

人民防空指挥工程蒸发冷凝式散热系统节能优化

文 / 江海濛 安徽省人民防空指挥信息保障中心

摘要：地下工程内部热量较高，导致温度较高，影响内部电子设备的运行。蒸发冷凝式散热具有热流密度较高、对周围环境污染较小、风道截面减少、容易安装与维护等优点，可以解决地下工程内部的散热问题。为此，文章从人民防空指挥工程的角度，探讨了地下工程散热方式，分析了蒸发冷凝式散热系统，并探讨了相关系统的能耗问题，提出了一些节能优化措施。旨在提升蒸发冷凝式散热系统的应用效果，满足人防指挥工程的需求。

关键词：人防工程；指挥工程；地下工程；蒸发冷凝式；散热系统；节能优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.024

引言

近年来，地下空间的开发、利用受到广泛关注，如人防工程、地下商场、地下能源站、地下数据中心以及城市轨道交通等。不仅能降低地面空间资源的依赖，也能缓解交通堵塞的问题，更好的节约能源。地下工程虽然具有不少优势，但由于设备、人员产生大量余热，会让工程内部温度升高，特别是部分密闭的地下空间，散热成为最棘手的问题。工程内的高温环境会让人体舒适度下降，也会增加数据机房、通信设备等故障率，影响地下工程的有效应用。因此，地下工程的散热问题成为关键。以人民防空指挥工程为例，该工程是实施战时人民防空指挥的重要场所，配备有较强的通信指挥和生存保障设备。由于大功率设备、信息化装备越来越多，且战时进驻多部门人员，相应增加了工程的散热需求。目前，

人防指挥工程散热系统的研究始终处于热门领域，如水冷散热、风冷散热、蒸发冷凝式散热等。其中蒸发冷凝式散热属于高效、环保的冷却技术，运用了热交换、冷凝与循环工作原理，实现快速散热。基于此，文章从人防指挥工程角度探讨蒸发冷凝式散热系统节能优化具有现实意义与价值，希望能解决人防指挥工程的散热问题，降低散热系统的运行能耗，满足战时掩体的基本需求^[1]。

一、人防指挥工程散热方式

一般的散热系统，是将风机、冷却塔等设备放置外界。人防指挥工程不同于传统建筑，放置外界容易产生红外暴露，也提高了被击毁的概率，影响工程的稳定运行。以下将探讨水冷散热、风冷散热、蒸发冷凝式散热的人防指挥工程散热方式，分析不同散热方式的优缺点。表1为三种散热方式的性能对比。

表1 三种散热方式的性能对比

| 方式 | 安全性 | 稳定性 | 散热能力 | 工程造价 | 适用情形 |
|---------|-----|-----|------|------|------|
| 水冷散热 | 较好 | 好 | 好 | 较大 | 长期 |
| 风冷散热 | 一般 | 一般 | 较好 | 巨大 | 长期 |
| 蒸发冷凝式散热 | 较好 | 较好 | 较好 | 较小 | 长期 |

（一）水冷散热

水冷散热是常见的散热方式，通过对循环水冷却冷凝器，冷凝器中的气态将转化为液态，热量最终经循环水排出。水冷散热有开式循环与闭式循环两种模式。开式循环是将外部水源、内部水源结合进行散热。由于循环水的用量较大，工程内部的水源很难满足需求，而采用外部水源容易被战时影响，无法使用外部水源，这也导致开式循环不适用于人防指挥工程。闭式循环是指冷却塔，将循环水的热量散发到工程外，虽然这种散热系统比较复杂，设备、管道较多，但运行过程具有较高的可靠性、平稳性，能满足人防指挥工程热量转移的要求。人防指挥工程采用闭式循环的优点在于，整个流体输送过程，成本费用较低，不会产生过多能耗。但也会面临载热密度小、传热温差小等问题。如果布置较大面积的冷却塔，则容易在战术暴露，遭受打击失效^[2]。

（二）风冷散热

风冷散热是利用风冷单元、巨大风量进行换热。该散热方式的特点是不再设立工程外冷却装置，主要以工程内部的引风、排风为主，散热结构相对简单、可靠。

但风冷散热在使用中也会面临一些问题，如风的载热密度较小，只有提高风量、风道截面才能有效散热，同时应用于人防指挥工程中，也需要布置长距离的地下引风、排风通道，提高了工程项目的造价成本与能耗，也容易在战时暴露。另外，风冷散热也容易受到地区温度、湿度条件的影响，稳定性较低，短时间很难处理大量新风。

