

某转运站结构的动力性能分析

翟磊, 薛建阳, 闫春生, 王林科

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为分析转运站结构的动力性能, 研究了转运站结构的动力特性和动力响应. 基于现场实测结果, 对某转运站结构进行数值模拟, 分析了结构的动力特性和水平振动响应. 模拟计算结果与实测结果对比表明: 计算模型中应考虑钢桁架通廊对转运站结构的水平支撑作用. 由于未考虑非结构构件刚度的贡献, 计算结构的自振周期宜乘以一个小于 1 的折减系数. 转运站属于柔性结构, 在静荷载作用下结构的位移与动荷载作用下结构的位移响应有很大差异. 研究结果可为转运站动力特性和动力分析提供参考.

关键词: 转运站; 动力测试; 动力特性; 动力响应

中图分类号: TU366 TU311.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0235-05

Analysis on dynamic performances of transfer station structure

ZHAI Lei, XUE Jianyang, YAN Chunsheng, WANG Linke

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

Abstract: In order to analyze the dynamic performances of the transfer station, dynamic analysis was carried out on the dynamic characteristics and responses of the structure. Based on actual investigations, a classical transfer station structure was simulated. Dynamic characteristics and horizontal displacement response of the structure were analyzed indicating that the lateral support of structural steel traverse to the transfer station should be taken into account in simulation model. The computation period should be reduced by a factor lower than 1 in modeling because of no consideration of the contribution of the non-structure element to the structures. For the transfer station is a kind of flexible structure, there is a big difference between the displacement response under static loads and that under dynamic loads. This study can be helpful for the analysis on the dynamic characteristics and response of transfer station.

Key words: transfer station; dynamic test; dynamic characteristics; dynamic response

转运站是设在两台高架固定式带式输送机之间的中转站, 在工业运输系统中起着重要的枢纽作用. 转运站多为敞开式框架结构, 高宽比较大, 除设备层外其余各层通常不设置楼板, 属典型的柔性结构; 而且皮带张力和动力设备扰力作为引发转运站结构振动的主要激振源, 均作用于结构顶部. 因此, 无论是结构形式还是受力性质, 转运站结构的抗振性能都比一般结构不利得多. 目前, 随着长运距、高带速、大运量、大功率带式输送机在工业运输领域的广泛使用, 对转运站的结构高度和水平抗振能力也提出了更高的要求.

对转运站这一特殊结构的振动问题, 国内尚无系统的研究成果可供借鉴并应用于新建结构设计和在役结构的加固维修^[1-3]. 解决振动问题的方法不外乎通过理论分析和试验研究, 二者是相辅相成的. 特别是计算机和数值模拟技术的发展和完善, 为解决复杂振动问题提供了强有力的手段^[4-6]. 为系统掌握转运站结构的振动特性和动力响应, 使转运

站能够正常、安全、经济和高效地服务于生产, 有必要对常见类型转运站结构的动力性能进行系统的研究, 对结构的设计原则和设计方法进行深入探讨. 本文采用现场实测和模拟计算^[7]的方法, 结合典型工程案例, 对振动系统所受各种激励及所产生的动力响应之间的关系进行探讨, 提出符合转运站结构实际受力情况的整体计算模型, 为新建转运站结构设计和在役转运站结构加固维修提供依据.

1 工程概况

转运站系某钢铁公司焦化厂煤料输送系统工程之一, 为四层六柱组成的钢筋混凝土框架结构, 转载单元为顶部两层, 转载方向为 90°. 结构平面布置规则, 横向轴线尺寸为 5.70 m+5.30 m, 纵向轴线尺寸 8.70 m, 总高度 18.70 m, 一、二层敞开无围护结构, 一层 (标高 4.000 m 处) 无楼板, 三、四层局部外围设砌体填充墙并开设门窗洞口. 框架柱截面尺寸均为 500 mm×500 mm. 转运站在四层和

三层分别与 R3、R4 通廊和 R5、R6 双机通廊相连。四层布置 R3、R4 两台输送机机头、驱动电机和减速箱,三层布置 R5、R6 两台输送机机尾。图 1 为某转运站现场照片,其剖面图如图 2 所示,转运站三层、四层设备平面布置如图 3 所示。



