



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108375144 A

(43)申请公布日 2018.08.07

(21)申请号 201810038906.0

F24F 11/83(2018.01)

(22)申请日 2018.01.16

F24F 110/10(2018.01)

(30)优先权数据

15/411,878 2017.01.20 US

15/422,422 2017.02.01 US

(71)申请人 江森自控科技公司

地址 美国威斯康星州

(72)发明人 布拉德利·J·里德尔

格雷姆·威尔默特

马修·J·阿斯穆斯

(74)专利代理机构 上海脱颖律师事务所 31259

代理人 脱颖

(51)Int.Cl.

F24F 5/00(2006.01)

F24F 11/64(2018.01)

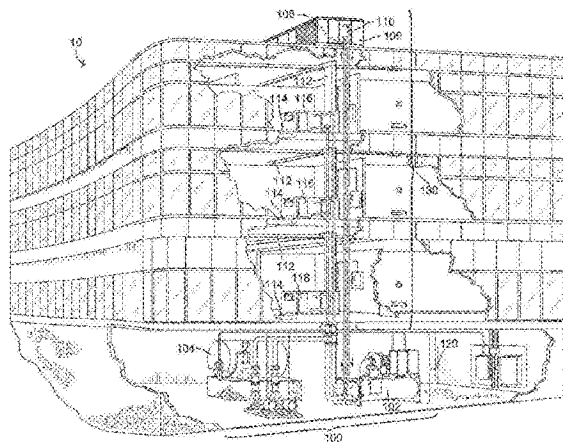
权利要求书3页 说明书52页 附图15页

(54)发明名称

具有预测性自然冷却控制和自然冷却优化的HVAC系统

(57)摘要

一种用于建筑物的暖通空调(HVAC)系统,包括:冷却器、与所述冷却器分离的热交换器、以及控制器。所述冷却器被配置用于当所述HVAC系统在机械冷却状态下运行时为所述建筑物中的冷却负载提供机械冷却。所述热交换器被配置用于当所述HVAC系统在自然冷却状态下运行时为所述建筑物中的所述冷却负载提供自然冷却。所述控制器被配置用于预测外部空气温度并且响应于确定在至少所述最小自然冷却时间期间所述所预测的外部空气温度将小于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述机械冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。



1. 一种用于建筑物的暖通空调 (HVAC) 系统, 所述 HVAC 系统包括:
 - 冷却器, 所述冷却器被配置用于当所述 HVAC 系统在机械冷却状态下运行时为所述建筑物中的冷却负载提供机械冷却;
 - 热交换器, 所述热交换器与所述冷却器分离并且被配置用于当所述 HVAC 系统在自然冷却状态下运行时为所述建筑物中的所述冷却负载提供自然冷却; 以及
 - 控制器, 所述控制器被配置成用于:
 - 预测多个未来时间步长的外部空气温度;
 - 判定在至少最小自然冷却时间期间所预测外部空气温度是否将小于自然冷却温度阈值; 并且
 - 响应于确定在至少所述最小自然冷却时间期间所述所预测外部空气温度将小于所述自然冷却温度阈值而使所述 HVAC 系统在所述机械冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。
2. 如权利要求 1 所述的 HVAC 系统, 其中, 所述控制器被配置用于:
 - 判定在至少最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度是否将大于所述自然冷却温度阈值; 并且
 - 响应于确定在至少所述最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度将大于所述自然冷却温度阈值而使所述 HVAC 系统在所述自然冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行。
3. 如权利要求 1 所述的 HVAC 系统, 其中, 所述控制器被配置用于:
 - 确认实际外部空气温度;
 - 判定所述实际外部空气温度是否高于所述自然冷却温度阈值; 并且
 - 响应于确定所述实际外部空气温度高于所述自然冷却温度阈值而使所述 HVAC 系统在所述自然冷却状态下运行转变成在非冷却状态下运行。
4. 如权利要求 3 所述的 HVAC 系统, 其中, 所述控制器被配置用于响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在预定时间量内降低到低于所述自然冷却温度阈值而使所述 HVAC 系统在所述自然冷却状态下运行转变成在所述非冷却状态下运行。
5. 如权利要求 1 所述的 HVAC 系统, 其中, 所述控制器被配置用于:
 - 确认实际外部空气温度;
 - 判定所述实际外部空气温度是否低于所述自然冷却温度阈值; 并且
 - 响应于确定所述实际外部空气温度低于所述自然冷却温度阈值而使所述 HVAC 系统在非冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。
6. 如权利要求 5 所述的 HVAC 系统, 其中, 所述控制器被配置用于响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在至少预定时间量期间保持高于所述自然冷却温度阈值而使所述 HVAC 系统在所述非冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行。
7. 如权利要求 1 所述的 HVAC 系统, 其中, 所述控制器被配置用于基于通过使所述 HVAC 系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述 HVAC 系统在所述机械冷却状态下运行所产生的估计成本节省来计算所述最小自然冷却时间。

8. 如权利要求1所述的HVAC系统,其中,所述控制器被配置用于通过以下方式计算所述最小自然冷却时间:

确认由于使所述HVAC系统转变到所述自然冷却状态所产生的成本;

估计通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的、作为所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行的时间量的函数的成本节省;以及

确定需要所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行以使所述成本节省大于或等于所产生成本的最小时间量。

9. 如权利要求8所述的HVAC系统,其中,所述控制器被配置用于通过以下方式估计所述成本节省:

确定通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的能量节省量;

确认针对所述未来时间步长中的每一个的单位能量成本,在所述未来时间步长期间,所述HVAC系统将在所述自然冷却状态下运行;以及

通过将所述能量节省量乘以所述单位能量成本来计算所述成本节省。

10. 如权利要求8所述的HVAC系统,其中,所产生的成本包括设备退化的经济成本以及由停止和重新启动所述冷却器所产生的电力成本增加中的至少一项。

11. 一种用于运行建筑物的暖通空调 (HVAC) 系统的方法,所述方法包括:

使所述HVAC系统在机械冷却状态下运行,在所述机械冷却状态下,冷却器用于为所述建筑物中的冷却负载提供机械冷却;

预测多个未来时间步长的外部空气温度;

判定在至少最小自然冷却时间期间所预测外部空气温度是否将小于自然冷却温度阈值;

响应于确定在至少所述最小自然冷却时间期间所述所预测外部空气温度将小于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述机械冷却状态下运行转变成在自然冷却状态下运行;以及

使所述HVAC系统在自然冷却状态下运行,在所述自然冷却状态下,与所述冷却器分离的热交换器用于为所述建筑物中的所述冷却负载提供自然冷却。

12. 如权利要求11所述的方法,进一步包括:

判定在至少最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度是否将大于所述自然冷却温度阈值;以及

响应于确定在至少所述最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度将大于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行。

13. 如权利要求11所述的方法,进一步包括:

确认实际外部空气温度;

判定所述实际外部空气温度是否高于所述自然冷却温度阈值;以及

响应于确定所述实际外部空气温度高于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在非冷却状态下运行。

14. 如权利要求13所述的方法,其中,响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在预定时间量内降低到低于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在所述非冷却状态下运行发生。

15. 如权利要求11所述的方法,进一步包括:

确认实际外部空气温度;

判定所述实际外部空气温度是否低于所述自然冷却温度阈值;以及

响应于确定所述实际外部空气温度低于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在非冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。

16. 如权利要求15所述的方法,其中,响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在至少预定时间量期间保持高于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述非冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行发生。

17. 如权利要求11所述的方法,进一步包括基于通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的估计成本节省来计算所述最小自然冷却时间。

18. 如权利要求11所述的方法,进一步包括通过以下方式计算所述最小自然冷却时间:

确认由于使所述HVAC系统转变到所述自然冷却状态所产生的成本;

估计通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的、作为所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行的时间量的函数的成本节省;以及

确定需要所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行以使所述成本节省大于或等于所产生成本的最小时间量。

19. 如权利要求18所述的方法,其中,估计所述成本节省包括:

确定通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使在所述机械冷却状态下运行所产生的能量节省量;

确认针对所述未来时间步长中的每一个的单位能量成本,在所述未来时间步长期间,所述HVAC系统将在所述自然冷却状态下运行;以及

通过将所述能量节省量乘以所述单位能量成本来计算所述成本节省。

20. 如权利要求18所述的方法,其中,所产生的成本包括设备退化的经济成本以及由停止和重新启动所述冷却器所产生的电力成本增加中的至少一项。

21. 一种HVAC系统,包括权利要求1-10中的任意一个技术特征或者技术特征的任意组合。

22. 一种方法,包括权利要求11-20中的任意一个技术特征或者技术特征的任意组合。

具有预测性自然冷却控制和自然冷却优化的HVAC系统

[0001] 相关专利申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2017年1月20日提交的第15/411,878号美国专利申请以及于2017年2月1日提交的第15/422,422号美国专利申请的权益和优先权。这两个专利申请均将其全部内容通过援引并入本文。

技术领域

[0003] 本披露总体上涉及用于建筑物的暖通空调 (HVAC) 系统。本披露更具体地涉及被配置用于在自然冷却状态和机械冷却状态下运行的HVAC系统以及被配置用于对用于向建筑物提供自然冷却的HVAC设备的运行进行优化的HVAC系统。

背景技术

[0004] 自然冷却是使用低温外部空气来向系统提供冷却而不需要使用冷却器的技术。在某些良好的天气状况下,自然冷却可以被用作对机械冷却(例如,蒸汽压缩冷却)的替代。例如,当外部空气温度高于自然冷却所需要的阈值温度时,冷却器通常用于为建筑物提供机械冷却(例如,通过冷却提供给建筑物的液体)。当外部空气温度下降到低于阈值时,提供机械冷却的冷却器可被解除激活,并且可以使用冷却塔而不是提供自然冷却。

[0005] 在传统自然冷却系统中,每当室外湿球空气温度低于自然冷却所需要的最低温度时,使用自然冷却。然而,传统方法没有考虑到同自然冷却与机械冷却之间的转变相关联的经济成本。例如,机械冷却状态与自然冷却状态之间的切换可能产生经济成本。将期望提供经济地使用对机械冷却状态与自然冷却状态之间的转变的最优控制的HVAC系统。

发明内容

[0006] 本披露的一种实施方式是一种用于建筑物的暖通空调 (HVAC) 系统。所述HVAC系统包括冷却器、与所述冷却器分离的热交换器以及控制器。所述冷却器被配置用于当所述HVAC系统在机械冷却状态下运行时为所述建筑物中的冷却负载提供机械冷却。所述热交换器被配置用于当所述HVAC系统在自然冷却状态下运行时为所述建筑物中的所述冷却负载提供自然冷却。所述控制器被配置用于:预测多个未来时间步长的外部空气温度;判定在至少最小自然冷却时间期间所预测外部空气温度是否将小于自然冷却温度阈值;并且响应于确定在至少所述最小自然冷却时间期间所述所预测外部空气温度将小于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述机械冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。在一些实施例中,所述外部空气温度是所述外部空气的湿球温度。

[0007] 在一些实施例中,所述控制器被配置用于:判定在至少最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度是否将大于所述自然冷却温度阈值;并且响应于确定在至少所述最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度将大于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行。

[0008] 在一些实施例中,所述控制器被配置用于:确认实际外部空气温度;判定所述实际

外部空气温度是否高于所述自然冷却温度阈值；并且响应于确定所述实际外部空气温度高于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在非冷却状态下运行。

[0009] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在预定时间量内降低到低于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在所述非冷却状态下运行。

[0010] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于：确认实际外部空气温度；判定所述实际外部空气温度是否低于所述自然冷却温度阈值；并且响应于确定所述实际外部空气温度低于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在非冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。

[0011] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在至少预定时间量期间保持高于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述非冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行。

[0012] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于基于通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的估计成本节省来计算所述最小自然冷却时间。

[0013] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于通过以下方式计算所述最小自然冷却时间：确认由于使所述HVAC系统转变到所述自然冷却状态所产生的成本；估计通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的、作为所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行的时间量的函数的成本节省；以及确定需要所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行以使所述成本节省大于或等于所产生成本的最小时间量。

[0014] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于通过以下方式估计所述成本节省：确定通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的能量节省量；确认针对所述未来时间步长中的每一个的单位能量成本，在所述未来时间步长期间，所述HVAC系统将在所述自然冷却状态下运行；以及通过将所述能量节省量乘以所述单位能量成本来计算所述成本节省。

[0015] 在一些实施例中，所产生的成本包括设备退化的经济成本以及由停止和重新启动所述冷却器所产生的电力成本增加中的至少一项。

[0016] 在一些实施例中，所述热交换器被配置用于将来自冷却液体电路的热量传递至冷却塔电路以便为冷却液体电路中的冷却液体提供冷却。

[0017] 在一些实施例中，所述HVAC系统包括冷却塔，所述冷却塔被配置用于除去来自所述冷却塔电路的热量以便为所述冷却塔电路中的冷却剂提供冷却。

[0018] 在一些实施例中，所述HVAC系统包括一个或多个泵，所述一个或多个泵被配置用于使所述冷却剂经由所述冷却塔电路在所述冷却塔与所述热交换器之间循环。

[0019] 在一些实施例中，所述控制器被配置用于：确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率、确定穿过所述冷却塔的空气的最优流速率并且运行所述一个或多个泵和所述冷却塔以便实现所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率以及穿过所述冷却

塔的所述空气的所述最优流速率。

[0020] 在一些实施例中,所述热交换器被配置用于以取决于所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率的热传递速率将来自所述冷却液体电路的所述热量传递至所述冷却塔电路。在一些实施例中,所述控制器被配置用于通过使所述热交换器中的所述热传递速率与所述冷却负载设定值之差最小化来确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率。

[0021] 本披露的另一种实施方式是一种用于运行建筑物的暖通空调 (HVAC) 系统的方法。所述方法包括:使所述HVAC系统在机械冷却状态下运行,在所述机械冷却状态下,冷却器用于为所述建筑物中的冷却负载提供机械冷却;预测多个未来时间步长的外部空气温度;判定在至少所述最小自然冷却时间期间所预测外部空气温度是否将小于自然冷却温度阈值;响应于确定在至少所述最小自然冷却时间期间所述所预测外部空气温度将小于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述机械冷却状态下运行转变成在自然冷却状态下运行;以及使所述HVAC系统在自然冷却状态下运行,在所述自然冷却状态下,与所述冷却器分离的热交换器用于为所述建筑物中的所述冷却负载提供自然冷却。在一些实施例中,所述外部空气温度是所述外部空气的湿球温度。

[0022] 在一些实施例中,所述方法包括:判定在至少最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度是否将大于所述自然冷却温度阈值;以及响应于确定在至少所述最小机械冷却时间期间所述所预测外部空气温度将大于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行。

[0023] 在一些实施例中,所述方法包括:确认实际外部空气温度;判定所述实际外部空气温度是否高于所述自然冷却温度阈值;以及响应于确定所述实际外部空气温度高于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在非冷却状态下运行。

[0024] 在一些实施例中,响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在预定时间量内降低到低于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述自然冷却状态下运行转变成在所述非冷却状态下运行发生。

[0025] 在一些实施例中,所述方法包括:确认实际外部空气温度;判定所述实际外部空气温度是否低于所述自然冷却温度阈值;以及响应于确定所述实际外部空气温度低于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在非冷却状态下运行转变成在所述自然冷却状态下运行。

[0026] 在一些实施例中,响应于确定所述实际外部空气温度当前高于所述自然冷却温度阈值并且被预测将在至少预定时间量期间保持高于所述自然冷却温度阈值而使所述HVAC系统从在所述非冷却状态下运行转变成在所述机械冷却状态下运行发生。

[0027] 在一些实施例中,所述方法包括基于通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的估计成本节省来计算所述最小自然冷却时间。

[0028] 在一些实施例中,所述方法包括通过以下方式计算所述最小自然冷却时间:确认由于使所述HVAC系统转变到所述自然冷却状态所产生的成本;估计通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的、作

为所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行的时间量的函数的成本节省;以及确定需要所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行以使所述成本节省大于或等于所产生成本的最小时间量。

[0029] 在一些实施例中,估计所述成本节省包括:确定通过使所述HVAC系统在所述自然冷却状态下运行相对于使所述HVAC系统在所述机械冷却状态下运行所产生的能量节省量;确认针对所述未来时间步长中的每一个的单位能量成本,在所述未来时间步长期间,所述HVAC系统将在所述自然冷却状态下运行;以及通过将所述能量节省量乘以所述单位能量成本来计算所述成本节省。

[0030] 在一些实施例中,所产生的成本包括设备退化的经济成本以及由停止和重新启动所述冷却器所产生的电力成本增加中的至少一项。

[0031] 本披露的另一种实施方式是一种用于建筑物的暖通空调(HVAC)系统。所述HVAC系统包括:热交换器,所述热交换器被配置用于将来自冷却液体电路的热量传递至冷却塔电路以便为冷却液体电路中的冷却液体提供冷却;冷却塔,所述冷却塔被配置用于除去来自所述冷却塔电路的热量以便为所述冷却塔电路中的冷却剂提供冷却;一个或多个泵,所述一个或多个泵被配置用于使所述冷却剂经由所述冷却塔电路在所述冷却塔与所述热交换器之间循环;以及自然冷却控制器。所述控制器被配置用于:确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率、确定穿过所述冷却塔的空气的最优流速率并且运行所述一个或多个泵和所述冷却塔以便实现所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率以及穿过所述冷却塔的空气的最优流速率。

[0032] 在一些实施例中,所述热交换器被配置用于以取决于所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率的热传递速率将来自所述冷却液体电路的热量传递至所述冷却塔电路。在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过使所述热交换器中的所述热传递速率与所述冷却负载设定值之差最小化来确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率。

[0033] 在一些实施例中,所述冷却塔被配置用于以取决于穿过所述冷却塔的空气的最优流速率的热传递速率除去来自所述冷却塔电路的热量。在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过使所述冷却塔中的所述热传递速率与所述热交换器的热传递速率之差最小化来确定穿过所述冷却塔的空气的最优流速率。

[0034] 在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于:估计所述一个或多个泵的实现所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率所需要的功耗;估计所述冷却塔的实现穿过所述冷却塔的空气的最优流速率所需要的功耗;并且基于所述一个或多个泵的最优流速率和所述冷却塔的最优流速率来估计总功耗。

[0035] 在一些实施例中,所述HVAC系统包括高级优化器,所述高级优化器被配置用于向所述自然冷却控制器提供冷却负载设定值。所述自然冷却控制器可以被配置用于基于所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率以及穿过所述冷却塔的空气的最优流速率来估计实现所述冷却负载设定值所需的最小功耗并且将所估计的最小功耗提供给所述高级优化器。

[0036] 在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于使用包括逐次代换、牛顿-拉普森法和正割法中的至少一项的迭代数值技术来确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最

优流速率。

[0037] 在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过迭代地调整所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率直到所述热交换器中的热传递速率等于所述冷却液体电路从所述建筑物吸收热量的速率来确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率。

[0038] 在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过迭代地调整穿过所述冷却塔的所述空气的所述流速率直到所述冷却塔中的热传递速率等于所述热交换器中的热传递速率从而来确定穿过所述冷却塔的所述空气的最优流速率。

[0039] 在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过确认第一方程(所述第一方程将所述热交换器的有效性定义为所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率的函数)并且确认第二方程(所述第二方程将所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率定义为所述热交换器的所述有效性的函数)来确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率。所述自然冷却控制器可以:将所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率的值递归地代入所述第一方程;评估所述第一方程以便确定所述有效性的结果值;并且将所述有效性的结果值代入所述第二方程直到所述第二方程平衡。

[0040] 本披露的另一种实施方式是一种用于向建筑物提供自然冷却的方法。所述方法包括使用一个或多个泵来使冷却剂在热交换器与冷却塔之间循环。所述冷却剂吸收所述热交换器中的热量并且排出所述冷却塔中的热量。所述方法包括:确定冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率以便实现冷却负载设定值、确定穿过所述冷却塔的空气的最优流速率以便平衡所述冷却塔电路中的热传递并且运行所述一个或多个泵和所述冷却塔以便实现所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率以及穿过所述冷却塔的所述空气的所述最优流速率。

[0041] 在一些实施例中,所述冷却剂以取决于所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率的热传递速率吸收所述热交换器中的热量。在一些实施例中,确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率包括使所述热交换器中的所述热传递速率与所述冷却负载设定值之差最小化。

[0042] 在一些实施例中,所述冷却剂以取决于穿过所述冷却塔的所述空气的所述流速率的热传递速率排出所述冷却塔中的热量。在一些实施例中,确定穿过所述冷却塔的所述空气的所述最优流速率包括通过使所述冷却塔中的所述热传递速率与所述热交换器的热传递速率之差最小化。

[0043] 在一些实施例中,所述方法包括:估计所述一个或多个泵的实现所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率所需要的功耗;估计所述冷却塔的实现穿过所述冷却塔的空气的所述最优流速率所需要的功耗;以及基于所述一个或多个泵的所述功耗和所述冷却塔的所述功耗来估计总功耗。

[0044] 在一些实施例中,所述方法包括:从高级优化器接收冷却负载设定值;基于所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率以及穿过所述冷却塔的空气的所述最优流速率来估计实现所述冷却负载设定值所需的最小功耗;以及将所估计的最小功耗提供给所述高级优化器。

[0045] 在一些实施例中,确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率包括使用包括逐次代换、牛顿-拉普森法和正割法中的至少一项的迭代数值技术。

[0046] 在一些实施例中,确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率包括迭代地调整所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率直到所述热交换器中的热传递速率等于所述建筑物的冷却负载设定值。

[0047] 在一些实施例中,确定穿过所述冷却塔的所述空气的所述最优流速率包括迭代地调整穿过所述冷却塔的所述空气的所述流速率直到所述冷却塔中的热传递速率等于所述热交换器中的热传递速率。

[0048] 本披露的另一种实施方式是一种用于建筑物的暖通空调 (HVAC) 系统。所述 HVAC 系统包括:冷却塔,所述冷却塔被配置用于除去来自冷却塔电路中的冷却剂的热量;一个或多个泵,所述一个或多个泵被配置用于使所述冷却剂经由所述冷却塔电路在所述冷却塔与冷却负载之间循环;以及自然冷却控制器。所述自然冷却控制器被配置用于:确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的最优流速率、确定穿过所述冷却塔的空气的最优流速率并且运行所述一个或多个泵和所述冷却塔以便实现所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率以及穿过所述冷却塔的所述空气的所述最优流速率。

[0049] 在一些实施例中,所述冷却塔电路被配置用于以取决于所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述流速率的速率从所述冷却负载吸收热量。在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过使所述冷却电路从所述冷却负载吸收热量的所述速率与所述冷却负载设定值之差最小化来确定所述冷却塔电路中的所述冷却剂的所述最优流速率。

[0050] 在一些实施例中,所述冷却塔被配置用于以取决于穿过所述冷却塔的所述空气的所述流速率的热传递速率除去来自所述冷却塔电路的所述热量。在一些实施例中,所述自然冷却控制器被配置用于通过使所述冷却塔中的所述热传递速率与所述冷却塔电路从所述冷却负载吸收热量的速率之差最小化来确定穿过所述冷却塔的所述空气的所述最优流速率。

[0051] 本领域的技术人员将理解,所述概述仅是说明性的并且不旨在以任何方式进行限制。在此描述的如仅由权利要求书所限定的装置和/或过程的其他方面、创造性特征、以及优点将在本文中陈述并结合附图进行的详细说明中变得清楚。

附图说明

[0052] 通过以下结合附图的详细描述将更充分地理解一些实施例,在附图中,相同的参考标号代表相同的元素,在附图中:

[0053] 图1是根据示例性实施例的配备有暖通空调 (HVAC) 系统的建筑物的图示;

[0054] 图2是根据示例性实施例的可以用于与图1的 HVAC 系统结合的水侧系统的图示;

[0055] 图3是根据示例性实施例的可以用于与图1的 HVAC 系统结合的空气侧系统的图示;

[0056] 图4是根据示例性实施例的可以用于监测和控制图1的建筑物和 HVAC 系统的建筑物管理系统的框图;

[0057] 图5是根据示例性实施例的可以用于监测和控制图1的建筑物和 HVAC 系统的另一个建筑物管理系统的框图;

[0058] 图6是根据示例性实施例的被配置用于在机械冷却状态和自然冷却状态下运行的 HVAC 系统的框图;

[0059] 图7是框图,展示了根据示例性实施例的图6的 HVAC 系统在机械冷却状态下的运

行;

[0060] 图8是框图,展示了根据示例性实施例的图6的HVAC系统在自然冷却状态下的运行;

[0061] 图9是框图,更加详细地展示了根据示例性实施例的图6的HVAC系统的一部分;

[0062] 图10是状态转变图,展示了根据示例性实施例的由图6的HVAC系统使用的状态转变和转变条件;并且

[0063] 图11是根据示例性实施例的用于在机械冷却状态和自然冷却状态下运行图6的HVAC系统的过程的流程图。

[0064] 图12是根据示例性实施例的具有跨多个子设施分配热能负载的中央设施控制器的中央设施系统的框图。

[0065] 图13是根据示例性实施例的自然冷却系统的框图,所述自然冷却系统包括除去来自建筑物的热量的冷水电路以及使用自然冷却和冷却塔来除去来自冷水电路的热量的冷却塔电路。

[0066] 图14是根据示例性实施例的可以用于监测和控制图13的自然冷却系统的自然冷却控制器的框图。

[0067] 图15是根据示例性实施例的冷却塔热传递模型的框图,所述冷却塔热传递模型可以由图14的自然冷却控制器用来确定冷却塔中的最优空气流速率。

[0068] 图16是根据示例性实施例的目标函数的曲线图,所述目标函数可以被图14的自然冷却控制器优化以便确定冷却塔电路中的最优水流速率。

[0069] 图17是根据示例性实施例的用于优化自然冷却系统的性能的过程的流程图。

具体实施方式

[0070] 概述

[0071] 总体上参照附图,根据示例性实施例,示出了具有预测性自然冷却控制及其部件的暖通空调(HVAC)系统。HVAC系统可以在机械冷却状态和自然冷却状态两者下运行。HVAC系统可以在机械冷却状态与自然冷却状态之间转变以便为冷却负载提供经济上最优的冷却。在一些实施例中,HVAC系统包括控制器,所述控制器可以评估状态转变条件并且基于评估结果在运行状态之间转变。

[0072] 在传统自然冷却系统中,每当室外湿球空气温度低于自然冷却所需要的最低温度时,通常使用自然冷却。然而,传统方法没有考虑到与运行状态之间的转变相关联的经济成本。例如,机械冷却状态与自然冷却状态之间的切换可能产生经济成本。经济成本可能由冷却器启动时增大的电消耗、由切换冷却器开/关产生的增大的设备退化、启动期间低效率的冷却器运行、运行阀门所需要的电力和/或由于状态转变而产生的任何其他经济成本产生。

[0073] 为了使自然冷却在经济上可行,由自然冷却获得的能量和成本节省应当足够来克服由于机械冷却状态与自然冷却状态之间的转变而产生的成本。有利地,本文中所描述的HVAC系统可以通过权衡由自然冷却获得的成本节省与执行状态转变的经济成本来判定对自然冷却的使用是否将在经济上可行。例如,仅当自然冷却持续最小量时间时,自然冷却可以在经济上可行。控制器可以预测对自然冷却的使用将持续多久以及将通过在所预测的自然冷却时段期间使用自然冷却实现的能量节省。控制器可以权衡所预测的能量节省与执行

状态转变的成本以便判定是否转变到自然冷却状态。

[0074] 在一些实施例中,控制器被配置用于预测到未来的多个时间步长中的每一个的外部空气温度 \hat{T}_{OA} (例如,所预测的外部空气湿球温度)。控制器可以使用来自传感器的测量结果和/或来自天气服务的天气预报来预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 。当在机械冷却状态下运行时,控制器可以判定在未来的预定时间量内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 是否将低于自然冷却温度阈值 T_{FC} 。控制器可以响应于确定在预定时间量内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 将保持低于自然冷却温度阈值 T_{FC} 而从机械冷却状态转变到自然冷却状态。

[0075] 在一些实施例中,自然冷却温度阈值 T_{FC} 是自然冷却是可能的或经济上可行的最大室外空气湿球温度。预定时间量可以是自然冷却必须持续以便证明转变到自然冷却状态的经济成本是合理的最小时间量 $t_{\text{最小},FC}$ 。如果所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 在预定时间量 $t_{\text{最小},FC}$ 内将不低于温度阈值 T_{FC} ,则控制器可以保持在机械冷却状态,即使当前外部空气温度 T_{OA} 低于温度阈值 T_{FC} 。这防止HVAC系统在花费于自然冷却状态的时间量以及相应能量节省不足以克服由于状态转变而产生的成本时转变到自然冷却状态。

[0076] 在一些实施例中,当在自然冷却状态下运行时,自然冷却控制器用于优化HVAC系统的性能。特别地,自然冷却控制器可以优化自然冷却系统(例如,HVAC系统的自然冷却子系统)的性能,所述自然冷却系统使用自然冷却来满足建筑物的冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 。自然冷却系统可以包括以速率 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 除去来自建筑物的热量的冷水电路以及以速率 \dot{Q}_{HX} 经由热交换器除去来自冷水电路的热量的冷却塔电路。冷却塔电路可以包括冷却塔、热交换器以及被配置用于使热交换器与冷却塔之间的水循环的一个或多个塔水泵。冷却塔可以包括一个或多个风扇并且可以被配置用于以速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 除去来自冷却塔电路中的水的热量。

[0077] 自然冷却控制器可以执行多阶段优化过程来估计HVAC装置在自然冷却系统中的功耗。在优化过程的第一阶段中,自然冷却控制器可以确定冷却塔电路中的水的最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 。最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 可以被定义为导致热交换器以速率 $\dot{Q}_{HX} = \dot{Q}_{\text{负载}}$ 将来自冷水电路的热量传递至冷却塔电路的流速率。在优化过程的第二阶段中,自然冷却控制器可以确定穿过冷却塔的最优气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 以便满足能量平衡方程 $\dot{Q}_{HX} - \dot{Q}_{\text{塔}} = 0$ 。一旦已经确定了最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 和 $\dot{V}_{\text{空气}}$,自然冷却控制器就可以计算跨自然冷却系统的各个部件的压降。自然冷却控制器可以使用压降信息来计算由塔水泵和冷却塔风扇消耗的电力以便满足冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 。以下详细描述了HVAC系统的附加特征和优点。

[0078] 建筑物HVAC系统和建筑物管理系统

[0079] 现在参照图1至图5,根据一些实施例,示出了可以在其中实施本披露的系统和方法的若干建筑物管理系统(BMS)和HVAC系统。简要概述,图1示出了配备有HVAC系统100的建筑物10。图2是可以用于服务建筑物10的水侧系统200的框图。图3是可以用于服务建筑物10的空气侧系统300的框图。图4是可以用于监测和控制建筑物10的BMS的框图。图5是可以用于监测和控制建筑物10的另一个BMS的框图。

[0080] 建筑物和HVAC系统

[0081] 具体地参照图1,示出了建筑物10的透视图。建筑物10由BMS服务。BMS通常是被配

置用于对建筑物或建筑物区域之中或周围的设备进行控制、监测和管理的装置系统。例如，BMS可以包括HVAC系统、安全系统、照明系统，火情报警系统、能够管理建筑物功能或装置的任何其他系统或其任何组合。

