

带限位装置的新型摩擦滑移隔震结构振动台试验研究

刘军生^{1, 2}, 王社良¹, 石 韵², 曹晓辉²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院, 陕西西安 710068)

摘要: 以新型固体润滑材料, 即二硫化钼涂层材料为主, 设计制作了一种带限位装置的新型滑移隔震装置, 并进行了新型摩擦滑移隔震支座的力学性能试验, 研究表明, 文中研发的新型滑移隔震装置具有摩擦滑移隔震和限位功能, 构造简单, 适用性强。在此基础上, 建立欠人工质量模型的一致相似关系, 设计制作了一个相似比为 1: 5 的 2 跨 5 层框架模型结构, 进行了结构振动台试验研究。检验了新型摩擦滑移隔震装置的隔震和限位性能, 振动台试验结果表明: 限位装置可有效降低隔震层相对滑动位移, 新型摩擦滑移隔震支座降低了上部结构的地震反应, 新型隔震系统能够控制结构层间位移角在允许范围内, 隔震效果良好, 且具有良好限位复位能力, 结构可满足抗震要求。

关键词: 摩擦滑移; 隔震结构; 振动台试验; 二硫化钼; 限位装置

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)04-0498-5

Shaking table test for isolated structures supported on slide-limited innovative separated friction sliding device

LIU Junsheng^{1,2}, WANG Sheliang¹, SHI Yun², CAO Xiaohui²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2 Shaanxi Academy of Building Research, Xi'an 710068, China)

Abstract: An innovative separated friction sliding device using molybdenum disulfide lubricant coating has been proposed. With molybdenum disulfide lubricant coating, the test of shaking table in the isolated structure models has been adopted by mild steel cone bar. Based on the test results, the seismic behavior is evaluated in terms of displacement response and acceleration response. Test result reveals that the limiting device reduced the relative sliding displacement of isolation layer effectively. The earthquake response of the upper structure could be reduced using the innovative friction sliding device, and the structure angle of floor displacement could be controlled within the allowable range using the improved system. This system has better isolating affection and better limiting displacement ability. Isolated structure can well meet the design requirement.

Key words: Friction sliding; isolated structures; shaking table test; molybdenum disulfide lubricant; restrainer

摩擦滑移隔震体系主要依靠滑移层的水平滑动隔断地震作用, 隔震效果取决于滑移层材料的选择, 课题组提出了一种采用二硫化钼固体润滑剂涂层的新分离式摩擦滑移隔震装置, 进行了初步有限元分析^[1-3], 并在有限元基础上进行了振动台试验研究^[4], 以上研究表明该装置摩擦系数能够稳定维持在 0.04 左右, 相比于传统的润滑剂力学性能稳定, 摩擦系数较小。较小的摩擦系数能够取得很好的隔震效果, 但会引起隔震层水平位移过大^[3], 为解决二硫化钼固体润滑剂涂层新型分离式摩擦滑移隔震装置滑移量大的缺陷, 对试件改进, 采用软钢实体圆锥棒限位器, 进行一个带限位装置的新型摩擦滑移隔震结构振动台试验研究。进一步研究该隔震装置的工作性能, 分析限位装置对结构抗震性能影响。

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)对

隔震结构设计主要以叠层橡胶隔震系统为主, 对摩擦滑移隔震结构的设计研究较少, 使其应用受到限制^[5]。滑移隔震结构采用软化结构的方式, 即在上部结构和下部结构之间加入摩擦滑移装置来控制、减少地震能量由下部向上部传递从而减轻上部结构的地震反应。

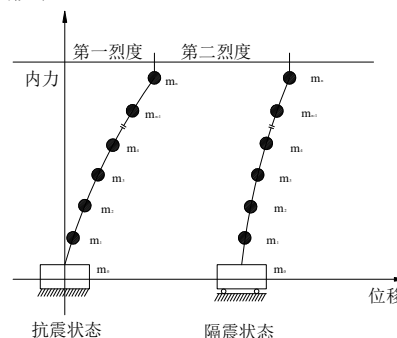


图 1 滑移隔震计算模型

Fig.1 Sliding structure calculation model

在地震作用下, 滑移隔震建筑存在两个状态,

当隔震层水平剪力小于隔震层的摩擦力时,建筑处于抗震状态,建筑物此时所对应的烈度为抗震烈度;当隔震层水平剪力大于隔震层摩擦力时,建筑处于滑动状态,建筑物此时所对应的烈度为隔震烈度,其计算模型如图1所示。

