

能流图在洁净手术部 空调设计中的应用*

中国建筑科学研究院 孙 宁[☆]

摘要 由于对室内环境的要求较高,医院洁净手术部的空调系统能耗比普通区域的空调系统大。为了简化能耗分析,提出一个新的技术经济评价指标——空调能效成本指标 ECE,并将其与能流图融合,作为空调能耗的辅助分析工具。利用能流图和 ECE 分析了建筑布局、换气次数、风机风压、空气处理过程等对手术部空调能耗的影响。建议在设计阶段采用该简便方法对空调方案的能耗和能源费用进行必要的技术经济比较分析。

关键词 手术室 空调能耗 能流图 空调能效成本指标 评价

Application of energy flow chart on air conditioning system design for clean operating departments

By Sun Ning[★]

Abstract The energy consumption of air conditioning system in operating rooms is higher than that of other zones in a hospital because of higher indoor environment requirement. In order to simplify energy consumption analysis, puts forward a new technical economical evaluation index, i. e. energy cost effectiveness (ECE) of air conditioning, which is used as an auxiliary analysis tool combined with an energy flow chart. With the energy flow chart and the ECE index, analyses the influence of building layout, air change rate, fan pressure head and air handling process on the energy consumption of air conditioning system for clean operating departments. Suggests that the method be used to make necessary comparison and perform technical and economic analysis for the energy consumption of air conditioning schemes at design phase.

Keywords operating room, energy consumption of air conditioning, energy flow chart, energy cost effectiveness index of air conditioning, evaluation

★ China Academy of Building Research, Beijing, China

①

1 背景

目前我国正在进行手术部的建设和升级改造,单个手术部的规模不断刷新纪录。医院单位面积能耗在 $200 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 左右,而手术部能耗高达 $500 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,在各类用房中最高。例如一个只有 10 间手术室的手术部,若按每年 150 天制冷、每天运行 10 h 计算,全年仅电费就接近 35 万元。在照明、医疗设备、办公设备和空调等各项能耗中,空调能耗占 70%~80%。空调能耗包含了制冷机、锅炉、风机、水泵、电加热器、加湿器、除湿机等设备的能耗。各种能耗费用最后都得

由医保或患者承担,因此,降低手术部能耗费用事关民生大事。

手术部直接用于医疗的能耗会随着医疗技术的发展继续增长,单纯讨论节能意义不大,更有效的途径应该是通过提高能源有效利用率,降低能耗成本。本文以能流图和空调能效成本指标 ECE (energy cost effectiveness) 为分析工具,并从建筑布局、空调通风风量/风压、空气处理方式等几个方

①[☆] 孙宁,男,1971年1月生,博士,副研究员

100013 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院

(010) 84278377-815

E-mail: sunning@chinaibee.com

收稿日期:2013-03-19

修回日期:2013-04-19

* 国家科技支撑计划课题“医院建筑绿色化改造技术研究工程示范”(编号:2012BAJ06B06)

面探讨在设计过程中降低手术部空调能耗费用的方法,供相关人员参考。

2 能流图与能效成本指标 ECE

为了分析手术部能耗,本文引入能流图方法,该图可以很直观地显示系统能量流动、转换及数量关系。例如某一个手术部有 10 间手术室及若干辅助用房,洁净区空调系统采用一次回风电再热方式,该系统的能流图如图 1 所示(其中,制冷机电耗包含了水泵能耗,风机为输入电功率)。

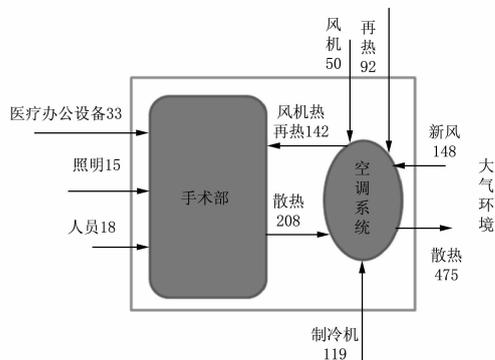


图 1 夏季设计工况的手术部能流图
($ECE = 3.8$ 元/kW)(单位: kW)

