

基于相似理论的带钢热镀锌生产线 冷却塔模型设计

徐培民¹, 张学龙², 许飞², 王文军³

1. 安徽工业大学机械工程学院, 安徽马鞍山, 243032
2. 安徽工业大学研究生学院, 安徽马鞍山, 243002
3. 宁波市车辆管理所, 浙江宁波, 315040

摘要 某钢厂带钢连续热镀锌线上的冷却塔高达 60 余米, 结构复杂且其上设备繁多, 其动特性对工艺段带钢抖动的贡献不可忽视。为了更好地研究冷却塔的动力学特性及其可能带来的对带钢抖动的影响, 本文以相似理论中的 π 定理为基础, 对冷却塔进行模型相似设计, 并用 LMS 模态测试系统测试模型塔动态特性, 结果发现, 模型和原型的动力学特性基本相似, 这为进一步在实验室建立抖动试验装置、更深入地研究热镀锌工艺段的带钢抖动问题提供了可靠的塔模型。

关键词 相似理论; 相似系数; 相似准则; 模态; 动力特性

中图分类号 TH128

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.01.007

A Model of the Cooling Tower of a Continuous Hot Dip Galvanizing Line Based on Similarity Theory

XU Peimin¹, ZHANG Xuelong², XU Fei², WANG Wenjun³

1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, Anhui Province, China
2. Graduate School of AHUT, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui Province, China
3. Vehicles Enterprise of Ningbo, Ningbo 315040, Zhejiang Province, China

Abstract The cooling tower of a continuous hot dip galvanizing line is more than 60 meters high, with complex structure and with various equipments installed in it. The dynamic characteristics of the cooling tower have important effects on the strip vibration of the process section. In order to better reveal the effects of dynamic characteristics of the cooling tower on the strip vibration, this paper designs a model to simulate the cooling tower based on the theorem of the similarity theory. The LMS modal testing system is used to test the dynamic characteristics of the model and the prototype, and it is found that their dynamic characteristics are basically similar to each other. So a reliable tower model is obtained for a vibration testing device of the process section to investigate the strip vibration.

Keywords similarity theory; similarity coefficient; similarity criterion; modal; dynamic characteristic

0 引言

带钢连续热镀锌生产线工艺段的冷却塔是超高层大型钢结构建筑物, 带钢在其中完成镀锌、合金化、冷却和纠偏等工艺过程, 对整个工艺系统起着至关重要的作用。冷却塔动态特性的优劣直接影响到由带钢、冷却塔和辊子组成的复杂工艺系统的动态性能, 关系到带钢在出锌锅上行段的运行平稳性, 进而直接影响镀层质量, 必须对其进行透彻的动力学设计和分析。但是由于其结构复杂, 塔上辅助设备繁多, 工作

环境恶劣, 在实际工况下很难对其进行详细的动力学研究。

对于像冷却塔如此大型钢结构的研究, 一般是根据相似理论^[1]把原型模型化, 先对模型进行研究, 然后再根据相似条件把模型数据换算到原型上。文献[2]根据相似理论对一高层钢框架进行模型化设计, 真实地再现了实际结构体系的工作状态, 并总结出模型相似的一般准则。文献[3]根据相似理论对一大桥进行动力学相似设计, 得出了模型满足动力学相似的相似关系, 并把理论分析与实验结果对比, 两者基本吻合。为了

收稿日期: 2011-09-14; 修回日期: 2011-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975003)

作者简介: 徐培民, 教授, 研究方向为非线性动力学、机械系统动力稳定性, 电子信箱: xupeimin@gmail.com

使模型与原型在动力学上能够达到最大程度地相似,文献[4]首次引入固有频率比相对误差的概念,并把其作为模型相似程度的衡量标准。本文为了研究某热镀锌冷却塔对工艺段带钢抖动的影响,拟根据相似理论对冷却塔进行模型化设计。

1 原型塔描述

冷却塔原型是一个钢结构(图1),长 $l_p=19.3\text{m}$,宽 $b_p=12.8\text{m}$,高 $h_p=65.27\text{m}$ 。6根型号为HW400×400的大H型钢立柱刚接在地面上。塔共15层,如图1中数字1—15所示,每层的大梁也都由H型钢做成,这些H型钢的型号主要是HM350×250。每层立柱之间都有加强杆,加强杆的主要型号是25b的槽钢。梁与梁之间、梁和立柱之间多用螺栓刚性连接或铰接,加强杆与立柱和横梁之间为铰接。

