

学
术
交
流基于有限元法的屏蔽门机械系统
结构响应分析

应寅琼, 江 虹, 李 成, 谢永清

(宁波南车时代传感技术有限公司, 浙江 宁波 315021)



摘 要: 建立了地铁站台屏蔽门机械系统的结构分析模型, 利用有限元法分析了屏蔽门系统模态和结构刚度, 得到屏蔽门系统的各阶主要模态的特性和屏蔽门整体及各关键部件的变形及应力分布。运用该分析方法对屏蔽门整体机械系统的结构特性及其可行性进行评价, 为屏蔽门机械系统优化和可靠性设计提供了理论基础。

关键词: 屏蔽门系统; 模态分析; 有限元结构分析; 应力; 地铁

中图分类号: TH122; U231+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)02-0075-04

作者简介: 应寅琼 (1986-), 女, 硕士, 主要从事机械结构设计及 CAE 分析。

Structural Analysis of PSD Mechanical System Based on FEA

YING Yin-qiong, JIANG Hong, LI Cheng, XIE Yong-qing

(Ningbo CSR Times Transducer Technique Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315021, China)

Abstract: Structural analysis model of metro platform screen door (PSD) mechanical system was built, and FEA method was employed to study the modal and structural stiffness of PSD system for getting the natural frequencies and vibration modes from modal analysis, and obtaining the deformation and stress distribution of the whole PSD and its key parts. By the calculation model and method, the structural properties of the PSD system and its design feasibility were evaluated, which provided theoretical base for the optimum and reliability design of PSD system.

Key words: PSD system; modal analysis; FEA structural analysis; stress; metro

0 前言

地铁站台屏蔽门系统安装于地铁沿线车站站台边缘, 由于它能提高运营安全系数、改善乘客候车环境、节约运营成本^[1], 故该系统在地铁站台中得到广泛应用。其结构设计的可靠性和安全性是评价屏蔽门系统工程优劣的重要指标之一, 但屏蔽门技术长期被英国 Westinghouse、法国 Faiveley、日本 Nabco、瑞士 KABA 等^[2] 几家公司垄断, 国内对此类屏蔽门进行的相关研究较少。

在建的宁波轨道交通 1 号线一期工程基于对乘客安全、节能和车站环境的考虑采用了屏蔽门系统。由于轨道交通的特殊性, 业主对屏蔽门机械系统的安全性、可靠性及经济性有较高要求。目前屏蔽门机械设计主要分为结构设计和强度、刚度分析等, 以满足屏蔽门的特殊要求。

1 屏蔽门机械系统结构

1.1 屏蔽门机械系统结构

屏蔽门系统在地铁站台上的布置示意图如图 1 所示, 主要由标准滑动门单元、标准固定门单元、应急门单元、非标滑动门单元、非标固定门单元及端门单元组成(图中未画出)。正常停车状态下, 列车门单元与屏蔽门系统中的滑动门单元一一对齐, 非正常停车状态

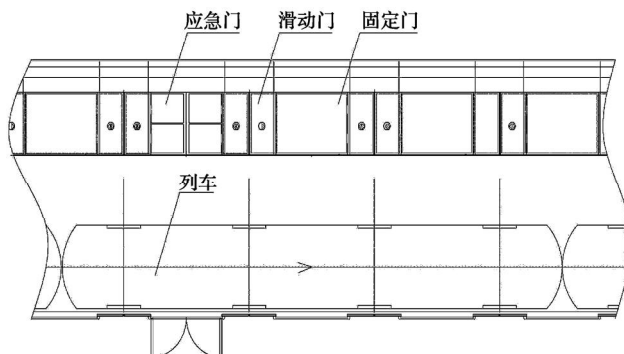


图 1 屏蔽门系统站台布置示意图

下,至少有一个列车门单元可以与屏蔽门系统中的某一滑动门单元对齐,保证旅客可以顺利下车。

图2所示为一个用于有限元分析的标准屏蔽门样机单元,主要包括两扇标准滑动门(ASD)、两扇应急门(EED)、1个标准固定门(FIX)、门机梁单元、承重结构以及上部防沉降伸缩装置等。其中,门体主要由不锈钢门框及钢化玻璃组成,用于隔离站台与轨道。门机梁单元包括铝型材门机梁及各种控制驱动单元(DCU、电机、皮带、挂轮组件等),用于控制滑动门的开闭动作。承重结构主要由门槛、底座及立柱等部件组成,在屏蔽门系统中起到骨架的作用,用于支撑整个屏蔽门系统及承受各种载荷,屏蔽门系统通过底座与站台地板连接。上部防沉降伸缩装置用于连接屏蔽门系统与站台天花板,可以有效地吸收站台沉降。

