

非出水时段电热水器加热时间与能耗的预测模型

冉茂宇

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 首先,通过对电热水器加热过程热平衡方程的解析,导出壳体内水温在加热过程中的理论计算公式.在此基础上,提出电热水器水温加热到设定温度所需加热时间与加热能耗的理论预测模型,并通过计算值与实测值对比,验证预测模型的有效性.最后,通过对不同工况的计算,考察不同因素对加热时间和加热能耗的影响.研究表明:随着水容量和设定温度的提高,加热时间和加热能耗显著增加;初始水温提高,加热时间和加热能耗明显减少;加热功率增加,加热时间呈指数减少,加热能耗减少不明显;保温性能和环境气温的提高有助于减少加热时间和加热能耗.

关键词: 电热水器; 加热时间; 加热能耗; 预测模型; 非出水时段

中图分类号: TM 925.32; TK 12

文献标志码: A

热水器广泛用于人们的生活和生产中,是能源消耗量大面广的设备之一.截至 2013 年底,我国已有 90.7% 的家庭使用热水器^[1-2].目前,关于热水器节能方面的研究,一是注重节能新技术的研发,包括高效保温^[3]、智能控制^[4-5]、变速加热和中温系统等^[6],二是注重可再生能源或廉价能源的利用,包括太阳能^[7]、空气能^[8]、相变能^[9]、余热与废热等^[10],但很少有文献从热水器运行的角度,讨论其能效问题.事实上,如果热水器运行管理不到位,同样要浪费相当多的能源.文献[11]对热水器进行模型简化和理论计算,得出连续加热用水比间歇加热用水节能的结论.文献[12]采用实测方法,探讨设定温度和加热功率对加热时间、加热能耗及出水量的影响,指出中温系统是较为节能的方式.建立热水器在使用过程中加热时间和加热能耗预测模型,不仅可以揭示各种因素对加热时间和能耗的影响,而且能为热水器的节能运行提供理论依据和指导.基于此,本文就热水器在非出水时段将水温加热到设定温度所需时间和能耗的预测进行研究.

1 非出水时段加热过程水温变化

热水器用水前通常由于水温较低,需要进行非出水加热,其分析模型如图 1 所示.记热水器水容量为 V ,初始水温为 t_0 ,加热功率为 P ,加热设定温度为 t_s ,环境气温为 t_f .假设热水器在加热过程中水温均匀,壳体的蓄热作用很小可忽略不计,水的密度和比热因水温不同变化不大.对这种非出水加热过程建立水的热平衡方程为

$$V\rho C_p \frac{dt}{d\tau} = P - KF(t - t_f).$$

(1)

式(1)中: ρ 为水的密度; C_p 为水的比热; t 为水的温度; τ 为时间变量; K 为热水器壁体平均传热系

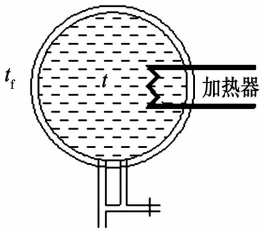


图 1 电热水器分析模型
Fig. 1 Analytical model
of electric water heater

收稿日期: 2015-10-13

通信作者: 冉茂宇(1967-),男,教授,博士,主要从事建筑热工与建筑节能、室内外热湿环境、绿色建筑与生态技术的研究. E-mail: ranmaoyu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078156); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01297); 福建省小发明、小创造专项基金资助项目(2009—2011 年度); 华侨大学基本科研业务费专项基金资助项目(JB-JC1006); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室科研基金资助项目(2009KB13)

数; F 为热水器外表散热面积. 由于热水器壳体保温层热阻远大于内外对流换热热阻, 因此, 可以认为在加热过程中, 热水器壁体平均传热系数变化不大.

代入初始条件 $t(0)=t_0$, 可将式(1)改写为非出水时段加热过程的水温计算式, 有

$$t=t_f+\frac{P}{KP}+[t_0-t_f-\frac{P}{KP}]\exp(-KF\tau/(V\rho C_p)).$$

(2)

由式(2)可知: 在非出水时段, 热水器加热过程水温随时间呈指数型增加, 而影响水温变化的主要因素有加热功率 P 、水容量 V 、保温性能 KF 、环境气温 t_f 和初始水温 t_0 .

