

作者简介：郭鹏（1977-），男，高级工程师，研究方向：暖通空调系统优化与新能源应用
通讯作者：郭鹏

不同冷却水温度对冷水机组能效的影响分析

郭 鹏

(北京天鸿汇辰管理咨询有限责任公司, 北京 100000)

摘要：本文分析了不同冷却水温度对冷水机组能效的影响。通过理论计算与数据分析，指出在标准工况下，降低冷却水供水温度可显著提高冷水机组的制冷性能系数(COP)，每降低1℃供水温度，COP约提升2~3%。研究比较了不同冷却水温差和冷水机组类型(定频离心式、变频离心式、螺杆式)在部分负荷下的能效表现，合理控制冷却水温度有助于优化系统运行效率，降低制冷系统能耗，对实现建筑节能目标具有重要意义。

关键词：冷却水、COP、能效

Analysis of the Impact of Different Cooling Water Temperatures on Chiller Energy Efficiency

Guo Peng

(Beijing Tianhong Huichen Management Consulting Co., Ltd., Beijing 100000)

Abstract: This paper analyzes the impact of different cooling water temperatures on the energy efficiency of chillers. Through theoretical calculations and data analysis, it indicates that under standard operating conditions, lowering the supply water temperature of the cooling water can significantly improve the chiller's Coefficient of Performance (COP). For every 1°C decrease in the supply water temperature, the COP increases by approximately 2~3%. The study compares the energy efficiency performance of different cooling water temperature differences and chiller types (fixed-speed centrifugal, variable-speed centrifugal, screw) under partial loads. The results show that reasonably controlling the cooling water temperature helps optimize system operational efficiency, reduce energy consumption of the refrigeration system, and is of significant importance for achieving building energy conservation goals.

Key words: Cooling Water、COP、Energy Efficiency

0 引言

能源是影响可持续发展的关键因素之一，同时也带来了空气污染和温室效应等环境问题。未来20年，世界能源需求总量将增加近一倍，能源供给压力倍增。建筑能耗是终端能源消耗的重要部分。在美国，建筑能耗占到终端能耗的约41%，在欧洲，约为40%。在中国，建筑能耗也占到了终端能耗的约27%。暖通系统是建筑能耗的主要设备，在公共建筑中，暖通系统的运行能耗占到建筑能耗的60%。在空调系统能耗中，制冷机房能耗占到暖通系统总能耗的70%。因此，制冷机房的高效化，对于减少能源消耗有重要的意义和价值。^[1]

2019年开始实施的《绿色高效制冷行动方案》中，明确了高效制冷实施目标，到2030

年，大型公共建筑制冷能效提升 30%，制冷总体能效提升 25%以上的实施目标。

制冷机房内主要设备包括：冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔、水处理设备等。其中，冷水机组能耗占制冷机房总能耗的 68~88%，冷冻水泵能耗占制冷机房总能耗的 5~15%，冷却水泵能耗占制冷机房总能耗的 5~13%，冷却塔能耗占制冷机房总能耗的 3~6%。^[1]

冷却水系统作为冷水机组与外界热交换的媒介，其设计选型会直接影响冷水机组的运行与能效。本文将主要分析冷却水供回水温度对冷水机组能效（或制冷性能系数）的影响。

1 理论分析

1.1 蒸汽压缩式制冷工况的逆卡诺循环

蒸汽压缩式制冷的工作原理是使制冷剂在压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器等热力设备中进行压缩、放热冷凝、节流和吸热蒸发四个主要热力过程，从而完成制冷循环，实现对被冷却介质的制冷效果。

逆卡诺循环是在两个温度不同的定温热源之间进行的理想热力循环。逆卡诺循环的制冷系数为：

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T_K - T_0} \quad (1)$$

ε : 制冷性能系数

T_0 : 蒸发温度，K

T_K : 冷凝温度，K

1.2 冷水机组标准工况参数

根据厂家样本资料，水冷冷水机组在标准运行工况下，蒸发器进出水温度为 12/7°C，冷凝器进出水温度为 30/35°C。蒸发器侧冷冻水流量为 $0.172m^3/(h * kW)$ ，冷凝器侧冷却水流量为 $0.215m^3/(h * kW)$ 。新机组蒸发器和冷凝器污垢系数为 0。蒸发温度为 5°C (278K)，冷凝温度为 40°C (313K)。

将蒸发温度和冷凝温度代入上式，得制冷性能系数为 7.94。

1.3 蒸发温度和冷凝温度变化对制冷性能系数的影响

1.3.1 冷凝温度 (40°C) 不变，蒸发温度变化对制冷性能系数的影响

表 1 蒸发温度对制冷性能系数的影响

项目	数值							
蒸发温度， °C	3	4	5	6	7	8	9	10
制冷性能系数， ε	7.46	7.69	7.94	8.21	8.48	8.78	9.10	9.43
$\varepsilon/7.94$	0.939	0.969	1.000	1.033	1.069	1.106	1.146	1.188
蒸发温度每升高 1°C，制冷性能系数升高比例值， %	0	2.960	3.093	3.349	3.513	3.733	3.974	4.239

