

电机变频控制实现换热器节能的应用研究^{*}

李 明¹, 王润涛¹, 魏 巍²

(1. 东北农业大学 电气与信息学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 中国移动通信有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 结合寒冷地区气候特点与通信机房温控的现状, 针对 50% 浓度乙二醇溶液为工质的换热器, 试验研究了自然冷源利用率与换热器自身变频节能的关系。结合乙二醇冷剂的特性, 通过建立功率与频率关系模型、温差与功率和频率关系模型, 实现了换热器循环泵和风机的变频控制策略。结果表明: 在室内外温差、换热功率与循环泵、风机频率同时满足的条件下, 以功率模型作为参数进行换热器自身的变频节能是可行的。通过对哈尔滨地区的气候数据与散热房控温试验分析, 证明了乙二醇换热器的变频节能效果。

关键词: 换热器; 散热房; 变频; 自然冷源; 节能率

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)09-0100-05

Application Research on Energy Saving of Heat Exchanger by Frequency Conversion Control for Electric Motor^{*}

LI Ming¹, WANG Runtao¹, WEI Wei²

(1. College of Electrical and Information, North East Agriculture University, Harbin 150030, China;

2. China Mobile Communication Co., Ltd., Harbin 150030, China)

Abstract: Combined with the cold region climate characteristics and the current situation of temperature control in heating room, the relationship between the natural cold source utilization rate and variable frequency energy saving of heat exchanger itself which working fluid was 50% concentration glycol solution was experimentally studied. The results showed that with the parameter of power model, it was feasible for the variable frequency energy saved of heat exchanger itself, under the satisfied conditions of difference in temperature of inside and outside, pump and fan operating frequency, heat exchanger power at the same time. The variable frequency energy saved effect of ethylene glycol heat exchanger was proved in terms of the analysis of climate data, palisade structure heat exchanger and center temperature control test in Harbin.

Key words: ethylene glycol heat exchanger; heating room; variable frequency; natural cool source; energy saving rate

0 引 言

随着全球能源问题的日趋严峻, 节能减排成为各领域的首要任务。冶金、动力、暖通、农业等领域都存在由于大型设备运行同时散发较高热量, 所以会导致室内温度过高。本文中称为的散热室, 目前对散热室温控有空调和换热器两种方

式, 而空调制冷需要浪费巨大的电能, 各国专家尝试利用自然冷源实现散热室环境温度控制。各种换热器层出不穷, 大量学者研究表明: 气-气换热器换热性能不及气-液或液-液换热器^[1-3], 乙二醇水溶液作为气-液换热的冷介质在该领域中得到了广泛的应用。文献[4]剖析了乙二醇与水混合液在柱状管道内部流动过程中的热传导特性。

^{*} 基金项目: 十二五国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B04); 黑龙江省博士后启动基金(LBH-Z15024)

作者简介: 李 明(1984—), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电气化与自动化。

王润涛(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能控制及其应用、电力系统自动化。

文献[5]利用北方地带冬季寒冷气候特点,采用乙二醇与水混合液为导热剂,借助土壤蓄冷实现了极端工作条件下的集成热泵系统。文献[6]将乙二醇与水按 1:1 比例混合作为兆瓦级风电制冷系统导热剂,实现了发电机单机容量从千瓦级向兆瓦级过渡过程中的快速散热,提高了风电机组运行安全性。文献[7-8]针对汽车换热器采用不同配比乙二醇与水混合液作为导热剂进行了应用性研究,为新能源汽车发展提供了技术支持。文献[9]借助具体城市具有代表性年份的室外干球逐时气象数据,开发了能够全年度应用的风冷冷水散热机组,该机组相较空调具有良好的节能效果。文献[10]利用北方地区冬季冻冰蓄冷,夏季利用,实现间接换热冷量交换系统。

乙二醇换热器利用冬季室外冷源,通过循环泵的运转,将室内的热量传达到室外冷凝器散发掉,在以确保散热房的室内湿度恒定、洁净度提高、温度可控的前提下,实现节约电能、降低资源损耗的目的。一定的室内外温差是利用自然冷源换热节能的基础条件,乙二醇换热器的应用存在着较大的地域局限性,我国北方地区冬季时间长、室外温度低,50%浓度的乙二醇水溶液,其冰点可以达到 -37°C ,可以在室内外实现液体循环。利用室外自然冷源实时的调节换热器的工作效率是实现空调整能的关键。本文针对寒冷地区室内外温差与换热器效率的关系进行分析,建立变频模型,实现乙二醇换热器的最佳节能。

