

文章编号:1007-6735(2013)06-0572-05

列车空调变负荷影响和变频技术应用研究

徐君瑜¹, 余 敏¹, 龙时丹², 赵 旭¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海法维莱交通车辆设备有限公司 技术部, 上海 201906)

摘要: 通过对列车车体、车窗、新风、人体以及设备 5 部分传热量总负荷的计算, 得到总负荷随着列车运行环境和乘客数量变化的规律. 提出采用变频压缩机, 通过改变压缩机转速以使得实际热负荷与机组的冷负荷尽可能保持一致. 用 MATLAB 编程, 分析计算环境温度、太阳辐射强度和乘客数量等因素对实际所需的变频压缩机转速变化的影响. 得到相比于太阳辐射强度, 乘客数量的变化对车厢负荷和压缩机转速影响较大的结论.

关键词: 列车; 空调机组; 负荷计算; 变频空调

中图分类号: TK **文献标志码:** A

Variable Load Affect on Air Conditioning on Train and the Application of Frequency Conversion Technology

XU Jun-yu¹, YU Min¹, LONG Shi-dan², ZHAO Xu¹(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Technical Department, Shanghai Faiveley Traffic Equipment Co. Ltd, Shanghai 201906, China)

Abstract: The total heat load on a train includes the loads by the train body, windows, fresh air, the human body and the equipment heat transfer, and its variation, which is related to the train operating environment and the passengers number, was calculated. The application of frequency conversion compressor was proposed to make sure that the actual unit load and the cooling load was in consistency as far as possible. With the help of MATLAB, the compressor speed and the frequency change rate in the actual circulation flow were determined according to the analysis on the ambient temperature, solar radiation intensity, train speed and passengers number. Compared with the solar radiation intensity, the change of the number of passengers has a greater influence on the compressor speed.

Key words: train; air conditioning unit; load calculation; inverter air conditioner

目前,我国铁路客车和城市轨道交通均采用定 频空调机组,由于列车的外部运行环境、乘客流量的

收稿日期: 2013-01-19

基金项目: 上海市宝山区产学研合作资助项目(CXY-2011-06)

第一作者: 徐君瑜(1989-)女,硕士研究生.研究方向:能源有效利用与节能技术. E-mail: xjy_nicole@163.com

通讯作者: 余 敏(1952-)女,教授.研究方向:能源有效利用与节能技术、强化传热和高效换热器、热力系统及热力设备优化、制冷空调设备性能测试技术. E-mail: usstym@qq.com

改变会引起车厢内热负荷的变化,导致车厢内的温度波动较大,降低乘客的舒适度.另外,在列车行驶时,外表面负压会随着车速的提高而增大,由于冷凝器是置于车顶且直接与外部空气接触,这对于列车空调机组的运行工况势必带来负面影响^[1].因而寻求舒适、高效、节能、可靠的列车空调机组已经刻不容缓.而变频空调可以根据实际工况调节制冷负荷以满足实际需要,在节电的同时精确控制环境温度,维持车厢内恒定的舒适环境.本文对列车空调的变负荷进行计算,提出采用变频压缩机,通过改变压缩机转速以适应列车空调机组运行过程中因受到各种影响因素而引起的负荷变化,并从舒适性和节能性的角度分析了列车变频空调的优势.

1 列车车厢负荷的计算热力学模型

1.1 模型的简化与假设

为计算方便,采用车厢稳态传热的近似计算方法,并作如下的简化与假设:

- 车体维护结构和车窗的传热为一维传热;
- 车厢内气流组织良好,空气温度均匀一致且空气初始温度相同;
- 车厢顶部和一个侧面只考虑太阳辐射,另外一个侧面只考虑散射;
- 车厢内各壁面间的相互辐射忽略不计.

1.2 负荷计算模型

列车车厢空调冷负荷可表示为^[2]

$$Q_0 = Q_B + Q_G + Q_V + Q_p + Q_E$$

式中, Q_0 为列车车厢总的空调冷负荷, W; Q_B 为车体铝合金结构传入的热量, W; Q_G 为车厢玻璃传入的热量, W; Q_V 为新风散发的热量, W; Q_p 为车厢乘客散热量, W; Q_E 为车厢内仪器、设备发热量, W.

