

循环水养殖车间全年负荷计算与能耗分析

张海琳¹, 吴娟¹, 许陆顺², 张羽², 张忠斌², 赵娟²

(1. 中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 循环水养殖车间内部负荷不仅与建筑的冷热负荷相关, 还涉及到养殖池的热负荷. 针对养殖车间全年负荷以及能耗量设计出了一套计算方案. 以福建省南平市某养殖车间为例, 在车间内部的水池温度和空气温湿度一定的情况下, 对全年负荷进行了计算. 循环水养殖车间热负荷占养殖车间能耗的一大部分, 其中补水加热负荷所占比例较大. 在此基础上, 通过改变养殖池温度和车间环境温度, 分析了养殖特定鱼类的耗能情况. 结果表明, 养殖池温度每提高 1 °C 会使养殖平均日能耗量约提升 6.9%, 总能耗约降低 2.6%.

[关键词] 循环水养殖, 全年负荷, 计算方法, 能耗量, 温湿度

[中图分类号] S964.3; TU834 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2023)04-0050-07

Calculation of Annual Load and Energy Consumption Analysis in Recirculating Aquaculture Systems(RAS) Workshop

Zhang Hailin¹, Wu Juan¹, Xu Lushun², Zhang Yu², Zhang Zhongbin², Zhao Juan²

(1. China Construction and Installation Group Co., Ltd, Nanjing 210023, China)

(2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The internal load of a recirculating aquaculture system (RAS) workshop is not only related to the building's heating and cooling load but also involves the thermal load of the fish tanks. In this article, a calculation scheme for the annual load and energy consumption variation of the aquaculture workshop is designed. Taking a certain aquaculture workshop in Nanping, Fujian Province as an example, the annual load is calculated under the conditions of constant pond temperature and indoor air temperature and humidity. The thermal load of the RAS workshop accounts for a large proportion of the energy consumption of the aquaculture workshop, with the heating load for water makeup being the most significant. Based on this, the energy consumption of a specific fish species is analyzed by changing the temperature of the fish tanks and the workshop's ambient temperature. The results show that increasing the temperature of the fish tanks by 1 °C increases the average daily energy consumption of aquaculture by about 6.9% and reduce the total energy consumption by about 2.6%.

Key words: recirculating aquaculture, annual load, computing method, energy consumption, temperature and humidity

循环水养殖模式建立在生物学、环境科学、建筑科学等多学科基础上, 是多学科的交汇和应用^[1]. 与传统养殖相比, 循环水养殖具有养殖环境稳定性、便于管理等特点^[2]. 为加快水产养殖业转型升级和绿色发展, 陆基高位圆池循环水养殖得到了广泛应用^[3-4]. 另一方面, 由于循环水养殖车间具有特殊性, 将车间内温湿度控制在一定范围内尤为重要^[5]. 养殖车间内部含湿量高达 80%, 对除湿的需求较大, 故需要采用高效的除湿技术, 例如一体式除湿热泵空调^[6]、膜基全热交换器机械除湿^[7]、太阳能辅助热泵除湿^[8]等.

对于工厂车间这类大空间建筑垂直方向上温度梯度较大, 屋顶聚集了大量热, 建筑供冷暖所消耗的能量是非常可观的^[9], 因此更要注重节能. 为此, 该类建筑需要采用一些节能措施, 例如, 冰蓄冷技术^[10]、热泵技术^[11]. 环境温度和供水温度也会影响设备机组, 还需要进一步评估机组的可靠性和节能性^[12-13]. 循

收稿日期: 2023-01-13.

通讯作者: 张忠斌, 博士, 教授, 研究方向: 数据中心(建筑)气流组织和能效管理、制冷空调及冷链装备性能优化. E-mail: zhangzhongbin@163.com

环水养殖车间的负荷不同于其他工厂车间,综合考虑车间的养殖规模,规定车间内空气温度高于养殖池温度 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,车间内相对湿度为 75% 。另外,车间内的负荷不仅与围护结构传热负荷和新风负荷有关,还涉及到养殖池预热负荷、养殖池补水加热负荷以及维持养殖池温度恒定所需的热负荷等。到目前为止,很少有循环水养殖车间对全年负荷计算方面的研究。本文针对循环水养殖车间全年负荷的计算方法和养殖特定成鱼的能耗量及可靠性展开分析研究,对其全年负荷和能耗量设计出一套计算方案。

