

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.018

乘客电梯曳引机支撑座系统的动态特性分析

陈栋栋,汪 剑,杨凯杰

(浙江省特种设备检验研究院 电梯检验所, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对乘客电梯在不同乘客负载情况下所表现不同动态响应特性问题,利用数值模拟技术对2.5 m/s的高速电梯支撑座系统进行了研究。采用ANSYS有限元软件中的模态叠加法,在分析了支撑座系统本身固有频率后,计算了轿厢在常见乘客满载、半载和空载3种工况下时支撑座系统的动态响应大小,建立了外界激励频率与支撑座系统动态响应间关系,提出了负载变化对支撑座系统动态响应的规律。研究表明,支撑座中的3根工字钢梁横向位移响应明显,且动态响应特性规律基本一致;随着轿厢中乘客人数增加,支撑座系统工字钢动态响应特性越加明显;3种工况下,外界激励频率均在高于一阶固有频率附近发生最大的动态响应位移。支撑座系统动态特性研究为工程人员合理的支撑座结构设计提供了一定的理论依据。

关键词: 乘客电梯; 支撑座系统; 动态响应

中图分类号: TH39; TH113.1; TP24 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0760-04

Dynamic characteristic analysis for support seat system of passenger elevator

CHEN Dong-dong, WANG Jian, YANG Kai-jie

(Elevator Department, Zhejiang Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at different dynamic characteristics of passenger elevator in different number of passenger, support seat system of 2.5 m/s high-speed-elevator was studied through the numerical simulation technique. Using mode superposition method in ANSYS finite element software, after the analysis of nature frequency for support seat system, the performance of dynamic was computed which the analysis was in three operating condition of elevator car, respectively, full-load, half-load and no-load, the relationship between external excitation frequency and dynamic performance was built, and the influence law of dynamic response was offered as the load changed. The results indicate that transverse displacement responses are obvious for the three I-beams of support seat system, and dynamic responses are basically identical. As the passengers increase in the car, the degree of the dynamic response of the I-beams is increased. Under the three usual operating conditions, the most degree of dynamic response is happened which external excitation frequency are beyond the first step natural frequency. The study of dynamic characteristics provides a theoretical basis for engineers to design a reasonable constructor of support seat system.

Key words: passenger elevator; support seat system; dynamic response

0 引 言

曳引机支撑座系统主要用来支撑整个电梯运载负荷,其几乎承受全部轿厢、对重与乘客负载带来的弯曲应力^[1]。电梯正常运行时,支撑座的振动通过曳引钢丝绳传递给轿厢,影响乘客舒适性。

实验研究表明电梯振动具有强的谐波性,且与电梯系统固有频率有密切关系^[2]。Nai K等人^[3]通过对电气驱动系统、绳索系统和轿厢系统等进行综合分析,建立了10自由度离散质量模型,推导得到电梯动态分析方程,实验证明有效。Okamoto K I等人^[4]则深入研究了电梯导轨3种可能扰动模式对电梯动态特性的影响。国内很多学者从理论、实验、数值模拟角度

收稿日期: 2014-01-03

作者简介: 陈栋栋(1987-),男,浙江丽水人,主要从事机械结构设计及优化方面的研究. E-mail:hacklehen@qq.com

对电梯动态特性进行深入研究,如华南理工大学的杨海燕^[5]的曳引系统有限元动态性能研究,沈阳航空工业学院的武丽梅等^[6]的曳引式电梯机械系统垂直振动动态特性分析,浙江大学的刚宪约^[7]的曳引电梯系统动态理论及动力学参数优化方法研究等。

曳引式乘客电梯随着载客人数不同而表现出不同的运动特性,本研究通过深入研究支撑座系统的动态响应规律,为工程人员合理的机构设计提供一定的理论依据。

1 曳引机支撑座系统

曳引机支撑座系统主要由两根工字钢组成,其大小、跨度根据不同规格负载、机房空间等情况而变化。同时,不同品牌电梯厂商对支撑座设计也不尽相同。目前,使用较多的为非复绕式分布的电梯结构,即电梯曳引钢丝绳未绕曳引轮与导向轮间一圈以上^[8]。为了减少曳引轮槽的磨损,曳引钢丝绳通过对重反绳轮、轿顶反绳轮绕回到曳引机支撑座上,即其曳引比为2:1。非复绕式2:1电梯系统结构分布情况如图1所示。其中,曳引系统主要由曳引驱动电机、减速箱、曳引轮、制动器等组成。由图1可见,曳引系统直接安装在支撑座系统上,通过橡胶垫进行减振。支撑座系统除受曳引系统和导向轮的自重外,更重要的是受来自电梯整个轿厢系统与对重系统的自身载荷重力,通过曳引钢丝绳传递作用在支撑座系统上。因而,支撑座系统的稳定性直接影响了电梯的舒适运行。