2 非出水时段加热时间和能耗预测模型的建立

设将水温从初始值 t_0 加热到设定值 t_s 所需加热时间为 τ_s , 则由式(2)可建立 τ_s 与 t_s 的关系为

$$t_s=\frac{P+KFt_f}{KP}+[t_0-\frac{P+KFt_f}{KP}]\exp(-KF\tau/(V\rho C_p)).$$

(3)

整理式(3), 可得非出水时段加热到 t_s 所需时间的预测模型为

$$t_s=\frac{V\rho C_p}{KP}\ln[\frac{P-KF(t_s-t_f)}{P-KF(t_0-t_f)}].$$

(4)

热水器在加热过程中的外表温度高于环境温度, 要向周围环境散热, 其散热量(Q_s)的计算式为

$$Q_s=\int_0^{\tau_s}KF(t-t_f)d\tau.$$

(5)

将式(2)代入式(5), 经积分并考虑到式(4), 整理可得加热过程中的散热量计算式为

$$Q_s=-\frac{PV\rho C_p}{KP}\ln[\frac{P-KF(t_s-t_f)}{P-KF(t_0-t_f)}]-V\rho C_p(t_0-t_s).$$

(6)

热水器在加热过程中, 能耗主要用于两个方面: 一是用于提高水的温度, 表现为水的内能增加即 $V\rho C_p(t_s-t_0)$; 二是用于补偿向环境散热, 表现为式(6). 因此, 将初始水温 t_0 加热到设定温度 t_s 所需的能耗 Q_h 应为这两部分之和, 即

$$Q_h=-\frac{PV\rho C_p}{KP}\ln[\frac{P-KF(t_s-t_f)}{P-KF(t_0-t_f)}]-V\rho C_p(t_0-t_s).$$

(7)

需要注意的是, 式(7)未包括热水器加热到设定温度后非用水保温期间向环境散热所需的能耗.

由式(4), (7)可知: 影响热水器加热时间和能耗的因素有性能参数, 如水容量 V 、加热功率 P 、保温性能 KF , 也有非性能参数如环境气温 t_f 、初始水温 t_0 和设定温度 t_s .

3 非出水时段加热时间与能耗预测模型验证

为了验证上述预测模型(4), (7)的有效性, 参考文献[12]中的实测条件, 分别计算某品牌 0.06 m^3 (60 L) 和 0.10 m^3 热水器在 3 种加热功率下将初始水温从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 的加热时间(τ_s)和能耗量(Q_h). 实测值与计算值对比, 如表 1 所示. 表 1 中: 同时列出文献[12]在相同条件下的测试值. 由表 1 可知: 加热时间的计算值与实测值具有良好的一致性, 最大相对误差未超过 7%; 加热能耗的计算值与实测值也同样具有良好的一致性, 最大相对误差未超过 4%. 说明预测模型(4), (7)具有相当的可靠性.

表 1 加热时间和加热能耗的实测值与计算值对比

Tab. 1 Comparison between the calculation results and test results of heating time and energy consumption

V/m^3	P/W	τ_s/min			$Q_h/\text{kW}\cdot\text{h}$		
		实测值 ^[12]	计算值	相对误差/%	实测值 ^[12]	计算值	相对误差/%
0.06	2 000	101.79	104.83	2.99	3.53	3.49	-1.06
	1 200	169.64	169.89	0.15	3.27	3.40	3.94
	800	240.62	252.40	4.89	3.41	3.37	-1.22
0.10	2 000	190.35	176.97	-7.00	5.83	5.90	1.22
	1 200	326.50	309.26	-5.28	6.42	6.19	-3.59
	800	460.49	462.08	0.34	5.96	6.16	3.42

4 性能参数对加热时间和能耗的影响

目前,市面上的热水器品牌多种多样,性能参数不尽相同.从加热功率看,主要有 800,1 200,1 500,2 000,2 500,3 000 W.在保温性能上,按国家标准 GB/T 20289—2006《储水式电热水器》以 24 h 固有能耗系数 ϵ 表示.根据 ϵ 值大小分为 1 级、2 级、3 级和 4 级,其对应的保温性能 KF 值可根据该标准进行换算^[13],如表 2 所示.从水容量上看,广为使用的有 0.04,0.05,0.06,0.08,0.10 m³.