（三）蒸发冷凝式散热

蒸发冷却分为直接蒸发冷却、间接蒸发冷却。直接蒸发冷却是指干燥空气、水直接接触、冷却，空气、水之间的传热、传质同时发生，且相互影响。其中一部分水蒸气通过吸收热量，让空气、水的温度降低，发生冷却效应。但由于人防指挥工程内部战时存在较高湿负荷，如果将含湿量的空气引入工程内，会对工程内的电子设备造成影响。因此，直接蒸发冷却不适用于空气湿度较高的人防指挥工程。间接蒸发冷却的散热方式，避免有效避免传热传质的相互影响，其中冷却介质和被冷却介质不直接接触。蒸发冷却技术具有低碳、经济、节能、健康的优势，但在使用过程不容易控制，稳定性较差。蒸发冷凝式散热是在蒸发冷却基础上，增加机械制冷，

如图 1 所示。蒸发冷凝式散热是将传统水冷式冷凝器与冷却塔分离，通过水蒸发吸热实现制冷剂冷凝冷却。运行过程，制冷剂会在管道冷凝，热量传递至水膜，蒸发吸热，之后通过与风机、空气换热，实现将工程内的热量散至外界^[3]。

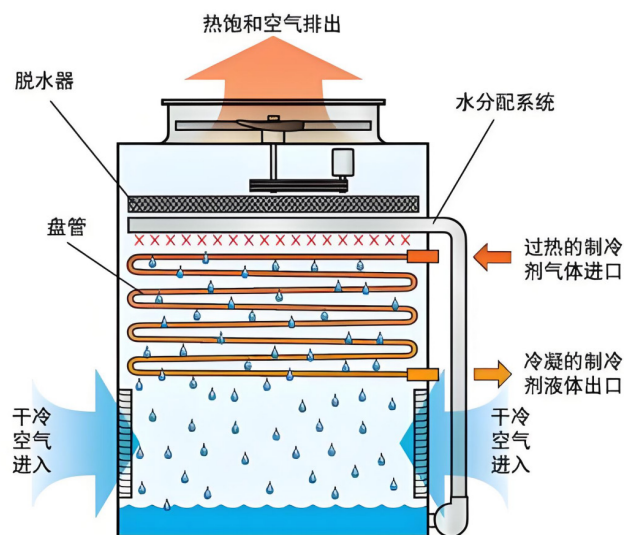


图 1 蒸发式冷凝器原理图

蒸发冷凝式散热是将风冷式、水冷式相结合，使冷凝器、冷却塔合二为一，省略了冷凝器到冷却塔的传递。该散热方式可以带走大量热量，热流密度较高，对周围环境污染较小，同时风道截面、风量大幅度减少，容易安装与维护。虽然蒸发冷凝式散热融合了多种散热方式，但长期使用后，容易出现结垢、腐蚀等问题。蒸发式系统与传统风冷式、水冷式系统能耗的比较如表 2 所示。

表 2 蒸发式系统与传统风冷式、水冷式系统能耗的比较

| 冷凝方式 | 风冷式 | 水冷式 | 蒸发式 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 冷凝温度 / °C | 45 | 40 | 38 |
| 单位冷量风机风量 / (m ³ / h) | 420 ~ 500 | 120 ~ 200 | 110 ~ 125 |
| 冷却水泵能耗 | — | 至少 20m 扬程 | 3 ~ 5m 扬程 |
| 单位冷量冷凝能耗 / kW | 0.026 | 0.038 | 0.014 |
| 系统 COP | 2.5 ~ 3.2 | 3.2 ~ 3.8 | 4.2 ~ 4.8 |
| 蒸发式冷凝对比节能 | 35% 以上 | 15% 以上 | |

二、人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统

蒸发冷凝式散热系统相比于传统散热系统，具有高效制冷、集成式、占地面积小、环境友好性高的优点。系统的制冷机组分为蒸发器、压缩机、蒸发式冷凝器、回热器、循环水泵等。

蒸发器是系统的核心组件，主要通过制冷剂液体汽

化吸收空气或水等载冷剂的热量，达到降温目的。其换热量 Q_e 公式如下：

$$Q_e = m_R(h_1 - h_6)$$

式中， m_R 为制冷剂的质量流量，kg/s； h_6 、 h_1 分别为蒸发器进出口制冷剂的比焓，kJ/kg。

压缩机是系统制冷循环的关键部件，起到压力提升、循环驱动的作用。如压缩机能将低压低温制冷剂蒸气，转化为高压高温的过热蒸汽，推动制冷剂在蒸发、冷凝、膨胀、吸气过程的持续流动，实现散热。

