

文章编号: 1000-582X(2012)02-047-08

# 大型双曲冷却塔的自振特性

沈国辉<sup>1</sup>, 王宁博<sup>1</sup>, 孙炳楠<sup>1,2</sup>, 楼文娟<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 针对大型双曲冷却塔的自振特性问题, 采用有限元方法进行计算分析, 以某典型塔为例分析自振频率和振型的分布特点, 并进行冷却塔自振特性的变参数分析, 最后拟合得基频和倾覆频率的计算公式。分析表明: 冷却塔的基频与混凝土材料参数  $\sqrt{E/\rho}$ 、筒体厚度成线性递增关系, 与高度成反比, 与人字柱总截面面积和子午线退化参数呈二次曲线关系。拟合公式与实测结果吻合较好, 说明其在预测冷却塔自振频率方面具有较高可信度。

**关键词:** 冷却塔; 有限元; 频率; 振型; 拟合公式

**中图分类号:** TU312

**文献标志码:** A

## Natural vibration characteristic of large hyperbolic cooling towers

SHEN Guo-hui<sup>1</sup>, WANG Ning-bo<sup>1</sup>, SUN Bing-nan<sup>1,2</sup>, LOU Wen-juan<sup>1</sup>(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, P. R. China;  
2. Ningbo Institute of technology, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** The paper uses the finite element method to study the vibration characteristics of large hyperbolic cooling towers. Taking a typical tower for example, the distribution of the natural frequencies and mode shapes are investigated. The equations to estimate the fundamental frequency and overturning frequency are fitted based on a series of parametric studies. The results show that the fundamental frequency is directly proportional to the concrete material property  $\sqrt{E/\rho}$  and the thickness of tower wall, and inversely proportional to the height of tower. The fundamental frequency also has a quadratic relationship with the total cross-sectional area of supporting columns and the median regressive parameter. The good matches between the results from the fitting equation and the results from full-scale tests indicate that the fitting equation has a high credibility in predicting the natural frequencies of cooling towers.

**Key words:** cooling towers; finite element method; natural frequency; mode shape; fitting equation

大型双曲冷却塔是常用的水冷却设备, 近年来随着我国工业技术的发展, 冷却塔的建设数量和规模不断增长。冷却塔的体型非常特殊, 一般为双曲线型薄壳结构, 壁厚极薄, 通常 100 多米高冷却塔的壳体最小厚度也仅有十几厘米, 其厚径比甚至只有蛋壳的 1/3。同时双曲壳与圆柱壳相比, 其刚度更大, 稳定性更好, 薄膜应力分布更均匀, 但动力特性

也更为复杂。加之为满足底部通风要求, 增设人字柱支撑, 使得结构的自振特性愈加复杂。

鉴于冷却塔自振特性的复杂性, 而其在抗震抗风等研究<sup>[1-9]</sup>中又必不可少, 因此非常有必要研究其振型和频率的分布规律, 已有一些研究人员致力于该方面的研究。Winney<sup>[1]</sup>和 Juhasova<sup>[2]</sup>采用现场实测方法, 获得冷却塔的自振特性; Yeh<sup>[6]</sup>采用有限

收稿日期: 2011-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608063)

作者简介: 沈国辉(1977-), 男, 浙江大学博士, 副教授, 主要从事结构分析, (E-mail)ghshen@zju.edu.cn.

元分析方法,得到冷却塔自振特性的一些定性结论;赵衍刚<sup>[10]</sup>,采用环元法,进行冷却塔动力特性分析;还有一些研究人员试图给出自振频率的拟合公式;张相庭<sup>[11]</sup>给出了自振周期关于淋水面积的经验取值;鲍侃袁<sup>[12]</sup>给出了自振频率与塔高、壁厚等的关系。

以上研究存在着一些不足,如分析中没有考虑人字柱,或仅用简单参数如淋水面积估计自振频率等。对于这种大型薄壳结构,其塔体厚度、高度、子午线形状等参数是决定自振特性的主要因素<sup>[12-14]</sup>,此外由于人字柱支撑导致截面突变,也会对自振特性产生较大影响。因此文中应用有限元方法,建立 70 余组不同尺寸的冷却塔模型,分析冷却塔壳体厚度、高度、子午线退化参数、底部人字柱及混凝土材料等因素对自振特性的影响,给出基频和倾覆频率的拟合公式,并用以往实测结果检验拟合公式的可靠度。