1 养殖池热负荷计算方法

一般来说,养殖温水性鱼类最适合生长的环境温度为 $25\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14],较低的水温会使鱼类生长缓慢^[15],过高的水温则会使鱼类死亡。若鱼类遇到水温瞬间变化过大的情况,也会严重损害鱼类机体。因此,为了考虑养殖效益,应选择合适的水温以供鱼类生长。要使水温维持在一定的范围内变化,这就需要对养殖池进行加热处理。

1.1 养殖池预热负荷

养殖池初次注水温度一般较低,需要对其进行加热处理,养殖池水预热所需热量 Q_c ,

$$Q_c = \frac{c_w \rho_w V_w (t_c - t_z)}{\tau} \quad (1)$$

式中, Q_c 为养殖池水初次注水加热所需热量,kJ; c_w 为水的比热容,kJ/(kg· $^{\circ}\text{C}$); ρ_w 为水的密度,kg/ m^3 ; V_w 为养殖池内水的体积, m^3 ; t_c 为养殖池温度, $^{\circ}\text{C}$; t_z 为注水初始温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为养殖池初次注水的加热时间,s。

1.2 养殖池补水加热负荷

养殖池补水量 W_b 主要由两部分组成,即养殖池水的蒸发量 W_z 和从循环水处理池排掉的废水量 W_p ,故养殖池补水量,

$$W_b = W_z + W_p \quad (2)$$

式中,养殖池水蒸发量 W_z 计算公式参考文献[16],

$$W_z = \frac{1}{\beta} \rho (0.017 4v_f + 0.002 29) (P_w - P_i) A_c \frac{B}{B'} \quad (3)$$

式中, W_z 为从池水面产生的水蒸汽量,kg/h; β 为压力换算系数,取 133.32 Pa ; ρ 为水的密度,kg/L; v_f 为蒸发表面空气流速,m/s; P_w 为相应水表面温度下的饱和空气的水蒸气分压力,Pa; P_i 为车间内空气温度对应的水蒸气分压力,Pa; A_c 为池水面面积, m^2 ; B 为标准大气压力,Pa; B' 为当地的大气压力,Pa。

循环水系统可以有效处理鱼类产生的废水,并将池内水质控制在合适范围^[17]。每小时从循环水处理池排掉的废水量 W_p ,一般取养殖池总水量的 1% 左右。

养殖池补水加热所需热量 Q_b ,

$$Q_b = c_w W_b (t_c - t_z) \quad (4)$$

式中, Q_b 为养殖池水补充水加热所需热量,kJ; W_b 为养殖池水补充水量,kg/h。

1.3 维持养殖池恒温所需热负荷

剧烈的水温变化会使鱼类难以进行适应性生理调节,身体代谢过程易发生紊乱,影响鱼类的摄食与生长,所以维持养殖池恒温至关重要^[18]。维持养殖池恒温所需热负荷 Q_h 与养殖池水面蒸发的潜热量 Q_q 、室内空气向池水传递显热量 Q_x 以及通过养殖池池壁、池底和输水管道的导热热量 Q_i 有关^[19]。养殖池水面蒸发的潜热量 Q_q 可以采用蒸发水量与水的汽化潜热采用式(4)进行计算蒸发的潜热。

室内空气向池水传递显热量 Q_x ,

$$Q_x = \alpha_x (t_a - t_c) A_c \quad (5)$$

式中, Q_x 为室内空气向池水传递显热量,kJ; α_x 为空气与池水表面的对流换热系数,通过池水表面空气流动情况,进一步考虑了空气流速,根据文献[20]此处对流换热系数取 $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; t_a 为循环水养殖车间空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由于养殖池池壁、池底和输水管道的导热温差较小并且导热热阻较大,一般可以忽略不计。若遇到导热温差较大的情况,可由常规导热公式计算导热热量 Q_i ,

$$Q_i = k_i(t_a - t_c)A_i. \quad (6)$$

式中, Q_i 为各部分的导热系数, kJ; k_i 为传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_i 为传热面积, m^2 .

