

第 4 章 蒸发冷却型冷源

1. 利用蒸发冷却技术制备冷风

为节约数据中心冷却系统电耗，在室外气象条件较好时，各类系统都充分利用自然冷却实现数据中心冷却。利用室外新风制备冷风对数据中心进行排热的几种方式如表 1 所示。

方式 1 和方式 3 为引入室外新风的方式，方式 1 由于直接引入室外新风，其冷源温度为室外空气干球温度，自然冷却时间短；方式 3 利用室外新风进行直接或间接蒸发冷却后送入机房内，其冷源温度为室外湿球温度或者露点温度；这两种方式室外空气湿度会直接影响机房湿度，并且会引入室外灰尘，并且由于以风为载冷介质，风机电耗高，仅适合室外空气质量好的小型数据中心。

方式 2 和方式 4 是利用空气-空气换热器通过新风对回风降温的方式，其中方式 2 是直接利用室外空气对回风降温，其冷源温度为室外空气干球温度；方式 4 是利用新风侧的直接蒸发冷却过程通过风风换热器冷却回风，其冷源温度为室外空气湿球温度；这两种方式均利用风风换热器实现对回风的降温，风-风换热系数低，设备和风道体积大，占用空间大，成本高，风机电耗高，很难用于大型数据中心的冷却。

表 1. 利用室外新风制备冷风对数据中心排热的方式

方式	冷却技术	冷源温度	特点	适用范围
1	直接引入室外新风（直接风侧经济器）	室外干球温度	1. 影响机房湿度 2. 引入灰尘 3. 自然冷却时间短，风机电耗高	适用空气质量好、半湿润气候、小型数据中心
2	利用室外新风对机房回风降温（间接风侧经济器）	室外干球温度	1. 自然冷却时间短 2. 空间大，成本高，占地大 3. 风机电耗高	适用场合较少
3	新风直接或间接蒸发冷却制备冷风	室外湿球温度（直接蒸发冷却；间接蒸发冷却，室外风作为二次风） 室外露点温度（间接蒸发冷却，送风的一部分为二次风）	1. 影响机房湿度，带来灰尘 2. 风机电耗高	适用空气质量好、干燥气候、小型数据中心
4	新风直接蒸发冷却方式，冷却回风	室外湿球温度	1. 占用空间大，成本高，占地大； 2. 风机电耗高；	适用于干燥气候、小型数据中心

方式 4 目前在国内一些小型数据中心中被应用，被称作“间接蒸发冷却空调机组”，而实质上其内部是室外空气和水直接接触的直接蒸发冷却过程来冷却回风，新风的蒸发冷却通道为湿通道，回风的等湿降温过程为干通道，其本质上是直接蒸发冷却技术，冷源为室外空气的湿球温度，应与一般意义上的利用一次空气进风或一次空气出风的一部分做二次风的间接蒸发冷却技术有所区分。其原理

图如图 1 所示。

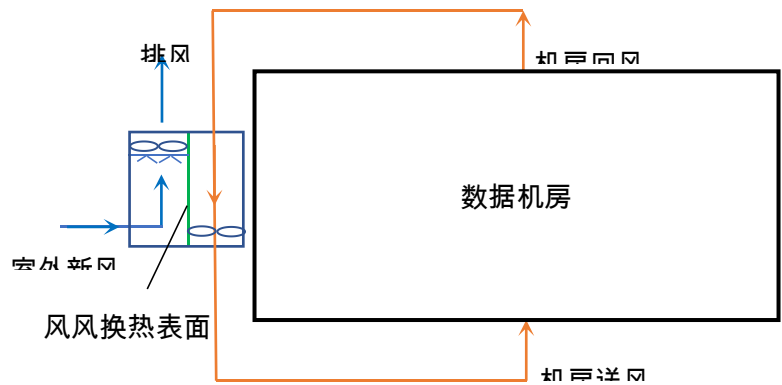


图 1. 新风直接蒸发冷却方式，冷却机房回风

如图 1 所示的利用新风直接蒸发冷却，通过风风换热器对回风进行降温的蒸发冷却方式，正如上所述，其冷源温度为室外空气湿球温度，与冷却塔制备出冷水，再通过冷水对机房回风进行冷却的方式相比，其冷却效果要差一些，原因是图 1 中的风-风换热很难做成纯逆流方式，并且风-风换热系数比风-水换热要低很多，需要非常大的风风换热面积，才能达到与风-水换热相当的效果。若考虑冷却塔制备的冷水不能直接用来冷却回风，一般通过水-水板换将冷量传递给闭式循环的水侧，再通过闭式循环的冷水冷却回风，如图 2 所示，这样相比图 1 的方式，会多一个换热环节，但是水-水换热的换热系数比风-风换热高至少 2 个数量级，即便考虑此换热环节，当投入同样的换热面积成本时，图 2 所示的冷却系统其冷却效果仍然优于图 1，换言之在同样的气候条件下其自然冷却时间要长于图 1 的系统。或者图 1 为达到和图 2 相同的冷却效果，其换热面积成本要高出很多。并且，图 1 所示系统的实际工程，需要在机房附近有足够空间来安装蒸发冷却设备，风道会比较复杂，导致风机电耗高，灵活性相比图 2 所示的以水为载冷介质的系统，要变差很多。因此，图 1 所示的系统仅适合规模小的机房，对于大型数据中心，设计时要谨慎，从各个角度分析，其并不适用。

