

文章编号:1005-0523(2011)06-0080-07

基于能耗分析的车厢热舒适性综合研究

徐青¹, 陈夏¹, 汪卫东², 屈睿瑰³, 刘广海⁴, 骆坚⁵

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西电力职业技术学院动力工程系, 江西 南昌 330013; 3. 广州城市职业技术学院建筑环境学院, 广州 广东 511400; 4. 广州大学商学院, 广州 广东 511400; 5. 南昌铁路局人事处, 江西 南昌 330013)

摘要:随着人们生活水平的提高,旅客对列车的舒适度也提出了更高的要求,如何在保障旅客热舒适性的同时降低能耗已成为当前研究的热点问题。基于热舒适性评价指标和车厢能耗模型,针对影响列车空调系统能耗以及热舒适性的车厢内风速、温度和相对湿度加以综合探讨,提出了列车空调系统的节能调控措施,为列车空调系统的进一步节能改造和改善车厢内人体热舒适环境提供了理论参考依据。

关键词:列车空调;能耗模型;舒适;节能

中图分类号:U271.2

文献标志码:A

我国空调列车自投入使用以来,经过不断地技术更新和发展,已经成为人们出行快捷舒适的交通工具。随着经济的增长,我国旅客列车正向高速化迈进,人们对列车空调的舒适性要求越来越高。由于人体的热舒适感与车厢内空气温度、新风量、车厢内相对湿度以及车内空气流速等多种因素有关,因此,要得到较舒适的车厢内环境受多种因素的共同影响。铁道部颁布的《铁路节能技术政策》明确要求严格控制空调列车制冷制热管理,减少不必要能耗。目前,单纯控制车厢内温度很难真正满足人们对舒适性的需要,即使达到较舒适的车厢内环境,也是以空调系统能耗的增加为代价。因此,在满足舒适性的同时如何节约能耗是当今铁路空调列车亟需解决的问题^[1-4]。本文基于列车车厢能耗模型研究,结合上述影响因素,对车厢内热舒适性进行了综合探讨。

1 列车空调车厢热平衡能耗模型的综合计算

1.1 车厢热平衡模型的构建思想

取YW25G型空调硬卧列车的一节车厢为研究对象。该车厢长18 838 mm,宽2 885 mm,高2 750 mm,车窗1 064 mm×1 014 mm,共设11个卧铺单元,满员66人。由于列车结构非常复杂,完全按照其实体建立计算模型存在一定困难,因此基于合理简化的原则,在使用热平衡分析法初始化模型时需对车内区域做出以下假设:①整个车体为规则的长方体,并单独作为研究基本单元;②忽略车两端乘务员室、配电间、厕所以及邻节车厢对车体温度及能耗状况的影响;③车厢两端车门近似为绝热状态;④采用一维处理壁体的传热过程;⑤车厢隔热壁各层材料的物理性质不随温度的变化而改变;⑥车厢内空气温度恒定为26℃,相对湿度为60%,车内风速0.25 m·s⁻¹,且车外天气晴朗,无云层覆盖。

基于以上假设,车厢热平衡模型的围护结构由6个隔热壁组成:车顶、车底、两侧车窗和两侧侧壁。如以列车的行驶方向为前方,令1,2分别代表车顶和车底;3,4分别代表偏西和偏东车壁;5,6分别代表偏西和偏东车窗(如图1所示)。同时,假设各围护结构内表面所接收的太阳直射辐射量和照明辐射得热均匀分

收稿日期:2011-10-23

基金项目:江西省科技厅科技支撑项目(2009AE01602);铁道部科技开发重点课题(2010Z002-B)

作者简介:徐青(1962—),女,副教授,主要研究方向为暖通节能与多相流体的检测。

布在内表面上,即可构建车厢内各个壁面的热平衡模型。

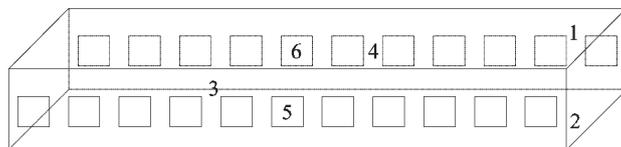


图1 YW25G型空调硬卧列车车厢模型示意图

Fig.1 Carriage schematic diagram of YW25G air-conditioning hard berth sleeper train

