

矿井提升系统振动与行程控制仿真研究

王 平 肖兴明 李帅波 徐 波

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏省徐州市, 221008)

摘 要 给出了矿井提升系统振动微分方程和 S 形曲线算法, 并分别在折形速度给定和 S 形给定下, 对提升过程进行仿真, 最后对两种仿真结果进行定量比较分析。研究表明, S 形速度给定可以大大减小提升中的系统冲击, 改善钢丝绳受力情况, 提高提升的平稳性, 同时还可为提升钢丝绳的选用和提升机运行控制方式的设计与改进提供参考。

关键词 矿井提升系统 振动 行程控制 S 形曲线

中图分类号 TD532 **文献标识码** A

A simulation study on coal mine hoist system's vibration and travel control

Wang Ping, Xiao Xingming, Li Shuaibo, Xu Bo

(School of Electro-Mechanical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu province 221008, China)

Abstract In this paper, the vibration differential equation and S-shaped curve algorithm for the mine shaft hoist system are presented. The paper simulates the hoisting conditions with and without S-shaped curves, analyses and compares the results quantitatively. Study indicates that impacts on hoisting system decrease and steel wire rope tension reduces with S-shaped curve and the hoisting could become smoother and steadier. This paper also provides references to wire rope selection, design and innovations of hoist travel control.

Key words mine hoisting system, vibration, travel control, S-shaped curve

随着现代矿井的发展, 矿井开采深度和开采水平不断增加, 提升机工作负荷越来越大, 同一升降过程所需要的停靠次数也越来越多, 这无疑对提升设备的动力学提出了更高的要求。同时, 随着提升钢丝绳长度的增加, 钢丝绳弹性变大, 提升绳系的振荡也将越严重, 在深井提升系统中, 提升容器的振荡甚至达到 ± 1 m。这不仅增加了提升系统工作的不平稳性, 影响钢丝绳的寿命和矿井的安全生产, 对于副井提升来说还影响了乘坐人员的舒适性。为解决上述问题, 多采用 S 形速度给定, 通过限制加速度的变化率来软化速度给定曲线, 有关文献对此进行了研究, 但这些研究主要集中在 S 形曲线的设计与实现, 而没有对其改善钢丝绳受力的具体效果方面进行分析。本文通过仿真研究两种速度给定下钢丝绳振动及受力情况, 并加以定量分析比较, 研究 S 形曲线在改善提升系统运行状态方面的效果, 从而为矿井提升机的进一步研究和设计提供

了参考依据。

1 矿井提升系统数学模型

在提升机的运动状态中, 提升容器的速度反映了系统运行的实际速度, 那么它的振动也反映了系统的运动稳定性, 所以从分析提升容器的振动大小和钢丝绳的张力可看出提升机的运行状况。提升系统容器的示意图如图 1 所示。

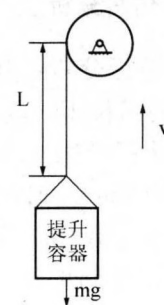


图 1 提升容器示意图

为了便于分析,图中将主绳质量用瑞利法处理,尾绳质量集中到容器上,则当提升机按图2所示的3段速度图进行工作时,在加速、等速和减速3阶段提升容器的振动大小 \ddot{u} 和钢丝绳的张力 \dot{p} 的微分方程分别为:

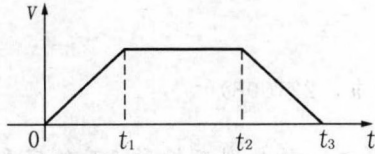


图2 三阶段速度图

$$\ddot{u} = (g + a_1) - \frac{EA(u + u_0)}{L_1(t)[m + \rho L_1(t)/3]} \quad (1)$$

$$\ddot{u} = g - \frac{EA(u + u_0)}{L_2(t)[m + \rho L_2(t)/3]} \quad (2)$$

$$\ddot{u} = (g - a_2) - \frac{EA(u + u_0)}{L_3(t)[m + \rho L_3(t)/3]} \quad (3)$$

$$\dot{p} = \left\{ EA(g + a_1) - \left[a_1 + \frac{EA}{m + \rho L_1(t)/3} \right] p - 2a_1 \dot{p} \right\} / L_1(t) \quad (4)$$

$$\dot{p} = \left[EA g - \frac{EA p}{m + \rho L_2(t)/3} - 2v \dot{p} \right] / L_2(t) \quad (5)$$

$$\dot{p} = \left\{ EA(g - a_2) + \left[a_2 - \frac{EA}{m + \rho L_3(t)/3} \right] p - 2[V_m - a_2(t - t_2)] \dot{p} \right\} / L_3(t) \quad (6)$$