表 2 保温级别与性能参数 KF 之对应关系

Tab. 2 Relationship between the thermal insulation class and value W · °C⁻¹

级别	KF				
	V=0.04 m ³	V=0.05 m ³	V=0.06 m ³	V=0.08 m ³	V=0.10 m ³
1 级	≤0.788	≤0.872	≤0.956	≤1.125	≤1.294
2 级	0.788~0.919	0.872~1.017	0.956~1.116	1.125~1.313	1.290~1.509
3 级	0.919~1.050	1.017~1.163	1.116~1.275	1.313~1.500	1.509~1.725
4 级	1.050~1.196	1.163~1.324	1.275~1.452	1.500~1.708	1.720~1.965

为了揭示热水器性能参数对加热时间和能耗的影响,需要在讨论某一参数时设定其他参数不变.在 $V=0.06\text{ m}^3$, $\text{KF}=0.956\text{ W}\cdot\text{°C}^{-1}$, $t_s=40\text{ °C}$, $t_f=t_0=5\text{ °C}$ 条件下,改变加热功率 P 进行计算,结果如图 2 所示.由图 2 可知:加热功率从 800 W 增加到 2 800 W,加热时间从 183.75 min 降到 51.7 min,且呈现指数减少;而加热能耗从 2.45 kW·h 降为 2.41 kW·h,只稍有减少.因此,就热水器加热到设定温度后立即用水而论,购置热水器时应尽量选择加热功率大的热水器,使用热水器时应尽量采用“速热档”进行加热,这不仅能节省加热时间,也有一定的节能效果.

在 $V=0.06\text{ m}^3$, $P=800\text{ W}$, $t_s=40\text{ °C}$, $t_f=t_0=5\text{ °C}$ 的情况下,改变 KF 值进行计算,结果如图 3 所示.由图 3 可知:当 KF 值从 $0.956\text{ W}\cdot\text{°C}^{-1}$ 增加到 $1.956\text{ W}\cdot\text{°C}^{-1}$ 时,加热时间从 183.75 min 延长到

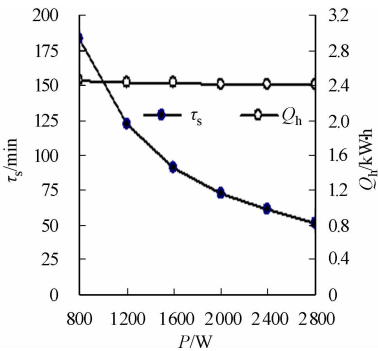


图 2 加热功率对加热时间及能耗影响
Fig. 2 Effect of heating power on heating time and energy consumption

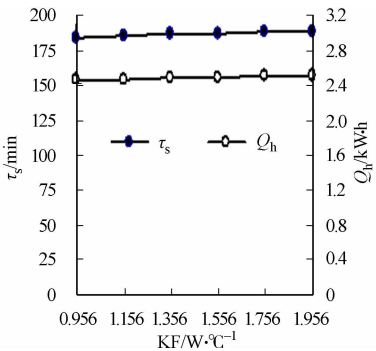


图 3 保温性能对加热时间及能耗影响
Fig. 3 Effect of thermal insulation on heating time and energy consumption

188.05 min;加热能耗从 2.45 kW·h 增加到 2.51 kW·h.因此,加热时间和加热能耗都随 KF 值增加而增加,但在文中计算的 KF 值范围内这种增加不是很明显.这说明,单就热水器一次加热而言,选用不同保温级别的差别不大,但考虑到热水器使用频次高,无论是从节能的角度还是从节时的角度,都应选用保温性能好(KF 值低)的热水器.

不同容量的热水器因其体积和形状不同,散热面积也不一样,因此,在壳体保温性能相同的情况下,KF 值也不一样.在 $P=800\text{ W}$, $t_s=40\text{ °C}$, $t_f=t_0=5\text{ °C}$ 的情况下,改变 V 值进行计算,结果如图 4 所示.为了具有可比性,在讨论水容量对加热时间和能耗影响时,不以相同的 KF 值进行讨论,而是将 KF 值设定为对应的 1 级上限值(参见表 2).由图 4 可知:水容量从 0.04 m^3 增加到

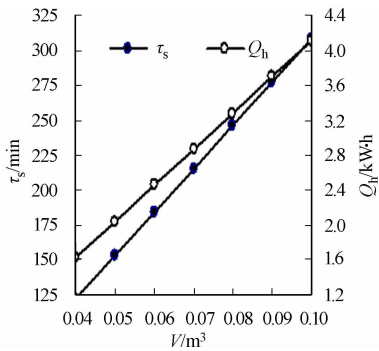


图 4 水容量对加热时间及能耗影响
Fig. 4 Effect of water capacity on heating time and energy consumption

0.1 m³,加热时间从 122.5 min 延长到 314.9 min;加热能耗从 1.633 kW·h 增加到 4.199 kW·h;加热时间和加热能耗都随水容量增加呈线性增加.因此,购买和使用热水器时,在保证用水量的情况下,宜选择和使用小容量热水器.