图 1 某转运站现场照片
Fig.1 The transfer station site photo

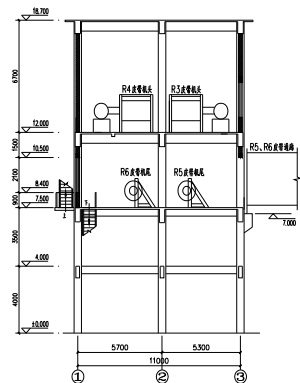
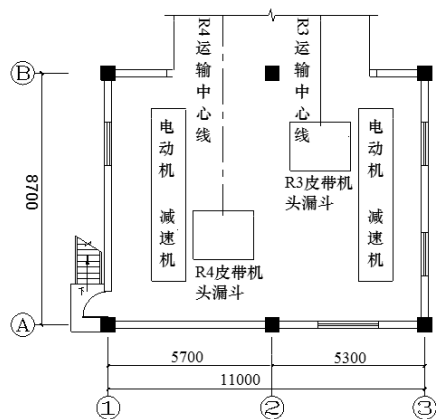
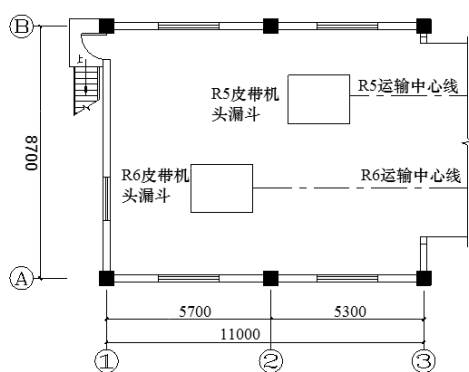


图 2 某转运站剖面图
Fig.2 A profile of the transfer station



(a) 四层 (12.000 m) 设备平面布置图



(b) 三层 (7.500 m) 设备平面布置图

图 3 某转运站设备层平面布置图

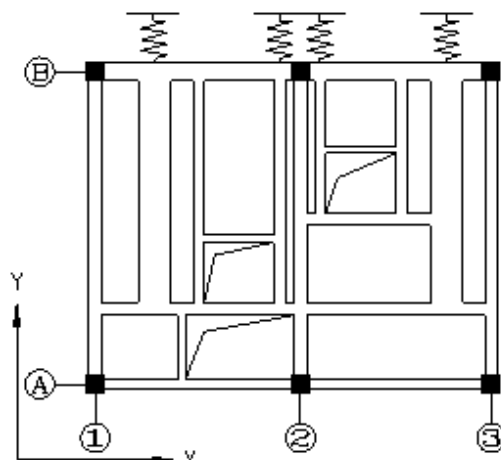
Fig.3 The planar graph of the equipment floor

2 结构动力分析

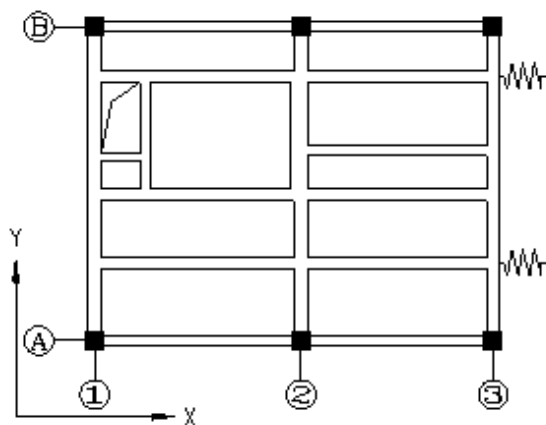
2.1 有限元模型的建立

转运站结构的计算分析采用 ETABS Non-linear

V8.48 程序,建模时混凝土和钢材均采用线弹性、各向同性材料模型,楼板单元选用膜单元(Membrane),膜厚度采用楼板厚度设计值,从实际作用来看,钢桁架通廊对转运站结构可以起到水平支撑作用,从而抑制转运站结构在水平方向的振动,同时也改变了转运站结构的动力特性。R3、R4 通廊与转运站交接处有四个支承点,为明确钢桁架通廊的支撑作用,在建立力学模型分析时,将钢桁架通廊简化为四个 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 R5、R6 双机通廊在 X 方向上做类似的简化处理,如图 4 所示。



(a) 三层楼板 (12.000m) 弹簧支座布置



(b) 二层楼板 (7.500m) 弹簧支座布置

图 4 简化弹簧支座布置示意图

Fig.4 The schematic drawing of simplified spring support

机器设备按现场实际情况进行布置,结构上作用的荷载按照 GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》^[8]等确定,设备荷载按厂家提供的资料确定。激振源由高频激振源和低频激振源组成。模型中未考虑砌体填充墙和附属钢楼梯等非结构构件对结构动力特性的影响。建立的实体结构计算模型,如图 5 所示。



图 5 转运站结构计算模型
Fig.5 The computing model of the transfer station

2.2 动力特性计算结果

表 1 为转运站结构自振频率、自振周期、各阶振型的有限元模拟计算结果, 以及与测试结果的对比.