式中: m ——终端质量;

$L(t)$ ——提升时的绳长;

a_1 ——提升加速度;

a_2 ——提升减速度;

E ——钢丝绳弹性模量;

A ——钢丝绳横截面积;

ρ ——钢丝绳每米重量;

v_m ——最大提升速度;

u_0 ——初始伸长量;

u ——提升时与容器相连的绳端变形;

p ——绳在天轮处的张力

2 折形速度给定下仿真分析

结合如下参数进行分析:终端质量 8000 kg,提升机在下井口时的绳长 450 m,加速度与减速度均为 0.6 m/s^2 ,最大提升速度 8.0 m/s ,钢丝绳弹性模量 $1.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,钢丝绳横截面积 698 mm^2 ,钢丝绳质量 6.5 kg/m 。采用 Matlab/Simulink 工具进行仿真,得到的结果如图3~图5所示。

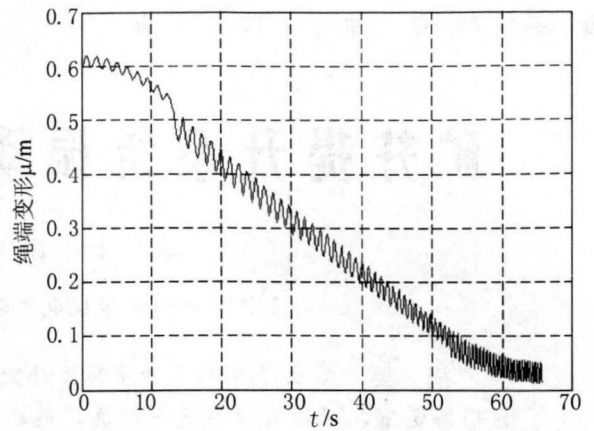


图3 绳端变形量

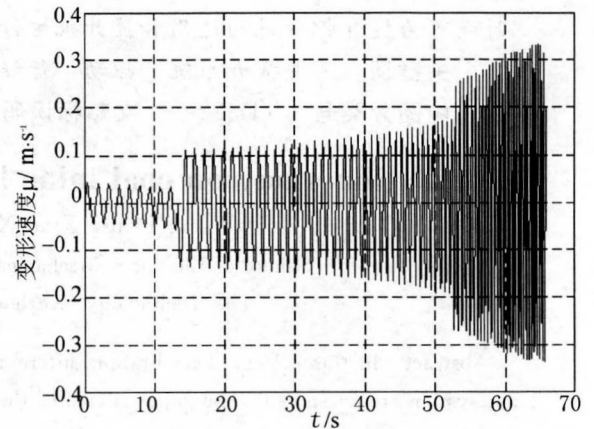


图4 绳端变形速度

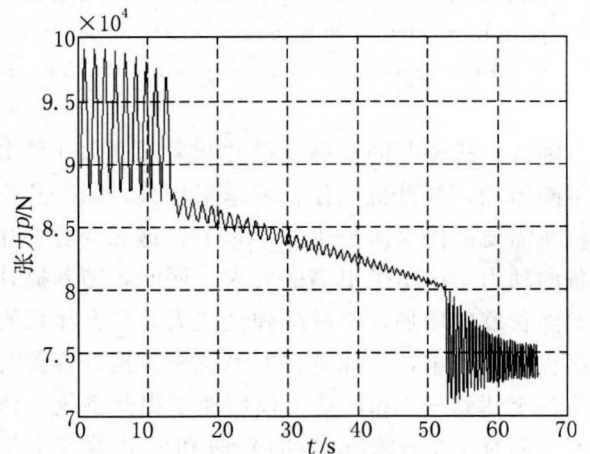


图5 钢丝绳张力

由图3~图5可知,在整个提升过程中,随着时间的增加,绳长的减小,绳端变形量不断减小,变形速度不断增大,钢丝绳张力总体上呈减小趋势。其原因在于,绳长不断减小使得钢丝绳的自重变小,即负载减小,而同时绳的等效弹性系数变大,因此振动频率变大,从而使绳端的变形速度随着时间的增加而变大。振动频率的变化规律从上面的图中也能够看出。

上面各图明显的分为3个阶段,在各阶段变形量、变形速度和张力的变化较为平缓,而在各阶段之间的转折处有明显的突变现象,这无疑会产生严重的系统冲击,降低提升的稳定性及乘坐的舒适性,甚至影响矿井生产的安全性。这主要是图2所示的折形速度图的速度过渡不平滑,在速度的变化转折处加速度变化率过大而造成的。为了解决折线形速度曲线所产生的问题,实现速度图的平滑变化,减小钢丝绳张力突变,需要采用软化突变的S形给定曲线。