5 非性能参数对加热时间和能耗的影响

在 $V=0.06\text{ m}^3, P=800\text{ W}, KF=0.956\text{ W}\cdot^\circ\text{C}^{-1}, t_s=40\text{ }^\circ\text{C}, t_i=5\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,改变初始水温 t_0 的值进行计算,结果如图 5 所示.由图 5 可知:初始水温从 5 $^\circ\text{C}$ 提高到 35 $^\circ\text{C}$;加热时间从 183.75 min 降为 26.736 min;加热能耗从 2.45 kW·h 降为 0.356 kW·h,减少效果非常明显.这带来三方面的启示:一是夏季使用热水器比冬季使用热水器节能、节时;二是采用中温系统可以节省加热时间,这在有些热水器中已经采用;三是利用余热或废热对进水进行预热可以节能节时.文献[10]采用一种“节能垫”回收热水器淋浴时废热并预热其进水,研究表明其至少节能 40%.

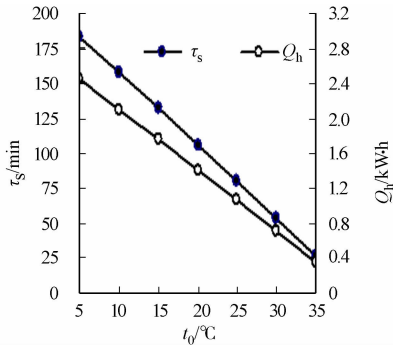


图 5 初始水温对加热时间及能耗影响
Fig. 5 Effect of initial water temperature on heating time and energy consumption

为了清楚地揭示环境气温对加热时间和加热能耗的影响,在 $V=0.06\text{ m}^3, P=800\text{ W}, KF=0.956\text{ W}\cdot^\circ\text{C}^{-1}, t_s=40\text{ }^\circ\text{C}, t_0=5\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,改变 t_i 值进行计算,结果如图 6 所示.由图 6 可知:气温从 0 $^\circ\text{C}$ 升高到 30 $^\circ\text{C}$,加热时间从 184.88 min 降到 178.31 min;加热能耗从 2.465 kW·h 降到 2.377 kW·h.因此,在其他参数不变的情况下,气温变化对于加热时间和加热能耗影响不大.这是因为气温 t_i 和性能参数 KF 共同影响热水器散热,在 KF 值较小的情况考察气温的影响,其效果当然就不明显.尽管如此,在气温高时使用热水器还是比在气温低时使用热水器节能、节时.

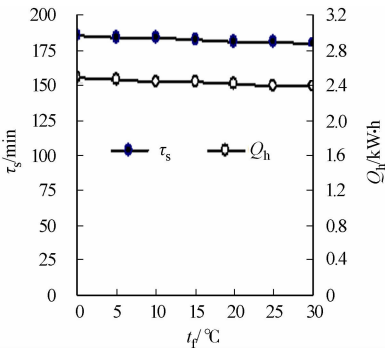


图 6 环境气温对加热时间及能耗影响
Fig. 6 Effect of air temperature on heating time and energy consumption

在 $V=0.06\text{ m}^3, P=800\text{ W}, KF=0.956\text{ W}\cdot^\circ\text{C}^{-1}, t_i=t_0=5\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,改变设定温度 t_s 值进行计算,结果如图 7 所示.由图 7 可知:当设定温度从 40 $^\circ\text{C}$ 提高到 70 $^\circ\text{C}$,加热时间从 183.75 min 增长到 347.75 min;加热能耗从 2.45 kW·h 增加到 4.637 kW·h;加热时间和加热能耗都随设定温度增加而线性增加.因此,在保证热水器用水量满足要求的前提下,不宜将加热温度设置过高,这样才能保证热水器节能节时运行.