2. 利用蒸发冷却技术制备冷水

2.1 利用直接蒸发冷却技术制备冷水

利用直接蒸发冷却制备冷水的技术就是我们所熟悉的利用冷却塔制备冷水，通过冷水对机房回风降温，如图 2 所示，也即大型水冷系统的自然冷却模式。利用冷却塔制备冷水的极限温度为室外空气的湿球温度，当湿球温度和露点温差相差较大时，即室外空气的相对湿度较低时，其相比间接蒸发冷却制备冷水的方式，出水温度高，自然冷却时间短，并不占优势。并且，用于寒冷地区数据中心冬季自然冷却时，还会面临较严重的结冰问题，如后所述。因此，利用直接蒸发冷却冷却制备冷水，其比较适用于非寒冷地区、且室外空气相对湿度相对偏高的地区，一般作为机械制冷排热用冷却塔，或者冬季的自然冷却（自然冷却模式如图 2 所示）。

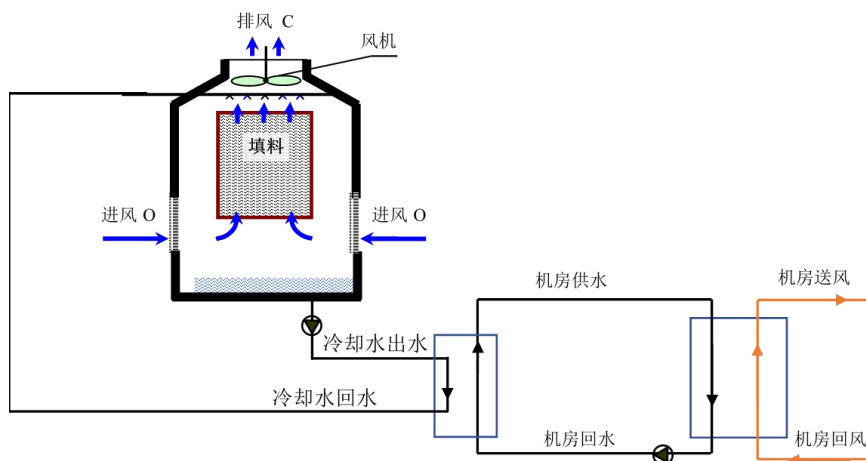
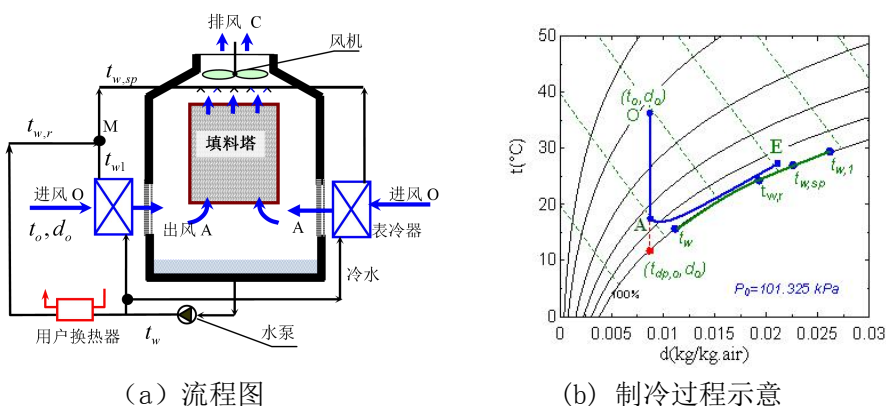


图 2. 利用冷却塔制备冷水实现机房排热的系统

2.2 利用间接蒸发冷却技术制备接近室外露点温度的冷水

延长自然冷却时间是数据中心冷却系统节电的主要措施之一，而进一步降低可以获得的自然冷源的温度是延长自然冷却时间的关键。直接蒸发冷却技术通过不饱和空气和水之间直接接触，通过水蒸发对水和空气降温，可以将自然冷源的温度自室外干球降低至室外湿球温度。而间接蒸发冷却技术通过在空气-水直接接触进行直接蒸发冷却过程之前先对空气进行等湿降温，从而降低空气的湿球温度，使得利用间接蒸发冷却技术可以制备低于室外湿球温度、极限为室外露点温度的冷源。因此，相比直接蒸发冷却技术，利用间接蒸发冷却技术能进一步延长自然冷却时间。而在大型数据中心应用间接蒸发冷却技术，核心是利用间接蒸发冷却制备冷水，从而在干燥地区替代电制冷机作为数据中心冷却系统的独立冷源，或者在夏季湿度高一些的地区在过渡季和冬季替代电制冷机实现数据中心的自然冷却。

利用间接蒸发冷却技术制备冷水的流程如图 3 所示，



(a) 流程图

(b) 制冷过程示意

图 3 间接蒸发冷却制备冷水的原理

间接蒸发冷却冷水机组主要由空气冷却器和填料塔所组成，其制备冷水的原理如图 3 所示。室外空气首先经过空气-水进风冷却器被填料塔出水的一部分等湿冷却，之后空气进入填料塔和喷淋水直接接触进行传热传质过程，水蒸发吸收汽化潜热进入空气中，空气被加热加湿最终被排出填料塔，冷水最终被冷却之

