

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-834-06

# 某铁路站房空调系统水泵改造节能分析

郭涛<sup>1</sup> 吴宁<sup>1</sup> 张涂静娃<sup>2</sup> 肖骏林<sup>2</sup>

(1. 江苏省铁路集团有限责任公司 南京 210049;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

**【摘要】** 空调系统的设计以满足最大负荷为目的,但在部分负荷运行下,系统往往会出现“大流量小温差”的现象,特别对于铁路站房建筑,该类建筑客流量随时间的变化明显,由此产生建筑负荷变化也较为明显。因此,在实际运行中,末端所需要的水流量将不断发生变化,对系统的能耗有显著影响。为了具体研究不同水泵搭配下,系统的节能潜力,以实际工程为例,研究了全部采用定频水泵、变频水泵同步调频和一台定频水泵搭配多台变频水泵三种方式下,系统的节能情况,结果发现,同步调频和一定多变两种方式均具有节能潜力,其中同步调频的节能潜力更大。

**【关键词】** 铁路站房; 定频水泵; 变频水泵; 节能

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Energy-saving Analysis of Water Pump Renovation of Air-conditioning System in a Certain Railway Station

Guo Tao<sup>1</sup> Wu Ning<sup>1</sup> Zhangtu Jingwa<sup>2</sup> Xiao Junlin<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Railway Group Co., Ltd, Nanjing, 210049;

2.China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** The air-conditioning system is designed to meet the maximum load, but under partial load operation, the system often has the phenomenon of "large flow and small temperature difference". Especially for railway station buildings, the passenger flow of such buildings changes significantly with time. This produces a more obvious change in the building load. Therefore, in actual operation, the flow rate of the water pump will continue to change, which will have a significant impact on the energy consumption of the system. In order to specifically study the energy-saving potential of the system under different water pump configurations, this paper takes an actual project as an example to study the performance of the system under the three modes of using all fixed-frequency water pumps, synchronous frequency modulation of variable-frequency water pumps, and one fixed-frequency water pump with multiple variable-frequency water pumps. According to the energy-saving situation, it was found that both the synchronous frequency modulation of variable-frequency water pumps, and one fixed-frequency water pump with multiple variable-frequency water pumps methods have energy-saving potential, and the former has greater energy saving potential.

**【Keywords】** Railway station building; fixed frequency water pump; variable frequency water pump; energy saving

## 0 引言

空调系统能耗占建筑总能耗的 40%~60%以上<sup>[1]</sup>,其中机组、水泵和空调末端是空调系统中的

三大耗能部分,在设计时,根据负荷特点选取合适容量的机组,同时结合控制 and 功能需求对水泵和空调末端进行选配。而三者的能耗也成为了空调系统

主要能耗的来源, 一直以来不断有学者对空调系统的节能潜力进行研究, 而除去机组能耗, 系统的主要能耗便来自水泵和空调末端, 但是目前空调系统 90% 的时间是在低于最大负荷 65% 的情况下运行的, 因此经常存在“大流量小温差”的问题<sup>[2]</sup>。同时由于水泵的功率与水流量的大小相关, 因此, 采用变流量水系统将会提高系统节能效果。

在空调水系统中, 其主要能耗为水泵能耗, 而水泵的搭配形式存在多样性, 其中全部采用定频水泵 (以下简称: 定频水泵)、全部采用变频水泵并同频率调节 (以下简称: 同步调频) 和一台定频水泵和多台变频水泵搭配 (以下简称: 一定多变) 的方式较为多见。丁云飞等<sup>[3]</sup>研究了在部分负荷状态下, 变频调速水泵的效率, 结果显示当负荷率低于 25% 时, 交流电机的效率下降较快, 同时在负荷率较低时, 变频调速器的效率也较低, 因此建议变频调速水泵尽量在高负荷率下运行; 同时林立昌等<sup>[4]</sup>基于实测数据研究了多台变频水泵运行的优化效果, 结果显示当地源侧的总流量在单台水泵额定流量 100%~136% 和 181%~193% 时宜分别采用 2 台和 3 台水泵, 且节能率分别为 31.61% 和 19.56%, 空调侧总流量在单台水泵额定流量的 230%~260% 时宜采用 3 台水泵, 节能率为 12.82%; 邹同华等<sup>[5]</sup>人研究了变频水泵在开式和闭式系统中的应用, 结果显示变频水泵具有良好的节能潜力, 同时发现采用变频调节则无论单泵变频还是双泵变频, 闭式循环比开式循环的节能率高。惠文荣<sup>[6]</sup>研究了空调冷却水泵变频调速的能耗情况, 结果显示采用变频水泵后系统整体的节能率在 10% 左右。