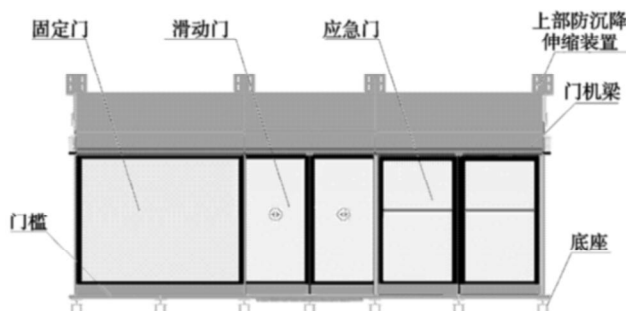


图2 屏蔽门系统机械结构图

1.2 屏蔽门有限元分析模型

屏蔽门的实际模型相当复杂,在不影响计算精度的前提下,有限元分析时需要对机械结构系统进行简化处理,将不受载的零件简化,如密封橡胶和防护板等,将螺栓简化为连接约束等。屏蔽门的有限元分析模型如图3所示。

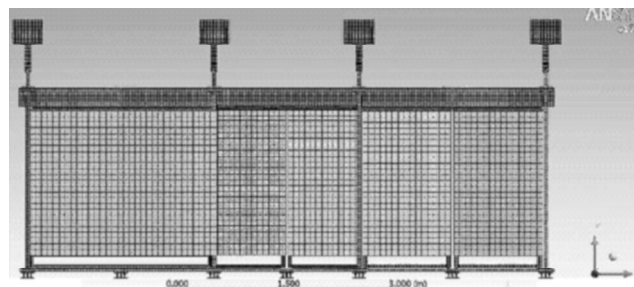


图3 屏蔽门系统机械结构有限元分析模型

屏蔽门的有限元模型中,门框、横梁、底座和玻璃等所有结构都采用solid实体单元(各零件的详细材料参数见表1),并采用六面体单元进行sweep网格划分,对不同尺寸零件的网格大小进行控制,玻璃等尺寸较

表1 材料参数

部件	材料	弹性模量/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	泊松比	密度/ $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
门体, 门槛	不锈钢 304L	2.1×10^5	0.30	7.85	1.8×10^{-5}
支撑结构	Q235 钢	2.1×10^5	0.30	7.85	1.2×10^{-5}
玻璃板	钢化玻璃	7.2×10^4	0.21	2.56	1.0×10^{-5}
底座	铝合金型材	7.0×10^4	0.33	2.71	2.3×10^{-5}

大的零件采用的网格尺寸相对较大,底座等采用的网格尺寸小。零件相互接触处采用固连方式处理,并根据实际对各零件的材料参数进行相应设置。

1.3 屏蔽门边界条件及载荷设置

根据实际情况在屏蔽门系统结构有限元模型中施加的边界条件主要为固定约束,分为底座约束和顶部支撑约束,门框、立柱、横梁和支撑之间采用固连方式相互连接。

屏蔽门承受外载荷主要有风压、人群挤压载荷、冲击载荷和地震载荷等^[3]。该分析中4种载荷类型被考虑,冲击载荷按工况分为4类,人群挤压载荷看作节点力,风压看作作用于玻璃板上的均匀压力,地震载荷看作加速度。4种载荷的详细参数如表2所示。

表2 屏蔽门载荷

载荷种类	详细参数介绍
风压载荷	$1\,000\text{ N/m}^2$
挤压载荷	$1\,500\text{ N/m}$,作用在 1.125 m 高处,结构无屈服变形
冲击载荷	$2\,800\text{ N}$,作用形式见工况参数说明
地震水平	水平加速度 $0.2g$,垂直加速度 $0.1g$