后输出填料塔。冷水出水被分成两股，一股进入空气冷却器冷却进风，另外一股送入用户实现用户的排热。间接蒸发冷却制备冷水的过程在焓湿图上的表示如图 3(b) 所示，由于进风空气在与水直接接触进行直接蒸发冷却之前首先被等湿降温，空气的湿球温度降低，制备出的冷水温度首先可低于室外空气的湿球温度。当空气冷却器中空气与冷水的显热换热过程满足流量匹配时，即进风的流量与空气比热的乘积等于进入空气冷却器的冷水流量与冷水比热的乘积；且当填料塔中空气与水的湿交换过程也满足流量匹配，即进风的流量与空气的等效比热的乘积等于喷淋水流量与冷水比热的乘积；此时当空气冷却器和填料塔的传热传质面积足够大时，此时该间接蒸发冷却过程制备出冷水的极限温度可以接近室外空气的露点温度。实际间接蒸发冷水机组制备出冷水的温度处在室外露点与室外湿球的平均值，如图 4 所示。

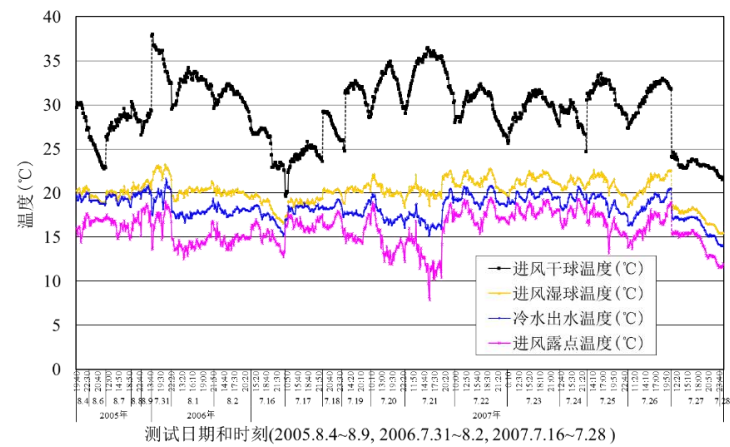


图 4. 间接蒸发冷水机组实测出水温度

我国西北地区室外气候干燥，湿球温度与露点温度之差可达 10℃ 以上，当数据中心要求的冷水温度足够高时，建设在西北地区的大型数据中心可以实现全年的自然冷却。图 5 展示了我国西北地区各城市最湿月的平均露点温度（如黑色数字所示）和最湿月间接蒸发冷水机组的平均出水温度（如红色数字所示）。

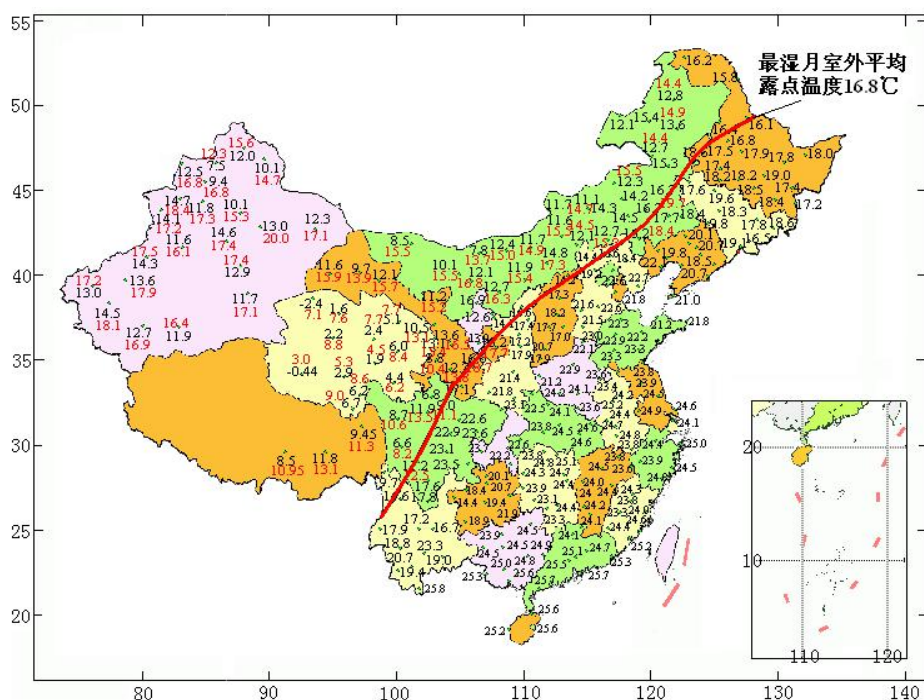


图 5. 我国西北各地最湿月室外平均露点温度和间接蒸发冷水机组出水温度

在西北地区，当冷冻水温设计温度足够高时，利用间接蒸发冷水机组可以作为独立冷源实现数据中心的全年自然冷却；而在中部地区和东北地区，夏季空气湿度较西北地区高，无法利用间接蒸发冷水机组作为独立冷源实现自然冷却，但过渡季和冬季可以利用间接蒸发冷水机制备冷水实现自然冷却。利用间接蒸发冷水机，由于可以制备出低于室外湿球温度、处在室外湿球和露点平均值的冷水，在中部地区和东北地区，延长了数据中心冷却的自然冷却时间，降低冷却系统电耗。