如此高的冷却塔(同类冷却塔中最高的),其结构复杂设备繁多,模型与原型完全相似^[9]是不能实现的,因此,本文主要关心模型与原型的动态相似^[6]。

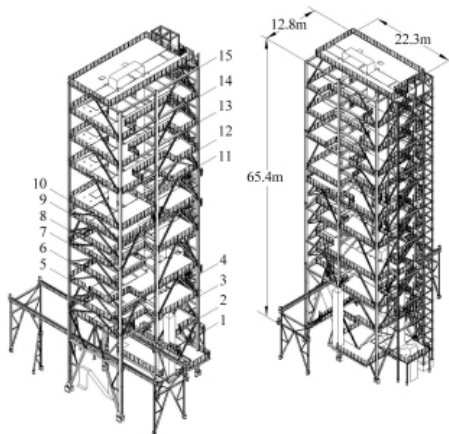


图1 冷却塔原型

Fig. 1 Structure of cooling tower

2 相似准则确定

在确定模型与原型之间的相似准则之前,首先必须找出各相关物理量之间的关系。对于简单的结构,可以根据材料力学或弹性力学等建立相关物理量之间的函数关系,确定相似准则。但是对于像冷却塔如此复杂的结构,建立相关物理量之间的函数关系是不能实现的。因此,本文引入无量纲化法^[6]来确定相似准则。

如不作特殊说明,本文下标字母p代表原型,下标字母m代表模型,C表示相似准数。

2.1 静力学相似准则确定

影响冷却塔静力特性的主要物理量有:弹性模量 E_p (210GPa)、应力 σ_p 、泊松比 μ_p (0.3)、密度 ρ_p ($7.85 \times 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、应变 ε_p 、塔长度 l_p (19.3m)、线位移 δ_p 、塔高 h_p (65.27m)、塔梁横截面积 A_p 、集中力 F_p 、弯矩 M_p 、塔宽 b_p (12.8m)、塔梁惯性矩 I_p 、重力加速度 g_p ($9.8 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),共14个变量。

2.2 动力学相似准则确定

实际上,动力学相似比静力学相似只多了一个频率相

似,但是为了进一步说明动力相似的特性,本文将选用与静力相似不同的基本量纲确定动力相似准则。影响系统动力特性的主要物理量有:长度 l 、弹性模量 E 、密度 ρ 、时间 t 、泊松比 μ 、位移 d 、加速度 a 、重力加速度 g 、频率 f 、质量 m 、力 F 、速度 v 、位移传递函数 H 。

以长度 l 、质量 m 和时间 t 为基本量纲,根据无量纲化要求,计算推出各 π 因子:

$$\pi_1 = lEt^2/m, \pi_2 = l^2\rho/m, \pi_3 = dl/l, \pi_4 = at^2/l, \pi_5 = gt^2/l, \pi_6 = ft, \pi_7 = Ft^2/ml, \pi_8 = vt/l, \pi_9 = 1, \pi_{10} = Hml^2 \quad (1)$$

从而可以推出动力相似准则:

$$C_E = C_m C_l^{-1} C_t^{-2}, C_\rho = C_m C_l^{-3}, C_a = C_l, C_g = C_l C_t^{-2}, C_f = C_l C_t^{-2}, C_F = C_m C_l C_t^{-2}, C_v = C_l C_t^{-1}, C_u = 1, C_H = C_l^2 C_m^{-1} \quad (2)$$