3 S曲线算法

S形曲线控制方法主要是改变了加速度的突变,其速度给定的基本依据是加速度的变化率对时间的双积分,它能给出每一计算周期内的实际给定值,从而产生计算过程的运行曲线 $v=f(t)$,这就实现了速度转折点处的平滑过渡。在高速提升机中,为了保证乘客舒适感和提高运行效率,通常采用正弦加速度曲线或抛物线一直线综合曲线。其中采用正弦加速度曲线时S曲线的速度计算公式如下:

$$v_1(t) = \frac{a_1^2}{A_1} (1 - \cos \frac{A_1 t}{a_1}) \quad 0 < t \leq t_1 \quad (7)$$

$$v_2(t) = \frac{a_1^2}{A_1} + a_1(t - t_1) \quad t_1 < t \leq t_2 \quad (8)$$

$$v_3(t) = v_m - \frac{a_1^2}{A_1} \{1 + \cos[\frac{A_1(t-t_2)}{a_1}] - \frac{v_m A_1}{a_1^2} + 2\} \quad t_2 < t \leq t_3 \quad (9)$$

$$v_4(t) = v_m \quad t_3 < t \leq t_4 \quad (10)$$

$$v_5(t) = v_m + \frac{a_2^2}{A_2} [\cos \frac{A_2(t-t_4)}{a_2} - 1] \quad t_4 < t \leq t_5 \quad (11)$$

$$v_6(t) = v_5 - a_2(t - t_5) \quad t_5 < t \leq t_6 \quad (12)$$

$$v_7(t) = v_6 - \frac{a_2^2}{A_2} \sin \frac{A_2(t-t_6)}{a_2} \quad t_6 < t \leq t_7 \quad (13)$$

$$v_8(t) = v_f \quad t_7 < t \leq T \quad (14)$$

式中: A_1, A_2 ——加速段和减速段的最大加速度变化率,取 A_1, A_2 的值均为 0.15 m/s^3 ;
 a_1 ——加速段最大加速度值, m/s^2 ;
 a_2 ——减速段最大减速度值, m/s^2 ;
 v_f ——爬行速度, m/s ;
 T ——运行周期, s