## 1 大型双曲冷却塔简介

自然通风冷却塔主体一般为双曲线壳体,底部由人字柱支撑,壳体顶部和底部的壳体厚度增大,形成环梁,如图 1 所示。

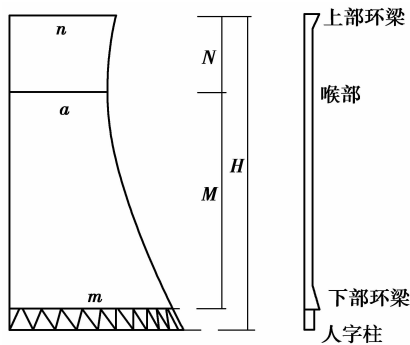


图 1 大型双曲冷却塔示意图

筒体的控制方程可以写成

$$r^2/a^2 - h^2/b^2 = 1, \quad (1)$$

式中: $r$ 为水平剖面的半径; $a$ 为喉部半径; $h$ 为计算点离开喉部的距离; $b$ 为旋转壳体的几何特征值,由塔底柱坐标 $(m, M)$ 和塔顶柱坐标 $(n, N)$ 确定

$$\left. \begin{aligned} b &= aM / \sqrt{m^2 - a^2} \text{ (喉部以下)} \\ b &= aN / \sqrt{n^2 - a^2} \text{ (喉部以上)} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

式中: $m$ 和 $n$ 分别为塔底和塔顶的截面半径; $M$ 和 $N$ 分别为塔底和塔顶距喉部的垂直距离。双曲壳可视为由圆柱壳退化而来,定义子午线退化参数 $k$ 为

$$k = \sqrt{1 + a^2/b^2}, \quad (3)$$

当 $k=1$ 时,壳体为圆柱壳, $k$ 越大则子午线的曲率也越大。

## 2 冷却塔的有限元模拟方法

在通用有限元软件 ABAQUS<sup>[15]</sup>中进行冷却塔自振特性的计算<sup>[14]</sup>,冷却塔的有限元模型如图 2 所示。筒体和上下部环梁采用空间壳单元 S4R,人字柱采用梁单元 B31。特征值求解器选用 Lanczos,在求解较多特征值时,Lanczos 求解器比子空间迭代求解器整体速度更快、精度更高<sup>[16]</sup>。

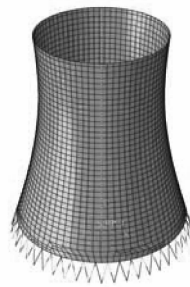


图 2 大型双曲冷却塔的有限元模型

## 3 某典型冷却塔的自振特性分析

### 3.1 某典型冷却塔的尺寸

取某冷却塔进行分析,塔淋水面积为 9 000 m<sup>2</sup>,塔高 150 m,壳体顶部半径为 35.9 m,底部半径为 59.425 m,喉部半径 33.35 m,喉部标高 112.5 m。人字柱为圆形截面,半径 450 mm,高 10.3 m,共 48 对。冷却塔的各项参数为:混凝土密度 $\rho$ ,弹性模量 $E$ ,人字柱总截面积 $A$ ,冷却塔高度 $H$ ,壳体厚度 $t$ 和上部退化参数 $k'$ 见表 1。

表 1 某典型冷却塔的结构参数

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$A/\text{m}^2$	$H/\text{m}$	$t/\text{mm}$	$k'$
2 500	30	61.07	150	220	1.06

根据多个冷却塔的设计资料,假设上下部环梁厚度为线性变化,下部环梁高度 $0.1H$ ,最大厚度为 $4t$ ,上部环梁高度 $0.05H$ ,最大厚度为 $2t$ 。同时在有限元建模中采用素混凝土,底部约束条件取固支,网格密度取 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ,这些参数的敏感性分析见 3.4 节。

### 3.2 典型冷却塔的自振特性分析

对该典型冷却塔进行自振特性分析,前 5 阶振

型和倾覆振型如图3所示,图中 $n$ 为环向谐波数, $m$ 为子午向谐波数。由图可知,冷却塔的振型奇特,前几阶振型类似于花朵形状,表现为环向3~6个谐波,子午向2~3个谐波,在更高阶时环向和子午向会出现更多的谐波数。其中一阶频率为0.920 Hz,环向谐波数为4,子午向谐波数为2。同时冷却塔的前20阶频率均在0.9~2 Hz之间,可见频率分布非常密集。