表 1 动力特性测试结果与计算结果的比较
Tab.1 Comparison of dynamic characteristics between test and calculation

阶数	测试结果			模拟计算结果		
	频率/Hz	周期/s	振型	频率/Hz	周期/s	振型
1	1.75	0.57	X向平动	1.61	0.62	X向平动
2	—	—	—	2.53	0.39	绕 Z 轴扭转
3	—	—	—	2.59	0.38	Y向平动

可以看出, 模拟计算的第一周期与实测周期之比为 1.1. 动力特性的计算结果与测试结果比较接近, 表明在计算模型中考虑钢桁架通廊对转运站结构的水平支撑作用是正确的, 模型的简化计算方法合理. 由于在建模时没有考虑砌体填充墙和钢楼梯等非结构构件对结构动力特性的影响, 因此计算结果与测试结果存在较小的误差.

2.3 动力响应分析

在动力荷载作用下, 结构物发生异常振动的原因主要有两种: 一是由于激振力频率与结构固有频率相接近或一致, 发生共振现象; 二是由于结构自身刚度不足, 致使在受迫振动时结构的振动幅度较大, 超过结构安全和正常使用所要求的允许振动标准. 对于转运站结构而言, 其振动主要有两种类型, 即: 结构的水平振动和设备层楼盖的竖向振动.

(1) 楼盖竖向振动响应分析

转运站结构楼盖的竖向振动主要由高频激振源(驱动电机和减速箱输入端)所诱发. 在三层楼盖 R3 和 R4 输送机驱动装置位置分别施加竖向激振力 $P(t)$, 计算得到三层楼盖(驱动电机和减速箱所在楼层, 标高 12.000 m)跨中竖向振动位移幅值为 0.013 mm; 二层楼盖(标高 7.500 m)跨中竖向振动位移幅值为 0.011 mm. 表明楼盖竖向振动微弱.

(2) 结构水平振动响应分析

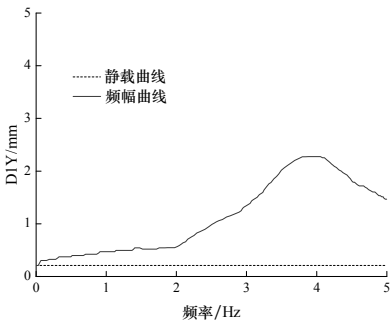
结构水平振动主要由低频动力设备扰力和输送机皮带动张力引起. 由于皮带张力幅值比动力设备扰力幅值要大很多, 因此, 在结构水平振动响应分析中, 水平激振力幅值以皮带张力为主, 结构水平振动响应分析选取各层 2 轴线中点为参考点, 从第一层到第四层分别用 D1, D2, D3, D4 来表示.

对模型施加 R3、R4 皮带张力(Y 向): 激振力幅值 $138\text{ kN}\times 2$, 获得 D1-D4 点 Y 轴频率—位移关系曲线如图 6 所示. 该工况下结构主要表现为 Y 向位移响应, 各参考点沿 Y 轴频率—位移关系曲线有以下特征(如表 2 所示).

表 2 各参考点沿 Y 轴频率—位移曲线特征
Tab.2 The eigenvalues of reference points by frequency-displacement curve along Y axis

参考点	D4	D3	D2
曲线第一峰值处激振力频率/Hz	2.60	2.40	4.10
结构第 3 阶(Y 向)频率/Hz	2.60	2.60	2.60
曲线第二峰值处激振力频率/Hz	—	3.80	—
结构第 5 阶(Y 向)频率/Hz	3.85	3.85	3.85

结构的 Y 向平动主要出现在第 3 阶和第 5 阶振型. 其中顶板 D4 的 Y 向最大相对位移出现在第 3 阶振型, 二层板 D2 的 Y 向最大相对位移出现在第 5 阶振型. 由图 6 中各参考点沿 Y 方向的频率—位移关系曲线特征能够显示出结构的上述动力特性, 即: 由于弹簧支座限制了楼层水平位移, 弹簧支座以下各层只有在较高频激振力作用下才会出现峰值.