维持池水温度所需热负荷 Q_h ,

$$Q_h = Q_q - Q_x + Q_i. \quad (7)$$

2 养殖车间负荷计算方法

为了避免池水的过度蒸发, 养殖车间的温度尽量不过高, 以减少车间空气对水表面的温度差异. 另一方面, 适当增加车间内的湿度, 可以减少空气中水蒸气分压力的差异, 从而降低蒸发速率. 此外, 通过定期监测养殖池水的温度、湿度和蒸发速率, 并根据需要做出及时调整, 否则会导致耗热量和排除余湿的风量增大^[21]. 此外, 为节约能耗, 车间内空气温度也不易过高. 通过计算出养殖车间内的负荷, 可以选用空调设备对其车间内部环境进行合理调节. 循环水养殖车间内部负荷计算主要包括 3 个方面, 即新风负荷、夏季冷负荷和冬季热负荷.

2.1 新风负荷

新风负荷与新风量、室外空气焓差以及车间内空气密度有关, 新风负荷 Q_{xf} 为,

$$Q_{xf} = L\rho_a(i_n - i_w). \quad (8)$$

式中, Q_{xf} 为新风负荷, kW; L 为养殖车间新风量, m^3/s ; ρ_a 为空气的密度, kg/m^3 ; i_n 为室内空气焓值, kJ/kg; i_w 为室外空气焓值, kJ/kg.

通过多次现场设计和调研, 循环水养殖车间内系统新风量 L 为,

$$L = d_f Va_1 a_2 a_3. \quad (9)$$

式中, L 为新风量, m^3/h ; d_f 为养殖车间内空气清新度, 一般取 0.3~0.5, l/h; V 为养殖车间的体积, m^3 ; a_1 为环境影响系数, 一般取 1.05~1.1; a_2 为送排风方式影响系数, 上送方式取 1.0, 下送方式取 0.9; a_3 为养殖水池密度影响系数, 一般取 0.9~1.2, 部分经验参数参考文献[22].

2.2 夏季冷负荷

养殖车间内部冷负荷主要包括通过围护结构传热形成的冷负荷、机组散热形成的冷负荷、灯光照明散热形成的冷负荷. 由于循环水养殖的模式是工业化程度最高的一种^[23], 设备自动化程度较高, 所需人员较少, 故可不计人员散热形成的冷负荷.

通过围护结构温差传热形成的冷负荷 Q_{wx} ,

$$Q_{wx} = \alpha KF(t_n + \delta - t_w). \quad (10)$$

式中, α 为修正系数; K 为围护结构传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F 为围护结构面积, m^2 ; t_n 为室内温度, $^\circ C$; t_w 为室外温度, $^\circ C$; δ 为地点修正系数, $^\circ C$.

灯具散热形成的冷负荷 Q_d 参考文献[24],

$$Q_d = n_1 N_1 X_r. \quad (11)$$

式中, n_1 为同时使用系数, 一般取 0.6~0.8; N_1 为灯具功率, W; X_r 为灯具散热的冷负荷系数.

设备散热形成的冷负荷 Q_s ,

$$Q_s = n_1 n_2 n_3 \frac{N_2}{\eta}. \quad (12)$$

式中, n_1 为同时使用系数, 一般取 0.5~1.0; n_2 为安装系数, 一般取 0.7~0.9; n_3 为负荷系数, 一般取 0.4~0.5; N_2 为设备总功率, W; η 为电动机的效率.

由于车间外窗无任何遮阳设施, 所以透过外窗形成了太阳辐射, 辐射传热形成的冷负荷 Q_r ,

$$Q_r = FX_g X_d J_{w_r}. \quad (13)$$

式中, F 为计算面积, m^2 ; X_g 为窗的构造修正系数; X_d 为地点修正系数; J_{w_r} 为透过无遮阳设施窗玻璃太阳辐射的冷负荷强度, W/m^2 .

其中, 式(11)~式(13)中各种修正系数的来源参考文献[24].

2.3 冬季热负荷

通过围护结构传热形成的热负荷 Q_{wd} ,

$$Q_{wd} = KF(t_n - t_w)\alpha(1 + \beta). \quad (14)$$

式中, K 为围护结构传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F 为围护结构面积, m^2 ; α 为温度修正系数; β 为朝向修正系数. 冷风渗透形成的热负荷 Q_f 参考文献[25],

$$Q_f = 0.278c_a\rho_a V_a(t_n - t_w). \quad (15)$$

式中, c_a 为空气的定压比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; V_a 为冷空气体积, m^3 .

$$V_a = L_i l n. \quad (16)$$

式中, L_i 为单位长度渗透量, $m^3/(m \cdot h)$; l 为门、窗缝隙的计算长度, m ; n 为渗透空气量的朝向修正系数.