其中车厢热平衡模型包括了车外气象参数模型,车厢内外表面热平衡子模型,壁体传热模型以及车内空气热平衡模型等,在上述模型基础上可建立车厢热平衡方程组,联立求解即得到车厢内表面温度状况和车内冷负荷变化情况,方便对运行中列车的热工性能评价。

1.2 车厢热平衡模型的综合计算分析

在热平衡模型计算中,空调列车由于其运动特性,模拟起来比空调建筑更为复杂,因此沿途的室外气候参数、车内的人员等因素的变化和建筑物在一天24 h的变化有一定的相似性。通过计算逐时冷负荷可以得出任何时刻列车所需制冷量。以行程南昌—厦门为例,采用上述假设条件,调用沿途室外综合温度,采用非稳态传热法通过使用编程软件编写的热平衡程序运算和逐时迭代,最终列出2010年8月11日18时至次日11时,沿途各壁面逐时温度及各壁面的动态能耗状况,如图2所示。

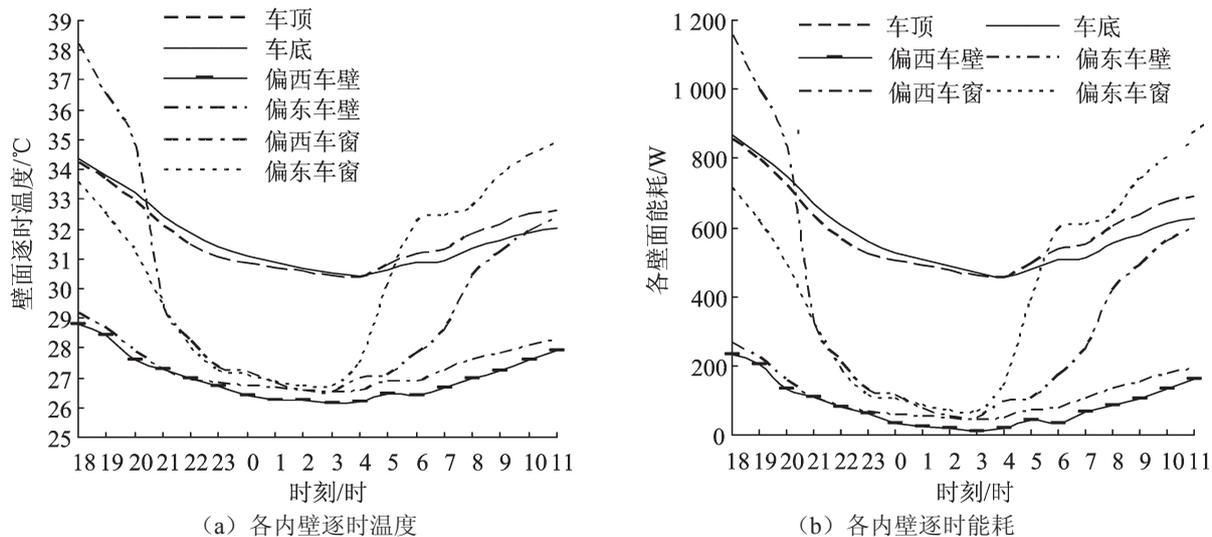


图2 南昌至厦门车厢各内壁逐时温度和逐时能耗

Fig.2 Hourly railway carriage indoor temperature and energy consumption of the train from Nanchang to Xiamen

空调列车在实际线路上运行时,各壁面温度的变化情况存在着差异:车顶温度变化范围为30.36~34.21℃,车底为30.40~34.38℃,偏西车壁为26.14~28.78℃,偏东车壁为26.52~29.17℃,偏西车窗为26.52~38.21℃,偏东车窗为26.70~33.57℃。由图2(a)清晰可见,各壁面温度变化趋势大致相同,其中以车窗的内壁温度变化最明显,因为车窗属于无热惰性围护结构,白天吸收大量的太阳辐射热,温度变化较大;当列车处于夜间行驶时,无法接收太阳辐射,随着旅客活动量的减小,内壁温度接近于车内空气温度,而其他壁面随着室外综合温度高低程度的不同也有所不同。同时由于受到太阳辐射和壁面热惰性的影响,各壁面的温度传入车厢内时有一定的延时,使得上午偏东侧内壁温较高,且在快接近中午时达到最高;类似的,下午偏西侧内壁温较高,傍晚时达到最高。图2(b)为车厢各壁面逐时能耗,可以看出壁面能耗的变化趋势与壁温一致,以车窗变化最为明显,所以在壁面能耗中,温度是影响能耗的主要因素。

