

空调列车不稳定传热反应系数项数的研究

屈睿瑰¹, 李建强¹, 刘广海²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:针对空调列车结构特点及区别于普通建筑的速度特性, 利用反应系数的基本原理和计算机辅助分析, 对其围护结构的不稳定传热进行数值计算, 从而考察不同反应系数项数对车辆负荷计算的影响. 研究进一步完善了传热反应系数法, 为该理论在列车上的实际应用创造了条件.

关 键 词:空调列车; 反应系数; 不稳定传热

中图分类号: TU831.2

文献标识码: A

1 引 言

铁路列车隔热壁的传热不仅是车厢得(失)热量的主要组成部分, 也是影响系统设计与机组选取的主要因素. 为此, 在对列车系统进行动态仿真和精确求取制冷机组动态负荷时, 采用负荷的不稳定算法是必不可少的. 而其中, 又以反应系数法计算最为精确、运用最为广泛^[1].

所谓反应系数法是由加拿大著名学者 D. G. Stephenson 和 G. P. Mitalas 于六十年代末、七十年代初共同提出, 其实质是利用拉普拉氏变换, 并引入现代控制理论, 将壁面视为一个热力系统, 将任意随时间变化的温度边界条件分解成一系列三角脉冲, 预先求出作为热力系统反应系数的单位三角温度波外扰引起的热流变化, 并认为各脉冲都是线性无关的, 而热力系统本身是线性系统, 在此基础上应用叠加原理, 将每一脉冲引起的热流变化按卷积原理进行叠加, 即求得整个系统的热状况.

在利用反应系数法计算空调、制冷负荷时, 反应系数自身特点及计算的准确与否, 直接影响到负荷特性及其求解精度. 对于空调建筑而言, 此方面研究较多, 但不同国家、不同文献观点各不相同; 就

列车而言, 由于其还存在着区别于普通建筑的速度特性和地域特性, 使其反应系数更为复杂, 且国内外均缺乏在此方面的研究. 本文拟采用反应系数的基本原理, 对围护结构的不稳定传热进行数值分析, 从而考察不同项数反应系数对列车负荷的影响.

2 列车壁面不稳定传热研究

2.1 传热模型

由传热学原理和反应系数法计算公式可知, 对于列车壁面而言, 其逐时传热得热量可表述为^[2]:

$$HG(n) = \sum_{j=0}^{\infty} Y(j) t_z(n-j) - K t_n \quad (1)$$

式中, $HG(n)$ 为 n 时刻的传热得热量, W/m^2 ; j 为反应系数项数; K 为壁体传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $t_z(n)$ 为 n 时刻的车外综合温度, K ; t_n 为车内空气温度, K ; $Y(j)$ 为壁面第 j 项传热反应系数.

通过上式可以看出, 一旦所需计算的对象确定, 其车外综合温度、车内空气温度便已确定下来, 而作为列车的固有特性, 各壁体的传热系数 K 值为一已知值, 因此, 列车壁面逐时传热得热量的计算转化为求取相应的传热反应系数 $Y(j)$. 而 $Y(j)$ 值

的确定可由(2)式确定^[2]:

$$\begin{cases} Y(0)=K+\sum_{i=1}^{\infty}\frac{B_i}{\Delta\tau}(1-e^{-a_i\Delta\tau}) & j=0 \\ Y(j)=-\sum_{i=1}^{\infty}\frac{B_i}{\Delta\tau}(1-e^{-a_i\Delta\tau})^2e^{-(j-1)a_i\Delta\tau} & j\geq 1 \end{cases}$$

(2)

式中, i 为方程根的数量; a_i 为车辆围护结构热力系统传递矩阵 $B(s)=0$ 的第 i 个根; $\Delta\tau$ 为离散时间间隔, h; B_i 为系数.

$$B_i=-1/[a_i^2B'(-a_i)]$$

(3)