[0082] 服务于建筑物10的BMS包括HVAC系统100。HVAC系统100可以包括被配置用于为建筑物10提供加热、冷却、通风或其他服务的多个HVAC装置(例如，加热器、冷却器、空气处理单元、泵、风扇、热能储存设备等)。例如，HVAC系统100被示出为包括水侧系统120和空气侧系统130。水侧系统120可以向空气侧系统130的空气处理单元提供加热的或冷却的液体。空气侧系统130可以使用加热的或冷却的液体来加热或冷却提供给建筑物10的气流。参照图2和图3更加详细地描述了可以在HVAC系统100中使用的示例性水侧系统和空气侧系统。

[0083] HVAC系统100被示出为包括冷却器102、锅炉104和屋顶空气处理单元(AHU) 106。水侧系统120可以使用锅炉104和冷却器102来加热或冷却工作液体(例如，水、乙二醇等)并且可以使所述工作液体循环至AHU 106。在各实施例中，水侧系统120的HVAC装置可以位于建筑物10内或周围(如图1中所示出的)或位于非现场位置(如中央设施(例如，制冷设施、蒸汽设施、热力设施等))。可以在锅炉104中加热或在冷却器102中冷却工作液体，这取决于建筑物10中是需要加热还是冷却。锅炉104可以例如通过燃烧易燃材料(例如，天然气)或使用电加热元件来向循环的液体添加热量。冷却器102可以使循环的液体与热交换器(例如，蒸发器)中的另一种液体(例如，制冷剂)成热交换关系以从循环的液体中吸收热量。可以经由管路108将来自冷却器102和/或锅炉104的工作液体输送到AHU 106。

[0084] 在一些实施例中，HVAC系统100使用自然冷却来冷却工作液体。例如，HVAC系统100可以包括一个或多个冷却塔或将来自工作液体的热量传递至外部空气的热交换器。当外部空气的温度低于阈值温度时，自然冷却可以被用作对经由冷却器102的机械冷却的替代或补充。HVAC系统200可以基于外部空气的当前温度和/或外部空气的所预测将来温度来在自然冷却与机械冷却之间切换。参照图6更加详细地描述了可以在HVAC系统100中使用的自然冷却系统的示例。

[0085] AHU 106可以使工作液体与穿过AHU 106的气流成热交换关系(例如，经由一级或多级冷却盘管和/或加热盘管)。气流可以是例如外部空气、来自建筑物10内的回流空气或两者的组合。AHU 106可以在气流与工作液体之间传递热量，从而为气流提供加热或冷却。例如，AHU 106可以包括被配置用于使气流通过或穿过包含工作液体的热交换器的一个或多个风扇或鼓风机。工作液体然后可以经由管路110返回至冷却器102或锅炉104。

[0086] 空气侧系统130可以经由空气供应管道112将由AHU 106供应的气流(即，供应气流)递送至建筑物10并且可以经由空气回流管道114向AHU 106提供来自建筑物10的回流空气。在一些实施例中，空气侧系统130包括多个变风量(VAV)单元116。例如，空气侧系统130被示出为包括建筑物10的每一个楼层或区域上的独立VAV单元116。VAV单元116可以包括气闸或可以被运行以控制提供给建筑物10的单独区域的供应气流的量的其他流量控制元件。在其他实施例中，空气侧系统130将供应气流递送至建筑物10的一个或多个区域中(例如，经由供应管道112)，而不使用中间VAV单元116或其他流量控制元件。AHU 106可以包括被配置用于测量供应气流的属性的各种传感器(例如，温度传感器、压力传感器等)。AHU 106可以从位于AHU 106内和/或建筑物区域内的传感器接收输入并且可以调整穿过AHU 106的供应气流的流速、温度或其他属性以实现建筑物区域的设定值条件。

[0087] 水侧系统

[0088] 现在参照图2,根据一些实施例,示出了水侧系统200的框图。在各实施例中,水侧系统200可以在HVAC系统100中补充或替代水侧系统120,或者可以与HVAC系统100分开来实施。当在HVAC系统100中实施时,水侧系统200可以包括HVAC系统100中HVAC装置的子集(例如,锅炉104、冷却器102、泵、阀等)并且可以运行用于向AHU 106提供加热的或冷却的液体。水侧系统200的HVAC装置可以位于建筑物10内(例如,作为水侧系统120的部件)或位于非现场位置(如中央设施)。

[0089] 在图2中,水侧系统200被示出为具有多个子设施202-212的中央设施。子设施202-212被示出为包括:加热器子设施202、热回收冷却器子设施204、冷却器子设施206、冷却塔子设施208、高温热能储存(TES)子设施210和低温热能储存(TES)子设施212。子设施202-212消耗来自公共设施的资源(例如,水、天然气、电力等)以服务建筑物或校园的热能负载(例如,热水、冷水、加热、冷却等)。例如,加热器子设施202可以被配置用于在热水回路214中加热水,所述热水回路使热水在加热器子设施202与建筑物10之间循环。冷却器子设施206可以被配置用于在冷水回路216中冷却水,所述冷水回路使冷水在冷却器子设施206与建筑物10之间循环。热回收冷却器子设施204可以被配置用于将来自冷水回路216的热量传递到热水回路214以便提供对热水的附加加热和对冷水的附加冷却。冷凝水回路218可以从冷却器子设施206中的冷水吸收热量并且在冷却塔子设施208中放出所述吸收的热量或将吸收到的热量传递至热水回路214。高温TES子设施210和低温TES子设施212可以分别储存高温热能和低温热能,以供后续使用。

[0090] 热水回路214和冷水回路216可以将加热的和/或冷却的水递送至位于建筑物10的屋顶上的空气处理器(例如,AHU 106)或建筑物10的单独层或区域(例如,VAV单元116)。空气处理器推送空气经过热交换器(例如,加热盘管或冷却盘管),水流过所述热交换器以提供对空气的加热或冷却。可以将加热或冷却的空气递送至建筑物10的单独区域以服务于建筑物10的热能负载。水然后返回子设施202-212以接收进一步加热或冷却。

[0091] 尽管子设施202-212被示出或描述为加热和冷却水以便循环至建筑物,但是应当理解的是,替代或除了水之外可以使用任何其他类型的工作液体(例如,乙二醇、CO₂等)以服务于热能负载。在其他实施例中,子设施202-212可以直接向建筑物或校园提供加热和/或冷却,而不需要中间热传递液体。对水侧系统200的这些和其他变体在本披露的教导内。

[0092] 子设施202-212中的每个子设施可以包括被配置用于促进子设施的功能的各种设备。例如,加热器子设施202被示出为包括被配置用于为热水回路214中的热水添加热量的多个加热元件220(例如,锅炉、电加热器等)。加热器子设施202还被示出为包括若干泵222和224,所述泵被配置用于使热水回路214中的热水循环并控制穿过单独加热元件220的热水的流速。冷却器子设施206被示出为包括被配置用于除去来自冷水回路216中的冷水的热量的多个冷却器232。冷却器子设施206还被示出为包括若干泵234和236,所述泵被配置用于使冷水回路216中的冷水循环并控制穿过单独冷却器232的冷水的流速。

[0093] 热回收冷却器子设施204被示出为包括被配置用于将来自冷水回路216的热量传递至热水回路214的多个热回收热交换器226(例如,制冷电路)。热回收冷却器子设施204还被示出为包括若干泵228和230,所述泵被配置用于使穿过热回收热交换器226的热水和/或冷水循环并控制穿过单独热回收热交换器226的水的流速。冷却塔子设施208被示出为包括

被配置用于除去来自冷凝水回路218中的冷凝水的热量的多个冷却塔238。冷却塔子设施208还被示出为包括若干泵240,所述泵被配置用于使冷凝水回路218中的冷凝水循环并控制穿过单独冷却塔238的冷凝水的流速。

[0094] 在一些实施例中,水侧系统200使用自然冷却来冷却冷水回路216中的水。例如,冷水回路216中从建筑物返回的水可以被递送至冷却塔子设施208并且穿过冷却塔238。冷却塔238可以除去来自冷水回路216中的水的热量(例如,通过将热量传递至外部空气)以便向冷水回路216中的水提供自然冷却。在一些实施例中,水侧系统100基于外部空气的当前温度和/或外部空气的所预测将来温度来在具有冷却塔子设施208的自然冷却与具有冷却器子设施206的机械冷却之间切换。参照图6更加详细地描述了可以在水侧系统200中使用的自然冷却系统的示例。

[0095] 高温TES子设施210被示出为包括被配置用于储存热水以供稍后使用的高温TES罐242。高温TES子设施210还可以包括被配置用于控制流入或流出高温TES罐242的热水的流速的一个或多个泵或阀。低温TES子设施212被示出为包括被配置用于储存冷水以供稍后使用的低温TES罐244。低温TES子设施212还可以包括被配置用于控制流入或流出低温TES罐244的冷水的流速的一个或多个泵或阀。

[0096] 在一些实施例中,水侧系统200中的一个或多个泵(例如,泵222、224、228、230、234、236和/或240)或水侧系统200中的管道包括与其相关联的隔离阀。隔离阀可以与泵集成或定位在泵的上游或下游以控制水侧系统200中的液体流动。在各实施例中,水侧系统200可以基于水侧系统200的特定配置和水侧系统200所服务的负载的类型而包括更多、更少或不同类型的装置和/或子设施。

[0097] 空气侧系统

[0098] 现在参照图3,根据一些实施例,示出了空气侧系统300的框图。在各实施例中,空气侧系统300可以补充或替代HVAC系统100中的空气侧系统130或者可以与HVAC系统100分开来实施。当在HVAC系统100中实施时,空气侧系统300可以包括HVAC系统100中的HVAC装置子集(例如,AHU 106、VAV单元116、管道112至114、风扇、气闸等)并且可以位于建筑物10中或周围。空气侧系统300可以运行以使用由水侧系统200提供的加热的或冷却的液体来加热或冷却提供给建筑物10的气流。

[0099] 在图3中,空气侧系统300被示出为包括节能装置类型的空气处理单元(AHU)302。节能装置类型的AHU改变空气处理单元用于加热或冷却的外部空气和回流空气的量。例如,AHU 302可以经由回流空气管道308从建筑物区域306接收回流空气304并且可以经由供应空气管道312将供应空气310递送至建筑物区域306。在一些实施例中,AHU 302是位于建筑物10的屋顶上(例如,图1中所示出的AHU 106)或者以其他方式被定位用于接收回流空气304和外部空气314两者的屋顶单元。AHU 302可以被配置用于运行排气闸316、混合气闸318和外部空气闸320以便控制组合形成供应空气310的外部空气314和回流空气304的量。未通过混合气闸318的任何回流空气304可以通过排气闸316从AHU 302排出为废气322。

[0100] 气闸316至320中的每一个可以由致动器运行。例如,排气闸316可以由致动器324运行,混合气闸318可以由致动器326运行,并且外部空气闸320可以由致动器328运行。致动器324至328可以经由通信链路332与AHU控制器330通信。致动器324至328可以从AHU控制器330接收控制信号并且可以向AHU控制器330提供反馈信号。反馈信号可以包括例如对当前

致动器或气闸位置的指示、致动器施加的转矩或力的量、诊断信息(例如,由致动器324至328执行的诊断测试的结果)、状态信息、调试信息、配置设置、校准数据和/或可以由致动器324至328收集、储存或使用的其他类型的信息或数据。AHU控制器330可以是被配置用于使用一个或多个控制算法(例如,基于状态的算法、极值搜索控制(ESC)算法、比例积分(PI)控制算法、比例-积分-微分(PID)控制算法、模型预测控制(MPC)算法、反馈控制算法等)来控制致动器324至328的节能装置控制器。

[0101] 仍然参照图3,AHU 302被示出为包括冷却盘管334、加热盘管336和位于供应空气管道312内的风扇338。风扇338可以被配置用于推动供应空气310通过冷却盘管334和/或加热盘管336并且向建筑物区域306提供供应空气310。AHU控制器330可以经由通信链路340与风扇338通信以便控制供应空气310的流速。在一些实施例中,AHU控制器330通过调节风扇338的速度来控制施加到供应空气310的加热量或冷却量。

[0102] 冷却盘管334可以经由管路342从水侧系统200(例如,从冷水回路216)接收冷却的液体并且可以经由管路344将冷却的液体返回至水侧系统200。可以沿着管路342或管路344定位阀门346以便控制通过冷却盘管334的冷却的液体的流速。在一些实施例中,冷却盘管334包括可以被独立地激活和取消激活(例如,由AHU控制器330、由BMS控制器366等)以调节施加到供应空气310的冷却量的多级冷却盘管。

[0103] 加热盘管336可以经由管路348从水侧系统200(例如,从热水回路214)接收加热的液体并且可以经由管路350将加热的液体返回至水侧系统200。可以沿着管路348或管路350定位阀门352以便控制通过加热盘管336的加热的液体的流速。在一些实施例中,加热盘管336包括可以被独立地激活和取消激活(例如,由AHU控制器330、由BMS控制器366等)以调节施加到供应空气310的加热量的多级加热盘管。

[0104] 阀门346和352中的每一个可以由致动器控制。例如,阀门346可以由致动器354控制,并且阀门352可以由致动器356控制。致动器354至356可以经由通信链路358至360与AHU控制器330通信。致动器354至356可以从AHU控制器330接收控制信号并且可以向控制器330提供反馈信号。在一些实施例中,AHU控制器330从定位在供应空气管道312(例如,冷却盘管334和/或加热盘管336的下游)中的温度传感器362接收供应空气温度的测量结果。AHU控制器330还可以从位于建筑物区域306中的温度传感器364接收建筑物区域306的温度测量结果。

[0105] 在一些实施例中,AHU控制器330经由致动器354至356运行阀门346至352以调节提供给供应空气310的加热量或冷却量(例如,从而达到供应空气310的设定值温度或者将供应空气310的温度维持在设定值温度范围内)。阀门346和352的位置影响由冷却盘管334或加热盘管336提供给供应空气310的加热量或冷却量并且可以与消耗以达到期望的供应空气温度的能量量相关。AHU 330可以通过对盘管334至336进行激活或取消激活、调整风扇38的速度或两者的组合来控制供应空气310和/或建筑物区域306的温度。

[0106] 在一些实施例中,HVAC控制器330使用自然冷却来控制供应空气310。AHU控制器330可以通过运行外部空气闸320和冷却盘管334来在自然冷却与机械冷却之间切换。例如,AHU控制器330可以响应于确定自然冷却在经济上最优而对冷却盘管334进行取消激活并且打开外部空气闸320以允许外部空气314进入供应空气管道312。AHU控制器330可以基于外部空气314的温度和/或外部空气314的所预测将来温度来判定自然冷却是否在经济上最

优。例如,AHU控制器330可以判定外部空气314的温度是否被预测为在预定时间量内低于阈值温度。参照图10更加详细地描述了可以由AHU控制器330使用的自然冷却切换逻辑的示例。

[0107] 仍然参照图3,空气侧系统300被示出为包括建筑物管理系统(BMS)控制器366和客户端装置368。BMS控制器366可以包括一个或多个计算机系统(例如,服务器、监督控制器、子系统控制器等),所述计算机系统充当空气侧系统300、水侧系统200、HVAC系统100和/或服务于建筑物10的其他可控系统的系统级控制器、应用或数据服务器、头结点或主控制器。BMS控制器366可以根据相似或不同协议(例如,LON、BACnet等)经由通信链路370与多个下游建筑物系统或子系统(例如,HVAC系统100、安全系统、照明系统、水侧系统200等)通信。在各实施例中,AHU控制器330和BMS控制器366可以是分离的(如图3中所示出的)或集成的。在集成的实施方式中,AHU控制器330可以是配置用于由BMS控制器366的处理器执行的软件模块。

[0108] 在一些实施例中,AHU控制器330从BMS控制器366接收信息(例如,命令、设定值、运行边界等)并且向BMS控制器366提供信息(例如,温度测量结果、阀门或致动器位置、运行状态、诊断等)。例如,AHU控制器330可以向BMS控制器366提供来自温度传感器362至364的温度测量结果、设备开/关状态、设备运行能力和/或可以由BMS控制器366用来监测和控制建筑物区域306内的可变状态或情况的其他任何信息。

[0109] 客户端装置368可以包括用于对HVAC系统100、其子系统和/或装置进行控制、查看或以其他方式交互的一个或多个个人机接口或客户端接口(例如,图形用户接口、报告接口、基于文本的计算机接口、面向客户端的web服务、向web客户端提供页面的web服务器等)。客户端装置368可以是计算机工作站、客户终端、远程或本地接口或任何其他类型的用户接口装置。客户端装置368可以是固定终端或移动装置。例如,客户端装置368可以是台式计算机、具有用户接口的计算机服务器、膝上型计算机、平板计算机、智能电话、PDA或任何其他类型的移动或非移动装置。客户端装置368可以经由通信链路372与BMS控制器366和/或AHU控制器330通信。

[0110] 建筑物管理系统

[0111] 现在参照图4,根据一些实施例,示出了建筑物管理系统(BMS)400的框图。可以在建筑物10中实施BMS 400以自动地监测和控制各种建筑物功能。BMS 400被示出为包括BMS控制器366和多个建筑物子系统428。建筑物子系统428被示出为包括建筑物电气子系统434、信息通信技术(ICT)子系统436、安全子系统438、HVAC子系统440、照明子系统442、电梯/电动扶梯子系统432和防火安全子系统430。在各实施例中,建筑物子系统428可以包括更少的、附加的或替代的子系统。例如,建筑物子系统428还可以包括或可替代地包括制冷子系统、广告或引导标示子系统、烹饪子系统、售货子系统、打印机或拷贝服务子系统或者使用可控的设备和/或传感器来监测或控制建筑物10的任何其他类型的建筑物子系统。在一些实施例中,如参照图2至图3描述的,建筑物子系统428包括水侧系统200和/或空气侧系统300。

[0112] 建筑物子系统428中的每一个可以包括用于完成其单独功能和控制活动的任意数量的装置、控制器和连接。如参照图1至图3描述的,HVAC子系统440可以包括许多与HVAC系统100相同的部件。例如,HVAC子系统440可以包括冷却器、锅炉、任意数量的空气处理单元、

节能装置、现场控制器、监控控制器、致动器、温度传感器以及用于控制建筑物10内的温度、湿度、气流或其他可变条件的其他装置。照明子系统442可以包括任意数量的灯具、镇流器、照明传感器、调光器或被配置用于可控制地调整提供给建筑物空间的光量的其他装置。安全子系统438可以包括占用传感器、视频监控摄像机、数字视频录像机、视频处理服务器、入侵检测装置、访问控制装置和服务器或其他与安全相关的装置。

[0113] 仍然参照图4, BMS控制器366被示出为包括通信接口407和BMS接口409。接口407可以促进BMS控制器366与外部应用(例如, 监测和报告应用422、企业控制应用426、远程系统和应用444、驻留在客户端装置448上的应用等)之间的通信, 以允许用户对BMS控制器366和/或子系统428进行控制、监测和调整。接口407还可以促进BMS控制器366与客户端装置448之间的通信。BMS接口409可以促进BMS控制器366与建筑物子系统428之间的通信(例如, HVAC、照明安全、电梯、配电、业务等)。

[0114] 接口407、409可以是或包括用于与建筑物子系统428或其他外部系统或装置进行数据通信的有线或无线通信接口(例如, 插座、天线、发射器、接收器、收发器、电线端子等)。在各实施例中, 经由接口407、409进行的通信可以是直接的(例如, 本地有线或无线通信)或经由通信网络446(例如, WAN、互联网、蜂窝网等)。例如, 接口407、409可以包括用于经由基于以太网的通信链路或网络发送和接收数据的以太网卡和端口。在另一个示例中, 接口407、409可以包括用于经由无线通信网络进行通信的Wi-Fi收发器。在另一个示例中, 接口407、409中的一者或两者接口可以包括蜂窝或移动电话通信收发器。在一个实施例中, 通信接口407为电力线通信接口并且BMS接口409为以太网接口。在其他实施例中, 通信接口407和BMS接口409都为以太网接口或为同一个以太网接口。

[0115] 仍然参照图4, BMS控制器366被示出为包括处理电路404, 所述处理电路包括处理器406和存储器408。处理电路404可以可通信地连接至BMS接口409和/或通信接口407, 从而使得处理电路404及其各个部件可以经由接口407、409发送和接收数据。处理器406可以被实施为通用处理器、专用集成电路(ASIC)、一个或多个现场可编程门阵列(FPGA)、一组处理部件或其他合适的电子处理部件。

[0116] 存储器408(例如, 存储器、存储器单元、存储装置等)可以包括用于存储数据和/或计算机代码的一个或多个装置(例如, RAM、ROM、闪存器、硬盘存储设备等), 所述数据和/或计算机代码用于完成或促进本申请中所描述的各种过程、层和模块。存储器408可以是或包括易失性存储器或非易失性存储器。存储器408可以包括数据库组件、目标代码组件、脚本组件、或用于支持本申请中所描述的各种活动和信息结构的任何其他类型的信息结构。根据一些实施例, 存储器408经由处理电路404可通信地连接至处理器406并且包括用于(例如, 由处理电路404和/或处理器406)执行本文中所描述的一个或多个过程的计算机代码。

[0117] 在一些实施例中, 在单个计算机(例如, 一个服务器、一个外壳等)内实施BMS控制器366。在各个其他实施例中, BMS控制器366可以跨多个服务器或计算机(例如, 其可以存在于分布式位置中)分布。进一步地, 虽然图4示出了如存在于BMS控制器366外的应用422和426, 但在一些实施例中, 应用422和426可以托管在BMS控制器366内(例如, 在存储器408内)。

[0118] 仍然参照图4, 存储器408被示出为包括企业集成层410、自动测量与验证(AM&V)层412、需求响应(DR)层414、故障检测与诊断(FDD)层416、集成控制层418以及建筑物子系统

集成层420。层410至420可以被配置用于从建筑物子系统428和其他数据源接收输入、基于所述输入确定建筑物子系统428的最优控制动作、基于所述最优控制动作生成控制信号并且将所生成的控制信号提供给建筑物子系统428。以下段落描述了由BMS 400中的层410至420中的每一个层执行的通用功能中的一些通用功能。

[0119] 企业集成层410可以被配置用于服务于具有信息和服务的客户端或本地应用以支持各种企业级应用。例如,企业控制应用426可以被配置用于向图形用户接口(GUI)或向任意数量的企业级业务应用(例如,会计系统、用户识别系统等)提供跨子系统控制。企业控制应用426还可以或可替代地被配置用于提供用于配置BMS控制器366的配置GUI。在又其他实施例中,企业控制应用426可以与层410至420一起工作以基于在接口407和/或BMS接口409接收到的输入来优化建筑物性能(例如,效率、能量使用、舒适度或安全性)。

[0120] 建筑物子系统集成层420可以被配置用于管理BMS控制器366与建筑物子系统428之间的通信。例如,建筑物子系统集成层420可以从建筑物子系统428接收传感器数据和输入信号并且向建筑物子系统428提供输出数据和控制信号。建筑物子系统集成层420还可以被配置用于管理建筑物子系统428之间的通信。建筑物子系统集成层420跨多个多厂商/多协议系统转译通信(例如,传感器数据、输入信号、输出信号等)。

[0121] 需求响应层414可以被配置用于响应于满足建筑物10的需求而优化资源使用(例如,电的使用、天然气的使用、水的使用等)和/或这种资源使用的货币成本。优化可以基于分时电价、缩减信号、能量可用性、或者从公共设施提供商、分布式能量生成系统424、能量储存设备427(例如,高温TES 242、低温TES 244等)或其他来源接收到的其他数据。需求响应层414可以接收来自BMS控制器366的其他层(例如,建筑物子系统集成层420、集成控制层418等)的输入。从其他层接收到的输入可以包括环境或传感器输入(如温度、二氧化碳水平、相对湿度水平、空气品质传感器输出、占用传感器输出、房间安排等)。输入还可以包括如来自公共设施的电气使用(例如,以千瓦每小时(kWh)表示)、热负载测量结果、定价信息、预计的定价、平滑定价、缩减信号等输入。

[0122] 根据一些实施例,需求响应层414包括用于响应于其接收的数据和信号的控制逻辑。这些响应可以包括与集成控制层418中的控制算法进行通信、更改控制策略、更改设定值或者以受控方式激活/取消激活建筑物设备或子系统。需求响应层414还可以包括被配置用于确定何时利用所储存的能量的控制逻辑。例如,需求响应层414可以确定刚好在高峰使用时间开始之前开始使用来自能量储存设备427的能量。

[0123] 在一些实施例中,需求响应层414包括控制模块,所述控制模块被配置用于主动发起控制动作(例如,自动更改设定值),所述控制动作基于表示或基于需求(例如,价格、缩减信号、需求等级等)的一个或多个输入来使能量成本最小化。在一些实施例中,需求响应层414使用设备模型来确定最优控制动作集合。设备模型可以包括例如描述输入、输出和/或由各种建筑物设备组执行的功能的热力学模型。设备模型可以表示建筑物设备集合(例如,子设施、冷却器阵列等)或单独的装置(例如,单独的冷却器、加热器、泵等)。

[0124] 需求响应层414可以进一步包括或利用一个或多个需求响应政策定义(例如,数据库、XML文件等)。政策定义可以由用户(例如,经由图形用户接口)编辑或调整,从而使得可以针对用户的应用、期望的舒适度、具体建筑物设备或者基于其他关注点来定制响应于需求输入而发起的控制动作。例如,需求响应政策定义可以响应于特定需求输入而指定可以

开启或关掉哪些设备、系统或一件设备应该关掉多久、可以更改什么设定值、可允许的设定值调整范围是什么、在返回到正常安排的设定值之前保持高需求设定值多久、接近容量限制有多近、要利用哪些设备模型、进入和离开能量储存装置(例如,热储存罐、电池组等)的能量传递速率(例如,最大速率、报警率、其他速率边界信息等)以及何时分派现场能量生成(例如,经由燃料电池、电动发电机组等)。

[0125] 集成控制层418可以被配置用于使用建筑物子系统集成层420和/或需求响应层414的数据输入或输出来作出控制决策。由于子系统集成由建筑物子系统集成层420提供,集成控制层418可以集成子系统428的控制活动,从而使得子系统428表现为单个集成超系统。在一些实施例中,集成控制层418包括控制逻辑,所述控制逻辑使用来自多个建筑物子系统的输入和输出以相对于单独的子系统可以单独提供的舒适度和能量节省而提供更大的舒适性和能量节省。例如,集成控制层418可以被配置用于使用来自第一子系统的输入来为第二子系统作出节能控制决策。这些决策的结果可以被传送回建筑物子系统集成层420。

[0126] 集成控制层418被示出为在逻辑上低于需求响应层414。集成控制层418可以被配置用于通过配合需求响应层414而使建筑物子系统428和其对应控制回路能够被控制来增强需求响应层414的有效性。这种配置可以有利地减少相对于常规系统的破坏性需求响应行为。例如,集成控制层418可以被配置用于确保对冷水温度的设定值(或者直接或间接影响温度的另一个部件)进行需求响应驱动的向上调整不会导致风扇能量(或用于冷却空间的其他能量)的增加,所述风扇能量增加将导致建筑物能量使用总量比在冷却器处节省得更多。

[0127] 集成控制层418可以被配置用于向需求响应层414提供反馈,从而使得需求响应层414检查即使正在进行所要求的减载时也适当地维持约束(例如,温度、照明水平等)。约束还可以包括与安全性、设备运行极限和性能、舒适度、防火规范、电气规范、能量规范等相关的设定值或感测边界。集成控制层418还可以在逻辑上低于故障检测与诊断层416以及自动测量与验证层412。集成控制层418可以被配置用于基于来自多于一个建筑物子系统的输出而向这些更高层提供所计算的输入(例如,汇总)。

[0128] 自动测量与验证(AM&V)层412可以被配置用于验证由集成控制层418或需求响应层414命令的控制策略正适当地工作(例如,使用由AM&V层412、集成控制层418、建筑物子系统集成层420、FDD层416或其他方式汇总的数据)。由AM&V层412进行的计算可以基于用于单独的BMS装置或子系统的建筑物系统能量模型和/或设备模型。例如,AM&V层412可以将模型所预测的输出与来自建筑物子系统428的实际输出进行比较以确定模型的准确度。

[0129] 故障检测与诊断(FDD)层416可以被配置用于为建筑物子系统428、建筑物子系统装置(即,建筑物设备)以及由需求响应层414和集成控制层418使用的控制算法提供持续故障检测。FDD层416可以从集成控制层418、直接从一个或多个建筑物子系统或装置或者从另一个数据源接收数据输入。FDD层416可以自动地诊断并响应检测到的故障。对检测到的或诊断到的故障的响应可以包括向用户、检修调度系统或被配置用于试图修复故障或解决故障的控制算法提供警报消息。

[0130] FDD层416可以被配置用于使用在建筑物子系统集成层420处可用的详细子系统输入来输出故障部件的特定标识或故障原因(例如,松动的气闸联接)。在其他示例性实施例中,FDD层416被配置用于向集成控制层418提供“故障”事件,所述集成控制层响应于接收到

的故障事件而执行控制策略和政策。根据一些实施例，FDD层416(或由集成控制引擎或业务规则引擎执行的策略)可以在故障装置或系统周围关闭系统或直接控制活动，以减少能量浪费、延长设备寿命或确保适当的控制响应。

[0131] FDD层416可以被配置用于存储或访问各种不同的系统数据存储设备(或实时数据的数据点)。FDD层416可以使用数据存储设备的一些内容来确认设备级(例如，特定冷却器、特定AHU、特定终端单元等)故障并使用其他内容来确认部件或子系统级故障。例如，建筑物子系统428可以生成指示BMS 400及其各个部件的性能的时间(即，时间序列)数据。由建筑物子系统428生成的数据可以包括测得或计算出的值，所述测得或计算出的值展现统计特性并且提供关于相应的系统或过程(例如，温度控制过程、流量控制过程等)是如何在来自其设定值的误差方面执行的信息。FDD层416可以检查这些过程，以暴露系统何时开始性能降低并警告用户在故障变得更严重之前修复故障。

[0132] 现在参照图5，根据一些实施例，示出了另一个建筑物管理系统(BMS) 500的框图。BMS 500可以用于监测和控制HVAC系统100、水侧系统200、空气侧系统300、建筑物子系统428的装置以及其他类型的BMS装置(例如，照明设备、安全设备等)和/或HVAC设备。

[0133] BMS 500提供促进自动设备发现和设备模型分布的系统架构。设备发现可以跨多个不同通信总线(例如，系统总线554、区域总线556至560和564、传感器/致动器总线566等)并且跨多个不同通信协议在多级BMS 500上发生。在一些实施例中，使用有效节点表来完成设备发现，所述有效节点表为连接至每个通信总线的装置提供状态信息。例如，可以通过监测新节点的相应有效节点表来监测针对新装置的每个通信总线。当检测到新装置时，BMS500可以在没有用户交互的情况下开始与新装置进行交互(例如，发送控制信号、使用来自装置数据)。