表 2 给出了西北地区几个典型城市，考虑夏季露点温度最高的工况，给出了该城市数据中心冷却系统利用间接蒸发冷水机实现全年自然冷却可制取的冷冻水供水温度（此时冷却水供回水温差 5℃，冷却水和冷冻水之间换热的板换的最小换热端差为 1K）。

表 2. 西北地区几个典型城市夏季露点温度最高工况和相应的冷冻水温度要求

城市	大气压(Pa)	干球温度(℃)	露点温度(℃)	冷冻水供水(℃)
西宁	77090	26.2	17.9	20
兰州	84440	25.6	18.9	21
乌鲁木齐	90370	30.4	19.4	22
呼和浩特	88560	26.7	21.6	23.5
银川	87720	33.5	21.6	24

图 6 给出了间接蒸发冷水机与常规冷却塔比较的一个算例，由图 6 可以看出，室外空气相对湿度越低，常规冷却塔出水温度与间接蒸发冷水机出水温度的差别越大，室外空气相对湿度越高，二者差别越小。当相对湿度高于 80% 时，间接蒸发冷却与直接蒸发冷却的出水温度接近，此时没有必要采用间接蒸发冷却技术。

当相对湿度在 70%左右时，冷却塔出水温度与间接蒸发冷水机出水温度相差 1K 左右。因此，是否采用间接蒸发冷却技术，取决于所在区域的室外气象条件，若全年室外相对湿度较低的时间段很短，大部分时间都处在相对湿度较高的时段，此时不应采用间接蒸发冷却技术，比如我国南方全年比较潮湿、干燥时段较短的地区，而具体相对湿度的分界（比如 70% or 60%）以及时长再针对具体工程做详细的技术经济分析。

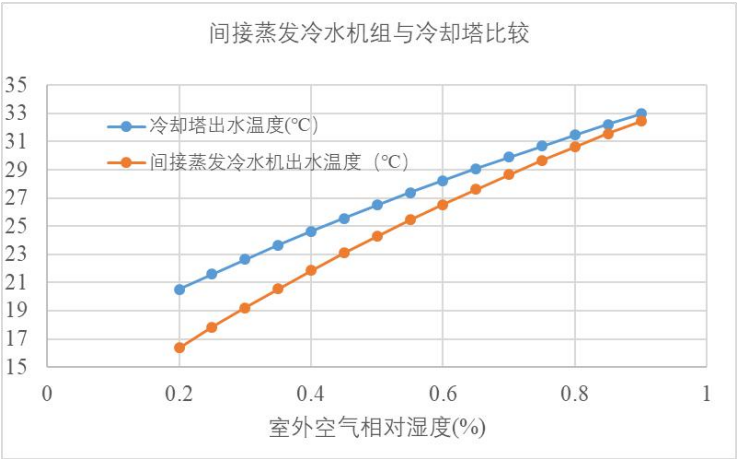


图 6. 间接蒸发冷水机组与常规冷却塔的比较（室外干球温度为 34℃，填料塔 NTU=3）

3. 在冬季利用间接蒸发冷却塔防止冷却塔结冰

3.1 北方数据中心用冷却塔的结冰现象

在北方地区利用水冷制冷系统，还有一个比较大的问题是冬季冷却塔结冰问题。如图 7 所示，冬季冷却塔运行，实现自然冷却，此时冬季冷却塔的进风面会极易结冰，进风面持续结冰会堵塞进风通道，从而使得冷却塔无法实现排热功能，使得数据中心冷却系统无法安全可靠运行。在空气进风面极易结冰的原因是在进风面空气和水是叉流流动关系，进风面空气流量是全部的进风量，而水量仅为喷淋到进风面的一小层水量，进风面处于风多水少的情况，当风温较低时，进风面极易结冰。



图 7. 冷却塔空气入口结冰现象

3.2 已有的冷却塔冬季防结冰的方法

已有的研究提出了多种方法防止冷却塔的结冰，比较常用的有电伴热方法，利用电伴热防止冷却塔水槽等位置的结冰，但利用电伴热的方式首先电耗会比较高，更重要的是电伴热的方式很难对冷却塔进风进行加热，很难解决冷却塔空气进口处的结冰问题。