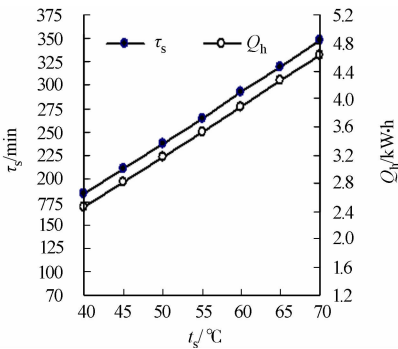


图 7 设定温度对加热时间及能耗影响
Fig. 7 Effect of set temperature on heating time and energy consumption

6 结论

热水器在非出水时段加热过程中,壳体水温变化可用式(2)进行预测和计算,加热到设定温度所需加热时间和加热能耗可分别用式(4),(7)进行预测和计算.

在热水器性能参数中,水容量增加,加热时间和加热能耗明显增加;加热功率增加,加热时间可明显

减少,但加热能耗减少不明显;提高保温性能,有助于减少加热时间和加热能耗,但效果不明显.在热水器非性能参数中,初始水温提高,加热时间和加热能耗明显下降;设定温度提高,加热时间和加热能耗明显提高;气温升高,有助于减少加热时间和加热能耗,但效果不明显.

因此,在热水器选购方面,宜根据家庭一次性用水量多少选择水容量合适的热水器;加热功率的选择宜大不宜小,这样可极大地缩短加热时间,也有一定的节能性.考虑到热水器加热到设定温度后有时不是立即使用,热水器的散热主要取决于保温性能,故宜选择保温性能好的热水器.在热水器使用方面,应对加热时间进行预计,当热水器加热到设定温度后应立即使用,这样不至于浪费能源.另外,尽可能在气温和进水温度高时使用热水器,这样也可以达到一定的节能效果.

参考文献：

[1] 王荣. 中国家用热水设备典型用水模式研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013:1-5.

[2] 孙凤梅,李念平,姚亮,等. 长沙市住宅建筑冬季逐时能耗实测及能耗特征研究[J]. 制冷与空调,2008,22(2):22-28.

[3] 郑金玲,胡小芳,黄焕文. 储水式电热水器的有限元能效分析[J]. 化工机械,2011,38(3):309-312.

[4] 杨文强,刘树聃. 基于 HT46R23 单片机控制的太阳能热水器节能供水系统设计[J]. 安徽农业科学,2012,40(6):3776-3778.

[5] 刘虎,化莉,孙汉忠. 智能型太阳能热水器水位水温测控系统的研制[J]. 淮阴工学院学报,2002,11(5):23-25.

[6] 李彩霞,刘洋,孙强,等. 组合加热方式在电热水器上的研究及应用[J]. 家电科技,2014(11):80-83.

[7] 梁宏博. 太阳能热水器回收年限与节能简要分析[J]. 太阳能,2012(15):10-12.

[8] 胡韩莹,巨小平,林州强,等. 外盘管空气源热泵热水器不同工况下的试验研究[J]. 流体机械,2012,40(12):58-61.

[9] 李建新,王永川,陈光明. 相变储热预热式热泵热水器系统性能研究[J]. 太阳能学报,2008,29(10):1230-1234.

[10] 陈观生,李凡. 家用热水器节能垫的试验研究[J]. 广东工业大学学报,2002,19(2):46-47.

[11] 牛纪德,周遵凯,杨先亮. 电热水器运行方式与能耗的理论分析[J]. 山西建筑,2012,38(26):213-214.

[12] 孙园,陈天翔,张辑,等. 家用电热水器节能使用方式的探讨[J]. 电力需求与管理,2013,15(3):25-28.

[13] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会,中国家用电器研究院,等. 储水式电热水器:GB/T 20289—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006:2-10.

Prediction Model of the Heating Time and Energy Consumption of Electric Water Heater During the Un-Draining Period

RAN Maoyu

(College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The thermal balance equation of heating process of electric water heater during the un-draining period was analyzed, the calculation formula of water temperature was derived, then the prediction model of heating time and energy consumption was put forward. Through the comparison between calculation results and test results, the validity of the prediction model was verified. By case calculations under different condition, the effect of different factor on heating time and energy consumption was investigated. It shows that: as the water capacity and set temperature increase, the heating time and energy consumption increase obviously; as the initial water temperature increases, the heating time and energy consumption decrease significantly; as the heating power increases, the heating time decreases exponentially, but the energy consumption reduces little; the better thermal insulation and higher air temperature are conducive to reduce the heating time and energy consumption.

Keywords: electric water heater; heating time; energy consumption, prediction model, un-draining period

(责任编辑：陈志贤 英文审校：方德平)