

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801019



高速电梯提升系统纵向振动建模与分析

吴虎城^{1,2}, 张德坤¹, 程琼²

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 江苏建筑职业技术学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了分析电梯轿厢的振动规律,以高速电梯提升系统作为研究对象,利用 Hamilton 原理建立纵向振动方程,采用 Galerkin 方法对振动方程进行离散化处理. 首先,将某高速电梯实际运行状态作为输入参数,获得轿厢的纵向振动响应;然后,通过机械系统动力学自动分析(ADAMS)建模仿真进行验证. 结果表明:基于柔性体弹性变形理论建立的提升系统,其纵向振动模型可靠性较高,可较好地反映轿厢的振动特性;电梯提升过程中,轿厢的纵向振动响应越来越大;同等条件下,空载提升的轿厢纵向振动响应比满载提升强烈.

关键词: 高速电梯; 轿厢; 纵向振动特性; 柔性体弹性变形理论; ADAMS 模型

中图分类号: TH 211.06; TB 123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)05-0654-05

Modeling and Analysis of longitudinal Vibration of High-Velocity Elevator Hoisting System

WU Hucheng^{1,2}, ZHANG Dekun¹, CHENG Qiong²

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Mechanical and Electrical Engineering College,
Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The vibration rule of lift car was analyzed with a high-velocity elevator hoisting system. The longitudinal vibration equation was established based on Hamilton's principle and the Galerkin method was adopted for its discretization. Using the actual running status of a certain high-velocity elevator as the input parameter, the longitudinal vibration response of lift car was obtained and validated it by means of automatic dynamic analysis of mechanical systems (ADAMS) modeling and simulation. The results show that: the longitudinal vibration model of hoisting system established based on the elastic deformation theory for flexible body has a higher reliability and can reflect the vibration performance of lift car better; during the process of elevator hoisting, the longitudinal vibration response of lift car becomes higher; under the same conditions, the longitudinal vibration response of lift car at zero load is stronger than that at full load.

Keywords: high-velocity elevator; lift car; longitudinal vibration performance; flexible body elastic deformation theory; ADAMS modeling

随着曳引式高速电梯提升速度的加快,高速电梯提升系统的柔性特征便越加显著,主要体现在电梯轿厢的振动响应变大^[1],而轿厢的振动特性将直接影响到电梯提升的安全性与舒适性. 国家标准将轿厢

收稿日期: 2018-01-06

通信作者: 吴虎城(1978-),男,副教授,博士研究生,主要从事现代机械设计、矿山设备可靠性的研究. E-mail: wuhucheng@jsjz.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375479);江苏省住房和城乡建设厅科技基金资助项目(ZD201703);江苏省徐州市科技计划资助项目(KC16SG282)

的振动响应作为评价高速电梯提升舒适性的重要指标之一^[2]. 实际运行过程中, 轿厢振动响应主要包括纵向振动与水平振动, 其振动响应数值能够直接反映电梯是否正常运行^[3]. 现场检测发现, 轿厢的振动响应主要是纵向振动引起的^[4], 故研究提升系统纵向振动的建模与响应对电梯的减振设计有着重要的意义. 目前, 国内外专家对柔索驱动建模的研究主要集中在参数的离散建模与分布参数的连续建模 2 种方法^[5-7]. 武丽梅等^[8]、王艳军等^[9]采用集中参数的离散建模方法, 建立不同自由度的电梯提升系统力学模型, 重点研究高速电梯在不同速度、不同载荷条件下的固有频率与振动响应, 为进一步的动力学研究提供基础. 张长友等^[10]建立电梯提升系统多自由度耦合振动方程, 阐述电梯运行过程的各阶固有频率的求解方法. 文献^[11-12]将矿井提升钢丝绳看作离散的质量-弹簧-阻尼系统, 研究提升系统在提升过程的动态响应问题. 对于高速电梯而言, 提升距离越大, 提升钢丝绳的质量也越大. 由于钢丝绳本身的刚性变形与弹性变形相互影响, 导致桥厢和钢丝绳对外界的干扰更为敏感, 整个提升系统的振动也变得异常复杂. 在这种情况下, 再将提升系统作为刚性系统来对待就不合适了. 饶勇^[13]、张鹏^[14]、吴娟等^[15]将曳引钢丝绳作为一个柔性的变长度弦线, 采用弦线弹性变形理论对提升系统进行建模, 重点分析各个参数对提升系统的影响, 并提出各自的减振方法. 本文在上述研究的基础上, 继续考虑曳引钢丝绳变形所产生的非线性影响因素, 并将平衡钢丝绳等效在桥厢上, 建立高速电梯提升系统纵向振动偏微分方程, 对其进行数值求解, 以获得不同提升载荷对纵向振动的影响; 通过机械系统动力学自动分析 (ADAMS) 的建模仿真, 验证振动方程的可靠性, 以为电梯的减振设计提供依据.

