

# 高层转运站结构的动力分析及振动控制研究

薛建阳，翟磊，闫春生

(西安建筑科技大学土木工程学院，陕西 西安 710055)

**摘要：**为改进高层转运站结构设计，提高高层转运站的抗振动能力，研究了高层转运站结构的动力特性和动力响应。通过有限元模拟，分析了高层转运站在两种振动控制方案下的结构的动力特性和动力响应。结果表明：通廊对提高高层转运站结构整体刚度效果显著；转运站结构的侧向水平振动主要受低频激振力的影响；相对于选用钢筋混凝土“门式”剪力墙加固方案，增设交叉钢支撑更适合作为一种临时加固方案。

**关键词：**高层转运站；振动控制；动力特性；激震源

**中图分类号：**TU366； TU311.1

**文献标志码：**A

**文章编号：**1006-7930(2015)04-0477-5

## Dynamic analysis and research on vibration control of high-rise transfer station structures

XUE Jianyang, ZHAI Lei, YAN Chunsheng

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract :** In order to improve the design and capacity of collision anti-vibration of high-rise transfer station, dynamic characteristics and responses of vibration of high-rise transfer station were studied. Based on numerical analysis, the original structure and computing models of two strengthening scheme were simulated. Dynamic analysis and displacement response of vibrations were analyzed. The results indicate that corridors have significant effects on the increase of the overall stiffness of transfer station. It also can conclude that lateral horizontal vibration of transfer station is obvious only under low frequency exciting force. Compared to the door-sheer wall strengthening scheme, cross-bracing scheme is more suitable as a temporary reinforcement scheme.

**Key words:** high-rise transfer station; vibration control; dynamic characteristics; exciting source

高层转运站是设在两台高架固定式带式输送机进行异向或水平向传送的重要枢纽，是矿山、冶金行业中普遍存在的构筑物。其主要功能为转载，常用于长距离物料运输和物料的异向输送，在港口和工业运输系统中起到了重要的中转作用。高层转运站与其它转运站相似，多为高宽比较大(一般大于 3)的敞开式钢筋混凝土框架结构。一般仅在最上面两层局部设置楼板，属典型的高耸柔性结构；皮带转运机运行过程中会对高层转运站顶层施加压力、拉力、水平力及振动等荷载，从而对结构产生较大的影响，因此，无论是从结构形式还是受力特点来看，高层转运站结构的抗振性能都要比一般框架结构都复杂的多<sup>[1]</sup>。

随着我国经济的快速发展，矿山、冶金行业所使用的转运站随处可见。同时，由于皮带的传送工艺也不断进步，使转运站受力更加复杂。传统加大转运站结构构件的方法既不经济也不合理<sup>[2-4]</sup>，这使得解决转运站结构的振动控制问题更加迫切。目前，国内外学者对多层转运站这一特殊结构

形式的振动控制已经做了部分研究<sup>[5-8]</sup>，但对高层转运站的研究还鲜为报导。为解决高层转运站的振动控制问题，通过对某高层转运站的有限元模拟，对其振动系统、各种激励、产生的响应之间的相互关系进行了分析，并提出了振动控制方案，为解决高层转运站这一特殊结构的振动问题提供了参考。

### 1 结构水平振动控制方法

对于普通钢筋混凝土框架结构，控制其水平振动和位移的方法主要是提高结构本身的抗侧刚度。常用的加固方案有以下两种：

(1) 增设钢支撑：钢支撑宜采用双角钢交叉支撑，通过钢板套箍与原框架构件可靠连接。钢支撑布置如图 1 (a) 所示。

(2) 加设钢筋混凝土“门式”剪力墙：考虑转运站与通廊接口布置、机器设备吊装和底部交通需要，将加设剪力墙立面做成“门”形，中部适当开设洞口，并与原框架采用锚筋或现浇钢筋混凝土套连接，形成框架—剪力墙结构。剪力墙立面布置如图 1 (b) 所示。