列车车厢总冷负荷除了围护结构冷负荷,还包括照明、人员、渗风以及新风等方面,其中空气渗透量按每米门窗缝隙渗入的空气量 $L = 8.75 \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{h})^{-1}$ 进行计算,结合内壁温度以及热平衡方程可得出南昌—厦

门沿途车厢的各项负荷和空调逐时总负荷变化曲线。从图3(a)中可以看出,车厢各项能耗与总能耗的变化规律相似,整个行程中最大负荷为35.33 kW,出现在18时;最小负荷为12.06 kW,出现在次日凌晨4时。白天列车受车外环境温度、太阳辐射、新风量和车厢内散热的综合影响,特别是在中午到下午时间段内,属于太阳辐射比较强烈的时间,且旅客活动量较强,所需新风量也较大,由此可知太阳辐射和新风量对负荷的影响很大,并且新风负荷在总负荷中所占比例很大;而在夜间,空调负荷只受外部温度、新风量以及车厢内散热的影响,旅客活动量小,所需新风量也相对减少,较白天来说负荷大大地减小,各项负荷对总负荷的影响也相对减少。

此外,图3(b)显示了南昌至厦门整个行程中,各部分能耗所占比例。其中在进行热平衡模拟时,围护结构传热是采用非稳态传热法进行计算,且图中显示围护结构能耗占总能耗14.43%,其影响不容忽视,也进一步说明了采用非稳态法准确计算围护结构传热的意义所在。而其余各部分能耗也分别显示了各自在列车整个行程能耗中的重要程度,应分别予以计算。

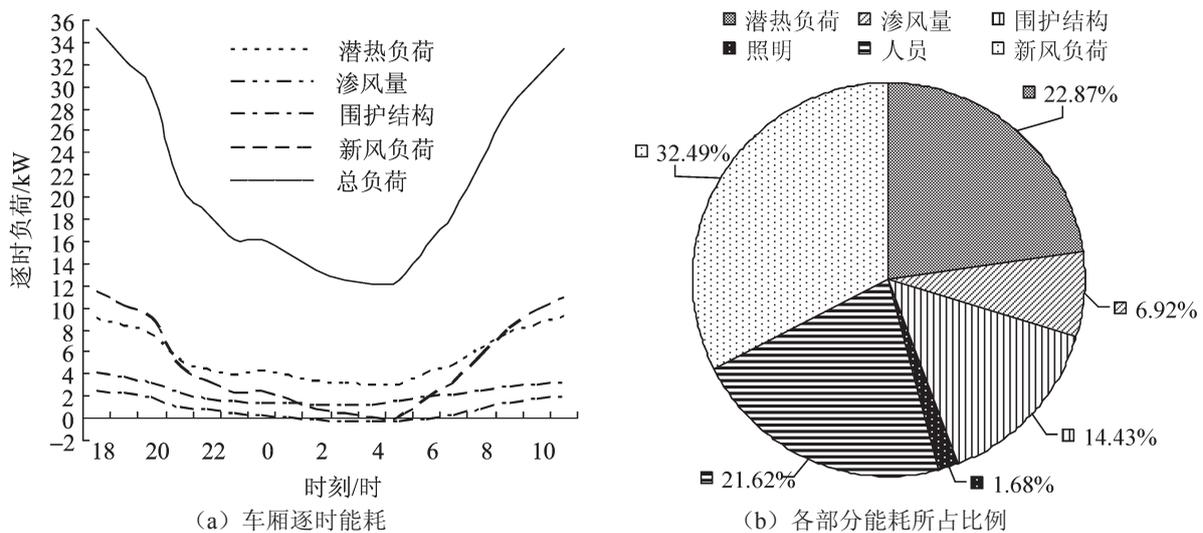


图3 南昌至厦门车厢逐时能耗和各部分能耗所占比例
Fig.3 Hourly railway carriage energy consumption and the energy ratio in various parts of the train from Nanchang to Xiamen

2 车厢能耗及热舒适性影响因素分析

由于影响能耗以及热舒适性的因素非常多,从能耗的角度来看,包括了太阳辐射、相对湿度、车内风速以及新风量等众多因素共同影响。但各项因素的变化对能耗以及热舒适性的具体影响程度有多大,必须进行逐一分析,了解其变化规律,为列车运行节能和改善车厢内热舒适提供依据^[5-6]。