3 工程实例

3.1 工程概况

本工程为福建省南平市某渔业产业园循环水养殖厂成鱼车间,总建筑面积约为 24 668.16 m^2 ,建筑高度约为 7.5 m,共一层. 如图 1 所示,循环水处理车间位于本建筑中间部分,面积约为 5 330.75 m^2 ,水处理池区域面积约为 2 897.8 m^2 ,共有水处理池 24 个,每个水处理池的尺寸为 10 m×8 m×1.5 m. 两个循环水养殖车间对称分布在本建筑南北两侧,每个车间面积约为 8 821.9 m^2 ,共有圆形养殖池 192 个,每个养殖池的半径为 4 m,深度为 1.5 m.

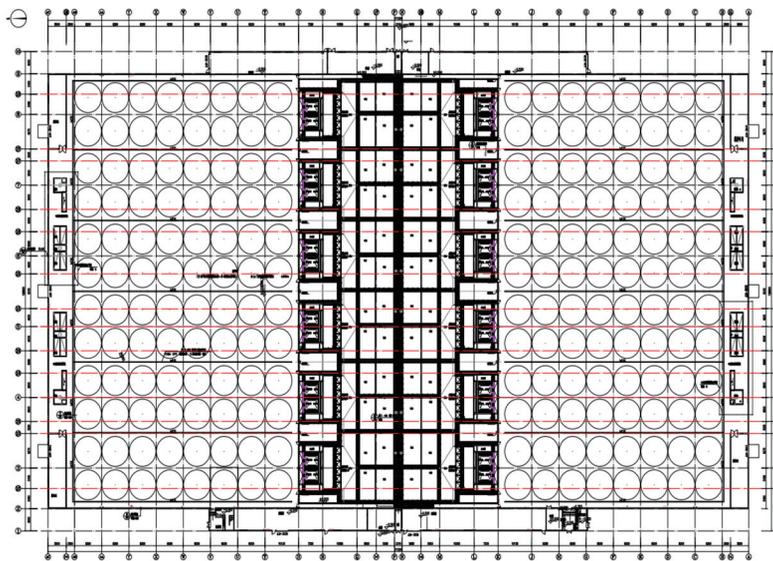


图 1 循环水养殖车间平面图

Fig. 1 The plan of circulating water breeding workshop

3.2 养殖车间及其系统计算参数

对于养殖车间及养殖系统的计算参数,本文根据该养殖厂的养殖鱼种类以及该养殖厂的规模综合考虑得出,如表 1 所示. 在此状态下,空气中水蒸气的分压力为 3.37 kPa,池水温度为 29 $^\circ C$. 在一个大气压下,水表面包络层内饱和水蒸汽的压力约为 0.004 MPa,所以池水处于蒸发状态.

3.3 全年负荷分析

本文选取南平市 2017 年 3 月至 2022 年 2 月,共 5 年的逐时气温,资料来自 WheatA 软件. 根据数据计算出了当地的年平均逐时气温值,如图 2 所示. 夏季高温持续时间短,基本维持在 30 $^\circ C$ 左右,最高温度可达 35 $^\circ C$. 在夏季只有极少数的时间会出现室外工况高于车间内部设计工况的情况,与循环水养殖车间内部设计温度相比,夏季工况对车间内部环境温度影响较小. 在过渡季节以及冬季,室外气温下降幅度较大并且室外环境均低于养殖车间内部设计温度,在冬季室外温度可降低至 2 $^\circ C$ 左右. 较低的室外环境会使养殖车间内部温度有较大的波动,为了保障养殖车间

表 1 养殖车间及养殖系统计算参数

Table 1 Calculation parameters of the breeding workshop and breeding system

参数	数值
养殖池水温度/ $^\circ C$	29
室内空气温度/ $^\circ C$	31
室内空气相对湿度/%	75
室内平均风速/(m/s)	2
养殖池补水初温/ $^\circ C$	16

内鱼类的存活率以及养殖效益,所以对养殖车间内部补充适当的热负荷是尤为重要的。

以该循环水养殖车间为例,采用式(10)计算所需的新风量,该养殖车内部新风量约为 47 205.6~60 443.1 m³/h. 文中提出的新风量计算方案,在保证循环水养殖车间内空气质量的同时又降低了车间的新风能耗。