以上表明, 采用变频水泵的系统具有较大的节能潜力, 因此本文以实际案例研究了上述三种水泵搭配方式下, 水泵的能耗, 并以定频水泵为对照, 分析了同步调频和一定多变两种方式的节能潜力。

## 1 水泵能耗计算理论

### 1.1 水泵能耗数学模型

通常情况下, 水泵的转速、流量和功率之间具有相关关系如式 (1) - (3), 根据公式 (3) 可以看出能耗和水泵的流量的三次方相关<sup>[7]</sup>:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} = X \quad (1)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (2)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^3 = X^3 \quad (3)$$

而对于变频水泵来说, 其运行情况还受变频器效率的影响, 因此, 有学者<sup>[3]</sup>提出了计算变频水泵能耗的方法, 如公式 (4) - (7):

$$\eta_m = 0.94187 \times (1 - e^{-9.04X}) \quad (4)$$

$$\eta_{vfd} = 0.5067 + 1.283X - 1.42X^2 + 0.5842X^3 \quad (5)$$

$$\eta_p = C (\text{常数}) \quad (6)$$

$$N = \frac{\gamma HQ}{\eta_{vfd} \eta_m \eta_p} \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为水的比重,  $\text{kg/m}^3$ ;  $X$  为电机相对转速百分数, %;  $\eta_m$  为电机效率;  $\eta_{vfd}$  为变频器效率;  $\eta_p$  为水泵效率。

### 1.2 水泵全年能耗模型

水泵的全年能耗等于水泵在各工况点下的运行功率和运行时间的乘积, 计算公式如式 (8):

$$N = T \int_0^{M_i} P_i(M_i) \beta_i(M_i) dT \quad (8)$$

式中:  $N$  为水泵运行总能耗,  $\text{kWh}$ ;  $T$  为水泵运总时间,  $\text{h}$ ;  $P_i$  为水泵在水流量  $M_i$  时的功率,  $\text{kW}$ ;  $\beta_i$  为在水流量  $M_i$  时水泵的运行时间占总时间权重。

## 2 运行方式介绍

### 2.1 定频水泵运行方式

定频水泵运行下 (见图 1,  $Q_{\text{额定}}$  表示定频水泵,  $Q_{\text{变}}$  表示变频水泵, 下同), 水泵以额定的频率运转, 单位时间内输出的流量一定, 无法有效响应负荷侧的变化, 单位时间内的能耗不会随负荷的变化而变化, 其能耗往往较高; 此外, 在并联使用时, 水泵的工作状况较差, 能耗较大, 而水泵变频调速可以有效地减少该问题<sup>[8]</sup>。

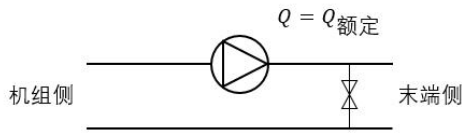


图 1 定频水泵运行示意图

Fig.1 Operation diagram of fixed frequency pump

### 2.2 同步调频运行方式

同步调频方式运行下（见图 2），所有水泵的运行频率均可变化，能够较好的响应负荷侧的需求，单位时间内的能耗随着负荷的变化而变化。但变频水泵存在变频下限，一旦超过该限制，将会严重损伤水泵，同时系统效率下降较快，因此，变频水泵往往在一个“高效”区间内运行，所以流量调节范围有限，其单位时间能耗也在一个范围内变化；此外在变频水泵台数切换时存在“最佳切换”点（见图 3），在该点对应的流量下切换时，能有效保持水系统的运行稳定性。