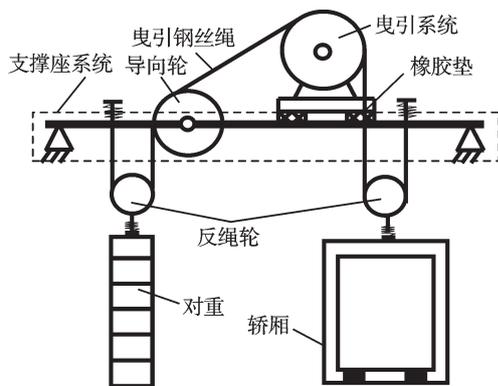


图1 非复绕式2:1电梯系统结构示意图

2 梁动态分析理论

本研究通过ANSYS软件对支撑座系统进行动态特性分析,其利用模态分析理论与谐响应分析理论进行有限元法计算。

2.1 模态分析理论

曳引机支撑座系统通过几根长跨度的工字钢来

承受绝大部分运行作用力。根据有限元法,支撑座系统进行离散化处理,应用最小势能原理导出结构运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{a}\} + [C]\{\dot{a}\} + [K]\{a\} = \{F\} \quad (1)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ —结构整体质量、阻尼及刚度矩阵; $\{\ddot{a}\}$, $\{\dot{a}\}$, $\{a\}$ —结构离散化后有限元节点的加速度、速度和位移; $\{F\}$ —作用在结构上的外力矢量。

当外力矢量 $\{F\}=0$ 时,则结构处于自由振动状态。此时,结构运动微分方程体现了结构本身固有特性,即频率与振型。

2.2 谐响应分析理论

谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间按正弦(简谐)规律变化载荷时稳态响应的一种技术^[9]。其通用的运动方程为:

$$(K - \omega^2 M + i\omega C) \cdot (\varphi_1 + i\varphi_2) = F \quad (2)$$

式中: C —结构阻尼矩阵; ω —振动频率; i —外激振载荷数; φ_1 , φ_2 —模态; F —外载荷激振力矩阵。

3 曳引机支撑座系统分析模型

3.1 实体模型简化及工程参数

目前,各品牌电梯公司支撑座系统绝大多数由工字钢梁组成来承担整个电梯运行时产生的作用力。本研究选取安装在25层住宅楼的2.5 m/s高速乘客电梯曳引支撑座系统进行研究。通过Solidworks进行实体三维建模,将IGS格式模型导入到ANSYS Workbench中进行分析,模型显示如图2所示。电梯曳引系统由多个部件组成,考虑分析效率,将曳引系统与导向轮部件通过质量点形式作用在支撑座系统上来简化模型(支撑座系统三维模型示意图如图2所示)。简化的模型主要由两根35号(1#与2#)和一根22号(3#)工字钢及其4个支撑橡胶垫、2个钢丝绳端板与1个挡绳板等组成。曳引钢丝绳通过对重反绳轮与轿顶反绳轮绕回到支撑工字钢上,并作用在钢丝绳端板上。

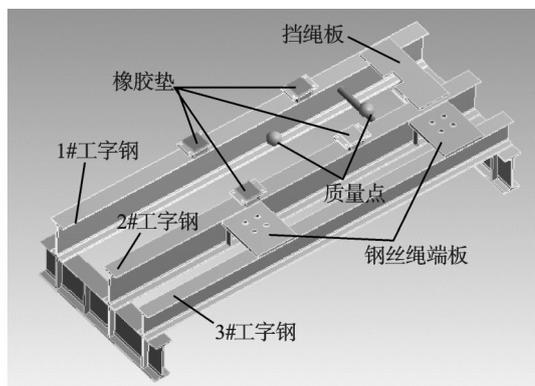


图2 支撑座系统三维模型示意图

为了防止轿厢制动时刚性冲击,在钢丝绳端部连接弹簧。整个电梯系统运行所涉及的主要工程参数如表1所示。

表1 电梯系统主要工程参数

序号	参数名称	数值
1	电梯额定速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.5
2	曳引机额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	720
3	曳引轮半径/m	0.35
4	支撑座跨度/m	3.09
5	支撑座泊松比	0.3
6	支撑座弹性模量/Pa	2.1×10^{11}
7	曳引系统质量/kg	655
8	导向轮质量/kg	142
9	额定载荷/kg	1 350
10	轿架质量/kg	750
11	轿厢质量/kg	900
12	平衡重质量/kg	2 270
13	曳引机橡胶垫数目/根	4
14	对重轮质量/kg	125
15	轿顶轮质量/kg	142
16	橡胶垫弹性模量/Pa	6.5×10^6
17	橡胶垫泊松比	0.47