(a) D1 点沿 Y 轴频率-位移曲线

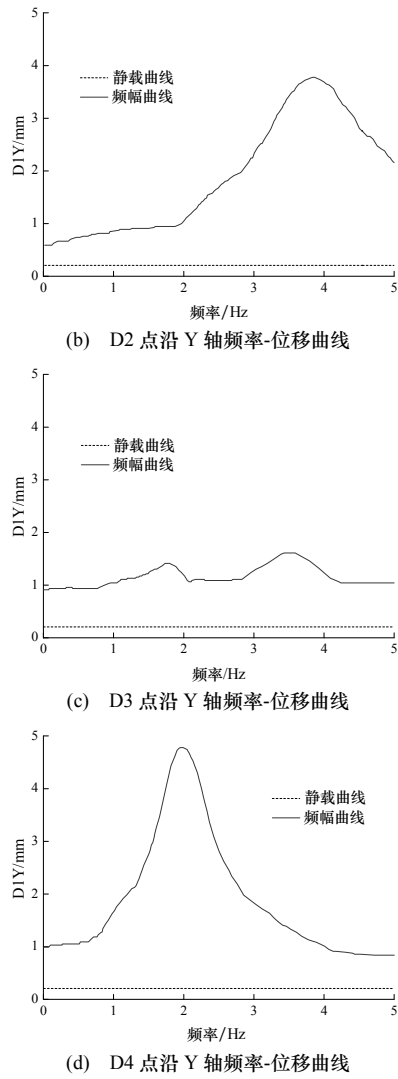


图 6 D 点 Y 轴频率-位移曲线

Fig.6 Frequency-displacement curve of Point D along Y axis
对模型施加 R5、R6 皮带张力 (X 向): 激振力幅值 $50\text{ kN}\times 2$, 获得 D1-D4 点沿 X 轴频率-位移关系曲线如图 7 所示. 该工况下结构主要发生 X 向位移响应, 各参考点沿 X 轴频率-位移关系曲线有以下特征 (如表 3 所示).

表 3 各参考点沿 X 轴频率-位移曲线特征
Tab.3 The eigenvalues of reference points by frequency-displacement curve along X axis

参考点	D4	D3	D2
曲线第一峰值处激振力频率/Hz	1.60	1.60	1.50
结构第 1 阶 (X 向) 频率/Hz	1.61	1.61	1.61
曲线第二峰值处激振力频率/Hz	3.40	3.50	3.30
结构第 4 阶 (X 向) 频率/Hz	3.47	3.47	3.47

结构 X 向平动主要出现在第 1 阶和第 4 阶振型. 各参考点沿 X 方向的频率-位移关系曲线第一峰值和第二峰值所对应的激振力频率分别近似等于结构 X 向的前两阶自振频率值 1.60 Hz 和 3.47

Hz. 由于弹簧支座限制了楼层水平位移, 弹簧支座以下楼层 (D1) 虽在第一频率 1.60 Hz 出现峰值, 但频率-位移关系曲线整体呈上升趋势, 峰值位移随激振力频率的增加而增大.