得到的S形速度曲线如图6所示。

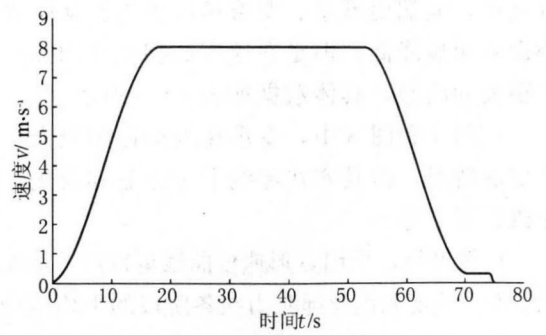


图6 S形速度曲线

4 S形速度给定下仿真分析

S形曲线给定下的仿真结果如图7~图9所示。

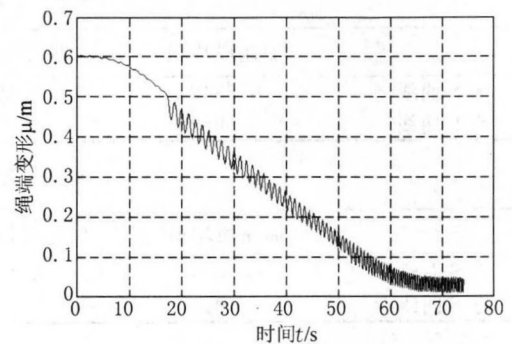


图7 S形给定曲线下的绳端变形

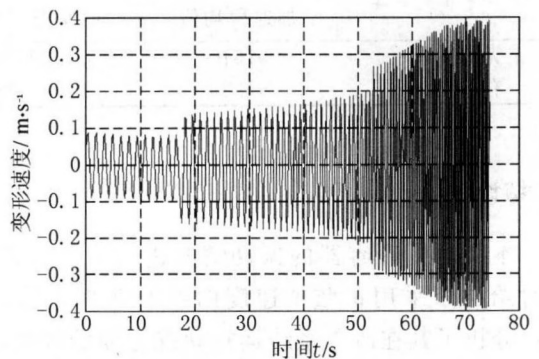


图8 S形给定曲线下的绳端变形速度

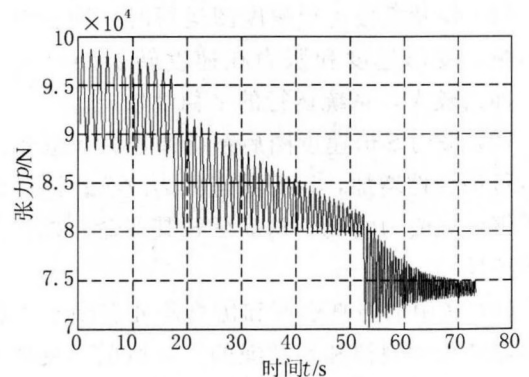


图9 S形给定曲线下钢丝绳的张力

比较图3~5和图7~9,采用了S形曲线的提

升过程,绳端变形量、变形速度和钢丝绳张力的大小没有明显降低,但是在速度的拐点处的突变却有了很大的改善,具体数据如表1~3所示。

在图4和图8中,变形速度的振幅较大,且有突变的情况,但其在零线上下作对称变化,因而均值接近于零。

比较可得,采用S形速度曲线运行后,绳端变形量、变形速度和钢丝绳张力在各阶段的平均值变化不大,但在加速至等速、等速至减速段拐点处的突变值大为减小,从而减小了系统冲击,这可以大大改善钢丝绳的受力情况,减小其振动,提高增加矿山生产的安全性,对于副井来说还能使人员乘坐舒适。

本文采用建模仿真的方式,通过仿真结果定量分析比较S形曲线在改善提升系统振动与受力方面的效果,研究表明,S形曲线能够减小提升系统的振动与冲击,提高系统的安全性和可靠性。另外通过改变提升机运行参数(如最大提升速度)、提升加速度及钢丝绳参数(如弹性模量),文中的模型还可用于研究钢丝绳振动与提升机运行参数及钢丝绳参数之间的关系。在提升系统设计时,可以通过仿真设计出使钢丝绳振动和受力最小的提升控制方式;而根据设计出的提升运行参数,可以通过仿真了解钢丝绳的振动与受力情况,为钢丝绳的设计选择提供参考。

表1 有无S曲线的变形情况表出

/m

	加速段均值	加速至匀速突变	匀速段均值	匀速至减速突变	减速段均值
无S曲线	0.5842	0.0856	0.2928	0.0492	0.1124
有S曲线	0.5669	0.0506	0.3099	0.0370	0.1089

表2 有无S曲线的变形速度情况表

/m·s⁻¹

	加速段均值	加速至匀速突变	匀速段均值	匀速至减速突变	减速段均值
无S曲线	-0.0054	0.0789	-0.0158	0.0708	-0.0899
有S曲线	-0.0106	0.0464	0.0194	0.0574	-0.0982

表3 有无S曲线的钢丝绳张力情况表

/N

	加速段均值	加速至匀速突变	匀速段均值	匀速至减速突变	减速段均值
无S曲线	91910	11126	83626	9464	76353
有S曲线	91939	7839	83948	5703	74762

5 结论

本文对提升容器的振动情况进行了仿真研究,同时给出了采用正弦加速度曲线的S形速度图算法,分析了其在改善系统运行状况方面的效果,研究表明:

(1)提升机按折形速度图运行时,钢丝绳绳端变形量、变形速度和张力在速度转折处有突变现象,冲击较大,系统运行的平稳性较差。

(2)采用S形速度图后系统冲击大大减小,系统运行平稳性增加,运行状态大为改善;同时还缓解了钢丝绳受力情况,从而延长其寿命,提高运行的经济性。

(3)文中的仿真模型和仿真研究有助于了解提升容器的振动规律和钢丝绳的受力情况,及其与速度给定和钢丝绳参数的关系,从而可为提升机速度给定的设计及钢丝绳的选择提供依据。

参考文献:

- [1] 彭佑多,张永忠,刘德顺等.矿井提升机驱动系统合理加速度曲线的确定[J].湘潭矿业学院学报,2001,16(3)
- [2] 严世榕,闻邦椿.竖井提升钢丝绳容器系统在提升过程中的动力学仿真[J].中国有色金属学报,1998(增刊2)
- [3] 范狄庆,吴子岳.矿井提升机理想S形速度运行曲线的模型研究[J].煤矿机械,2006,27(2)
- [4] 周孟然.提升机速度给定数字化控制的实现[J].中国煤炭,2001,3
- [5] 高宏伟.新型矿井提升机调速方案的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2003
- [6] 王德堂.矿井提升机运行特性及智能控制研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2007

作者简介:王平(1984-),男,山东鱼台人,中国矿业大学机电学院在读硕士研究生,研究方向:机械电子工程。

(责任编辑 张艳华)