3.2 有限元模型及边界条件

本研究通过Solidworks建立的三维实体模型导入到ANSYS中,根据表1进行材料参数分配,然后进行有限元网格划分。有限元动态特性分析选取模态叠加法,首先对支撑座系统进行模态分析,得到各阶固有频率及振型,建立在各阶特性基础上,叠加得到支撑座系统在分析频率范围内的动态响应特性。

本研究根据力平衡方程及乘客电梯部件的几何位置关系,得到了作用在曳引系统底座与钢丝绳端板上的力分布情况。乘客电梯正常额定运行时,电梯系统处于动平衡状态,在有限元动态特性分析中,将作用力施加在相应作用点上,边界条件加载如图3所示,边界载荷力大小与方向如表2所示。

4 计算结果分析

本研究计算了曳引机支撑座系统本身固有频率;同时,考虑轿厢负载随乘客人数变化而不同,因此主要计算了轿厢在常见的空载、半载及满载3种工况下的动态谐响应特性。

4.1 模态分析结果

本研究通过模态分析得到支撑座系统的固有频率,当外界激励与支撑座系统本身固有频率接近时,会产生强烈振动,即所谓共振^[10]。电梯作为建筑物的

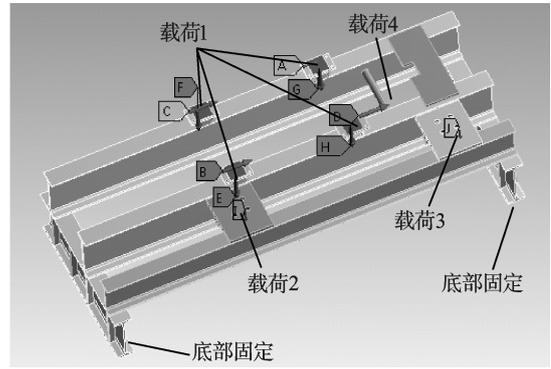


图3 边界条件加载示意图

表2 边界载荷力大小与方向

运行状态	载荷 1/N	载荷 2/N	载荷 3/N	载荷 4/N
空载	6 500(16.5°)*	8 250#	11 980	7 800(71°)
半载	7 317.5(15.5°)	12 335	11 980	7 800(71°)
满载	8 137.5(13°)	15 170	11 980	7 800(71°)

注:“*”——垂直工字钢横截面内与重力方向夹角;“#”——重力方向
运输工具,其驱动电机频繁起动与制停,产生的激励直接作用在支撑座系统上;支撑座系统激励振动通过钢丝绳传递给轿厢,导致乘客的不适感。模态分析结果可用来评判驱动电机运行是否会引起支撑座系统共振。

笔者通过研究计算了支撑座系统前6阶固有特性,各阶固有频率结果如表3所示。由表3可知,各阶固有频率随阶数增加而增加,一阶到二阶跨度最大,一定程度上也减少了共振频率带。电梯匀速运行时,驱动电机额定旋转频率为12 Hz(额定转速为720 rad/min)。可见,电梯启动与制停时旋转频率相对较远离支撑座系统本身固有频率,但是,驱动电机额定工作频率比较接近一阶固有频率,有引起共振的危险,需要引起注意及进一步分析。

表3 各阶固有频率计算结果

阶数/阶	1	2	3	4	5	6
f/Hz	13.332	36.742	42.676	44.009	48.815	59.239

4.2 谐响应分析结果与分析

本研究采用模态叠加法对电梯运行时常见的空载、半载与满载3种工况进行动态特性研究。电梯运行振动复杂,对于中高速电梯(额定速度大于2 m/s)尤其明显,其受到井道中绕流的冲击、曳引系统偏心、T型导轨安装精度等影响,因而,支撑座系统受到力为随时间变化的动态力^[11]。考虑到整个系统,笔者统一分析在不同工况下,支撑座系统受外界同频率激励下的动态响应情况。

支撑座系统中的工字钢结构竖直安装刚度高于

横向刚度,因而3根工字钢的横向响应位移高于纵向位移,电梯在3种不同工况下1号工字钢横向位移谐波响应情况如图4所示。由图4可知,随着乘客人数增加,电梯横向移动幅度变大。3种工况下,1号工字钢响应变化规律一致;且均在频率为13.44 Hz左右横向响应位移最大,其为一阶固有频率接近,一定程度上也验证了分析的有效性。该频率附近,满载下最大横向响应位移为4.37 mm,其为空载下最大响应位移2.48 mm的1.8倍左右,而为半载下最大响应位移3.45 mm的1.3倍。在工作频率12 Hz(720 r/min)处,满载、半载、空载下的横向响应位移分别为0.31 mm,0.24 mm,0.17 mm。可见,三者响应大小情况符合刚度需求,一定程度上能够保证电梯的运行稳定性。