目前还有一种比较流行的实现冷却塔冬季防冻的措施是冬季改用干冷器，干冷器中采用乙二醇循环实现防冻。乙二醇干冷器与普通冷却塔结合，一般是单设一套空气-乙二醇干冷器盘管和乙二醇-水板换，仅在冬季采用，这样需要重复投资一套乙二醇换热装置。目前还有一些工程采用乙二醇干冷器与间接蒸发冷却塔结合，间接蒸发冷却塔中设置一组空气-乙二醇干冷器盘管和乙二醇-水板换，在冬季实现室外空气对乙二醇降温，之后乙二醇再对机房内冷冻水降温排热；在夏季一些工程设计此乙二醇干冷器盘管同时作为预冷进风用盘管，只是需要在乙二醇环路上增加冷却塔出水与乙二醇换热的板换，间接实现冷却塔出水对进风的预冷；这种设计冬季冷却塔出水与乙二醇换热的板换不再使用，成为死水管路，而且切换用的阀门很多，也有部分在冬季成为死水管路，这些死水管路在冬季若水不能排净，将有非常大的结冻风险。并且系统切换非常复杂，降低了机房冷却系统的安全可靠的运行性能。并且这种乙二醇的干冷器的方式，有一个很大的弊端，就是很难应对日较差较大的情况。而北方冬季大部分城市日较差都较大，如图 8 所示，如果按照白天工况设计干冷器，干冷器的面积就非常高，使得干冷器投资很高不经济，大部分情况干冷器面积不足够大，这样白天需要开喷淋过程利用冷却塔排热，晚上开干冷器，这就使得白天晚上频繁切换，导致系统晚上需要排水，白天需要灌水，不仅增加了运行操作的复杂性，对阀门的可靠性要求很高，较大得影响了数据中心冷却系统的安全可靠运行。并且，这种频繁的切换也会出现较多的死水管路，导致结冰冻管。因此冬季利用乙二醇干冷器并不是防冻的可靠措施，反而增加了系统的复杂性，导致部分管路更易结冻。

另外，还有些研究采用闭式冷却塔实现冬季防冻，夏季开启喷淋水，冬季停止喷淋，利用闭式塔的盘管作为干冷器直接和室外风进行换热。但是闭式冷却塔的方式仍然无法如图 8 应对日较差较大的情况。

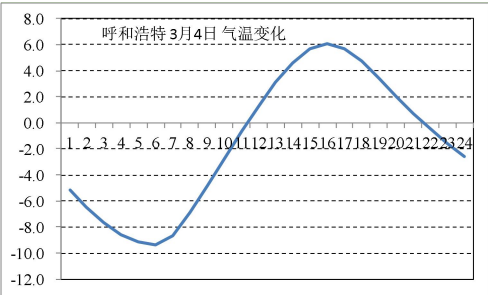


图 8 冬季日较差较大的室外工况（以呼和浩特冬季某天为例）

3.3 利用间接蒸发冷却塔彻底避免冷却塔结冰的方法

因此，需要找到彻底避免冷却塔结冰的方法。利用间接蒸发冷却塔恰好可以彻底实现冬季的防冻，其系统原理图如图 9 所示。有两种形式的流程，一种是并联形式的流程，一种是串联形式的流程，并联形式的流程的夏季制冷原理已在上面阐述过。对于串联形式的流程，如图 9 (a)，是利用与机房冷冻水换完热之后的冷却水回水进入表冷器与室外空气进行换热，之后冷水再在填料塔中与喷淋水接触进行蒸发冷却过程。

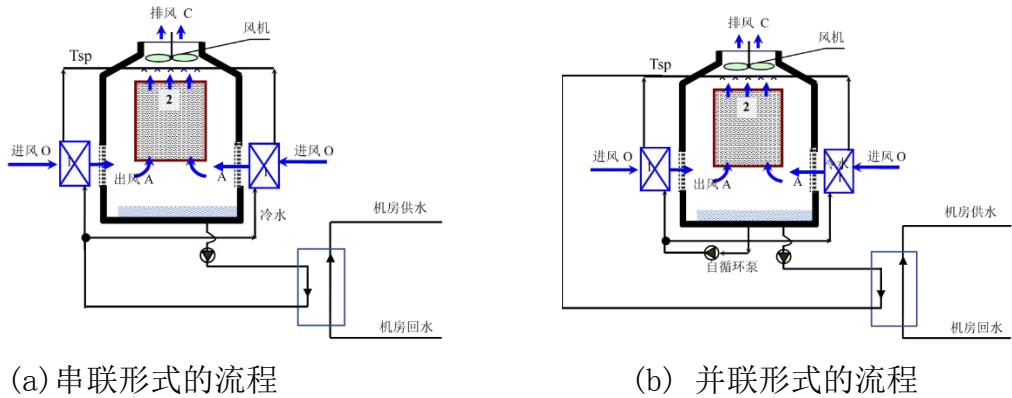


图 9. 利用间接蒸发冷水机流程制备冷水排走机房热量

而冬季的工况，以图 9(a) 的串联流程为例，此时冷却水的回水温度与机房回水温度接近，二者之间仅差一个板换两侧的换热端差，一般处在 14°C 之上，此时冷却水回水进入空气冷却器时，可以使得室外空气升温至 10°C 之上，此时空气再进入喷淋塔与水接触进行蒸发冷却过程时，不再有结冰现象。此时实际依靠的是机房的排热加热室外风，从而彻底避免结冰现象的发生。对于图 9(b) 所示的并联流程，其利用的是冷却水出水为表冷器进风升温，冷却水出水温度一般在 10°C 之上，也可以将空气加热至 10°C 附近，也避免了填料塔中喷淋水的结冰现象，但由于利用的是冷却水出水，其温度比冷却水回水温度低 $4\sim 5\text{K}$ ，因此串联流程冬季的防冻效果会由于并联流程。

