

基于 LHS 冷却塔敏感性分析及频率估算^{*}

柯世堂¹, 徐璐^{1,2}

(1. 南京航空航天大学土木工程系 南京, 210016)

(2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 广州, 510700)

摘要 现有冷却塔结构自振频率主要基于有限元分析手段, 缺乏简单有效的冷却塔自振频率估算公式。为解决该问题, 以国内某 179 m 高的大型冷却塔为基准塔, 首先, 通过改变结构典型参数(塔高、喉部高度、喉部直径、进风口高度和支柱截面积)获得基准塔的 38 个模型并进行动力特性分析, 同时提炼出基频和倾覆频率随结构参数的变化规律; 然后, 用扰动法和拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, 简称 LHS)两种方法进行结构自振频率参数的敏感性分析, 获取了不同阶数下各参数的敏感因子, 在此基础上, 创新性地拟合提出考虑敏感因子权重值的多参数基频和倾覆频率的实用估算公式; 最后, 验证自振频率估算公式的精度, 选择课题组已有研究的冷却塔进行了误差分析。揭示结构参数对大型冷却塔自振频率的敏感性具有重要意义, 可为冷却塔结构抗风抗震设计、动力特性优化设计等提供指导。

关键词 冷却塔; 有限元分析; 敏感性分析; 自振频率; 估算公式

中图分类号 TU279.7⁺41; TH12

引 言

自振频率是决定着结构动态变形和受力的关键因素, 现有冷却塔结构自振频率主要通过有限元计算或现场实测来获取, 计算过程复杂、耗时且方法单一, 缺乏简单有效的冷却塔自振频率估算公式。而现阶段国内外研究成果^[1-3]和规范^[4-6]中鲜有给出简单快捷的冷却塔自振频率估算公式; 此外, 冷却塔基频对何种结构参数较为敏感也尚未得出一致结论。文献[7-8]给出了多参数下自振频率的拟合公式, 然而并未对其结构参数进行敏感性分析。因此探究不同参数下动力特性的敏感性, 通过附加敏感因子权重值拟合出自振频率的估算公式, 并进行精细化验证具有重要的理论和工程意义。

针对结构动力特性的敏感性分析, 主要集中在大跨度桥梁和屋盖, 文献[9-10]提出了基于高斯过程模型的全局灵敏度分析方法, 分析了实桥动力特性不确定性的灵敏度。文献[11]针对某大跨屋盖采用扰动法和拉丁超立方抽样法进行多参数下结构自振频率的敏感性分析。文献[12-13]采用扰动法进行了刚性悬索加劲钢桁梁桥结构参数敏感性分析和

矢跨比等参数对辐射式张弦梁结构地震响应的敏感度分析。此外, 针对大型冷却塔动力特性的研究, 文献[14]基于现场实测数据对冷却塔动力特性进行分析。文献[15]发现冷却塔低阶频率主要受环向刚度控制, 子午线型与结构整体抗倾覆弯矩有关。文献[16]通过建立与渡桥电厂冷却塔相同壁厚、高度、筒底直径和人字柱等参数的冷却塔, 分析两者动力特性和风致响应的差异, 结果表明塔型不合理是渡桥电厂冷却塔倒塌的重要原因之一。文献[8, 17]对 3 种不同特征尺寸的冷却塔进行了动力特性分析, 研究发现基频较低的冷却塔共振响应占据主导地位, 随基频的降低风振响应的动力放大作用愈加显著。已有研究均未涉及参数的敏感性分析, 这也成为设计人员在塔型优化过程中的瓶颈问题。

鉴于此, 以国内某 179 m 高的大型冷却塔为基准塔, 首先, 通过改变模型典型结构参数获得基准塔 38 个模型的动力特性, 提炼出基频和倾覆频率随结构参数的变化规律; 然后, 采用扰动法和拉丁超立方抽样两种方法进行结构自振频率参数的敏感性分析, 获取了不同阶数下各结构参数的敏感因子, 在此基础上首次拟合出考虑敏感因子权重值的多参数基频和倾覆频率的实用估算公式; 最后, 选取课题组已

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51761165022, 51878351 和 U1733129); 江苏省优秀青年基金资助项目(BK20160083); 博士后科学基金资助项目(2013M530255 和 1202006B); 苏高校青蓝工程、江苏省六大大人才高峰高层次人才计划资助项目(JZ-026)