2.1 车厢内风速

根据规范《中华人民共和国铁道部客车空调设计参数》TB1951-87和《公共交通工具卫生要求和标准》可知,我国列车空调夏季的车内空气流速较为合理的范围为 $0.25\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。现假设车厢内温度为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度60%,将此范围内的PMV-PPD值列于表1。

从表1中可以看出,当车厢内风速为 $0.25\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,能很好地满足 $\text{PMV}=-0.5\sim +0.5$, $\text{PPD}\leq 10\%$ 的热舒适标准,即90%以上的人感到满意的热环境为热舒适环境,并且可知车厢内风速在 $0.25\sim$

表1 不同车内风速下PMV-PPD计算表

Tab.1 The calculation sheet of PMV-PPD in different indoor wind speed

车厢内风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	PMV	PPD
0.25	-0.328	7.232
0.3	-0.417	8.623
0.4	-0.567	11.730
0.5	-0.685	14.859

0.5 m·s⁻¹范围内对人体热舒适性的影响较小。

同样以南昌—厦门为基本算例,将舒适范围内不同的车内风速(0.25,0.3,0.4,0.5 m·s⁻¹)代入车厢热平衡模型,分析其对能耗的影响。从图4中可以看出,随着车内风速的增加,车厢内负荷呈上升趋势,这是因为在车厢内空气热平衡模型中,车内风速的增加使得车内空气与各壁面的对流换热热量增加,各壁面的负荷也相应增加。以车内风速0.25 m·s⁻¹为基准,取行程中的最大负荷,将节能率列于表2。从表中可以看出,车内风速对能耗影响较小,节能率随车内风速的递增基本呈线性变化,车内风速每下降0.1 m·s⁻¹,空调将节能0.5%。因此,在设计列车空调时,可选用较小的车内风速,一方面能够满足人员的舒适感,减少吹风感,另一方面能够降低列车能耗^[7]。

表2 不同车内风速的节能率计算

Tab.2 The calculation of energy-saving in different indoor wind speed

车内风速/m·s ⁻¹	最大负荷/kW	节能率/%
0.25	35.33	0.00
0.3	35.52	-0.55
0.4	35.75	-1.19
0.5	35.93	-1.70

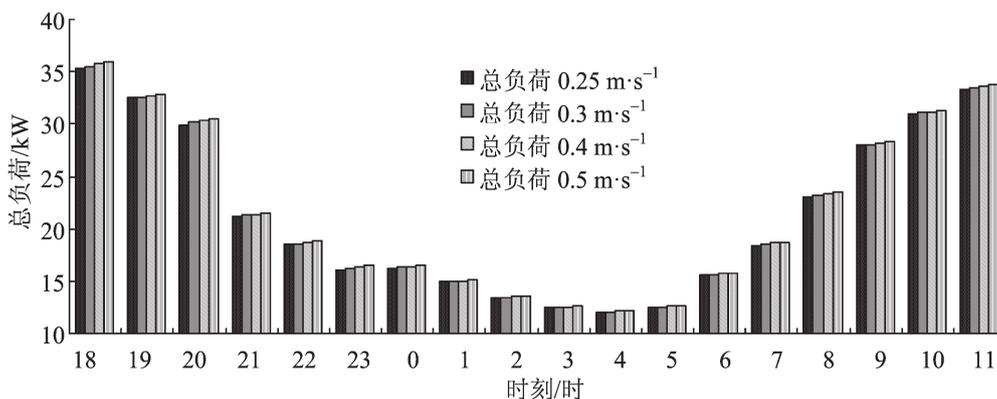


图4 不同车内风速下车厢逐时总负荷

Fig.4 Hourly total load of railway carriage at different indoor wind speed

2.2 车内空气温度

标准中规定我国旅客列车空调夏季车内空气温度较为合理的范围为24~29℃,而上述车厢能耗热平衡模型是采用26℃来进行能耗计算的。针对标准推荐的车内温度舒适范围,分析其对逐时能耗的影响。