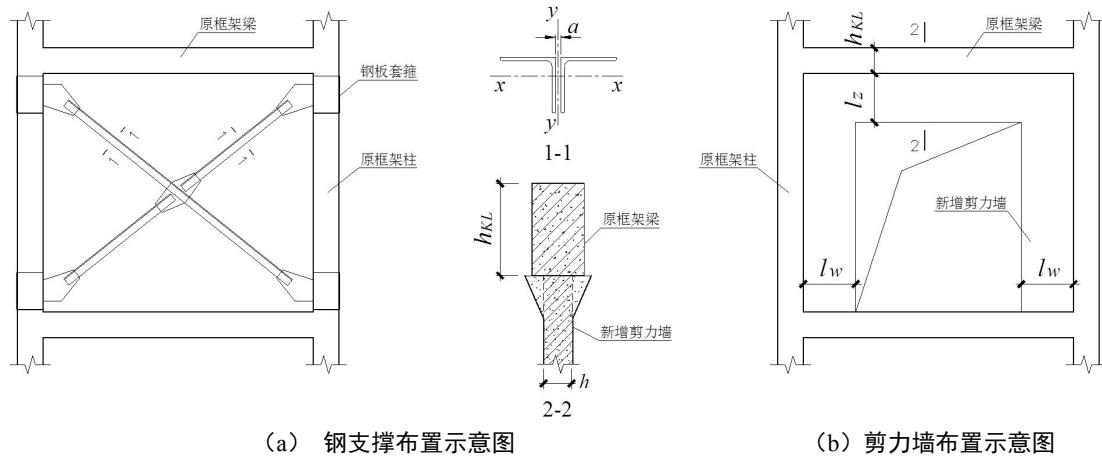


图 1 钢筋混凝土框架加固方案示意图  
Fig. 1 The schematic drawing of the strengthening scheme of reinforces concrete frame

## 2 高层转运站振动控制的力学模型与响应分析

### 2.1 力学模型的建立

某高层转运站为四柱十层的钢筋混凝土框架结构, 转载区域为九层、十层, 转载方向为  $90^\circ$ . 框架开间、进深均为 9.0 m, 结构总高度为 50 m, 采用变截面框架柱, 0~29.1 m 以下为 900 mm×900 mm, 29.1~49.5 m 变为 700 mm×700 mm. 标高

34.1 m 以下为无围护墙的敞开式框架结构, 布置 204 输送机机头及动力设备于标高 42.4 m 平台处, 布置 205 输送机机尾于标高 39.1 m 平台处。转运站剖面、计算模型分别如图 2 (a)、2 (b) 所示。



图 2 高层转运站原结构及两种加固方案计算模型

Fig. 2 The original structure and computing models of two strengthening scheme

利用有限元软件 ETABS 对此高层转运站进行了建模计算分析, 混凝土和钢材均采用线弹性、各向同性材料模型, 梁、柱均采用空间 beam 单元, 剪力墙采用 wall 单元, 楼板单元选用可直接将楼面荷载传递到与之相连的梁上的膜单元(Membrane), 膜厚度采用楼板厚度设计值, 边梁刚度放大系数为 1.0, 中梁刚度放大系数为 1.5. 由于 204 输送机所在通廊与转运站相接处有 2 个支承点, 考虑通廊对

高层转运站的水平支撑作用, 建立力学模型计算分析时, 将钢桁架通廊简化为两个 Y 方向的弹簧支座布置在转运站结构计算模型的相应位置; 同理, 对 205 双机所在通廊在 X 方向上做同样的处理。水平激振力作用位置按滚筒支架基础的锚固螺栓位置以点荷载形式平均分配确定, 作用点位置分布如图 3 所示。

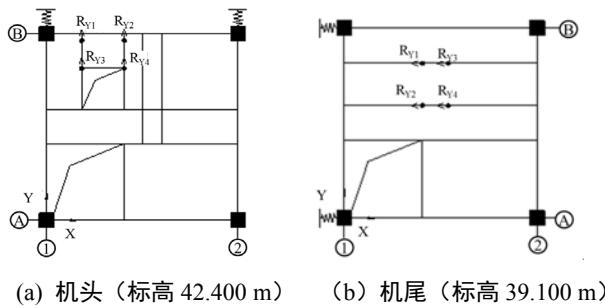


图 3 简化弹簧支座布置示意图

### Fig. 3 The schematic drawing of simplified spring support 2.2 结构的动力特性

截取前 5 阶振型, 采用 Ritz (LDR) 向量分析法进行模态分析。按“不考虑通廊水平支撑作用”和“考虑通廊水平支撑作用”两种工况进行。各工况下结构模态频率的计算结果如表 1 所示。