1 变频控制策略

1.1 功率与频率关系

换热器以乙二醇水溶液作为导热剂,通过泵机控制导热剂循环,同时利用风机加速导热剂散热,因此,循环泵和风机是换热器的驱动源也是最主要的耗能部件。换热器实际工作过程中,室外温度下降时会使室内外温差增大,同等驱动条件下,散热效率提高。如果控制室内温度在恒定范围内,可以通过保持散热效率降低驱动频率,即保证了换热器合理控制室内温度又能够实现换热器的自身节能。本文研究的换热器选用 ER400-4 型轴流风机,25PBG-13-N 型循环增压泵。

根据流体力学的运动相似原理和比例定律,针对同一台风机或水泵,当输送的流体密度不变

时,其轴功率与转速的 3 次方成正比^[11],工程实践中,比例定律存在约束计算区间,仅适用于电机额定转速的 60%~100% 范围^[12]。但是,换热器实际运行时,由于循环泵和风机的负荷量、电机效率及变频器效率等相互影响,不能够绝对遵循比例定律。本文针对泵和风机在 70%~100% 调速范围(即工作频率为 35~50 Hz 范围)的功率进行分析,如表 1 所示。

表 1 频率与功率相关性数据

频率/ Hz	功率/W						
	35	38	40	43	45	48	50
泵	150	159	174	201	225	268.5	300
风机	100.2	117.7	128.2	153.8	172	207.4	233

表 1 数据显示频率的三次方与功率比例关系不成立,因此,对频率与功率进行相关性拟合分析,得到拟合方程为

$$f(v) = a_1 v^2 + a_2 v + a_3 \quad (1)$$

式中: $f(v)$ ——功率;

v ——频率;

a_1, a_2, a_3 ——系数。

方程中不同频率与功率系数如表 2 所示。

表 2 频率与功率方程中的系数

	p_1	p_2	p_3	SSE	R-square	RMSE
泵	0.518 3	33.92	701.4	6.964	0.999 6	1.319
风机	0.318 9	-18.31	351.2	5.813	0.999 6	1.20 6

1.2 温差与功率、频率关系

温差是影响换热器变频节能的主要依据,温差与功率、频率相关性分析是建立合理变频策略的基础。选取代表性温差数据点,估测换热功率为 3 000 W^[13],分别建立泵和风机的功率与频率模型。

考虑到模型需满足如下约束条件^[10]:换热器换热功率函数 $W(x) - 3\,000 \geq 0$;管外雷诺数函数 $500 \leq Re_1(x) \leq 10\,000$;管内雷诺数函数 $Re_2(x) - 2\,100 \geq 0$;风机风量函数 $Q(x) - 3\,450 \leq 0$;循环泵流量函数 $Q_1(x) - 1.65 \leq 0$;风机、循环泵频率函数 $35 \leq F(x) \leq 50$;室内轴流风机速度函数 $v_1(x) - 4 \geq 0$;室外轴流风机速度函数 $v_2(x) - 3 \geq 0$ 。

在满足上述约束条件的前提下求解功率模型的最优解,即为换热器的最小基本功率:

min f(x) = P₁(x) + P₂(x) + P₃(x) (2)

式中: x——温度;

P₁(x)——室内风机功率函数;

P₂(x)——室外风机功率函数;

P₃(x)——循环泵功率函数。

通过遗传算法搜索功率模型最优解,生成温差与功率的关系如图 1 所示,温差与频率的关系如图 2 所示。

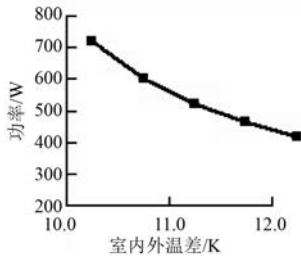


图 1 温差与功率的关系

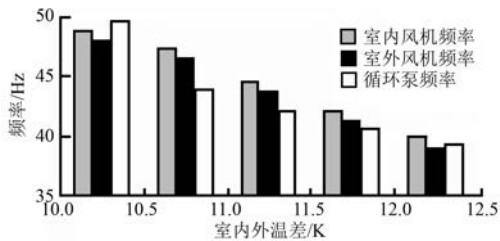


图 2 温差与频率的关系

图 1 表明温差从 10 K 增加至 12 K,功率从 720.06 W 降低至 419.47 W,功率在几个温差点呈下降趋势。

图 2 显示了温差与室内风机频率、室外风机频率、循环泵频率的柱状关系,温差达到 12 K 时,室内外 2 个风机的频率、循环泵频率均可下调到 40 Hz,因此在允许的温差范围内进行变频节能是可行的。