从表 1 可以看出，在制冷空调工况附近，冷凝温度不变时，制冷性能系数随着蒸发温度的升高而升高，蒸发温度每升高 1°C，制冷性能系数升高 3~4% 左右。蒸发温度越高，制冷性能系数升高的比例也越大。

1.3.2 蒸发温度 (5°C) 不变，冷凝温度变化对制冷性能系数的影响

表 2 冷凝温度对制冷性能系数的影响

项目	数值
----	----

冷凝温度, °C	36	37	38	39	40	41	42	43
制冷性能系数, ε	8.97	8.69	8.42	8.18	7.94	7.72	7.51	7.32
$\varepsilon/7.94$	1.129	1.094	1.061	1.030	1.000	0.973	0.946	0.921
冷凝温度每升高 1°C, 制冷性能系数降低比值, %	0	3.529	3.316	3.121	2.942	2.779	2.629	2.490

从表 2 可以看出, 在制冷空调工况附近, 蒸发温度不变时, 制冷性能系数随着冷凝温度的降低而升高, 冷凝温度每降低 1°C, 制冷性能系数升高 2.5~3.5% 左右。冷凝温度越低, 制冷性能系数升高的比例也越大。

对比上述两表, 在逆卡诺循环中, 在空调制冷工况下, 蒸发温度对于制冷性能系数的影响要比冷凝温度对制冷性能系数的影响要大。

1.3.3 蒸发温度(5°C) 不变, 冷冻水供回水温度为 7/12°C 时, 不同冷却水供回水温度对冷水机组制冷性能系数的影响

水冷离心式冷水机组非名义工况制冷性能系数修正可以参考下式^[2]:

$$COP = \frac{COP_n}{K_a} \quad (2)$$

$$K_a = A * B \quad (3)$$

$$A = 0.000000346579568 * (LIFT)^4 - 0.00121959777 * (LIFT)^2 + 0.0142513850 * (LIFT) + 1.33546833 \quad (4)$$

$$B = 0.00197 * LE + 0.986211 \quad (5)$$

$$LIFT = LC - LE \quad (6)$$

COP : 名义工况下离心式冷水机组的性能系数

COP_n : 非名义工况下离心式冷水机组的性能系数

LC : 冷水机组满负荷时冷凝器出口温度, °C

LE : 冷水机组满负荷时蒸发器出口温度, °C

上式中, LE 取蒸发器出水温度 7°C。

表 3 不同冷却水供回水温度对制冷性能系数的影响 (5°C 温差)

冷却水供水温度, °C	冷却水回水温度, °C	制冷性能系数	冷却水供水温度每降低 1°C, 制冷性能系数变化比值, %
25	30	8.85	2.30
26	31	8.65	2.36
27	32	8.46	2.40
28	33	8.26	2.42
29	34	8.06	1.54
30	35	7.94	3.28

31	36	7.69	2.34
32	37	7.51	2.25
33	38	7.35	0

表4 不同冷却水供回水温度对制冷性能系数的影响 (7°C温差)

冷却水供水温度, °C	冷却水回水温度, °C	制冷性能系数	冷却水供水温度每降低1°C, 制冷性能系数变化比值, %
25	32	8.46	2.40
26	33	8.26	2.42
27	34	8.06	2.42
28	35	7.87	2.39
29	36	7.69	2.34
30	37	7.51	2.25
31	38	7.35	2.12
32	39	7.19	1.96
33	40	7.06	0

制冷性能系数在冷却水供回水温差不变的情况下，随着冷却水供水温度的降低而提高。不同冷却水供回水温差下，增幅相差不大。温差变大后，制冷性能系数略有降低。

2 不同冷却水温度对冷却塔选型的影响

2.1 冷却塔冷却能力计算公式

冷却能力计算公式：

$$Q = 72 * L * (h_1 - h_2) \quad (7)$$

Q :冷却能力, kcal/h

L :冷却塔风量, m^3/h

h_1 :冷却塔入口空气焓值, kJ/kg

h_2 :冷却塔出口空气焓值, kJ/kg

冷却塔效率计算：

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_s} * 100\% \quad (8)$$

η :冷却塔的效率

T_1 :冷却塔进水温度, °C

T_2 :冷却塔出水温度, °C

T_s :室外湿球温度, °C

2.2 冷却塔出水温度的影响因素^[3]