图 10 给出了一个极端低温的室外空气状态下 (-40°C)，利用间接蒸发冷却塔的防冻效果，此时利用的是串联流程，冷却水回水 14°C ，由于室外空气温度极低，此时已经不再需要开启风机，依靠热压通风的风量已经满足排热需求。由图 10 所示，利用间接蒸发冷却塔可以在室外 -40°C 的情况下，利用冷却水回水通过表冷器将室外风加热到 13.8°C ，此时表冷器出风湿球 2.5°C ，填料塔喷淋水温 11.1°C ，冷水出水温度 10°C 。可见，依靠间接蒸发冷却塔可以较好得实现冷却塔防冻。

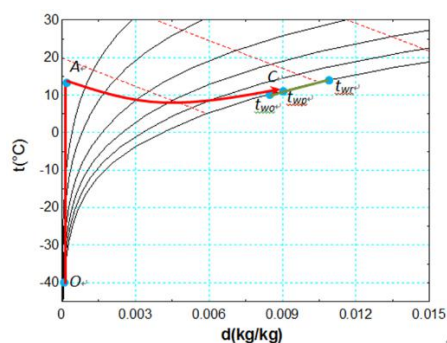


图 10. 间接蒸发冷却塔在-40℃下的排热过程举例

3.4 哈尔滨利用间接蒸发冷却塔实现数据中心冷却塔防冻的示范工程

为了验证间接蒸发冷却塔应用在数据中心冬季防结冰的效果，我们在哈尔滨某数据中心建立了示范工程。该示范工程的间接蒸发冷却塔设计水量 120t/h，间接蒸发冷却塔（5.4m*3.1m*6m），采用串联流程设计，利用冷却水回水通过表冷器对室外空气升温。为了控制冷却水出水温度稳定，为间接蒸发冷却塔的排风机设置变频器，根据室外温度控制风机变频器的频率，当室外温度低时，降低风机频率，一直到停止风机，当室外温度高时，适当增大风机频率，从而保证稳定温度的冷却水出水。

图 11 给出了该间接蒸发冷却塔的照片，图 12 给出了间接蒸发冷却塔风机和其变频器的设置。



图 11 用在哈尔滨示范工程的间接蒸发冷却塔照片

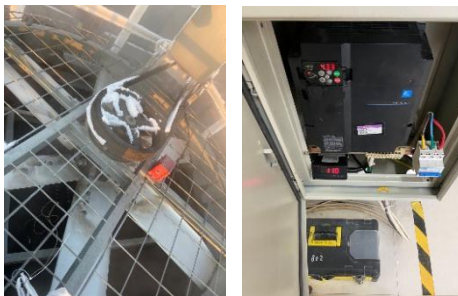


图 12 风机变频控制水温稳定

该间接蒸发冷却塔自 2019 年 12 月运行至今，实现了在哈尔滨-25℃的温度时的零结冰，彻底避免了常规冷却塔的结冰现象。图 13~图 15 展示了间接蒸发冷却塔内部参数的运行状态。由图 13 可见，在间接蒸发冷却塔的风机变频的控

制下，冷却水出水温度稳定在该机房要求的 10℃左右，而其表冷器出风和表冷器出水都稳定在了 11℃~12℃之间，安全可靠得实现了利用间接蒸发冷却塔为机房排热，且冷却塔不冻。由图 15 所示为测试得到了最低温度的工况，当室外温度低至零下 25℃时，间接蒸发冷却塔仍然可以可靠稳定运行，且无任何结冰现象。