实际使用过程中,屏蔽门所承受的载荷可以分为3种工况。表3为3种工况下4种载荷的作用情况。工况2和工况3中,挤压和冲击2种载荷只存在1种;工况1中4种载荷同时存在,以分析屏蔽门在极限工况下的状态。其中按照作用位置,冲击载荷又分别分析了4种不同的条件:作用位置分别在固定门中心(载荷工况1a)、固定门立柱中心(载荷工况1b)、滑动门柱中心(载荷工况1c)和同时在固定门中心、固定门立柱中心(载荷工况1d)和滑动门柱中心(载荷工况1d)。

表3 屏蔽门工况种类

对应载荷组合	工况 1	工况 2	工况 3
风压载荷	*	*	*
挤压载荷	*	无	*
冲击载荷	*	*	无
地震作用	*	*	*

注: * 表示该工况下需考虑载荷

2 屏蔽门有限元分析结果

2.1 屏蔽门模态分析结果

在模态分析中,低阶模态对振动系统的影响较大,结构的振动特性分析时通常取频率较小的模态,但在本文中结构的固有频率较低,而且数值相差较小,所以提取屏蔽门的前30阶模态。由有限元分析得屏蔽门系统的前30阶固有频率,如表4所示。

表4 屏蔽门的前30阶固有频率

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
固有频率/Hz	13.1	15.1	17.6	24.6	27.9	28.3	29.4	31.9	39.7	41.6
阶数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
固有频率/Hz	42.6	45.4	46.9	47.4	51.1	54.4	57.3	59.3	63.1	65.5
阶数	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
固有频率/Hz	67.2	76.9	77.8	79.8	86.4	89.5	92.6	96.2	99.6	105

由表4可以看出屏蔽门系统的前30阶固有频率在13.1~105 Hz之间,随着阶数增大,固有频率从小到大分布,在数值很接近的固有频率下,会出现振型和频率相接近但相位不同的情况。现提取几阶典型振型,对屏蔽门的振动特性进行分析。图4为频率分别为13.1、42.7、65.5、67.2、89.5和99.6 Hz时屏蔽门的振型。

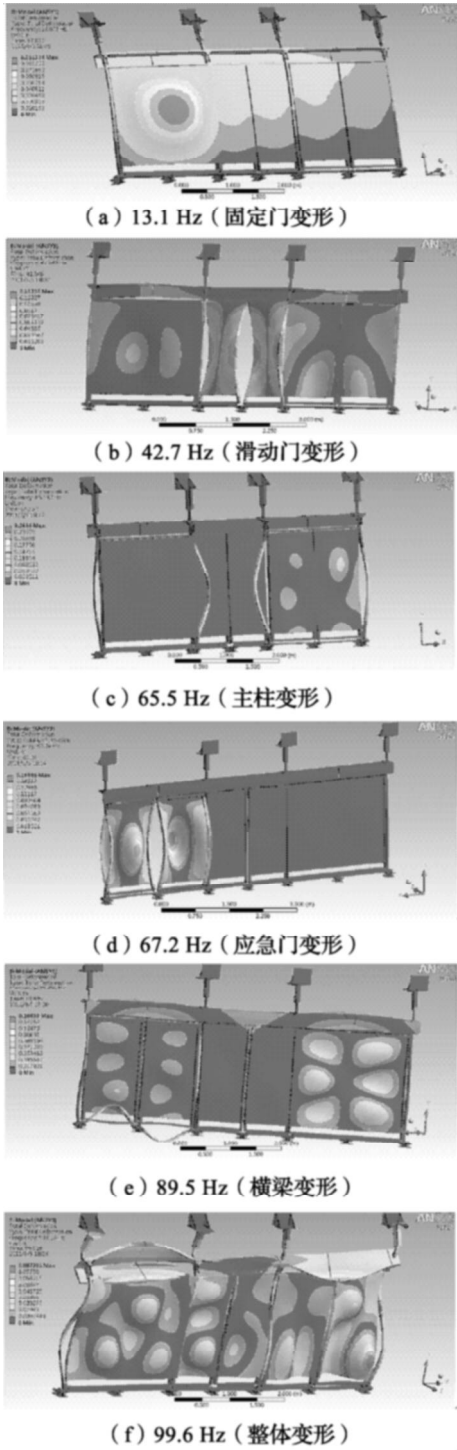


图4 不同频率下屏蔽门的典型振型

由有限元模态分析可得屏蔽门的各阶模态特性,其中在频率为13.1~105 Hz之间,屏蔽门的振型大多为各门体、立柱和横梁的各种变形形态。现提取其中比较典型的几阶振型,如图4所示。频率为13.1 Hz时,固定门在水平z方向产生变形,中心位置的变形最大;频