冷却塔的换热原理是水与空气接触带走热量。冷却塔出水温度的主要影响因素有：冷却面积、水表面空气流动的速度、水的温度、环境温度等。

2.2.1 冷却面积

冷却塔的填料可以增加散热面积，一般是采用PVC材料制作，具有通风阻力小，亲水面积大，汽水扰动小，减缓水膜下降速度等特点。冷却水通过布水器，均匀布水，水流过填料变成水膜状态，增加了与空气的接触面积，可以更加高效的利用水的蒸发吸热，带走热量。

2.2.2 水表面空气流动的速度

冷却塔换热能力的一个重要参数是气水质量比，在循环水量一定的情况下，通风量大的风机能够提供更高的气水质量比，为冷却水的大幅度降温提供了前提条件。水蒸发带走的热

量比水和空气接触换热带走的热量小的多，气水质量比越大，换热量越大。

2.2.3 水的温度

在换热量一定的条件下，冷却水循环量越大，进塔水温越低。

2.2.4 环境温度

环境温度主要通过干球温度和湿球温度表示。在干球温度一定的条件下，空气中湿度越大，水就越不容易蒸发，湿球温度就越高。反之，空气越干燥，水就越容易蒸发，湿球温度就越低。干球温度的降低，会有利于冷却塔的出水温度降低。湿球温度的降低，会有利于降低冷却塔的出水温度。

湿球温度与冷却塔出水温度的差值，称为逼近度。业内普遍认为逼近度一般在 2.5~3°C 为宜。

3 冷却水供回水温度对冷水机组能效的影响^[4]

冷水机组是整个制冷系统中能耗较高的设备。其制冷性能系数（COP）对整个制冷系统的能耗有显著的影响，尤其是在部分负荷运行时。冷却塔的能耗主要体现在冷却塔风机上，其运行状态和性能会影响冷却水的供回水温度，间接影响冷水机组的性能系数和能耗。冷水机组的冷凝器散热一般采用水作为介质，水质直接影响管道的阻力和冷水机组的换热能力，进而影响冷水机组的能耗。水泵的能耗主要取决于流量、扬程、效率、功率等参数，减小管路阻力，降低水泵扬程，提高运行效率，能够减小水泵功率，进而减小能耗。

常用冷水机组制冷性能系数（COP）特性：

表 5 常用冷水机组制冷性能系数（COP）特性

冷水机组类型	COP	设计工况下负荷率		
		COP 峰值	COP 下降拐点	安全运行范围
定频离心式	高	80~90%	60~70%	40~100%
变频离心式	较定频机组低 3~4%	60~80%	40~50%	30~100%
螺杆式	较离心式低	60~90%	40~50%	20~100%

选用某厂家的冷水机组产品，螺杆式冷水机组选用制冷量为 780KW，COP 为 5.65；定频离心式冷水机组选用制冷量为 2782KW，COP 为 6.32；变频离心式冷水机组选用制冷量为 2898KW，COP 为 5.94。

常用冷水机组部分冷负荷-COP 曲线见下图，在满负荷时，定频离心式冷水机组的 COP 最大，其次是变频离心式冷水机组，最小的是螺杆式冷水机组。变频离心式冷水机组在运行负荷低于 80% 时，COP 将高于定频离心式冷水机组。变频离心式冷水机组的 COP 均高于螺杆式冷水机。

