

文章编号: 1004- 0609(1999) 04- 0884- 06

加速过程箕斗提升设备机电系统动力学分析^①

严世榕 闻邦椿

(东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110006)

摘 要: 提出了交流拖动绕线式三相电动机串联多段电阻控制下的加速过程箕斗提升机电系统动力学的时变且非线性的模型, 并在此基础上, 借助计算机仿真技术, 分别得到了八段和六段串联电阻下的提升容器与滚筒的运动学与动力学规律。作者提出的力学模型和方法以及所揭示的一些未见报道的现象和规律对于旧式提升机的改进尤其是改用计算机控制具有重要参考价值, 对其它形式的交流拖动或直流拖动提升设备设计或改进也具有一定的参考价值。

关键词: 机电系统动力学; 箕斗提升; 加速过程

中图分类号: TD53

文献标识码: A

目前国内各种矿山还在大量采用多段电阻控制的绕线式三相交流电动机拖动箕斗提升设备。这种提升设备的动力学问题较多,且由于对其机电系统动力学没有进行过理论研究,从而在设备选型与设计计算时未能考虑这些问题。同时,为了更新提升设备,改进操作条件和提高生产效率,节省能源,保证设备高速平稳运行,不少矿山正陆续引进计算机控制。因此,开展对提升设备的机电系统动力学研究,在理论和应用方面均有较重要的意义。

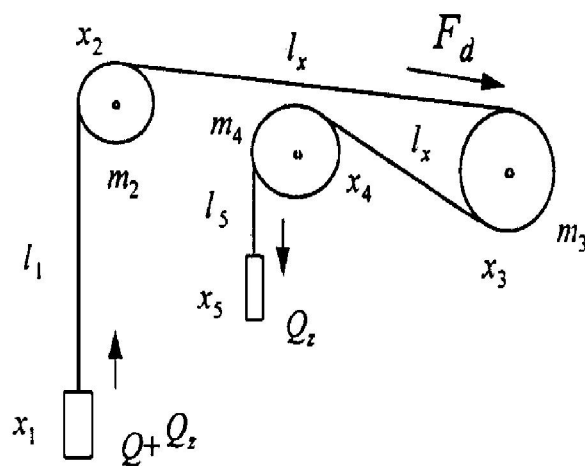


图 1 力学模型

Fig. 1 Mechanic model

1 机电系统力学模型

将双箕斗缠绕交流绕线式异步电动机拖动提升设备作为研究对象, 考虑上提下放的两个箕斗、整根提升钢丝绳、两个天轮和提升机本身(含滚筒、减速器和电动机等)等, 忽略滚筒、轴及传动系统等的弹性变形, 将它们简化为五个自由度的机电动力学系统, 见图 1。设 x_1 为上提侧绳的变形量, x_2 为上绳弦的变形量, x_3 为滚筒圆周的等效线位移, x_4 为下绳弦的变形量, x_5 为下放侧钢丝绳的变形量。当滚筒圆

周的线位移为 x_3 时, 左天轮圆周线位移为 $x_3 - x_2$, 位于井底的重容器则运动了 $x_3 - x_2 - x_1$, 右天轮的圆周运动了 $x_3 + x_4$, 位于井口的空容器移动了 $x_3 + x_4 + x_5$ 。考虑各段绳的变形与对应张力的关系, 并引进电机在滚筒圆周侧的等效拖动力的表达式后, 在忽略箕斗运行过程中的摩擦阻力、传动件摩擦阻力、空气阻力以及绳与天轮相对滑动等条件下, 本文得到了支配提升容器、滚筒、有关各段钢丝绳变形规律及电动机运行的运动微分方程如下:

① 收稿日期: 1998-08-10; 修回日期: 1999-09-12

严世榕(1969-),男,博士研究生

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= g - \ddot{x}_2 + \ddot{x}_3 - EFx_1/[l_1(t) \cdot \\ &\quad (Q_z + Q + pl_1(t)/3)] \\ \ddot{x}_2 &= \ddot{x}_3 + (EFx_1/l_1(t) - \\ &\quad EFx_2/l_x)/m_2 \\ \ddot{x}_3 &= \{4M_m i \eta V[(v_t - \dot{x}_3)/v_t s_m + \\ &\quad s_m v_t/(v_t - \dot{x}_3)]D - \\ &\quad EF(x_2 - x_4)/l_x\}/m_3 \\ \ddot{x}_4 &= g - \ddot{x}_3 - \ddot{x}_4 - EFx_5/[l_5(t) \cdot \\ &\quad (Q_z + pl_5(t)/3)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 E 为钢丝绳的弹性模量, F 为绳的钢丝绳横断面总和, Q 为提升有效载荷, Q_z 为箕斗自重, $l_1(t)$ 为上提侧钢丝绳的悬垂高度, ρ 为绳每米质量, l_x 为位于两个滚筒间的那段绳的长度, m_2 为上天轮的变位质量, M_m 为电动机最大输出力矩, v_t 为电动机同步转速, s_m 为电动机最大力矩时转差率, m_3 为电动机、减速器及滚筒装置等化成滚筒圆周上的变位质量, m_4 为下天轮变位质量, $l_s(t)$ 为下放侧钢丝绳的悬垂高度, D 为滚筒直径, η 为减速器效率, i 为减速器速比。

由于式(1)的第三个方程是一个非线性微分方程, 故式(1)是一个五个自由度的非线性方程组。当考虑到提升过程上下侧绳长的变化, 这又是一个时变系数的微分方程组。在加速过程, 因采用多段电阻控制, 在不同段中, 参数等取值不同, 这个方程组又变成分段非线性的方程组。对于这样的微分方程组目前并没有很好的求解析解的办法, 一般都采用数值法求解。本文根据这个方程组, 采用基尔公式与阿当姆斯法相结合的方法, 利用 C 语言编制出计算机仿真程序, 并将仿真结果借助 PSPLOT 软件绘出。该仿真程序可适用于不同提升参数、不同大小提升设备的双箕斗缠绕式交流提升系统。

2 动力学仿真研究

本文分别对箕斗采用八段与六段电阻控制加速提升过程进行了计算机仿真, 对每种情况又分别进行了时间控制与力矩控制(即电流控

制) 仿真研究, 详细地研究了两容器的振动规律(即上提侧钢绳与下放侧钢绳的变形规律)、电动机的加速过程动态特性、输出力矩及与其它部件动态特性的关系, 还研究了位于天轮与滚筒间绳弦的变形规律等等。

仿真时采用如下的单水平提升参数: 井筒深度为 450 m, 悬垂高度为 500 m, 箕斗自重为 5 000 kg, 载重 6 000 kg, 绳每米重为 5.717 kg, 提升机为 2JK-3.5/11.5, 天轮为 TSH3 500/23.5, 电动机为 YR-800-12/1430 等。

2.1 采用时间控制时仿真

2.1.1 采用八段时间控制时仿真

八段控制指的是采用两段预备级, 六段加速控制级电阻。通过不断地切除各段串联在转子上的电阻, 使提升容器和提升机达到预定的最大提升速度。第一预备级仅仅是使绳被拉紧等, 第二预备级则使箕斗产生在装卸载曲轨里的初加速并达到一定的初速度; 第一到第六级为主加速级, 其平均加速度为运动学计算中的主加速度大小。当切除掉这些电阻后提升设备便按电动机的固有机特性曲线运行。

八段时间控制是指每段电阻的接通时间是依设计值取值的, 具体各段时间大小参考有关电机拖动的书籍计算得到。

时间控制是针对上述方程组中的所有方程的, 但因形式上仅式(1)的第三个方程含电机拖动力, 故这里仅写出这个方程, 它在不同时段的表现式分别为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_3 &= \{4M_m i \eta V[(v_t - \dot{x}_3)/v_t s_{m_{y2}} + \\ &\quad s_{m_{y2}} v_t/(v_t - \dot{x}_3)]D - \\ &\quad EF(x_2 - x_4)/l_x\}/m_3 \\ &\quad (t_{y2} \geq t \geq 0) \\ \ddot{x}_3 &= \{4M_m i \eta V[(v_t - \dot{x}_3)/v_t s_{m_1} + \\ &\quad s_{m_1} v_t/(v_t - \dot{x}_3)]D - \\ &\quad EF(x_2 - x_4)/l_x\}/m_3 \\ &\quad (t_{y2} + \Delta t_1 \geq t \geq t_{y2}) \\ &\quad \vdots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 t_{y2} 对应初加速时间, 它由卸载曲轨长度和初速度的大小决定; $s_{m_{y2}}$ 为此时段的转差率;