表 1 各振型模态频率的改变情况  
Tab.1 The changes of modal frequency

振型	X 向	Y 向	绕 Z 轴扭转	X 向	Y 向
M0	0.58	0.58	0.81	2.08	2.07
M1	2.08	1.88	2.21	2.08	2.59
M1/M0	3.58	3.23	2.75	1.00	1.25

注: M0-不考虑通廊支撑作用时的模态频率/Hz; M1-考虑通廊支撑作用时的模态频率/Hz

可以看出: 不考虑通廊水平支撑作用时, 由于纵横向柱距相等、构件截面尺寸相等, 结构前两阶平动振型对应的自振频率基本相等; 考虑通廊水平

支撑作用后, 增加了结构整体的侧向刚度, 同时缩短了结构的自振周期, 提高了结构的自振频率。

### 2.3 结构动力响应分析

分析类型采用线性时程分析; 指定振型阻尼比为 0.05; 荷载工况为稳定运行时机头皮带及机尾皮带对转运站结构的水平拉力幅值: 机头  $RY=400$  kN、机尾  $RX=50$  kN; 时程函数为正弦函数; 作用周期数为 5; 频率间隔 0.05 Hz; 频率范围 0.50~5.00 Hz (包含了原结构前 10 阶自振频率、水平振动频率测试值 0.98~1.12 Hz 和低频动力设备的振动频率)。为明确两个方向皮带张力各自对转运站结构的影响, 以下分析将两个方向的皮带张力分别独立施加, 从而得到两种工况下结构水平振动响应。各层参数的参考点为 2 轴与 A 轴的交点。

考虑通廊水平支撑作用对结构动力响应的影响程度, 分析过程分别建立两种计算模型, 即“模型一”(不考虑通廊水平支撑作用) 和“模型二”(考虑通廊水平支撑作用)。提取第 10 层的参考点在激振力作用方向上的频率一位移曲线, 如图 4、5 所示。其中  $DY_n$  表示机头皮带张力 ( $RY$ ) 作用下第  $n$  层参考点  $Y$  方向位移,  $DX_n$  表示机尾皮带张力 ( $RX$ ) 作用下第  $n$  层参考点  $X$  方向位移。

