医院生活热水系统碳减排潜力研究

褚雅君　康万立

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘　要】：生活热水系统作为医院建筑中重要的碳排放源，无论是能源消耗直接碳排放，还是用电消耗间接碳排放，都是衡量生活热水系统设计是否先进、高效的重要参数。本文通过对医院生活热水系统碳排放计算实例分析，结合医院用水特点，对比分析两种热水工况下的环境效益和经济效益，并提出相应的碳排放技术措施，以期使医院热水系统设计更符合绿色减碳背景和技术需要。

【关键词】：医院热水系统；碳排放；空气源热泵；太阳能

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.088

前言

近年来，由于城市化进程的加快，建筑碳排放已经成为全新的碳排放增长领域。清华大学建筑节能研究中心对我国医院建筑进行能耗分析时发现，我国医院建筑在运营阶段的资源消耗高于其他类型的公共建筑。2012 年，中国在医疗健康上共支出 25 390 亿人民币，产生的温室气体的二氧化碳当量为 3.15 亿吨。根据国家卫健委统计数据，截至 2021 年 3 月，全国医疗卫生机构数量达 102.6 万个，因此，减少医疗建筑碳排放对于实现碳中和具有重要意义。本文针对医疗建筑热水系统，提出两种热水系统运行模式，对比分析两种工况下的环境效益和经济效益，旨在探寻高效、环保、适用于医疗建筑的节能热水系统。

1 医院热水系统碳排放计算

1.1 医院热水系统运行工况

目前，在医院、宾馆等公共建筑中采用的生活热水系统主要有以下几种：太阳能热水系统、燃气/燃煤锅炉热水系统、空气源热泵热水系统等。太阳能系统单独使用时，最突出存在的问题是水温不稳定，用户使用舒适度较差。而传统的燃气/燃煤热水锅炉运行时不仅会消耗大量的矿物燃料资源，而且燃烧产生的污染物（如：SO_2、NOx、CO_2 等温室气体）对环境造成了极大的污染。在倡导节能减排的大环境下，具有节能、环保优点的太阳能、空气源热泵热水系统日益受到人们的重视。空气源热泵热水装置是利用环境中空气中蕴含的能量来获取热水，空气源热泵热水装置消耗少量部分的电能，从大气环境中吸收热量，并将热量传递热水。由于医院建筑洗浴热水用水量大，对热水稳定性要求较高，鉴于太阳能具有较高经济性，而空气源热泵具有节能性和高效性，燃气锅炉具有比较强的稳定性。本文根据项目实际情况，因地制宜地选取燃气锅炉+太阳能热水系统、空气源热泵+太阳能热水系统等综合系统，以期实现最佳的节能效益。本文针对医疗建筑，建立以下两种热水系统运行工况：（1）工况一：燃气锅炉+太阳能热水系统（2）工况二：空气源热泵+太阳能热水系统

1.2 不同工况下医院热水系统碳排放计算

（1）工况一：燃气锅炉+太阳能热水系统。该系统由燃气锅炉作为主要热源向水箱提供加热，当水箱温度低于燃气锅炉加热设定温度时，启动燃气锅炉，对水箱中的水进行循环加热；当水箱温度等于燃气锅炉设定温度时，关闭燃气锅炉。太阳能作为辅助加热装置，当集热器出口温度高于进水温度 8℃时，认为运行太阳能较为经济，此时与燃气锅炉同时对水箱中的水进行加热，当水温差在 2℃以内时，仅由燃气锅炉对水箱中的水进行加热。

太阳能日均产水量Q_s如式 1 所示。

$$Q_{sw}=\frac{AJ_T\eta_{cd}(1-\eta_L)}{C(t_{end}-t_0)f}$$（式 1）

式中：Q_s—太阳能日均产水量，m^3/天；A—太阳能集热器的面积，m^2；J_T—当地单位面积太阳能集热器采光面上的年平均日太阳辐射量，MJ/m^2·天；η_{cd}—太阳能集热器的年平均集热效率，取 0.55；η_L—储水箱和管路的热损失率，取 0.15；c—水的比热容，4.178 kJ/kg·℃；t_{end}—设计供热水温度，60℃；t_0—水的初始温度，℃；f—太阳能保证率。