由图 1 可以看到,为了消除室内 66 kW 的热负荷以及提供足够的换气次数,消耗了 261 kW 的电,并向环境排放了 475 kW 的热量。如果电价是 0.7 元/(kW·h),则该系统夏季设计工况 1 h 空调耗电量: $119 \text{ kW} \cdot \text{h} + 50 \text{ kW} \cdot \text{h} + 92 \text{ kW} \cdot \text{h} = 261 \text{ kW} \cdot \text{h}$,电费 182.7 元。

根据全年的能耗和能耗费用计算可以对不同的空调设计方案进行评价和比选,但需要使用全年逐时气象数据并进行大量的计算,为简化评价过程,可以仅对典型工况(如夏季、过渡季、冬季)进行评价。而且笔者认为,对于工程设计来说,采用能耗成本评价比采用能耗评价更有实际意义。现在的医疗和照明设备都是使用电能的,而医院空调设备使用的能源可以有电、天然气、柴油、煤。为了进行设计方案的比较和选择,合理地评价技术措施的经济性,采用货币这个一般等价物来计算空调系统的能耗成本,比采用折算的一次能源消耗更能体现技术和经济综合评价。

空调能效成本指标 ECE 的定义式如下:

$$ECE = \frac{C}{P} \quad (1)$$

式中 C 为空调系统在某工况下 1 h 的能耗费,

P 为医疗、办公和照明系统的设计电功率, kW。

空调单位时间能耗费包括用于手术部的制冷机、锅炉、风机、水泵、电加热器、加湿器、除湿机等设备在某一设计工况下的每 h 能耗费用。医疗、办公设备及照明系统的设计输入电功率是指各医疗、办公及照明设备的设计安装电功率乘以各自使用率之后的和。

空调是为医疗服务的, ECE 指标表示了空调能耗费用与医疗电耗的比例关系。该指标比单纯地折算一次能源消耗更具有经济性分析的价值。

由于空调工况不同,可以分为夏季、冬季和过渡季指标。以上例计算,其夏季工况的空调能耗成本指标 ECE 为 $182.7 \text{ 元} \div (33 \text{ kW} + 15 \text{ kW}) = 3.8$ 元/kW。数值越小,空调能源利用越好。

下面利用能流图和 ECE 这两个工具分析手术部空调节能的几个途径。

3 空气热湿处理方式

3.1 送风再热

一些手术室空调系统采用一次回风处理过程,即新风和回风混合后经盘管冷却到露点温度后再加热到送风状态点,而且再热方式以电热为主。在设计工况下,再热能耗可占全部空调能耗的 25%~60%,手术室的等级越高,再热能耗所占比例就越高。

在图 1 中,制冷机的冷凝热本来是排放到大气环境中的废热,通过热回收可以作为再热热源。热回收方法如下:

1) 可在冷凝器高温段设热回收器,以水作冷却介质,热水的温度可以达到 $30 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。已有制冷机制造商生产带热回收的风冷冷水机和水冷螺杆冷水机。不少医院的手术部采用风冷冷水机组,可以通过改造安装热回收器。

2) 对于水冷冷水机组,温度 $30 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却水可供再热使用,通常机组的效率在 4.5~6.0 之间,比电热节能,比锅炉热水的经济性好。

图 2 为制冷机冷凝热回收利用后的手术部能流图。如图 2 所示,如果再热中的 85% 由冷凝热承担,则空调能效成本指标 ECE 为 2.7 元/kW,下降 30%。

即便当制冷机的冷凝热不好回收,采用燃气锅炉提供的热水作再热源,运行成本也比电热低得多。医院全年都供应生活热水,温度在 $50 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$

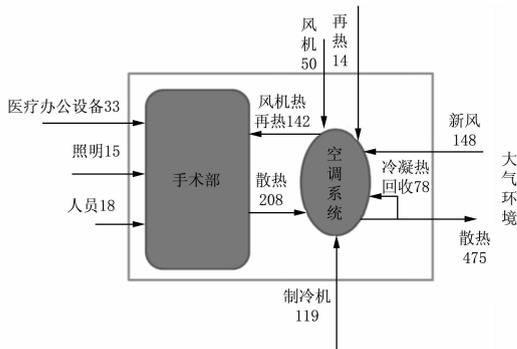


图2 制冷机冷凝热回收利用后的手术部能流图
(ECE=2.7元/kW)(单位:kW)