室内外温差的变化是动态的非定值,必须建立连续温差与频率、功率关系的预测模型,作为变频控制的参数。

在连续变化温差数据点对功率与频率建立 Elman 神经网络预测模型,预测结果曲线如图 3 所示。

图 3 中曲线显示了在 10~13 ℃ 范围内,随机

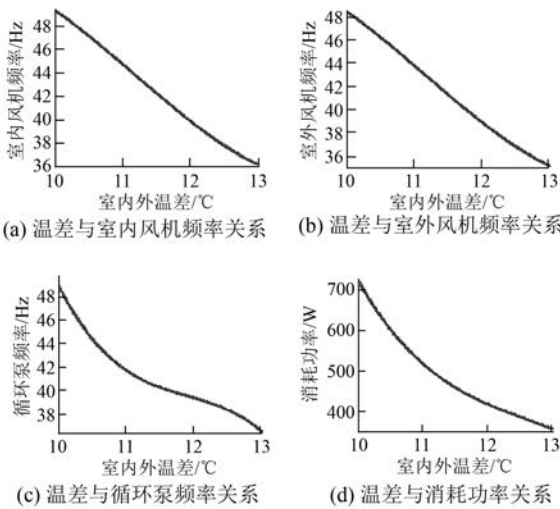


图 3 温差与频率、功率关系曲线

温差点与其相对应的基础运行频率及最优功率消耗情况。依据建立的预测模型,进行三次拟合,在置信度为 95% 时,得到拟合方程为

f(x) = p₁x³ + p₂x² + p₃x + p₄ (3)

式中: f(x)——功率和频率;

x——室内外温差;

p₁、p₂、p₃、p₄——系数,取值如表 3 所示。

表 3 功率与频率拟合方程系数

频率	p ₁	p ₂	p ₃	p ₄	SSE	R-square	RMSE
室内风机频率与温差	0.219	-7.342	77.059	-206.401	0.631	0.998	0.251
室外风机频率与温差	0.210	-7.079	73.189	-192.403	0.612	0.998	0.247
循环泵频率与温差	-0.863	30.821	-368.701	1 516.02	3.198	0.98	0.566
损耗功率与温差	-10.759	405.401	-5 149.01	2.242e+004	361.102	0.998	6.009

在 9.8~13.2 K(对应 35~50 Hz 频率区间)温差范围内可以通过方程进行变频参数设置,实现换热器自身的变频节能。

1.3 误差分析

为了对已建立的功率模型进行节能效果分析,本文以某农垦地区通信机房为试验对象,根据机房的实际环境参数,在冷热平衡实验室中进行相应的设置获取实测数据,将参数代入功率模型得到计算数据。试验过程中要求室内温度控制为

25℃(大型设备最佳运行温度要求),采用联动温控机制:设置温差大于 10 K 时启动乙二醇换热器进行控温,小于 10 K 停止乙二醇换热器启动空调控温。试验数据如表 4 所示。

表 4 乙二醇水溶液换热器功率模型误差分析

室内 温度/℃	室外 温度/℃	室内风机 频率/Hz	室外风机 频率/Hz	循环泵 频率/Hz	换热量/W		功耗/W		换热量相对 误差/%	功耗相对 误差/%
					模拟	实测	模拟	实测		
25	15	48.91	48.01	49.61	3 000	2 985	721	724	0.5	0.41
25	14	44.60	43.70	42.12	3 000	3 101	523	537	3.26	2.61
25	13	39.92	39.03	39.33	3 000	3 077	421	439	2.5	4.1

表 4 中的数据表明,功率模型计算数据与实测数据的相对误差均在 5% 范围内。

调频控制过程:室外温度低于 11.8℃,换热器进入恒频 35 Hz 运行;室外温度在 11.8~15℃范围内采用变频控制运行;室外温度高于 15℃时停止乙二醇换热器,启动空调。

温差呈现非连续变化状态,因此,乙二醇换热器的工作时间呈现非预测间断性特点。为达到实时控温的目的,需要采取换热器与空调交替联动式控温方式。对全年温控过程整体耗能分析,换热器全年的节能率计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{W_2}{W_1}\right) \times 100\% \tag{3}$$

2 变频节能效果分析

综合分析乙二醇换热器的节能效果,需要结合温差变化对换热器制冷情况的影响进行分析,归纳为 2 个方面:

(1) 室内外温差满足乙二醇换热器运行条件,对单独采用乙二醇换热器控温与单独采用空调控温 2 种情况分别分析耗能;

(2) 室内外温差不能满足乙二醇换热器运行条件(本文为小于 10 K),单独分析采用空调控温的耗能。

式中: W_1 ——使用换热器前的全年空调制冷耗电量;

W_2 ——使用换热器后的全年空调制冷耗电量。

以哈尔滨地区为例,本文借助清华大学开发的建筑能耗模拟分析软件 DeST^[15] 对全年的室外温度数据进行模拟,设定散热房内控温为 25℃条件下,在采用砖混 37 墙体和 50 彩钢板两种围护结构中,分别进行模拟试验,乙二醇换热器的全年节能数据,如表 5 所示。