燃气锅炉每天需产热水量式 2 所示。

Q_{rw}=最高日用水量−Q_s（m^3/天）（式 2）

燃气锅炉第 i 月需提供的热量如式 3 所示。

$Q_{r,i}=Q_{rw}(t_{end}-t_0)\rho cK_b*$ 30/1000（式 3）

式中，$Q_{r,i}$—燃气锅炉第 i 月提供的热量，MJ；ρ—水的密度，1×103 kg/m^3；Kb—小时变化系数，医院取 2.56。

天然气的碳排放因子为 0.056 kgCO_2/MJ，由此可

以得到燃气锅炉+太阳能热水系统的碳排放量计算公式，如式 4 所示。

$$T_s=\sum Q_r * EF_r \text{（式 4）}$$

其中，T_s—生活热水系统碳排放量（$kgCO_2$）；Q_r—由燃气锅炉提供的能量（MJ）；EF_r—天然气排放因子（0.056 $kgCO_2/MJ$）。

（2）工况二：空气源热泵+太阳能热水系统。该系统由空气源热泵作为主要热源向水箱提供加热，太阳能强制循环系统一般采用温差控制，太阳能循环水泵开启的温差宜取 5～10℃，停止运行的温差为 2～5℃。太阳能日均产水量Q_s如式 1 所示，空气源热泵第 i 月需提供的热量如式 3 所示，空气源热泵每月机组耗热量如式 5 所示。

$$P=\frac{Q_{a,i}}{3.6* COP} \text{（式 5）}$$

式中：$Q_{a,i}$—空气源热泵第 i 月提供的热量，MJ；P—热泵机组耗电量，kW·h；COP—热泵机组的制热效率。

根据我国火力发电 CO2 排放量为 0.785kg/kW·h，该系统的碳排放量计算公式如式 6 所示。

$$T_a = P * EF \text{（式 6）}$$

式中：T_a—生活热水系统碳排放量（$kgCO_2$）；EF—电力碳排放因子，0.785 kg/kW·h

2 案例分析-以北京某综合医院为例

2.1 工程概况

根据《2020 年中国风能太阳能资源年景公报》，北京市年平均太阳辐射量 1050~1400 kW·h/m^2，太阳能资源丰富。该医疗建筑位于北京市，设计用水量最高日为 900.5m^3/d，设计供水温度为 60℃，生活热水系统 24 小时运行。

2.2 碳排放计算

北京市自来水水源为地表水、地下水、南水北调水及再生水，其水温和当地气温有一定关系，当冬季气温过低时，根据经验本文取水温为 4℃。当气温大于 0℃时，采用式 7 来拟合气温与水温的关系。

$$T_w = 4.717e^{0.041t} \text{（式 7）}$$

根据往年统计资料，采用北京市累年（1981-2010 年）月平均气温拟合自来水温度。再根据式 1，计算各月太阳能的日均产水量。本项目根据建筑屋面实际情况，太阳能最大可用面积为 2700 m^2，北京市太阳年平均日辐射量为 16.698 MJ/m^2·天，太阳能保证率取 75%。各月计算结果如图 1 所示。

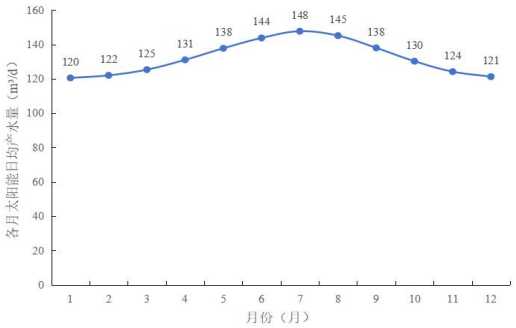

图 1 该项目各月太阳能日均产水量

由图 2 可知，夏季（6 月~8 月）自来水进水温度较高，太阳能日均产水量较多，剩余部分热水量需由燃气锅炉或空气源热泵机组提供。

（1）工况一：燃气锅炉+太阳能热水系统

根据式 2 可以看出，燃气锅炉提供的热水量为最高日用水量与太阳能提供热水量的差值，再由式 3~式 4 可计算燃气锅炉+太阳能热水系统的碳排放量，计算结果见表 3。

表 3 燃气锅炉+太阳能热水系统碳排放量

月份	碳排放量(吨 CO_2)	月份	碳排放量(吨 CO_2)	月份	碳排放量(吨 CO_2)
1	32.67	5	27.95	9	27.89
2	32.21	6	26.57	10	29.86
3	31.23	7	25.73	11	31.56
4	29.65	8	26.28	12	32.45
全年碳排放量合计:354.06 吨					

（2）工况二：空气源热泵+太阳能热水系统

根据式 2 可以看出，空气源热泵提供的热水量为最高日用水量与太阳能提供热水量的差值，由式 5~式 6 可计算空气源热泵+太阳能热水系统的碳排放量，根据式 5 可以发现，空气源热泵的制热效率（COP 值）是决定其碳排放量的关键因素之一，它受环境温度和进出水温的变化影响，COP 取值越高，热泵机组耗电量越低，二氧化碳排放量越少。陈伟等人研究发现，实际系统的 COP 值远小于主机的设计 COP；另外，在冬季湿冷工况下，热泵机组的 COP 值是下降的，且随着气温的降低，其热效率也随之降低。杜甜甜通过对实验室中空气源热泵能耗的观察及 COP 计算，研究发现在室外低于-6℃时，空气源热泵 COP 接近 2。王建民研究发现在北京地区使用空气源热泵的 COP 均值为 3.4 左右。根据表 2 可以看出，北京地区月均最低温高于-6℃，参考基于北京地区的空气源热泵 COP 研究，取 COP 值为 3.4，并计算工况二的 CO_2 排放量，计算结果见表 4。