进一步可以导出时间相似系数:

$$C_t = C_l \sqrt{C_\rho / C_E} \quad (3)$$

2.3 模态相似

根据传递函数矩阵与模态参数之间的关系^[7],可以推出以下模态相似关系。

(1) 模态振型相似

若把模型和原型的振型各自都对同一位置的元素作标准化,则有

$$(H_{ir})_p / (H_{ir})_m = 1 \quad (4)$$

式中, H_{ir} 表示地 r 阶的位移传递函数,上式表明模型和原型的振型相同。

(2) 模态频率相似

在质量相似,即满足: $C_\rho = C_l^{-1} C_g^{-1} C_E$ 时,由式(3)可以推得:

$$C_t = \sqrt{C_l} \quad (5)$$

进而可以推得:

$$f_p / f_m = 1 / \sqrt{C_l} \quad (6)$$

式中, f_p, f_m 分别表示原型和模型的模态频率,且频率相似准数 $C_f=20$,大于1,所以,式(6)表明模型的第 r 阶模态频率大于原型的同阶频率。

在质量不相似时,此时由式(3)可以推出下列关系:

$$C_t = \sqrt{C_\rho C_l^2 / C_E} = \sqrt{C_l' / C_E C_l} \quad (7)$$

式中, $C_l' = \frac{m_p}{m_m}$ 表示原型实际质量(m_p)与模型实际质量(m_m)比值。此时模型与原型的模态频率关系为:

$$f_p / f_m = \sqrt{C_E C_l' / C_m} \quad (8)$$

(3) 模态质量相似

当所选的模型材料与原型材料一样时,模态质量有下列关系:

$$\frac{(m_r)_p}{(m_r)_m} = \frac{H_m}{H_p} \frac{(f_r)_m}{(f_r)_p} = C_l^3 \quad (9)$$

式中, m_r 表示第 r 阶的模态质量, f_r 表示第 r 阶的模态频率,由式(9)可见,原型模态质量是模型模态质量的体积比。

(4) 模态刚度相似

由 $f_r = \frac{k_r}{m_r}$ 可得出

$$(k_r)_p / (k_r)_m = (f_{mr}^2)_p / (f_{mr}^2)_m = C_l \quad (10)$$

式中, k_r 表示第 r 阶模态刚度。式(10)表明模型塔的模式刚度减小了。

3 模型设计

根据实验室空间,几何尺寸缩尺比定为 20:1,即 $C_l=20$ 。所以模型塔的长宽高直接缩尺为: $l_m=0.97m, b_m=0.64m, h_m=3.26m$ 。

本文主要关心模型塔的动力特性,所以在模型设计时,主要保持惯性力与弹性恢复力相似,即保持式(3)所示相似准则^[8-10]。

3.1 模型塔静力学设计

根据静力相似准则,泊松比相似系数 $C_\mu=1$,为了保证泊松比相似,模型材料和原型材料必须相同。又由于 $C_\mu=1$,这就意味着原型和模型结构上对应点的应变必须相同,这一点在模型设计时无法保证。应变无法保证,应力 $C_\sigma=C_E C_\epsilon$ 就无法保证。但是由于本文只关心模型结构的动态特性,因此在模型设计时,忽略应力应变相似,只要求弹性模量 E 严格相似即可,根据实验室条件,本文 $C_E=1$ 。由式(2)可见,模型材料的密度是由模型材料的几何尺寸、弹性模量以及重力加速度决定的。由于模型和原型都是处于同一重力场之中,所以 $C_g=1$ 。而 $C_l=20, C_E=1$ 已经确定,所以 $C_\rho=C_l^{-1} C_g^{-1} C_E=1/20$,也就是模型材料的密度是原型材料密度的 20 倍。这种材料是找不到的。解决这个问题有两种方法:第一,采用附加质量法对模型加砝码,以提高模型密度;第二,忽略重力加速度相似条件。本文采用附加质量法。在相似参数 C_E, C_ρ, C_l 都已确定的基础上,可确定其余相似参数,据此可进一步确定模型的几何参数(表 1)。

表 1 模型几何参数

Table 1 Geometry parameters of the model

	截面积/cm ² A_m	惯性矩/cm ⁴		截面抗弯系数/cm ³	
		I_{mx}	I_{my}	W_{mx}	W_{my}
立柱	0.5467	0.4153	0.1400	0.1453	0.1400
大梁	0.2488	0.1304	0.0228	0.1533	0.0364
加强杆	0.0992	0.0220	0.0022	0.0352	0.0040