[0134] BMS 500中的一些装置使用设备模型将它们自己呈现给网络。设备模型定义设备对象属性、视图定义、日程表、趋势以及用于与其他系统整合的相关联BACnet值对象(例如，模拟值、二进制值、多态值等)。BMS 500中的一些装置存储其自己的设备模型。BMS 500中的其他装置外部地存储设备模型(例如，到其他装置内)。例如，区域协调器508可以存储旁路气闸528的设备模型。在一些实施例中，区域协调器508自动创建旁路气闸528或区域总线558上的其他装置的设备模型。其他区域协调器还可以创建连接至其区域总线的装置的设备模型。可以基于由区域总线上的装置暴露的数据点类型、装置类型和/或其他装置属性来自动创建装置的设备模型。以下更加详细地讨论了自动设备发现和设备模型分布的若干示例。

[0135] 仍然参照图5，BMS 500被示出为包括：系统管理器502；若干区域协调器506、508、510和518；以及若干区域控制器524、530、532、536、548和550。系统管理器502可以监测BMS 500中的数据点并将监测到的变量报告给各种监测和/或控制应用。系统管理器502可以经由数据通信链路574(例如，BACnet IP、以太网、有线或无线通信等)与客户端装置504(例如，用户装置，台式计算机、膝上型计算机、移动装置等)通信。系统管理器502可以经由数据通信链路574向客户端装置504提供用户接口。用户接口可以允许用户经由客户端装置504监测和/或控制BMS 500。

[0136] 在一些实施例中，系统管理器502经由系统总线554与区域协调器506至510和518连接。系统管理器502可以被配置用于使用主从令牌传递(MSTP)协议或任何其他通信协议

经由系统总线554与区域协调器506至510和518通信。系统总线554还可以将系统管理器502与其他装置(如恒定量(CV)屋顶单元(RTU)512、输入/输出模块(IOM)514、恒温器控制器516(例如,TEC5000系列恒温器控制器)、以及网络自动化引擎(NAE)或第三方控制器520)连接。RTU 512可以被配置用于直接与系统管理器502通信并且可以直接连接至系统总线554。其他RTU可以经由中间装置与系统管理器502通信。例如,有线输入562可以将第三方RTU 542连接至恒温器控制器516,所述恒温器控制器连接至系统总线554。

[0137] 系统管理器502可以为包含设备模型的任何装置提供用户接口。如区域协调器506-510和518以及恒温器控制器516等装置可以经由系统总线554向系统管理器502提供其设备模型。在一些实施例中,系统管理器502为不包含设备模型的连接装置(例如,IOM 514、第三方控制器520等)自动创建设备模型。例如,系统管理器502可以为响应于装置树请求的任何装置创建设备模型。由系统管理器502创建的设备模型可以存储在系统管理器502内。系统管理器502然后可以使用由系统管理器502创建的设备模型为不包含其自己的设备模型的装置提供用户接口。在一些实施例中,系统管理器502为经由系统总线554连接的每种类型的设备存储视图定义并且使用所存储的视图定义来生成设备的用户接口。

[0138] 每个区域协调器506至510和518可以经由区域总线556、558、560和564与区域控制器524、530-532、536和548-550中的一个或多个区域控制器连接。区域协调器506至510和518可以使用MSTP协议或任何其他通信协议经由区域总线556至560和564与区域控制器524、530-532、536和548-550通信。区域总线556-560和564还可以将区域协调器506-510和518与其他类型的装置(如变风量(VAV)RTU 522和540、转换旁路(COBP)RTU 526和552、旁路气闸528和546以及峰值(PEAK)控制器534和544)连接。

[0139] 区域协调器506-510和518可以被配置用于监测和命令各种分区制系统。在一些实施例中,每个区域协调器506至510和518监测和命令单独分区制系统并且经由单独区域总线连接至所述分区制系统。例如,区域协调器506可以经由区域总线556连接至VAV RTU 522和区域控制器524。区域协调器508可以经由区域总线558连接至COBP RTU 526、旁路气闸528、COBP区域控制器530和VAV区域控制器532。区域协调器510可以经由区域总线560连接至峰值控制器534和VAV区域控制器536。区域协调器518可以经由区域总线564连接至峰值控制器544、旁路气闸546、COBP区域控制器548和VAV区域控制器550。

[0140] 单一模型的区域协调器506至510和518可以被配置用于处理多种不同类型的分区制系统(例如,VAV分区制系统、COBP分区制系统等)。每个分区制系统可以包括RTU、一个或多个区域控制器和/或旁路气闸。例如,区域协调器506和510被示出为分别连接至VAV RTU 522和540的Verasys VAV引擎(VVE)。区域协调器506经由区域总线556直接连接至VAV RTU 522,而区域协调器510经由提供给峰值控制器534的有线输入568连接至第三方VAV RTU 540。区域协调器508和518被示出为分别连接至COBP RTU 526和552的Verasys COBP引擎(VCE)。区域协调器508经由区域总线558直接连接至COBP RTU 526,而区域协调器518经由提供给峰值控制器544的有线输入570连接至第三方COBP RTU 552。

[0141] 区域控制器524、530-532、536和548-550可以经由传感器/致动器(SA)总线与单独BMS装置(例如,传感器、致动器等)通信。例如,VAV区域控制器536被示出为经由SA总线566连接至连网传感器538。区域控制器536可以使用MSTP协议或任何其他通信协议与连网传感器538通信。尽管图5中仅示出了一个SA总线566,但是应当理解的是,每个区域控制器524、

530-532、536和548-550可以连接至不同SA总线。每个SA总线可以将区域控制器与各种传感器(例如,温度传感器、湿度传感器、压力传感器、光传感器、占用传感器等)、致动器(例如,气闸致动器、阀门致动器等)和/或其他类型的可控设备(例如,冷却器、加热器、风扇、泵等)连接。

[0142] 每个区域控制器524、530-532、536和548-550可以被配置用于监测和控制不同建筑物区域。区域控制器524、530-532、536和548-550可以使用经由其SA总线提供的输入和输出来监测和控制各种建筑物区域。例如,区域控制器536可以将经由SA总线566从连网传感器538接收到的温度输入(例如,建筑物区域的测得温度)用作温度控制算法中的反馈。区域控制器524、530-532、536和548-550可以使用各种类型的控制算法(例如,基于状态的算法、极值搜索控制(ESC)算法、比例积分(PI)算法、比例-积分-微分(PID)控制算法、模型预测控制(MPC)算法、反馈控制算法等)来控制建筑物10中或周围的可变状态或状况(例如,温度、湿度、气流、照明等)。

[0143] 具有自然冷却的HVAC系统

[0144] 现在参照图6,根据示例性实施例,示出了具有自然冷却的HVAC系统600的框图。HVAC系统600被配置用于向冷却负载608提供冷却。冷却负载608可以包括例如建筑物区域、流过空气管道的供应气流、空气处理单元或屋顶单元中的气流、流过热交换器的液体、制冷器或冷冻机、冷凝器或蒸发器、冷却盘管或需要冷却的任何其他类型的系统、装置或空间。在一些实施例中,泵622使冷却的液体经由冷却液体电路636循环至冷却负载608。冷却的液体可以从冷却负载608吸收热量,由此向冷却负载608提供冷却并且使冷却的液体升温。

[0145] HVAC系统600被示出为包括冷却塔602、热交换器606和冷却器610。HVAC系统600可以在机械冷却状态(图7中所示出的)和自然冷却状态(图8中所示出的)两者下运行。HVAC系统600可以在机械冷却状态与自然冷却状态之间转变以便为冷却负载608提供经济上最优的冷却。在机械冷却状态下,离开冷却负载608的冷却液体被引导至冷却器610的蒸发器616。冷却器610运行以便通过将来自冷却液体的热量传递至制冷剂来为蒸发器616中的冷却液体提供机械冷却(例如,蒸汽压缩冷却),所述制冷剂经由制冷电路634循环穿过蒸发器616。在自然冷却状态下,离开冷却负载608的冷却液体被引导至热交换器606。热交换器606被配置用于将来自冷却液体的热量传递至经由冷却塔电路632循环穿过热交换器606的水(或任何其他冷却剂)。

[0146] 冷却塔602可以被配置用于通过将来自水的热量传递至外部空气来使冷却塔电路632中的水冷却。在一些实施例中,泵620使水经由冷却塔电路632循环穿过冷却塔602。冷却塔602可以包括使冷却空气流过冷却塔602的风扇604。冷却塔602使冷空气与较温水成热交换关系,由此,将来自较温水的热量传递至较冷的空气中。在机械冷却状态下,冷却塔602可以为冷却器610的冷凝器612提供冷却。冷凝器612可以将来自制冷电路634中的制冷剂的热量传递至冷却塔电路632中的水。在自然冷却状态下,冷却塔602可以为热交换器606提供冷却。热交换器606可以将来自冷却液体电路636中的冷却液体的热量传递至冷却塔电路632中的水。尽管冷却塔电路632被示出并描述为循环水,但是应当理解的是,任何类型的冷却剂或工作液体(例如,水、乙二醇、CO₂等)可以用在冷却塔电路632中。

[0147] 冷却器610被示出为包括冷凝器612、压缩机614、蒸发器616和膨胀装置618。压缩机614可以被配置用于使制冷剂经由制冷电路634在冷凝器612与蒸发器616之间循环。压缩

机614运行以便将制冷剂压缩到高压高温状态。经压缩的制冷剂流过冷凝器612,所述冷凝器将来自制冷电路634中的制冷剂的热量传递至冷却塔电路632中的水。冷却的制冷剂然后流过膨胀装置618,所述膨胀装置使制冷剂膨胀到低压低温状态。经膨胀的制冷剂流过蒸发器616,所述蒸发器将来自冷却液体电路636中的冷却液体的热量传递至制冷电路634中的制冷剂。

[0148] 在一些实施例中,冷却器610仅当HVAC系统在机械冷却状态下运行时有效。在自然冷却状态下,冷却器610可以被取消激活以便减少能耗。在一些实施例中,HVAC系统600包括多个冷却器610。冷却器610中的每个冷却器可以被并行安排并且被配置用于为冷却液体电路636中的液体提供冷却。类似地,HVAC系统600可以包括多个冷却塔602。冷却塔602中的每个冷却塔可以被并行安排并且被配置用于为冷却塔电路632中的水提供冷却。

[0149] 仍然参照图6,HVAC系统600被示出为包括若干阀门624、626、628和630。阀门624至630可以是三路阀门,所述三路阀门可以由控制器640运行以用于控制冷却液体电路636中的冷却液体以及冷却塔电路632中的水的流量。例如,当HVAC系统600转变到机械冷却状态时,控制器640可以运行阀门628和630来引导离开冷却负载608的冷却液体穿过蒸发器616并且防止冷却的液体流过热交换器606。在机械冷却状态下,控制器640可以运行阀门624和626来引导离开冷却塔602的水穿过冷凝器612并且防止水流过热交换器606。相反地,当HVAC系统600转变到自然冷却状态时,控制器640可以运行阀门628和630来引导离开冷却负载608的冷却液体穿过热交换器606并且防止冷却的液体流过蒸发器616。在自然冷却状态下,控制器640可以运行阀门624和626来引导离开冷却塔602的水穿过热交换器606并且防止水流过冷凝器612。

[0150] 现在参照图7,根据示例性实施例,示出了展示HVAC系统600在机械冷却状态下运行的框图。在图7中,在机械冷却状态下使用的流动路径以实线示出,而不在机械冷却状态下使用的流动路径以虚线示出。在机械冷却状态下,冷却器610用于为冷却液体电路636中的冷却液体提供冷却。冷却液体电路636和冷却塔电路632两者流体连接至冷却器610。不使用热交换器606,并且连接至热交换器606的液体导管被阻塞。

[0151] 在机械冷却状态下,控制器640运行阀门624来引导来自冷却塔602的冷水穿过冷凝器612。冷凝器612将来自制冷电路634中的制冷剂的热量传递至冷却塔电路632中的冷水,由此使水升温。温水然后从冷凝器612流向阀门626。控制器640运行阀门626来将温水引导至冷却塔602。冷却塔602将来自水的热量传递至流过冷却塔602的较冷空气。控制器640可以运行风扇604来调节穿过冷却塔602的气流,这调整冷却塔602中的热传递速率。控制器640还可以运行泵620来调节穿过冷却塔电路632的水的流速率,这调整冷却塔602和/或冷凝器612中的热传递速率。

[0152] 在机械冷却状态下,控制器640运行阀门630来引导离开冷却负载608的液体穿过蒸发器616。蒸发器616将来自冷却液体电路636中的液体的热量传递至制冷电路634中的制冷剂,由此使冷却液体电路636中的液体冷却。冷却的液体然后从蒸发器616流向阀门628。控制器640运行阀门628来将冷却的液体引导至冷却负载608。冷却负载608将热量排放至冷却的液体,由此为冷却负载608提供冷却并且使冷却的液体升温。控制器640可以运行泵622来调节穿过冷却液体电路636的冷却液体的流速率,这调整蒸发器616和/或冷却负载608中的热传递速率。

[0153] 现在参照图8,根据示例性实施例,示出了展示HVAC系统600在自然冷却状态下运行的框图。在图8中,在自然冷却状态下使用的流动路径以实线示出,而不在自然冷却状态下使用的流动路径以虚线示出。在自然冷却状态下,热交换器606用于为冷却液体电路636中的冷却的液体提供冷却。冷却液体电路636和冷却塔电路632两者流体连接至热交换器606。不使用冷却器610,并且连接至冷却器610的液体导管被阻塞。

[0154] 在自然冷却状态下,控制器640运行阀门624来引导来自冷却塔602的冷水穿过热交换器606。热交换器606将来自冷却液体电路中的液体的热量传递至冷却塔电路632中的冷水,由此使水升温。温水然后从热交换器606流至阀门626。控制器640运行阀门626来将温水引导至冷却塔602。冷却塔602将来自水的热量传递至流过冷却塔602的较冷空气。控制器640可以运行风扇604来增加或减少穿过冷却塔602的气流,这增大或减小冷却塔602中的热传递速率。控制器640还可以运行泵620来调节穿过冷却塔电路632的水的流速,这调整冷却塔602和/或热交换器606中的热传递速率。

[0155] 在自然冷却状态下,控制器640运行阀门630来引导离开冷却负载608的液体穿过热交换器606。热交换器606将来自冷却液体电路636中的液体的热量传递至冷却塔电路632中的水,由此使冷却液体电路636中的液体冷却。冷却的液体然后从热交换器606流向阀门628。控制器640运行阀门628来将冷却的液体引导至冷却负载608。冷却负载608将热量排放至冷却的液体,由此为冷却负载608提供冷却并且使冷却的液体升温。控制器640可以运行泵622来调节穿过冷却液体电路636的冷却液体的流速率,这调整热交换器606和/或冷却负载608中的热传递速率。

[0156] HVAC控制器

[0157] 现在参照图9,根据示例性实施例,示出了更加详细地展示HVAC系统600的一部分和控制器640的框图。简要概述,控制器640接收来自传感器914的测量结果以及来自天气服务916的天气预报。控制器640使用传感器测量结果和天气预报来确定HVAC系统600的运行状态。例如,控制器640可以判定是转变到机械冷却状态、自然冷却状态还是非冷却状态。控制器640可以生成控制信号并将所述控制信号提供给HVAC设备930(例如,阀门624-630、冷却器610等)。HVAC设备930运行以便影响建筑物中的环境状况(例如,温度、湿度、气流等),所述环境状况可以由传感器914测量并且作为反馈提供给控制器640。

[0158] 控制器640可以是HVAC系统或BMS中的任何类型的控制器。在一些实施例中,控制器640是被配置用于监测和控制建筑物区域的区域控制器。例如,控制器640可以是区域温度控制器、区域湿度控制器、区域照明控制器、VAV区域控制器(例如,VAV区域控制器524、532、536、550)、COBP区域控制器(例如,COBP控制器530、548)或建筑物区域的任何其他类型的控制器。在其他实施例中,控制器640是系统控制器或子系统控制器。例如,控制器640可以是BMS控制器(例如,BMS控制器366)、中央设施控制器、子设施控制器、HVAC系统或任何其他类型的建筑物子系统的监督控制器(例如,建筑物子系统428中的任何建筑物子系统的控制器)。在一些实施例中,控制器640是被配置用于监测和控制HVAC装置组或其他建筑物设备的性能的现场控制器或装置控制器。例如,控制器640可以是AHU控制器(例如,AHU控制器330)、恒温器控制器(例如,恒温器控制器516)、屋顶单元控制器、冷却器控制器、气闸控制器、或者HVAC系统或BMS中的任何其他类型的控制器。

[0159] 在一些实施例中,控制器640是将离散控制系统和闭环控制系统的功能结合的混

合控制器。离散控制系统可以使用有限状态图 (FSD) 来描述并且可以在有限状态机 (FSM) 中实施。在离散控制系统中,当满足状态转变条件中的一个或多个时,控制器评估状态转变条件(例如,使用来自受控系统的反馈)以及各种运行状态之间的转变。离散控制系统中的运行状态中的每种运行状态可以具有相应控制输出集。在一些实施例中,离散控制系统中的控制输出在控制器保持在同一运行状态下时保持恒定并且当控制器转变到新运行状态时改变。

[0160] 可以使用各种控制技术(例如,反馈控制、前馈控制、极值搜索控制、比例积分控制、比例-积分-微分控制、模型预测控制等)中的任何控制技术来实施闭环控制系统。在闭环控制系统中,控制器在值范围内调节提供给受控系统的控制输出(即,被操纵的变量)以便实现期望的效果。例如,控制器可以调节控制输出以便将监测到的变量驱动为设定值。在一些实施例中,控制器使用来自受控系统的反馈来确定设定值与监测到的变量之间的误差。控制器可以变化地增大或减小值范围内的控制输出以便驱使误差为零。

[0161] 控制器640可以包括离散控制元件和闭环控制元件两者。例如,控制器640被示出为包括状态转变控制器910和多个状态控制器920(即,机械冷却状态控制器922、自然冷却状态控制器924和非冷却状态控制器926)。状态转变控制器910可以作为有限状态机进行运行以便评估状态转变条件并且在各种运行状态之间转变。由状态转变控制器910使用的状态转变条件和逻辑可以存储在数据库中以供稍后检索。在一些实施例中,状态转变控制器910向状态控制器920提供对当前运行状态的指示。以下将更加详细地描述状态转变控制器910。

[0162] 状态控制器920中的每一个可以作为特定运行状态内的闭环控制器进行运行。在一些实施例中,每个状态控制器920在状态转变控制器910转变到相应运行状态时变得有效并且在状态转变控制器910转变到相应运行状态之外时无效。在一些实施例中,状态控制器920中的每一个使用不同控制算法和/或不同控制逻辑。这允许控制器640充当多个不同控制器,所述多个不同控制器中的每一个控制系统600在特定运行状态下的运行。以下将更加详细地描述状态控制器920。

[0163] 仍然参照图9,HVAC系统600被示出为包括传感器914、天气服务916、用户装置918和HVAC设备930。传感器914可以包括被配置用于测量建筑物中的可变状态或状况的各种传感器中的任何传感器。例如,传感器914可以包括温度传感器、湿度传感器、气流传感器、照明传感器、压力传感器、电压传感器或任何其他类型的传感器。传感器914可以遍及建筑物分布并且被配置用于测量建筑物中的不同位置处的各种环境状况。例如,传感器914之一可以位于建筑物的第一区域中并且被配置用于测量第一区域的温度,而传感器914中的另一个传感器可以位于建筑物的第二区域中并且被配置用于测量第二区域的温度。类似地,传感器914可以遍及HVAC系统分布并且被配置用于测量HVAC系统中的不同位置处的状况。例如,传感器914之一可以是配置用于测量从AHU提供给建筑物区域的气流的温度的供应空气温度传感器,而传感器914中的另一个传感器可以是配置用于测量从建筑物区域回流到AHU的气流的温度的回流空气温度传感器。

[0164] 在一些实施例中,传感器914包括被配置用于测量建筑物外部的空气的温度、压力、湿度或其他属性的室外空气传感器。传感器914可以经由通信接口902将测量结果作为输入提供给控制器640。在一些实施例中,传感器914向控制器640提供反馈信号,所述反馈

信号指示受控系统中(例如,建筑物区域温度、建筑物区域湿度、系统功耗等)或受控系统外部(例如,室外湿球空气温度)的兴趣变量值。控制器640可以使用来自传感器914的测量结果来评估状态转变条件和/或执行各种运行状态内的闭环控制运行。

[0165] 天气服务916可以被配置用于向控制器640提供天气预报。天气预报可以包括温度预报、湿度预报、风力预报、雨或雪预报或者任何其他类型的天气预报。控制器640可以使用天气预报来预测多个将来时间处的室外温度、湿度、湿球温度或其他属性。在一些实施例中,控制器640使用室外空气的预测属性来评估状态转变条件和/或执行各种运行状态内的闭环控制运行。以下更加详细地描述了由控制器640用来评估状态转变条件并执行状态转变的逻辑。

[0166] 用户装置918可以包括被配置用于促进与控制器640和/或HVAC系统的用户交互的各种用户可运行装置中的任何用户可运行装置。例如,用户装置918可以包括计算机工作站、台式计算机、膝上型计算机、平板计算机、智能电话、PDA或任何其他类型的移动或非移动装置。用户装置918可以包括被配置用于接收来自用户的输入并向用户提供输出的用户接口元件(例如,电子显示屏、触屏显示器、键盘、扬声器、按钮、拨号盘等)。用户装置918可以经由通信接口912与控制器640交互以便监测系统运行并向控制器640提供输入。例如,用户装置918可以允许用户向控制器640提供设定值、运行参数、测得变量的手动值、运行命令、手动状态转变命令和/或其他类型的用户输入。控制器640可以使用来自用户装置918的输入来评估状态转变条件和/或执行各种运行状态内的闭环控制运行。

[0167] HVAC设备930可以包括HVAC系统600中的各种可控系统或装置中的任何可控系统或装置。例如,HVAC设备930可以包括冷却塔602、风扇604、冷却器610、泵620-622和/或阀门624-630。如参照图1至图3描述的,HVAC设备930可以包括HVAC系统100、水侧系统200或空气侧系统300的系统或装置中的任何系统或装置。例如,HVAC设备930可以包括一个或多个冷却器、锅炉、AHU、节能装置、控制器、制动器、风扇、泵、电子阀门和/或可以由控制器640运行用于影响建筑物10之中或周围的可变状态或状况(例如,温度、湿度、气流、照明等)的其他类型的设备。

[0168] HVAC设备930可以包括如参照图4所描述的建筑物子系统428的系统或装置中的任何系统或装置和/或如参照图5所描述的BMS 500的系统或装置中的任何系统或装置(例如,区域协调器、屋顶单元、VAV单元、旁路气闸等)。HVAC设备930可以向控制器640提供运行数据并且可以接收来自控制器640接的控制信号。在一些实施例中,HVAC设备930根据控制信号进行运行以便影响由传感器914测量的变量中的一个或多个变量。

[0169] 仍然参照图9,控制器640被示出为包括通信接口912和处理电路904。通信接口912可以包括用于与各种系统、装置或网络进行数据通信的有线或无线接口(例如,插座、天线、发射器、接收器、收发器、电线端子等)。例如,通信接口912可以包括用于经由基于以太网的通信网络发送和接收数据的以太网卡和端口和/或用于经由无线通信网络进行通信的WiFi收发器。通信接口912可以被配置用于经由局域网或广域网(例如,互联网、建筑物WAN等)进行通信并且可以使用各种通信协议(例如,BACnet、IP、LON等)。

[0170] 通信接口912可以是配置用于促进控制器640与各个外部系统或装置(例如,传感器914、天气服务916、用户装置918、HVAC设备930等)之间的电子数据通信的网络接口。例如,控制器640可以经由通信接口912从监督控制器(例如,BMS控制器366、系统管理器502

等)接收设定值和运行参数。控制器640可以经由通信接口912从传感器914接收测量结果。控制器640可以使用通信接口912来将控制信号发送至HVAC设备930。在一些实施例中,控制器640经由通信接口912向用户装置918提供用户接口和其他信息。

[0171] 处理电路904被示出为包括处理器906和存储器908。处理器906可以是通用或专用处理器、专用集成电路(ASIC)、一个或多个现场可编程门阵列(FPGA)、一组处理部件或其他合适的处理部件。处理器906可以被配置用于执行存储在存储器908中或从其他计算机可读介质(例如,CDROM、网络存储设备、远程服务器等)接收到的计算机代码或指令。

[0172] 存储器908可以包括用于存储数据和/或计算机代码以完成和/或促进本披露中所描述的一个或多个过程的一个或多个装置(例如,存储器单元、存储器装置、存储装置等)。存储器908可以包括随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、硬盘驱动器存储设备、临时存储设备、非易失性存储器、闪存、光学存储器、或用于存储软件对象和/或计算机指令的任何其他合适的存储器。存储器908可以包括数据库组件、目标代码组件、脚本组件、或用于支持本披露中所描述的各种活动和信息结构的任何其他类型的信息结构。存储器908可以经由处理电路904可通信地连接至处理器906并且可以包括用于(例如,由处理器906)执行本文中所描述的一个或多个过程的计算机代码。

[0173] 状态转变和运行状态

[0174] 现在参照图10,根据示例性实施例,示出了展示HVAC系统600的运行的状态转变图1000。状态转变图1000被示出为包括多个运行状态1002-1006(即,机械冷却状态1002、自然冷却状态1004、非冷却状态1006)和状态转变条件1008-1014。尽管状态转变图1000中仅示出了三个运行状态1002-1006,但是应当理解的是,状态转变图1000可以包括任意数量的运行状态以模拟具有各种复杂性的系统。在一些实施例中,各种子状态可以嵌套在运行状态1002-1006中的一个或多个运行状态中。然而,为了简单起见,从状态转变图1000中省略这种子状态。

[0175] 状态转变控制器910可以评估状态转变条件1008-1014并且可以基于所属评估的结果在运行状态1002-1006之间转变。状态转变条件1008-1014可以涉及时间比较和/或值比较。在传统自然冷却系统中,每当室外湿球空气温度低于自然冷却所需要的最低温度时,通常使用自然冷却。然而,传统方法没有考虑到与运行状态之间的转变相关联的经济成本。例如,机械冷却状态1002与自然冷却状态1004之间的切换可以产生经济成本。经济成本可以由冷却器610启动时增大的电消耗、由切换冷却器610开/关产生的增强的设备退化、冷却器610启动时的低效率冷却器运行、运行阀门624-630所需要的电力和/或由于状态转变而产生的任何其他经济成本产生。

[0176] 为了使自然冷却在经济上可行,由自然冷却获得的能量和成本节省应当足够来克服由于机械冷却状态1002与自然冷却状态1004之间的转变所产生的成本。有利地,状态转变控制器910可以通过权衡由自然冷却获得的成本节省与执行状态转变的经济成本来判定对自然冷却的使用是否将在经济上可行。例如,仅当自然冷却持续最小量时间时,自然冷却可以在经济上可行。状态转变控制器910可以预测对自然冷却的使用将持续多久以及将由在所预测的自然冷却时段期间使用自然冷却实现的能量节省。状态转变控制器910可以权衡所预测的能量节省与执行状态转变的成本以便判定是否转变到自然冷却状态1004。

[0177] 在一些实施例中,状态转变控制器910被配置用于预测到未来的多个时间步长中

的每一个的外部空气温度 \hat{T}_{OA} (例如,所预测的外部空气湿球温度)。状态转变控制器910可以使用来自传感器914的测量结果和/或来自天气服务916的天气预报来预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 。当在机械冷却状态1002下运行时,状态转变控制器910可以判定在未来的预定时间量内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 是否将低于自然冷却温度阈值 T_{FC} (转变条件1008)。状态转变控制器910可以响应于确定满足状态转变条件1008而从机械冷却状态1002转变到自然冷却状态1004。

[0178] 在一些实施例中,自然冷却温度阈值 T_{FC} 是自然冷却是可能的或经济上可行的最大室外空气湿球温度。预定时间量可以是自然冷却必须持续以便证明转变到自然冷却状态1004的经济成本是合理的最小时间量 $t_{\text{最小,FC}}$ 。如果所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 在预定时间量 $t_{\text{最小,FC}}$ 内将不停留在低于温度阈值 T_{FC} ,则状态转变控制器910可以保持在机械冷却状态1002,即使当前外部空气温度 T_{OA} 低于温度阈值 T_{FC} 。这防止状态转变控制器910在花费于自然冷却状态1004的时间量以及相应能量节省不足以克服由于状态转变而产生的成本时转变到自然冷却状态1004。

[0179] 在一些实施例中,状态转变控制器910计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 。状态转变控制器910可以通过权衡自然冷却能量节省与由于机械冷却状态1002到自然冷却状态1004的切换而产生的成本来计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 。例如,状态转变控制器910可以使用以下方程来计算转变到自然冷却状态1004以及在自然冷却状态1004下运行的经济价值:

[0180] 价值 $_{FC} = \Delta t_{FC} \text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}} - \text{切换罚分}$

[0181] 其中,价值 $_{FC}$ 是在所预测的自然冷却时段期间转变到自然冷却状态1004以及在自然冷却状态1004下运行的总经济价值, Δt_{FC} 是自然冷却时段的持续时间(即,将花费在自然冷却状态1004上的所预测时间量),成本 $_{\text{电力}}$ 是在自然冷却时段期间所估计的电力的每单位成本(例如, $\frac{\$}{\text{kWh}}$), $P_{\text{电力}}$ 是在自然冷却时段期间所估计的每单位时间的自然冷却能量节省(例如,kW),并且切换罚分是由于从机械冷却状态1002切换到自然冷却状态1004而产生的经济或货币成本(例如,\$)。

[0182] 在先前方程中,项 $\Delta t_{FC} \text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}}$ 表示在自然冷却时段的持续时间内相对于机械冷却由使用自然冷却所产生的成本节省。例如,能量成本成本 $_{\text{电力}}$ (例如, $\frac{\$}{\text{kWh}}$)与每单位时间的能量节省 $P_{\text{电力}}$ (例如,kW)的乘积表示通过在自然冷却时段的每个时间步长期间使用自然冷却而节省的电力的经济成本(例如, $\frac{\$}{\text{小时}}$)。将此每单位时间的节省乘以自然冷却时段的持续时间 Δt_{FC} (例如,小时)得到自然冷却时段的持续时间内的总成本节省。项切换罚分表示由于状态转变而产生的经济成本。如之前所描述的,经济成本可以由冷却器启动或关闭期间增大的电消耗、由切换冷却器610开/关产生的增强的设备退化、冷却器610启动或关闭时的低效率冷却器运行、运行阀门624-630所需要的电力和/或由于状态转变而产生的任何其他经济成本产生。

[0183] 状态转变控制器910可以通过找到导致总经济价值为零(即,价值=0)的自然冷却时段的持续时间 Δt_{FC} 来计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 。例如,状态转变控制器910可以解出以下方程来计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$:

[0184] $0 = t_{\text{最小,FC}} \text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}} \text{切换罚分}$

$$[0185] \quad t_{\text{最小,FC}} = \frac{\text{切换罚分}}{\text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}}}$$

[0186] 其中,成本_{电力}、P_{电力}和切换罚分的值具有已知值。切换罚分的值可以被固定,而成本_{电力}的值可以从能量公共事业单位接收或者基于过去的电力成本被预测。P_{电力}的值可以基于冷却负载608所需要的冷却量被预测或估计。

