

文章编号:1672-3031(2017)03-0213-05

冷却塔热力性能评价方法的对比分析

马麟¹, 赵顺安^{1,2}, 章立新¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 中国水利水电科学研究院 水力学研究所, 北京 100038)

摘要: 冷却塔的冷却能力是衡量其性能的重要参数, 多数测试标准对冷却能力的评价方法可分为冷却水量法与冷却水温法。本文通过一组实测数据对比分析了冷却水量法与冷却水温法这两种评价方法以及各标准间的差异性及存在问题, 得出国内测试标准的冷却水温法评价结果比冷却水量法和美国 CTI 标准评价结果均偏差约 2.3% 的结论。并分析出主要原因是标准中设计水温差计算时风量取值为实测风量, 为以后标准的修订提供了技术支持。

关键词: 冷却塔; 热力性能评价方法; 对比分析; 差异性

中图分类号: TQ051.5

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.03.008

1 研究背景

冷却塔是将冷却水在其内与大气充分直接或间接接触, 使水的热量传给大气的一种设备^[1], 在工业生产及人们的日常生活中应用十分广泛。如电力行业中, 作为提高凝汽器真空度的冷端设备, 冷却塔的性能好坏直接影响发电机组的安全性及经济性; 又如化工行业和冶金行业中, 各种机械设备正常运转产生的热量如不能通过冷却塔及时排出, 严重时会造成设备的瘫痪从而停滞生产。因此, 有必要对冷却塔的实际运行状态进行检测及性能计算, 来评价冷却塔的真实冷却能力。

目前, 国内外各标准^[2-5]关于冷却塔热力性能的评价方法主要分为: 冷却水量法及冷却水温法。冷却水量法是根据实测工况参数, 求出修正到设计工况条件下的冷却水量, 再与设计水量相比来评价; 而冷却水温法是根据实测工况参数, 按冷却塔热力性能曲线或公式, 计算出实测参数下冷却水温差并与该工况下的实测冷却水温差之比来评价。无论哪种方法, 冷却塔的冷却能力实质均应该是实际表现与设计表现的比值。两者除计算公式不同外, 在国内外标准中也有部分差异, 如关于冷却数的计算: 文献[2]采用辛普森公式, 日本标准^[5]与美国 CTI 标准^[6]采用切比雪夫公式; 关于风量的计算: 文献[3]、美国 CTI 标准^[6]采用风机轴功率来计算, 文献[2]、文献[4]及日本标准^[5]等却优先采用皮托管测定风速来计算。关于不同标准之间的差异, 部分学者进行了对比研究, 如李德兴^[7]对国内标准与美国 CTI 标准做了对比分析, 认为其最大不同是测量上的实施细则(测量风量、水量等), 其他条款相近; 日本手冢俊一^[8]对比日本标准与美国 CTI 标准后, 认为美国 CTI 标准最大不同是评价时对实测水量和实测风量限制过严(须均接近设计标准值), 如若偏差较大则难以得到正确的性能评价等等。而关于冷却水量法与冷却水温法两种评价方法, 是否会造成评价结果的差异, 目前还未有学者做过这方面对比研究。本文以一个实测案例对冷却水量法与冷却水温法进行了比较, 并将各个标准^[2-6]一同对比。发现文献[2]、文献[4]中的冷却水温法评价结果较冷却水量法评价结果偏差了约 2.3%; 各标准间的评价结果基本一致。

2 冷却能力评价方法

2.1 冷却水量法 各个冷却塔测试标准^[2-5]关于冷却水量法的规定基本相同, 即根据塔的实测工况参数, 求出修正到设计工况条件下的气水比 λ_c 和冷却水量 Q_c , 再与设计水量 Q_d 相比(如图 1)。图中: N