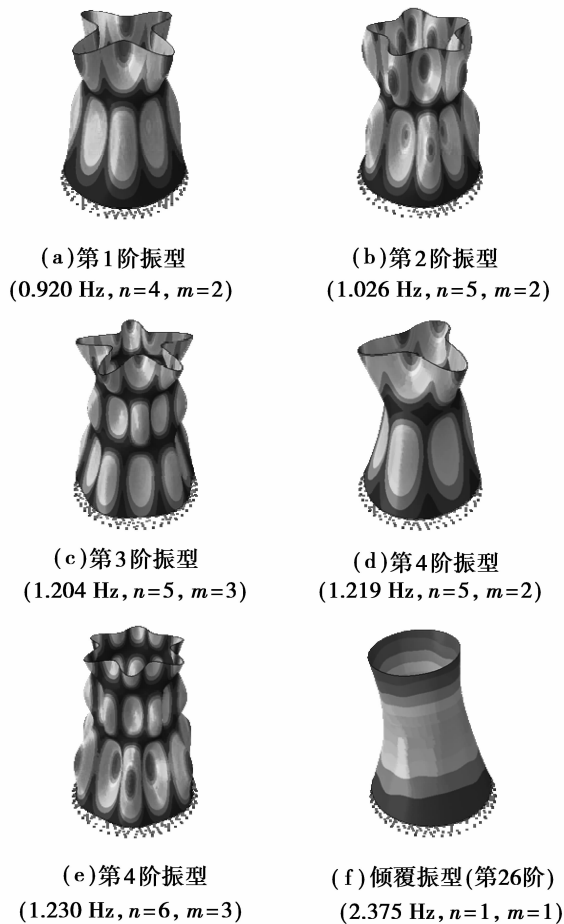


图3 某典型冷却塔的振型和频率

倾覆振型为环向谐波数 $n=1$ 的情况,此时整个冷却塔就像悬臂梁,仅表现为子午向的弯曲变形。在水平向振动中,该阶振型的参与系数很大,因此该振型对抗震计算至关重要,在文中予以特别关注。

### 3.3 无人字柱对自振特性的影响

鲍佩袁<sup>[4]</sup>、Yeh<sup>[6]</sup>和 Nasir<sup>[13]</sup>在采用有限元方法研究冷却塔自振特性时,均没有考虑人字柱,而是将塔体整个高度均当作筒体来处理,这样的简化会对自振特性产生一定的影响。为分析无人字柱对自振特性的影响,将上述冷却塔在高度150 m范围内

均采用双曲壳体建模,上下部环梁按3.1节的比例尺寸取,则其基频为0.972 Hz。与考虑人字柱时的基频0.920 Hz增大了5.4%。可见无人字柱情况下冷却塔的刚度会增大,因此在采用有限元方法分析冷却塔的自振特性时必须考虑底部人字柱。

### 3.4 建模参数的敏感性分析

在建模过程中,有必要对配筋、底部约束条件和网格密度等进行敏感性分析,以适当简化建模过程,提高计算效率。

为分析混凝土配筋对自振特性的影响,建立冷却塔在有配筋情况下的有限元模型。配筋采用壳体内外双侧配筋,子午向配 $\Phi 16@160$ ,环向配 $\Phi 12@250$ ,在上下环梁处对配筋进行加密。分析中配筋的弹性模量取200 GPa,密度取7 800 kg/m<sup>3</sup>,在有限元中配筋采用增加钢筋层<sup>[15]</sup>(Rebar Layer)的方法模拟。配筋后的基频结果为0.912 Hz,与素混凝土模型的0.920 Hz相差很小,同时振型也完全相同。可见配筋对冷却塔自振特性的影响很小,因此文中均按素混凝土模型考虑。

人字柱与地面的真实约束条件很复杂,在有限元中很难模拟。Yeh<sup>[6]</sup>认为径向自由,环向和子午向固定;而 Nasir<sup>[13]</sup>认为固接和铰接对自振特性分析影响很小。进行冷却塔在底部固接和铰接情况下的自振特性计算,两者基频均为0.920 Hz,振型也完全相同。可见人字柱与地面的约束条件对自振特性的影响很小,分析中采用固支条件。

有限元分析中网格的划分密度往往会影响计算结果的精度。由于冷却塔筒体和人字柱的连接较为复杂,因此采用自由网格划分技术中的进阶算法,网格采用4边形网格,筒体网格尝试采用4种网格密度:3.5 m×3.5 m、2.5 m×2.5 m、1.5 m×1.5 m和0.9 m×0.9 m。基频计算值分别为0.914 Hz、0.928 Hz、0.920 Hz和0.914 Hz。可以发现,不同网格密度之间的计算结果比较接近,文中所有模型均选用1.5 m×1.5 m的网格密度。

## 4 冷却塔自振频率的参数分析

影响冷却塔自振频率的主要参数有:混凝土弹性模量和密度、人字柱、冷却塔高度、筒体厚度和子午线退化参数等。在参数分析中将上节分析的典型塔确定为基准塔,分析各参数与基频 $f_1$ 、倾覆频率 $f_0$ 之间的关系。对于各参数之间存在的关联性,暂不考虑。

### 4.1 混凝土弹性模量和密度的影响

在基准模型基础上,仅变化混凝土弹性模量 $E$

和密度  $\rho$ , 分析材料特性对自振频率的影响。混凝土弹性模量的范围通常为 25~40 GPa, 等间距取 7 个数据进行分析, 计算中将  $\rho$  固定为常用的 2 500 kg/m<sup>3</sup>。图 3 给出了混凝土弹性模量与基频和倾覆频率的关系, 图中的拟合线为直线。由图可知, 基频  $f_1$  和倾覆频率  $f_b$  随  $\sqrt{E}$  的增加而增加, 并与  $\sqrt{E}$  成线性关系。分析混凝土密度的影响, 混凝土密度的范围通常为 2 300 ~ 2 600 kg/m<sup>3</sup>, 等间距取 5 个数据进行分析, 计算中将  $E$  固定为常用的 30 GPa。图 4 给出了混凝土密度与基频和倾覆频率的关系, 图中的拟合线为直线。由图可知, 基频  $f_1$  和倾覆频率  $f_b$  均随  $\sqrt{1/\rho}$  的增大而增大, 并与  $\sqrt{1/\rho}$  成线性关系。因此可以认为冷却塔的基频和倾覆频率与  $\sqrt{E/\rho}$  呈线性递增关系。