图5表示车内温度分别为24~29℃下车厢总能耗的变化情况。可以看出,随着温度的升高,车厢内外温差逐渐减小,负荷亦随着温差的减小而减小,出现这种状况主要原因如下:① 渗风耗热量随着温差的减小而不断减小;② 温差的减小也使得通过围护结构由车外传进车厢内的热量也相应减小;③ 新风负荷和潜热负荷也会随着温差的减小而相应降低,这是因为车厢内温度的降低直接影响了其相应的焓值和含湿量,因此使得新风负荷和潜热负荷也随之减少。

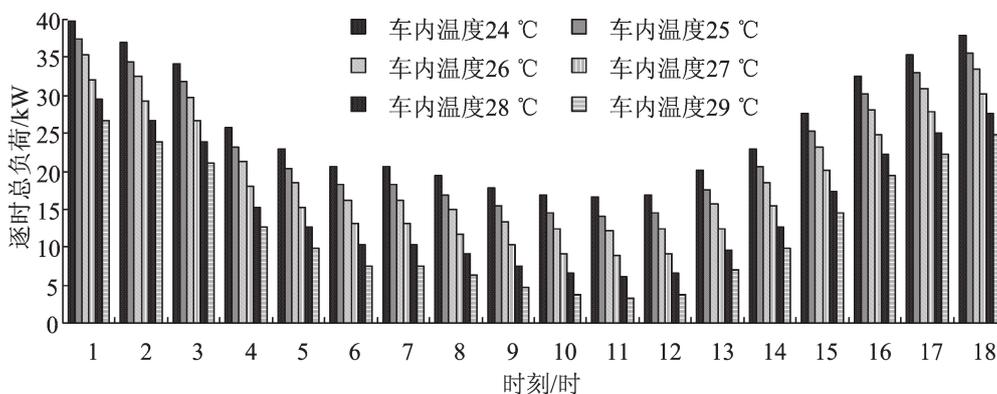


图5 不同车内温度下车厢逐时总负荷

Fig.5 Hourly total load of railway carriage in different indoor temperatures

以车厢内空气温度为26℃为基准,由表3清晰可见,当温度降低1℃,负荷增加约6%;升高1℃,负荷降低约9%,升高2℃,负荷降低约16%,节能率随着温度的变化基本呈线性变化,但是车厢内的温度不能无限制的增大和降低,过高和过低的温度都会影响人体的舒适感,现假设车厢内相对湿度恒定为60%,车内风速为 $0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,计算得到相应温度范围内的PMV-PPD值。从表4中可以看出当车厢内空气温度 $\geq 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\leq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PMV-PPD值不符合热舒适标准,即在此温度下,90%以上的旅客感到过冷或者过热。因此从热舒适感和节能率两方面同时考虑,建议静坐时车厢内温度为26~27℃较为合适。

表3 不同车内温度的节能率计算

Tab.3 Calculation of energy-saving in different indoor temperatures

车内温度/℃	最大负荷/kW	节能率/%	车内温度/℃	最大负荷/kW	节能率/%
24	39.78	-12.59	27	32.12	9.08
25	37.32	-5.65	28	29.45	16.64
26	35.33	0.00	29	27.00	23.57

表4 不同车内温度下PMV-PPD计算表

Tab.4 Calculation sheet of PMV-PPD in different indoor temperatures

车内温度/℃	PMV	PPD	车内温度/℃	PMV	PPD
24	-1.454	48.412	27	0.242	6.214
25	-0.893	21.852	28	0.817	19.065
26	-0.328	7.232	29	1.396	45.301

2.3 车内相对湿度

在夏季列车空调的计算中,旅客的散热、散湿量是基本保持不变的,即车内的逐时潜热负荷为一给定值。根据规范所规定,在进行列车空调计算时,维持车内温度为26℃,并使车内的相对湿度基本保持在40%~80%的范围内,计算可得到该范围PMV-PPD值如表5。从表中可以看出,基于热舒适标准^[8],相对湿度能够基本保证人体的舒适感,说明相对湿度在40%~80%的范围内对车厢内舒适性的影响非常小。

表5 不同车内相对湿度下PMV-PPD计算表

Tab.5 Calculation table of PMV-PPD in different indoor relative humidity

相对湿度/%	PMV	PPD	相对湿度/%	PMV	PPD
40	-0.506	10.356	65	-0.283	6.663
45	-0.462	9.446	70	-0.238	6.178
50	-0.417	8.623	75	-0.194	5.778
55	-0.372	7.885	80	-0.149	5.460
60	-0.328	7.232			