养殖车间全年冷负荷 Q_0 为,

$$Q_0 = Q_{ux} + Q_d + Q_s + Q_r \quad (17)$$

从图 2 可知,当地夏季室外温度基本与养殖车间内设计温度持平,而且室外高温现象持续时间较短. 在夏季,当出现室外温度高于养殖车间内设计温度时,需对养殖车间进行供冷. 夏季高温仅出现在 7 月至 9 月之间,并且通过对逐时气温数据进行统计计算,发现每天高温时间约 1.6 h 左右,所以只需要对该时间段进行降温制冷,每年需对养殖车间供冷约 78 h. 另外,根据式(17)可知,车间内的夏季冷负荷主要包括了通过围护结构传热形成的冷负荷、灯具和设备散热形成的冷负荷以及辐射传热形成的冷负荷,根据以上数据可以计算出在全年供冷时间段的冷负荷值约为 84 kW.

养殖池系统全年热负荷 Q_1 为,

$$Q_1 = Q_c + Q_b + Q_h \quad (18)$$

通过计算得出养殖池系统全年所需的热负荷约为 $Q_1 = 2\ 919.75$ kW.

养殖车间全年热负荷 Q_2 为,

$$Q_2 = Q_{wd} + Q_f + Q_x \quad (19)$$

总热负荷 Q 为,

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (20)$$

养殖车间全年逐时热负荷如图 3 所示,其中,春季(3,4,5 月)热负荷为 4 486.12 kW,夏季(6,7,8 月)热负荷为 3 479.02 kW,秋季(9,10,11 月)热负荷为 4 046.36 kW,冬季(12,1,2 月)热负荷为 4 809.68 kW,最大热负荷为 5 179.8 kW,全年平均热负荷为 4 488.66 kW. 在全年养殖车间热负荷中,养殖池补水加热负荷为 2 919.75 kW,新风负荷为 852.51 kW,二者占了相当大的一部分,尤其是补水加热负荷,占比达到了总负荷的一半以上,在节约能耗方面,可以着重考虑补水加热负荷。

3.4 不同池水温度下可靠性及能耗分析

由上述全年负荷分析可知,冬季所需的热负荷最多. 为节约能耗,针对冬季工况下,采取小范围降低养殖池温度的方式. 如表 2 所示,在上述计算方案 A 的基础上增加方案 B 和方案 C,并进行计算和比较. 由上述计算出的逐时热负荷可以计算出冬季的平均热负荷。

养殖池温度的降低,会影响鱼类的摄食与生长速度. 本文以特定鱼类为例,研究生长速率与能耗之间的关系,特定鱼类最高生长温度 $t_{max} = 29.5$ °C,超过此温度会影响生长和饲料的转化率,其温度与增长率 k 的关系,

$$k = \frac{t_c - t_{base}}{tu_{base}} \quad (21)$$

式中, k 为鱼的月增长率,cm/月; t_{base} ,特定鱼类取 18.3 °C; tu_{base} ,特定鱼类取 3.28 °C.

此车间用于养殖成鱼,即特定鱼类从身长 17.8 cm 开始养殖,收获时身长为 35.2 cm. 故不同池水温度

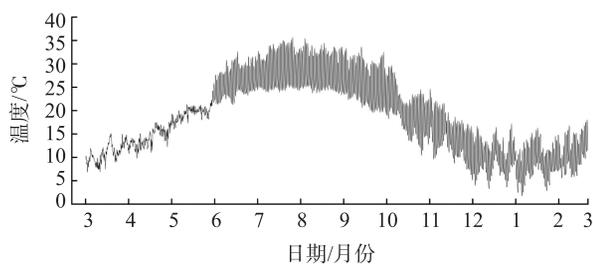


图 2 南平市年平均气温值

Fig. 2 Annual mean hourly temperature in Nanping

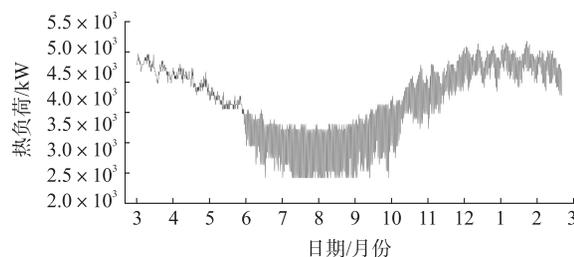


图 3 养殖车间全年热负荷

Fig. 3 Hourly heat load in breeding workshop throughout the year

表 2 不同养殖池温度设计方案及平均热负荷

Table 2 Water temperature design of different breeding pools and the average heat load

方案	养殖池温度/°C	室内空气温度/°C	平均热负荷/kW
A	29	31	4 809.68
B	28	30	4 477.16
C	27	29	4 152.36

所需时间不同,各方案所需时间 τ 为,

$$\tau = \frac{30.5(l_c - l_z)}{k} \quad (22)$$

式中, τ 为养殖时间,天; l_c 为初始养殖长度,cm; l_z 为收获时最终长度,cm.