率为42.7 Hz时,两扇滑动门各自沿中心线产生扭转变形,滑动门边缘处变形最大;频率为65.5 Hz时,立柱沿水平x方向产生变形,立柱中心处变形最大;频率为67.2 Hz时,应急门沿水平z方向产生变形,门的中心及边缘处的变形最大,且方向相反;频率为89.5 Hz时,应急门底部横梁产生“s”形变形;频率为99.6 Hz时,整个屏蔽门发生整体变形,各个零件在此频率下同时产生较大变形。

2.2 屏蔽门结构刚度分析结果

针对不同工况,对屏蔽门的结构刚度进行分析,得到不同工况下屏蔽门系统的变形及应力响应。表5为各工况下屏蔽门的刚度分析结果。

表5 各载荷工况下屏蔽门的刚度分析结果

参数	工况 1a	工况 1b	工况 1c	工况 1d	工况 2	工况 3
最大应力 /MPa	101	157	195	214.8	153	96
最大变形 /mm	9.2	4.0	3.3	10.3	3.7	2.5

由表5可知载荷工况1d时,屏蔽门的最大变形及应力高于其他工况条件的最大变形和应力,即对载荷工况1d是该屏蔽门最苛刻的工作条件。下面详细分析该工况下的屏蔽门系统及其零部件的变形及应力响应。图5为载荷工况1d下屏蔽门的整体变形及应力分析结果。由图5可知,该工况下屏蔽门的最大变形为10.3 mm,在固定门的中心位置;最大应力为214.8 MPa,在应急门横梁与立柱接触处。在立柱、支座和横梁的其他位置,最大应力在40~80 MPa之间。

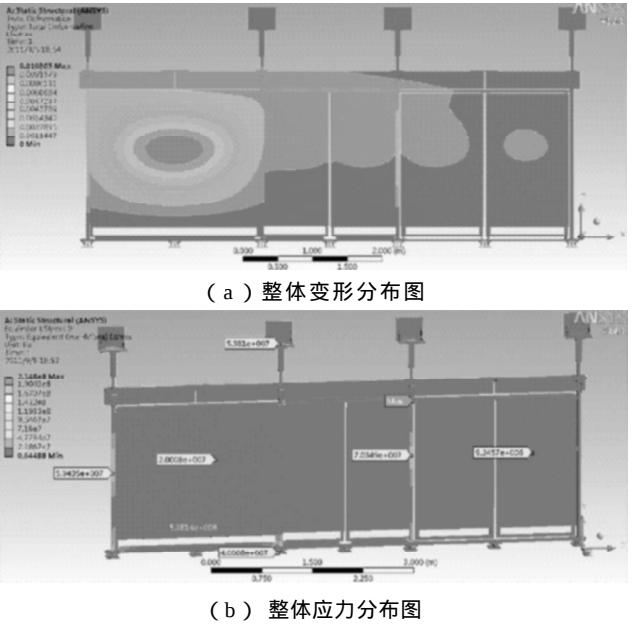


图5 工况1d下屏蔽门的刚度分析图

图6为工况1d下各个门体及立柱框架的变形分布图,由图可知,滑动门上部的变形较大,最大变形为2.2 mm,在门的中部偏上位置;应急门的最大变形为2.1 mm,两扇门的变形表现明显不对称分布,因为整体屏蔽门所承受的载荷不对称;固定门的最大变形为10.3 mm,处于门的中心位置,在该工况下固定门