[0187] 当在自然冷却状态1004下运行时,状态转变控制器910可以判定在未来的预定时间量内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 是否将高于温度阈值 T_{FC} (转变条件1010)。状态转变控制器910可以响应于确定满足状态转变条件1010而从自然冷却状态1004转变到机械冷却状态1002。状态转变条件1010中的预定时间量可以是证明转变到机械冷却状态1002合理所需要最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 。状态转变条件1010中的最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 可以与状态转变条件1008中的最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 相同或不同。

[0188] 当在自然冷却状态1004下运行时,状态转变控制器910可以判定实际外部空气温度 T_{OA} 是否高于温度阈值 T_{FC} (转变条件1012)。状态转变控制器910可以响应于确定满足状态转变条件1012而从自然冷却状态1004转变到非冷却状态1006。在非冷却状态1006下,不使用自然冷却也不使用机械冷却。转变到非冷却状态1006可以在外部空气温度 T_{OA} 高于自然冷却温度阈值 T_{FC} 时发生,但是未被预测到在证明切换回机械冷却合理所需要最小时间量 $t_{\text{最小,MC}}$ 内保持高于温度阈值 T_{FC} 。状态转变控制器910可以保持在非冷却状态1006下直到实际外部空气温度 T_{OA} 下降到低于温度阈值 T_{FC} 。

[0189] 当在非冷却状态1006下运行时,状态转变控制器910可以判定实际外部空气温度 T_{OA} 是否低于温度阈值 T_{FC} (转变条件1014)。状态转变控制器910可以响应于确定满足状态转变条件1012而从非冷却状态1006转变到自然冷却状态1004。在一些实施例中,状态转变控制器910响应于确定在超过最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 的时间量内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 将高于温度阈值 T_{FC} 而非冷却状态1006转变到机械冷却状态1002。然而,这种状态转变可能不是必要的,因为状态转变控制器910可能不在非冷却状态1006下运行除非外部空气温度 T_{OA} 被预测为在最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 内下降到低于温度阈值 T_{FC} 。

[0190] 在一些实施例中,状态转变控制器910通过在范围内优化成本函数 J 来判定在持续时间 h 范围内的多个时间步长 k 中的每一个处使用自然冷却还是机械冷却。在每个时间步长 k 处,成本函数 J 可以被写成如下:

$$[0191] \quad J_k = C * \overline{x_k}$$

[0192] 其中, J_k 是成本函数在时间步长 k 处的值, C 是成本向量,并且 $\overline{x_k}$ 是决策变量在时间步长 k 处的向量。决策变量的向量 $\overline{x_k}$ 可以包括指示将在时间步长 k 期间使用自然冷却还是机械冷却的二进制决策变量和/或连续决策变量(以下更加详细地描述)。成本向量 C 可以包括指示与决策变量中的每一个相关联的经济成本。

[0193] 范围上的总成本可以表示如下:

$$[0194] \quad J_{\text{总}} = \sum_{k=1}^h J_k = \sum_{k=1}^h C * \overline{x_k}$$

[0195] 状态转变控制器910可以通过优化(即,最小化)范围内的总成本 $J_{\text{总}}$ 来确定在每个时间步长 k 处向量 \overline{x}_k 中的决策变量的最优值。因此,优化问题可以用公式表示为以下方程中示出的:

$$[0196] \quad \min(J_{\text{总}}) = \min\left(\sum_{k=1}^n J_k\right) = \min\left(\sum_{k=1}^n C * \overline{x}_k\right)$$

[0197] 在其他实施例中,决策向量 \overline{x}_k 可以由决策矩阵 X 代替。决策矩阵 X 中的每一列可以是指针对特定时间步长 k 的决策向量 \overline{x}_k ,并且可以包括针对所述时间步长的决策变量的值。决策矩阵 X 的每一行可以与特定决策变量相对应。决策矩阵 X 的每个元素(即,行和列的交叉点)可以指示在相应时间步长期间相应决策变量的值。对于决策矩阵 X ,范围上的总成本可以表示如下:

$$[0198] \quad J_{\text{总}} = C * X$$

[0199] 并且优化问题可以用公式表示为以下方程中示出的:

$$[0200] \quad \min(J_{\text{总}}) = \min(C * X)$$

[0201] 在一些实施例中,状态转变控制器910使用二进制罚分方法来定义决策向量 \overline{x}_k 和成本向量 C 。当使用二进制罚分方法时,决策向量 \overline{x}_k 可以被定义如下:

$$[0202] \quad \overline{x}_k = [X_{1,k}, X_{2,k}, X_{3,k}, b_{1,k}, b_{2,k}, P_k]^T$$

[0203] 其中, $X_{1,k}$ 是在时间步长 k 处分配给自然冷却(例如,分配给自然冷却子设施)的冷却负载, $X_{2,k}$ 是在时间步长 k 处分配给机械冷却(例如,分配给机械冷却子设施)的冷却负载,并且 $X_{3,k}$ 是在时间步长 k 处的剩余冷却负载。剩余冷却负载 $X_{3,k}$ 可以被指定为未满足冷却负载或者被分配给另一个设施或子设施(例如,热能储存设备)。变量 $b_{1,k}$ 是指示是否将在时间步长 k 期间使用自然冷却的二进制决策变量。类似地,变量 $b_{2,k}$ 是指示是否将在时间步长 k 期间使用机械冷却的二进制决策变量。变量 P_k 指示在时间步长 k 期间切换罚分是否有效。

[0204] 当使用二进制罚分方法时,成本向量 C 可以被定义如下:

$$[0205] \quad C = [\lambda_1 C_u, \lambda_2 C_u, \lambda_3 C_u, 0, 0, C_p]$$

[0206] 其中, λ_1 是自然冷却子设施的效率, λ_2 是机械冷却子设施的效率, λ_3 是分配有冷却负载 $X_{3,k}$ 的子设施的效率, C_u 是能量使用成本,并且 C_p 是切换罚分成本。

[0207] 当使用二进制方法时,状态转变控制器910可以优化受到以下约束的总成本 $J_{\text{总}}$:

$$[0208] \quad b_1, b_2 \in \{0, 1\}$$

$$[0209] \quad b_{1,k} + b_{2,k} = 1$$

$$[0210] \quad X_{1,k} + X_{2,k} + X_{3,k} = Q_{\text{负载},k}$$

$$[0211] \quad -b_{1,k} X_{1,\text{最大}} + X_{1,k} \leq 0$$

$$[0212] \quad -b_{2,k} X_{2,\text{最大}} + 0_{2,k} \leq 0$$

$$[0213] \quad X_{1,k} \leq X_{1,\text{最大}} FC_{\text{可用}k}$$

$$[0214] \quad b_{1,k} - b_{1,k-1} - P_k \leq 0$$

$$[0215] \quad b_{1,k-1} - b_{1,k} - P_k \leq 0$$

[0216] 其中, $Q_{\text{负载},k}$ 是在时间步长 k 处将满足的总冷却负载, $X_{1,\text{最大}}$ 是自然冷却子设施的最大容量, $X_{2,\text{最大}}$ 是机械冷却子设施的最大容量, $FC_{\text{可用}k}$ 是指示自然冷却是否在时间步长 k 处

可用(例如,FC可用 $k=1$)或者在时间步长 k 处不可用(例如,FC可用 $k=0$)的二进制变量,并且 $b_{1,k-1}$ 是指示是否将在时间步长 $k-1$ 处使用自然冷却的二进制变量。

[0217] 在一些实施例中,状态转变控制器910基于在时间步长 k 处的所预测外部湿球空气温度 T_{0A} 来设置FC可用 k 的值。例如,如果在时间步长 k 处的所预测湿球空气温度 T_{0A} 低于自然冷却温度阈值 T_{FC} ,则状态转变控制器910可以设置FC可用 $k=1$ 。类似地,如果在时间步长 k 处的所预测湿球空气温度 T_{0A} 高于自然冷却温度阈值 T_{FC} ,则状态转变控制器910可以设置FC可用 $k=0$ 。

[0218] 在一些实施例中,状态转变控制器910使用连续罚分方法来定义决策向量 \overline{x}_k 和成本向量 C 。当使用连续罚分方法时,决策向量 \overline{x}_k 可以被定义如下:

$$[0219] \quad \overline{x}_k = [X_{1,k}, X_{2,k}, X_{3,k}, FC \text{ 可用}_k, \delta_{1,k}^+, \delta_{2,k}^+, \delta_{3,k}^+, \delta_{1,k}^-, \delta_{2,k}^-, \delta_{3,k}^-]$$

[0220] 其中, $X_{1,k}$ 是在时间步长 k 处分配给自然冷却(例如,分配给自然冷却子设施)的冷却负载, $X_{2,k}$ 是在时间步长 k 处分配给机械冷却(例如,分配给机械冷却子设施)的冷却负载,并且 $X_{3,k}$ 是在时间步长 k 处的剩余冷却负载。剩余冷却负载 $X_{3,k}$ 可以被指定为未满足冷却负载或者被分配给另一个设施或子设施(例如,热能储存设备)。如之前所描述的,变量FC可用 k 是指示自然冷却是否在时间步长 k 处可用(例如,FC可用 $k=1$)或者在时间步长 k 处不可用(例如,FC可用 $k=0$)的二进制变量。

[0221] 变量 $\delta_{1,k}^+$, $\delta_{2,k}^+$, 和 $\delta_{3,k}^+$ 指示冷却负载 $X_{1,k}$, $X_{2,k}$ 和 $X_{3,k}$ 相对于其在之前时间步长 $k-1$ 处的值增大的量(如果有的话)。例如,变量 $\delta_{1,k}^+$, $\delta_{2,k}^+$, 和 $\delta_{3,k}^+$ 可以被定义为如下:

$$[0222] \quad \delta_{1,k}^+ = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ X_{1,k} - X_{1,k-1} \end{array} \right.$$

$$[0223] \quad \delta_{2,k}^+ = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ X_{2,k} - X_{2,k-1} \end{array} \right.$$

$$[0224] \quad \delta_{3,k}^+ = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ X_{3,k} - X_{3,k-1} \end{array} \right.$$

[0225] 类似地,变量 $\delta_{1,k}^-$, $\delta_{2,k}^-$, 和 $\delta_{3,k}^-$ 指示冷却负载 $X_{1,k}$, $X_{2,k}$ 和 $X_{3,k}$ 相对于其在之前时间步长 $k-1$ 处的值减小的量(如果有的话)。例如,变量 $\delta_{1,k}^-$, $\delta_{2,k}^-$, 和 $\delta_{3,k}^-$ 可以被定义为如下:

$$[0226] \quad \delta_{1,k}^- = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ X_{1,k-1} - X_{1,k} \end{array} \right.$$

$$[0227] \quad \delta_{2,k}^- = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ X_{2,k-1} - X_{2,k} \end{array} \right.$$

$$[0228] \quad \delta_{3,k}^- = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ X_{3,k-1} - X_{3,k} \end{array} \right.$$

[0229] 当使用连续罚分方法时,成本向量 C 可以被定义如下:

$$[0230] \quad C = [\lambda_1 C_u, \lambda_2 C_u, \lambda_3 C_u, 0, c_1^\Delta, c_2^\Delta, c_3^\Delta, c_1^\Delta, c_2^\Delta, c_3^\Delta]$$

[0231] 其中, λ_1 是自然冷却子设施的效率, λ_2 是机械冷却子设施的效率, λ_3 是分配有冷却负载 $X_{3,k}$ 的子设施的效率, c_1^Δ 是自然冷却子设施中负载变化的罚分成本, c_2^Δ 是机械冷却子设施中负载变化的罚分成本,并且 c_3^Δ 是分配有冷却负载 $X_{3,k}$ 的子设施中负载变化的罚分成本。

[0232] 当使用连续罚分方法时,状态转变控制器910可以优化受到以下约束的总成本 $J_{\text{总}}$:

[0233] $FC_{\text{可用}k} \in \{0, 1\}$

[0234] $X_{n,k} \geq 0$

[0235] $\delta_{n,k}^+ \geq 0$

[0236] $\delta_{n,k}^- \geq 0$

[0237] $X_{1,k} + X_{2,k} + X_{3,k} = Q_{\text{负载},k}$

[0238] $X_{n,k} \leq X_{n,\text{最大}}$

[0239] $X_{1,k} \leq M_{\text{大}} FC_{\text{可用}k}$

[0240] $X_{2,k} \leq M_{\text{大}} (1 - FC_{\text{可用}k})$

[0241] $(T_{\text{OA},k} - T_{\text{FC}}) - M_{\text{大}} (1 - FC_{\text{可用}k}) \leq 0$

[0242] 其中, $X_{n,k}$ 是在时间步长 k 处分配给子设施 n ($n=1 \cdots 3$)的冷却负载, $\delta_{n,k}^+$ 是分配给子设施 n 的冷却负载在时间步长 $k-1$ 与时间步长 k 之间的增大(如果有的话), $\delta_{n,k}^-$ 是分配给子设施 n 的冷却负载在时间步长 $k-1$ 与时间步长 k 之间的减小(如果有的话), $X_{n,\text{最大}}$ 是子设施 n 的最大容量, $Q_{\text{负载},k}$ 是在时间步长 k 处将满足的总冷却负载, $T_{\text{OA},k}$ 是在时间步长 k 处的所预测外部空气湿球温度, T_{FC} 是自然冷却温度阈值(例如,自然冷却在热力学上可行的最大外部空气湿球温度),并且 $M_{\text{大}}$ 是足够大的数字(例如, $M_{\text{大}}=10^{10}$)。

[0243] 在二进制罚分方法和连续罚分方法两者中,状态转变控制器910可以使用混合的整数线性规划来优化范围的持续时间内的总成本 $J_{\text{总}}$ 。例如,考虑具有每小时时间步长的十二小时范围(即, $k=1 \cdots 12$)。由于优化,状态转变控制器910可以生成以下向量 X_1 、 X_2 和 X_3 ,所述向量在十二个时间步长中的每一个处包括最优值 $X_{1,k}$ 、 $X_{2,k}$ 和 $X_{3,k}$:

[0244] $X_1 = [0, 0, 0, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8, 0, Q_{10}, Q_{11}, 0]$

[0245] $X_2 = [Q_1, Q_2, Q_3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, Q_{12}]$

[0246] $X_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, Q_9, 0, 0, 0]$

[0247] 在此示例中,在时间步长4-8以及10-11期间冷却负载被分配给自然冷却,如由向量 X_1 中的非零值 $Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8, Q_{10}$,和 Q_{11} 所指示的。这指示自然冷却在范围的小时4-8以及10-11期间是经济上最优的。在时间步长1-3和12期间冷却负载被分配给机械冷却,如由向量 X_2 中的非零值 Q_1, Q_2, Q_3 和 Q_{12} 所指示的。这指示机械冷却在范围的小时1-3和12期间是经济上最优的。在时间步长9期间,冷却负载未被分配给自然冷却或机械冷却,如由向量 X_3 中的值 Q_9 所指示的。这指示在范围的小时9期间,自然冷却和机械冷却都不是经济上最优的,并且冷却负载被转移至热能储存设备或由 X_3 表示的另一个子设施。

[0248] 状态控制器920中的每一个可以作为相应运行状态1002-1006内的闭环控制器进行运行。例如,机械冷却状态控制器922可以控制机械冷却状态1002下的系统运行,自然冷却状态控制器924可以控制自然冷却状态1004下的系统运行,并且非冷却状态控制器926可以控制非冷却状态1006下的系统运行。在一些实施例中,状态控制器920中的每一个响应于确定状态转变控制器910已经转变到相应运行状态而变得有效并且响应于确定状态转变控制器910已经转变到相应运行状态之外而无效。例如,机械冷却状态控制器922可以响应于确定状态转变控制器910已经转变到机械冷却状态1002而变得有效并且响应于确定状态转变控制器910已经转变到机械冷却状态1002之外而无效。类似地,自然冷却状态控制器924

可以响应于确定状态转变控制器910已经转变到自然冷却状态1004而变得有效并且响应于确定状态转变控制器910已经转变到自然冷却状态1004之外而无效。

[0249] 在一些实施例中,状态控制器920中的每一个使用不同控制算法、不同控制逻辑和/或不同控制方法(例如,PID控制、极值搜索控制、模型预测控制等)。这允许控制器640充当多个不同控制器,所述多个不同控制器中的每一个控制HVAC系统600在指定运行状态下的运行。例如,机械冷却状态控制器922可以通过激活冷却器610并且使用冷却器610来为冷却负载608提供冷却进而控制机械冷却状态1002下的系统运行,如参照图7所描述的。自然冷却状态控制器924可以通过对冷却器610取消激活并且使用冷却塔602来直接使冷却液体电路636中的冷却液体冷却进而控制自然冷却状态1004下的系统运行,如参照图8所描述的。

[0250] 预测性自然冷却流程图

[0251] 现在参照图11,根据示例性实施例,示出了用于使HVAC系统在机械冷却状态和自然冷却状态下运行的过程1100的流程图。过程1100可以由HVAC系统600的一个或多个部件执行,如参照图6至图10所描述的。在一些实施例中,过程1100由控制器640执行。

[0252] 过程1100被示出为包括使HVAC系统在机械冷却状态下运行(步骤1102)。在机械冷却状态(图7中所展示的)下,一个或多个冷却器(例如,冷却器610)可以用于为冷却液体电路636中的冷却液体提供冷却。冷却液体电路636和冷却塔电路632两者可以流体连接至冷却器610。可以不使用热交换器606,并且连接至热交换器606的液体导管可以被阻塞。在机械冷却状态下可以不使用自然冷却。

[0253] 在机械冷却状态下,控制器640可以运行阀门624来引导来自冷却塔602的冷水穿过冷凝器612。冷凝器612将来自制冷电路634中的制冷剂的热量传递至冷却塔电路632中的冷水,由此使水升温。温水然后从冷凝器612流向阀门626。控制器640运行阀门626来将温水引导至冷却塔602。冷却塔602将来自水的热量传递至流过冷却塔602的较冷空气。控制器640可以运行风扇604来调节穿过冷却塔602的气流,这调整冷却塔602中的热传递速率。控制器640还可以运行泵620来调节穿过冷却塔电路632的水的流速率,这调整冷却塔602和/或冷凝器612中的热传递速率。

[0254] 在机械冷却状态下,控制器640可以运行阀门630来引导离开冷却负载608的液体穿过蒸发器616。蒸发器616将来自冷却液体电路636中的液体的热量传递至制冷电路634中的制冷剂,由此使冷却液体电路636中的液体冷却。冷却的液体然后从蒸发器616流向阀门628。控制器640运行阀门628来将冷却的液体引导至冷却负载608。冷却负载608将热量排放至冷却的液体,由此为冷却负载608提供冷却并且使冷却的液体升温。控制器640可以运行泵622来调节穿过冷却液体电路636的冷却液体的流速率,这调整蒸发器616和/或冷却负载608中的热传递速率。

[0255] 仍然参照图11,过程1100被示出为包括预测针对未来多个时间步长中的每一个的外部空气温度 \hat{T}_{OA} (步骤1104)。在一些实施例中,所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 是由HVAC系统600冷却的建筑物外部空气的湿球温度。可以使用来自传感器914的测量结果和/或来自天气服务916的天气预报来预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 。

[0256] 过程1100被示出为包括确认自然冷温度态阈值 T_{FC} (步骤1106)。在一些实施例中,自然冷却温度阈值 T_{FC} 是自然冷却是可能的或经济上可行的最大外部空气湿球温度。自然冷

却温度阈值 T_{FC} 可以基于由HVAC系统600冷却的建筑物或区域的温度设定值。例如,对于具有大约70°F的温度设定值的建筑物,自然冷却温度阈值 T_{FC} 可以为大约40°F。

[0257] 过程1100被示出为包括确定自然冷却在经济上可行所需要的最小自然冷却时间量 $t_{\text{最小,FC}}$ (步骤1108)。为了使自然冷却在经济上可行,由自然冷却获得的能量和成本节省应当足够来克服由于机械冷却状态1002与自然冷却状态1004之间的转变所产生的成本。步骤1108可以包括确定HVAC系统600必须继续在自然冷却状态1004下运行以便补偿由于状态转变而产生的成本的最小时间量。

[0258] 在一些实施例中,步骤1108包括计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 。可以通过权衡自然冷却能量节省与由于机械冷却状态1002到自然冷却状态1004的切换而产生的成本来计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 。例如,步骤1108可以包括使用以下方程来计算转变到自然冷却状态1004以及在自然冷却状态1004下运行的经济价值:

[0259] 价值 $_{FC} = \Delta t_{FC} \text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}} - \text{切换罚分}$

[0260] 其中,价值 $_{FC}$ 是在所预测的自然冷却时段期间转变到自然冷却状态1004以及在自然冷却状态1004下运行的总经济价值, Δt_{FC} 是自然冷却时段的持续时间(即,将花费在自然冷却状态1004上的所预测时间量),成本 $_{\text{电力}}$ 是在自然冷却时段期间所估计的电力的每单位成本(例如, $\frac{\$}{kWh}$), $P_{\text{电力}}$ 是在自然冷却时段期间所估计的每单位时间的自然冷却能量节省(例如,kW),并且切换罚分是由于从机械冷却状态1002切换到自然冷却状态1004而产生的经济或货币成本(例如,\$)。

[0261] 在先前方程中,项 $\Delta t_{FC} \text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}}$ 表示在自然冷却时段的持续时间内相对于机械冷却由使用自然冷却所产生的成本节省。例如,能量成本成本 $_{\text{电力}}$ (例如, $\frac{\$}{kWh}$)与每单位时间的能量节省 $P_{\text{电力}}$ (例如,kW)的乘积表示通过在自然冷却时段的每个时间步长期间使用自然冷却而节省的电力的经济成本(例如, $\frac{\$}{\text{小时}}$)。将此每单位时间的节省乘以自然冷却时段的持续时间 Δt_{FC} (例如,小时)得到自然冷却时段的持续时间内总成本节省。项切换罚分表示由于状态转变而产生的经济成本。如之前所描述的,经济成本可以由冷却器启动或关闭期间增大的电消耗、由切换冷却器610开/关产生的增强的设备退化、冷却器610启动或关闭时的低效率冷却器运行、运行阀门624-630所需要的电力和/或由于状态转变而产生的任何其他经济成本产生。

[0262] 步骤1108可以包括通过找到导致总经济价值为零(即,价值=0)的自然冷却时段的持续时间 Δt_{FC} 来计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 。例如,可以使用以下方程来计算最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$:

[0263] $0 = t_{\text{最小,FC}} \text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}} - \text{切换罚分}$

[0264] $t_{\text{最小,FC}} = \frac{\text{切换罚分}}{\text{成本}_{\text{电力}} P_{\text{电力}}}$

[0265] 其中,成本 $_{\text{电力}}$ 、 $P_{\text{电力}}$ 和切换罚分的值具有已知值。切换罚分的值可以被固定,而成本 $_{\text{电力}}$ 的值可以从能量公共事业单位接收或者基于过去的电力成本被预测。 $P_{\text{电力}}$ 的值可以基于冷却负载608所需要的冷却量被预测或估计。

[0266] 仍然参照图11,过程1100被示出为包括判定在大于或等于最小自然冷却时间

$t_{\text{最小,FC}}$ 的持续时间内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 是否将小于或等于自然冷却温度阈值 T_{FC} (步骤1110)。如果所预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 在至少最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 内将不保持低于温度阈值 T_{FC} (即,步骤1110的结果为“否”),则过程1100可以返回至步骤1102并且使HVAC系统600继续在机械冷却状态1002下运行。然而,如果所预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 在至少最小自然冷却时间 $t_{\text{最小,FC}}$ 内将保持低于温度阈值 T_{FC} (即,步骤1110的结果为“是”),则过程1100可以继续进行到步骤1112。

[0267] 过程1100被示出为包括使HVAC系统在自然冷却状态下运行(步骤1112)。在自然冷却状态下,热交换器606可以用于为冷却液体电路636中的冷却液体提供冷却。冷却液体电路636和冷却塔电路632两者可以流体连接至热交换器606。在自然冷却状态下可以不使用冷却器610,并且连接至冷却器610的液体导管可以被阻塞。

[0268] 在自然冷却状态下,控制器640可以运行阀门624来引导来自冷却塔602的冷水穿过热交换器606。热交换器606将来自冷却液体电路中的液体的热量传递至冷却塔电路632中的冷水,由此使水升温。温水然后从热交换器606流至阀门626。控制器640运行阀门626来将温水引导至冷却塔602。冷却塔602将来自水的热量传递至流过冷却塔602的较冷空气。控制器640可以运行风扇604来增加或减少穿过冷却塔602的气流,这增大或减小冷却塔602中的热传递速率。控制器640还可以运行泵620来调节穿过冷却塔电路632的水的流速,这调整冷却塔602和/或热交换器606中的热传递速率。

[0269] 在自然冷却状态下,控制器640可以运行阀门630来引导离开冷却负载608的液体穿过热交换器606。热交换器606将来自冷却液体电路636中的液体的热量传递至冷却塔电路632中的水,由此使冷却液体电路636中的液体冷却。冷却的液体然后从热交换器606流向阀门628。控制器640运行阀门628来将冷却的液体引导至冷却负载608。冷却负载608将热量排放至冷却的液体,由此为冷却负载608提供冷却并且使冷却的液体升温。控制器640可以运行泵622来调节穿过冷却液体电路636的冷却液体的流速率,这调整热交换器606和/或冷却负载608中的热传递速率。

[0270] 仍然参照图11,过程1100被示出为包括确定证明机械冷却合理所需要的最小机械冷却时间量 $t_{\text{最小,MC}}$ (步骤1114),并且判定在大于或等于最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 的持续时间内所预测的外部空气温度 \hat{T}_{OA} 是否将大于或等于自然冷却温度阈值 T_{FC} (步骤1116)。如果所预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 在至少最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 内将不保持高于温度阈值 T_{FC} (即,步骤1116的结果为“否”),则过程1100可以返回至步骤1112并且使HVAC系统600继续在自然冷却状态1004下运行。然而,如果所预测外部空气温度 \hat{T}_{OA} 在至少最小机械冷却时间 $t_{\text{最小,MC}}$ 内将保持高于温度阈值 T_{FC} (即,步骤1116的结果为“是”),则过程1100可以返回至步骤1102并且将HVAC系统转变到机械冷却状态1002。

[0271] 具有自然冷却的中央设施系统

[0272] 现在参照图12,根据示例性实施例,示出了展示中央设施系统1200的框图。系统1200被示出为包括中央设施控制器1202、建筑物自动化系统(BAS)1208以及多个子设施202-212。子设施202-212可以与之前参照图2所描述的子设施相同。例如,子设施202-212被示出为包括加热器子设施202、热回收冷却器子设施204、冷却子设施209 (例如,冷却器子设施206和冷却塔子设施208)、高温TES子设施210和低温TES子设施212。

[0273] 子设施202-212中的每一个被示出为包括可以由中央设施控制器1202和/或建筑物自动化系统1208控制以便优化中央设施200的性能的设备1240。设备1240可以包括例如加热装置220、冷却器232、热回收热交换器226、冷却塔238、热能储存装置242-244、泵、阀门和/或子设施202-212的其他装置。设备1240的单独装置可以被开启或关掉以便调整由子设施202-212中的每一个服务的热能负载。在一些实施例中,可以根据从中央设施控制器1202接收的运行设定值以可变容量来运行设备1240的单独装置(例如,以10%的容量或60%的容量来运行冷却器)。

[0274] 在一些实施例中,子设施202-212中的一个或多个子设施包括被配置用于控制相应子设施的设备1240的子设施级控制器。例如,中央设施控制器1202可以确定设备1240的开/关配置和全局运行设定值。响应于开/关配置和接收到的全局运行设定值,子设施控制器可以开启或关掉设备1240的单独装置,并且实施特定运行设定值(例如,气闸位置、叶片位置、风扇速度、泵速度等)以达到或维持全局运行设定值。

[0275] 在一些实施例中,子设施级控制器从中央设施控制器1202接收子设施负载设定值。每个子设施级控制器可以使用相应子设施的子设施负载设定值来选择对子设施内的设备1240的一个或多个装置进行激活或取消激活以便以节能方式满足子设施负载设定值。在其他实施例中,由中央设施控制器1202内的低级优化器1232执行设备选择和分级决策(即,决定开启/关掉哪些装置)。

[0276] 中央设施系统1200可以被配置用于在经济上可行时使用自然冷却以便优化运行中央设施200的成本。例如,当当前天气状况或未来天气预报指示自然冷却相比于机械冷却在经济上有优势(例如,成本更低)时,系统1200可以从机械冷却切换到自然冷却。在一些实施例中,中央设施控制器1202使用参照图6至图10所描述的技术来确定何时使用自然冷却。参照图13更加详细地描述了可以由中央设施系统1200使用的自然冷却系统的示例。

[0277] BAS 1208可以被配置用于监测受控建筑物或建筑物区域内的状况。例如,BAS 1208可以从分布在建筑物各处的各个传感器(例如,温度传感器、湿度传感器、气流传感器、电压传感器等)接收输入并且可以向中央设施控制器1202报告建筑物状况。建筑物状况可以包括例如建筑物或建筑物区域的温度、建筑物的功耗(例如,电负载)、建筑物内被配置用于影响受控状态的一个或多个致动器的状态、或者与受控建筑物有关的其他类型的信息。BAS1208可以运行子设施202-212以影响建筑物内所监测的状况并服务建筑物的热能负载。

[0278] BAS 1208可以从中央设施控制器1202接收指定设备1240的开/关状态、和/或设定值的控制信号。BAS 1208可以根据中央设施控制器1202所提供的控制信号来控制设备1240(例如,经由致动器、功率继电器等)。例如,BAS 1208可以使用闭环控制来运行设备1240以实现中央设施控制器1202所指定的设定值。在各个实施例中,BAS 1208可以与中央设施控制器1202结合或者可以是单独建筑物自动化系统的一部分。根据示例性实施例,BAS 1208是由江森自控有限公司(Johnson Controls, Inc)出售的METASYS®牌建筑物自动化系统。

[0279] 中央设施控制器1202可以使用从BAS 1208接收到的信息来监测受控建筑物的状态。中央设施控制器1202可以被配置用于预测建筑物的针对预测窗口中的多个时间步长的热能负载(例如,加热负载、冷却负载等)(例如,使用来自天气服务1224的天气预报)。中央设施控制器1202可以生成设备1240的开/关决策和/或设定值以便使由子设施202-212消耗

用于服务所预测的加热和/或冷却负载持续预测窗口的持续时间的能量成本最小化。根据示例性实施例,中央设施控制器1202被集成在单个计算机(例如,一个服务器、一个外壳等)内。在各个其他示例性实施例中,中央设施控制器1202可以跨多个服务器或计算机(例如,其可以存在于分布式位置中)分布。在另一个示例性实施例中,中央设施控制器1202与管理多个建筑物系统的智能建筑物管理器集成和/或与BAS 1208结合。

[0280] 中央设施控制器1202被示出为包括通信接口1204和处理电路1206。通信接口1204可以包括用于与各种系统、装置或网络进行数据通信的有线或无线接口(例如,插座、天线、发射器、接收器、收发器、电线端子等)。例如,通信接口1204可以包括用于经由基于以太网的通信网络发送和接收数据的以太网卡和端口和/或用于经由无线通信网络进行通信的WiFi收发器。通信接口1204可以被配置用于经由局域网或广域网(例如,互联网、建筑物WAN等)进行通信并且可以使用各种通信协议(例如,BACnet、IP、LON等)。