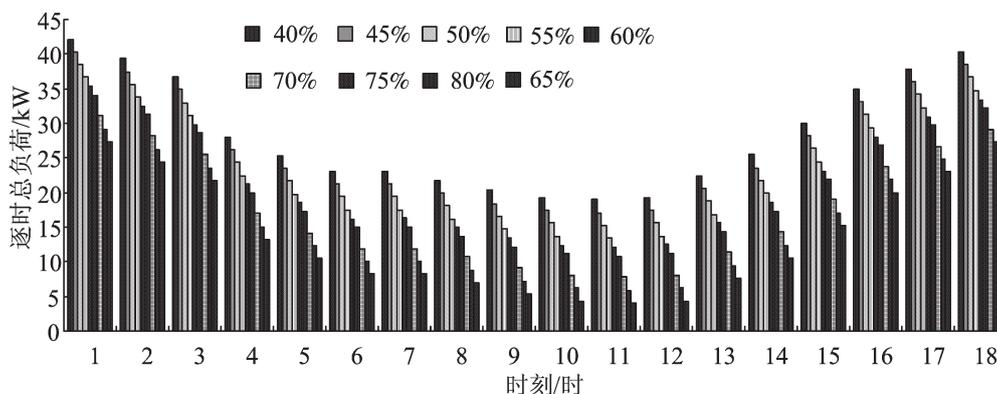


图6 不同车内相对湿度下车厢逐时总负荷

Fig.6 Hourly total load of railway carriage in different indoor relative humidity

依然采用1.1节热平衡构建思想,分析相对湿度对能耗的影响,得出相对湿度分别为40%~80%时车厢逐时总能耗变化(见图6)。从图中可以看出相对湿度对空调能耗的影响很大,车厢内的能耗与相对湿度呈反比关系,随着车厢内相对湿度的增加内能耗呈下降趋势。因为车厢内相对湿度的升高导致车内外的焓差和含湿量的差值都相应的减小,相应的新风负荷和潜热负荷也随之减小。

同样,以相对湿度60%为基准,取行程中的最大负荷,将节能率列于表6,从表中可以看出,节能率亦随着相对湿度的递增基本呈线性变化,相对湿度越大,节能效果越明显。通过上述分析与计算结果比较,可以很清楚的看到:车厢内相对湿度对空调能耗的影响很大。在设计列车空调时,相对湿度可以适当提高,取为55%~70%,不仅满足人体的热舒适性要求,而且可降低列车能耗。

表6 不同车内相对湿度的节能率计算

Tab. 6 Calculation of energy-saving in different indoor relative humidity

相对湿度/%	最大负荷/kW	节能率/%	相对湿度/%	最大负荷/kW	节能率/%
40	42.17	-19.37	65	33.08	6.38
45	40.31	-14.10	70	31.06	12.08
50	38.48	-8.91	75	29.10	17.63
55	37.28	-5.52	80	27.29	22.76
60	35.33	0.00			

3 舒适性列车空调的节能措施综合探讨

列车在夏季能耗很大,其中空调设备耗电量占有很大的比例,是影响列车运行能耗的主要因素之一。目前,针对我国列车空调的现状和我国能源的极度匮乏,节约列车空调的能耗,对列车空调进行必要的节能研究显得尤为重要。

3.1 合理控制车厢内温湿度

通过以上能耗分析与节能计算结果的比较,可以很清楚地看到:车厢内相对湿度对旅客的热舒适性影响很小,但对空调能耗的影响很大,相对湿度越小,耗能越多,不利于节能;而车内空气温度对人的热舒适性影响很大,过低和过高的温度都能使旅客产生不舒适感,且对空调能耗的影响也较为明显。基于热舒适性和节能两方面综合考虑,有必要对车厢内的温度和相对湿度进行合理的控制。一般认为车厢内温度维持在25~27℃,湿度可以高一些(55%~70%),既可以保证较好的热舒适性,又可以节约列车空调能耗。

因此,车厢内的温湿度可以根据不同要求在上述规定范围内选取,控制方式可以利用热舒适性传感器来代替车厢中的温度传感器,根据热舒适性传感器传来的信号来判断当前的温湿度是否达到了要求,进而控制空调机组的启停,达到节能的目的。