Δ_1 为第一主加速段时间, s_{m1} 为第一主加速段的转差率。同理, 可以写出这个方程第二、第三等在其它时段的表达式。

图2为滚筒运动规律和作用在电机上的等效拖动力矩变化图。其中, 图2(a)为加速度图, 图2(b)为力矩图。在时间0~3.125s内为初加速时间(电机运行在第二预备级上), 随着加速的进行和提升速度的增大, 电机给出的力矩在不断地减小, 但由于仍比作用在滚筒上的静力矩大, 故整个系统在这期间作加速运动。虽然在这期间力矩变化平缓, 但因刚启动时对提升系统的冲击和钢绳的弹性作用以及绳的长度的变化, 滚筒的加速度呈波动性减小。从3.125s起提升设备运行在第一加速级上, 直至6.4415s止。从力矩图可以清楚地看到, 当刚一进入第一加速级时, 由于切掉了第二预备级电阻, 力矩立刻呈跳跃性突变增加, 使得滚筒的加速度马上发生相应的跳跃性增加, 但随着滚筒速度的提高和提升钢绳长度的变化, 作用在滚筒上的力矩逐渐减少, 导致其加速度也逐渐减小。到了6.4415s后, 电机进入第二加速级工作, 此时因力矩的突然增加又使滚筒的加速度剧烈地增加并接着诱发新一轮剧烈的振动。8.3978s为第三级的起始点, 9.5517s为第四级的起始点, 10.2324s为第五级的起始点, 10.6339s为第六级的起始点, 10.8707s起开始按电动机固有机特性曲线运行。在11s左右滚筒便进入匀速运行阶段。

图3为这种情况下的上提重载侧绳的变形规律, 其中, 图3(a)为位移, 图3(b)为其加速度图。从变形图来看, 绳的变形总体在减少,

但一直在振动着。刚启动时由滚筒传来的加速力矩使绳一下子被突然拉长而诱发振动。到了初加速结束第一加速级刚开始时, 因力矩的突然增大且比刚开机时更大, 故绳的变形增大幅度很大。由于采用时间控制, 到第二级加速段开始时, 因力矩小于第一级开始时的值, 且绳变短了些, 激起的振幅小于第一级时对应的值。以后其它各级也有类似情况。

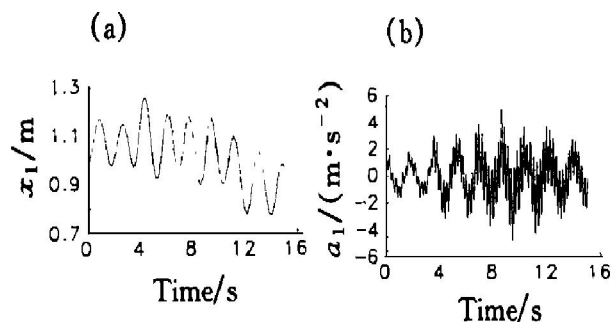


图3 x_1 位移与加速度

Fig. 3 Displacement and acceleration (x_1)

从图3的加速度图来看, 它的变化规律基本与变形规律相似, 但它的波形中的高频成分更多些。这是由于加速度是由外力直接决定的, 外力的变化马上在加速度上显示出来。在11s后左右, 当系统进入匀速区段后, 变形图和加速度图均显示振幅减弱趋势。

图4为下放空箕斗侧绳的变形规律图。它的变形随时间不断增加, 到加速结束时其平均变形达到刚开始时的3倍左右, 这是由于此时绳的悬垂高度约比刚开始时多1倍以上。从加速度图来看, 刚开始时加速力矩起主要作用, 且因绳较短, 振动频率高, 故初加速阶段, 变形与第一级加速段差不多情况下, 加速度明显