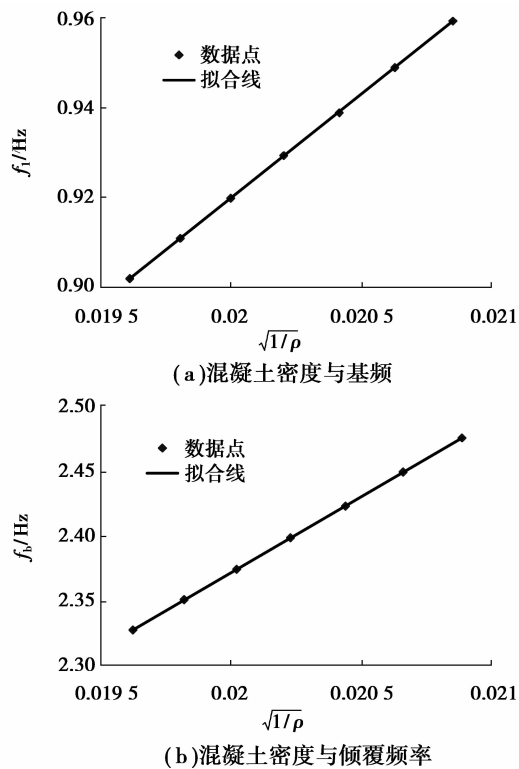


图 4 混凝土密度与自振频率的关系

#### 4.2 人字柱的影响

人字柱主要考虑: 人字柱高度、数目和总截面面积。在基准塔诸参数不变的前提下, 仅改变人字柱高度(基准塔人字柱高 10.3 m), 计算得到冷却塔的基频和倾覆频率如表 2 所示。由表可知, 随人字柱高度的增加, 基频和倾覆频率的变化幅度均很小。保持基准塔人字柱总截面面积不变, 改变人字柱数目(基准塔人字柱为 48 对), 分析人字柱数目对自振频率的影响, 结果如表 3 所示。由表可知, 随人字柱

数目增大, 基频略有增大, 但增大幅度较小; 倾覆频率基本不变。整体而言, 人字柱高度和数目对自振频率的影响很小, 下面主要考虑人字柱总截面面积的影响。

表 2 人字柱高度对自振频率的影响

高度/m	5.0	7.5	10.3	12.5
基频/Hz	0.911	0.919	0.920	0.921
倾覆频率/Hz	2.395	2.403	2.374	2.310

表 3 人字柱的数目对自振频率的影响

数目/对	36	42	48	54
基频/Hz	0.898	0.906	0.920	0.924
倾覆频率/Hz	2.348	2.354	2.375	2.358

在基准塔诸参数不变的前提下, 仅改变人字柱总截面面积  $A$ , 截面面积通过截面半径来控制, 在 250~600 mm 中等间距取 8 个数据点分析(基准塔半径为 450 mm)。图 5 给出了不同总截面面积下的基频和倾覆频率, 图中的拟合线为二次曲线。由图可知, 人字柱总截面面积  $A$  对自振频率的影响较大, 随着总截面面积的增大, 基频和倾覆频率先增大, 再几乎保持不变, 总体上呈二次曲线关系。