3.2 车厢内空气流速的有效控制

将相对湿度、温度和风速三者对能耗的影响相互比较,从表2,表3和表6可以看出调节风速所消耗的能耗最少,则从节能和舒适性的角度出发,针对环境温度和相对湿度适当提高的前提下,可以通过增大车厢内空气流速来改善温度和相对湿度升高对人体热舒适性的影响。

在确定列车空调参数时,风速应该限制在一定的范围内,以防旅客产生吹风感。因此,基于热舒适标准,可提高车厢内风速至 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这样既可以保证热舒适性,又可以节约空调能耗。

3.3 变频技术在列车空调系统中的应用

现有的很多旅客列车空调系统(如YW25G型列车)仍采用定制冷量、定风量的运行模式,由于制冷量不能随车内负荷变化进行连续调节,造成车厢内温度不能维持在恒定的范围内,不但满足不了旅客对舒适性的要求,而且整个行程中采用同样的制冷量造成能源大量的浪费。而列车空调应用变频技术对制冷量进行调节,能够使机组制冷量与车厢内实际负荷相匹配,改善了车厢内出现的过冷或过热现象,在节约能耗的同时满足旅客的舒适度。因此,变频技术在列车空调系统中的应用是重要的节能途径。

4 结论

1) 本文采用热平衡模型,分析了YW25G型列车空调系统在南昌—厦门线沿途的能耗,得知车厢内的能耗随时间、室外条件以及车厢内各项参数的变化而不断变化,最大负荷出现在18时,最小负荷出现在凌晨4时。

2) 结合能耗和对车厢热舒适性影响因素进行分析,得出调节风速所消耗的能耗最少,而相对湿度和温度的改变均对能耗产生明显的影响,但相对湿度的变化对车厢内热舒适性影响很小,而温度的改变则对旅客的热舒适性影响很大,过低和过高的温度都能使旅客产生不舒适感。

3) 通过对温度、相对湿度以及车内风速对PMV-PPD指标和能耗影响分析,得知空气温度、湿度和车内风速的变化不同程度地影响着热舒适性和能耗,为了改善车厢内热环境的舒适性以及节约列车空调能耗,本文将影响因素进行相互比较,提出了合理的节能调控措施。

参考文献:

- [1] 甘伟新. 客车空调的节能途径探讨[J]. 铁道车辆,2000,38(3):32-33.
- [2] 陈焕新,张登春. 空调硬卧车内人体热舒适性研究[J]. 铁道学报,2004,26(3):46-50.
- [3] LIU R, IAKOV M G. Energy-efficient operation of rail vehicle[J]. Policy and Practice,2003,37(10):917-932.
- [4] 陈焕新,欧阳召文,蔡敏. 空调列车运行能耗调查与分析[J]. 节能技术,2003,21(1):18-20.
- [5] 杨培志,陈焕新. 热舒适评价指标PMV-PPD在空调列车上的应用[J]. 制冷空调与电力机械,2002,23(2):22-24.
- [6] 张俊,廖胜明,陈焕新. 空调列车车厢内夏季热舒适性的研究[J]. 长沙铁道学院学报,2000,18(3):55-60.
- [7] 徐峻,减建彬. 基于车速的车辆空调负荷计算[J]. 制冷空调,2004,25(3):45-47.
- [8] 张桂荣,连之伟,何晶,等. 空调客车舒适度调查及分析[J]. 铁道车辆,2001,39(8):14-22.

Comprehensive Research of Thermal Comfort in Carriage Based on Energy Consumption Analysis

Xu Qing¹, Chen Xia¹, Wang Weidong², Qu Ruigui³, Liu Guanghai⁴, Luo Jian⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Power Engineering, Jiangxi Vocational and Technical College of Electricity, Nanchang 330013, China; 3. School of Building Environment, Guangzhou City Polytechnic, Guangdong 511400, China; 4. School of Business, Guangzhou University, Guangdong 511400, China; 5. Human Resources Department, Nanchang Railway Administration, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the rise of people's living standard, the passengers demand more comfort of the train. How to ensure passengers' thermal comfort and reduce the energy consumption at the same time has become a hot topic of current research. Based on the thermal comfort evaluation and energy consumption models of carriage, this article discusses the influence of wind speed, temperature and relative humidity on train air-conditioning energy consumption and comfort level. It also proposes energy-saving control measures in train air-conditioning system, which provide the theoretical references for air conditioning energy-saving technologies and train comfort.

Key words: train air-conditioning; energy consumption model; comfort; energy-saving