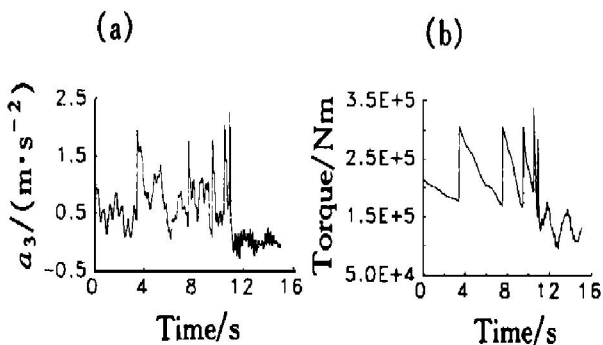


图2 滚筒加速度与力矩

Fig. 2 Drum motion and torque

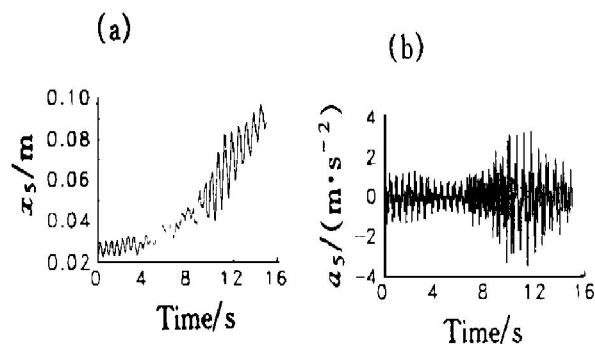


图4 x_5 位移与加速度

Fig. 4 Displacement and acceleration (x_5)

较后者大。到了第四级,第五级和第六级接连作用时,因其长度已超过了1倍左右,且外力连续而强有力的冲击使得其变形的幅值增加很快,加速度的振动幅值同样也猛增许多。

2.1.2 采用六段时间控制时仿真

与八段电阻控制相似,六段电阻控制采用两个预备级,四个主加速级。

图5~图7分别为六段控制时滚筒的运动规律与电机传给滚筒的力矩图、上提侧钢绳的变形图和下放侧钢绳的变形图。图5(b)为作用在滚筒上的力矩图,比较图2(b)与图5(b)这两图可以发现,四段加速情况比六段加速情况的力矩大,且变化幅度也大。第二预备级即初加速级与八段时相同,为此这一区段内,滚筒的运动规律及其上作用的力矩均与八段时相同。当然,上提载荷绳等各部件的变形和运动规律也同这一时间区内的八段控制时相同。除了六段控制时力矩突变次数少于八段控制时外,其它方面大致相同。从绳的变形图看,六段控制时其最大变形值及振动幅度均较八段控制时大,加速度图也大致如此。 x_5 的运动规律图表明,因没有象八段控制时在零点几秒内连

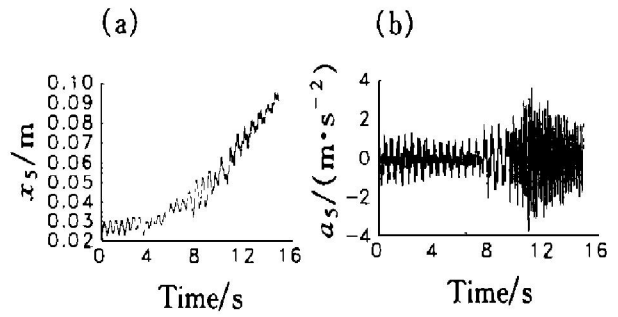


图7 x_5 位移与加速度

Fig. 7 Displacement and acceleration (x_5)

续遭受二三个力矩冲击,故在10s左右的振幅反而较八段控制时小,且在匀速区更快使振幅减小下来。其它方面基本与八段控制时相同。

2.2 采用力矩控制时仿真

与时间控制不同,力矩控制时将各主加速段拖动力矩限制在上下限范围内。在这种情况下,在非线性微分方程组中,仍只有第三个方程中的某些参数取值不同,其它方程形式不变。这个方程在相应加速段形式如下。

初加速段:

$$\ddot{x}_3 = \{4M_m i \nabla [(v_t - \dot{x}_3)/v_t s_{my2} + s_{my2} v_t / (v_t - \dot{x}_3)] D - EF(x_2 - x_4)/l_x\} / m_3$$

$$\text{当 } M_2 \leq 2M_m / [(v_t - \dot{x}_3)/(v_t s_{my2}) + s_{my2} v_t / (v_t - \dot{x}_3)] \leq M_1$$

第一主加速段:

$$\ddot{x}_3 = \{4M_m i \nabla [(v_t - \dot{x}_3)/v_t s_{m1} + s_{m1} v_t / (v_t - \dot{x}_3)] D - EF(x_2 - x_4)/l_x\} / m_3$$

$$\text{当 } M_2 \leq 2M_m / [(v_t - \dot{x}_3)/(v_t s_{m1}) + s_{m1} v_t / (v_t - \dot{x}_3)] \leq M_1$$