1 提升系统振动建模与求解

1.1 纵向振动建模

高速电梯提升系统主要由曳引机、曳引钢丝绳、桥厢桥架、导向轮、对重、平衡钢丝绳及张紧机构等组成, 其结构示意图和动力学模型, 如图 1 所示. 图 1 (b) 中: $l(t)$ 为提升距离; m 为重物质量; $u(x, t)$ 为纵向振动位移; H 为整体提升距离; $x(t)$ 为曳引钢丝绳在 x 处的位移.

为了方便建模与计算, 忽略平衡钢丝绳的振动影响, 将平衡钢丝绳的质量等效在桥厢上. 整个提升过程中, 不考虑钢丝绳的横向振动和扭转影响, 多根提升钢丝绳视为具有等效截面的单根钢丝绳, 并且其物理参数在提升过程保持不变, 同时, 忽略提升井道气流对提升系统的影响.

图 1(b) 所示的力学模型, 其提升系统的动能为

$$K = \frac{1}{2} \rho \int_0^{l(t)} \left[v + \frac{du}{dt} \right]^2 dx + \frac{1}{2} m_e \left[v + u_t \Big|_{x=l(t)} \right]^2. \quad (1)$$

式(1)中: $\frac{1}{2} \rho \int_0^{l(t)} \left[v + \frac{du}{dt} \right]^2 dx$ 为曳引钢丝绳动能; $\frac{1}{2} m_e \left[v + u_t \Big|_{x=l(t)} \right]^2$ 为轿厢动能; m_e 为等效在轿厢上的质量, $m_e = m + \rho(H - l(t))$; $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}$.

曳引绳的弹性势能为

$$U = \int_0^{l(t)} \frac{1}{2} EA \epsilon^2 dx. \quad (2)$$

式(2)中: ϵ 为曳引钢丝绳纵向应变. 曳引绳在运行过程中的阻尼耗能为

$$\delta W = \int_0^{l(t)} \left(\mu \cdot EA \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \delta u dx. \quad (3)$$

式(3)中: μ 为滑动摩擦系数. 将式(1)~(3)代入 Hamilton 方程中, 则有

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta L dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta(K - U) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0. \quad (4)$$

由于曳引钢丝绳长度 $l(t)$ 随时间变化, 在变分和积分运算时, 需使用 Leibniz 公式和分部积分法, 得

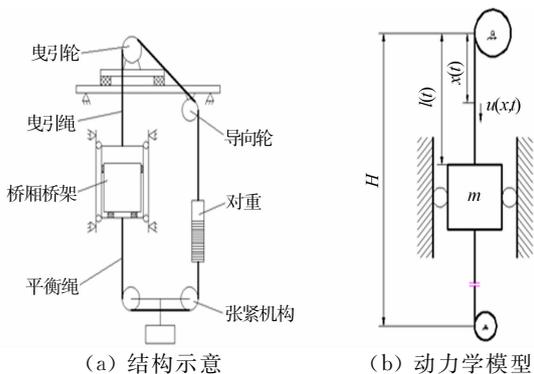


图 1 高速电梯提升系统模型

Fig. 1 High-speed elevator system model

到曳引钢丝绳纵向振动微分方程,即

$$\rho(a + u_{t,t} + au_x + 2vu_{x,t} + v^2u_{x,x}) - EAu_{x,x} - \mu EAu_x = 0, \quad 0 < x < l(t). \quad (5)$$

式(5)中:下角标 x 和 t 表示对 u 的偏导数.