所承受的载荷最大,所以变形最大;立柱框架的最大变形为4.6 mm,固定门处的立柱变形最大。

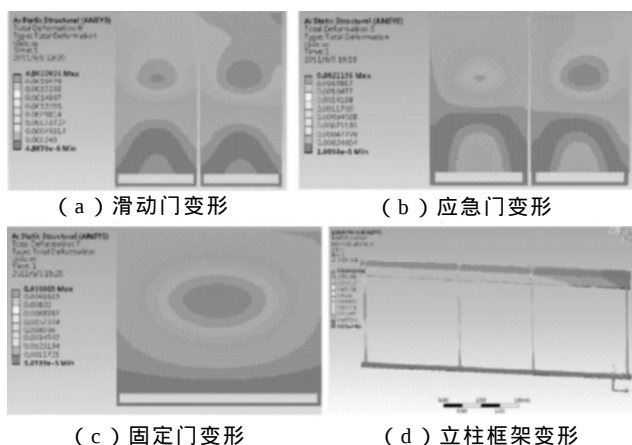


图6 工况1d下屏蔽门各部件的变形分布

底座及顶部支撑是屏蔽门与外部结构相连接的部件,其状态的好坏是屏蔽门能否正常工作的关键,因此对底座及顶部支撑的结构响应进行分析。图7为工况1d下底座的变形及应力分布图,由图可知,该底座的最大变形为8.2 mm,在底座顶部的侧边处,最大应力为40.8 MPa,处于底座的一个立柱上。底座上表面的应力最大值约为30 MPa左右。由此可知,底座满足该工况条件下的使用要求。

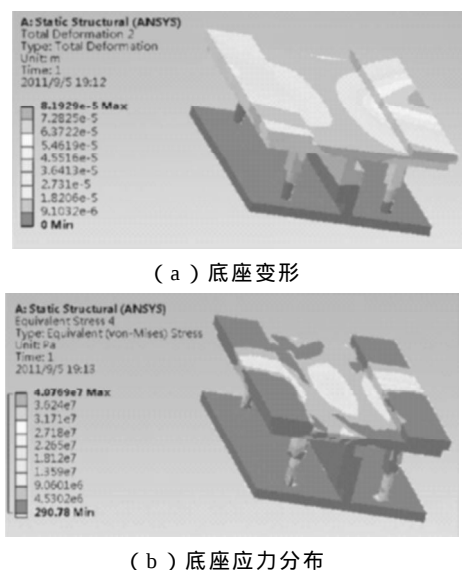
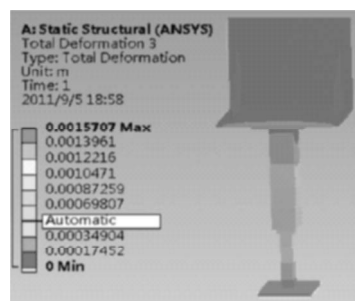
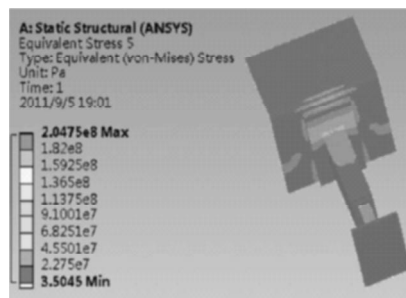


图7 工况1d下底座的变形及应力分布

图8为工况1d下顶部支撑的变形及应力分布图,由图可知,该顶部支撑结构的最大变形为1.6 mm,发生在顶部支撑与门体结构部件的连接处,最大应力为204.7 MPa,处于立柱与板的连接位置,该应力为集中应力,可以采取有效措施予以避免。支撑结构的其他位置处的最大应力在60~100 MPa之间,因此顶部支撑满足该工况条件下的使用要求。



(a) 顶部支撑变形



(b) 顶部支撑应力分布

图8 工况1d下顶部支撑的变形及应力分布

3 结语

本文建立了城市轨道交通地铁屏蔽门系统的结构分析模型,利用有限元法分析了屏蔽门系统模态和结构刚度,得到了屏蔽门系统的主要模态特性及变形应力响应,为屏蔽门系统的可行性及其优化设计提供了理论基础:

建立了屏蔽门系统的结构分析的模型及方法,为后续屏蔽门的结构分析提供参照。

通过屏蔽门系统的模态响应分析,得到了屏蔽门系统的低阶固有频率及振型,直观地分析了屏蔽门系统的振动特性,为屏蔽门的振动控制提供了理论基础。

通过屏蔽门系统的刚度特性分析,得到了屏蔽门系统在各个工况条件下的变形及应力响应情况,理论上论证了系统的可行性,并为系统的优化设计及可靠性设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 陈韶章. 地下铁道站台屏蔽门系统[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 10-13.
- [2] 李国庆, 张春生. 城市轨道交通发展中的屏蔽门创新[J]. 都市轨道交通, 2007, 20(5): 81-84.
- [3] 王永刚, 胡 煦. 屏蔽门系统顶部结构的应力分析[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 121-123.

(本篇文章为南车株洲电力机车研究所有限公司2011年度学术交流论文)