收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2018-06-14

有研究的冷却塔进行估算公式的误差分析,进而验证了笔者提出的自振频率估算公式精度高、稳定性好。

1 基准塔有限元建模及动力特性分析

1.1 有限元建模

基准塔塔高为 179 m,喉部直径为 98.6 m,进风口高度为 27.8 m。采用大型通用软件 ANSYS 建立基准塔模型,图 1 给出了冷却塔的主要构件:刚性环、塔筒、支柱和地基。塔筒采用 Shell63 单元,环向和子午向分别划分 192 和 118 个单元。环基及与环基连接的 48 对 X 型柱均采用 Beam188 单元。

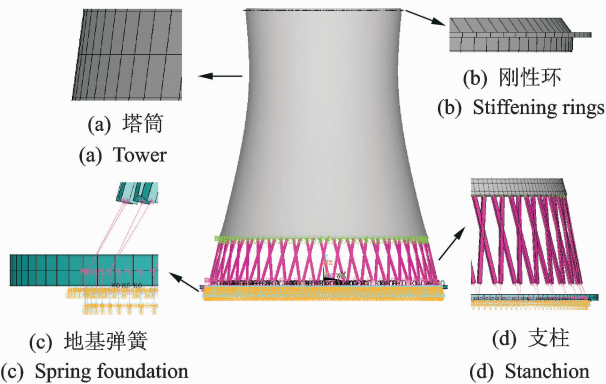


图 1 冷却塔有限元建模示意图

Fig. 1 Sketch map of finite element modeling of cooling tower

表 1 冷却塔前 10 阶固有频率和振型列表

Tab. 1 The first 10 order natural frequencies and vibration modes of cooling towers

阶数	1,2	3,4	5,6	7,8	9,10
固有频率/Hz	0.68	0.71	0.72	0.74	0.92

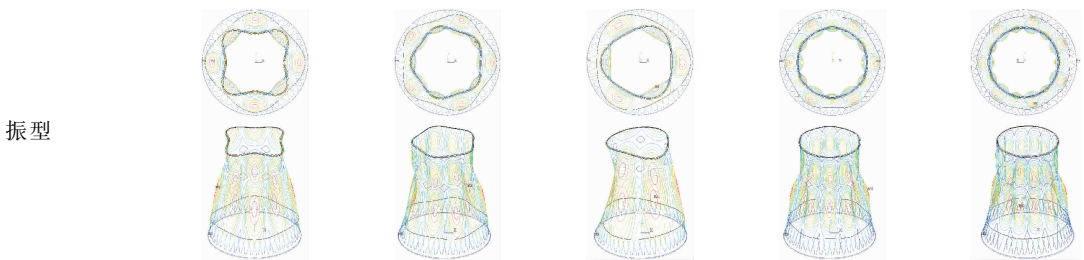


图 2 冷却塔自振频率分布示意图

Fig. 2 Distribution of natural frequency of cooling tower

2 自振频率的参数分析

冷却塔作为双曲薄壳结构,主要结构设计参数包括塔度、喉部直径、进风口位置、支柱截面积和地基刚度。建模过程中一般采用弹簧单元模拟真实结构与土之间的相互作用,研究^[18-19]表明,弹簧刚度对结构基频存在影响,在一定范围内随刚度增加自振频率增大,当增至一定限度后自振频率出现减小的

X 型支柱与塔筒下部连接采用节点自由度耦合的方式,每个环基下部采用 Combin14 单元,每根桩基均采用 3 个力弹簧单元和 3 个力矩弹簧单元分别模拟桩沿竖向、环向、径向、绕竖向、绕环向和绕径向的作用,弹簧单元一端与环基刚性连接,另一端固结约束。

1.2 自振特性分析

采用 Block Lanczos 方法求解基准塔的自振频率和振型,图 2 和表 1 分别为冷却塔前 10 阶自振频率分布曲线和典型振型列表。该基准塔的基频为 0.678 Hz,前 10 阶频率均小于 1.0 Hz。结构振型复杂且具有明显的三维特征,具体表现为:子午向均存在至少 2 个谐波,随阶数增加底部谐波所处高度逐渐降低,且环向谐波数随阶数增加而增大。

趋势。冷却塔地基弹簧刚度一般采用经验公式^[15,20]计算

$$Ei = \frac{DL_i K}{N_i} \quad (1)$$

其中: D 为地基周长; $L_i (i=1,2,3)$ 分别为地基弹簧沿竖向、径向和环向长度; K 为基床系数; $N_i (i=1,2,3)$ 为绕竖向、绕环向和绕径向单元个数。