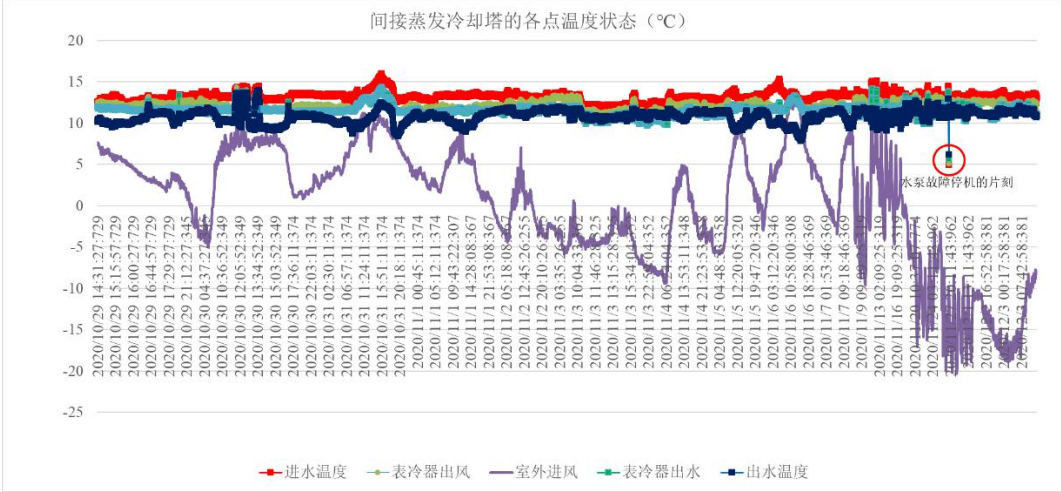


图 13. 2020. 11~2020. 12 间接蒸发冷却塔的运行状况

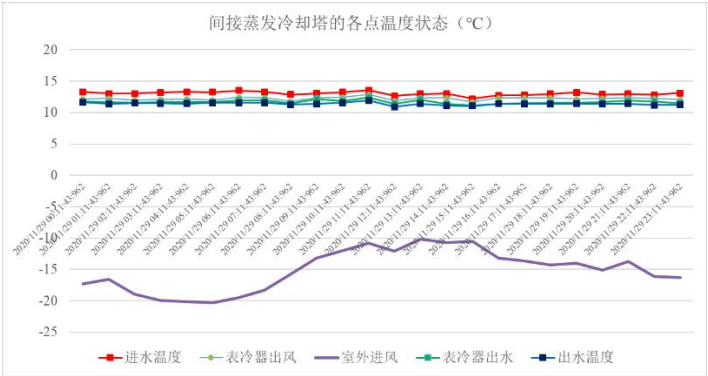


图 14. 2020 年 11 月底典型日的间接蒸发冷却塔运行状态



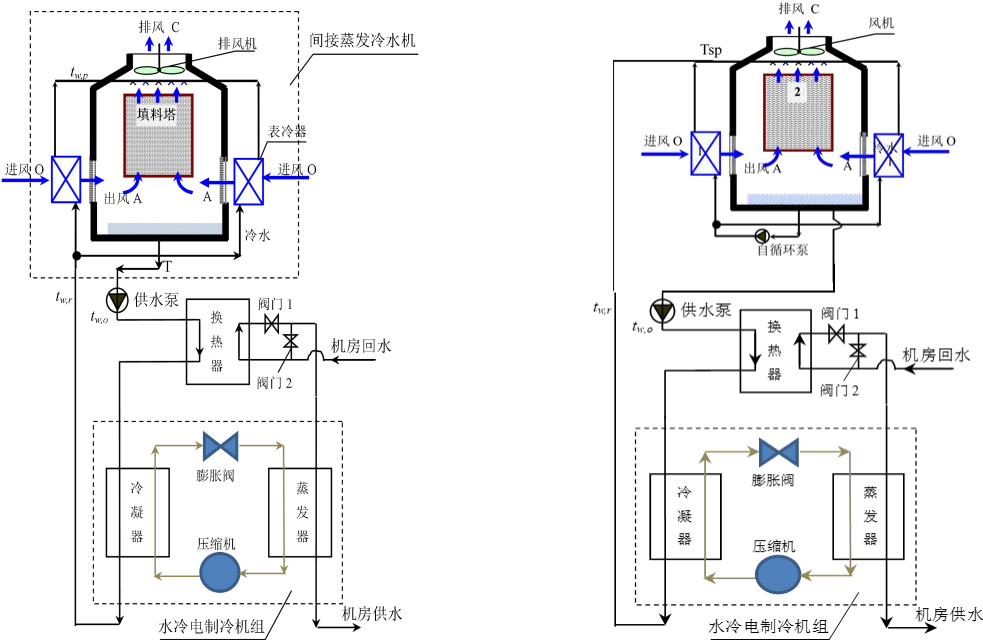
图 15. 2020 年 1 月典型日的间接蒸发冷却塔运行状态

该间接蒸发冷却塔的示范工程是一个改造工程，该工程原本也设计了间接蒸发冷却塔的系统，但是由于中标企业不懂间接蒸发冷却塔的防冻原理，表冷器设计成了纯叉流状态，表冷器内部水流速低于 0.2m/s，导致刚开始运行部分表冷器就出现了结冰冻管现象，使得该工程所设计的 27 台间接蒸发冷却塔仅能按照

常规冷却塔模式运行，结冰现象非常严重。而经过我们 2019 年的改造之后，将表冷器从纯叉流状态改成为准逆流状态，保证水管内的水流速，从而保证了表冷器内的水不冻，成功地实现了间接蒸发冷却塔本应具备的防冻功能。因此，间接蒸发冷却塔的防冻设计，不仅是依靠表冷器通过冷水回水加热进风使得填料塔的喷淋水过程不冻，也要对表冷器进行正确合理的设计，才能保证表冷器不冻，这样整个间接蒸发冷却塔才能彻底实现防冻。

4. 当蒸发冷却的水温不能满足要求时，间接蒸发冷却与机械制冷的结合

以上讨论了利用间接蒸发冷却实现数据中心全年自然冷却的方式，和利用间接蒸发冷却塔彻底避免冬季冷却塔的结冰。而当夏季间接蒸发冷却制备的冷水高于数据中心要求的冷冻水温时，此时间接蒸发冷却需要与及机械制冷相结合，为数据中心提供冷水。图 16 给出了间接蒸发冷水机组与机械制冷相结合的系统。