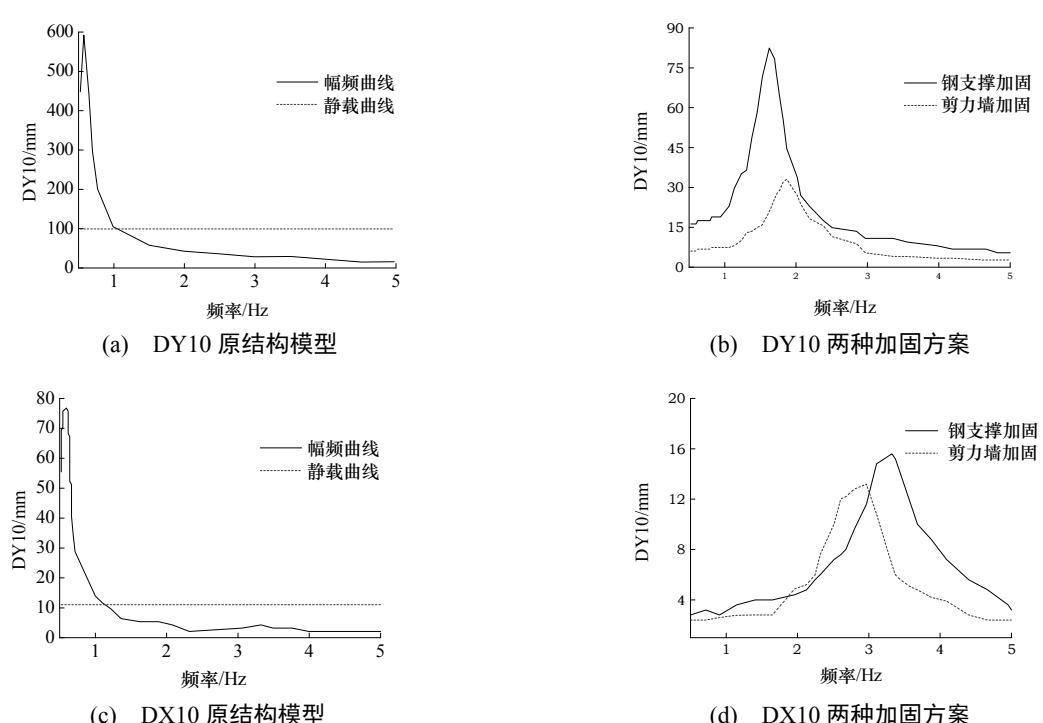


图 4 原结构模型及两种加固方案各参考点频率—位移曲线 (不考虑通廊水平支撑作用)

Fig. 4 The frequency-displacement curve of reference points of original structure and strengthening schemes

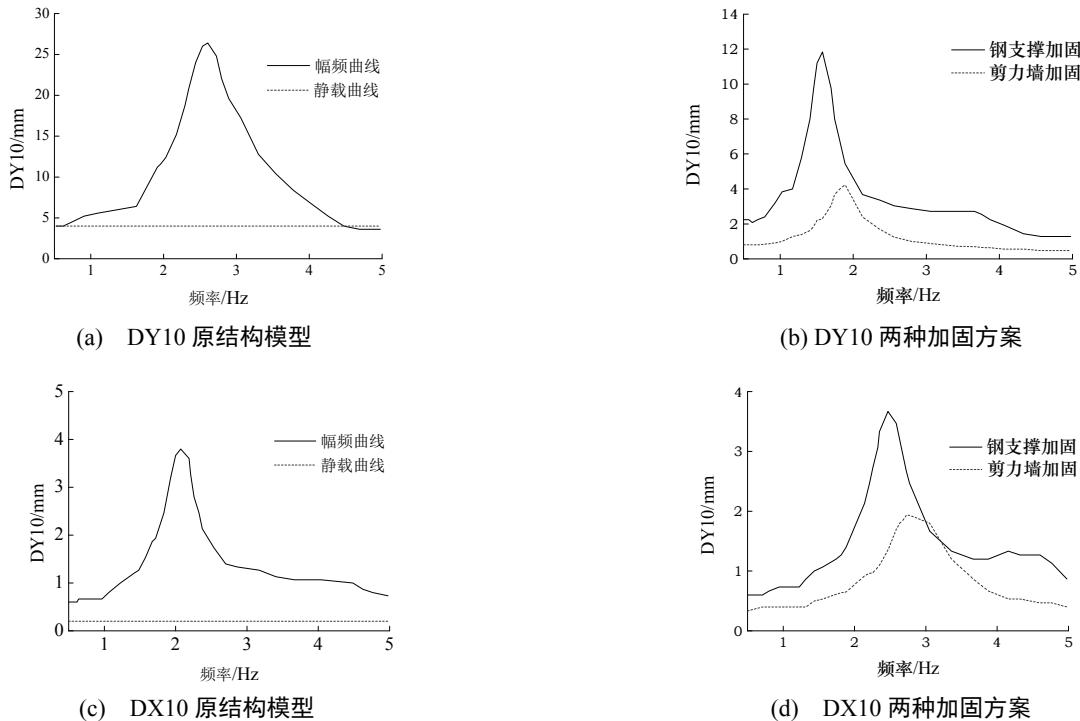


图 5 原结构模型及两种加固方案各参考点频率一位移曲线(考虑通廊水平支撑作用)

Fig. 5 The frequency-displacement curve of reference points of original structure and strengthening schemes