与此同时,获得相应的边界条件为

$$m(a + u_{t,t}) + EAu_x = 0, \quad x = l(t).$$

由于曳引钢丝绳属于连续体,对应的式(5)所表示的偏微分方程组具有无穷多的自由度,且很多参数具有时变特性,因此,其解析解求解困难.

采用 Galerkin 方法将无限维偏微分方程离散为有限维的常微分方程,通过数值方法进行求解.为了方便方程离散,引入一个无量纲参数 ξ ,将提升钢丝绳相对于 x 的时变域 $[0, l(t)]$ 归一化为相对于 ξ 的固定域 $[0, 1]$,即 $\xi = \frac{x}{l(t)}$.从而,纵向振动位移 $u(x, t)$ 表示为 $w(\xi, t) = u(x, t)$.因此,提升系统振动方程可转化为

$$\rho \left[a + w_{t,t} + \frac{2v}{l}(1 - \xi)w_{t,\xi} \right] + \rho \frac{v^2}{l^2}(\xi - 1)^2 w_{\xi,\xi} + \rho \left(\frac{a}{l} - \frac{2v^2}{l^2} \right) (1 - \xi)w_\xi - \frac{EA}{l^2} w_{\xi,\xi} = 0. \quad (6)$$

边界条件则转换为

$$m(a + w_{t,t}) + \frac{EA}{l} w_\xi = 0, \quad x = l(t). \quad (7)$$

根据弦线运动特性,可以运用振型叠加法求解振动位移解.假设分布式参量 $w(\xi, t)$ 表达为

$$w(\xi, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi_i(\xi). \quad (8)$$

式(8)中: n 为所包含的模态数; $q_i(t)$ 为广义坐标; $\psi_i(\xi)$ 为第 i 阶试函数.同时,对式(8)中 ξ 和 t 分别求微分,将结果代入式(6),(7)中,最后可得

$$\begin{aligned} & \rho a + \rho \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi_i(\xi) + \frac{2\rho v}{l}(1 - \xi) \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi'_i(\xi) + \\ & \frac{\rho v^2}{l^2}(\xi - 1)^2 \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi''_i(\xi) + \rho \left(\frac{a}{l} - \frac{2v^2}{l^2} \right) (1 - \xi) \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi'_i(\xi) - \\ & \frac{EA}{l^2} \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi''_i(\xi) - \frac{2\mu EA v}{l^3} \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi''_i(\xi) - \\ & \frac{\mu EA}{l^2} \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi''_i(\xi) + \frac{\mu EA v \xi}{l^3} \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi'''_i(\xi) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

$$ma + m \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi_i(1) + \frac{EA}{l} \sum_{i=1}^n q_i(t) \psi'_i(1) = 0, \quad x = l(t). \quad (10)$$

对式(9),(10)两边同时左乘 $\psi_j(\xi)$,并将两边同时在 $\xi = [0, 1]$ 范围内积分,可将偏微分方程离散化为常微分运动方程组,即

$$\mathbf{M}(t) \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}(t) \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}(t) \mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t). \quad (11)$$

式(11)中: $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ 为广义坐标向量; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}, \mathbf{F}$ 分别为质量、阻尼、刚度和力的广义矩阵.

1.2 振动方程求解

为真实模拟电梯在整个提升运动过程中的运动状态,将其提升过程分为 7 个阶段,即加速度值由 0 减至最小、保持不变、增至零值、匀速、加速度增至最大、保持不变、减至零值.提升过程的最大加速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最大速度为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大提升距离为 108 m.定义每个运行阶段的时长,通过 Matlab 软件可获得电梯提升过程的运行状态曲线,如图 2 所示.图 2 中: a 为加速度; v 为速度; t 为时间.

该高速电梯额定载荷 1 600 kg,由 8 根直径为 13 mm 的钢丝绳提升,每根钢丝绳的线密度为 $0.575 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,弹性模量为 85 GPa,导靴刚度为 $100 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,阻尼系数为 $300 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$.将相关参数代入上述振动微分方程求解,可获得轿厢空载和满载工况时的纵向振动位移曲线,如图 3 所示.

