001.  
JIA Qi-fen, LIU Xi-jun. Engineering mechanics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001. (in Chinese)
- [10] 胡 锋. 自动化立体仓库控制系统设计与实现[J]. 科技信息, 2010(15): 71-73.  
HU Feng. Design and implementation of automatic solid warehouse control system[J]. Science and Technology Information, 2010(15): 71-73. (in Chinese)
- [11] 顾海明,周勇军. 机械振动理论与应用[M]. 南京:东南大学出版社,2007.  
GU Hai-ming, ZHOU Yong-jun. Mechanical vibration theory and application[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2007. (in Chinese)
- [12] Math Works. Simulink-dynamic system simulation for MATLAB[Z]. New York: User's Guide, 1992.
- [13] Kuo B C, Hanselman D C. MATLAB tools for control system analysis and design[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1994.
- [14] 郑玉巧,张堆学. 巷道式堆垛机立柱动态性能仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(5): 16-18.  
ZHENG Yu-qiao, ZHANG Dui-xue. Simulation analysis on dynamic performance of tunnel stacker crane column[J]. Modular Machine Tools and Automatic Manufacturing Technology, 2009(5): 16-18. (in Chinese)
- [15] 龚秋生. 堆垛机的机械结构及控制系统设计研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2013.  
GONG Qiu-sheng. Research on mechanical structure and control system design for stacker[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013. (in Chinese)
- [16] 李梅娟. 自动化仓储系统优化方法的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.  
LI Mei-juan. Research on optimization method of automated storage and retrieval systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] Bloomfield R, Riccio J, Taylor J, et al. Return-roll stacker[C]//SIEDS. 2008 Systems and Information Engineering Design Symposium Charlottesville: IEEE, 2008: 50-54.
- ~~~~~
- (上接第 131 页)
- [11] 周凌云. 区域物流多主体系统的演化与协同发展研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.  
ZHOU Ling-yun. Research on evolution and synergetic development of regional logistics multi-agent system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 孟庆松,韩文秀. 复合系统整体协调度模型研究[J]. 河北师范大学学报:自然科学版, 1999, 23(2): 177-179.  
MENG Qing-song, HAN Wen-xiu. Study on the whole coordination degree model of non-line composite systems[J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science, 1999, 23(2): 177-179. (in Chinese)
- [13] 王圣云,沈玉芳. 我国省级区域物流竞争力评价及特征研究[J]. 中国软科学, 2007(10): 104-110.  
WANG Sheng-yun, SHEN Yu-fang. The appraisal and characters of provincial level logistics competitiveness in China[J]. China Soft Science, 2007(10): 104-110. (in Chinese)
- [14] 周凌云,穆 东,李佳成. 区域物流系统多主体协同内涵与机制[J]. 综合运输, 2010(3): 43-46.  
ZHOU Ling-yun, MU Dong, LI Jia-cheng. The connotation and mechanism of the regional logistics system multi-agent collaboration[J]. Comprehensive Transportation, 2010(3): 43-46. (in Chinese)
- [15] 李建军. 区域物流系统成长研究[D]. 南昌:江西财经大学, 2013.  
LI Jian-jun. The collaborative growth of regional logistics[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2013. (in Chinese)
- [16] 郭 琴,刘海静. 基于复合信息熵权的多式联运型物流网络协同度模型研究[J]. 物流技术, 2011, 30(1): 35-38.  
GUO Qin, LIU Hai-jing. Model of level of collaboration for multi-modal logistics networks based on composite information entropy weighing [J]. Logistics Technology, 2011, 30(1): 35-38. (in Chinese)