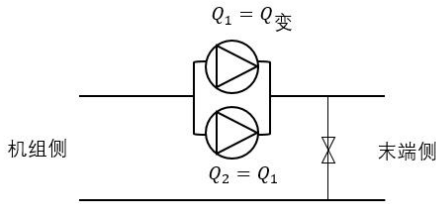


图 2 两台变频水泵同时运行示意图

Fig.2 Schematic diagram of two variable frequency pumps running at the same time

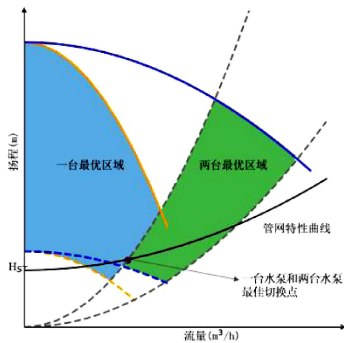


图 3 多台变频水泵切换示意图

Fig.3 Schematic diagram of switching of multiple variable frequency pumps

### 2.3 一定多变运行方式

一定多变的方式运行下（见图 4），一台定频水泵承担变频水泵的变频下限的流量输出，当一台定频水泵和一台变频水泵并联后，其性能曲线为图

5 中一定多变运行曲线及虚线所示。假设系统所需要的流量为  $Q_3$ ，然而这时仅开启定频水泵只能为系统提供的流量为  $Q_1$ ，因此此时要开启变频水泵，并不断提高转速，直至变频水泵获得和定频水泵同样的出口压力，才可以为系统提供  $Q_2$  ( $Q_3-Q_1$ ) 的流量。否则扬程较低的水泵的止回阀将关闭，造成水泵空转。由相似定律可以得知此时变频水泵消耗的功率升高，此外，这时由于两台水泵的出口压力相同可能会造成管路流量大于系统所需流量，因此要降低阀门的开启来使得流量满足要求<sup>[2]</sup>，因此可以看出一定多变的模式存在一定限制。

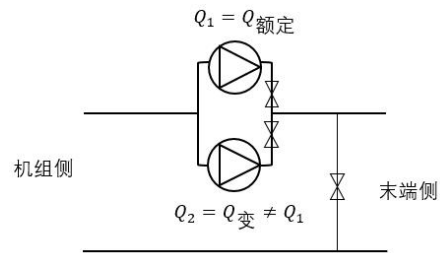


图 4 一台定频水泵和一台变频水泵联合运行示意图

Fig.4 Joint operation of a fixed frequency pump and a variable frequency pump

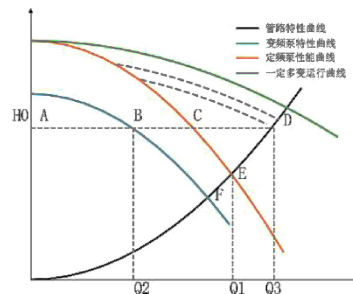


图 5 一定多变水泵运行示意图

Fig.5 Schematic diagram of operation of fixed-variable combined water pumps

综上，每种水泵的搭配方式各有其优缺点，同时在不同的系统中，其对最终能耗的影响程度也不同。因此，考虑计算代价和保证研究结果的工程应用价值后，本文简化了部分计算过程，重点突出不同水泵搭配方式的节能潜力。

## 3 能耗计算方法

### 3.1 水泵能耗计算

在计算水泵能耗时，主要根据负荷所需流量来计算该流量下水泵的功率，从而计算能耗。如图 6

所示, 对于定频水泵, 由于在运行中其始终保持额定流量运行, 因此运行中的功率极为额定功率; 对于同步调频的方式, 在运行中流量是平均分配给两台或多台变频水泵, 让其一同样的频率运行, 因此可以视为所有变频水泵的运行功率一致, 因此, 此时仅需要计算出一台变频水泵在对应流量下的功率, 即可进一步计算出所有水泵的总能耗; 对于一

定多变的方式, 在运行中, 应首先判断所需流量是否高于定频水泵的流量, 当不高于时, 仅开启定频水泵运行, 此时仅计算定频水泵的功率; 当高于定频水泵的额定流量时, 计算出需要由变频水泵补充的流量, 并计算在保持出口压力和定频水泵相同, 且能满足流量需求时的功率, 此时水泵的功率是定频水泵额定功率和变频水泵功率之和。