2 列车车厢空调冷负荷

在计算列车空调冷负荷时列车内外设计工况参数^[3]设置如下:夏季车厢外空气温度 40℃, 空气相对湿度 50%; 车厢内空气温度 27℃, 车厢内空气相对湿度 45%.

冬季主要依靠电加热器调节温度, 空调系统只起到通风作用.

2.1 经车体铝合金结构传热量引起的冷负荷

由于太阳辐射使车厢外表面温度升高, 将太阳辐射的作用转化成相当的温度形式, 与车厢外温度

迭加在一起, 形成太阳辐射表面的综合温度 t_c . 车身各部分受到的影响因素不同, 表面综合温度也不同. 传热系数由设计工况可得 $K_r = K_e = K_w = K_f = 1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 对各表面分别进行计算, 即

$$Q_r = F_r K_r (t_{Cr} - t_B)$$

$$Q_e = F_e K_e (t_{Ce} - t_B)$$

$$Q_w = F_w K_w (t_{Cw} - t_B)$$

$$Q_f = F_f K_f (t_{Cf} - t_B)$$

$$Q_B = (Q_r + Q_e + Q_w + Q_f) = \left[F_r K_c \cdot \left(\frac{\rho_c I \sin \alpha}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + F_s K_c \left(\frac{\rho_c I \cos \alpha}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + F_s K_c \left(\frac{\rho_c I_s}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + F_f (t_H - t_B + 2) \right]$$

式中, Q_r , Q_w , Q_e 和 Q_f 分别为通过车顶、车厢阴面、车厢阳面和车厢底面传入的热量; F_r 为车厢顶部面积, m^2 ; F_s 为车厢侧面除去窗户的面积, $F_s = F_e = F_w$, m^2 ; F_f 为车厢底部面积, m^2 ; K_c 为车厢铝合金结构的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρ_c 为车体外表面太阳光吸收系数; I 为太阳辐射强度, W/m^2 ; α 为太阳光入射角度; α_H 为车厢外空气与日照列车表面的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_H 为车厢外湿空气温度, $^\circ\text{C}$; t_B 为车厢内环境温度, $^\circ\text{C}$; I_s 为车厢阴面散射光辐射强度, W/m^2 .

2.2 通过车窗传热量引起的冷负荷

考虑到太阳辐射的作用, 列车车厢由侧窗传入的热量 Q_G 由温差传热和辐射换热两部分组成: 车厢内外温差传入的热量 Q_{G1} 和太阳辐射透过玻璃传入的热量 Q_{G2} . 所以

$$Q_G = Q_{G1} + Q_{G2} = K_G F_G (t_H - t_B) + \left(\eta + \frac{\rho_G \alpha_B}{\alpha_H} \right) S (F_{ws} I \cos \alpha + F_{ws} I_s)$$

式中, η 为太阳辐射通过玻璃的透入系数; K_G 为玻璃窗的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρ_G 为玻璃对太阳辐射热的吸收系数; S 为遮阳修正系数; F_{ws} 为车厢侧窗面积, 阴阳各一面, m^2 .

2.3 人体散热量引起的冷负荷

人体散发^[4]的热量与劳动强度、周围空气温度、性别、年龄、衣着等很多因素有关. 根据有关标准, 人均发热量 q_p 取 116 W, 列车定员时人体负荷分别为

$$Q_p = N q_p$$

式中, N 为车厢内乘客和乘务人员的总数.

2.4 新风热量引起的冷负荷

新风的传入有两个途径: 一是门窗缝隙, 二是新

风系统. 列车车厢内的人员数量^[5]直接关系到新风需求量,而新风量^[6]和列车运行的环境息息相关. 设计工况下根据湿空气的变化规律计算高速列车相应的热量变化

$$Q_v = NV\rho(h_H - h_B)$$

式中, Q_v 为每个人所需的新风量, $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; h_H, h_B 分别为车厢内外湿空气的焓值, kJ/kg .

2.5 其它热量引起的冷负荷

列车车厢内的发热设备主要有灯和电子产品. 为了避免列车突然进入隧道, 列车上一半的灯从列车运行时就一直打开. 本文车厢内设备散热量 Q_E 取 2 500 W, 由合作单位提供; 考虑由其它因素引起的空调附加热负荷 Q_F , 其值取 880 W.