(a) 串联式间接蒸发冷水机组与电制冷结合 (b) 并联式间接蒸发冷水机组与电制冷结合

图 16. 间接蒸发冷却塔与机械制冷方式相结合的系统

由图 16(a) 所示，间接蒸发冷水机组制备的冷水首先经过换热器与机房回水进行换热，之后冷水出水进入电压缩制冷机的冷凝器带走冷凝器排热，之后冷水出水回到间接蒸发冷水机的表冷器与室外空气进行换热，表冷器的冷水出水最终回到间接蒸发冷水机组的填料塔顶部喷淋，与空气接触进行蒸发冷却过程最终制备出冷却水出水。图 16(b) 的系统流程与图 16(a) 的系统流程相似，不同的仅是图 16(b) 用的是并联式的间接蒸发冷水机组，表冷器中用来和空气换热的冷水来自于间接蒸发冷水机组自身制备冷水的一部分。

由图 16 所示的系统，当室外空气高温潮湿时，利用间接蒸发冷水机组制备出的冷却水出水温度高于机房冷冻水回水温度时，此时应该关闭阀门 1，开启阀门 2，使得冷却水不再和冷冻水之间换热，而是直接进入冷机的冷凝器为冷凝器

排热，此时间接蒸发冷水机组仅作为电制冷机组的冷却塔用，但和普通冷却塔不同的是，此时间接蒸发冷水机组制备出的冷却水其温度可低于室外湿球温度，从而可以降低电制冷机的冷凝温度，提高电制冷机的 COP，降低其电耗。当室外空气变得干燥时，利用间接蒸发冷水机组制备出的冷却水出水温度低于机房冷冻水回水温度但是高于机房冷冻水出水温度时，此时可以开启阀门 2，关闭阀门 1，由间接蒸发冷水机组和电制冷机组联合制冷，间接蒸发冷水机组协助承担冷冻水的部分降温任务，将冷冻水回水温度进行预冷，之后冷冻水再经过电制冷机的蒸发器制冷至要求的冷冻水供水温度，此时间接蒸发冷水机组即承担电制冷机的排热任务，又承担冷冻水的部分降温任务。进而，当室外空气继续变干时，利用间接蒸发冷水机组制备出的冷水温度低于冷冻水温度，且二者之差高于二者通过板换的最小换热端差时，此时利用间接蒸发冷水机组可以承担冷冻水的全部降温任务，开启阀门 2，关闭阀门 1，电制冷机可关闭，利用间接蒸发冷水机组实现数据中心冷冻水的自然冷却。

该系统的还有一个显著的优势，就是在上述三个模式切换时，仅需切换冷冻水侧的两个阀门，冷却水侧不切换，全年以一个模式运行，从而完全避免了死水管路，结合间接蒸发冷水机组的防冻特性，使得该系统全年、包括冬季在内都能安全可靠的运行。



图 17. 不同冷冻水设计温度下，不同模式的时间

图 17 给出了间接蒸发冷水机组（并联方式）与电制冷结合的系统在不同地区运行时各模式的时间长短，其中图中甘肃选择的的城市是兰州，云南地区选择的的城市是昆明，其中冬季模式代表的是利用间接蒸发冷水机组作为独立冷源的自然冷却模式，过渡季模式指的是间接蒸发冷水机组与电制冷联合制冷模式，夏季模式指的是利用电制冷机制冷、间接蒸发冷水机组作为电制冷机冷却塔排热的模式。由图 17 可以看出，冷冻水设计温度越高，自然冷却时间越长；冷冻水设计温度越高，机械制冷时间越长。当冷冻水供回水设计温度达到 22℃/28℃时，兰州和

昆明等地可以实现全年自然冷却，将大大降低数据中心冷却系统电耗。

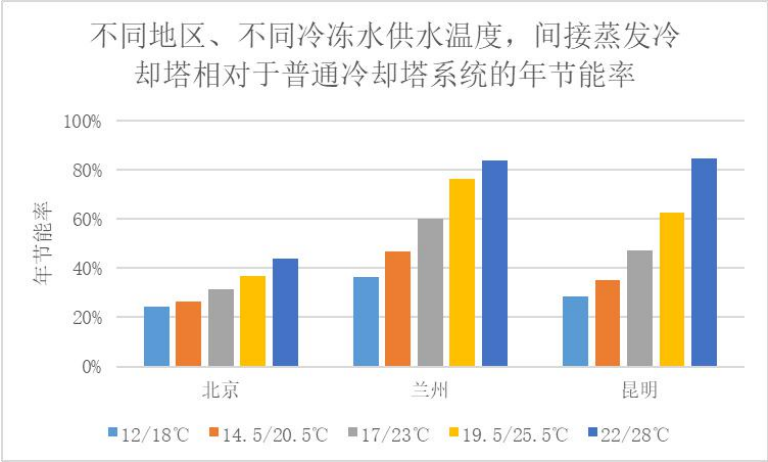


图 18. 间接蒸发冷却与机械制冷结合的方式与普通水冷系统相比的节能效果

图 18 给出了间接蒸发冷却与机械制冷结合的系统与普通水冷系统比的节能效果，该联合系统相比普通水冷系统，节能率在 20~80%之间变化，冷冻水设计温度越高，节能效果越明显。可见基于间接蒸发冷水机组的数据中心冷却系统有着较大的节能潜力和广阔的应用前景。