有限元模拟结果表明, 考虑通廊作用时, 可以明显缩短高层转运站的自振周期, 提高其自振频率, 整体刚度明显提高。在不考虑通廊水平支撑作用时, 结构刚度沿竖向均匀分布, 各层参考点频率一位移曲线峰值均对应相同的频率, 且  $X$ 、 $Y$  两个方向均只在第一阶频率处有共振现象, 表明高层转运站结构和其他高耸柔性结构一样, 侧向水平振动受低频激振力影响显著。采用钢支撑加固和钢筋混凝土剪力墙加固两种加固方案后, 峰值点位移显著降低, 结构侧向刚度明显提高, 共振频率相应增加。

考虑通廊水平支撑作用时对各工况下的结构的动力特性和动力响应进行了比较。基本自振频率比较, 如表 2 所示。水平振动位移峰值比较, 如表 3、表 4 所示。图 6 和图 7 表示考虑通廊水平支撑作用时,  $0.5\sim5.0$  Hz 频段简谐水平激振力作用下结构在  $Y$  方向和  $X$  方向的共振频率及相应各参考点的位移幅值。

通过比较可以看出:

(1)对于高层转运站结构, 通廊的水平支撑作用在结构水平振动控制中起到了重要作用, 如表 2~表 4 所示。但由于转运站结构自身刚度相对较小, 局部水平约束使得结构侧向刚度沿竖直方向呈现

不均匀变化, 且结构自身刚度愈小, 这种不均匀性体现越明显。表现为水平力作用下结构侧向变形不均匀, 各楼层参考点的峰值位移对应激振频率不统一, 在计算频段( $0.5\sim5.0$  Hz)内的发生多个频率点共振现象, 如图 6(a) 和图 7(a) 所示。

(2)采用钢支撑加固方案: 在  $X$  方向上, 考虑到高层转运站与通廊接口设置和设备吊装需要, 在顶层 A 轴、B 轴 ( $X$  方向) 柱间未布置支撑, 钢支撑不均匀的设置使结构在  $X$  方向上各层的共振频率仍有离散现象, 但离散程度明显减弱, 如图 6(b) 所示; 在  $Y$  方向上, 钢支撑设置均匀, 结构整体刚度的提高使得局部水平约束对结构局部刚度的改变程度减弱, 表现为各参考点有统一的共振频率, 且加固后结构在水平力作用下的侧向变形趋于均匀, 如图 7(b) 所示。

(3)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。表现为各楼层具有统一的共振频率, 且在计算频段( $0.5\sim5.0$  Hz)内的各层只在一个频率点发生共振现象。同时, 由于剪力墙设置均匀对称, 加固后高层转运站在水平力作用下侧向变形较均匀, 如图 6(c) 和图 7(c) 所示。所以建议优先选用钢筋混凝土剪力墙加固方案。

表2 各工况下结构基本自振频率计算结果对比  
Tab.2 Comparison of vibration frequencies under various operating conditions

方向	各工况基本自振频率/Hz					各工况频率比	
	M0	M1	M2	M3	M1/M0	M2/M1	M3/M1
Y	0.58	1.88	3.34	2.89	3.23	1.78	1.54
X	0.58	2.08	2.48	2.77	3.58	1.20	1.33

注: M0—原结构不考虑通廊的水平支撑作用; M1—原结构考虑通廊的水平支撑作用;  
M2—考虑通廊的水平支撑作用+钢支撑; M3—考虑通廊的水平支撑作用+钢筋混凝土剪力墙(下同)

表3 各工况下Y向水平振动位移峰值比较  
Tab.3 Comparison of horizontal displacements in Y direction under various operating conditions

参考点	各工况位移峰值/mm				各工况位移峰值比		
	M0	M1	M2	M3	M1/M0	M2/M1	M3/M1
DY10	588.61	26.38	14.76	14.86	22.31	1.79	1.78
DY9	541.55	7.01	12.18	12.77	77.21	0.58	0.55
DY8	513.78	6.32	13.54	12.33	81.29	0.47	0.51
DY7	451.67	10.03	13.61	11.53	45.03	0.74	0.87
DY6	376.16	12.79	12.80	10.35	29.41	1.00	1.24