2.6 各项冷负荷影响分析

通过以上计算得到列车车厢冷负荷分布, 如图 1 所示. 主要冷负荷来源于人体散热和新风带入的热量, 占总负荷的 70%; 相对而言设备散热和车体围护结构的散热所占比例较小.

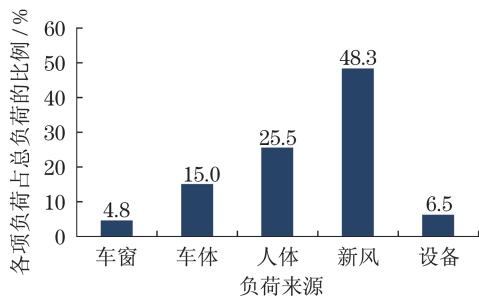


图 1 列车车厢各项负荷所占比例

Fig.1 Proportion of various kinds of heat load in train compartment

列车车厢空调负荷与各影响因素的关系为

$$Q_0 = \left\{ \begin{aligned} &F_r K_c \left(\frac{\rho_c I \sin \alpha}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + \\ &F_e K_c \left(\frac{\rho_c I \cos \alpha}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + \\ &F_w K_c \left(\frac{\rho_c I_s}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + \\ &F_t (t_H - t_B + 2) + K_G F_G (t_H - t_B) + \\ &\left(\eta + \frac{\rho_G \alpha_B}{\alpha_H} \right) S (F_{ws} I \cos \alpha + F_w I_s) + \\ &N q_p + NV\rho(h_H - h_B) + Q_E \end{aligned} \right\}$$

由上式可知, 影响列车车厢内空调冷负荷的因素很多, 但最主要的是乘客数量、环境温度和太阳辐射强度. 在设计工况下, 环境温度 t_H 和人员数量 N

的变化对车厢空调机组负荷 Q_0 的影响如图 2 所示. 当环境温度一定时, 随着人数的增加, 人体散热与新风热与乘客数量呈倍数增长, 车厢冷负荷随之增大; 而当乘客数量一定时, 环境温度的改变使得新风焓差和车厢内外传热温差发生变化, 导致冷负荷发生变化.

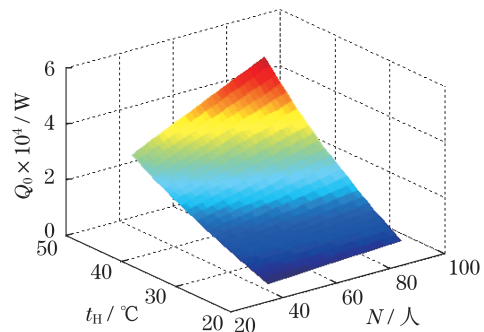


图 2 列车车厢总冷负荷 Q_0 随环境温度 t_H 和乘客数量 N 的变化规律

Fig.2 Variation of total cooling load with the ambient temperature and number of passengers

3 列车车厢变频空调性能分析

由负荷计算得到车厢空调总负荷为 41 kW, 每节车厢配两台机组, 每台机组制冷量为 20.5 kW. 采用变频压缩机, 通过改变转速使实际热负荷与机组的冷负荷尽可能保持一致. 本文选用 Danfoss 变频压缩机, 采用 R407C 环保制冷剂. 在相同压力下, R407C 制冷剂饱和蒸汽的温度大于饱和液体的温度. 根据制冷量和制冷剂类型, 列车车厢空调器名义工况下制冷循环 $\lg p-h$ 图如图 3 所示.

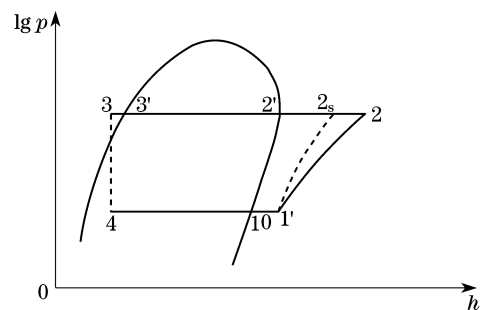


图 3 实际制冷循环的 $\lg p-h$ 简化图

Fig.3 Simple diagram of $\lg p-h$ for practical refrigeration cycle

3.1 变频压缩机的热力计算

计算列车所选压缩机为 Danfoss 变频压缩机, 型号为 HCP094T4, 其主要参数如表 1 所示.