由式(1)可知,弹簧刚度由多参数决定,其中包括基床系数(主要与结构所处土质有关)、有限元建模时基础单元数量、地基周长和地基的尺度等参数。

经验公式中弹簧刚度计算的参数存在较多不确定性,如基础单元的数量,因此在变量设置后得出的估算公式将与实际存在较大偏差。本研究未考虑弹簧刚度对冷却塔频率的影响,而将其他关键参数均考虑在内,文献[15-16,20]针对少部分结构参数进行探讨,但未针对以上全部关键参数进行研究,更未涉及结构参数的敏感性分析。

为研究塔高、喉部高度、喉部直径、进风口高度和支柱截面对冷却塔自振特性的敏感性,以基准塔为例,在保持其他参数不变并控制单一变量的前提下,对各个模型进行动力特性分析,具体参数分析如表 2 所示。

图 3 和 4 给出了不同高度、喉高比、喉部直径、进风口高度和支柱截面积下冷却塔的基频和倾覆频率结果,在此基础上拟合出基频随各参数变化的分布曲线。由图可知:a. 基频随冷却塔高度增加逐渐减小,最大减幅为 55%,说明塔高与自振频率呈负相关关系且相关性较强;倾覆频率也随塔高的增加逐渐减小;b. 随喉高比的增大结构基频大致呈下降趋势,喉高比与结构自振频率呈负相关关系,在 0.76~0.79 范围内出现了平缓区;倾覆频率随喉高

表 2 结构参数列表
Tab. 2 Structure parameter list

结构参数	塔高/m	喉高比	喉部直径/m	进风口高/m	支柱截面积/m ²
1	110	0.75	98.908	10	1.0
2	120	0.76	99.008	12	1.1
3	130	0.77	99.108	14	1.2
4	140	0.78	99.208	16	1.3
5	150	0.79	99.308	18	1.4
6	160	0.80	99.408	20	1.5
7	170			22	
8	180			24	2.6

比的增大呈先增后趋于平缓再减的趋势,在 0.76~0.79 范围内出现了平缓区;c. 随喉部直径的增大基频逐渐增大,喉部直径与结构自振频率呈正相关关系,但结构倾覆频率随喉部直径的增大逐渐减小;d. 进风口高度的增加使得结构基频呈非线性增加的趋势,最大增幅仅为 6%,进风口高度与基频呈正相关关系;此外,倾覆频率随进风口高度的增加逐渐减小,但最大减幅仅在 2% 左右;e. 支柱截面积与结构自振频率呈对数律分布,当截面积增大至一定数值(2 m²),结构基频增长趋势变缓,最大增幅为 9.8%,