[0281] 通信接口1204可以是配置用于促进中央设施控制器1202与各种外部系统或装置(例如,BAS 1208、子设施202-212等)之间的电子数据通信的网络接口。例如,中央设施控制器1202可以从BAS 1208接收指示受控建筑物的一个或多个测得的状态(例如,温度、湿度、电负载等)以及子设施202-212的一个或多个状态(例如,设备状态、功耗、设备可用性等)的信息。通信接口1204可以从BAS 1208和/或子设施202-212接收输入并且可以经由BAS1208向子设施202-212提供运行参数(例如,开/关决策、设定值等)。运行参数可以使子设施202-212激活、取消激活或调整设备1240的各个装置的设定值。

[0282] 仍然参照图12,处理电路1206被示出为包括处理器1210和存储器1212。处理器1210可以是通用或专用处理器、专用集成电路(ASIC)、一个或多个现场可编程门阵列(FPGA)、一组处理部件或其他合适的处理部件。处理器1210可以被配置用于执行存储在存储器1212中或从其他计算机可读介质(例如,CDROM、网络存储设备、远程服务器等)接收到的计算机代码或指令。

[0283] 存储器1212可以包括用于存储数据和/或计算机代码以完成和/或促进本披露中所描述的各个过程的一个或多个装置(例如,存储器单元、存储器装置、存储装置等)。存储器1212可以包括随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、硬盘驱动器存储设备、临时存储设备、非易失性存储器、闪存、光学存储器、或用于存储软件对象和/或计算机指令的任何其他合适的存储器。存储器1212可以包括数据库组件、目标代码组件、脚本组件、或用于支持本披露中所描述的各种活动和信息结构的任何其他类型的信息结构。存储器1212可以经由处理电路1206可通信地连接至处理器1210并且可以包括用于(例如,由处理器1210)执行本文中所描述的一个或多个过程的计算机代码。

[0284] 仍然参照图12,存储器1212被示出为包括建筑物状态监测器1234。中央设施控制器1202可以接收关于待经由建筑物状态监测器1234被中央设施200加热或冷却的总体建筑物或建筑物空间的数据。在示例性实施例中,建筑物状态监测器1234可以包括图形用户界面组件,所述图形用户界面组件被配置用于为用户提供用于选择建筑物要求(例如,整体温度参数、针对建筑物选择日程、针对不同的建筑物区域选择不同的温度水平等)的图形用户界面。

[0285] 中央设施控制器1202可以确定开/关配置和运行设定值以便满足从建筑物状态监测器1234接收到的建筑物要求。在一些实施例中,建筑物状态监测器1234接收、收集、存储

和/或传输冷却负载要求、建筑物温度设定值、占用数据、天气数据、能量数据、日程数据以及其他建筑物参数。在一些实施例中，建筑物状态监测器1234存储关于能量成本的数据，如可从公共事业单位1226获得的定价信息（能量收费、需量计费等）。

[0286] 仍然参照图12，存储器1212被示出为包括负载/费率预测器1222。负载/费率预测器1222可以被配置用于预测优化时段的每个时间步长 k （例如， $k=1 \cdots n$ ）的建筑物或校园的热能负载 $\hat{\ell}_k$ 。负载/费率预测器1222被示出为从天气服务1224接收天气预报。在一些实施例中，负载/费率预测器1222根据天气预报来预测热能负载 $\hat{\ell}_k$ 。在一些实施例中，负载/费率预测器1222使用来自BAS 1208的反馈来预测负载 $\hat{\ell}_k$ 。来自BAS 1208的反馈可以包括各种类型的传感器输入（例如，温度、流量、湿度、焓等）或与受控建筑物有关的其他数据（例如，来自HVAC系统、照明控制系统、安全系统、水力系统等输入）。

[0287] 在一些实施例中，负载/费率预测器1222（例如，经由建筑物状态监测器1234）从BAS1208接收测得的电负载和/或之前测得的负载数据。负载/费率预测器1222可以根据给定天气预报 $(\hat{\phi}_w)$ 、日期类型（day）、当日时间（t）以及之前测得的负载数据 (Y_{k-1}) 来预测负载 $\hat{\ell}_k$ 。这种关系通过以下方程来表达：

$$[0288] \quad \hat{\ell}_k = f(\hat{\phi}_w, \text{day}, t | Y_{k-1})$$

[0289] 在一些实施例中，负载/费率预测器1222使用从历史负载数据训练出的确定性加随机性模型来预测负载 $\hat{\ell}_k$ 。负载/费率预测器1222可以使用各种预测方法中的任何预测方法（例如，确定性部分的线性回归和随机性部分的AR模型）来预测负载 $\hat{\ell}_k$ 。负载/费率预测器1222可以预测建筑物或校园的一个或多个不同类型的负载。例如，负载/费率预测器1222可以预测在预测窗口内的每个时间步长 k 的热水负载 $\hat{\ell}_{\text{热},k}$ 和冷水负载 $\hat{\ell}_{\text{冷},k}$ 。

[0290] 负载/费率预测器1222被示出为从公共事业单位1226接收公共事业单位费率。公共事业单位费率可以指示公共事业单位1226在预测窗口中的每个时间步长 k 处所提供的资源（例如，电力、天然气、水等）的成本或单位价格。在一些实施例中，公共事业单位费率是时变费率。例如，电价可能在一周的一天或多天的某些时间（例如，在高需求时段期间）较高并且在本周的这天或这些天的其他时间（例如，在低需求时段期间）较低。公共事业单位费率可以限定多个时段以及资源在每个时段期间的单位成本。公共事业单位费率可以从公共事业单位1226接收到的实际费率或负载/费率预测器1222所估计的所预测的公共事业单位费率。

[0291] 在一些实施例中，公共事业单位费率包括公共事业单位1226所提供的一种或多种资源的需量计费。需量计费可以限定公共事业单位1226基于需量计费时段期间特定资源的最大用量（例如，最大能耗）而收取的单独费用。公共事业单位费率可以限定各个需量计费时段以及每个需量计费时段相关联的一个或多个需量计费。在一些实例中，需量计费时段可以彼此和/或与预测窗口部分或全部重叠。有利地，中央设施优化器1228可以被配置用于在由高级优化器1230执行的高级优化过程中处理需量计费。公共事业单位1226可以通过时变（例如，每小时的）价格、最高服务水平（例如，物理基础设施或合同所允许的最大消耗费率）以及（在电力情况下）某个时段内的需量计费或对峰值消耗费率的收费来限定。

[0292] 负载/费率预测器1222可以将所预测的负载 $\hat{\ell}_k$ 和公共事业单位费率存储在存储器

1212中和/或将所预测的负载 \hat{L}_k 和公共事业单位费率提供给中央设施优化器1228。中央设施优化器1228可以使用所预测的负载 \hat{L}_k 和公共事业单位费率来确定子设施202-212的最优负载分布并且生成设备1240的开/关决策和设定值。

[0293] 仍然参照图12,存储器1212被示出为包括中央设施优化器1228。中央设施优化器1228可以执行级联优化过程以便优化中央设施200的性能。例如,中央设施优化器1228被示出为包括高级优化器1230和低级优化器1232。高级优化器1230可以控制级联优化的外部(例如,子设施级)回路。高级优化器1230可以针对预测窗口中的每个时间步长确定跨子设施202-212的热能负载的最优分布,以便优化(例如,最小化)由子设施202-212消耗的能量成本。低级优化器1232可以控制级联优化的内部(例如,设备级)回路。低级优化器1232可以确定如何在由高级优化器1230确定的负载设定值处最佳地运行每个子设施。例如,低级优化器1232可以确定设备1240的各个装置的开/关状态和/或运行设定值,以便在满足子设施的热能负载设定值的同时优化(例如,最小化)每个子设施的能耗。参照图4更加详细地描述级联优化过程。

[0294] 仍然参照图12,存储器1212被示出为包括子设施监测器1238。子设施监测器1238可以收集和存储与子设施202-212的过去、当前和未来(例如,计划的)利用率有关的信息。例如,子设施监测器1238可以从BAS 1208和/或中央设施200接收实际利用率数据,所述实际利用率数据指示由加热器子设施202、热回收冷却器子设施204和冷却器子设施206服务的实际热能负载。实际利用率数据可以是当前利用率数据(例如,当前被服务的实际热能负载)或过去利用率数据(例如,在之前时间处被服务的实际热能负载)。实际利用率数据还可以指示高温TES子设施210和低温TES子设施212的过去或当前充电或放电速率以及TES子设施210-212的过去或当前状态(即,存储水平)。在一些实施例中,实际利用率数据指示要求由中央设施200在过去或当前时间处服务的总加热负载和/或总冷却负载。实际利用率数据还可以指示被要求但并未被中央设施200在过去或当前时间处满足的任何未满足加热和/或冷却负载。在一些实施例中,实际利用率数据指示公共事业消耗(例如,水消耗、电消耗、天然气消耗、光伏能量消耗等)的过去或当前速率。

[0295] 可以以各种粒度级别提供实际利用率数据。例如,给定子设施(例如,冷却器子设施206)的实际利用率数据可以包括表示由子设施服务的总热能负载(例如,由冷却器232中的所有冷却器服务的总负载)的聚合值。在其他实施例中,实际利用率数据可以提供给子设施202-212内的单独装置中的每一个(例如,由冷却器232中的每一个单独地服务的冷却负载)。

[0296] 在一些实施例中,子设施监测器1238将实际利用率数据接收为连续数据信号。在其他实施例中,子设施监测器1238以规则的间隔(例如,每分钟、每十五分钟、每小时等)接收实际利用率数据。子设施监测器1238可以将实际利用率数据存储于存储器1212中或者在单独子设施利用率数据库中。在一些实施例中,子设施监测器1238以规则的间隔存储实际利用率数据,从而使得所存储的利用率数据表示中央设施200随时间推移的相关运行信息的历史。

[0297] 子设施监测器1238可以接收所预测的未来利用率数据,所述所预测的未来利用率数据指示将由加热器子设施202、热回收冷却器子设施204和冷却器子设施206在未来时间处服务的热能负载。所预测的利用率数据还可以指示在未来时间处高温TES子设施210和低

温TES子设施212的所预测充电或放电速率以及TES子设施210-212的所预测状态(即,存储水平)。在一些实施例中,子设施202-212的所预测利用率数据由中央设施优化器1228针对预测窗口期间的多个时间步长生成。例如,所预测的利用率数据可以包括针对预测窗口内的每个时间步长由高级优化器1230预测的最优子设施负载和/或由低级优化器1232预测的最优设备开/关状态。

[0298] 在一些实施例中,所预测的利用率数据指示由负载/费率预测器1222预测的总加热负载和/或总冷却负载。所预测的利用率数据还可以指示预测将被请求但未被中央设施200满足的任何未满足加热和/或冷却负载。在一些实施例中,所预测的利用率数据指示公共事业消耗(例如,水消耗、电消耗、天然气消耗、光伏能量消耗等)的所预测速率。

[0299] 可以以各种粒度级别提供所预测的利用率数据。例如,给定子设施(例如,冷却器子设施206)的所预测利用率数据可以包括表示估计将由子设施服务的总热能负载(例如,由冷却器232中的所有冷却器服务的总预测负载)的聚合值。在其他实施例中,所预测的利用率数据可以提供给子设施202-212内的单独装置中的每一个(例如,由冷却器232中的每一个单独地服务的所预测冷却负载)。

[0300] 在一些实施例中,子设施监测器1238接收针对预测窗口期间的多个时间步长中的每一个的所预测利用率数据。例如,中央设施优化器1228可以执行优化过程(参照图4更加详细地描述的)来生成针对从当前时间延伸到预定预测范围的预测窗口期间的每个时间步长的子设施负载值。每个时间步长可以具有定义的持续时间(例如,十五分钟、一小时等)。所预测的子设施负载值可以在每次执行优化过程时被更新。子设施监测器1238可以将所预测的利用率数据存储于存储器1212中或者在单独子设施利用率数据库中。在一些实施例中,子设施监测器1238以规则的间隔(例如,每小时的间隔)存储所预测的利用率数据,从而使得所存储的利用率数据表示中央设施200随时间推移的计划调度日程。

[0301] 数据和处理由中央设施优化器1228产生,子设施监测器1238或中央设施控制器1202的其他模块可以被监测与报告应用1236访问(或被推送至所述监测与报告应用)。监测与报告应用1236可以被配置用于生成可由用户(例如,中央设施工程师)观察和操纵的实时系统健康仪表盘。例如,监测与报告应用1236可以包括基于网络的监测应用,所述基于网络的监测应用具有用于向图形用户界面(GUI)的用户显示关键性能指标(KPI)或其他信息的若干GUI元件(例如,小窗口、仪表板控件、窗口等)。在一些实施例中,GUI元件包括图表或图形(例如,调度条形图),所述图表或图形表示由子设施监测器1238提供的实际和所预测的利用率数据。GUI元件或报告可以基于实际和所预测的利用率数据来生成和示出,所述实际和所预测的利用率数据允许用户整体上使用单一屏幕监测子设施202-212和中央设施200的性能。

[0302] 仍然参照图12,中央设施控制器1202可以包括一个或多个GUI服务器、网络服务1214或GUI引擎1216以便支持监测与报告应用1236。在各个实施例中,应用1236、网络服务1214、以及GUI引擎1216可以被提供为中央设施控制器1202外部的单独部件(例如,作为智能建筑物管理器的一部分)。中央设施控制器1202可以被配置用于维护相关数据的详细历史数据库(例如,关系数据库、XML数据库等)并且包括计算机代码模块,所述计算机代码模块连续地、频繁地或不频繁地查询、聚集、变换、搜索或以其他方式处理在详细数据库中维护的数据。中央设施控制器1202可以被配置用于将任何这种处理的结果提供给其他数据

库、表格、XML文件或其他数据结构以便由例如外部监测与报告应用进行进一步查询、计算或访问。

[0303] 中央设施控制器1202被示出为包括配置工具1218。配置工具1218可以允许用户(例如,经由图形用户界面、经由提示符驱动向导等)定义中央设施控制器1202应该如何对中央设施子系统中的变化状况作出反应。在示例性实施例中,配置工具1218允许用户构造和存储可以跨多个中央设施装置、多个建筑物系统、以及多个企业控制应用(例如,工作指令管理系统应用、实体资源规划应用等)的条件响应场景。例如,配置工具1218可以为用户提供使用各种条件逻辑来(例如,从子系统、从事件历史)组合数据的能力。在变化的示例性实施例中,条件逻辑可以在从条件(例如,AND、OR、XOR等)之间的简单逻辑运算符到伪代码构造或复杂编程语言功能(允许多个复杂交互、条件语句、循环等)的范围内。配置工具1218可以呈现用于构造这种条件逻辑的用户界面。用户界面可以允许用户图形地定义策略和响应。在一些实施例中,用户界面可以允许用户选择预先存储或预先构造的策略并且适应所述策略或使其能与系统一起使用。

[0304] 在一些实施例中,中央设施优化器1228被配置用于执行级联优化过程以便优化中央设施200的性能。在级联优化过程中,高级优化器1230执行确定针对预测窗口中的每个时间步长的跨子设施202-212的热能负载的最优分配的子设施级优化以便使由子设施202-212消耗的能量成本最小化。低级优化器1232执行确定如何在由高级优化器1230确定的子设施负载设定值处最佳地运行每个子设施的设备级优化。例如,低级优化器1232可以确定设备1240的各个装置的开/关状态和/或运行设定值,以便在满足子设施的热能负载设定值的同时优化每个子设施的能耗。

[0305] 由中央设施优化器1228执行的级联优化过程的一个优点是计算时间的最优使用。例如,由于热能储存设备的运行,由高级优化器1230执行的子设施级优化可以使用相对长的时间范围。然而,由于低级系统动力相对较快(与热能储存设备的动力相比)并且设备1240的低级控制可以由BAS 1208来处理,所以由低级优化器1232执行的设备级优化可以使用短得多的时间范围或根本没有时间范围。这种计算时间的最优使用使得中央设施优化器1228有可能在短时间量内执行中央设施优化,从而允许实时预测控制。例如,短的计算时间使得中央设施优化器1228能够在具有交互式反馈的实时规划工具中得以实施。

[0306] 由中央设施优化器1228执行的级联优化的另一个优点是中央设施优化问题可以被分割成两个级联子问题。级联配置提供抽象层,所述抽象层允许高级优化器1230跨子设施202-212分配热能负载,而不需要高级优化器1230了解或使用与每个子设施内的特定设备配置相关的任何细节。每个子设施内的设备1240之间的互连可以对高级优化器1230隐藏、并且由低级优化器1232处理。出于由高级优化器1230执行的子设施级优化的目的,每个子设施可以完全由一条或多条子设施曲线1242定义。

[0307] 低级优化器1232可以生成子设施曲线1242并将其提供给高级优化器1230。子设施曲线1242可以指示子设施202-212中的每一个的作为子设施负载的函数的公共事业使用率(例如,以kW测量的用电、以L/s测量的用水等)。在一些实施例中,低级优化器1232基于设备模型1220生成子设施曲线1242(例如,通过将单独装置的设备模型1220结合到子设施的聚合曲线中)。低级优化器1232可以通过运行针对若干不同负载和天气状况的低级优化过程而生成多个数据点来生成子设施曲线1242。低级优化器1232可以将曲线拟合到数据点以便

生成子设施曲线1242。在其他实施例中，低级优化器1232向高级优化器1230提供数据点，并且高级优化器1230使用所述数据点来生成子设施曲线。

[0308] 高级优化器1230可以从负载/费率预测器1222接收负载和费率预测、并且从低级优化器1232接收子设施曲线1242。负载预测可以基于来自天气服务1224的天气预报和/或来自建筑物自动化系统1208的信息(例如，建筑物的当前电负载、来自建筑物的测量结果、之前负载的历史、设定值轨迹等)。公共事业单位费率预测可以基于从公共事业单位1226接收到的公共事业单位费率和/或来自另一个数据源的公共事业价格。高级优化器1230可以确定针对预测窗口中的每个时间步长内子设施202-212的最优负载分配(例如，每个子设施的子设施负载)并且可以向低级优化器1232提供作为设定值的子设施负载。在一些实施例中，高级优化器1230通过使中央设施200的在预测窗口内的总运行成本最小化来确定子设施负载。换言之，考虑到所预测的负载和来自负载/费率预测器1222的公共事业单位费率信息，高级优化器1230可以在优化时段上跨子设施202-212分配所预测的负载以便使运行成本最小化。

[0309] 在一些实例中，最优负载分配可以包括使用TES子设施210和/或212来储存第一时间步长期间的热能以供在随后时间步长期间使用。热能储存设备可以有利地允许在能量价格相对较低的第一时间段期间产生并储存热能、并且随后在能量价格相对较高的第二时间段期间取回并使用这些热能。高级优化可以不同于低级优化，因为高级优化由于TES子设施210-212提供的热能储存而具有较长的时间常量。高级优化可以由以下方程描述：

$$[0310] \quad \theta_{HL}^* = \arg \min_{\theta_{HL}} J_{HL}(\theta_{HL})$$

[0311] 其中， θ_{HL}^* 包含整个优化时段的最优高级决策(例如，子设施202-212中的每一个的最优负载)，并且 J_{HL} 是高级成本函数。

[0312] 为了找到最优高级决策 θ_{HL}^* ，高级优化器1230可以使高级成本函数 J_{HL} 最小化。高级成本函数 J_{HL} 可以是由子设施202-212中的每个子设施在优化时段的持续时间内消耗的每种公共事业的经济(例如，货币)成本的总和。在一些实施例中，可以使用以下方程来描述高级成本函数 J_{HL} ：

$$[0313] \quad J_{HL}(\theta_{HL}) = \sum_{k=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_s} \left[\sum_{j=1}^{n_u} t_s \cdot c_{jk} u_{jik}(\theta_{HL}) \right]$$

[0314] 其中， n_h 是优化时段中时间步长k的数量， n_s 是子设施数量， t_s 是时间步长的持续时间， c_{jk} 是优化时段的时间步长k处的公共事业j的经济成本，并且 u_{jik} 是时间步长k处子设施i对公共事业j的使用率。

[0315] 在一些实施例中，成本函数 J_{HL} 包括附加需量计费项，如：

$$[0316] \quad w_d c_{需求} \max_{n_h} (u_{电力}(\theta_{HL}), u_{最大, 电力})$$

[0317] 其中， w_d 是加权项， $c_{需求}$ 是需求成本，并且最大()项选择可适用的需量计费时段期间的高峰电力使用。相应地，可以由以下方程来描述高级成本函数 J_{HL} ：

$$[0318] \quad J_{HL}(\theta_{HL}) = \sum_{k=1}^{n_h} \sum_{i=1}^{n_s} \left[\sum_{j=1}^{n_u} t_s \cdot c_{jk} u_{jik}(\theta_{HL}) \right] + w_d c_{需求} \max_{n_h} (u_{电力}(\theta_{HL}), u_{最大, 电力})$$

[0319] 决策向量 θ_{HL} 可能经受若干约束。例如,这些约束可以要求子设施不以其总容量的容量运行、热储存设备不太快充电或放电或者低于/超过罐的流量、并且满足建筑物或校园的热能负载。这些限制可能导致对高级优化问题的等式约束和不等式约束。

[0320] 在一些实施例中,由高级优化器1230执行的高级优化与于2015年2月27日提交的题为“High Level Central Plant Optimization (高级中央设施优化)”的第14/634,609号美国专利申请中所描述的高级优化过程相同或类似,所述申请的全部披露通过援引并入本文。高级优化器1230可以包括第14/634,609号美国专利申请中所描述的高级优化模块的特征和/或功能中的一些或所有特征和/或功能。

[0321] 低级优化器1232可以使用由高级优化器1230确定的子设施负载来确定设备1240的最优低级决策 θ_{LL}^* (例如,二进制开/关决策、流量设定值、温度设定值等)。可以针对子设施202-212中的每一个执行低级优化过程。在各个实施例中,低级优化过程可以由执行针对子设施202-212中的每一个的单独低级优化的集中式低级优化器1232或由在每个子设施内运行的子设施级控制器组 (例如,每个子设施控制器运行低级优化器1232的实例) 执行。低级优化器1232可以负责确定使用子设施的哪些装置和/或这类种装置的在使能耗最小化的同时将实现子设施负载设定值的运行设定值。可以使用以下方程来描述低级优化:

$$[0322] \quad \theta_{LL}^* = \arg \min_{\theta_{LL}} J_{LL}(\theta_{LL})$$

[0323] 其中, θ_{LL}^* 包含最优低级决策,并且 J_{LL} 是低级成本函数。

[0324] 为了找到最优低级决策 θ_{LL}^* ,低级优化器1232可以使低级成本函数 J_{LL} 最小化。低级成本函数 J_{LL} 可以表示可适用于设施中的所有设备1240的总能耗。可以使用以下方程来描述低级成本函数 J_{LL} :

$$[0325] \quad J_{LL}(\theta_{LL}) = \sum_{j=1}^N t_s \cdot b_j \cdot u_j(\theta_{LL})$$

[0326] 其中, N 是子设施中的设备1240的装置数量, t_s 是时间步长的持续时间, b_j 是二进制开/关决策 (例如,0=关,1=开),并且 u_j 是由装置 j 使用的作为设定值 θ_{LL} 的函数的能量。每个装置可以具有连续变量,可以改变所述连续变量以便确定针对整体输入条件的最低可能能耗。

[0327] 低级优化器1232可以使受基于设备1240的容量的不等式约束和基于能量和质量平衡的等式约束的低级成本函数 J_{LL} 最小化。在一些实施例中,由切换约束来限制最优低级决策 θ_{LL}^* ,所述切换约束定义在二进制开/关切换之后用于维持装置处于开或关状态的短范围。切换约束可以防止装置迅速循环通断。在一些实施例中,低级优化器1232在不考虑系统动力的情况下执行设备级优化。优化过程可以足够慢以安全地假定设备控制已经达到其稳定状态。因此,低级优化器1232可以在时间实例处而不是长范围上确定最优低级决策 θ_{LL}^* 。

[0328] 低级优化器1232可以确定设备1240的多个装置的最优运行状态 (例如,开或关)。根据示例性实施例,可以使用二进制优化和二次补偿来确定开/关组合。二进制优化可以使表示可适用于设施中的装置的功耗的成本函数最小化。在一些实施例中,使用非穷举的 (即,并未考虑装置的所有潜在组合) 二进制优化。二次补偿可以用于考虑功耗为二次 (并且非线性) 的装置。低级优化器1232还可以使用非线性优化来确定设备的最优运行设定值。非

线性优化可以确认进一步使低级成本函数 J_{LL} 最小化的运行设定值。低级优化器1232可以将开/关决策和设定值提供给建筑物自动化系统1208以用于控制中央设施设备1240。

[0329] 在一些实施例中,由低级优化器1232执行的低级优化与于2015年2月27日提交的题为“Low Level Central Plant Optimization(低级中央设施优化)”的第14/634,615号美国专利申请中所描述的低级优化过程相同或类似,所述申请的全部披露通过援引并入本文。低级优化器1232可以包括第14/634,615号美国专利申请中所描述的低级优化模块的特征和/或功能中的一些或所有特征和/或功能。

[0330] 自然冷却系统

[0331] 现在参照图13,根据示例性实施例,示出了自然冷却系统1300。自然冷却系统1300可以被实施为独立系统或之前描述的系统中的一个或多个系统的部件。例如,可以在中央设施200和/或中央设施系统1200(例如,作为自然冷却子设施)中实施自然冷却系统1300以便冷却提供给建筑物的冷却水。在其他实施例中,自然冷却系统1300可以被实施为HVAC系统600的部件以便为冷却负载608提供冷却。

[0332] 自然冷却系统1300被示出为包括由热交换器1304连接的冷却塔电路1316和冷却水电路1318。冷却塔电路1316被示出为包括冷却塔1302和塔水泵1312。塔水泵1312可以包括被配置用于使水(或任何其他冷却剂)在冷却塔1302与热交换器1304的冷侧1306之间循环的一个或多个液体泵。尽管冷却塔电路1316被示出并描述为循环水,但是应当理解的是,任何类型的冷却剂或工作液体(例如,水、乙二醇、CO₂等)可以用在冷却塔电路1316中。

[0333] 在运行中,冷却塔水(即,冷却塔电路1316中的水)在温度 $T_{塔}^{供应}$ (°C)下进入热交换器1304。温度 $T_{塔}^{供应}$ 可以由沿着冷却塔1302与热交换器1304(例如,在冷侧1306的入口处)之间的冷却塔电路1316定位的温度传感器1322来测量。热交换器1304被配置用于以速率 \dot{Q}_{HX} (kW)将来自热侧1308的热量传递至冷侧1306(即,从冷却水电路1318传递至冷却塔电路1316)。冷却塔水吸收热交换器1304中的热量并且在温度 $T_{塔}^{返回}$ (°C)下离开热交换器1304。温度 $T_{塔}^{返回}$ 可以由沿着热交换器1304与冷却塔1302(例如,在冷侧1306的出口处)之间的冷却塔电路1316定位的温度传感器1320来测量。冷却塔水以速率 $\dot{Q}_{塔}$ (kW)排放冷却塔1302中的热量(例如,通过将热量传递至流过冷却塔1302的冷空气)。冷空气在干球温度 $T_{环境}$ 和湿度 $\phi_{环境}$ 下进入冷却塔1302。

[0334] 塔水泵1312可以由自然冷却控制器1330运行以便以可控流速率 $\dot{V}_{塔}$ (m³/s)使冷却塔水循环穿过热交换器1304和冷却塔1302。控制器1330可以通过增大或减小塔水泵1312的速度来调节流速率 $\dot{V}_{塔}$ 。通过调节流速率 $\dot{V}_{塔}$,控制器1330可以调整热交换器1304中的热传递速率 \dot{Q}_{HX} 和冷却塔1302中的热传递速率 $\dot{Q}_{塔}$ 。类似地,控制器1330可以通过增大或减小冷却塔风扇1328的速度来调节穿过冷却塔1302的冷空气的流速率 $\dot{V}_{空气}$ 。通过调节风扇1328的速度和气流速率 $\dot{V}_{空气}$,控制器1330可以调整冷却塔1302中的热传递速率 $\dot{Q}_{塔}$ 。通过调整热传递速率 \dot{Q}_{HX} 和 $\dot{Q}_{塔}$,控制器1330可以控制温度 $T_{塔}^{供应}$ 和 $T_{塔}^{返回}$ 。参照图14更详细地描述控制器1330

的运行。

[0335] 仍然参照图13,冷却水电路1318被示出为包括建筑物1310和冷却水泵1314。建筑物1310具有 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ (kW)的热能负载,必须从建筑物1310中除去所述热能负载以便将建筑物1310维持在舒适的温度。冷却水泵1314可以包括被配置用于使水(或任何其他冷却剂)在建筑物1310与热交换器1304的热侧1308之间循环的一个或多个液体泵。尽管冷却水电路1318被示出并描述为循环水,但是应当理解的是,任何类型的冷却剂或工作液体(例如,水、乙二醇、CO₂等)可以用在冷却水电路1318中。

[0336] 在运行中,冷却的水(即,冷却水电路1318中的水)在温度 $T_{\text{建筑物}}^{\text{返回}}$ (°C)下进入热交换器1304。温度 $T_{\text{建筑物}}^{\text{返回}}$ 可以由沿着建筑物1310与热交换器1304(例如,在热侧1308的入口处)之间的冷却水电路1318定位的温度传感器1324测量。冷却的水以速率 \dot{Q}_{HX} 排放热交换器1304中的热量并且在温度 $T_{\text{建筑物}}^{\text{供应}}$ (°C)下离开热交换器1304。温度 $T_{\text{建筑物}}^{\text{供应}}$ 可以由沿着热交换器1304与建筑物1310(例如,在热侧1308的出口处)之间的冷却水电路1318定位的温度传感器1326测量。冷却的水以速率 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 吸收建筑物1310中的热量以便为建筑物1310提供冷却。为了使冷却水电路1318维持在稳定状态,到冷却水电路1318的热传递速率(即, $\dot{Q}_{\text{负载}}$)以及到冷却水电路1318之外的热传递速率(即, \dot{Q}_{HX})可以是相等的(即, $\dot{Q}_{\text{负载}} - \dot{Q}_{\text{HX}} = 0$)。

[0337] 冷却水泵1314可以由控制器1330运行以便以可控流速率 $\dot{V}_{\text{建筑物}}$ (m³/s)使冷却的水循环穿过热交换器1304和建筑物1310。控制器1330可以通过增大或减小冷却水泵1314的速度来调节流速率 $\dot{V}_{\text{建筑物}}$ 。通过调节流速率 $\dot{V}_{\text{建筑物}}$,控制器1330可以调整热交换器1304中的热传递速率 \dot{Q}_{HX} 以及建筑物1310中的热传递速率 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 。通过调整热交换器1304中的热传递速率 \dot{Q}_{HX} ,控制器1330可以控制温度 $T_{\text{建筑物}}^{\text{供应}}$ 和 $T_{\text{建筑物}}^{\text{返回}}$ 。