1 试验概况

1.1 试件设计

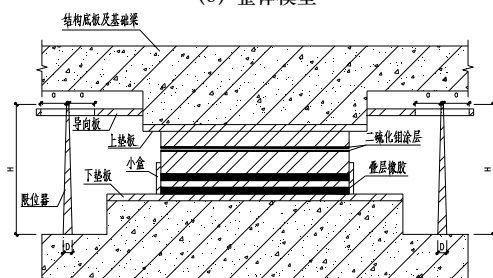
根据双烈度设计方法设计试件,基于量纲理论,在综合考虑振动台承载能力的基础上,按照一致相似关系进行五层钢筋混凝土框架结构的试验模型设计,缩尺比例为1:5,采用欠人工质量模型,相似关系和相似系数为:试验的加速度相似比为1.97,长度相似比为0.2,时间相似比为0.32。在试件底层柱脚处设置隔震支座,隔震支座采用9个直径400 mm的二硫化钼新型分离式摩擦滑移隔震支座,在每个支座处均设置软钢实体圆锥棒限位器,达到减小支座位移的目的。平面为2×2跨矩形对称布置,柱距1.2 m×1.2 m,模型底层高度0.84 m,其余四层每层高度0.72 m。二~五层每层配重25.6 kN。振动台试件模型见图2,试件编号为XW-1。试验时将基础底板与振动台固接。



(a) 带限位器的新型隔震支座



(b) 整体模型



(c) 带限位装置新型摩擦滑移支座细部尺寸

图2 振动台模型试验

Fig.2 Shaking table model test

1.2 带限位装置的新型摩擦滑移支座设计及试验

充分利用了二硫化钼固体润滑剂抗高压、耐高温、低摩擦和速度适应范围宽等优点,将其作为涂层材料,以软钢实体圆锥棒作为限位消能装置,示意如图2(c)所示。上下钢垫板分别通过预埋螺栓与混凝土结构连接。在下摩擦板中加入叠层橡胶垫可以使隔震层各支座之间受力均匀,防止振动工程中可能引起的结构扭转,橡胶垫的数量可以根据上部结构的重量来确定;小盒防止了下摩擦板中的叠层橡胶与钢板之间受拉破裂;预埋导向板上留有边长为 $2a$ 的正方形孔槽,以避免 X 向导向板在 Y 向地震中受扭破坏;圆锥钢棒限位器底端直径为 D ,高为 H ,沿着导向板滑移,自由滑移量为 a ,数量由上部结构的刚度来确定。

课题组利用剪压试验装置(见图3)对该新型摩擦滑移装置的摩擦滑移系数进行测定,并得到该装置的荷载—位移曲线(见图4)。分析得出,该装置在荷载作用下共经历三个阶段:位移0~1.2 mm时,为第一阶段,即未接触阶段,该阶段主要特征为位移持续增加而荷载不变,分析原因是由于滑块与固定装置存在缝隙,荷载—位移曲线表现为水平段,此时滑块并未出现滑动;位移1.2~1.9 mm时,为第二阶段,即静摩擦阶段,该阶段主要特征为荷载增量远远大于位移增量,荷载—位移曲线呈明显上升段;位移达到1.9 mm至试验结束,为第三阶段,即动摩擦阶段,该阶段前期荷载—位移曲线首先表现为斜向上升,一旦滑块完全滑动,曲线趋于水平,荷载不变,位移持续增加。

试验结束以后,经过检查发现,试件盖板与滑块表面的摩擦面出现了磨损情况,形成转移膜,摩擦系数经测试达到0.04,分析原因是因为二硫化钼整体内不形成交联,故其分子轮廓光滑,这种光滑的分子轮廓使其具有低摩擦系数的特性,亦能在滑动过程中在对偶面上形成薄的转移膜。