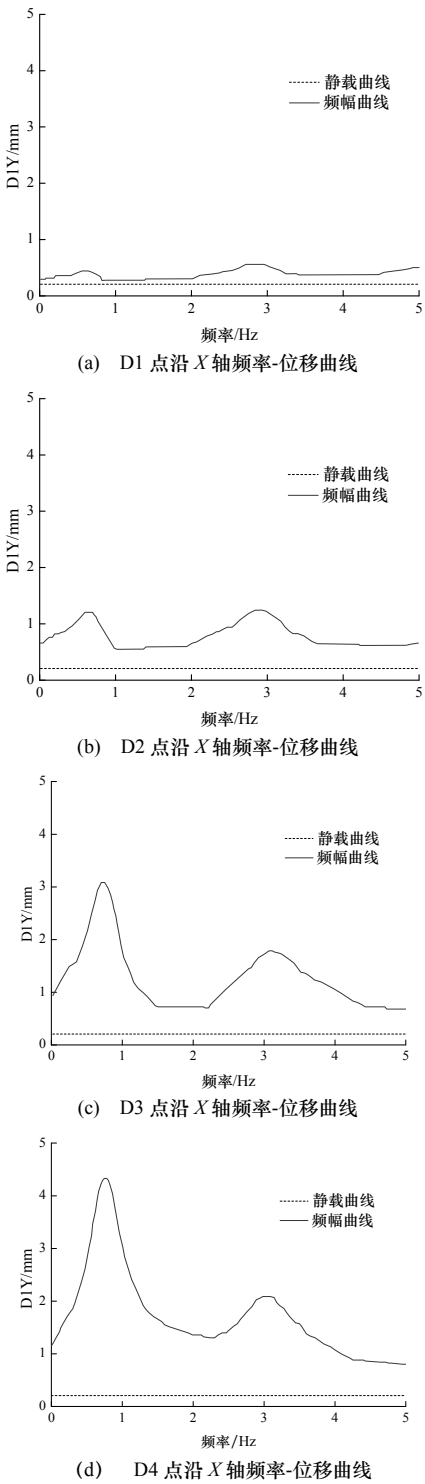


图 7 D 点 X 轴频率-位移曲线

Fig.7 Frequency-displacement curve of Point D along X axis

(3) 影响结构水平振动位移的因素讨论
取激振力 R3/R4 (频率取 2.50 Hz) 和 R5/R6 (频

率取 1.25 Hz) 共同作用、相位差等于 0、振型阻尼比 0.05 为标准工况. 分别改变激振力的相位差、激振频率和振型阻尼比, 比较在各参数发生变化时, 结构振动位移的变化规律, 如表 4 所示. 皮带输送系统在实际工作状态时, 每条运输线上的两台输送机应同时起动或 R5/R6 先起动、R3/R4 后起动, 表 4 中标准工况 0 表示 R5/R6 和 R3/R4 同时起动; 工况 4、工况 5 表示 R5/R6 先起动, R3/R4 后起动.

由表 4 可以看出, 由于两个方向作用力存在相

位差, 使得位移响应峰值不能同时出现, 因此分别独立施加水平力 R3/R4、R5/R6 所得的峰值位移之和, 与 R3/R4、R5/R6 同时施加或相继施加之合力作用下的峰值位移存在差异; 激振力频率取 0 (静荷载作用) 时的位移响应计算值与动荷载作用下的位移响应值存在显著差异, 表明激振力的幅频特性对结构动力响应有很大的影响, 应当准确判断结构的自振频率, 避免共振现象发生; 另外改变振型阻尼比, 结构位移响应计算值将产生较大变化.

表 4 各参考点在各工况下的水平振动位移幅值计算结果
Tab.4 The amplitude of horizontal vibration displacements of reference points under various operating conditions

工 况		D4Y/mm	D4X/mm	D3Y/mm	D3X/mm	D2Y/mm	D2X/mm
0	标准工况	4.568	2.079	1.378	1.691	0.954	0.874
1	仅施加 R3/R4	4.662	0.345	1.374	0.176	0.953	0.062
2	仅施加 R5/R6	0.248	1.890	0.017	1.542	0.004	0.867
3	R3/R4+R5/R6	4.910	2.235	1.391	1.718	0.957	0.929
4	相位差 90°	4.774	2.065	1.379	1.854	0.949	0.863
5	相位差 180°	4.765	2.103	1.378	1.829	0.960	0.834
6	激振力频率为 0	0.802	0.771	0.751	0.607	0.453	0.455
7	阻尼比 0.03	6.689	2.418	1.556	2.016	0.994	0.928

3 结论

(1) 运用 Etabs 有限元程序计算的转运站结构的动力响应与现场测试结果比较接近, 表明在计算模型中考虑钢桁架通廊对转运站结构的水平支撑作用是合理的. 将转运站和通廊作为一个整体, 考虑两者的协同工作, 可以提高转运站结构振动分析结果的精度.

(2) 结构建模时由于未考虑砌体填充墙和钢楼梯等非结构构件对转运站刚度的贡献, 计算周期值较实测值偏大. 工程设计时, 应根据填充墙数量、楼梯的布置等对计算的自振周期进行一定折减.

(3) 转运站属柔性结构, 且为高位水平受力不对称形式, 对抗振极为不利. 静荷载作用下结构的位移与动荷载作用下结构的位移响应有很大差异, 应在设计阶段充分考虑输送机皮带张力的幅频特性, 选择一种更为合理的结构方案, 以降低设备振动的影响.

参考文献 References

[1] 徐建. 建筑振动工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
XU Jian. Construction vibration engineering manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.

[2] 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LI Guoqiang, LI Jie. Engineering structure dynamic testing theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[3] 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.

[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] CLOUGH R W, PENZIENJ, Dynamics of structures[M]. Second edition (revised). Computers and Structures Inc., 2003.

[6] WILSON E L. Static and dynamic analysis of structures[M]. Forth edition (revised). Computers and Structures Inc., 2004.

[7] 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.

[8] GB 50009-2012. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50009-2012. Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

(本文编辑 吴海西)