收稿日期: 2017-01-20

作者简介: 马麟(1992-), 男, 河北邯郸人, 硕士生, 主要从事冷却塔方面的研究。E-mail: 791813689@qq.com

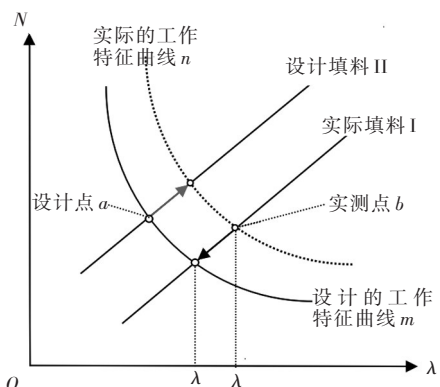


图1 冷却水量法计算示意

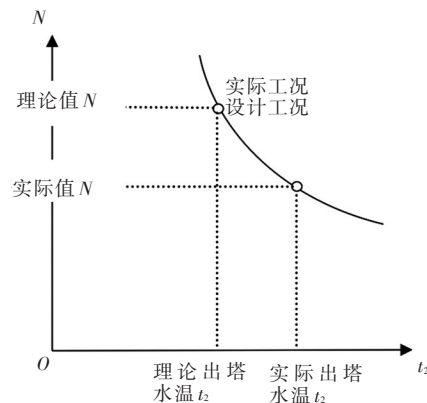


图2 冷却水温法计算示意

为冷却塔的冷却数； λ 为气水比，即进塔干空气量与进塔水流量的比值。

评价指标为：

$$\eta_{sq} = \frac{G_{\text{实}}}{Q_d \lambda_c} = \frac{Q_c}{Q_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中： η_{sq} 为评价指标，%； $G_{\text{实}}$ 为实测进塔干空气流量，kg/h； λ_c 为修正到设计工况下的气水比； Q_c 为修正到设计工况下的进塔水流量，kg/h； Q_d 为设计冷却水流量，kg/h。

2.2 冷却水温法 除冷却水量法外，标准^[2-5]中关于冷却水温法的规定也基本相同，均是根据实测工况参数，按设计或制造单位提供冷却塔的热力性能曲线或公式，计算出实测参数下冷却水温差 $\Delta t_i'$ 与该工况下的实测冷却水温差 Δt_i 之比(如图2)，评价指标为：

$$\eta_{st} = \frac{\Delta t_i}{\Delta t_i'} \times 100\% \quad (2)$$

式中： η_{st} 为评价指标，%； Δt_i 为实测的进出塔水温差， $\Delta t_i = \text{实测进塔水温} - \text{实测出塔水温}$ ， $^{\circ}\text{C}$ ； $\Delta t_i'$ 为修正到标准设计工况后的进出塔水温差， $\Delta t_i' = \text{实测进塔水温} - \text{修正后出塔水温}$ ， $^{\circ}\text{C}$ 。

不同的是，日本标准^[5]在计算出塔水温时采用设计进塔干空气流量；而文献[2]和文献[4]却采用实测进塔干空气流量，此计算结果并不能代表冷却塔应有的设计温差。

2.3 美国CTI标准的特性曲线评价法 美国CTI标准在国际上应用较为广泛，已被许多国家接受作为评价冷却塔热力性能的依据^[9]，故选此标准作为本次研究的对比参照。此评价方法与上述的冷却水量法基本相同，即：

$$\eta = \frac{G_t}{Q_d \lambda_c} = \frac{Q_c}{Q_d} \times 100\% \quad (3)$$

所不同的是冷却数计算采用切比雪夫公式。另外进塔干空气流量不是直接测定的，而是先测定其风机功率，根据风机功率再计算进塔干空气量。采用下式计算：

$$G_t = G_d \left(\frac{v_d}{v_t} \right) \left(\frac{P_t}{P_d} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_d}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中： G_t 、 G_d 分别为实际进塔干空气流量、设计进塔干空气流量，kg/h； v_t 、 v_d 分别为实测进塔干空气比体积、设计进塔干空气比体积， m^3/kg ； P_t 、 P_d 分别为实测风机轴功率、设计风机轴功率，kW； ρ_t 、 ρ_d 分别为实测进塔湿空气密度、设计进塔湿空气密度， kg/m^3 。

2.4 实测工况水量评价法 在采用冷却水量法进行评价计算时，各标准从冷却能力的概念出发，将实测参数核算到设计工况。也可将设计参数核算到实测工况来评价，即：先根据塔的设计工况参数，求出修正到实测工况条件下的气水比 λ'_c 和冷却水量 Q'_c ，再将实测冷却水量 $Q_{\text{实}}$ 与之相比(如图1)。评价指标按下式计算：

$$\eta_{sq} = \frac{Q_{实} \lambda'_c}{G_{设}} = \frac{Q_{实}}{Q'_c} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $G_{设}$ 为设计进塔干空气流量，kg/h； λ'_c 为修正到实测工况条件下的气水比； Q'_c 为修正到实测工况下的进塔水流量，kg/h； $Q_{实}$ 为实际冷却水流量，kg/h。

2.5 设计工况水温评价法 同2.4节，在运用冷却水温法进行评价计算时，也可将实测参数核算到设计工况，具体为：根据设计工况参数，按实际冷却塔的热力性能曲线或公式计算出设计参数下的冷却水温差 $\Delta t'_d$ ，与设计冷却水温差 Δt_d 相比(如图2)。评价指标按下式计算：

$$\eta_{st} = \frac{\Delta t'_d}{\Delta t_d} \times 100\% \quad (6)$$

式中： Δt_d 为设计冷却水温差， $\Delta t_d = \text{设计进塔水温} - \text{设计出塔水温}$ ，℃； $\Delta t'_d$ 为修正到实测工况后的进出塔水温差， $\Delta t'_d = \text{设计进塔水温} - \text{修正后出塔水温}$ ，℃。