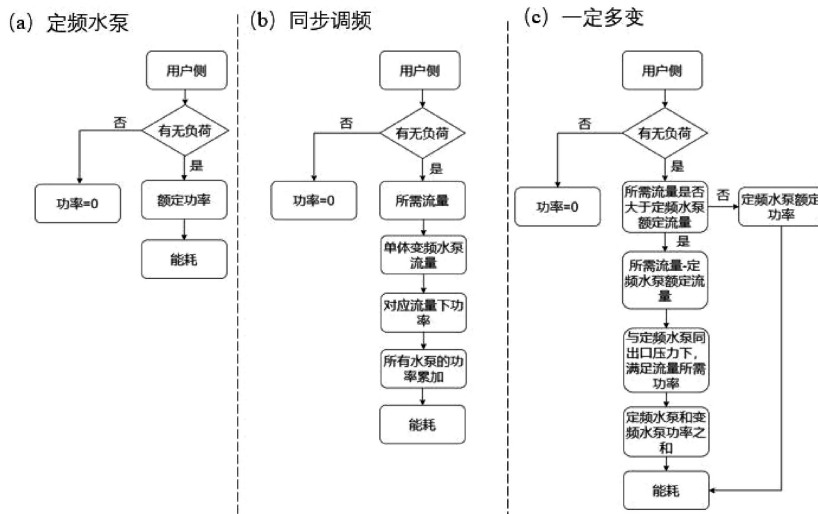


图 6 水泵运行能耗计算流程

Fig.6 Calculation flow of water pump operation energy consumption

### 3.2 机组能耗计算

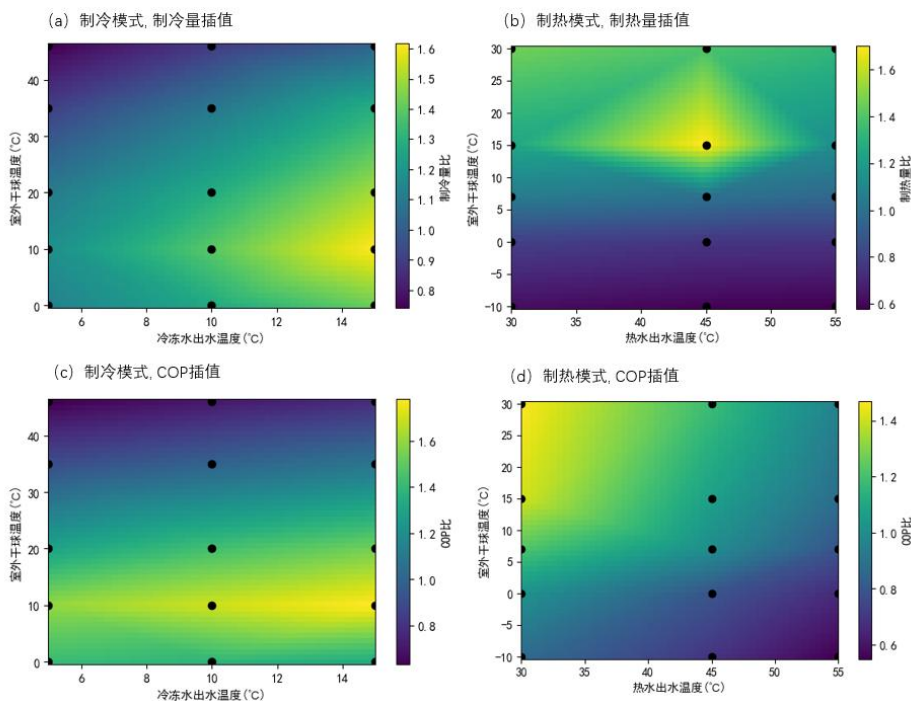


图 7 机组制冷/热能力和 COP 插值结果

Fig.7 Cooling/heating capacity and COP interpolation results of the unit

在机组选型时,其仅有若干标准工况下的制冷/热量及相应的 COP,但是在实际运行时,其经常不在标准工况下运行,因此为了计算非标准工况下的机组制冷/热量情况,本文对该机组的室外干球温度、冷冻水出水温度,热水出口温度等进行二维插值(见图 7 (a) 和 (b))。具体来说,将选型手册列出的各标准工况下的制冷/热量与额定制冷/热量进行比较,得对应标准工况下的制冷量比和制热量比;进一步地,根据此结果进行二维插值计算,即可得到机组在任意工况下的制冷/制热量;相似地,在计算机组 COP 时,也采用该方法进行二维插值计算(见图 7 (c) 和 (d)),即可得到任意工况下的 COP,进而根据制冷/热量计算得出在该运行下所消耗的能量。