[0338] 自然冷却控制器

[0339] 现在参照图14,根据示例性实施例,示出了更加详细地展示自然冷却控制器1330的框图。自然冷却控制器1330可以被配置用于估计自然冷却系统1300的满足建筑物1310的冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 所需要的功耗。在一些实施例中,由高级优化器1230使用参照图12所描述的高级优化过程来确定所需冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 。例如,高级优化器1230可以将冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 分配给自然冷却系统1300,并且控制器1330可以确定满足冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 所需要的最小功耗。控制器1330可以将估计的功耗提供为对高级优化器1230的输出。

[0340] 自然冷却控制器1330被示出为从传感器1402接收测量结果。传感器1402可以包括任何类型的传感器或自然冷却系统1300中的测量装置。例如,传感器1402可以包括被配置用于测量 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 、 $T_{\text{塔}}^{\text{返回}}$ 、 $T_{\text{建筑物}}^{\text{供应}}$ 、以及 $T_{\text{建筑物}}^{\text{返回}}$ 的温度传感器1320-1326。传感器1402可以包括流速率传感器,所述流速率传感器被配置用于测量冷却塔电路1316中的冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 、冷却水电路1318中的冷却水流速率 $\dot{V}_{\text{建筑物}}$ 和/或穿过冷却塔1302的空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。

传感器1402可以包括外部空气传感器,所述外部空气传感器被配置用于测量流入冷却塔1302的外部空气的温度 $T_{\text{环境}}$ 和湿度 $\phi_{\text{环境}}$ 。在一些实施例中,环境空气状况由天气服务(例如,天气服务916)提供而不是由传感器1402测量。

[0341] 在一些实施例中, $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 的实际温度为约42°F至45°F(5.6°C至7.2°C)。 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 可以比湿球温度 T_{wb} 高至少7°F(3.9°C)。这种启发方法暗示所需湿球温度为(至多)35°F至38°F(1.7°C至3.3°C)。冬季月份期间 $T_{\text{建筑物}}^{\text{供应}}$ 的典型值为约50°F(10°C),对于 $T_{\text{建筑物}}^{\text{返回}}$ 而言,约为55°F(12.8°C)。空气越干燥,当使用自然冷却时环境干球温度可能越高。有时,冬季月份中, $T_{\text{建筑物}}^{\text{供应}}$ 甚至可以高达55°F。

[0342] 自然冷却控制器1330被示出为将控制信号提供给水泵1404和冷却塔风扇1328。水泵1404可以包括塔水泵1312和冷却水泵1314。在一些实施例中,控制信号包括最优运行设定值。自然冷却控制器1330可以作为低级优化器(例如,低级优化器1232的实例)进行运行以便确定水泵1404和冷却塔风扇1328的最优运行设定值。最优运行设定值可以包括例如塔水泵1312、冷却水泵1314和/或冷却塔风扇1328的最优流速率设定值或速度设定值。由控制器1330提供的控制信号可以使水泵1404和冷却塔风扇1328增大或减小它们的吞吐量以便最优地满足具有最小功耗的冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 。

[0343] 自然冷却控制器1330可以被配置用于执行多阶段优化过程以便确定自然冷却系统1300的最优功耗。在优化过程的第一阶段中,自然冷却控制器1330可以确定冷却塔电路1316中的水的最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 。最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 可以被定义为导致热交换器1304以速率 $\dot{Q}_{\text{HX}} = \dot{Q}_{\text{负载}}$ 将来自冷却水电路1318的热量传递至冷却塔电路1316的流速率。在优化过程的第二阶段中,自然冷却控制器1330可以确定最优气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 以便满足能量平衡方程 $\dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}} = 0$ 。一旦已经确定最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 和 $\dot{V}_{\text{空气}}$,自然冷却控制器1330就可以计算跨自然冷却系统1300的各个部件的压降之和。自然冷却控制器1330可以使用压降信息来计算由水泵1312、1314和冷却塔1302消耗的电力。以下更加详细地描述自然冷却控制器1330的这些和其他特征。

[0344] 仍然参照图14,控制器1330被示出为包括通信接口1406和处理电路1408。通信接口1406可以包括用于与各种系统、装置或网络进行数据通信的有线或无线接口(例如,插座、天线、发射器、接收器、收发器、电线端子等)。例如,通信接口1406可以包括用于经由基于以太网的通信网络发送和接收数据的以太网卡和端口和/或用于经由无线通信网络进行通信的WiFi收发器。通信接口1406可以被配置用于经由局域网或广域网(例如,互联网、建筑物WAN等)进行通信并且可以使用各种通信协议(例如,BACnet、IP、LON等)。

[0345] 通信接口1406可以是配置用于促进控制器1330与各个外部系统或装置(例如,传感器1402、水泵1404、冷却塔风扇1328、高级优化器1230等)之间的电子数据通信的网络接口。例如,控制器1330可以经由通信接口1406从传感器1402接收测量结果并且从高级优化器1230接收所需要的冷却速率 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 。控制器1330可以使用测量结果来计算冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 、冷却塔空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 、跨水泵1404的压降 ΔP 、以及自然冷却系统1300的功耗的值。

控制器1330可以使用通信接口1406将控制信号发送至水泵1404和冷却塔风扇1328。在一些实施例中,控制器1330使用通信接口1406将自然冷却系统1300的估计功耗提供给高级优化器1230以在高级优化算法中使用。

[0346] 处理电路1408被示出为包括处理器1410和存储器1412。处理器1410可以是通用或专用处理器、专用集成电路(ASIC)、一个或多个现场可编程门阵列(FPGA)、一组处理部件或其他合适的处理部件。处理器1410可以被配置用于执行存储在存储器1412中或从其他计算机可读介质(例如,CDROM、网络存储设备、远程服务器等)接收到的计算机代码或指令。

[0347] 存储器1412可以包括用于存储数据和/或计算机代码以完成和/或促进本披露中所描述的一个或多个过程的一个或多个装置(例如,存储器单元、存储器装置、存储装置等)。存储器1412可以包括随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、硬盘驱动器存储设备、临时存储设备、非易失性存储器、闪存、光学存储器、或用于存储软件对象和/或计算机指令的任何其他合适的存储器。存储器1412可以包括数据库组件、目标代码组件、脚本组件、或用于支持本披露中所描述的各种活动和信息结构的任何其他类型的信息结构。存储器1412可以经由处理电路1408可通信地连接至处理器1410并且可以包括用于(例如,由处理器1410)执行本文中所述的一个或多个过程的计算机代码。

[0348] 塔水流速率优化

[0349] 仍然参照图14,自然冷却控制器1330被示出为包括塔水流速率优化器1414。塔水流速率优化器1414可以被配置用于确定穿过冷却塔电路1316的最优塔水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 以便从冷却水电路1318中除去恰当量的热量 \dot{Q}_{HX} (例如, $\dot{Q}_{HX} = \dot{Q}_{负载}$)。可以基于跨热交换器1304的热侧1308与冷侧1306的温度差、冷却塔电路1316中的流速率 $\dot{V}_{塔}$ 与冷却水电路1318中的 $\dot{V}_{建筑物}$ 、热交换器1304中的热传递表面面积以及热交换器1304的整体热传递系数由热力学第二定律来对由塔水流速率优化器1414执行的优化进行约束。除了冷却塔电路1316中的流速率 $\dot{V}_{塔}$ 之外,所有这些变量和参数的值可以是已知的。

[0350] 在一些实施例中,塔水流速率优化器1414执行多阶段优化过程的第一阶段。在优化过程的第一阶段中,塔水流速率优化器1414可以确定塔水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 的最优值以确保冷却水电路1318中的能量平衡。塔水流速率优化器1414可以使用各种优化技术中的任何优化技术来确定 $\dot{V}_{塔}$ 的最优值。以下详细描述可以由塔水流速率优化器1414使用的优化技术的若干示例。

[0351] 在一些实施例中,塔水流速率优化器1414使用迭代优化技术(例如,NTU- ϵ 法)来迭代地对 $T_{塔}^{返回}$ 和热传递速率 \dot{Q}_{HX} 进行求解直到计算出正确的热传递速率。也就是说,直到:

$$[0352] \quad \dot{Q}_{HX} - \epsilon \dot{Q}_{最大} = 0$$

[0353] 其中, $\dot{Q}_{最大}$ 是热交换器1304中的最大可能热传递速率,并且 ϵ 是热传递有效性。可以使用以下方程来计算最大可能热传递速率 $\dot{Q}_{最大}$:

$$[0354] \quad \dot{Q}_{最大} = \min(\rho \dot{V}_{塔} c_p^w, \rho \dot{V}_{建筑物} c_p^w) \times (T_{建筑物}^{返回} - T_{塔}^{供应})$$

[0355] 其中, ρ 是水的密度 (例如, $997.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), 并且 c_p^w 是水的比热容 (例如, $4.190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$)。

[0356] 在一些实施例中, 热传递有效性 ε 和最大可能热传递速率 $\dot{Q}_{\text{最大}}$ 均是未知的塔水速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的函数。塔水速率优化器 1414 可以使用非线性代数求解器来找到方程 $\dot{Q}_{\text{HX}} - \varepsilon \dot{Q}_{\text{最大}} = 0$ 的根。例如, 有效性 ε 可以被定义为:

$$[0357] \quad \varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}$$

[0358] 其中, C_r 由下式给出:

$$[0359] \quad C_r = \frac{\min(\rho \dot{V}_{\text{塔}} c_p^w, \rho \dot{V}_{\text{建筑物}} c_p^w)}{\max(\rho \dot{V}_{\text{塔}} c_p^w, \rho \dot{V}_{\text{建筑物}} c_p^w)}$$

[0360] 根据这个方程, 显然, C_r 是单比 (即, $0 < C_r < 1$), 其中 ρ 和 c_p^w 都在分子和分母中。因此, ρ 和 c_p^w 将在分子和分母中抵消, 并且所述比 C_r 将等于:

$$[0361] \quad C_r = \frac{\min(\dot{V}_{\text{塔}}, \dot{V}_{\text{建筑物}})}{\max(\dot{V}_{\text{塔}}, \dot{V}_{\text{建筑物}})}$$

[0362] 在极限为 $C_r \rightarrow 0$ 的情况下, 有效性 ε 变为:

$$[0363] \quad \varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$$

[0364] 并且在极限为 $C_r \rightarrow 1$ 的情况下, 有效性 ε 变为:

$$[0365] \quad \varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

[0366] 其中, NTU 是表示热交换器 1304 的传递单位数量的无因次量。塔水速率优化器 1414 可以使用以下方程来计算 NTU :

$$[0367] \quad NTU = \frac{UA}{\min(\rho \dot{V}_{\text{塔}} c_p^w, \rho \dot{V}_{\text{建筑物}} c_p^w)}$$

[0368] 其中, UA 是热交换器 1304 的整体热传递系数与热传递表面面积 (kW/K) 的乘积。在一些实施例中, 可以从热交换器 1304 的设计数据或制造商说明书中获得 UA 的值。例如, 在一些实施例中, UA 可以具有值 $UA = 1815.65 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$ 。

[0369] 在一些实施例中, 塔水速率优化器 1414 使用逐次代换法来确定 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的最优值。例如, 假定 $\dot{V}_{\text{塔}} < \dot{V}_{\text{建筑物}}$, 方程 $\dot{Q}_{\text{HX}} - \varepsilon \dot{Q}_{\text{最大}} = 0$ 可以重写如下:

$$[0370] \quad \dot{V}_{\text{塔}} = \frac{\dot{Q}_{\text{HX}}}{\varepsilon(\dot{V}_{\text{塔}}) \times \rho c_p^w (T_{\text{建筑物}}^{\text{返回}} - T_{\text{塔}}^{\text{供应}})} = F(\dot{V}_{\text{塔}})$$

[0371] 其中, 分母中的项 $\varepsilon(\dot{V}_{\text{塔}})$ 指示有效性 ε 是 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的函数。塔水速率优化器 1414 可以将值 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 递归地代入之前的方程直到方程在给定公差内平衡:

$$[0372] \quad \dot{V}_{\text{塔}}^{k+1} = F(\dot{V}_{\text{塔}}^k)$$

[0373] 在一些实施例中,塔水流速率优化器1414使用优化算法通过使最小二乘目标函数J最小化来确认最优流速率 $\dot{V}_{塔}$ 。问题然后变为:

$$[0374] \quad \min_{\dot{V}_{塔}} (\dot{Q}_{HX} - \varepsilon \dot{Q}_{最大})^2 = 0$$

[0375] 受 $\dot{V}_{塔} \geq 0$ 的约束。图16中示出了作为 $\dot{V}_{塔}$ 的函数的目标函数 $J = (\dot{Q}_{HX} - \varepsilon \dot{Q}_{最大})^2$ 的曲线图1600。在曲线图1600中,线1602表示目标函数J的值。通常使用明确定义的全局最小值1604对目标函数J进行平滑处理,所述全局最小值在根的位置处(例如,在 $\dot{V}_{塔} \sim 0.726 \frac{m^3}{s}$ 处)精确地接触x轴。这种求根方法的一个优点是,即使目标函数J从未达到值零,塔水流速率优化器1414仍可以找到全局最小值1604。

[0376] 在一些实施例中,塔水流速率优化器1414使用试位法(即,试位方法)来找到最优流速率 $\dot{V}_{塔}$ 。这个方法使用两个点a和b,从而使得f(a)在符号上不同于f(b)。换言之, $f(a) \times f(b) < 0$ 。通过波尔查诺定理(Bolzano's Theorem),由于这两个点在符号上不同,所以在区间(a,b)内某处一定存在根。通过找到连接(a, f(a))和(b, f(b))的线的根,此方法重复地缩短了区间,从而使得总是存在跨两个点(a, f(a))和(b, f(b))的符号变化。由于试位法需要符号变化以便工作,所以曲线图1600中示出的函数将不与试位法一起工作,因为所述根周围不存在符号变换。然而,试位法的优点是,如果函数是良态的,则保证了在区间内收敛至根。

[0377] 在一些实施例中,塔水流速率优化器1414使用正割法来找到的最优流速率 $\dot{V}_{塔}$ 。正割法可以是牛顿-拉普森(Newton-Rhapson)法的修改版本。在牛顿-拉普森法中,需要导数信息以使用递归关系。例如,用于找到代数表达式的根 $f(x) = 0$ 的牛顿-拉普森法由下式给出:

$$[0378] \quad x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

[0379] 正割法是牛顿-拉普森法的有限差分逼近。在正割法中,递归关系为:

$$[0380] \quad x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{\Delta f(x_k)}$$

$$[0381] \quad \Delta f(x_k) = \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}$$

[0382] 塔水流速率优化器1414可以使用上述方法或技术中的任何方法或技术来确定冷却塔电路1316中的最优流速率 $\dot{V}_{塔}$ 。如之前所描述的,最优流速率 $\dot{V}_{塔}$ 可以被定义为满足方程 $\dot{Q}_{HX} - \varepsilon \dot{Q}_{最大} = 0$ 的流速率和/或使 \dot{Q}_{HX} 与 $\varepsilon \dot{Q}_{最大}$ 之差最小化的流速率,其中,热交换器1304的有效性 ε 是流速率 $\dot{V}_{塔}$ 的函数。在此方程中, \dot{Q}_{HX} 的值表示跨热交换器1304的实际热传递。 \dot{Q}_{HX} 的值可以等于建筑物1310的冷却负载 $\dot{Q}_{负载}$,所述冷却负载可以被提供为(例如,从高级优化器1230)到塔水流速率优化器1414的已知输入。热交换器有效性 ε 和 $\dot{Q}_{最大}$ 的值可

以是流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的函数、并且可以由塔水流速率优化器1414使用之前描述的技术(例如, NTU- ϵ 法、逐次代换法、最小二乘优化、牛顿-拉普森法、正割法等)中的任何技术进行优化。

[0383] 塔空气流速率优化

[0384] 仍然参照图14,自然冷却控制器1330被示出为包括塔空气流速率优化器1416。塔空气流速率优化器1416可以被配置用于确定穿过冷却塔1302的空气中的最优流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。通过调整空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ (例如,通过运行冷却塔风扇1328),控制器1330可以调整冷却塔1302中的排热速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 。在一些实施例中,最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 是使冷却塔1302中的排热速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 与热交换器1304中的吸热速率 \dot{Q}_{HX} 相等的流速率。例如,最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 可以使冷却塔1302满足冷却塔电路1316的能量平衡,从而使得:

$$[0385] \quad \dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}} = 0$$

[0386] 在其他实施例中,最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 是使 \dot{Q}_{HX} 与 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 之差最小化的流速率。

[0387] 在一些实施例中,塔空气流速率优化器1416执行多阶段优化过程的第二阶段。塔空气流速率优化器1416可以使用之前描述的技术中的任何技术来确定最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。例如,塔空气流速率优化器1416可以使用如参照塔水流速率优化器1414所描述的NTU- ϵ 法、逐次代换法、最小二乘优化、牛顿-拉普森法和/或正割法。在一些实施例中,塔空气流速率优化器1416使用正割法来找到目标函数 $J = \dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}}$ 的根(即, $\dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}} = 0$),其中,热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 是空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的函数。

[0388] 在一些实施例中,塔空气流速率优化器1416使用冷却塔热传递模型1500来模拟冷却塔1302中的热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 。如图15中所示出的,冷却塔热传递模型1500可以定义作为模型1500的若干输入的函数的冷却塔1302中的热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 、离开冷却塔1302的水温度 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 、以及冷却塔有效性 $\epsilon_{\text{塔}}$ 。模型1500的输入被示出为包括冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 、冷却塔空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 、进入冷却塔1302的水温度 $T_{\text{塔}}^{\text{返回}}$ 、环境干球温度 $T_{\text{环境}}$ 、以及环境相对湿度 $\phi_{\text{环境}}$ 。所有这些输入可以具有已知和/或受控的值。例如,冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 可以被设置为由塔水流速率优化器1414之前确定的值。可以由自然冷却系统1300中的各个传感器来测量 $T_{\text{塔}}^{\text{返回}}$ 、 $T_{\text{环境}}$ 和 $\phi_{\text{环境}}$ 的值。 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的值可以由自然冷却控制器1330调整以便实现热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 的期望值。

[0389] 在一些实施例中,离开冷却塔1302的水温度 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 是优化变量并且被假定为具有已知或已分配的值。然而,塔空气流速率优化器1416还可以使用冷却塔热传递模型1500来计算 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 的值。在一些实施例中,塔空气流速率优化器1416将离开冷却塔1302的水温度的计算值(即, $T_{\text{塔}}^{\text{供应,计算}}$)与分配给 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 作为优化变量的值进行比较以便确保两个温度相匹配。换言之,塔空气流速率优化器1416可以验证:

$$[0390] \quad T_{塔}^{供应,计算} - T_{塔}^{供应} = 0$$

[0391] 其中, $T_{塔}^{供应,计算}$ 是由冷却塔热传递模型1500计算的值, 并且 $T_{塔}^{供应}$ 是分配给冷却塔水离开温度作为优化变量的值。

[0392] 压降和功耗估计

[0393] 仍然参照图14, 自然冷却控制器1330被示出为包括压降计算器1418和功耗估计器1420。压降计算器1418可以被配置用于计算跨冷却塔电路1316中的各个HVAC装置的压降。例如, 压降计算器1418可以计算冷却塔电路1316中跨塔水泵1312的水压降 $\Delta P_{泵}$ 、冷却塔电路1316中跨冷却塔1302的水压降 $\Delta P_{塔}$ 和/或冷却塔电路1316中跨热交换器1304的水压降 ΔP_{HX} 。在一些实施例中, 压降计算器1418计算穿过冷却塔1302跨风扇1328的空气压降 $\Delta P_{风扇}$ 。

[0394] 由压降计算器1418计算的压降可以是冷却塔水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 和/或冷却塔空气流速率 $\dot{V}_{空气}$ 的函数。例如, 压降计算器1418可以计算使期望的塔水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 穿过冷却塔电路1316所需的跨塔水泵1312的压力变化 $\Delta P_{泵}$ 。 $\dot{V}_{塔}$ 与 $\Delta P_{泵}$ 之间的关系可以由塔水泵1312的设备模型和/或冷却塔电路1316的压力模型定义。在一些实施例中, 压力模型是基于测得的塔水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 的集合和跨塔水泵1312的相应压力变化 $\Delta P_{泵}$ 的经验模型。

[0395] 跨HVAC装置的压降可以具有正值(如果跨HVAC装置的压力变化为正(即, 压力增益))或负值(如果跨HVAC装置的压力变化为负(即, 压降))。例如, 塔水泵1312可以引起压力增益, 而冷却塔1302和/或热交换器1304可以引起压降。在一些实施例中, 由塔水泵1312引起的压力增益 $\Delta P_{泵}$ 等于跨冷却塔1302的压降 $\Delta P_{塔}$ 和跨热交换器1304的压降 ΔP_{HX} 之和。换言之, 冷却塔电路1316中跨塔水泵1312、冷却塔1302和热交换器1304的水压力变化总和为零(例如, $\Delta P_{泵} + \Delta P_{塔} + \Delta P_{HX} = 0$)。

[0396] 功耗估计器1420可以被配置用于估计自然冷却系统1300中的HVAC装置的功耗。在一些实施例中, 功耗估计器1420估计冷却塔电路1316中的HVAC装置的功耗。例如, 功耗估计器1420可以估计冷却塔1302的功耗 $W_{塔}$ 、冷却塔风扇1328的功耗 $W_{风扇}$ 和/或塔水泵1312的功耗 $W_{泵}$ 。热交换器1304可以不消耗电功率并且可以被排除在功耗估计之外。

[0397] 在一些实施例中, 由功耗估计器1420估计的功耗值是流速 $\dot{V}_{塔}$ 和 $\dot{V}_{空气}$ 和/或压降 $\Delta P_{泵}$ 和 $\Delta P_{风扇}$ 的函数。例如, 功耗估计器1420可以估计作为穿过冷却塔1302的水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 的函数的功耗 $W_{塔}$ 。功耗估计器1420可以估计冷却塔风扇1328的作为由风扇1328引起的空气流速率 $\dot{V}_{空气}$ 和/或跨风扇1328的压降 $\Delta P_{风扇}$ 的函数的功耗 $W_{风扇}$ 。功耗估计器1420可以估计塔水泵1312的作为由塔水泵1312引起的水流速率 $\dot{V}_{塔}$ 和/或跨塔水泵1312的压力变化 $\Delta P_{泵}$ 的函数的功耗 $W_{泵}$ 。

[0398] 功耗与自然冷却系统1300的HVAC装置的压降和/或流速率之间的关系可以由HVAC装置的设备模型和/或HVAC装置的功耗模型定义。例如, 塔水泵1312的设备模型可以定义塔水泵1312的作为跨塔水泵1312的压力变化 $\Delta P_{泵}$ 的函数的功耗 $W_{泵}$ 。类似地, 风扇1328的设备模型可以定义冷却塔风扇1328的作为由风扇1328引起的空气流速率 $\dot{V}_{空气}$ 的函数的功耗 $W_{风扇}$ 。在一些实施例中, 功耗模型和/或设备模型是基于测得的功耗值的集合和相应压力变

化或流速率的经验模型。

[0399] 功耗估计器1420可以估计冷却塔电路1316中的耗电装置的总功耗 $W_{\text{总}}$ 。在一些实施例中,这些装置包括冷却塔1302(例如,冷却塔风扇1328)和塔水泵1312。在一些实施例中,功耗估计器1420通过对冷却塔风扇1328和塔水泵1312的功耗求和(即, $W_{\text{总}}=W_{\text{风扇}}+W_{\text{泵}}$)来计算总功耗 $W_{\text{总}}$ 。功耗估计器1420可以将总功耗 $W_{\text{总}}$ 提供为高级优化器1230的输出。从高级优化器1230的角度来看,自然冷却控制器1330提供作为冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 的函数的所估计功耗值 $W_{\text{总}}$ 。这允许高级优化器1230优化对各个子设施的热能负载分配并且基于冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 来判定自然冷却相对于机械冷却是否在经济上最优。

[0400] 如图14中所示出的,控制器1330可以将控制信号提供给水泵1404(例如,塔水泵1312和冷却水泵1314)和冷却塔风扇1328。控制器1330可以生成针对塔水泵1312的控制信号,所述控制信号使塔水泵1312实现经计算的压降 $\Delta P_{\text{泵}}$ 和/或最优塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 。类似地,控制器1330可以生成针对冷却塔风扇1328的控制信号,所述控制信号使冷却塔风扇1328实现最优塔空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。以此方式,控制器1330可以运行自然冷却系统1300的HVAC装置以便实现由塔水流速率优化器1414、塔空气流速率优化器1416和/或压降计算器1418确定的最优值。

[0401] 自然冷却优化过程

[0402] 现在参照图17,根据示例性实施例,示出了用于优化自然冷却系统1300的性能的过程1700的流程图。过程1700可以用于确定 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 和 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的最优值、计算跨自然冷却系统1300中的各个HVAC装置的压降、并且估计自然冷却系统1300的总功耗。过程1700可以由自然冷却系统1300的一个或多个部件(包括例如,自然冷却控制器1330、冷却塔1302、塔水泵1312、以及冷却塔风扇1328)执行。

[0403] 过程1700被示出为包括确定冷却塔电路中的水的最优流速率以便实现冷却热能负载设定值(步骤1702)。在一些实施例中,如参照图14所描述的,步骤1702由塔水流速率优化器1414执行。步骤1702中计算出的最优流速率可以是冷却塔电路1316中的水的最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 。冷却热能负载设定值可以是建筑物1310的冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 和/或跨热交换器1304的热传递速率 \dot{Q}_{HX} 。在一些实施例中,冷却塔电路1316中的水的最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 是以速率 \dot{Q}_{HX} 除去来自冷却水电路1318的热量的流速率。

[0404] 步骤1702可以包括使用上述方法或技术中的任何方法或技术来确定冷却塔电路1316中的最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 。这些方法包括例如NTU- ϵ 法、逐次代换法、最小二乘优化、牛顿-拉普森法、正割法等。在一些实施例中,最优流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 被定义为满足方程 $\dot{Q}_{\text{HX}} - \epsilon \dot{Q}_{\text{最大}} = 0$ 的流速率和/或使 \dot{Q}_{HX} 与 $\epsilon \dot{Q}_{\text{最大}}$ 之差最小化的流速率,其中,热交换器1304的有效性 ϵ 是流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的函数。在此方程中, \dot{Q}_{HX} 的值表示跨热交换器1304的实际热传递。 \dot{Q}_{HX} 的值可以等于建筑物1310的冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$,所述冷却负载可以被提供为(例如,从高级优化器1230)到塔水流速率优化器1414的已知输入。热交换器有效性 ϵ 和 $\dot{Q}_{\text{最大}}$ 的值可以是流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的函数并

且可以通过增大或减小流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 来调整。

[0405] 仍然参照图17,过程1700被示出为包括确定冷却塔中的空气的最优流速率以便使冷却塔电路中的热传递平衡(步骤1704)。在一些实施例中,如参照图14所描述的,步骤1704由塔空气流速率优化器1416执行。步骤1704中计算出的最优空气流速率可以是冷却塔1302中的空气的最优流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。在一些实施例中,最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 是使冷却塔1302中的排热速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 与热交换器1304中的吸热速率 \dot{Q}_{HX} 相等的流速率。例如,最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 可以使冷却塔1302满足冷却塔电路1316的能量平衡,从而使得:

$$[0406] \quad \dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}} = 0$$

[0407] 在其他实施例中,最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 是使 \dot{Q}_{HX} 与 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 之差最小化的流速率。

[0408] 步骤1704可以包括使用之前描述的技术中的任何技术来确定最优空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。例如,步骤1704可以包括使用如参照图14所描述的NTU- ϵ 法、逐次代换法、最小二乘优化、牛顿-拉普森法和/或正割法。在一些实施例中,步骤1704包括使用正割法来找到目标函数 $J = \dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}}$ 的根(即, $\dot{Q}_{\text{HX}} - \dot{Q}_{\text{塔}} = 0$),其中,热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 是空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的函数。

[0409] 在一些实施例中,步骤1704包括使用冷却塔热传递模型1500来模拟冷却塔1302中的热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 。冷却塔热传递模型1500可以定义作为模型1500的若干输入的函数的冷却塔1302中的热传递速率 $\dot{Q}_{\text{塔}}$ 、离开冷却塔1302的水温度 $T_{\text{塔}}^{\text{供应}}$ 、以及冷却塔有效性 $\epsilon_{\text{塔}}$ 。模型1500的输入可以包括例如冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 、冷却塔空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 、进入冷却塔1302的水温度 $T_{\text{塔}}^{\text{返回}}$ 、环境干球温度 $T_{\text{环境}}$ 、以及环境相对湿度 $\phi_{\text{环境}}$ 。所有这些输入可以具有已知和/或受控的值。例如,冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 可以被设置为之前在步骤1702中确定的值。可以由自然冷却系统1300中的各个传感器来测量 $T_{\text{塔}}^{\text{返回}}$ 、 $T_{\text{环境}}$ 和 $\phi_{\text{环境}}$ 的值。 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的值可以由自然冷却控制器1330调整。

[0410] 仍然参照图17,过程1700被示出为包括计算冷却塔电路中跨HVAC装置的压降以及HVAC装置的相应功耗(步骤1706)。在一些实施例中,如参照图14所描述的,步骤1706由压降计算器1418和功耗估计器1420执行。步骤1706可以包括计算冷却塔电路1316中跨塔水泵1312的水压降 $\Delta P_{\text{泵}}$ 、冷却塔电路1316中跨冷却塔1302的水压降 $\Delta P_{\text{塔}}$ 和/或冷却塔电路1316中跨热交换器1304的水压降 ΔP_{HX} 。在一些实施例中,步骤1706包括计算穿过冷却塔1302空气的跨风扇1328的压降 $\Delta P_{\text{风扇}}$ 。

[0411] 步骤1706中计算出的压降可以是冷却塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 和/或冷却塔空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的函数。例如,步骤1706可以包括计算使期望的塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 穿过冷却塔电路1316所需的跨塔水泵1312的压力变化 $\Delta P_{\text{泵}}$ 。 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 与 $\Delta P_{\text{泵}}$ 之间的关系可以由塔水泵1312的设备模型和/或冷却塔电路1316的压力模型定义。在一些实施例中,压力模型是基于测得的塔水流速

率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的集合和跨塔水泵1312的相应压力变化 $\Delta P_{\text{泵}}$ 的经验模型。

[0412] 步骤1706可以包括估计冷却塔1302的功耗 $W_{\text{塔}}$ 、冷却塔风扇1328的功耗 $W_{\text{风扇}}$ 和/或塔水泵1312的功耗 $W_{\text{泵}}$ 。热交换器1304可以不消耗电功率并且可以被排除在功耗估计之外。在一些实施例中,在步骤1706中估计的功耗值是流速 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 和 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 和/或压降 $\Delta P_{\text{泵}}$ 和 $\Delta P_{\text{风扇}}$ 的函数。例如,步骤1706可以包括估计作为穿过冷却塔1302的水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 的函数的功耗 $W_{\text{塔}}$ 。步骤1706可以包括估计冷却塔风扇1328的作为由风扇1328引起的空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 和/或跨风扇1328的压降 $\Delta P_{\text{风扇}}$ 的函数的功耗 $W_{\text{风扇}}$ 。步骤1706可以包括估计塔水泵1312的作为由塔水泵1312引起的水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 和/或跨塔水泵1312的压力变化 $\Delta P_{\text{泵}}$ 的函数的功耗 $W_{\text{泵}}$ 。