⋮

式中 M_1 , M_2 分别为上切换力矩和下切换力矩,它们由计算确定。

本文以八段电阻控制情况为研究对象来探讨这个问题,此时一切提升参数均与原八段时间控制时一样。图8~图10分别为这种工况下的滚筒的运动规律及作用其上的力矩、上提侧钢绳的变形规律和下放侧钢绳的变形规律的计算机仿真图。

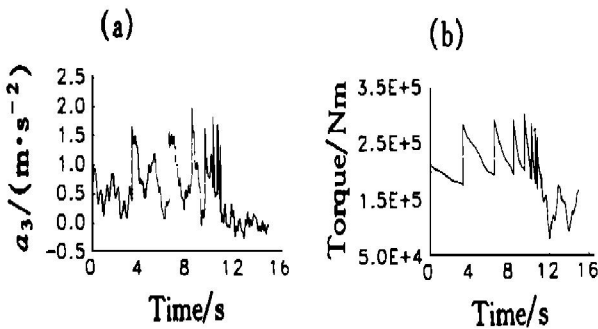


图5 滚筒加速度与力矩

Fig. 5 Drum acceleration and torque

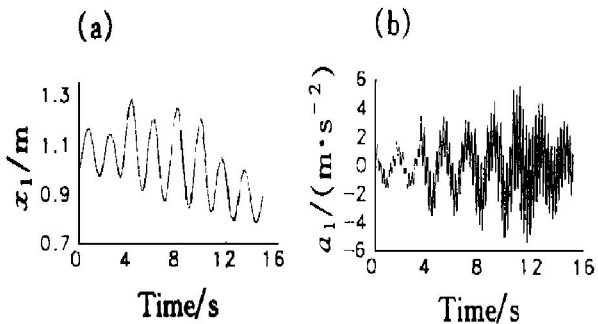


图6 x_1 位移与加速度

Fig. 6 Displacement and acceleration (x_1)

首先来看看这时滚筒是如何运动的(见图 8)。这种情况下,电机转速波动较时间控制时明显些。从力矩图看,各段力矩的最大值与最小值基本都相同,最大值没有八段时第四加速级时大,最小值也没八段时第五级第六级那么小;且因进入自然段时力矩较八段时大,故接着引起的振动较八段时大些。

从该图中的加速度图看,除了初加速区与时间控制时完全相同外,其它也大致相同,但是,在加速后期,因时间控制时力矩小于电流控制,且提升载荷还减少了一些,故电流控制时后期,加速度比时间控制时大。

图 9 表示 x_1 的变化规律。对比该图与图 3 可以看出,变形规律基本相同,但因滚筒在加速后期的加速度较时间控制时大,故相应地在同一时间段,上提侧绳的变形及加速度均比时间控制时大。对于 x_5 而言,初加速阶段不论是变形还是加速度均与时间控制时相同(图 10)。到加速后期,虽然滚筒的加速度较时间控制时大,但因下放侧钢绳的受力随滚筒加速度的增大而减小(只要不突然变化引起强烈冲击),故其变形的加速度,速度及其变形均较

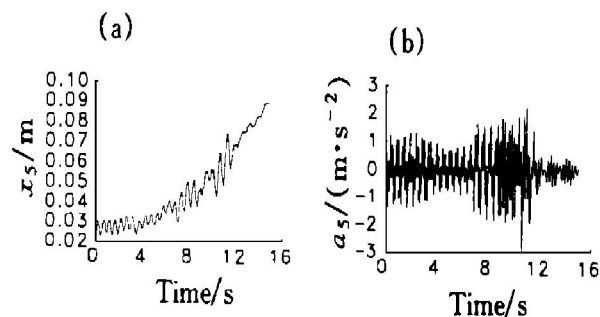


图 10 x_5 位移与加速度

Fig. 10 Displacement and acceleration (x_5)

时间控制时小一些。

3 结语

(1) 采用不同数目加速段对应不同的受力状态和运动情况,加速段数少不利于提升设备工作。

(2) 采用时间控制与电流(力矩)控制效果有些差异。时间控制时由于载荷逐渐变小会引起提升速度高于拖动力矩下限值所对应的速度,进而引起其后一级启动点的力矩下降,从而降低了上提侧绳加速后期的变形等。力矩控制时则因拖动力矩不变,提升过程载荷减少会引起滚筒加速度的提高,进而引起上提侧绳的变形增大等。