表 1 压缩机性能参数

Tab.1 Performance parameters of the compressor

项 目	数 值
名义制冷量/W	21 590
输入功率/kW	6.63
每转排量/(cm ³ ·r ⁻¹)	126.0
输气量/(m ³ ·h ⁻¹)	21.93
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 900

对于不同的热负荷,得到压缩机转速与制冷量的关系为

$$Q_0 = 10^{-6} \frac{\eta_v}{\nu_{s0}} 60 n V_s (h_{1'} - h_4) / 3\ 600$$

式中, η_v 为容积效率; ν_{s0} 为压缩机进气口处吸气状态下气体的比容, m³/kg; n 为压缩机的转速, r/min; V_s 为压缩机的每转排量, cm³/r; $h_{1'}$ 和 h_4 分别为图 3 中 1' 点和 4 点处的焓值。

3.2 热负荷与压缩机转速的关系

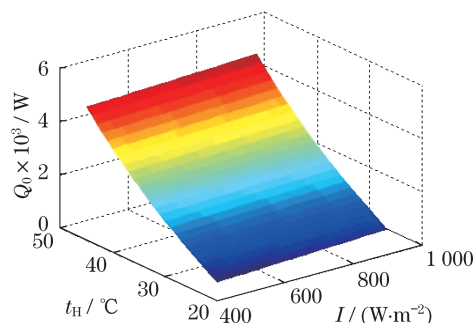
列车空调的设计工况只是列车运行过程中某一时刻的一个状态点,实际运行的列车环境温湿度、乘客数量和太阳辐射都在不断改变,而定频空调只能在设计负荷下运行。为了提高车厢空调机组的适应性,采用变频压缩机,通过调节压缩机的转速来调节机组的制冷量。空调机组的最佳工作状态就是实际所需冷负荷与机组提供的冷负荷相吻合,因此可以得到

$$n = \frac{\left\{ \begin{aligned} &F_r K_c \left(\frac{\rho_c I \sin \alpha}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + \\ &F_c K_c \left(\frac{\rho_c I \cos \alpha}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + \\ &F_w K_c \left(\frac{\rho_c I_s}{\alpha_H + K_c} + t_H - t_B \right) + \\ &F_i (t_H - t_B + 2) + K_G F_G (t_H - t_B) + \\ &(\eta + \frac{\rho_G \alpha_B}{\alpha_H}) S (F_{wf} I \sin \alpha + F_{ws} I \cos \alpha + \\ &F_w I_s) + N q_p + N V \rho (h_H - h_B) + Q_E \end{aligned} \right\}}{10^{-6} \frac{\eta_v}{\nu_{s0}} 60 V_s (h_{1'} - h_4) / 3\ 600}$$

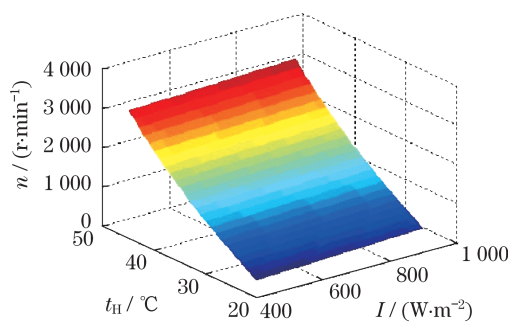
3.3 太阳辐射强度和环境温度改变对变频压缩机转速的影响

列车运行过程中,不同地区的太阳辐射强度与环境温度各不相同。设计工况下的太阳辐射强度为 800 W/m²,环境温度为 40 ℃。在其它条件不变的情况下,环境温度的影响要大于太阳辐射强度的影响,太阳辐射强度与环境温度对车厢空调冷负荷影响的变化规律如图 4(a) 所示,此负荷下变频压缩机相应

的转速如图 4(b) 所示。从图中可得,太阳辐射强度一定时,随着环境温度的降低,车厢总冷负荷减小,变频压缩机转速也相应减小;而环境温度一定时,随着太阳辐射强度的降低,车厢总冷负荷减小,变频压缩机的转速也相应减小。



(a) 车厢冷负荷变化



(b) 变频压缩机转速变化

图 4 车厢冷负荷和变频压缩机转速随太阳辐射强度和环境温度的变化规律

Fig.4 Variation of load and inverter compressor rotation speed while the intensity of solar radiation and ambient temperature are changing