表4 各工况下X向水平振动位移峰值比较  
Tab.4 Comparison of horizontal displacements in X direction under various operating conditions

参考点	各工况位移峰值/mm				各工况位移峰值比		
	M0	M1	M2	M3	M1/M0	M2/M1	M3/M1
DY10	76.26	3.83	3.60	2.34	19.91	1.06	1.63
DY9	70.52	1.65	1.39	1.92	42.68	1.19	0.86
DY8	67.12	1.12	1.06	1.75	60.19	1.05	0.64
DY7	53.37	1.40	0.91	1.58	38.02	1.54	0.89
DY6	49.40	1.88	0.78	1.39	26.34	2.42	1.35

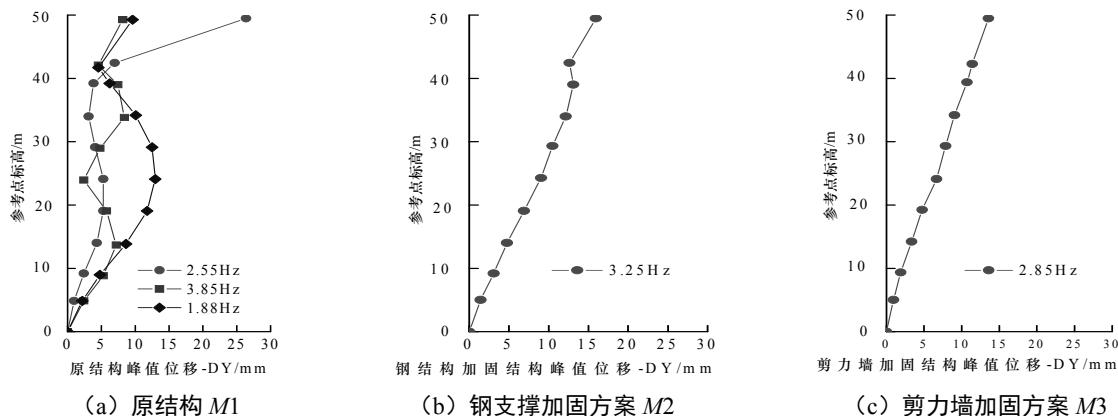


图6 RY作用下Y方向的共振频率及参考点位移幅值(水平力标高42.400 m)

Fig.6 The resonant frequency and displacement amplitude of reference points under RY force in Y direction

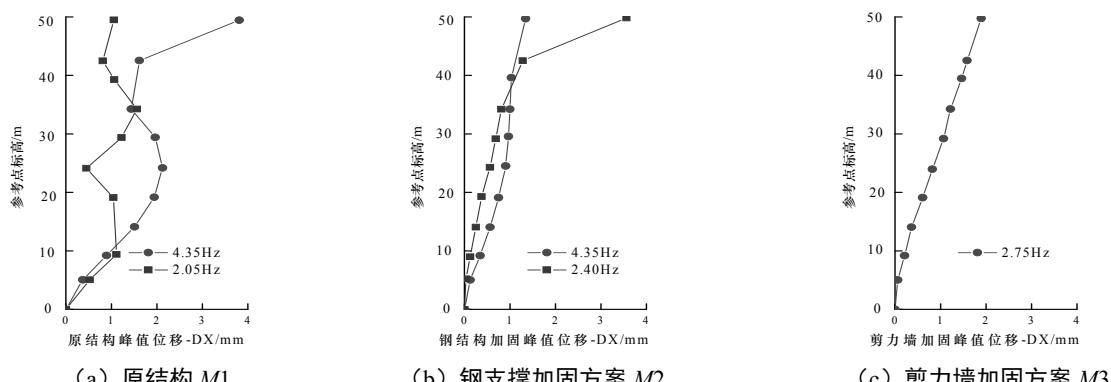


图7 RX作用下X方向的共振频率及参考点位移幅值(水平力标高39.100 m)

Fig.7 The resonant frequency and displacement amplitude of reference points under RX force in X direction