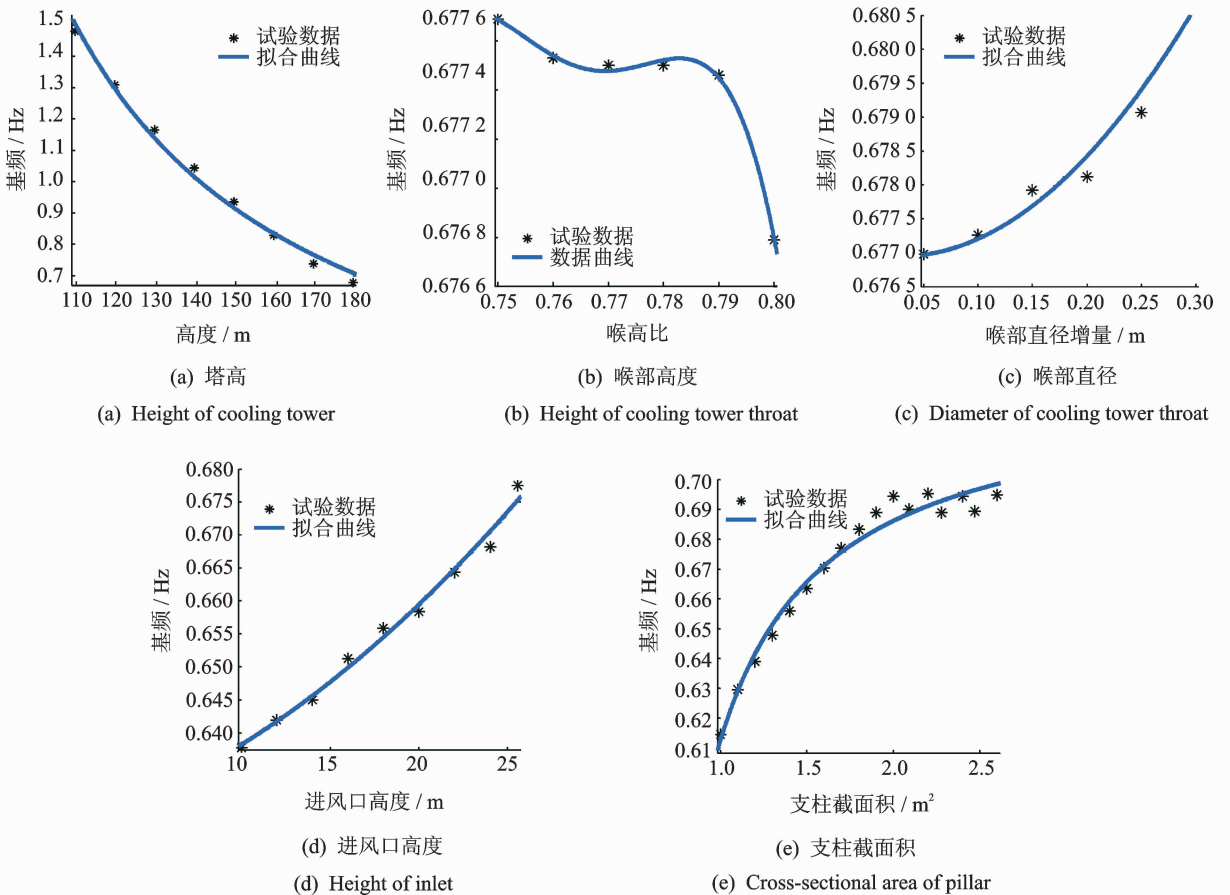


图 3 冷却塔各参数与基频的关系曲线

Fig. 3 The relative curve between each parameter of cooling tower and the natural frequency of vibration