3.4 环境温度和乘客数量改变对变频压缩机转速的影响

环境温度和乘客数量变化时变频压缩机转速的变化规律与上述相同。在设计工况环境温度 $t_H = 40$ ℃下,车厢总负荷和变频压缩机转速随乘客数量的变化如图 5 所示(见下页),可以看到环境温度越高,乘客数量对空调负荷和转速的影响也就越大。

环境温度 t_H 、乘客数量 N 和太阳辐射强度 I 是影响车厢总冷负荷 Q_0 的主要因素,实际运行过程中,这些影响因素同时变化。当影响因素都加强或减弱时,负荷变化较大;而当影响因素朝不同方向变化时,其中有一部分负荷会抵消,与此负荷相对应的变频压缩机转速也相应减小,其变化趋势与负荷的变化趋势基本一致。另外,由于人员的流动导致了新风

负荷和人体负荷的变化,这两者占总负荷的权重较大,从图5中也可直观看到,相比于太阳辐射强度,乘客数量的改变对车厢负荷和压缩机转速的影响较大。

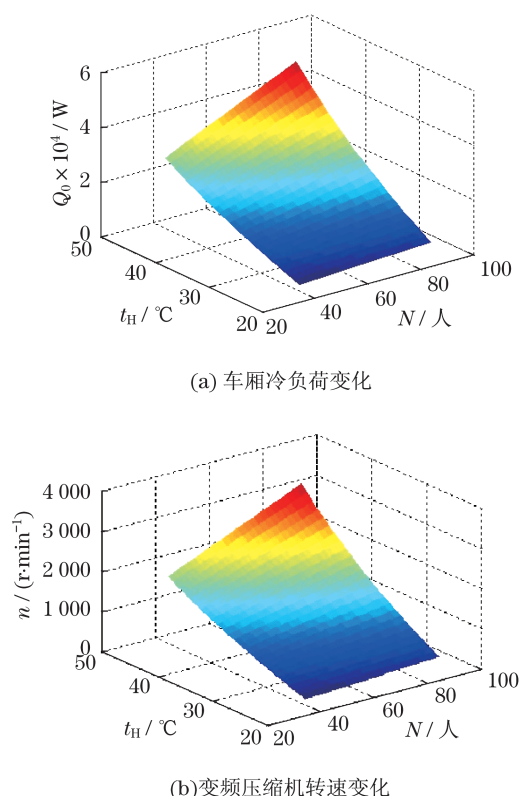


图5 车厢冷负荷和变频压缩机转速随乘客数量和环境温度的变化规律

Fig.5 Variation of load and inverter compressor rotation speed while the number of passengers and ambient temperature are changing

4 结束语

变频空调技术在家用和商用空调领域已得到较大的普及,列车空调中则尚未运用.后者由于其运行工况的特殊性,如环境温度的多变性,人员的流动性等,更能体现变频空调技术的优势.计算包括车体、车窗、人体、新风和设备5部分传热量的列车空调总负荷,得到了设计工况下高速列车人员和新风负荷占总负荷的70%,因此相比于太阳辐射强度,乘客数量的变化对车厢负荷和压缩机转速的影响较大.研究结果对列车空调机组采用变频技术和性能参数最佳匹配提供了一定的理论依据.为高速列车空调系统的优化以及冬季热泵在高速列车上的使用,提供了方向和依据.

参考文献:

- [1] 任钊瑞,余敏,姚俊豪.高速列车气流组织变化对空调机组的影响分析[J].流体机械,2011(12):63-68.
- [2] 张忠于,林玲.轿车空调热负荷的计算和分析[J].装备制造技术,2008(11):64-68.
- [3] 铁道部四方车辆研究所.TB/T 1957-91.铁路空调客车热工计算方法[S].北京:中华人民共和国铁道部,1992.
- [4] 刘长远,武彤.铝合金车体隔热壁设计原理[J].城市轨道交通研究,2008(5):39-42.
- [5] 刘文波,王亚伟,臧建彬,等.城市轨道交通车辆空调机组部分负荷特性研究[J].城市轨道交通,2011(4):74-78.
- [6] 吴金洪.铁路客车空调新风量的确定及控制[J].浙江师范大学学报,2005,24(8):393-396.

(编辑:金虹)