2.2 存在问题

从(1)、(2)二式可以看到,板壁的传热反应系数 $Y(j)$ 是与板壁热力系统的传递矩阵元素 $B(s)$ 的根值有关的一个无穷指数之和,在计算中选取 $Y(j)$ 项数的多少直接影响到 $HG(n)$ 的计算精度与繁琐程度,同时,因传热反应系数 $Y(j)$ 的项数 j 大到一定程度时, $Y(j)$ 以及与上述根值有关的指数项将趋于零,因此,精确求取不稳态传热量的问题即转化为应求取何种数量的传热反应系数项数及合适的 $B(s)$ 元素根值的问题.

其中,在确定 $B(s)$ 元素根值 $(-a_i)$ 范围方面的研究虽因各国建筑类型存在差异及对精度要求的不同而意见不一,但已较为完善:ASHRAE 认为,对于空调建筑,一般求至大于 (-50) 的根值时其精度足以保证^[1];而文献[2,3]则建议取至 (-40) 已较为合适;日本的 HASP 程序认为取至 (-25) 即可^[4];加拿大程序则规定须取至 (-100) ^[5].而在传热反应系数项数的确定方面,因普通建筑不存在地域变化的问题,采用周期性反应系数即可弥补相关误差,故研究较少;由于列车不断运动的特性使得该方法并不适用于车壁的传热计算,所以,在列车不稳定传热计算中,确定应计算的合适的反应系数项数十分必要.

3 列车车体特性研究

3.1 列车车壁具体状况

铁路列车有多种车型,结构复杂,且不同车型的结构千差万别.为使本次研究的内容更具普遍性,在此拟采用国内最常见的 25 型空调客车为研究对象进行分析.

具体来说,25 型空调列车车厢各朝向围护结构的主要构造为^[6]:车厢顶部由 2 mm 耐候钢板、70 mm 保温层和 5 mm 胶合板组成;车厢底部由 2 mm

耐候钢板、85 mm 保温层和 20 mm 木地板组成;车厢东侧和西侧均由 3 mm 耐候钢板、65 mm 保温层和 10 mm 胶合板组成,保温层的主要材料为聚苯乙烯泡沫.

3.2 车壁负荷特性分析

相对于建筑围护结构而言,列车由于有减少自重、增大空间容量等一系列要求,围护结构与建筑物有诸多区别:

1) 建筑围护结构的外墙一般为 240 mm、370 mm 甚至更厚,无论是砖砌墙体还是混凝土墙体或其它类型墙体,其结构均为实心,墙体质量较大,蓄热系数大;而构成列车车厢的壁体相对较轻较薄,蓄热系数小.因此,在空调过程中一旦存在外界干扰(车厢外界空气温度波动),车厢壁内表面的响应快(内表面温度易受外界影响而波动).相应的,列车壁面的反应系数较建筑维护结构而言,也存在着峰值提前、系数值衰减较快等特性.

2) 建筑物围护结构外墙砖砌体导热系数约 0.8 W/m·℃,水泥砂浆、石灰砂浆的导热系数分别为 0.93 W/m·℃和 0.81 W/m·℃,其它材料的导热系数也比较接近,因此,在处理墙体传热时可将其看作多层均匀导热.而在列车车厢结构中,钢材的导热系数在 50 W/m·℃左右,聚苯乙烯泡沫等保温材料的导温系数却鉴于 0.03~0.04 W/m·℃之间,胶合板、木材等其他材料的导温系数亦有不同,如此大的差别使得各层材料间传热特性大有不同,因而,只有采用非稳态的传热分析方法才能更好的体现其真实状况.这也进一步证实使用反应系数法分析列车壁面传热是合适的.

3) 由铁标可知^[7],车厢壁外表面空气空气对流换热系数

$$\alpha_w=9+3.5v^{0.66}$$

(4)

式中, v 为列车运行速度, km/h.