由图 3 可知:2 种提升工况下的运行过程中,轿厢振动响应越来越大,当轿厢接近顶端时,振动响应异常强烈,这与实际乘坐电梯的感觉相符.当满载工况时,振动的最大位移接近 4 mm;而当空载工况

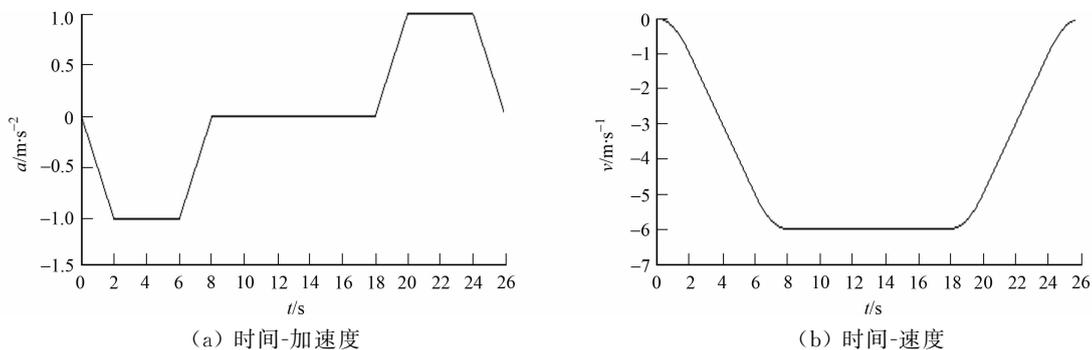


图 2 电梯运行状态曲线

Fig. 2 Movement profile curves of elevator

时,振动的最大位移约为 6 mm. 在空载工况下,轿厢的振动响应较满载工况强烈. 导致这种现象的主要原因是,提升质量增加,引起振动方程中的纵向广义刚度减小,相应的提升系统纵向振动响应也随之减弱.

2 提升系统振动仿真与分析

高速电梯提升系统的整体结构非常复杂,很难直接在 ADAMS 中建立整套系统的模型. 可以采取先在下一代产品开发系统(NX)中建立部分部件,再导入 ADAMS 中进行完善模型. 提升系统除去提升钢丝绳,其余部件均在 NX 中事先建好模型.

由于曳引钢丝绳作为典型的柔性体,不能直接建立真实模型,可以通过离散的方法单独对其进行建模. 在 ADAMS/Cable 模块中,通过依次输入锚固点、滑轮、绳索的参数,即可快速生成绳索及滑轮模型. 绳索模块中,建立的绳索有简化和离散 2 种模型,其中,简化模型忽略了绳索的质量与摩擦力,不能仿真绳索系统的振动情况,所以,采用离散模型进行仿真计算. 建立的提升系统仿真模型,如图 4 所示.

轿厢纵向振动 ADAMS 仿真结果与振动微分方程求解对比,如图 5 所示. 由图 5 可知:两者的振动位移变化趋势接近,上述提升系统纵向振动模型具有较好的可靠性.



图 4 电梯提升系统 ADAMS 模型

Fig. 4 ADAMS model of elevator hoisting system

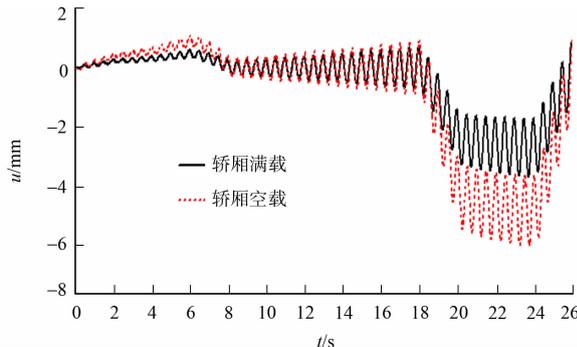


图 3 轿厢空载和满载时的纵向振动位移

Fig. 3 Longitudinal vibration displacement of a lift car under zero load and full load

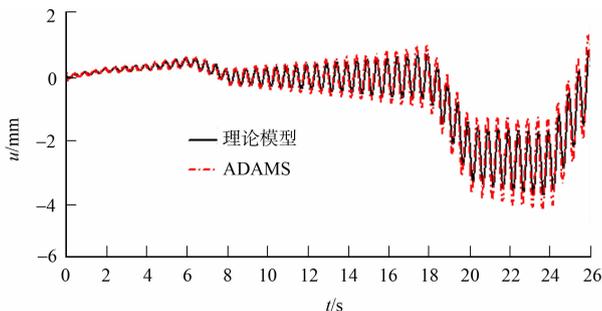


图 5 仿真结果验证

Fig. 5 Verification of simulation result

3 结论

考虑高速电梯提升系统曳引钢丝绳变长度的时变特性,利用 Hamilton 原理建立提升系统纵向振动偏微分方程,并给出离散化数值求解方法. 以某高速电梯提升系统实际参数作为输入,获得轿厢提升过程的纵向振动响应,并与 ADAMS 模型仿真结果进行对比,得到以下 3 点主要结论.