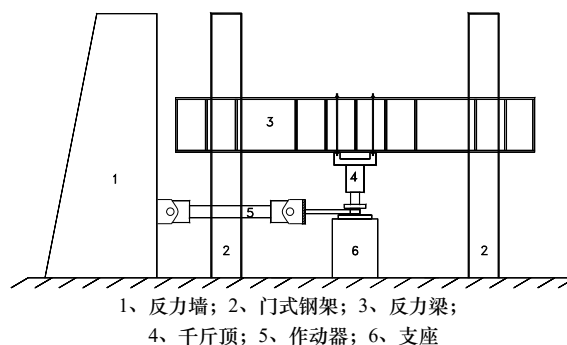


图3 滑移件试验装置

Fig.3 Friction test equipment

传统的摩擦滑移材料聚四氟乙烯,存在冷流性,附着性大、高轴压下易变形等缺点,而二硫化钼固体润滑剂摩擦系数低,且其物理及化学性能稳定,适用于隔震支座。

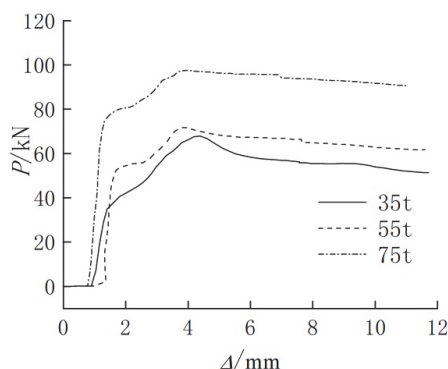


图4 滑移件荷载—位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve

文献[8]对软钢实体圆锥棒限位装置进行试验及理论分析,研究表明该限位装置具有较好的延性和良好的耗能能力,并且各项同性,在受到随机方向的地震作用或者多方向的地震作用时,仍然能够体现出良好的限位耗能特性,是一种比较理想的弹塑性阻尼器,并提出了一种计算该限位装置刚度和屈服荷载的方法,见式(1)~(3)。

$$P = 0.098 f (D^3 / H) (N) \quad (1)$$

$$k_1 = \alpha_1 (1 / \alpha_3) (D^4 / H^3) (N / mm) \quad (2)$$

$$k_2 = 0.15 k_1 \quad (3)$$

式中: P 为屈服荷载; D 为圆锥棒底部直径; H 为圆锥棒高度; f 为圆锥棒采用钢材的设计强度; k_1 为第一阶段刚度; α_1 为与圆锥棒的斜率有关的调整系数,这里取 α_1 为 31 524; k_2 为第二阶段刚度; α_2 为与圆锥棒的斜率有关的调整系数,取为 6.2。

对软钢实体圆锥棒限位装置设计采用文献[8]的研究成果。

1.3 试验装置、加载方案及数据采集

试验装置及加载方案与文献[4]一致,两个试件分别采用 EL-centro 波、天津波、人工合成波进行地震波输入。每组试件均经过白噪声扫频后,按照表 1 所示工况进行。考虑模型相似比后,地震波加速度峰值在 7 度 (0.1 g) 下调幅为 197 gal、8 度 (0.2 g) 下调幅为 394 gal、8 度 (0.3 g) 下调幅为 591 gal。加速度传感器及位移传感器分别在基础板 (即振动台台面)、结构底板和结构每层顶板处布置,其中,结构底板和每层顶板分别在四角 (西南、西北、东南、东北) 处沿 x 向和 y 向布置。

表 1 试验加载工况

Tab.1 Test condition

工况	烈度水准	工况代号	地震波	模型加速度/gal
1		BZS-1	白噪声	50
2	7 度基本烈	EL-197	EL-centro 波	197
3	度/0.1 g	TJ-197	天津波	197
4		RG-197	人工合成波	197
5		BZS-2	白噪声	50
6	8 度基本烈	EL-394	EL-centro 波	394
7	度/0.2 g	TJ-394	天津波	394
8		RG-394	人工合成波	394
9		BZS-3	白噪声	50
10	8 度基本烈	EL-591	EL-centro 波	591
11	度/0.3g	TJ-591	天津波	591
12		RG-591	人工合成波	591