受实验条件和其他客观条件所限,完全按照表 1 所列的理论计算值来制作模型塔的构件无法实现,只能根据机械设计手册选择合适的型钢材料。另由表 1 可见,理论计算出的立柱、大梁和加强杆的几何参数具有一定差别,这就意味着模型必须选用多种型号的材料,这会大大增加模型制作的难度。鉴于本文只关心模型与原型的模态相似,所以只根据立柱参数选材。因此所造成的模型塔的模式上的不足,将采用附加质量或刚度调节的方法来弥补。经过多次对比分析,最终确定以方形冷弯空心型钢^[11](GB/T6728—1986)作为模型材料,其具体参数如表 2 所示。

3.2 模型动力学设计

动力设计是在静力设计的基础上进行的,此时本文主要

表 2 方形冷弯空心型钢参数

Table 2 Parameters of the cold bending hollow square steel

材料	E /GPa	ρ (t·m ⁻³)	l /mm	壁厚 /mm	理论线 性质量 /(kg·m ⁻¹)	截面 面积 /cm ²	惯性矩 $I_x=I_y$ /cm ⁴	抗弯截 面系数 $W_x=W_y$ /cm ³
Q235	210	7.85	20	1.2	0.679	0.865	0.498	0.498

考虑模型模态,即模型必须满足式(3)所示相似准则。于是,模型原型的相似系数为:

$$C_f = \frac{1}{C_l} \sqrt{\frac{C_E}{C_\rho}} \quad (11)$$

原型与理想模型的模态频率见表 3。

表 3 原型与理想模型模态频率

Table 3 Natural frequencies of prototype and theoretical model

振型	原型模态	理想模型模态
x 向一弯/Hz	0.9375	4.1925
y 向一弯/Hz	1.0625	4.7515
一扭/Hz	1.8125	8.1055

经计算发现,若采用附加质量法提高模型密度,在模型上应附加的质量为:

$$m_{m\text{附加}} = m_p / C_m - m_m = m_p / C_l^2 - m_m \quad (12)$$

代入实际参数计算得:

$$m_{m\text{附加}} = \frac{520 \times 10^3}{400} - 100 = 1200 \text{kg} \quad (13)$$

实际上,模型不能附加如此多的质量,因此本文只有采用欠质量法^[12],附加适当的质量。此时,由式(8)可得频率关系式为:

$$f_m = \sqrt{\frac{C'_m}{C_l C_l}} f_p$$

4 模型验证

为了验证模型设计的正确性,本文采用 LMS 模态测试系统分别对原型塔和模型塔进行了模态测试,测试结果如图 2、3 和表 4 所示。图 2 是原型塔第一阶和第三阶振型,图 3 是模型塔第一阶和第三阶振型。根据实验室实际情况模型塔的模式是根据欠质量法只附加 300kg 质量时的模态。为便于对比分析模型塔与原型塔的振型,图 2 和图 3 中采用了一致的空间坐标,即塔的高度方向为 z 向,长度方向为 y 向,宽度方向

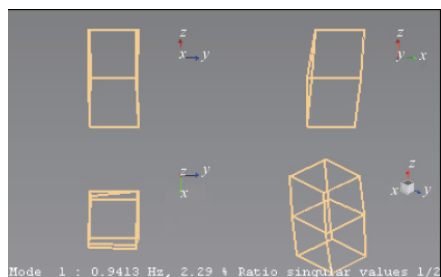
表 4 模型低阶模态频率计算值与测试值对比

Table 4 Comparison between calculated and experimental low order frequencies of the model

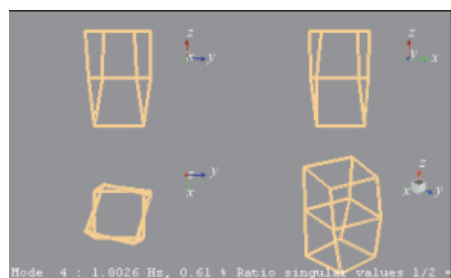
振型	原型模态	模型测试模态	模型计算模态	相对误差
x 向一弯/Hz	0.9375	7.6813	7.55625	1.65%
y 向一弯/Hz	1.0625	9.3767	8.56375	9.49%
一扭/Hz	1.8125	12.6323	14.60875	13.53%



为 x 向。由图 2、图 3 和表 4 可见,模型塔振型与原型塔振型一致,频率与理论计算值基本一致,前三阶频率相对误差分别为 1.65%,9.49%,13.53%。