2.6 汇总 各标准中关于冷却塔热力性能的评价方法主要分为两种：冷却水量法与冷却水温法。所核算的工况也分两种：设计工况与实测工况。表1将上述评价方法、所核算工况及涉及的标准进行了汇总，如下：

表1 各类评价方法汇总

评价方法	所核算工况	所涉及标准
冷却水量法	设计工况	美国CTI标准、文献[2]、文献[3]、文献[4]、文献[5]
	实测工况	本文
冷却水温法	设计工况	本文
	实测工况	文献[2]、文献[3]、文献[4]、文献[5]

3 评价方法对比分析

3.1 实测案例 本文采用了一组实测数据来进行各个评价方法的对比分析。其中设计参数和验收测量值见表2。

表2 设计参数与验收测量值

参数	设计值	测量值
大气压 P_0/kPa	101.2	101.5
干球温度 $\theta/^\circ C$	32.5	30.5
湿球温度 $\tau/^\circ C$	27	27
进水温度 $t_1/^\circ C$	42	40
出水温度 $t_2/^\circ C$	32	31.5
冷却水量 $Q/(t/h)$	3500	3400
风机轴功率 P/kW	150	145
设计气水比 λ	0.913	-
实测干空气量 $G/(kg/h)$	-	308×10^4

表3 不同公式下N值计算结果

文献	公式	设计值	测量值
文献[2]	辛普森 公式(8段)	1.198	1.201
	文献[3]	切比雪夫公式	1.233
文献[4]	辛普森 公式(8段)	1.296	1.275
	文献[5]	切比雪夫公式	1.198
文献[6]	切比雪夫公式	1.201	1.187

设计热力性能公式为： $N = 1.3\lambda^{0.61}$

3.2 冷却数N计算的差异 各标准^[2-6]对于冷却数N的计算公式主要分为两种：辛普森公式和切比雪夫公式。计算结果见表3。

由于各标准对k值(蒸发水量带走热量的修正系数)的选用存在差别(文献[3]、文献[4]选用k值进行计算，而文献[1]文献[5]文献[6]不选用k值)，所得出的冷却数也稍有偏差，其中设计值最大偏差6%，实测值最大偏差7%。

表4 冷却水量法与冷却水温法评价结果

评价方法	参数	文献[2]	文献[3]	文献[4]	文献[5]
冷却水量法	修正后 λ	0.90	0.92	0.90	0.90
	性能/ $\%$	97.7	97.8	97.7	97.7
冷却水温法	修正后出塔水温 $t_2/^\circ\text{C}$	31.5	-	31.5	31.3
	性能/ $\%$	100	-	100	97.7

3.3 冷却水量法与冷却水温法评价结果对比 各个标准^[2-5]采用冷却水量法与冷却水温法评价计算后的结果见表4。需要说明的是：文献[3]在2008年进行修订时，对于冷却水量超过1000t/h的冷却塔，性能评价方法由水温降对比法(冷却水温法)改为冷却水量法。

可以看出，针对本次案例，文献[2]和文献[4]中的冷却水量法评价结果较冷却水温法偏差了2.3%；文献[5]中的冷却水量法评价结果与冷却水温法是一致的。各个标准中采用冷却水量法进行评价后的结果亦均一致。

3.4 各标准评价结果对比 将文献[2]和文献[4]中的实测进塔干空气量改为设计进塔干空气量后进行评价，其结果同其他标准及方法的评价结果进行对比，见表5。

表5 各标准间评价结果

标准	评价方法	性能/ $\%$
文献[2]	冷却水量法	97.7
	冷却水温法	97.7
文献[3]	冷却水量法	97.8
	冷却水温法	97.7
文献[4]	冷却水量法	97.7
	冷却水温法	97.7
文献[5]	冷却水量法	97.7
	冷却水温法	97.7
美国 CTI 标准	特性曲线评价法	97.7
本文	实测工况水量评价法	97.8
本文	设计工况水温评价法	97.7

可以看出，各标准间的评价结果均无差别，说明 k 值的选用对各个标准、各个方法的评价结果影响较小。此外，设计工况水量评价法、实测工况水温评价法的评价结果较其他标准基本一致。