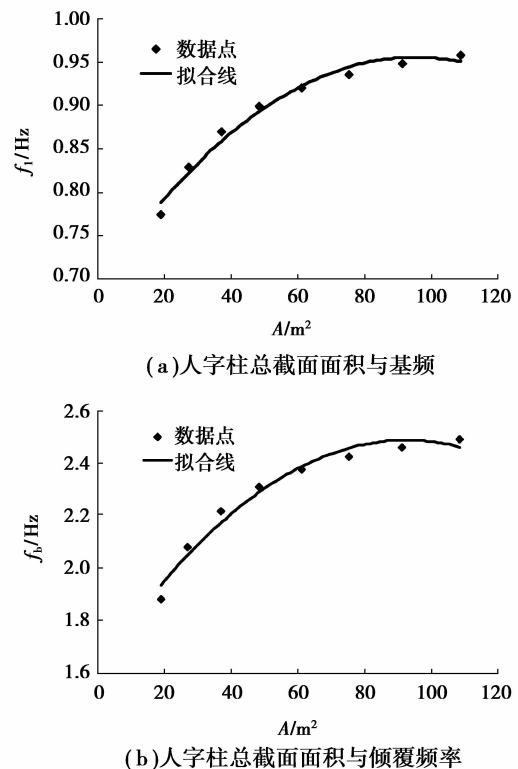


图 5 人字柱总截面面积与自振频率的关系



### 4.3 冷却塔高度的影响

冷却塔的动力特性对高度非常敏感。为研究冷却塔高度  $H$  对自振特性的影响,在通常的设计高度  $60\sim 200\text{ m}$  范围等间距取 15 个数据进行分析,基准塔高度为  $150\text{ m}$ 。各种高度下,喉部始终位于总高度的  $0.75$  倍处,保持冷却塔上下部曲率不变、人字柱总截面面积和壳体厚度不变,上下环梁仍按 3.1 节的比例尺寸取。图 6 给出了不同高度情况下冷却塔的基频和倾覆频率,图中拟合曲线的形式为  $y=1/(x+b)$ 。由图可知,基频和倾覆频率均随着冷却塔高度的增加而减小,且与高度呈反比例关系。

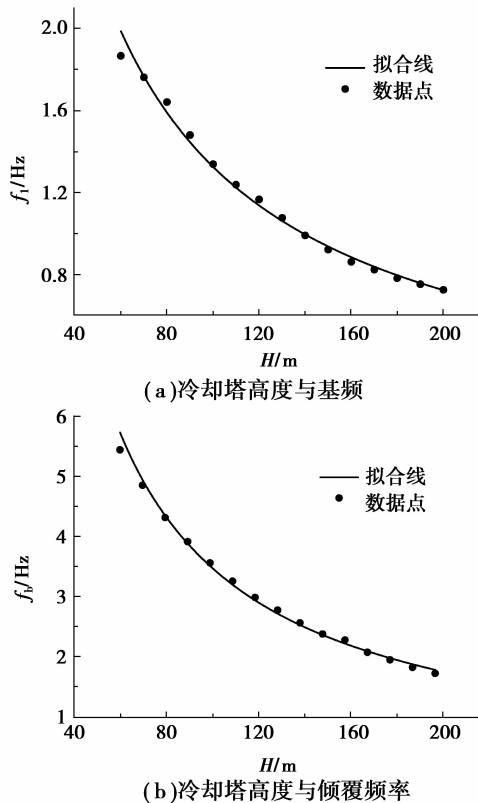


图 6 冷却塔高度与自振频率的关系

### 4.4 筒体厚度的影响

以基准塔为基础,保持其他参数不变,仅改变基本筒体厚度,上下环梁仍按 3.1 节的比例尺寸取。在通常的设计厚度  $120\sim 300\text{ mm}$  范围内等间距取 10 个数据(基准塔厚度为  $220\text{ mm}$ )。图 7 给出了不同厚度下的基频和倾覆频率,图中拟合线为直线。由图可知,基频随筒体厚度的增大而增大,两者成线性关系。倾覆频率随厚度的增大而减小,两者也成线性关系。

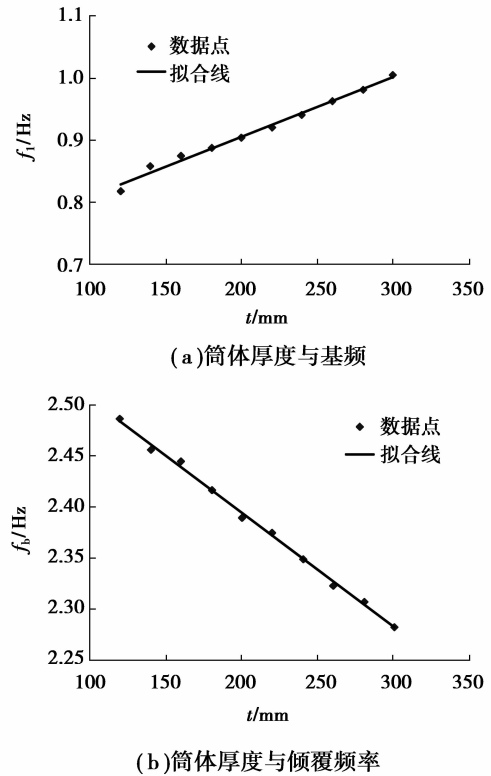


图 7 筒体厚度与自振频率的关系

### 4.5 子午线退化参数的影响

由双曲壳和圆柱壳动力特性的差异可知,子午线形状会对自振特性有较大影响。采用固定顶部和底部半径,仅改变喉部截面半径的方法来变化子午线的形状。由冷却塔的振型特征可知,筒体上部曲线的形状比下部曲线形状对自振特性的影响更显著,因此采用上部曲线的退化参数  $k'$  作为变化参数进行分析。喉部半径在  $17.35\sim 34.35\text{ m}$  取 9 个数据点(基准塔喉部半径  $33.35\text{ m}$ ),相应地, $k'$  由  $1.31$  变化至  $1.04$ 。图 8 给出了上部曲线退化参数  $k'$  与自振频率之间的关系,图中的拟合线为二次曲线。