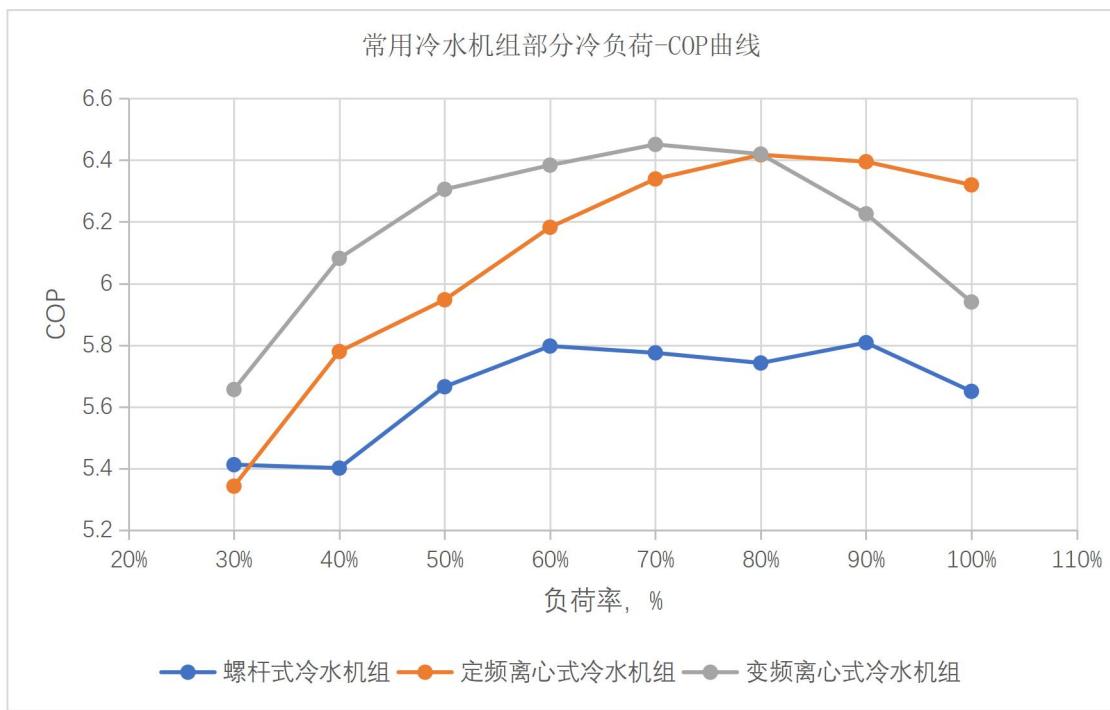


图1 常用冷水机组部分冷负荷-COP曲线

常用冷水机组部分负荷 COP-冷却塔出水温度曲线见下图。螺杆式冷水机组、定频离心式冷水机组、变频离心式冷水机组均随着冷却塔出水温度的降低而升高，变频离心式冷水机组提升幅度最大。

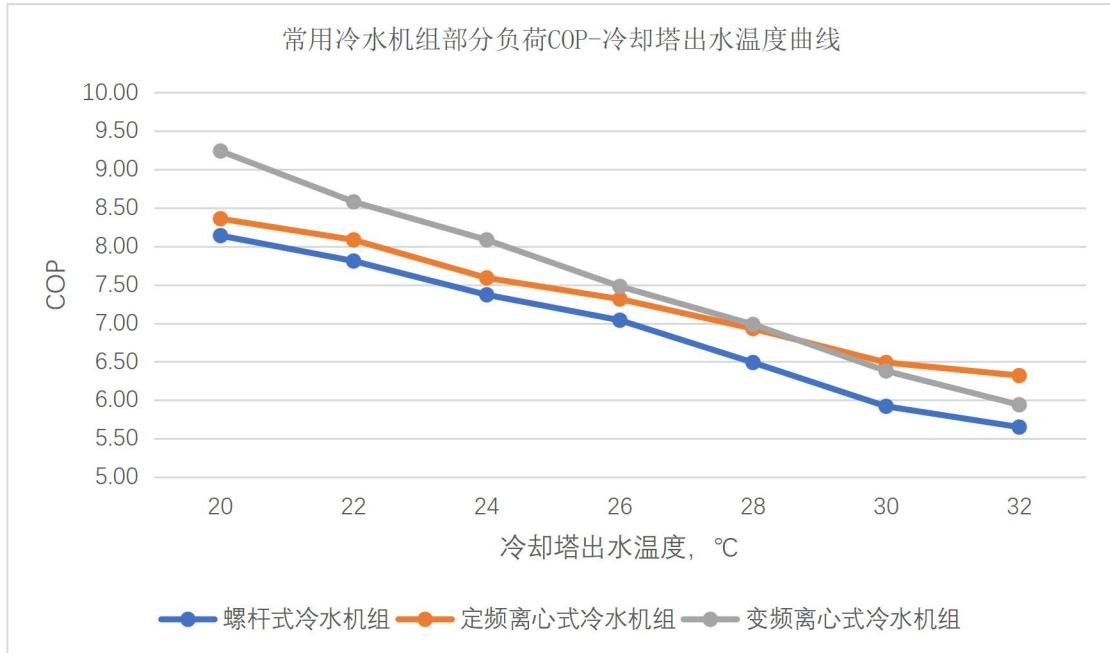


图2 常用冷水机组部分负荷 COP-冷却塔出水温度曲线

4 结束语

冷却水温度直接影响冷水机组冷凝器的热交换效率，当冷却水温度降低时，制冷剂与冷却水之间的温差变大，换热能力上升，冷凝温度和冷凝压力下降，冷水机组的制冷性能系数（COP）升高。降低冷凝温度能够提高冷水机组的能效。

参考文献：

- [1]徐伟, 中国高效空调制冷机房发展研究报告 (2021), 中国建筑工业出版社
- [2]GB 50189-2015, 公共建筑节能设计规范, 中国建筑工业出版社
- [3]王鑫国, 降低冷却塔出水温度的方法, 河北冶金, 2014 年第 5 期
- [4]李觐, 基于性能曲线的冷水机组配置和运行状况, 制冷, 2012 年第 2 期