表 4 空气源热泵+太阳能热水系统碳排放量

月份	耗电量 (kW·h)	碳排放量 (吨 CO_2)	月份	耗电量 (kW·h)	碳排放量 (吨 CO_2)
1	46307	37.42	7	36469	29.47
2	45653	36.89	8	37240	30.09
3	44258	35.76	9	39529	31.94
4	42015	33.95	10	42315	34.19
5	39617	32.01	11	44734	36.15
6	37662	30.43	12	45983	37.16
全年耗电量合计:516542			全年碳排放量合计:405.49		

2.3 结果与分析

（1）环境效益：两种工况的碳排放量如图 2 所示。

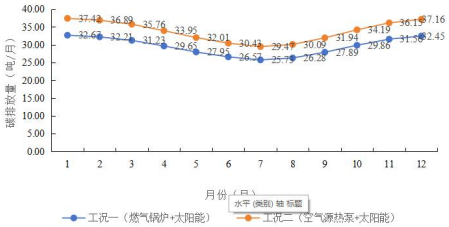

图 2 两种工况下的碳排放量

由图 2 可以看出，工况二全年 CO_2 排放量为 405.49 吨，工况一全年 CO_2 排放量为 354.06 吨，比工况二减少排放 51.43 吨 CO_2。

（2）经济效益：由表 4 可知，工况二条件下，该项目空气源热泵全年耗电量为 516542 kW·h，北京市城区非居民销售电价为 1.33 元/kW·h（不满 1 千伏，高峰用电段），计算得工况二条件下，空气源热泵全年运行费用约为 68.70 万元。由式 2 计算可得，工况一条件下，该项目燃气锅炉全年需提供 6322476 MJ 热量。根据《通用能耗计算通则》，天然气平均低位发热量为 32 238 kJ/m^3，将燃烧热折算成所需燃气体积，可以得出全年使用燃气体积为 19.61 万 m^3，北京城六区工商业天燃气价格为 2.87 元/m^3，计算得工况一条件下，购买天燃气费用约为 58.29 万元/年，比工况二节省 10.41 万元/年。

3 结论及建议

3.1 研究结论

本研究以北京市某三甲综合医院生活热水系统为研究对象，通过对不同热水工况下的碳排放量计算，进行了环境效益和经济效益分析，得出以下结论：结合北京地区气候条件、能源价格、项目太阳能设置面积等实际情况，该医院采用燃气锅炉+太阳能热水系统比空气源热泵+太阳能热水系统更有优势，燃气锅炉+太阳能热水系统可以明显减少热水系统 CO_2 排放量 39.84 吨/年，节约耗电费用 8.45 万元/年。本文以北京某医院为例，旨在提出一种热水系统碳排放计算思路，在选用热水系统时，应根据当地气候条件、项目实际情况，进行多个方案的经济技术比选，因地制宜地选择合适的热水系统。

3.2 减排措施

（1）热水系统的碳排放量与热水定额的选取息息相关，在进行项目设计时，应选用合适的用水定额值，用水定额越高，热水系统的能耗越高。（2）提高空气源热泵 COP 值；提高能效及运行效率，延长高 COP 时的运行时间。COP 取值越高，热泵机组耗电量越低，二氧化碳排放量越少。（3）在进行热水系统设计时，应根据项目地气候类型、资源条件、能源价格等实际情况进行多方案比选，优选出最佳低碳热水系统设计方案。

参考文献：

[1] Rui WA.The carbon footprint of the Chinese health-care system:an environmentally extended input–output and structural path analysis study[J].The Lancet Planetary Health,2019,3(10).

[2] 张海.高校太阳能热水系统的优化设计及运行策略研究[D].上海海洋大学.

[3] 崔莹.公共建筑碳排放特征及分析模型研究[D].北京建筑大学.

[4] 刘雨曦.空气源热泵辅助太阳能热水系统在夏热冬冷地区的运行模拟和应用研究[D].重庆大学,2011.

[5] Ping J,Tovey N K.Opportunities for low carbon sustainability in large commercial buildings in China[J].Energy Policy,2009,37(11):4949-4958.

[6] 国家气象科学数据中心，北京市月平均气温；https://data.cma.cn/data/weatherBk.html.

[7] 杜晓辉.高层住宅太阳能热水系统一体化设计研究[D].天津大学,2010.

[8] 陈伟,王靖华,屈利娟,等.空气源和能源塔热泵热水系统的运行效益比较与分析[J].给水排水,2012,38(8):5.

[9] 王建民.基于北京地区的空气源热泵能耗分析及节能改造[D].天津大学,2012.

[10] 杜甜甜.室外温湿度对空气源热泵能耗的影响[C]//2019 供热工程建设与高效运行研讨会.