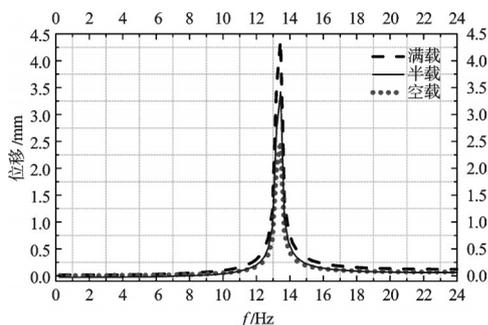


图4 1#工字钢3种工况下横向位移响应示意图

轿厢乘客满载情况下,3根工字钢的横向位移响应如图5所示。1号与2号工字钢直接承受曳引系统的动态作用力,动态受力最复杂;两者位移响应较大并较为接近,分别为4.37 mm与3.54 mm。3号工字钢主要用来承受对重与轿厢反绳轮上绕回的钢丝绳拉力,其横向响应相对较小,为0.97 mm,不到1号工字钢响应的1/4。尽管如此,乘客电梯作为一个频繁使用的室内交通工具,很可能受不同构件参数变化而引起振动发散,值得设计者注意。

由上可知,当外界激励频率接近一阶固有频率时,将发生较大谐响应。电梯在额定工作频率下,虽然较为接近一阶固有频率,可能引起共振,但是谐响应动态分析表明,3根工字钢均能够满足刚度使用要求。

5 结束语

笔者研究了电梯支撑座系统本身固有特性,及在满载、半载和空载3种工况下,于不同频率处的位移动态响应情况。其中,在固有频率处附近,满载情况下

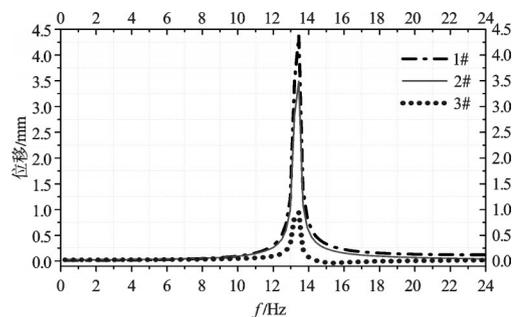


图5 满载工况下工字钢横向位移响应示意图

响应最为明显,半载情况响应相对较弱,空载响应则最小。同时,电梯工作频率较为接近固有频率,尽管满足刚度需求,但是电梯使用频繁,疲劳损伤容易带来振动发散。因而,设计者可以通过提高支撑座系统的刚度,来提高本身的固有频率。另外,由于钢丝绳磨损及井道风湍流等影响,整个电梯的振动特性还有待进一步综合考虑研究。

参考文献(References):

- [1] 张福恩,吴乃优,张金陵,等. 交流调速电梯原理设计及安装维修[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 刚宪约,丁立强. 主要品牌电梯运行品质测试与分析报告[R]. 浙江大学现代制造工程研究所,2004.
- [3] NAIL K, FORSYTHE W, GOODALL R M. Improving ride quality in high-speed elevators[J]. *Elevator world*, 1997, 45(6):88-93.
- [4] OKAMOTO K I, YUMURA T, KURAOKA H. A new slide guide shoe to suppress elevator vibration[C]. Proceedings of Elevator, Berlin, 2000.
- [5] 杨海燕. 曳引系统有限元动态性能研究[D]. 广州:华南理工大学机械工程学院,2011.
- [6] 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, 17(10): 16-18.
- [7] 刚宪约. 曳引电梯系统动态理论及动力学参数优化方法研究[D]. 杭州:浙江大学机械学院,2005.
- [8] 王宝强,许卫东. 对曳引式电梯上行制动试验制动距离的探讨[J]. 机械, 2013, 40(11): 43-45.
- [9] 张洪信,赵清海. ANSYS有限元分析完全自学手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [10] 周小燕,李兵,孔芬霞,等. 基于ANSYS Workbench柴油机后处理装置的模式分析[J]. 机电工程, 2011, 28(8): 928-930.
- [11] 朱春明,罗志群. 影响电梯舒适度的因素及对策探讨[J]. 机电工程技术, 2012, 41(8): 211-214.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

陈栋栋,汪剑,杨凯杰. 乘客电梯曳引机支撑座系统的动态特性分析[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 760-763.

CHEN Dong-dong, WANG Jian, YANG Kai-jie. Dynamic characteristic analysis for support seat system of passenger elevator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(6): 760-763.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>