实际运行过程中,温度变化表现为不确定性,

表 5 哈尔滨地区乙二醇换热器全年节能数据

维护 结构	室外温度大于 15℃			室外温度小于 15℃			全年节 能率/%
	冷负荷/kWh	工作时间/h	空调耗能/kWh	冷负荷/kWh	工作时间/h	空调耗能/kWh	
砖混 37	6 895.87	2 838	2 652.28	5 191.67	5 922	1 996.56	31.92
彩钢板 50	7 587.45	2 838	2 918.27	8 928.14	5 922	3 433.78	42.72

通过分析对比表 5 中的数据,哈尔滨地区全年室外温度大于 15℃的时间约为 2 838 h,即全年约有 1/4 的时间只能单独利用空调控温,这部分空调耗能不在本文的节能范围。温度小于 15℃的时间为 5 922 h,即全年约有 3/4 的时间可

以利用乙二醇换热器实现散热房控温。从全年整体控温过程分析,在砖混 37 围护结构中,散热房全年采用交替联动方式较单独采用空调节能 1 483.88 kWh,全年节能率达到 31.92%;在彩钢板 50 围护结构中,散热房全年采用交替联动方式

较单独采用空调节能 2 713.52 kWh, 节能率达到 42.72%。在以哈尔滨为代表的寒冷地区, 乙二醇换热器具有较大的应用前景, 可以通过建立乙二醇换热器——空调交替联动系统实现节能的目标。

3 结 语

本文针对 50% 浓度乙二醇溶液为工质的换热器, 研究了自然冷源利用率与换热器自身变频节能的关系, 建立了频率与功率、温差与功率、温差与频率的关系模型, 并以拟合的方程作为变频控制的参数。通过对哈尔滨地区散热房的全年温控数据分析, 得出: 采用乙二醇换热器与空调联动控温较单独采用空调控温节能效果显著, 砖混 37 围护结构中节能率 31.92%, 彩钢板 50 围护结构中节能率 42.72%。

【参考文献】

- [1] 宋卫堂, 姚珑璐, 丁涛, 等. 逆流式气-气换热器的设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 136-140.
- [2] 钟珂, 亢燕铭, 黄璞洁. 板翅式空气全热交换器热回收效率的实验研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(2): 62-67.
- [3] 杨开篇, 刁彦华, 赵耀华, 等. 热管式通风换热器热回收的实验研究[J]. 化学工程, 2009, 37(7): 17-20.
- [4] SANITJAI S, GOLDSTEIN R J. Heat transfer from a circular cylinder to mixtures of water and ethylene glycol[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4785-4794.
- [5] 黄建恩, 高涛. 一种土壤蓄冷与双级热泵集成系统[J]. 暖通空调, 2007, 37(11): 40-42.
- [6] 蒋彦龙, 元伟伟, 张秋, 等. MW 级风力发电机水冷系统的优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(2): 199-204.
- [7] DEHGHANDOKHT M, KHAN M G, FARTAJ A, et al. Flow and heat transfer characteristics of water and ethylene glycol-water in a multiport serpentine meso-channel heat exchanger[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(8): 1615-1627.
- [8] SIDDIQUI F A, DASGUPTA E S, FARTAJ A. Experimental investigation of air side heat transfer and fluid flow performances of multi-port serpentine cross-flow mesochannel heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 33(1): 207-219.
- [9] 郎铁军, 潘翠玉, 梁娟霞, 等. 一种可全年供冷的节能型风冷冷水机组的研制[J]. 制冷与空调, 2012, 12(1): 27-32.
- [10] 周福君, 张飞, 邹春阳. 冰水混合间接换热系统中换热器参数试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 126-129.
- [11] 杨诗成. 泵与风机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] 伍小亭, 芦岩. 循环水泵变频调速运行实例研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(8): 25-32.
- [13] 朱学莉, 齐维贵, 陆亚俊. 建筑供热负荷预报与预测控制策略研究[J]. 控制与决策, 2002, 17(51): 703-706.
- [14] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [15] 清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法 DeST[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

收稿日期: 2016 -11 -09

【读者群】

《电机与控制应用》杂志的读者包括电机与控制领域内从事科研、设计、生产的工程技术人员, 全国各大高等院校师生, 企业经营、管理、营销、采购人员, 各类产品代理分销渠道人员以及最终用户等, 遍及电力、石油、冶金、钢铁、交通、航

天、工控、医疗、机械、纺织、矿山等多个行业。

杂志读者群专业、稳定、层次高, 无论是交流前沿技术、实践经验, 还是传递行业信息, 开展企业及产品的广告宣传都能达到事半功倍的效果。