表1 手术室空调负荷

| 手术室等级 | 送风量/(m ³ /h) | 新风量/(m ³ /h) | 显冷负荷/W | 潜冷负荷/W | 新风冷负荷/W |
|-------|-------------------------|-------------------------|--------|--------|---------|
| I | 9 360 | 1 000 | 8 185 | 883 | 10 900 |
| III | 1 740 | 800 | 1 955 | 589 | 8 720 |

注:室内温湿度分别为24℃和50%,室外夏季设计干球温度33.5℃,湿球温度26.4℃。

表2 一次回风系统再热量

| 手术室等级 | 表冷器负荷/kW | 风机功率/kW | 再热量/kW |
|-------|----------|---------|--------|
| I | 45.2 | 7.8 | 17.5 |
| III | 15.9 | 1.5 | 3.1 |

注:风机功耗本身具有再热作用,其热量已经从电再热量中扣除。

在一次回风系统中,为了控制室内湿度,把回风和新风全部冷却到送风露点温度,使得送风具备的制冷能力大大超过了室内冷负荷和新风冷负荷,然后不得不再热升温。如表1,2所示,I级手术室的室内冷负荷仅9 kW,而送风提供的制冷量达到26.5 kW,多余的17.5 kW冷量只能靠再热抵消掉。很显然,一次回风系统先冷却再加热的处理过程中存在冷热抵消造成的能源浪费。

理论上,通过调整一次和二次回风比例,二次回风系统可以避免再热,可以使用少量一次回风,不仅消除了再热电耗,而且大大减少了表冷器的冷负荷。如表3所示。

表3 二次回风系统回风量

| 手术室等级 | 一次回风量/(m ³ /h) | 二次回风量/(m ³ /h) | 表冷器负荷/kW | 再热量/kW |
|-------|---------------------------|---------------------------|----------|--------|
| I | 3 410 | 4 950 | 23.7 | |
| III | 120 | 820 | 12.7 | |

在工程中,靠自控精确调整一、二次回风量很困难,对自控系统整定和风阀性能要求过高。在实际应用时,可以采用固定一、二次回风阀门的办法,并保留部分再热功能来控制室内温度。

此外,我国北方一些地区夏季高湿天气的时间不是很长,只要保证湿度在一定范围内,可以通过调节冷水调节阀开度直接控制室内温度,取代控制盘管下游的送风露点温度。这样,也可以大幅减少

之间,也可以考虑使用换热器与生活热水进行换热,为再热盘管提供40~50℃的热水。以上例计算,使用天然气生产的热水再热可使ECE从3.8元/kW下降到3.2元/kW(85%再热利用热水,天然气价格按2.0元/m³计算)。

3.2 二次回风与新风湿度优先

以北京地区典型的两个等级手术室为例进行分析比较,表1给出了在夏季制冷工况下的负荷和风量,表2是一次回风处理过程的主要计算结果。

再热能耗。

从表3中还可以看出,III级手术室一次回风量很小,可以考虑新风单独冷却除湿处理后直接与回风混合后送风。对于全国大部分室外空气湿度不高的地区,如果新风集中热湿处理到送风状态的露点温度,则新风能够承担室内全部湿负荷及部分室内显热负荷,可以使空调机组的表冷器处于干工况、小负荷运行,不用再热处理,而且干盘管可以使用高温冷水(14℃以上),提高制冷机的能效。这就是独立新风湿度优先方式。图3是采用独立新风湿度优先方式的能流图,以上例计算,ECE可以降到2.0元/kW。

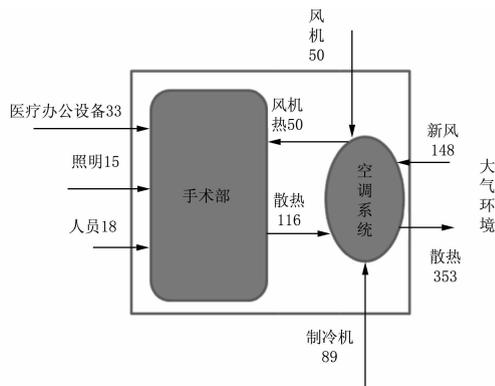


图3 采用独立新风湿度优先的手术部能流图(ECE=2.0元/kW)(单位:kW)