2 试验现象

为方便对比描述,将试件编号为 XW-1,将文献[4]中未设置限位装置的二硫化钼新型隔震结构的试件编号为 GZ-1。

在加载初期,试件 XW-1 反应与文献[4]中 GZ-1 一致,输入 197 gal (7 度 0.1 g) 后结构隔震支座位移,上部结构良好,结构在小震作用下,静摩擦力能够阻止上部结构与隔震装置的相对滑动,提供给隔震层初始刚度,此时限位器未工作。持续加载,在输入 394 gal (8 度 0.2 g),上部结构 4 层梁处首先出现细小裂缝,与此同时,XW-1 隔震支座的二硫化钼滑移层克服静摩擦力开始滑动,限位器受到碰撞力作用,产生变形,通过摩擦滑移作用削弱地震输入能量向上部结构的传递,并且由于钢棒阻尼器的阻尼大,限位器的振动也很快衰减,未测到结构在地震作用下出现较长时间振动。该装置起到消能减震的作用,且有效限制了结构隔震层侧移,隔震层侧移为 13.69 mm,相比于试件 GZ-1 侧移降低 14.7% (试件 GZ-1 结构侧移为 15.71 mm)。随着地震加速度的不断增大,在输入 591 gal (8 度 0.3 g),XW-1 裂缝逐渐增多,但裂缝宽度较小,未形成影响结构使用性能的贯通裂缝,限位消能器出现塑性变形,耗散了地震能量且有效限制了上部结构产生过大滑动位移,能量的耗散主要依靠隔震装置及限位装置完成,在大震下实现隔震减震目的。

3 试验结果分析

3.1 模型动力特性

为了测试模型的各阶段频率,观察结构的动力特性变化,在试验开始时及每次振幅完成后对结构模型进行了白噪声扫频。通过动力特性推定结构等

效刚度的退化情况. 表 2 给出了试验模型自振频率变化. 试件编号为 XW-1, 文献[4]中未设置限位装置的二硫化钼新型隔震结构的试件编号为 GZ-1.

在振动台试验开始前, 白噪声扫频得到模型的一阶频率为 3.95 Hz, 随着地震动强度增加, 自振频率降低, 结构在施加 100 gal 的地震作用后, 一阶自振频率减小 4.8%, 在施加 200 gal 的地震作用后, 一阶自振频率减小 9.6%, 模型自振频率降低在 10% 之内, 说明上部结构出现了损伤, 刚度有所降低, 但损伤在可控范围内, 这也和试验现象相符.

相比于未采用限位装置的隔震结构, 试件 XW-1 一阶自振频率略有增加 (BZS-1 工况下增加 14.5%, BZS-2 工况下增加 13.9%, BZS-3 工况下增加 13.9%) 分析原因是因为限位装置一定程度上增加了结构刚度, 使地震作用下结构吸收的能量更多.

表 2 结构自振频率 (Hz)
Tab.2 Nature frequency/Hz

模 型	工况			
	BZS-1	BZS-2	BZS-3	
	XW-1	3.95	3.76	3.57
	GZ-1	3.45	3.30	3.16

3.2 顶层位移及层间位移

以天津波为例, 图 5 给出了 TJ-197 工况下顶层位移时程曲线对比, 根据顶层位移时程曲线提取各工况下最大时间点的顶层位移, 如图 6 所示.

当地震作用较小时, 模型位移响应较小, 而位移传感器受到外界影响大, 因此各层位移均通过加速度在频域内积分获得, 位移传感器做校核使用. 通过图中可以看出, 在 7 度基本地震 (0.1 g) 和 8 度基本地震 (0.2 g) 工况下, 两个试件的顶点位移相差不大, 随着试验继续进行, 在 8 度基本地震 (0.3 g) 工况下未采用限位装置体系的顶点位移已经达到 32.16 mm, 明显大于采用限位装置体系. 采用限位装置后将顶点位移下降 13.6%, 起到了限位作用.