由图可知,上部曲线退化参数  $k'$  与基频和倾覆频率之间关系比较复杂。主要是因为随着  $k'$  的变化,不仅频率发生变化,振型也会发生变化。当  $k'$  较小( $k' < 1.2$ )时,一阶振型子午向谐波数  $m=2$ ,此时随着  $k'$  增大,基频增大。当  $k'$  较大( $k' > 1.2$ )时,一阶振型子午向谐波数  $m$  变为 3,此时随着  $k'$  的增大,基频反而减小,基频  $f_1$  与  $k'$  可近似用二次曲线来拟合。分析退化参数  $k'$  对倾覆频率的影响,发现当  $k'$  较小时,倾覆频率基本不变,当  $k' > 1.1$  时,倾覆频率随  $k'$  的增大而减小,倾覆频率与  $k'$  也可以近似用二次曲线来拟合。

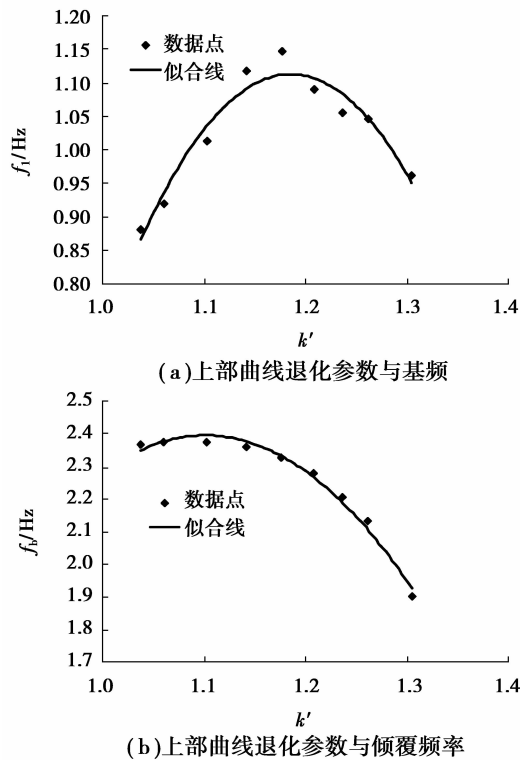


图 8 上部曲线退化参数与自振频率关系

## 5 自振频率的拟合公式

### 5.1 公式拟合

以上的参数分析表明:基频和倾覆频率均与混凝土材料参数 $\sqrt{E/\rho}$ 、厚度 $t$ 成线性关系,与冷却塔高度 $H$ 成反比关系,与上部退化参数 $k'$ 以及人字柱总截面积 $A$ 呈二次曲线关系。根据这些关系,应用最小二乘法拟合出基频和倾覆频率的公式,其中基频的拟合公式为

$$f_1 = 0.064 \sqrt{\frac{E}{\rho}} (t + 0.76) \cdot \frac{(k'^2 - 2.37k' + 1.31)(\eta^2 - 3.1\eta - 6.4)}{H + 6.3}, \quad (4)$$

倾覆频率的拟合公式为

$$f_b = 0.038 \sqrt{\frac{E}{\rho}} (2.3 - t) \cdot \frac{(k'^2 - 2.2k' + 1)(\eta^2 - 3\eta - 4)}{H - 4.8}. \quad (5)$$

式中所有参数单位均为国际单位制, $\eta$ 为人字柱总截面积归一化参数,定义为人字柱总截面积与基准塔面积之比,即 $\eta = A/61.07$ 。由参数分析可知,基频和倾覆频率的拟合公式使用范围:高度 $60 \sim 200$  m,筒体厚度在 $0.12 \sim 0.3$  m,该范围基本涵盖了现代大型冷却塔。

上述公式是在 66 组有限元分析结果基础上拟

合得到,基频公式拟合的相关系数 $R^2 = 0.989$ ,倾覆频率公式拟合的相关系数为 $R^2 = 0.994$ ,可见拟合情况非常好。图 9 给出拟合公式与 66 组有限元结果的比较,两者吻合得很好,基频的最大误差为 $3.16\%$ ,倾覆频率的最大误差为 $3.52\%$ 。