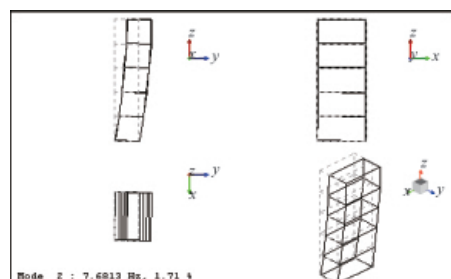
(a) x 向一弯
(a) Bending modes in x direction



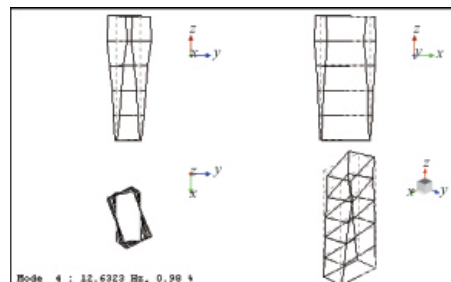
(b) x - y 面内一扭
(b) Twisting modes in x - y plane

图 2 原型模态振型

Fig. 2 Modal shapes of prototype



(a) x 向一弯
(a) Bending modes in x direction



(b) x - y 面内一扭
(b) Twisting modes in x - y plane

图 3 模型塔模态振型

Fig. 3 Modal shapes of model

图 2 中的下标所对应内容依次为阵型、频率和阻尼比。下同。

5 结论

根据相似理论对连续热镀锌工艺段的冷却塔进行动态特性模型设计,由于模型与原型完全相似是很难实现的,完全附加质量法在实际中行不通,因此,采用欠质量法附加模型质量。通过对原型塔和模型塔模态测试,发现根据相似理论设计的模型塔与原型塔振型一致,前二阶频率相对误差在 10% 以内,故模型塔整体上基本满足设计要求。

参考文献 (References)

- [1] 仵峰峰, 曹平, 万琳辉. 相似理论及其在模型实验中的应用[J]. 采矿技术, 2007, 7(4): 64-78.
Wu Fengfeng, Cao Ping, Wan Linhui. *Mining Technology*, 2007, 7(4): 64-78.
- [2] 张连一, 何若全. 设置刚臂的框架——支撑结构相似模型设计的相似条件[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994, 27(3): 7-13.
Zhang Lianyi, He Ruoquan. *J Harbin Archit & Civ Eng Inst*, 1994, 27(3): 7-13.
- [3] 陈常松, 颜东煌, 田仲初, 等. 岳阳洞庭湖大桥模型动力相似理论分析[J]. 桥梁建设, 2002(1): 48-51.
Chen Changsong, Yan Donghuang, Tian Zhongchu, et al. *Bridge Construction*, 2002(1): 48-51.
- [4] 王均刚, 马汝建. 满足固有频率相似的海洋平台相似模型设计 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(1): 103-106.
Wang Jungang, Ma Rujian. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2007, 22(1): 103-106.
- [5] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
Yang Junjie. *Similarity theory and structure model test* [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.
- [6] 迟世春, 林少书. 结构动力模型实验相似理论及其验证 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 11-20.
Chi Shichun, Lin Shaoshu. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(4): 11-20.
- [7] 李德葆. 振动模态分析及其应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
Li Debao. *Modal analysis with applications* [M]. Beijing: Space Press, 1989.
- [8] Zhu W D, Teppo L J. Design and analysis of a scaled model of a high-rise, high-speed elevator [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 264(3): 707-731.
- [9] Zhu W D, Chen Y. Theoretical and experimental investigation of elevator cable dynamics and control[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2006, 128(1): 66-78.
- [10] Marcilio A, Roberto E O. Scaling the impact of a mass on a structure[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(7): 1158-1173.
- [11] 成大仙 等编. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Cheng Daxian. *Handbook of mechanical design* [M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [12] 郭月哲, 童申家. 钢管混凝土拱桥振动试验模型相似理论分析[J]. 交通科技与经济, 2010(5): 73-76.
Guo Yuezhe, Tong Shenjia. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2010(5): 73-76.

(责任编辑 岳臣)