蒸发式冷凝器属于系统中蒸发器的制冷部件，促进蒸发器的热量交换，将制冷剂液体汽化，吸收热量，实现降温目的。

回热器是系统关键的热交换设备，能有效提升制冷系统的热效率、稳定性。回热器的工作原理是将蒸发器出口低温低压气态制冷剂与冷凝器出口高温高压液态制冷剂在回热器内进行热交换，其中液态制冷剂会处于过冷状态，而气态制冷剂会处于过热状态，最终通过高效循环实现散热^[4]。

循环水泵是系统热量转移、设备冷却的核心设备。比如在冷却循环期间，利用离心力，将冷却水从加压输送至冷凝器，经换热器降温后回流至水箱；蒸汽循环期间，通过将低压蒸汽吸至冷凝器，通过锅热交换的方式，使蒸汽冷凝为液体，形成散热的闭合循环。

三、人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统能耗问题分析

人防指挥工程引入蒸发冷凝式散热系统，能有效散热，减少对周围环境的污染，同时也能减少占地面积。但蒸发冷凝式散热系统的运行过程，能耗问题尤为突显。能耗问题的产生原因有很多方面，如设备自身原因、系统设计原因以及维护管理原因。以下将从人防指挥工程的角度，详细分析蒸发冷凝式散热系统能耗问题：

(一) 设备自身原因

人防指挥工程中，蒸发冷凝式散热系统可能会受到组成设备的影响，导致能耗较高。一方面，随着工程的使用部分设备过于老旧，如风机、冷却塔等，导致能效比较低，使系统运行过程产生较大的能耗。比如水泵和风机能耗约占制冷压缩机能耗的 7% ~ 8%，如果设备过于老旧，能耗占比还会有所提升。另一方面，部分蒸发冷凝器在工作过程，可能由于换热面积不足等，造成热传递效率低下，额外消耗了能耗^[5]。

(二) 系统设计原因

人防指挥工程应用蒸发冷凝式散热系统时，系统设计是关键。系统设计缺陷会影响系统整体的运行能耗。如在管道设计环节，缺乏结合区域实际，导致能量损失，额外增加能耗。再如系统在设计过程，可能热力计算不精准，预留余量不够，无法适应实际的温度波动、负荷变化、新增设备散热，增加了能耗消耗的占比。

（三）运维管理原因

人防指挥工程中采用蒸发冷凝式散热系统时，需要做好维护管理工作。是否进行周期性的维护管理会直接影响系统的节能效果。如系统在运行过程，可能出现管道堵塞、冷却塔积尘、风机故障等问题，如果未能及时处理，会由于散热效率被影响导致能耗增加。如系统运行过程缺乏对水流量、压差、能耗数据的监控则无法及时的发现散热系统异常的问题。

四、人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统节能优化建议

人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统的应用过程，会由于设备自身、系统设计以及运维管理等原因，额外增加能耗。基于此，以下将从节能优化角度，提出一些针对性解决建议，希望能提升人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统节能效果，满足长期、稳定运行的要求。

（一）设备升级与智能化控制

一是设备升级。人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统在使用过程，可能受设备的自身老旧、老化问题，增加能耗，影响制冷效率。工程维护管理部门可以从设备升级角度出发，结合设备的生产年代、老化程度以及能耗情况，根据固定资产报废处置相关规定，及时升级冷却塔、风机等核心设备，采购低能耗、高效能的新型设备，满足散热及降低能耗的要求。二是智能化控制。人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统节能优化中，要注重引入智能化控制。如在关键区域安装传感器、控制器，实时监控系统的运行状态，结合智能算法，自动调节设备的各项参数，降低人工操作的误差，实现节能优化的目标^[6]。