3.5 数据分析

3.5.1 冷却水量法与冷却水温法差别 文献[2]和文献[4]中冷却水温法较冷却水量法的评价结果偏差了2.3%，在经过将设计风量代替实测风量进行评价计算后，其结果才达成一致。说明偏差因素仅仅是实测干空气量导致的，究其原因，是因为风机的风量属于设定好的参数(即设计条件)，不可随意变动。而文献[5]中两种评价方法的评价结果本就一致，说明冷却水量法与冷却水温法均能真实客观的反映冷却塔的热力特性。

另外，当冷却塔在进塔水量偏离设计水量或在进塔水温偏离设计进塔水温等条件下运行时，实测出塔水温往往达不到预期效果，且偏离程度越大，效果越差，这在一定程度上会影响冷却水温法与冷却水量法的真实评价。且在评价计算过程中由于冷却水量法受实测进塔干空气量的限制更严(实测干空气量与水量、进塔水温等相关联：水量变化会影响淋水密度和塔阻的变化，进而影响风量；入塔水温会造成空气密度的变化亦会影响风量)，其评价结果的偏差会比冷却水温法更大。

3.5.2 各标准差别 各个标准间主要存在参数取值、 k 值选取、计算公式等差别。经过计算后发现，参数取值与计算公式造成的偏差可忽略不计，只有 k 值选取会对冷却数计算造成较大偏差，但并不影响其评价结果的一致。说明就同一组数据而言，各个标准均能得出相一致的评价结果。

3.5.3 实测工况水量评价法、设计工况水温评价法的差别 这两种方法从冷却概念角度来看，与冷

却水量法、冷却水温法并无差别,仅是核算工况相反。其评价结果的偏差在0.1%以内,属于合理范围。因此不失为一种有效评价冷却塔性能的新方法。

4 结论

在经过对比分析了冷却水量法与冷却水温法以及各标准间的差异性后,得出以下结论:(1)各个标准对于 k 值(蒸发水量带走热量修正系数)的选用虽存在差别,但不影响最后对冷却塔性能结果的评价,建议在冷却塔性能评价计算中 k 值取1。(2)国内测试标准中冷却水温法的评价结果比冷却水量法偏差约2.3%。是因为冷却水温法中的风量取值存在问题,应将实测进塔干空气流量改为设计进塔干空气流量,建议标准修订时予以修正。(3)各个标准在进行冷却塔评价计算时,无论是核算到设计工况还是实测工况,对同一组数据均能得出相一致的结果。

参 考 文 献:

- [1] 赵顺安.冷却塔工艺原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [2] 东北电力设计院. DL/T1027-2006 工业冷却塔测试规程[S]. 中华人民共和国电力行业标准,2006.
- [3] 机械工业第四设计研究院,中国水利水电科学研究院,上海交通大学,等. GB/T7190.2-2008 玻璃纤维增强塑料冷却塔第2部分:大型玻璃纤维增强塑料冷却塔[S]. 中华人民共和国国家标准,2008.
- [4] 西安建筑科技大学,国家电力公司东北电力设计院,国家电力公司热工研究院,等. CECS118-2000 冷却塔验收测试规程[S]. 中国工程建设标准化协会标准,2000.
- [5] 日本工业标准原案作成委员会. JISB8609-2008,机械通风冷却塔的性能试验[S]. 日本工业标准,2008.
- [6] Cooling Technology Institute. CTI ATC-105-2000 Acceptance Test Code for Water Cooling Towers[S]. American National Standards, 2000.
- [7] 李德兴. 冷却塔热力性能验收评价方法的运用[J]. 工业用水与废水,2011,42(2): 69-71.
- [8] 孙格非. 机械通风式冷却塔的热工性能换算方法、试验标准和评价方法(二)[J]. 制冷技术,1987(3): 1-8.
- [9] 杨国栋. 冷却塔性能评价[J]. 制冷,2005(增刊): 85-87.

Comparative analysis of cooling tower thermal performance evaluation method

MA Lin², ZHAO Shunan^{1, 2}, ZHANG Lixin¹

(1. University of Shanghai for Science and Technology, School of Energy and Power Engineering, Shanghai 200093, China;

2. Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The cooling ability is one of important parameters to measure the capacity of the cooling tower. Generally speaking, the current cooling ability evaluation method consists of the cooling water yield method and the cooling water temperature method. The study made a comparative analysis of the two kinds of cooling evaluation methods through a group of testing data as well as the distinctions and limitations between the different standards. The result made a conclusion that there exists a 2.3% deviation of the evaluation result between the domestic cooling water yield method and the cooling water temperature method as well as the American CTI evaluation standard. In addition, the causation of the results was also analyzed, which mainly owns to the air volume which is calculated as the measured air volume during the design of water temperature difference calculation of the standard, which provides the technical support for the further standard modification.

Keywords: cooling tower; cooling ability evaluation method; Comparative analysis; the distinctions

(责任编辑:李福田)