[0413] 功耗与自然冷却系统1300的HVAC装置的压降和/或流速率之间的关系可以由HVAC装置的设备模型和/或HVAC装置的功耗模型定义。例如,塔水泵1312的设备模型可以定义塔水泵1312的作为跨塔水泵1312的压力变化 $\Delta P_{\text{泵}}$ 的函数的功耗 $W_{\text{泵}}$ 。类似地,风扇1328的设备模型可以定义冷却塔风扇1328的作为由风扇1328引起的空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 的函数的功耗 $W_{\text{风扇}}$ 。在一些实施例中,功耗模型和/或设备模型是基于测得的功耗值的集合和相应压力变化或流速率的经验模型。

[0414] 在一些实施例中,步骤1706包括估计冷却塔电路1316中的耗电装置的总功耗 $W_{\text{总}}$ 。这些装置可以包括冷却塔1302(例如,冷却塔风扇1328)和塔水泵1312。在一些实施例中,步骤1706包括通过对冷却塔风扇1328和塔水泵1312的功耗求和(即, $W_{\text{总}}=W_{\text{风扇}}+W_{\text{泵}}$)来计算总功耗 $W_{\text{总}}$ 。步骤1706可以包括将总功耗 $W_{\text{总}}$ 提供为高级优化器1230的输出。这允许高级优化器1230优化对各个子设施的热能负载分配并且基于冷却负载 $\dot{Q}_{\text{负载}}$ 来判定自然冷却相对于机械冷却是否在经济上最优。

[0415] 仍然参照图17,过程1700被示出为包括运行HVAC装置以便实现计算出的压降和最优流速率(步骤1708)。可以通过将控制信号提供给自然冷却系统1300的各个部件来由自然冷却控制器1330执行步骤1708。例如,控制器1330可以将控制信号提供给水泵1404(例如,塔水泵1312和冷却水泵1314)和冷却塔风扇1328。步骤1708可以包括生成针对塔水泵1312的控制信号,所述控制信号使塔水泵1312实现计算的压降 $\Delta P_{\text{泵}}$ 和/或最优塔水流速率 $\dot{V}_{\text{塔}}$ 。类似地,步骤1708可以包括生成针对冷却塔风扇1328的控制信号,所述控制信号使冷却塔风扇1328实现最优塔空气流速率 $\dot{V}_{\text{空气}}$ 。以此方式,自然冷却系统1300的HVAC装置可以在步骤1708中运行以便实现在步骤1702至1706中确定的最优流速率和压降。

[0416] 示例性实施例的配置

[0417] 如各示例性实施例中所示出的系统和方法的构造和安排仅是说明性的。尽管本披露中仅详细描述了几个实施例,但是许多修改是可能的(例如,各种元件的大小、规模、结构、形状和比例、参数的值、安装安排、材料的使用、颜色、取向等的变化)。例如,元件的位置可以颠倒或以其他方式变化,并且离散元件的性质或数量或位置可以更改或变化。因此,所有这类修改旨在被包括在本披露的范围之内。可以根据替代实施例对任何过程或方法步骤的顺序或序列进行改变或重新排序。在不脱离本披露范围的情况下,可以在示例性实施例的设计、运行条件和安排方面作出其他替代、修改、改变、和省略。

[0418] 本披露假设任何机器可读介质上的用于完成各运行的方法、系统和程序产品。可以使用现有计算机处理器或由结合用于此目的或另一目的的适当系统的专用计算机处理器或由硬接线系统来实施本披露的实施例。本披露范围内的实施例包括程序产品,所述程序产品包括用于携带或具有存储在其上的机器可执行指令或数据结构的机器可读介质。这种机器可读介质可以是可由通用或专用计算机或具有处理器的其他机器存取的任何可用介质。通过示例,这类计算机可读介质可以包括RAM、ROM、EPROM、EEPROM、CD-ROM或其他光盘存储设备、磁盘存储设备或其他磁存储设备等,或者可以用来以机器可执行指令或数据结构的携带或存储所期望的程序代码并且可以由通用或专用计算机或具有处理器的其他机器访问的任何其他介质。上述内容的组合也包括在机器可读介质的范围内。机器可执行指令包括例如使得通用计算机、专用计算机或专用处理机执行特定功能或功能组的指令和数据。

[0419] 尽管附图示出了指定顺序的方法步骤,但是步骤的顺序可以不同于所描绘的。还可以同时或部分同时地执行两个或更多个步骤。这种变型将取决于所选软件和硬件系统以及设计者的选择。所有这种变型都在本披露的范围内。同样地,可以用具有基于规则的逻辑和用以实现各连接步骤、处理步骤、比较步骤和判定步骤的其他逻辑的标准编程技术来实现软件实施方式。