根据室内外空气温度和池水温度的范围,将冬季供热 COP 计算数值设定为 3.2,则平均日能耗 \bar{E} 为,

$$\bar{E} = \frac{\bar{Q}}{3.2} \times 24. \quad (23)$$

式中, \bar{E} 为养殖车间日平均能耗,kW; \bar{Q} 为养殖车间平均热负荷,kW·h.

假设鱼类生长均在冬季,那么将成鱼从身长 17.8 cm 开始养殖,到身长为 35.2 cm 时收获,各方案所需总能耗 E 为,

$$E = \bar{E}\tau. \quad (24)$$

在本案例中选用特定鱼类成鱼,该鱼类对池水温度变化较为敏感.从表 3 中可知,在其他条件不变的情况下,随着方案 B、方案 C 中池水温度和空气温度逐渐降低,养殖鱼的生长速率 k 也逐渐降低,养殖所需时间 τ 增加.另一方面,池水温度和空气温度的降低会导致该鱼类生长变慢,增加了养殖成本,使得投资回收期变长,降低了养殖系统的可靠性,不利于鱼类养殖.由此可见,池水温度和空气温度的波动对鱼类养殖系统有较大的影响,所以采取适当的措施来维持养殖环境的稳定性是必不可少的.

经计算,不同方案的总能耗如图 4 所示.虽然方案 B、方案 C 通过降低养殖池水温度,使养殖车间的热负荷和耗能量减少,但是池水温度的降低也影响了鱼的生长速率.对于本文所采用的特定鱼类而言,降低池水温度并不能减少总能耗量,反而使总能耗量有所增加.但是本文的鱼类并不代表所有鱼类,某些对温度敏感度较低的鱼类,通过适当的降低养殖池温度和环境温度有可能会使能耗量减少.另一方面,本文选取的南平市地区,冬季室外温度基本在 0 °C 以上.若循环水养殖车间设置在北方寒冷地区,选用方案 B、方案 C 有可能会使总能耗量降低.因此,针对不同鱼类以及不同地区,可以利用上述计算方法进行单独计算,从而确定合适的养殖温度以及能耗量.

4 结论

本文针对循环水养殖车间提出了全年负荷计算方法,以福建省南平市某养殖车间为例,计算分析了全年负荷,并且讨论了不同养殖温度下的可靠性及能耗量,得出如下结论:

(1) 在案例计算中,冬季热负荷远大于夏季的冷负荷,另外,在循环水养殖车间热负荷计算中,所占比例较大的是养殖池补水加热负荷,需要在冬季时对养殖车间进行合理的供热.

(2) 通过多次现场设计和调研,本文提出的新风量计算方法,不仅能保证循环水养殖车间内部的空气质量,而且能使车间内新风能耗降低.此外,养殖车间内部空间较大,所需的处理的新风量也较大,为了达到更好的节能效果,可以采用热回收方式对能量进行回收利用.

(3) 随着池水温度和空气温度提升 1 °C,会使养殖平均日能耗量约提升 6.9%,总能耗约降低 2.6%.另外,由于南北地区也存在着环境差异,所以在养殖过程中可以采用本文提出的全年负荷和能耗的计算方法,针对养殖鱼的种类以及不同地区设置养殖温度,以提高鱼类的养殖效率及经济效益.