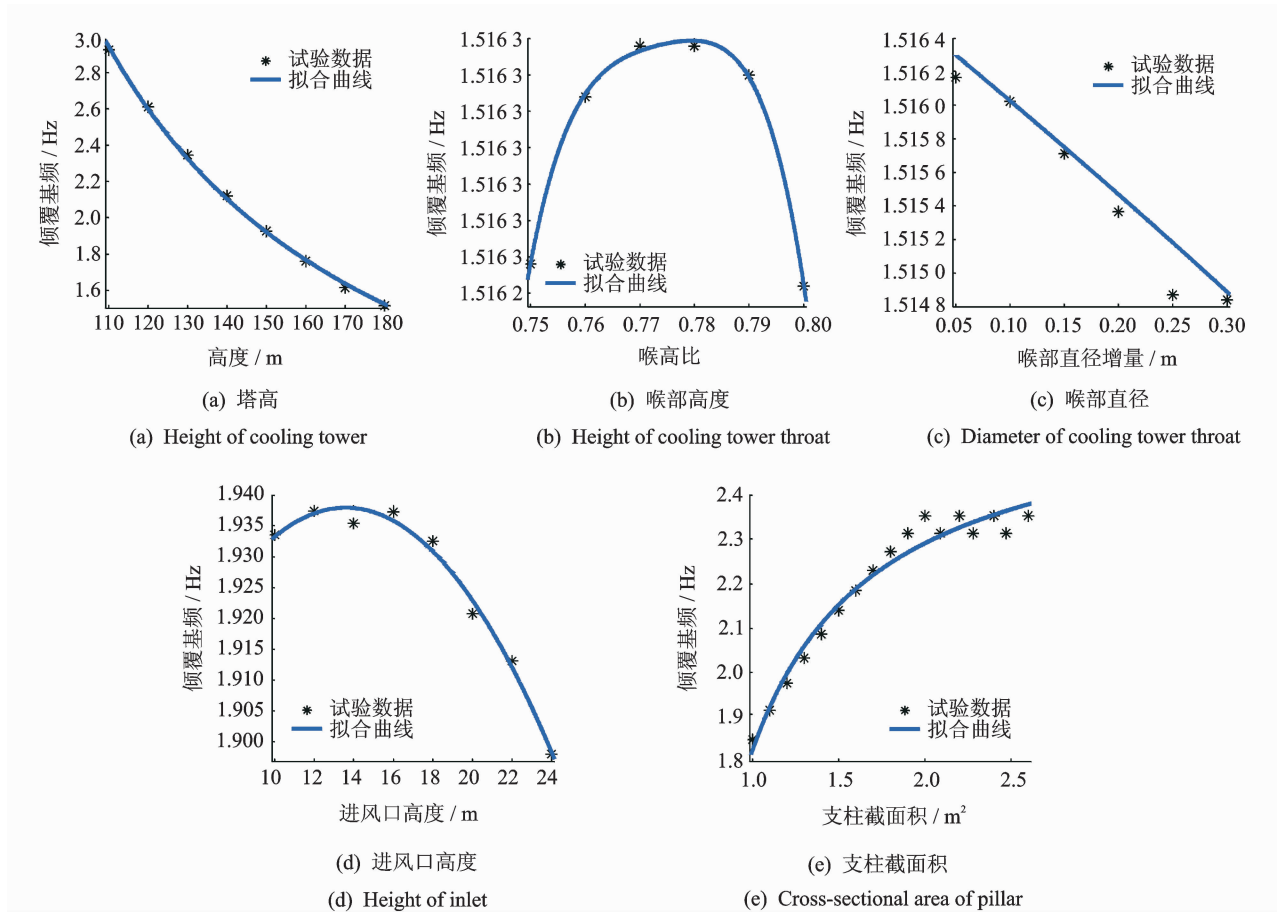


图 4 冷却塔各参数与倾覆频率的关系曲线

Fig. 4 The relative curve between each parameter of cooling tower and the natural frequency of vibration

与塔高相比,自振频率与支柱截面积相关性较弱。

3 自振频率参数的敏感性分析

3.1 扰动法

结构自振频率可写成设计参数的函数,表示为计算参数变化引起的系统响应变化量及系统响应对计算参数的导数。本研究选取塔高、喉部高度、喉部直径、进风口高度和支柱截面积 5 个设计参数进行敏感度分析,结构的第 j 阶计算频率 f_{fem}^j 可记为

$$f_{fem}^j = f_{fem}(H, B, R, J, A) \quad (2)$$

其中: f_{fem} 为求解函数; H 为塔高; B 为喉高比; R 为喉部直径; J 为进风口高度; A 为支柱截面积。

扰动法计算各模态灵敏度的公式为

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial p} = \frac{(\lambda_j' - \lambda_j)}{\Delta p} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中: λ_j 为 $p = p_0$ 时的自振频率; λ_j' 为保持其他参数不变,令 $p = p_0 + \Delta p$ 时算出的自振频率; p 为各种设计参数。

通过式(3)求得的灵敏度无量纲化如下

$$S_{Rel} = \frac{(\lambda_j' - \lambda_j) / \lambda_j}{\Delta p / p} \quad (4)$$

无量纲化的灵敏度称为相对灵敏度。本研究将其作为衡量各参数敏感度的指标,分析 5 种设计参数对冷却塔自振频率的敏感度,分别用 $|H|$ 、 $|J|$ 、 $|R|$ 、 $|B|$ 和 $|A|$ 来表示。

冷却塔结构具有轴对称性,其奇数和偶数阶频率一致,因此图 5 以奇数阶为例给出了 5 种设计参数对前 10 阶自振频率的相对灵敏度柱状图。分析表明:a. 塔高和喉部高度对模型自振频率的敏感因子均为负值,表明其与结构的自振频率呈负相关关系;喉部直径、进风口高度和支柱截面积的敏感因子为正值,表明其与自振频率呈正相关关系;b. 冷却塔高度对结构自振频率的敏感度较大,敏感因子均在 $-1.5 \sim -2.0$ 之间,喉部高度、喉部直径和支柱截面积的敏感因子均较小,在 ± 0.0 上下波动,而对于进风口高度,在低阶敏感因子较小,高阶敏感因子增大,最大可至 0.5 左右;c. 各设计参数对结构自振频率的敏感度按从小到大的排列顺序 $|H| > |J| > |B| > |A| > |R|$ 。

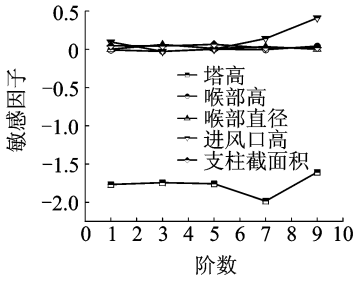


图5 各设计参数的相对灵敏度曲线图

Fig. 5 Relative sensitivity curve of design parameters

3.2 拉丁超立方抽样法

扰动法需假定其他参数为定值(基准状态),其结果会随着基准状态的不同而改变。拉丁超立方抽样^[21-22]方法是一种高效高精度的均匀抽样方法, LHS方法步骤为:a. 将每个变量 x_i 分为等概率的 K 个区间,每个区间的概率为 $1/K$,取每个区间的中点作为此变量的一个样本代表 x_i^k (见图6);b. 从每个变量 x_i 提取一个样本代表 x_i^k 按照随机编号排列,对所有变量的样本 x_i 都按照随机编号进行排列,从而形成 N 个随机排列,每个排列均包含全部变量的一个样本代表 x_i^k 。在计算中取 $K=4N/3$ 就能满足精度要求。本研究随机变量数 $N=5$,故取 $K=4N/3 \approx 6$,相应的随机编号如表3所示。