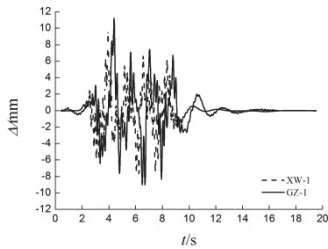


图 5 TJ-197 工况下顶层位移时程曲线
Fig.5 Top displacement time history curve with top displacement in TJ-197

表 3 给出了两个试件层间位移对比, 由于碰撞时限位装置会产生小幅度震颤, 因此增加限位装置后层间位移略有上升, 即限位器的加设增大了上部

结构的地震反应, 但层间位移仍远小于规范要求.

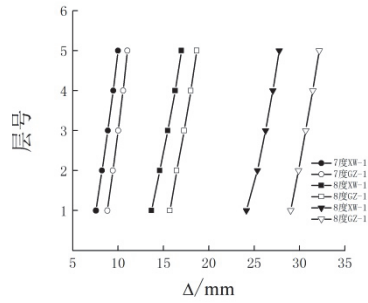


图 6 顶层位移对比
Fig.6 Comparison of top displacement

表 3 层间位移对比
Tab.3 comparison of story drift

地震烈度	7 度/0.1g		8 度/0.2g		8 度/0.3g	
试件楼层	GZ-1	XW-1	GZ-1	XW-1	GZ-1	XW-1
1 层	8.81	7.56	15.71	13.69	29.01	24.14
2 层	0.61	0.66	0.76	0.90	0.87	1.21
3 层	0.59	0.65	0.81	0.89	0.79	0.90
4 层	0.54	0.59	0.74	0.81	0.78	0.80
5 层	0.48	0.52	0.64	0.69	0.71	0.71

3.3 加速度反应对比

表 4 给出了 XW-1 和 GZ-1 在不同地震波激励下结构加速度放大系数. 表 4 可以看出, 限位器的加设使上部结构的加速度增加, 削弱了隔震装置的减震效果. 这也解释了试验现象中试件 XW-1 较 GZ-1 上部结构裂缝增加更快的原因.

表 4 加速度放大系数
Tab.4 Acceleration amplification coefficient

地震烈度	EL-centro 波		天津波		人工合成波	
试件编号楼层	GZ-1	XW-1	GZ-1	XW-1	GZ-1	XW-1
0 层	1.91	2.19	2.25	2.42	2.15	2.21
1 层	1.91	2.10	2.21	2.35	2.11	2.01
2 层	1.84	2.09	2.10	2.31	2.01	1.98
3 层	1.72	1.91	2.12	2.27	2.01	1.98
4 层	1.66	1.91	2.11	2.21	1.99	1.88
5 层	1.65	1.89	2.01	2.22	1.97	1.87

4 结论

(1)动力分析表明, 采用带限位装置的新型分离式摩擦滑移系统隔震结构相比于未设置限位装置的隔震结构自振频率略有增加. 随着地震动强度增加, 模型自振频率降低在 10% 之内, 上部结构出现了损伤, 但损伤不大.

(2)限位装置可有效降低隔震层相对滑动位移, 新型摩擦滑移隔震支座降低了上部结构的地震反应, 设置限位器后层间位移角略有增加, 但改进后的隔震系统能够控制结构层间位移角在允许范围内, 隔震效果良好, 且具有良好限位复位能力, 结构可满足抗震要求.

(3)建议进一步研究, 寻找最适用于高地震烈度

区的合理限位装置刚度.