4 风机功耗

在一定的风量下,风机的功率取决于风机全压及其电动机效率和传动效率。实际工程中新风机组和空调机组的余压取值往往过大。甚至个别项

目中,送风机电动机的输入频率已经降低到 30 Hz,手术室的换气次数仍超过上限值很多。

对于上例,如果风机能耗下降 20%,则图 3 所示系统的空调能效成本指标 ECE 可以下降到 1.8 元/kW(见图 4)。在满足过滤效率的前提下,优先选用寿命期内低阻力的过滤器可以进一步降低能耗费用。

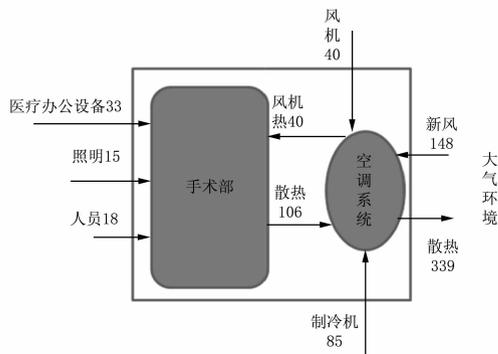


图 4 风机风压下降后的手术部能流图
($ECE = 1.8$ 元/kW)(单位:kW)

5 送风速度和换气次数

现行手术部规范规定,Ⅰ级手术室工作面高度(即地上 0.8 m 处)截面风速为 0.25~0.3 m/s;Ⅱ级手术室换气次数为 30~36 h^{-1} ,Ⅲ级 18~22 h^{-1} ,Ⅳ级 12~18 h^{-1} 。多年实测发现,不少手术室的设计风量是按照规范上限选取的,实际运行送风量更大。因此,建议设计人员根据手术室的面积、送风天花的尺寸以及手术类别等要素计算送风量;建议施工人员进行节能调试,运行管理人员通过监测系统参数,合理调整风机运行转速。

此外,笔者所在课题组通过多年实测和现场实验发现,适当降低Ⅰ级手术室手术区的截面风速,能够实现手术区静态 5 级洁净度以及动态的环境要求,可降低风机能耗 15%左右。

6 建筑布局

医院洁净手术部包含洁净手术室、洁净辅助用房和非洁净辅助用房。通常,洁净辅助用房有护士站、洁净区走廊、洗手间、无菌物品存放室、预麻室、麻醉苏醒室、体外循环室、更衣室等;非洁净辅助用房有医护人员餐厅、医护休息室、值班室、示教室、污物暂存处、储物间等。

不过,一些医院为了流程方便,常常把上述非洁净用房也并入了手术部的洁净区。扩大的洁净区同样按照净化空调的要求,尽管增加的造价不多,但是导致日后运行费用增加比较多。

非洁净区用房只要符合普通供暖、通风和空调要求即可。所以,应该将医护人员的部分办公、休息及污物暂存等用房布置在非洁净区,这样可以大大减少能耗费用。

此外,由于手术部的更衣室(含卫生间和淋浴间)的使用率在全天中不是很高,如果常年按照Ⅳ级辅助用房 8~10 h^{-1} 的换气次数运行,风机能耗增加。若能将其按非洁净区用房考虑,则可以减少运行能耗。为保证洁净区的洁净度和卫生要求,可以考虑在更衣室与洁净区走廊之间设置一个缓冲间(区)。

7 结语

本文针对手术室空调能耗费用问题,提出了能流图和手术部的能效成本指标 ECE 两个分析工具。我国气候多样,各医院手术部功能布局亦各有不同,采取的热湿处理方式不同,相应的运行策略各异,本文仅仅分析了几个方面的影响因素,以此抛砖引玉,希望更多的工程师参与医院空调技术讨论和实践。手术室空调系统设计不能仅仅满足于符合规范要求和建设方的功能需求,一个好的设计一定要在设计阶段进行必要的技术经济分析比较。