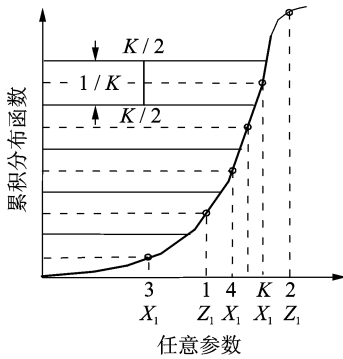


图6 各参数变量的等概率区间划分

Fig. 6 Equal probability interval division for parametric variables

表3 随机编号抽样表(无量纲)

Tab. 3 Sample table for random numbers (dimensionless)

运算次数	H/m	B	R/m	J/m	A/m^2
1	2	1	3	6	4
2	6	3	2	5	1
3	3	6	4	1	5
4	1	4	5	2	6
5	4	5	1	3	2
6	5	2	6	4	3

自振频率的计算参数 x_1, x_2, \dots 及频率的相关矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} & r_{1y} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} & r_{2y} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ r_{k1} & \dots & \dots & r_{kk} & r_{ky} \\ r_{y1} & r_{y2} & \dots & r_{yk} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: C 为各计算参数 x_1, x_2, \dots 及因变量 f 的相关矩阵; r_{ij} 为简单相关系数。

对式(3)求逆矩阵得

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1k} & c_{1y} \\ \dots & \dots & \dots & c_{2k} & c_{2y} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ c_{k1} & \dots & \dots & c_{kk} & c_{ky} \\ c_{y1} & c_{y2} & \dots & c_{yk} & c_{yy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则偏相关系数为

$$P_{xi,y} = -c_{iy} / \sqrt{c_{ii}c_{yy}} \quad (7)$$

图7为拉丁超立方抽样方法求得的各种设计参数的敏感因子。对比可知:采用LHS法得出的设计参数敏感度排列顺序如下:a. 塔高和喉部高度与结构自振频率呈负相关关系;喉部直径、进风口高度和支柱截面积与自振频率呈正相关关系;b. 冷却塔高度对结构自振频率的敏感度较大,敏感因子均在 $-1.5 \sim -2.0$ 之间,喉部高度、喉部直径和支柱截面积的敏感因子均较小,在 ± 0.0 上下波动;c. 各设计参数对结构自振频率的敏感度按从小到大的排列顺序 $|H| > |B| > |A| > |R| > |J|$ 。

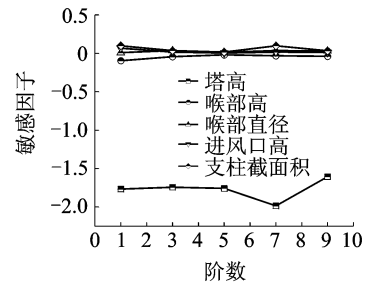


图7 各设计参数的相对灵敏度曲线图

Fig. 7 Relative sensitivity curve of design parameters

3.3 自振频率的实用估算公式

以上分析表明:基频和倾覆频率与塔高呈反比,与支柱截面积呈对数律形式增长,而与喉高比和进风口高度呈非线性关系。基于多项式拟合原理,以塔高、喉高比、喉部直径、进风口高度和支柱截面积为目标函数,笔者拟合给出超大型冷却塔基频和倾覆频率实用估算方式。其中,基频拟合公式为

$$F_f = \beta_1 \frac{25.43}{H - 47.80} + \beta_2 \times 42.14e^{-\left(\frac{B-0.76}{1.13}\right)^2} + \beta_3 \frac{8.02 \times 10^4}{R^3 - 23.96R^2 + 1.32R + 323.2} +$$

$$\beta_4(2.30 \times 10^{-4}R^2 + 3.72 \times 10^{-3}R + 3.12) + \beta_5 \frac{7.51A - 3.60}{A - 0.38} \quad (8)$$

倾覆频率拟合公式为

$$F_o = \beta_1 \frac{60.05}{H - 34.88} + \beta_2 \times \frac{2.67 \times 10^3 - 86.92B}{B^2 - 2.47B + 28.95} + \beta_3 \frac{7.48 \times 10^5}{R^2 + 4.67R + 1346} + \beta_4(-1.83 \times 10^{-3}J^2 + 4.97 \times 10^{-2}J + 9.33) + \beta_5 \frac{27.22A - 13.97}{A - 0.27} \quad (9)$$

其中: $\beta_1 = \frac{|H|}{|H| + |B| + |R| + |J| + |A|}$;

$\beta_2 = \frac{|B|}{|H| + |B| + |R| + |J| + |A|}$;