- 1) 高速电梯轿厢提升过程中,纵向振动响应越来越大,接近顶端时,振动响应异常剧烈.

2) 满载与空载 2 种工况下,轿厢的振动响应变化趋势一致。其中,满载工况轿厢最大振动位移接近 4 mm;空载工况轿厢最大振动位移约为 6 mm。即空载工况轿厢的振动响应较满载工况强烈。

3) 轿厢振动微分方程求解结果与 ADAMS 模型仿真结果较为相近,这表明高速电梯轿厢纵向振动理论模型是可靠的,振动方程的建立与求解方法将为进一步提升系统的减振设计提供依据。

参考文献:

- [1] ZHANG Peng,BAO Jihu,ZHU Changming. Dynamic analysis of hoisting viscous damping string with time-varying length[J]. Journal of Physics Conference Series,2013,448(1):012011. DOI:10.1088/1742-6596/448/1/01211.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 电梯技术条件: GB 10058—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009:10-12.
- [3] 陈建灿,刘晓梅. AR 双谱的电梯机械故障诊断[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2013,34(3):258-261. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2013.03.0258.
- [4] 傅武军,朱昌明,张长友. 单绕式电梯动力学建模及仿真分析[J]. 系统仿真学报,2005,17(3):635-638. DOI:10.3969/j.issn.1004-731x.2005.03.034.
- [5] 包继虎,张鹏,朱昌明. 变长度柔性提升系统钢丝绳横向振动建模及分析[J]. 上海交通大学学报,2012,46(3):341-345. DOI:1006-2467(2012)03-0341-05.
- [6] KIMURA H,ITO H,FUJITA Y, *et al.* Forced vibration analysis of an elevator rope with both ends moving[J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the Asme,2007,129(4):471-477. DOI:10.1115/1.2748471.
- [7] GOROSHKO O A. Evolution of the dynamic theory of hoist ropes[J]. International Applied Mechanics,2007,43(1):64-67. DOI:10.1007/s10778-007-0007-9.
- [8] 武丽梅,巩煜琰,李雪枫. 曳引式电梯机械系统垂直振动动态特性分析[J]. 机械设计与制造,2007,56(10):16-18. DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2007.10.007.
- [9] 王艳军,任立刚,于杰. 电梯系统动态固有频率分析[J]. 机械,2010,37(1):35-37. DOI:10.3969/j.issn.1006-0316.2010.01.011.
- [10] 张长友,朱昌明. 电梯系统动态固有频率计算方法及减振策略[J]. 系统仿真学报,2007,19(16):3856-3859. DOI:10.3969/j.issn.1004-731x.2007.16.058.
- [11] WANG Dagang. Effect of various kinematic parameters of mine hoist on fretting parameters of hoisting rope and a new fretting fatigue test apparatus of steel wires[J]. Engineering Failure Analysis,2012,22(2):92-112. DOI:10.1016/j.engfailanal.2012.01.008.
- [12] WANG Dagang,ZHANG Dekun,GE Shirong. Effect of terminal mass on fretting and fatigue parameters of a hoisting rope during a lifting cycle in coal mine[J]. Engineering Failure Analysis,2014,36(1):407-422. DOI:10.1016/j.engfailanal.2013.11.006.
- [13] 饶勇. 高速电梯曳引系统多向耦合振动建模与减振设计技术及其应用[D]. 杭州:浙江大学,2015:15-19.
- [14] 张鹏. 高速电梯悬挂系统动态性能的理论及实验研究[D]. 上海:上海交通大学,2007:18-26.
- [15] 吴娟,寇子明,梁敏,等. 摩擦提升系统钢丝绳纵向-横向耦合振动分析[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(5):885-892. DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.000318.

(编辑:李宝川 责任编辑:陈志贤 英文审校:崔长彩)