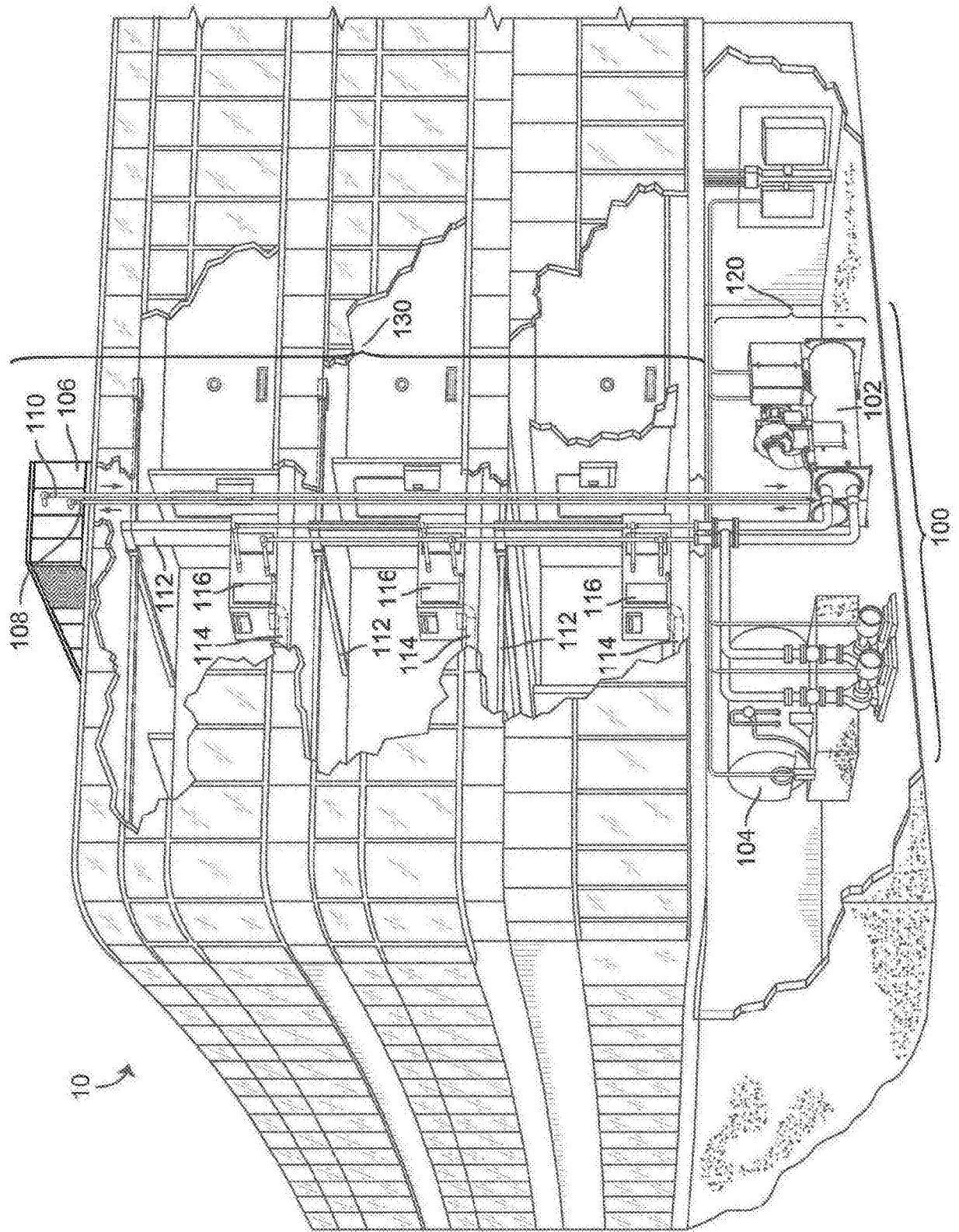


图1

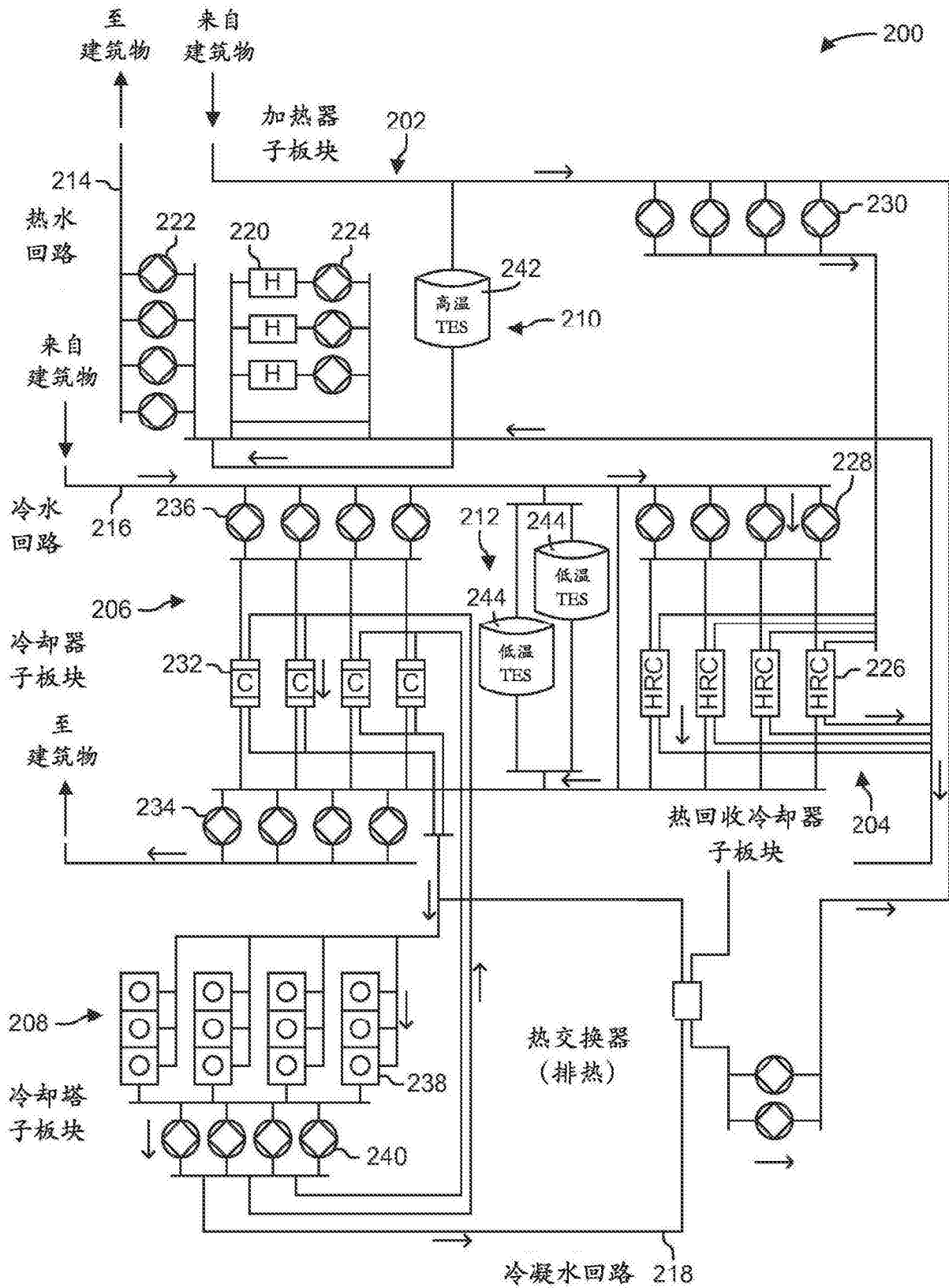


图2

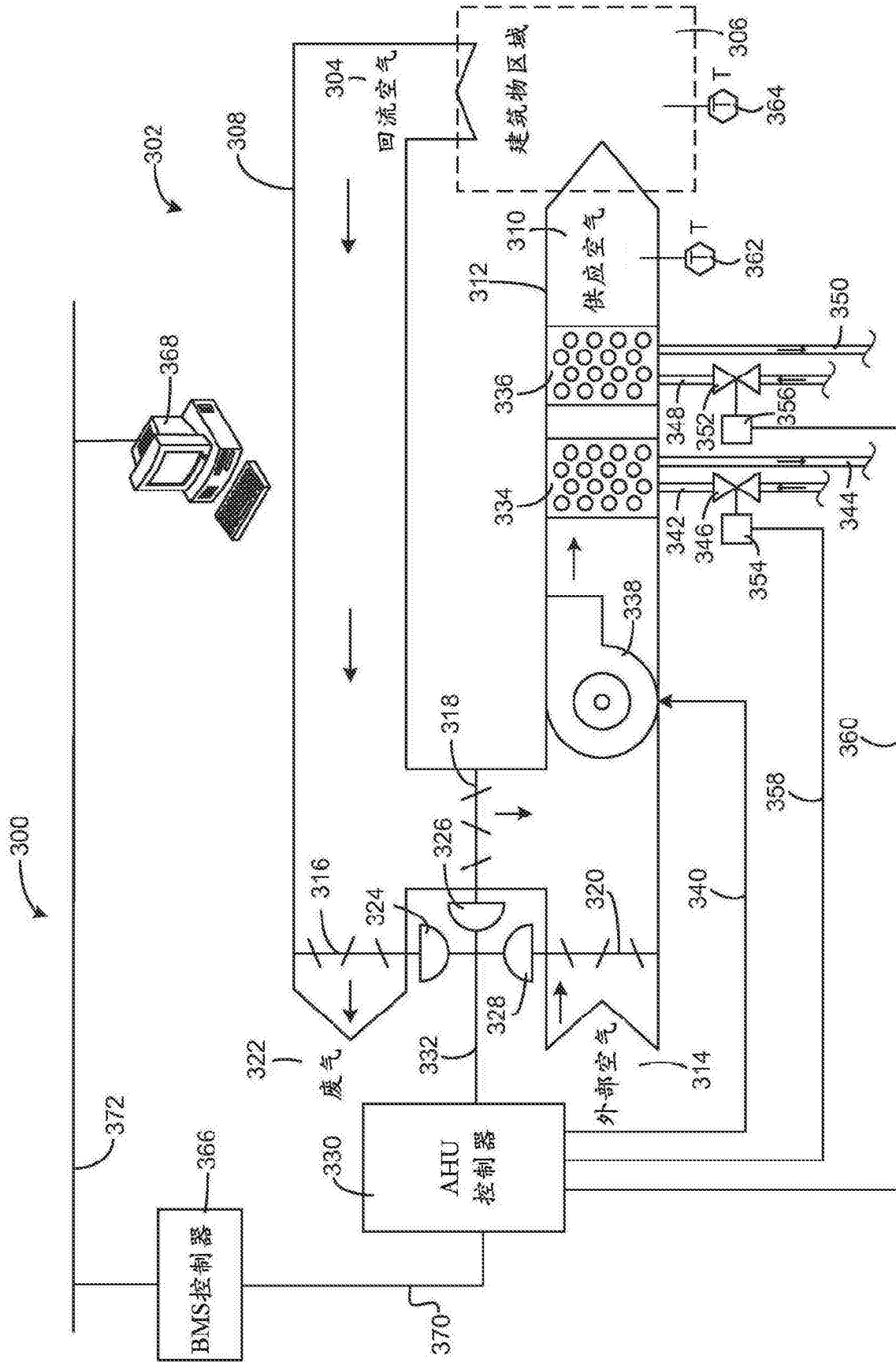


图3

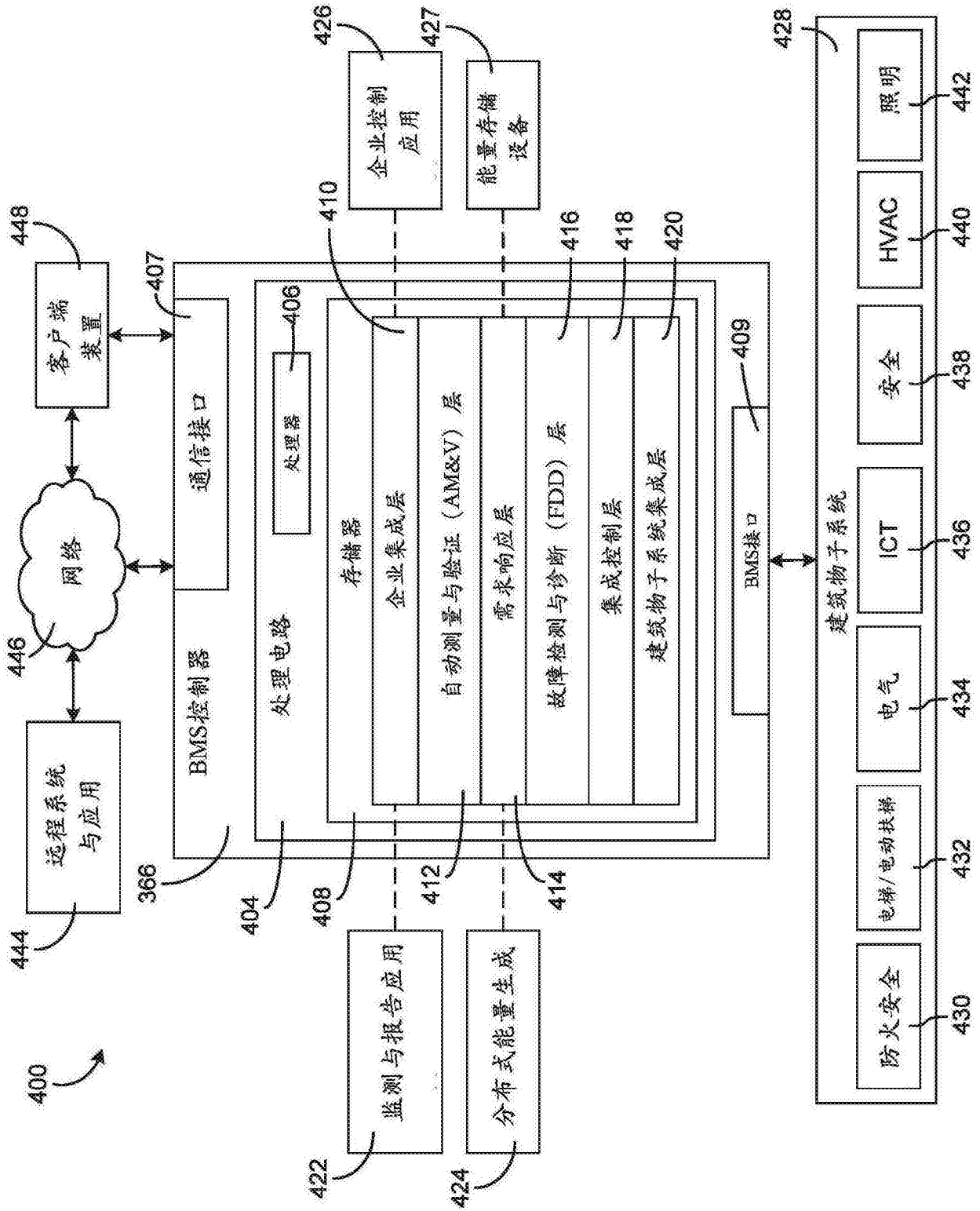


图4

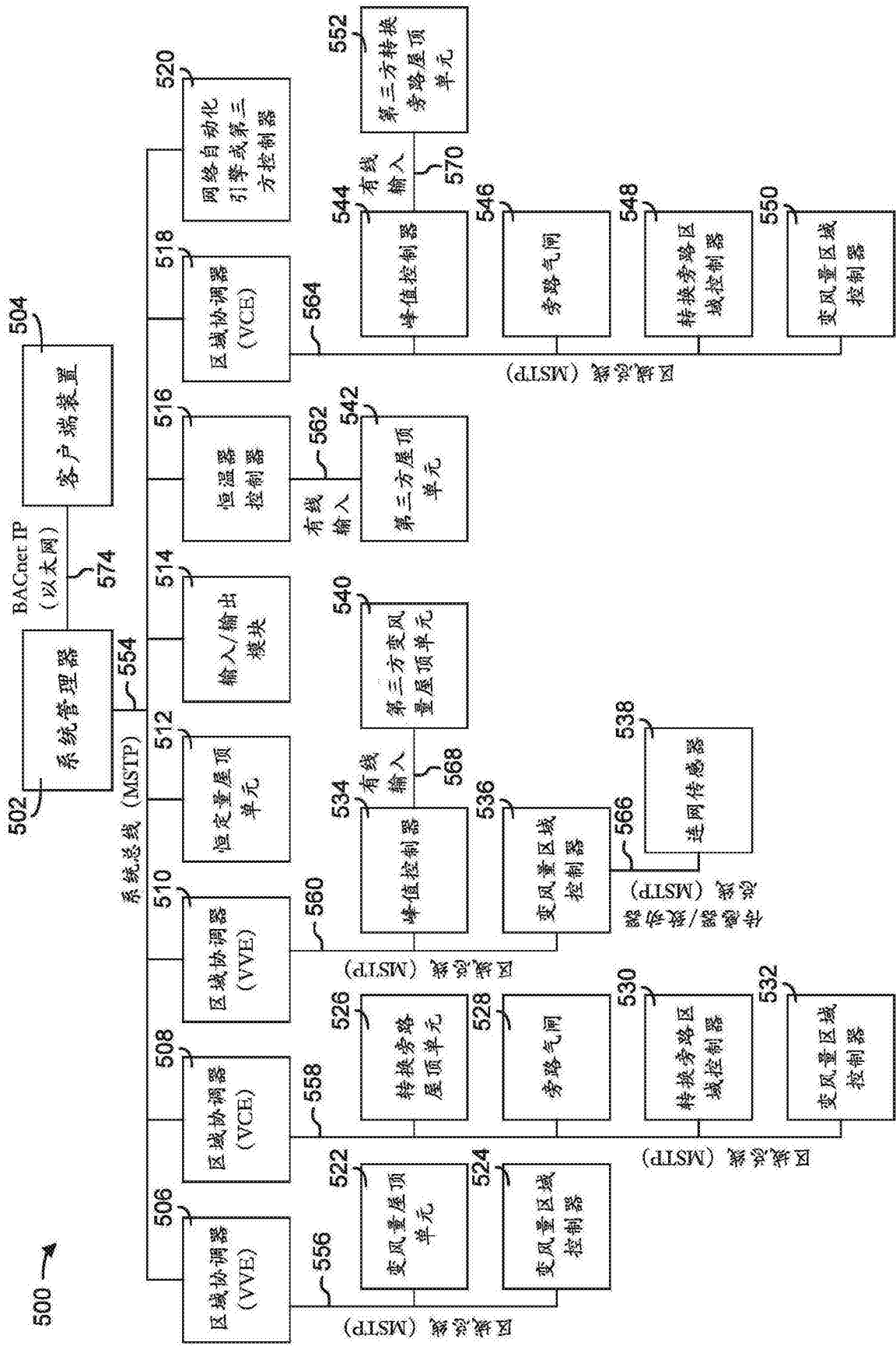


图5

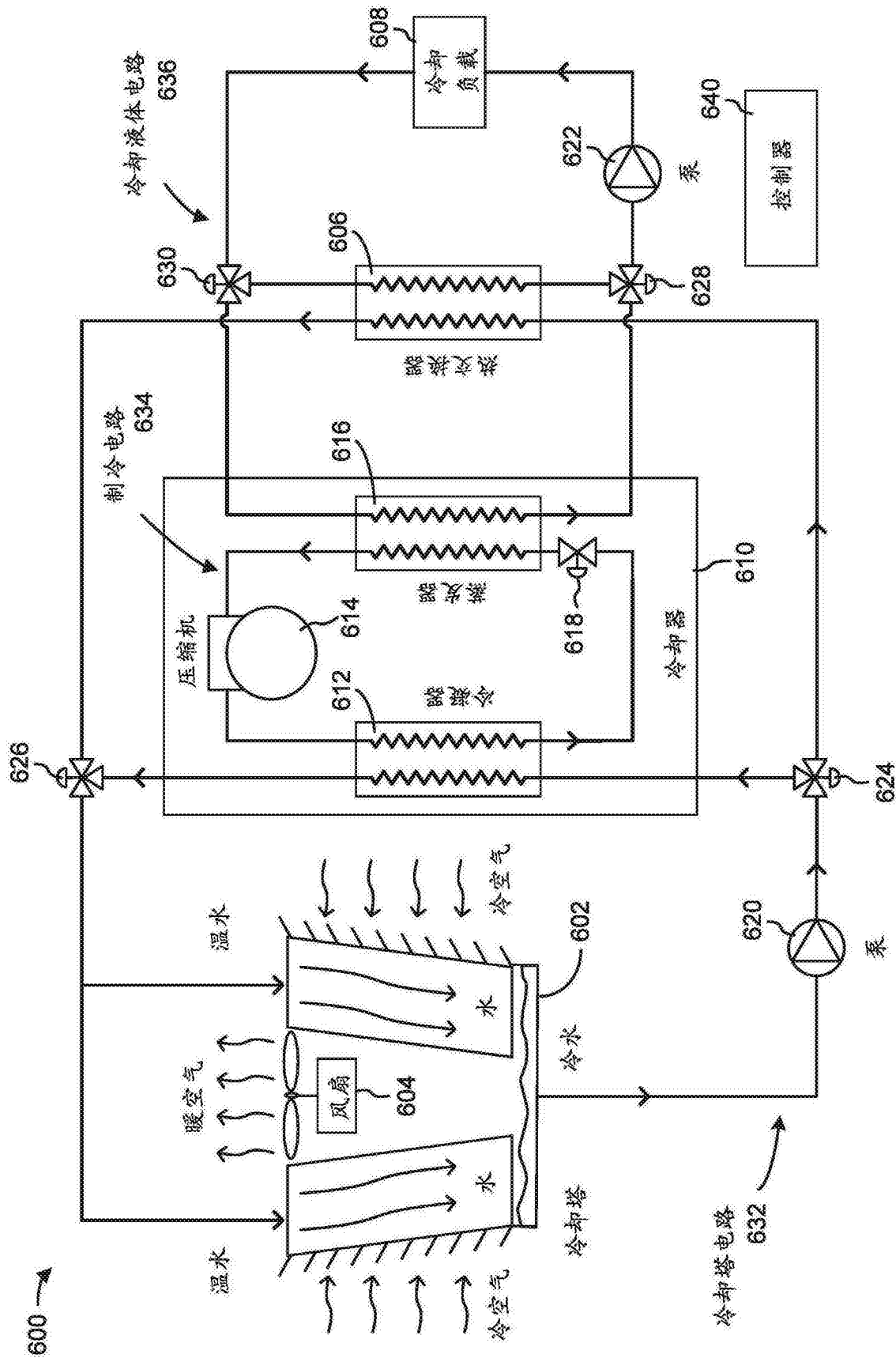


图6

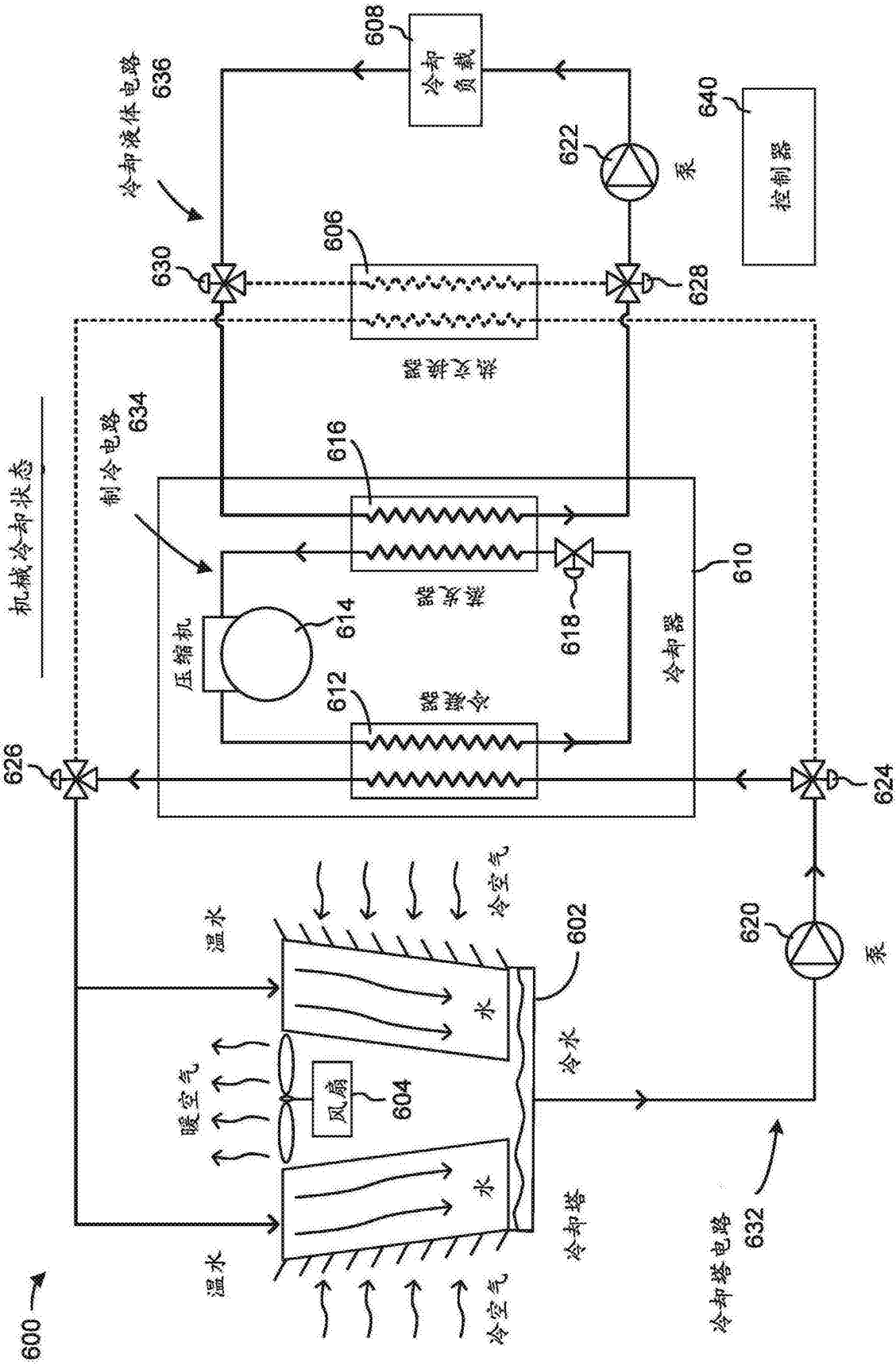


图7

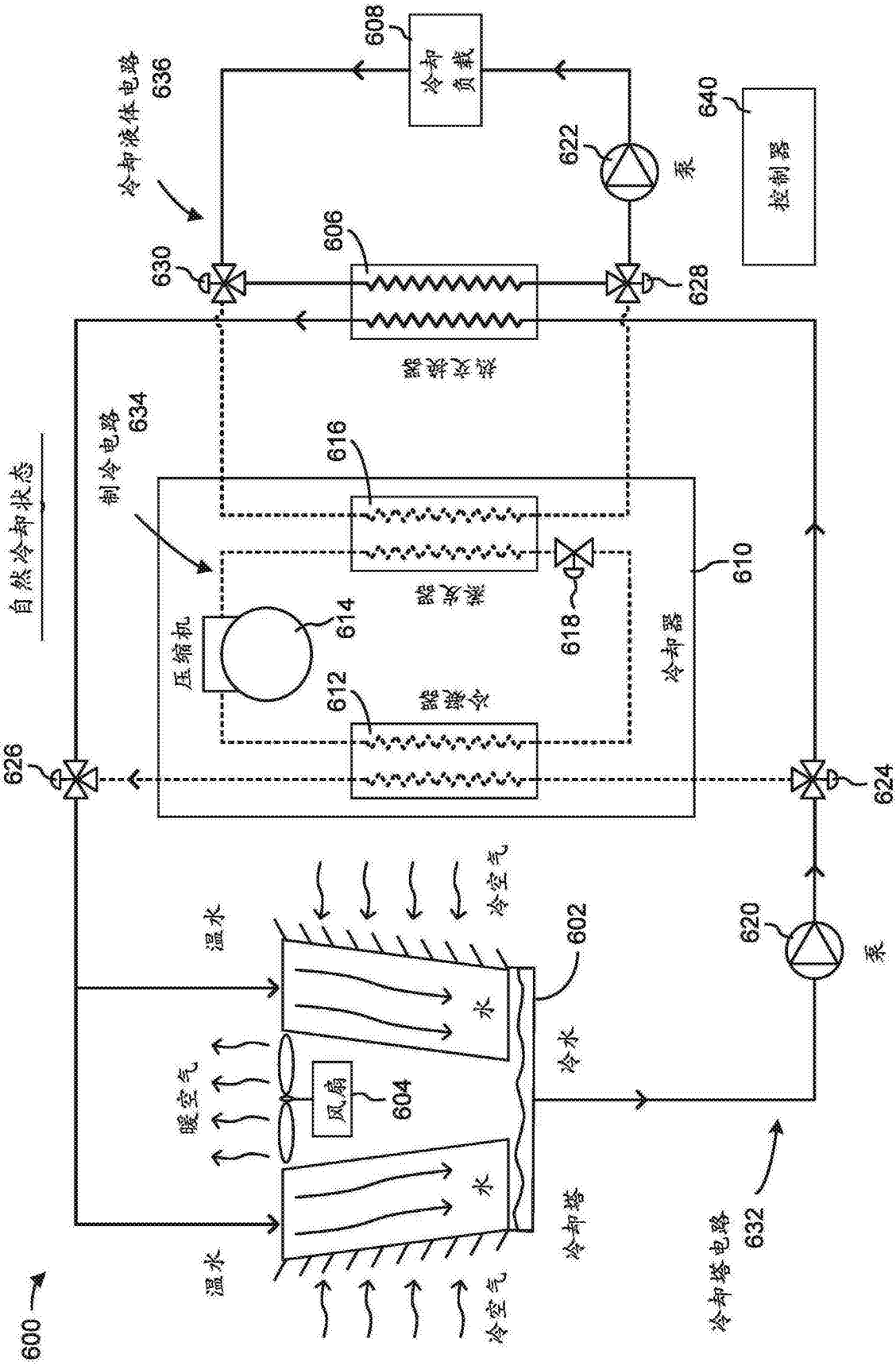


图8

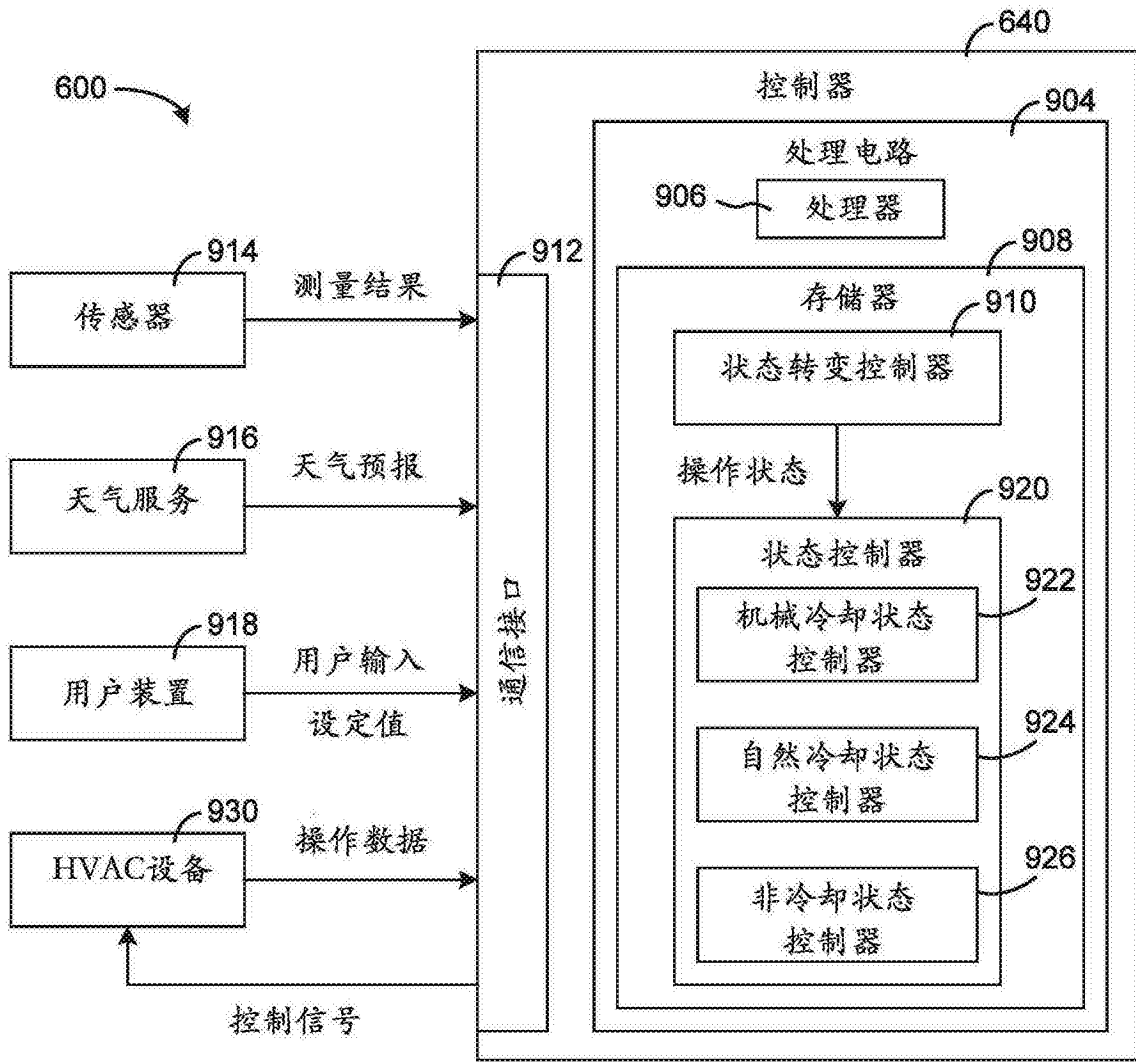


图9

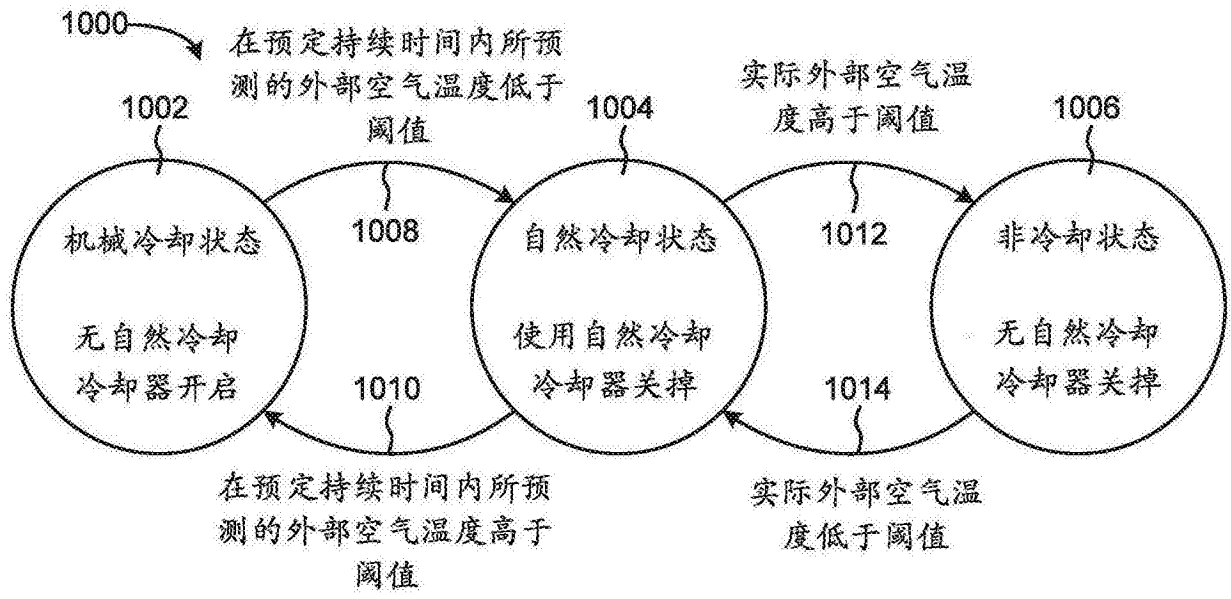


图10

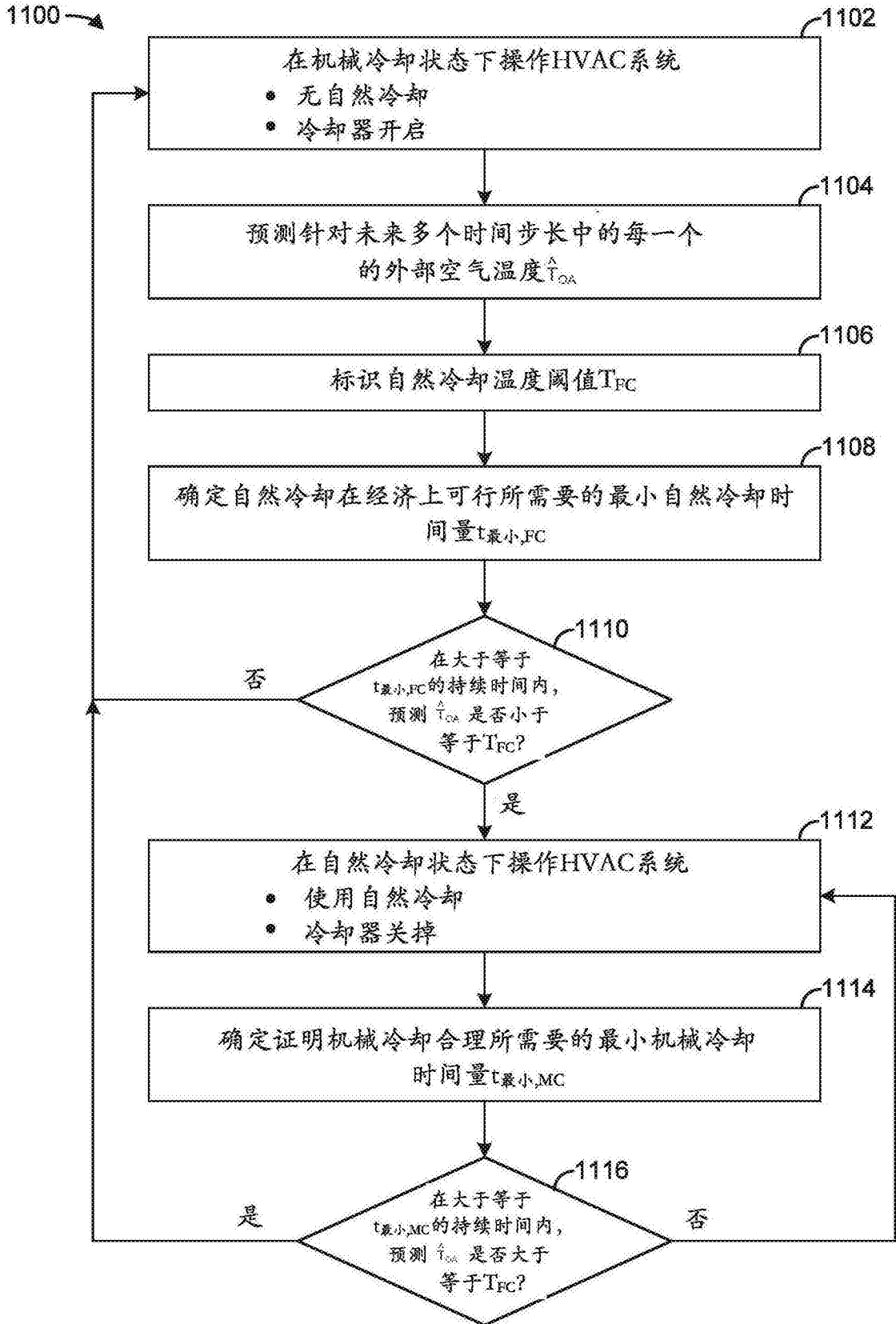


图11

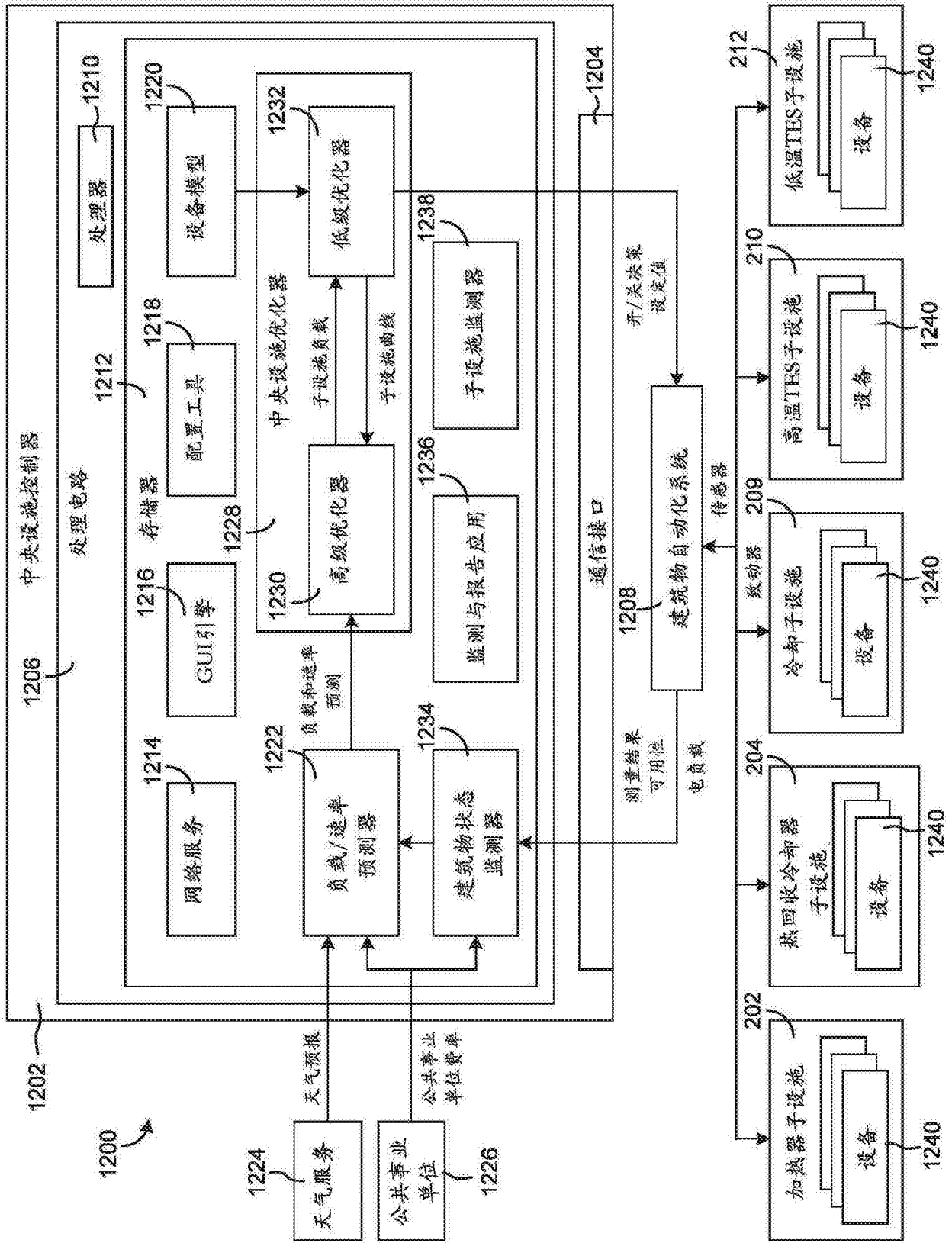


图12

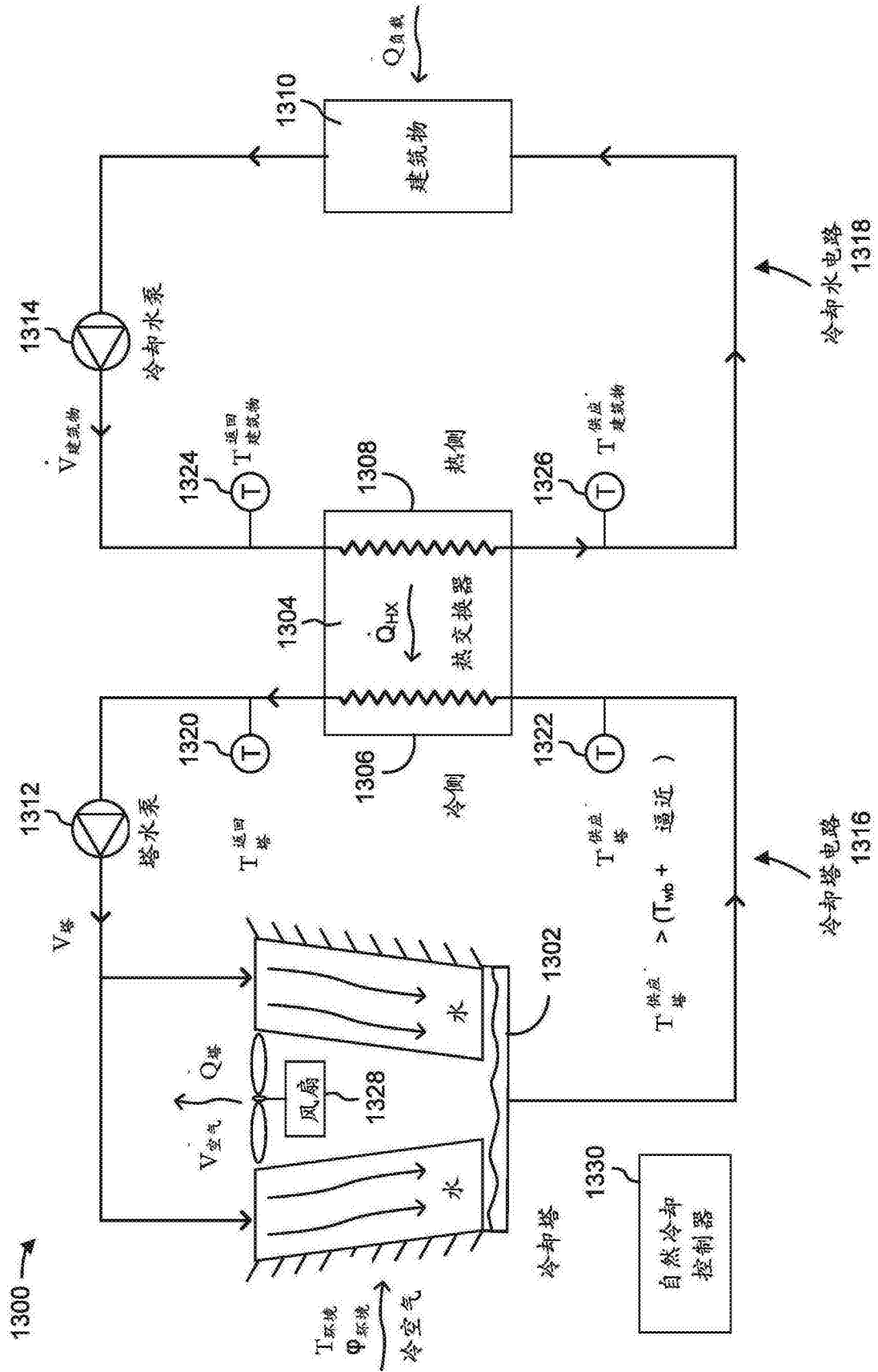


图13

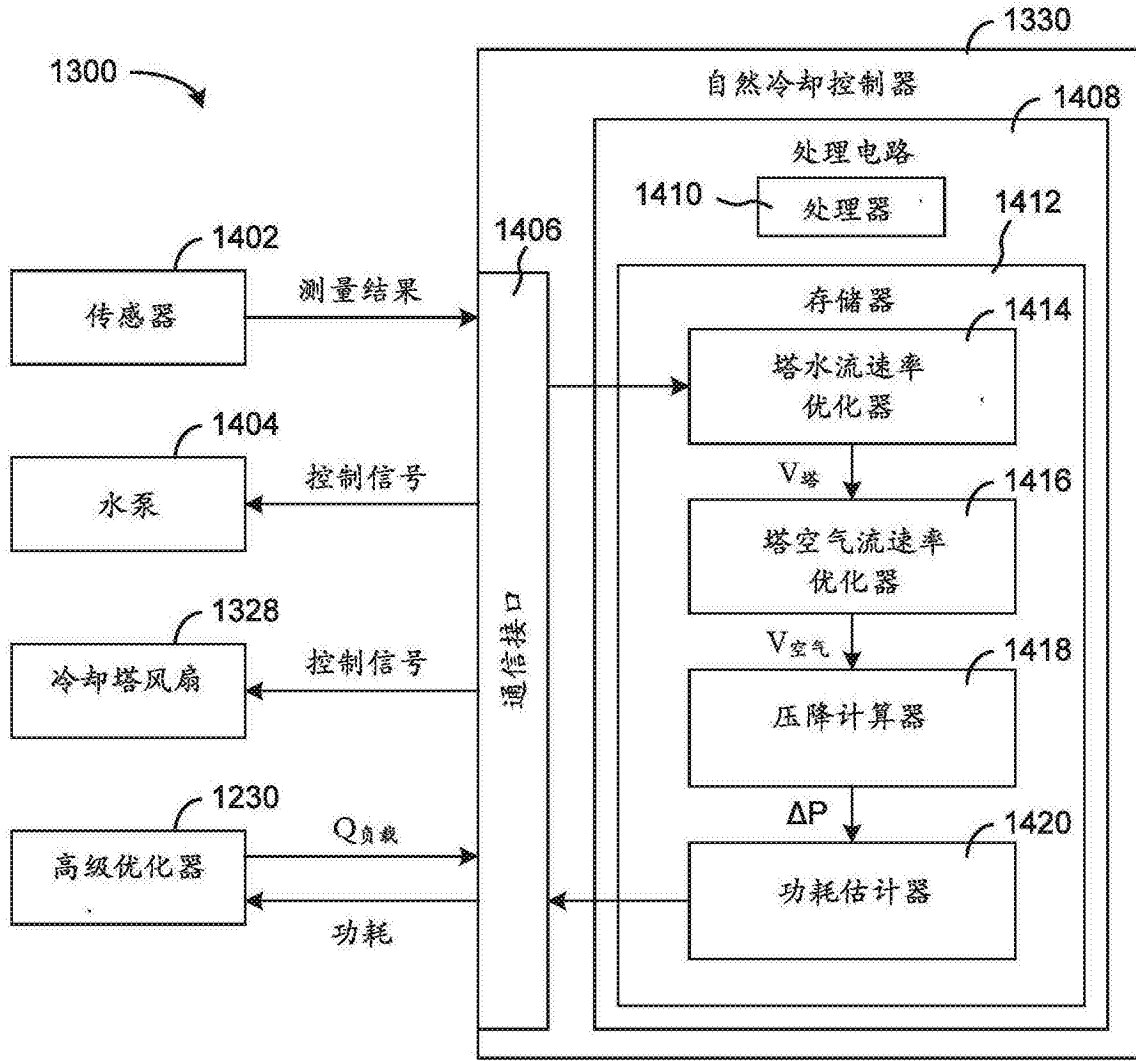


图14

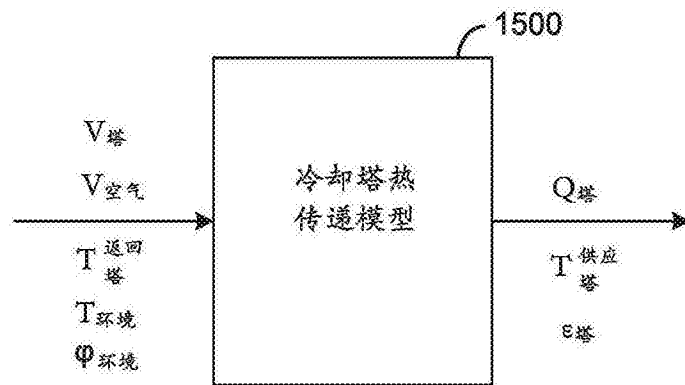


图15

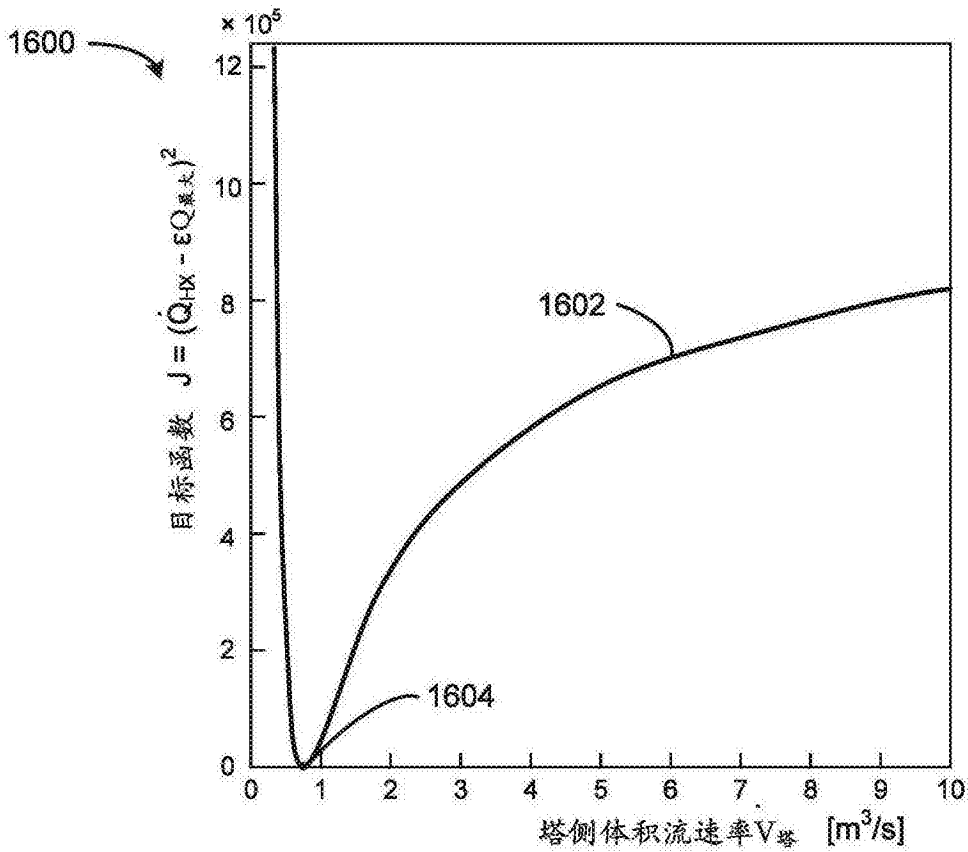


图16

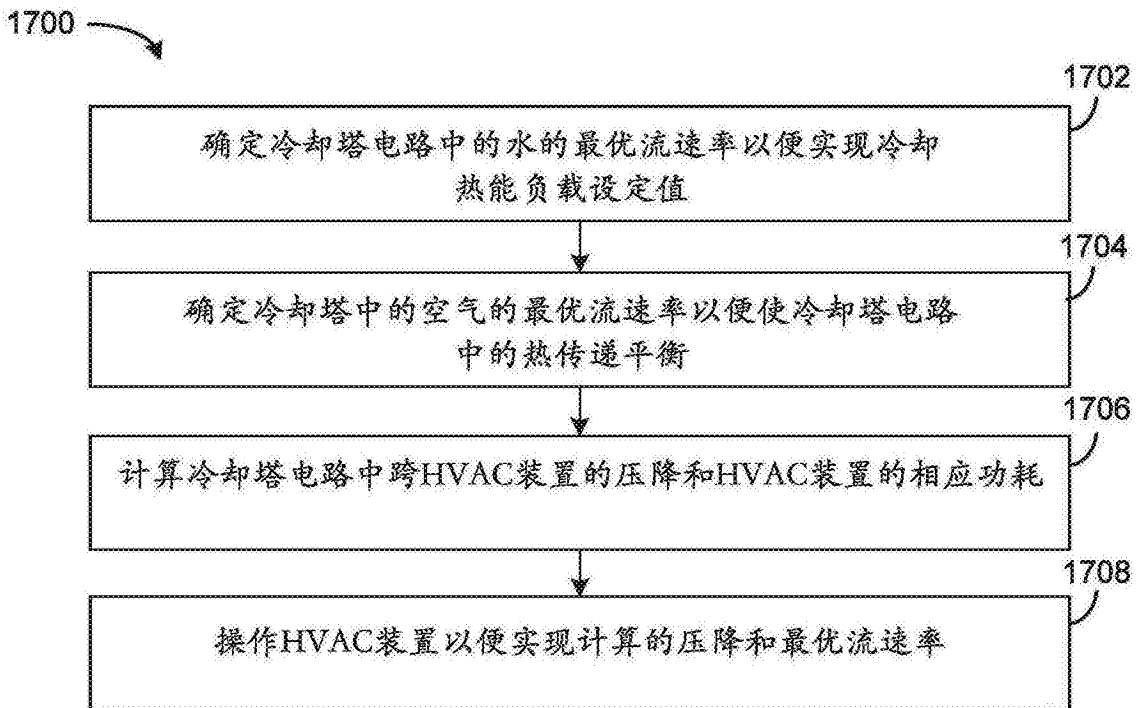


图17