$\beta_3 = \frac{|R|}{|H| + |B| + |R| + |J| + |A|}$;

$\beta_4 = \frac{|J|}{|H| + |B| + |R| + |J| + |A|}$;

$\beta_5 = \frac{|A|}{|H| + |B| + |R| + |J| + |A|}$; $\beta_1 \sim \beta_5$ 分别代

表塔高、喉高比、喉部直径、进风口高度和支柱截面积敏感因子的权重值。

3.4 误差分析

为验证拟合公式的有效性,采用课题组已有研究的冷却塔进行验证。文献[14,23]中冷却塔结构基本参数如表 4 所示。

表 4 试验塔结构基本参数

Tab. 4 Basic parameters of test cooling tower

塔名	H/m	B/m	R/m	J/m	A/m ²
A	215	160	99.28	19.8	1.33
B	177	75	133	13.5	1.33
C	155	119	68	10.6	0.95

表 5 为 3 个算例塔基频和倾覆频率有限元计算值和拟合值。对比发现:基频拟合结果误差值大于倾覆频率的误差,其中塔 B 基频误差最大,为 1.95%,塔 A 倾覆频率误差最小,为 0.33%。可见文中的基频和倾覆频率拟合公式在估算自振频率方面具有较高的可信度。

表 5 冷却塔自振频率结果验证

Tab. 5 The result verification of natural frequency for cooling tower

塔名	基频			倾覆频率		
	有限元值	拟合值	误差/%	有限元值	拟合值	误差/%
A	0.657	0.669	1.83	1.391	1.402	0.86
B	0.820	0.804	1.95	1.540	1.529	0.71
C	0.920	0.907	1.41	1.810	1.804	0.33

4 结 论

1) 冷却塔基频随总高度和喉部高度的增加逐渐减小,而随喉部直径、进风口高度和支柱截面积的增加逐渐增大;以塔高为目标计算所得的敏感因子显著大于其他 4 个参数的敏感因子,精度较高的拉丁超立方抽样法获取的敏感因子大小排序为 $|H| > |B| > |A| > |R| > |J|$ 。

2) 冷却塔自振频率与塔高呈线性反比关系,与支柱截面积呈对数律形式增长,而与喉部高度、喉部直径和进风口高度呈非线性关系。基于多项式拟合原理,创新性地提出考虑敏感因子权重值的多参数基频和倾覆频率的实用估算公式。

3) 3 个算例冷却塔基频拟合结果误差值大于倾覆频率的误差,其中,塔 B 基频误差最大,为 1.95%,塔 A 倾覆频率误差最小,为 0.33%。可见文中的基频和倾覆频率拟合公式在估算自振频率方面具有较高的可信度。

参 考 文 献

[1] Ren Weixin, Peng Xuelin, Lin Youqin. Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2005, 27(4): 535-548.

[2] Ke Shitang, Ge Yaojun. Extreme wind pressures and non-gaussian characteristics for super-large hyperbolic cooling towers considering aeroelastic effect[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 141(7): 04015010-04015036.

[3] 王文胜, 徐胜利, 程耿东. 基于简化模型的结构动力特性优化[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 45-50. Wang Wensheng, Xu Shengli, Cheng Gengdong. Optimization of structural dynamic characteristics based on the reduced model[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 45-50. (in Chinese)

[4] 金新阳, 王建, 王国砚, 等. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

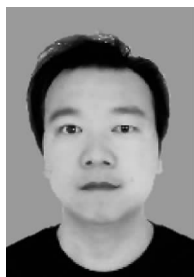
[5] 李武全, 罗书祥, 彭向东, 等. DL/T 5339—2006 火力发电厂水工设计规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[6] 王威, 李敬生, 龙健, 等. GB/T 50102-2014 工业循环水冷却设计规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[7] 沈国辉, 王宁博, 孙炳楠, 等. 大型双曲冷却塔的自振特性[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(2): 47-54. Shen Guohui, Wang Ningbo, Sun Bingnan, et al. Natural vibration characteristic of large hyperbolic cooling tower[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(2): 47-54. (in Chinese)

[8] 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[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010,