（二）系统设计优化

一是蒸发式冷凝器设计优化。一方面，在蒸发式冷凝器设计优化中，要注重增加传热面积，如根据实际情况，适当增加板间距、数量，不断提升换热效率。另一方面，蒸发式冷凝器设计优化中，可以在进风口设置填料预冷系统，减少冷凝器换热面积和机组尺寸，以降低能耗。二是管道布局设计优化。管道布局是否合理会影响运行能耗。一方面，要做好热负荷计算与参数选择，如结合人防工程的类型、面积以及使用功能，通过专业方式计算散热需求。结合人防工程特点，合理选择管道的管径以及连接方式，降低热损失、管道阻力。另一方面，要做好管材选择与安装规范。比如管材选择方面，可以选择耐压、防腐的管道材料，如塑料风管、玻璃钢，并做好防腐处理。再如管道布局方面，设计人员要做好区域的充分调研，减少弯管或分支，确保送风量最大化，实现节能优化，减少不必要的能耗成本^[7]。

（三）维护与能效管理

一是设备维护与运行管理。首先，有关部门要定期检查、清洗蒸发冷凝式散热系统的各个设备设施，如安排人员定期检查系统管道密封性情况，避免使用过程出现漏水问题；安排人员定期清洗管道、风机等设备，避免影响换热效率；定期针对进风滤网进行清洗更换，保证机组风量。其次，蒸发冷凝式散热系统运行期间，可

会遇到结垢问题，影响运行能耗。比如工程维护管理部门要做好结垢预防工作，比如采用悬臂型冷凝器减少铜管伸缩应力，降低结垢风险，同时也要加强结垢处理，避免影响系统运行，额外增加能耗。最后，工程维护管理部门要建立预防性维护机制，如通过物联网、大数据等技术实时采集系统运行的各项数据，之后根据数据反馈建立针对性的运维措施，及时处理一些故障隐患，降低对系统运行能耗的影响。二是系统能效管理。工程维护管理部门在蒸发冷凝式散热系统运行过程，要做好系统能效管理。比如在关键位置安装物联网传感器，实时监控系统的温度、压力等参数，为设备的自动化调节提供支持。同时安排人员定期对蒸发冷凝式散热系统的运行能耗进行评估，及时找出系统运行中的高能耗环节，给予针对性优化改进，以降低系统的运行能耗^[8]。

结语

综上所述，人防指挥工程散热方式包括水冷散热、风冷散热、蒸发冷凝式散热等。其中蒸发冷凝式散热相比于其他散热方式，优势明显，可以应用于人防指挥工程的散热环节。但蒸发冷凝式散热系统运行过程会产生额外能耗，增加了系统的运行成本。为此，文章分析了人防指挥工程蒸发冷凝式散热系统能耗问题，提出了一些针对性的解决建议，比如在关键区域安装传感器、控制器，实时监控系统的运行状态，结合智能算法，自动调节设备的各项参数；结合人防指挥工程特点，合理选择管道的管径以及连接方式，降低热损失、管道阻力；通过物联网、大数据等技术实时采集系统运行的各项数据，之后根据数据反馈建立针对性的运维措施等。希望上述探讨与分析能为蒸发冷凝式散热系统的节能优化提供参考，满足人防指挥工程的要求。未来，也将继续探讨人防指挥工程散热方式，希望能推动相关领域的不断发展。

参考文献

- [1] 杨海，黄福强，李圳培，等. 大型地下式水电站主变冷却器控制柜散热问题分析及处理 [J]. 水电与新能源，2024，38(11): 45-48.
- [2] 刘琪. 地下工程蒸发冷凝式散热系统节能优化 [D]. 军事科学院，2024.
- [3] 王杰. 基于热侧水冷散热方式的热电空气制水系统的性能研究 [D]. 浙江科技大学，2024.
- [4] 何龙. 一侧出口受限的地下隧道自然通风散热数值研究 [J]. 制冷与空调 (四川)，2023，37(03): 382-386.
- [5] 范杭茹. 一种水冷散热的设计方法及其仿真 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版)，2020，21(03): 94-99.
- [6] 吴本南. 风冷散热系统风机安装方式研究 [J]. 低温与超导，2019，47(10): 87-90+96.
- [7] 刘旭辉. 城市地下综合管廊热力舱散热及通风研究 [D]. 华北电力大学 (北京)，2019.
- [8] 程杨，张翼，刘海波，等. 一种新型蒸发冷却塔在地下工程中的应用研究 [J]. 洁净与空调技术，2017，(02): 106-109.