## 4 结果分析

### 4.1 建筑负荷

以建设地的典型气象年数据作为室外计算参数,利用 DeST 建模计算站房建筑集中空调部分空间(即站厅部分)负荷的模拟,结果如下,根据站房建筑和现有分层空调设计特点,按照《铁路房屋供暖通风及空气调节设计规范》(TB 10056-2019)关于分层空调负荷计算方法相关规定,空调冷负荷

在模拟结果基础上乘以 0.8 的系数后,站厅热负荷为 1049kW,冷负荷为 1479kW,年耗热量为 69.98 万 kW,年耗冷量为 114.94 万 kW,全年逐时负荷变化及分布情况如图,由图 9 可以看出,负荷大部分分布在低水平段,具体地说,冷负荷主要分布在 500kW 以下,热负荷主要分布在 400kW 以下。换句话说,在运行时,负荷侧需要的水流量实际大部分时间内都低于设计最高流量,因此,若采用定频水泵,则大部分能耗消耗在流经旁通管的水流量上,无效能耗较高,严重降低了系统的效能,因此有必要对水泵搭配方式具体研究。

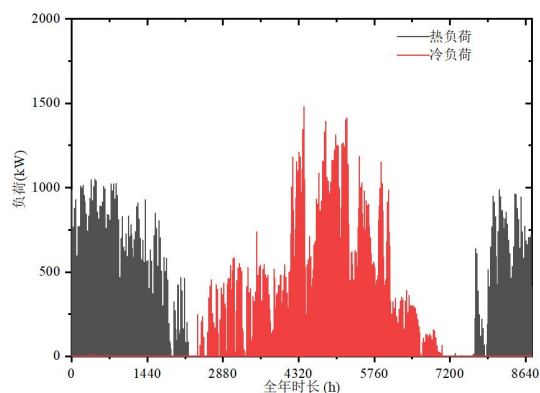


图 8 站房建筑全年逐时负荷

Fig.8 Annual hourly load of station building

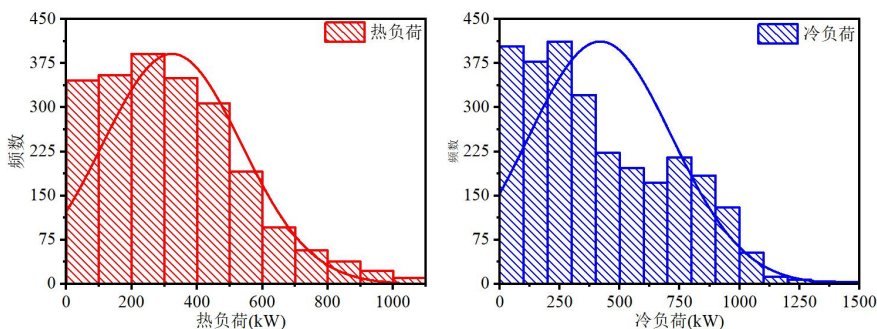


图 9 站房建筑全年负荷分布

Fig.9 Annual load distribution of station buildings

### 4.2 能耗对比

#### 4.2.1 水泵参数

根据空调系统的设计,此站房需要采取两套水系统,供回水温差为 5℃,该两套水系统独立运行并分别承担不同的负荷,其中一套系统需要承担总负荷的约 46.7%,剩余的 53.3%由另一套系统承担,因此,本文所说的每种搭配方式在实际计算时需要进行两次,而每种搭配方式最终的能耗是两次计算

结果之和。

在选择水泵时,每种搭配方式的水泵总额定流量不低于设计流量,但在选型时,无法精确选择十分合适的水泵,因此,每种搭配方式最终的总额定流量、额定功率和效率存在一些差异,这在实际应用时难以避免的,因此,本文在节能分析是忽略了该部分可能带来的影响,最终的水泵参数如表 1 所示。