可见,随着列车行驶速度的提高, α_w 的值迅速增大,车体传热特性亦发生改变,因此,在利用反应系数法对其不稳定传热进行分析时,也必然发生包括内、外空气层在内的列车壁面多层板壁围护结构的热力系统的传递矩阵发生较大变化的现象,进而导致其传热反应系数发生变化.具体表现为随列车速度的提高,其峰值增大、系数值衰减加快等现象发生.

综上所述,由于列车在自身结构、运行环境等方面与普通建筑存在较大区别,故传热特性不同,反应系数差异大,这也使得在研究列车不稳定传热

过程中确定其壁面反应系数项数十分必要。

4 列车壁面反应系数项数的确定

4.1 壁面反应系数误差计算

由(2)式可知,由于在计算能耗时所取根值数目不同,将导致 $Y(j)$ 有所误差,而将其进一步代入(1)式后,最终计算所得的能耗误差也必将进一步增大。利用反应系数的基本原理,研究者编制了相关程序,算出空调列车各壁面的反应系数。在计算中发现,车壁围护结构的传热反应系数数值从作用时刻起,随时间的推移,其值由一较小值增至最大,再逐渐减小,但在 50 项后几乎趋近于零(当 $i > 50$ 后,各项的值均小于 1.0×10^{-10})。因此可以认为,在研究中,取 $i=50$ 基本可消除 $B(s)$ 元素根值对计算精度的影响。

为简洁的表征计算中选取的反应系数项数对计算精度的影响,研究者由反应系数的性质

出发,将壁体的传热反应系数 表征为各时刻传热反应系数之和,即为:

$$K = Y(0) + \sum_{j=1}^{\infty} Y(j) \quad (5)$$

在此,统一取 $i=50$ 、 $j=50$, 则 $K = \sum_{j=0}^{50} Y(j)$, 令前 j 项反应系数之和为 $K(j)$, 通过(5)式定义在能耗计算中选用不同项数反应系数所存在的相对误差 δ_j 则为:

$$\delta_j = \frac{K - K(j)}{K} \quad (6)$$

式中, δ_j 为在能耗计算中选用不同项数反应系数所存在的相对误差, %; $K(j)$ 在能耗计算中选用前 j 项反应系数算得的传热反应系数值, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

将(6)式表述为图像,空调列车各壁面反应系数在不同速度条件下所存在的相对误差

分别如图 1 至图 3 所示。

4.2 列车壁面反应系数项数的分析与确定

通过上述图形可以看到,使用反应系数法计算能耗时误差随车速的提高和反应系数项数的增加而减少。对于空调列车而言,当车速处于 $0 \sim 50$ km/h 区间时,其值变化明显,而当车速进一步加大时,变化趋于平缓;在选取的反应系数项数方面,当所取项数少于 10 时,每增加一项,误差均有明显减少,但其趋势越来越缓。对于车顶反应系数,在计算中选取 20 项,能耗误差将小于万分之一,取 50 项,则小于 1.0×10^{-15} ;对于车壁和车底,分别选取 10 项