(3) 上提侧绳的变形规律与下放侧绳的变形规律不太一样,这是由于上提侧绳子长度大于下放侧,且为重载,加速度对两绳的作用效果相反。

(4) 本文的分析结果是在引进机电耦合情况下得到的,这是过去单纯考虑机械部分或电气部分时无法得到的,即必须同时考虑机电系统才能较全面地分析问题。

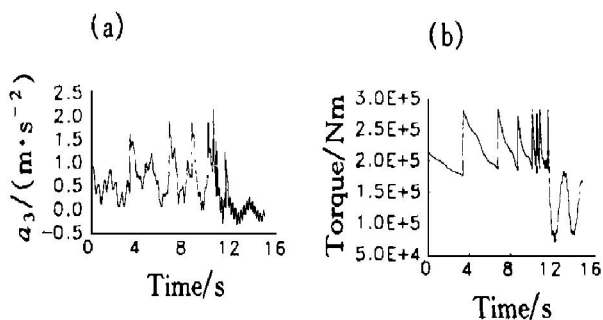


图 8 滚筒加速度与力矩

Fig. 8 Drum acceleration and torque

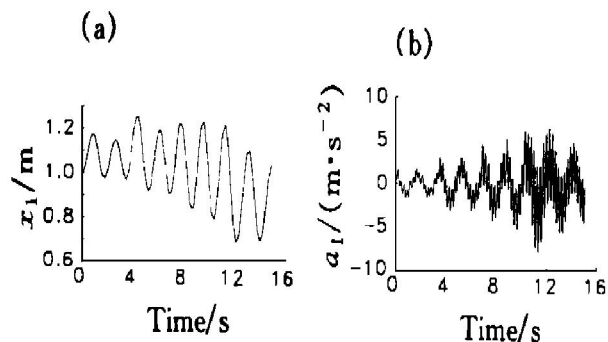


图 9 x_1 位移与加速度

Fig. 9 Displacement and acceleration (x_1)

REFERENCES

- 1 Yan Shirong(严世榕) and Wen Banchun(闻邦椿). J Chinese Coal Bulletin(煤炭学报), 1998, (5): 530~ 534.
- 2 Yan Shirong(严世榕) and Wen Bangchun(闻邦椿). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(Suppl. 2): 618~ 622.

- 3 Yan Shirong(严世榕) and Wen Bangchun(闻邦椿). J Metal Mine(金属矿山), 1998, (3): 15~ 18.
- 4 Yan Shirong(严世榕) and Wen Bangchun(闻邦椿). J Coal Machinery(煤矿机械), 1998, (3): 4~ 6.
- 5 Yan Shirong(严世榕) and Wen Bangchun(闻邦椿). J Mine Machinery(矿山机械), 1998, (9): 38~ 40.
- 6 Yan Shirong(严世榕) and Wen Bangchun(闻邦椿). Metallurgical Equipment(冶金设备), 1998, (5): 12 ~ 14.
- 7 Yu Penfei(俞鹏飞). J Metal Mine(金属矿山), 1996, (2): 20~ 24.
- 8 Xuan Bingda(孙炳达). Electricity Transmission(电气传动), 1998, (1): 15~ 20.
- 9 Xie Guilin(谢桂林), HuanZhang(黄章) and Liu Yunxiong(刘允閔). Driving and Control of Electricity in Mine(矿山电力拖动与控制). Xuzhou: Press of Coal Industry University of China, 1986.
- 10 Ren Liwei(任礼维) and Lin Ruiguan(林瑞光). Elementary Electricity Motor and Driving(电机与拖动基础), Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994.
- 11 Xuan Yurong(孙玉蓉) and Zhou Fakong(周法孔). Shaft Winding Equipment(矿井提升设备). Beijing: Coal Industry Press, 1995.

Analysis of dynamics for mechanical-electrical system of skip winding being accelerated

Yan Shirong, Wen Bangchun

*Department of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China*

Abstract: The time-variant & nonlinear dynamic model for the mechanical-electrical system of the skip winding equipment being accelerated was put forward firstly, in which an AC motor was controlled through multi-pieces of resistances in series. On the basis of the model and by using computer simulation technique, the kinematic & dynamic laws of the winding vehicles and the winding engine with 8-pieces and 6-pieces of resistances in series were gotten respectively. The proposed model and ways as well as the discovered phenomena and laws are fresh and can be the theoretical basis of improving the old type of winding system, especially the one improved with computer control technique, and it is helpful greatly to design other forms of winding system driven by AC motors or DC motors.

Key words: dynamics of mechanic-electric system; skip winding; acceleration course

(编辑 何学锋)