参考文献 References

- [1] 陈琪. 新型滑移隔震试验框架模型结构设计与分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
CHEN Qi. Structural design and analysis of experimental framework model with new sliding isolation [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [2] 杨佳玲. 新型滑移隔震支座性能试验研究及隔震结构地震反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
YANG Jialing. Experimental investigation on new sliding isolation device and seismic response analysis of isolated structure [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [3] 曹晓辉. 采用新型滑移隔震装置框架结构地震反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
CAO Xiaohui. New sliding isolation system seismic response analysis [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [4] 刘军生, 石韵, 曹晓辉. 采用新型分离式摩擦滑移系统的隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 22-26.
LIU Junsheng, SHI Yun, CAO Xiaohui. Shaking table test on isolated structures with innovative separated friction sliding device [J]. Building Structure, 2015, 45(4): 22-26.
- [5] 刘利军, 赵钦东, 王社良. 摩擦滑移隔震结构简化设计计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2006, (S).
LIU Lijun, ZHAO Qindong, WANG Sheliang. Research on the simplified calculation of base-isolated buildings [J]. Journal of Building Structures, 2006, (S).
- [6] 何志坚, 王社良. 多层简单框架结构振动台模型设计[J]. 振动与冲击, 2013, 23(15): 101-105.
HE Zhijian, WANG Sheliang. Model design of multilayer simple frame structure in shaking table test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 23(15): 101-105.
- [7] 王国栋, 蒋丽娟. 二硫化钼润滑剂应用研究进展[J]. 中国钼业, 2013, 37 (5): 7-10.
WANG Guodong, JIANG Lijuan. Advances in research on molybdenum disulfide additive [J]. China Molybdenum Industry, 2013, 37 (5): 7-10.
- [8] 李树信, 姚谦峰. 软钢实体圆锥棒的限位、消能性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1992, 24(3): 243-248.
LI Shuxin, YAO Qianfeng. On the properties of restrained displacement and energy absorption for mild steel frustum of a cone [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 1992, 24(3): 243-248.

(编辑 吴海西)

(上接第481页)

3 结论

(1) 通廊对提高高层转运站结构整体刚度效果显著. 基于此, 为确保通廊纵向有足够的抗侧刚度, 建议与高层转运站相邻的第一根通廊支架做成刚性固定支架; 同时, 可适当减小一跨通廊的跨度, 以提高通廊自身的纵向刚度.

(2) 不考虑钢桁架通廊对转运站的水平支撑作用时, 结构仅在基本频率处发生明显的低频共振现象, 且共振区位移幅频曲线波峰陡峭, 之后, 随激振力频率的增加结构位移响应逐渐减弱, 表明转运站结构和其他高耸柔性结构一样, 其侧向水平振动仅受低频激振力影响显著.

(3) 在原钢筋混凝土框架柱间增设钢筋混凝土剪力墙或交叉钢支撑, 都可减小结构水平侧移, 有效提高高层转运站的整体刚度. 对于高层转运站, 钢支撑自身刚度相对较低, 不易保证钢板套箍与原结构构件连接的紧密性和牢固性, 相比增设剪力墙方案, 其更适合作为一种临时加固方法.

(4) 采用剪力墙加固方案: 由于高层转运站结构整体刚度的提高使得局部水平约束对结构局部楼层抗侧刚度的改变程度大幅降低, 同时还可以实现新增结构构件与原结构在荷载作用下的协同工作, 起到了真正减振作用, 建议优先选用钢筋混凝土“门式”剪力墙加固方案.

参考文献 References

- [1] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Debao, LU Qiuhai. Analysis of experiment in engineering vibration [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] HAGER M, HINTZ A. The energy-saving design of belts for Long conveyor-systems[J]. Bulk Solids Handling, 1993, 13(4): 749-758.
- [3] FUNKE H, FONNEKER K. Experimental investigation and theory for the design of a Long distance belt conveyor system [J]. Bulk Solids Handling, 1988, 8(5): 208-216.
- [4] YOSHIDA I, KUROSE H, FUKUI S, et al. Parameter identification on active control of a structural model [J]. Smart Materials and Structures, 1995, 4(1): 82-90.
- [5] 牟广兴. 转运站的荷载取值问题探讨[J]. 矿业工程, 2008, (4): 51-53.
MO Guangxing. Study of load data determining of transfer station [J]. Mining Engineering, 2008, (4): 51-53.
- [6] 陈建. 通廊转运站振动分析及减振设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
CHEN Jian. The vibration analysis and vibration reduction design on corridor transfer station structure [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [7] 安道星, 栗润萍. 煤矿用长运距大运量带式输送机的制动动态分析[J]. 煤矿机械, 2009, 30 (1): 95-97.
AN Daoxing, LI Runping. Large coal mine with long distance conveyor volume of analysis of dynamic brake [J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30 (1): 95-97.
- [8] 陈绍元, 杨丹. 通廊转运站结构减振分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(7): 126-129.
CHEN Shaoyuan, YANG Dan. Vibration Analysis to the structure of the vestibule transportation station [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(7): 126-129.

(编辑 沈波)