表 3 不同方案的 k 值、所需时间及平均日能耗量

Table 3 k value and required time and average daily energy consumption in different schemes

方案	k /(cm/月)	τ /天	\bar{E} /(kW·h)
A	3.26	165.5	36 072.58
B	2.96	182.6	33 578.73
C	2.65	203.5	3 1142.68

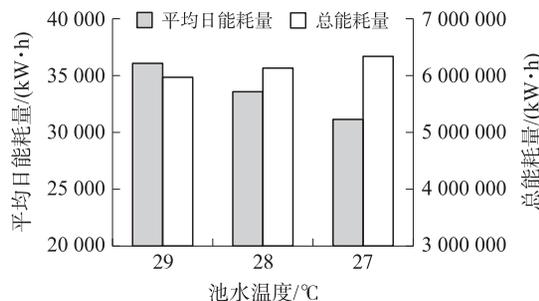


图 4 不同池水温度下平均日能耗量及养殖成鱼所需总能耗量

Fig. 4 Average daily energy consumption and total energy consumption required by breeding adult fish at different pool temperatures

[参考文献](References)

- [1] 王峰,雷霖霖,高淳仁,等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展[J]. 中国水产科学,2013,20(5):1100-1111.
- [2] 王大为,崔正国,曲克明,等. 循环水养殖绿色水产品全程追溯系统设计与实现[J]. 广东海洋大学学报,2022,42(5):94-101.
- [3] 郭从霞. 陆基高位圆池循环水养殖加州鲈技术[J]. 科学养鱼,2022(6):43-44.
- [4] 莽琦,徐钢春,朱健,等. 中国水产养殖发展现状与前景展望[J]. 渔业现代化,2022,49(2):1-9.
- [5] 李申,沈嘉,张学军,等. 恒温恒湿空调系统的优化控制与性能模拟[J]. 制冷学报,2012,33(1):22-27.
- [6] 袁野,葛天舒. 新型一体式除湿热泵空调循环夏季工况实验研究[J]. 制冷学报,2018,39(5):59-66.
- [7] ZHANG L Z, ZHU D S, DENG X H, et al. Thermodynamic modeling of a novel air dehumidification system[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(3):279-286.
- [8] 白雪莲,吴静怡,王如竹. 基于热回收的游泳池热泵除湿供暖系统[J]. 太阳能学报,2004(6):838-844.
- [9] 王海东,胡浩,朱杰克,等. 大空间建筑下送风分层空调系统区域间换热特性研究[J]. 制冷学报,2022,43(2):89-96.
- [10] SANAVE S, SHIRAZI A. Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications[J]. Energy and Buildings, 2013, 60:100-109.
- [11] SUN P, WU J Y, WANG R Z, et al. Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(5):1071-1080.
- [12] 郭宏伟,王宇,高文学,等. 不同气候区太阳能——空气源热泵热水系统运行性能评价[J]. 制冷学报,2019,40(4):45-51,100.
- [13] 吴学红,徐帅,桂许龙,等. 供水温度对低温空气源热泵制热性能的影响[J]. 制冷学报,2019,40(3):66-71,78.
- [14] 徐天科. 浅谈水环境对鱼类养殖的影响[J]. 农业与技术,2016,36(6):92.
- [15] 韩晓磊,王浩,高俊杰,等. 工厂化循环水养殖条件下大口黑鲈生长特点分析[J]. 水产科学,2020,39(4):567-572.
- [16] 罗新梅,盛家康. 室内敞开水面水蒸发量计算公式探讨[J]. 华东交通大学学报,2016,33(1):100-106.
- [17] 张瑞祺,苏建,鞠波,等. 简装循环水处理系统处理罗氏沼虾育苗废水的效果[J]. 南方农业学报,2016,47(1):140-146.
- [18] 俞志根,左希庆. 甲鱼养殖池恒温控制系统的设计与应用[J]. 农机化研究,2008(7):105-106,110.
- [19] 张宁,杨毓博,张殿光. 大连地区热带鱼养殖鱼池热负荷计算方法研究[J]. 建筑热能通风空调,2018,37(9):78-81.
- [20] GU L D, MIN J C, TANG Y C. Effects of mass transfer on heat and mass transfer characteristics between water surface and airstream[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122:1093-1102.
- [21] 贾瑜,蔡潇涵. 海南地区游泳馆空调通风设计[J]. 洁净与空调技术,2021(2):90-93.
- [22] 杨瑞梁,樊瑞,马富芹. 纺织车间空调系统最小新风量的研究[J]. 棉纺织技术,2008(9):19-21.
- [23] 杨晨,孙建,钟馨. 投饲量对全封闭循环水养殖虹鳟幼鱼水质影响的现场试验[J]. 水产学杂志,2019,32(6):6-10.
- [24] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [25] 雷明梁. 建筑热负荷计算在供暖管网中的应用[J]. 区域供热,2017(6):69-76.

[责任编辑:陈 庆]