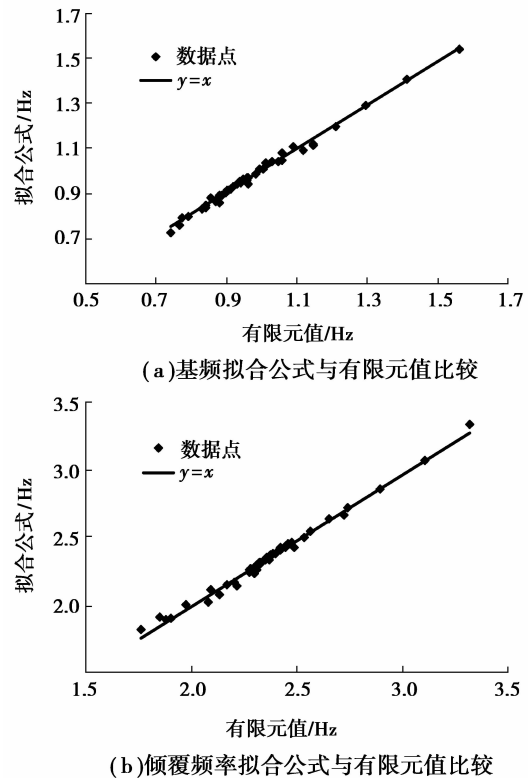


图 9 自振频率拟合公式与有限元值的比较

### 5.2 拟合参数的关联性问题

参与公式(4)、(5)拟合的诸参数之间可能会具有一定的关联性,如当冷却塔的高度增大时,其壳体厚度、人字柱截面等也会相应增大。在参数分析和公式拟合时,如果考虑各参数的关联性,会使过程变得非常困难和繁琐,因此中文第 4 节参数分析时并没有考虑参数间的关联性。选用覆盖面广、关联性明显的 6 组冷却塔参数进行有限元分析,以检验拟合公式(4)、(5)在参数具有关联性时的适用性,结果如表 4 所示。6 组冷却塔变化了 4 种参数:高度 $H$ 、壁厚 $t$ 、退化参数 $k'$ 和人字柱总截面积归一化参数 $\eta$ ,其他 2 个参数不变,即混凝土密度取 $2500 \text{ kg/m}^3$ ,弹模取 $30 \text{ MPa}$ 。表中 $f_{1,e}$ 和 $f_{b,e}$ 表示基频和倾覆频率的有限元分析结果, $f_{1,c}$ 和 $f_{b,c}$ 表示基频和倾覆频率的拟合公式计算值。由表可知,6 组冷却塔参数情况下,基频拟合公式计算的最大误差为 $3.71\%$ ,倾覆频率拟合公式计算的最大误差为 $4.41\%$ ,可见拟合公式(4)、(5)在多参数

关联情况下仍然具有较高的适用性。

表4 冷却塔多参数相关性分析

$H/m$	170	150	120	120	150	120
$t/m$	0.24	0.22	0.22	0.22	0.18	0.18
$k'$	1.06	1.18	1.10	1.10	1.10	1.10
$\eta$	1.14	0.79	1.00	0.60	0.60	0.60
$f_{1,t}/\text{Hz}$	0.850	1.100	1.238	1.162	0.932	1.187
$f_{1,e}/\text{Hz}$	0.856	1.077	1.281	1.192	0.924	1.143
误差/%	0.62	-2.13	3.43	2.52	-0.87	-3.71
$f_{b,t}/\text{Hz}$	2.084	2.282	3.016	2.814	2.291	2.900
$f_{b,e}/\text{Hz}$	2.094	2.212	2.995	2.719	2.199	2.772
误差/%	0.47	-3.09	-0.71	-3.34	-4.02	-4.41

### 5.3 拟合公式与以往实测结果的比较

为分析拟合公式的可信度,取以往的实测数据进行比较。Winney<sup>[1]</sup>进行了Didcot塔的实测,该塔的参数为: $E=29.5\text{ GPa}$ 、 $\rho=2\ 323\text{ kg/m}^3$ 、 $H=114.1\text{ m}$ 、 $t=0.178\text{ m}$ 、 $k'=1.086$ 、 $A=16.71\text{ m}^2$ 。Juhsova<sup>[2]</sup>进行了Prague塔的实测,文献中给出的参数有: $H=120\text{ m}$ 、 $t=0.15\text{ m}$ 、 $k'=1.077$ 。对于未给出的参数按最常规的数据取: $\rho=2\ 500\text{ kg/m}^3$ 、 $E=35\text{ GPa}$ 、 $\eta=1$ 。同时对这2个实测塔建立有限元模型,分析其自振特性。表5给出了2个实测塔的基频比较,可以发现,Didcot塔的基频拟合公式值与实测值相差1.37%,与有限元计算值相差2.27%;Prague塔的基频拟合公式值与实测值相差3.1%,与有限元计算值相差4.4%。可见文中给出的基频拟合公式在预测冷却塔频率方面具有较高的可信度。