- 44(5): 955-961.
- Bao Kanyuan, Shen Guohui, Sun Bingnan. 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. (in Chinese)
- [9] 万华平, 任伟新, 颜王吉. 桥梁结构动力特性不确定性的全局灵敏度分析的解析方法[J]. 振动工程学报, 2016, 29(3): 429-435.
- Wan Huaping, Ren Weixin, Yan Wangji. Analytical global sensitivity analysis for uncertainty in structural dynamic properties of bridges[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(3): 429-435. (in Chinese)
- [10] 李永乐, 苏茂材, 王士刚, 等. 大跨度钢桁梁铁路斜拉桥刚度参数敏感性分析[J]. 振动与冲击, 2015(2): 166-170.
- Li Yongle, Su Maocai, Wang Shigang, et al. Sensitivity of structural stiffness parameters of long-span steel truss cable-stayed railway bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(2): 166-170. (in Chinese)
- [11] 甘高凡, 傅继阳, 饶瑞. 设计参数对大跨屋盖结构自振频率的敏感度分析[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2011, 10(6): 73-78.
- Gan Gaofan, Fu Jiyang, Rao Rui. Sensitivity analysis of design parameters on natural frequency for long-span roof[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2011, 10(6): 73-78. (in Chinese)
- [12] 张俊光, 刘永健, 姚晓荣, 等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥结构参数敏感性分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31(5): 55-59.
- Zhang Junguang, Liu Yongjian, Yao Xiaorong, et al. Parameters sensitivity analysis of steel bridge stiffened with rigid cable[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2010, 31(5): 55-59. (in Chinese)
- [13] 王秀丽, 李晓飞, 薛晓峰. 辐射式张弦梁结构自振特性和地震响应分析[J]. 空间结构, 2010, 16(1): 24-28.
- Wang Xiuli, Li Xiaofei, Xue Xiaofeng. Analysis of free vibration characteristics and seismic response of radiant beam string structure[J]. Spatial Structure, 2010, 16(1): 24-28. (in Chinese)
- [14] 柯世堂, 侯宪安, 姚友成, 等. 强风作用下大型双曲冷却塔风致振动参数分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(10): 32-37.
- Ke Shitang, Hou Xianan, Yao Youcheng, et al. Parameter analysis of wind-induced vibration for large hyperbolic cooling towers under strong wind loads[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2013, 40(10): 32-37. (in Chinese)
- [15] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 双曲冷却塔结构特性新认识[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 67-76.
- Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin. New perceptions on the structure behavior of hyperboloidal cooling towers[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 67-76. (in Chinese)
- [16] 沈国辉, 王宁博, 楼文娟, 等. 渡桥电厂冷却塔倒塌的塔型因素分析[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 123-128.
- Shen Guohui, Wang Ningbo, Lou Wenjun, et al. Analysis of tower shape factor in the collapse of the Ferrybridge cooling towers[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 123-128. (in Chinese)
- [17] Tsujimori A, Kato M, Uchida M. Dynamic characteristics of the capillary pumped loop for cooling the tower-type computer[C]// ASME 2007 InterPACK Conference collocated with the ASME/JSME 2007 Thermal Engineering Heat Transfer Summer Conference Proceeding. New York: IEEE, 2007: 663-668.
- [18] 吴定俊, 张吉, 陈锦波, 等. 基础-墩-梁组合体系自振特性变化规律分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 65-71.
- Wu Dingjun, Zhang Ji, Chen Jinbo, et al. Free vibration characteristic analysis for foundation-pier-beam system[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 65-71. (in Chinese)
- [19] 傅学怡, 邸博. 基础刚度对高层建筑抗震设计的影响分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 19-28.
- Fu Xueyi, Di Bo. Study on effect of foundation stiffness on seismic design of high-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 19-28. (in Chinese)
- [20] Wang Haishun. Analysis of mechanical properties and dynamic characteristics of one hyperbolic cooling tower[J]. Special Structures, 2012, 6(347): 303-311.
- [21] Glanville M J, Kwok K C S. Dynamic characteristics and wind induced response of a steel frame tower[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1995, 54(2): 133-149.
- [22] 刘晓春, 祝小平, 周洲, 等. 基于太阳能飞机应用的低雷诺数翼型研究[J]. 航空学报, 2017, 38(4): 107-117.
- Liu Xiaochun, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou, et al. Study of low Reynolds number airfoils based on solar aircraft applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(4): 107-117. (in Chinese)
- [23] 柯世堂, 杜凌云. 不同气动措施对特大型冷却塔风致响应及稳定性能影响分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(5): 79-89.
- Ke Shitang, Du Lingyun. Impact study on wind-induced response and stability for super large cooling tower with different aerodynamic measures[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2016, 43(5): 79-89. (in Chinese)



第一作者简介:柯世堂,男,1982年11月生,博士、教授。主要研究方向为结构抗风与风能利用。曾发表《Sensitivity analysis and estimation method of natural frequency for large cooling tower based on field measurement》《Thin-Walled Structures》2018, Vol. 127等论文。
E-mail: keshitang@163.com