表 1 不同搭配方式下的水泵参数

Table 1 Parameters of water pumps in different configurations

搭配方式	水泵	额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	额定功率 (kW)	效率	台数
定频水泵	定频水泵-1	120	15	0.85	1
	定频水泵-2	80	7.5	0.82	1
同步调频	变频水泵-1	56	7.5	0.79	3
	变频水泵-2	24.5	7.5	0.754	3
一定多变	定频水泵-1	39.2	11	0.8	1
	定频水泵-2	23	10.5	0.8	1
一定多变	变频水泵-1	56	7.5	0.79	2
	变频水泵-2	32.7	5.5	0.75	2

#### 4.2.2 运行策略

##### (1) 定频水泵

在系统运行过程中, 无论水流量如何变化, 水泵均在额定转速下运行, 因此其单位时间内的能耗基本保持一致。

##### (2) 同步调频

在该运行方式下, 当环路流量低于变频水泵的变频下限流量时, 水泵停止变频, 保持最低运行下限频率, 知道流量再次高于变频下限流量后再根据实际流量进行变频调节。

##### (3) 一定多变

在该运行方式下, 一台定频水泵用来承担低于变频水泵的变频下限流量, 当流量高于单台变频水泵的变频下限流量时即关闭定频水泵, 开启变频水泵, 并根据环路的流量变化适时调整开启的变频水泵个数。

#### 4.2.3 节能效果

根据计算结果, 如图 10 所示, 全部采用定频水泵时, 水泵的总能耗为 15.73 万 kWh, 采用一定多变的方式, 水泵的总能耗为 13.54 万 kWh, 而采用同步调频的方式, 水泵的总能耗为 7.37 万 kWh。因此, 可以看出采用一定多变和同步调频的方式都较目前设计节能, 其中一定多变降低约 13.9% 的水泵运行能耗, 同步调频的方式降低约 53.1% 的水泵运行能耗。

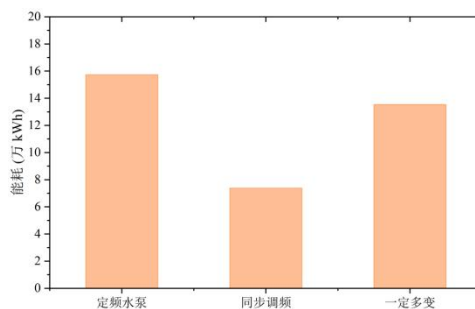


图 10 不同搭配方式下水泵的能耗

Fig.10 Energy consumption of water pumps in different configurations

## 5 结论

在空调系统中, 水泵存在较大节能潜力, 本研究分析了三种水泵能耗的运行方式和能耗计算模型, 并依某铁路站房建筑为研究案例, 对比分析了其节能潜力。结果显示, 采用一台定频水泵和多台变频水泵的运行方式和全部采用变频水泵的运行方式都较全部采用定频水泵的运行方式节能, 其中前者可节能约 13.9%, 后者可节能约 53.1%。

## 参考文献:

- [1] 江亿. 我国建筑能耗状况与节能重点[J]. 建设科技, 2007,(5):26-29.
- [2] 李彬, 肖勇全, 李德英, 等. 变流量空调水系统的节能探讨[J]. 暖通空调, 2006,(1):132-136.
- [3] 丁云飞, 江长平. 变频调速水泵的能耗分析[J]. 流体机械, 2001,(3):25-26.
- [4] 林立昌, 刘青荣, 阮应君. 基于实测数据并联变频水泵运行优化[J]. 科学技术与工程, 2020,20(30):12546-12551.
- [5] 邹同华, 马淑媛. 水泵变频能耗的试验研究[J]. 流体机械, 2011,39(10):1-3,9.
- [6] 惠文荣. 空调冷却水泵变频调速的能耗分析[J]. 中国设备工程, 2020,(14):100-102.
- [7] 杨春, 高红斌. 流体力学泵与风机[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [8] 刘光大, 马卫武, 刘启一, 等. 空调冷却水泵变频调速的能耗分析[C]. 全国暖通空调制冷 2010 年学术年会论文集, 2010:174.