表5 2个实测塔基础频率的比较 Hz

塔名	实测值	有限元值	拟合公式值
Didcot塔	1.062	1.102	1.076
Prague塔	1.250	1.267	1.211

## 6 结论

采用有限元方法分析了冷却塔的自振特性,主要有以下结论。

1)冷却塔的频率分布比较密集,振型独特,前几阶振型类似于花朵形状,环向为3~6个谐波,子午向为2~3个谐波。

2)人字柱对冷却塔自振频率有较大影响,文中实例分析中无人字柱情况下基频相差5.4%,因此有限元分析中必须考虑人字柱。

3)参数分析发现冷却塔基频与 $\sqrt{E/\rho}$ 和厚度均呈线性递增关系,与冷却塔高度成反比,随着高度的增加而减小。

4)根据参数分析结果,拟合得到冷却塔基频和倾覆频率的计算公式,该公式与实测结果吻合较好,说明拟合公式在预测冷却塔自振频率方面具有较高可信度。

### 参考文献:

- [1] WINNEY P E. The modal properties of model and full scale cooling towers [J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 57(1): 131-148.
- [2] JUHASOVA E, BITTNER Z, FISCHER O. Vibration characteristics of a cooling-tower shell [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, (12): 145-154.
- [3] NOORZAEI J, NAGHSHINEH A, KADIR M R A, et al. Nonlinear interactive analysis of cooling tower-foundation-soil interaction under unsymmetrical wind load [J]. Thin-walled Structures, 2006, 44 (9): 997-1005
- [4] 鲍侃袁, 沈国辉, 孙炳楠. 双曲冷却塔的脉动风荷载模拟和风致响应研究 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(5): 955-961.  
BAO KAN-YUAN, SHEN GUO-HUI, SUN BING-NAN. Numerical simulation of fluctuating wind load and wind-induced response of large hyperbolic cooling tower [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(5): 955-961.
- [5] 柯世堂, 赵林, 葛耀君. 超大型冷却塔结构风振与地震作用影响比较 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42 (10): 1635-1641.  
KE SHI-TANG, ZHAO LIN, GE YAO-JUN. Comparison of super-large cooling towers under earthquake excitation and wind load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42 (10): 1635-1641.
- [6] YEH C, W, SHIEH Y J. Stability and dynamic analyses of cooling tower [J]. Journal of the Power Division, 1973, 339-347.
- [7] 沈国辉, 余关鹏, 孙炳楠, 等. 大型冷却塔双塔干扰的风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 109-114.  
SHEN GUO-HUI, YU GUAN-PENG, SUN BING-NAN, et al. Study on interference effects of two large

- hyperbolic cooling towers by using wind tunnel test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3):109-114.
- [8] 武秀根, 郑百林, 刘曙光, 等. 大型冷却塔的风致振动响应数值分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(1):91-97.  
WU XIU-GEN, ZHENG BAI-LIN, LIU SHU-GUANG, et al. Numerical analysis of wind induced response for large cooling tower[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(1):91-97.
- [9] VILADKAR M N, KARISIDDAPPA, BHARGAVA P, et al. Static soil-structure interaction response of hyperbolic cooling towers to symmetrical wind loads [J]. Engineering Structures, 2006, 28(9): 1236-1251.
- [10] 赵衍刚, 江近仁. 双曲冷却塔的动力分析[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(1): 61-71.  
ZHAO YAN-GANG, JIANG JIIN-REN. Dynamic analysis of hyperbolic cooling tower [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(1): 61-71.
- [11] 张相庭. 结构风工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] 鲍侃袁. 大型双曲冷却塔的风荷载和风致响应理论分析和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [13] NASIR A M, THAMBIRATNAM D, BUTLER P, et al. Dynamics of axisymmetric hyperbolic shell structures[J]. Thin-walled Structures, 2002, (40): 665-690.
- [14] 王宁博. 大型双曲冷却塔风致响应和等效风荷载研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [15] ABAQUS 6. 9. Theory Manual [M]. Dassault Systemes Simulia Corp, 2009.
- [16] 张文元. ABAQUS 动力学有限元分析指南[M]. 香港: 中国图书出版社, 2005.

(编辑 陈移峰)



(上接第 40 页)

- [11] 刘小雄, 章卫国, 王振华, 等. 无人机自适应编队飞行控制设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1420-1422.  
LIU XIAO-XIONG, ZHANG WEI-GUO, WANG ZHEN-HUA, et al. Adaptive formation flight control design for UAVs[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5):1420-1422.
- [12] WANG X H, BALAKRISHNAN S N. Optimal and hierarchical formation control for UAV [C] // Proceedings of the 2005 American Control Conference, June 8-10, 2005. Portland, USA: IEEE, 2005, 7: 4685-4689.
- [13] 刘小雄, 武燕, 李广文, 等. 双机编队飞行自适应神经网络控制设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22):7211-7214.  
LIU XIAO-XIONG, WU YAN, LI GUANG-WEN, et al. Adaptive neural network formation flight control design for two aircrafts [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22):7211-7214.
- [14] 胡云安, 左斌, 李静. 退火递归神经网络极值搜索算法及其在无人机紧密编队飞行控制中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5):879-882.  
HU YUN-AN, ZUO BIN, LI JING. An annealing recurrent neural network for extremum seeking algorithm and its application to unmanned aerial vehicle tight formation flight [J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(5):879-882.
- [15] 张雷, 王道波, 高宇辉, 等. 基于粒子群优化的无人战斗机编队任务协调方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2):439-442.  
ZHANG LEI, WANG DAO-BO, GAO YU-HUI, et al. Study on uninhabited combat air vehicle formation tasks schedul ingmethod based on particle swarm optimization algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2):439-442.
- [16] SOKOLNIKOFF I S. Tensor analysis: theory and applications to geometry and mechanics of continua [M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1951.

(编辑 侯湘)