左右系数后,误差便已小于万分之一,而当分别选取 40 项和 30 项左右反应系数时,误差将小于 1.0×10^{-15} 。

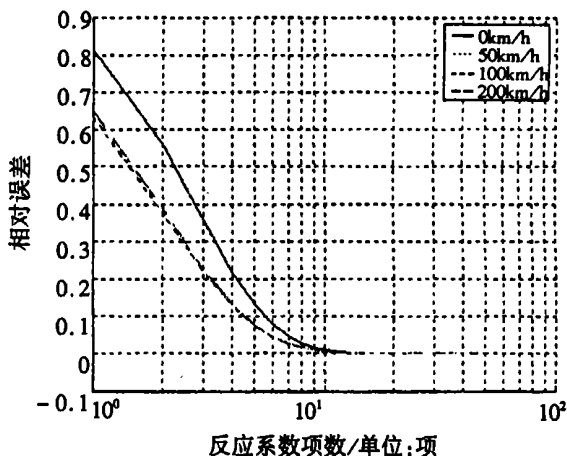


图 1 车顶不同项反应系数条件下相对误差值

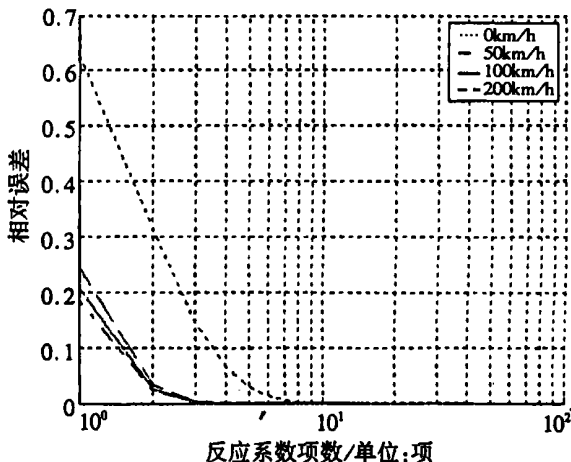


图 2 车壁不同项反应系数条件下相对误差值

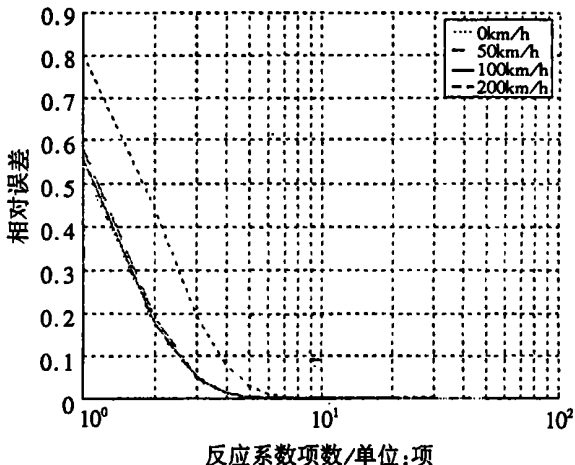


图 3 车底不同项反应系数条件下相对误差值

为计算便利,综合上述分析可以认为:对于空调列车而言,在利用反应系数法计算能耗时,车顶取 20 项反应系数、车壁和车底取 10 项反应系数完全能满足计算精度要求。

5 结 语

利用反应系数法计算列车围护结构的不稳定传热是反映列车动态特性较为客观的一种方法,但因以往针对列车的相关研究较少,致使长期以来该方法仅应用于建筑领域. 针对上述问题,本文利用反应系数的基本原理和计算机辅助分析方法,对其围护结构的不稳定传热进行数值计算,从而考察不同反应系数项数对列车负荷计算精度的影响. 研究进一步完善了传热反应系数法,为该理论在列车领域的实际应用创造了条件.

参考文献:

[1] ASHRAE. 1997 AHSRAE Handbook — Fundamentals [S]. 1997.

[2] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:建筑工业出版社,1986.

[3] 中原信生著,龙惟定,等译. 建筑与建筑热备的节能[M]. 北京:建筑工业出版社,1990.

[4] 龙惟定,赵九龙. 高层空调建筑全年动态负荷的计算机模拟[J]. 暖通空调, 1990,20(3):25—28.

[5] 连之伟. 方程根数对反应系数法求解负荷的影响[J]. 西安建筑科技大学学报,1996,28(3):245—247.

[6] 章音,滕兆武等编著. 车辆设计参考手册[S]. 北京:中国铁道出版社, 1993.

[7] 客车空调设计参数 TB1951—87[S]. 中华人民共和国铁道部部标准, 1988.

[8] 徐湘波,胡益雄. 建筑物与汽车空调负荷[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1997.

[9] Morris G. Davies. Current methods to handle wall conduction and room internal heat transfer[J]. ASHRAE Trans. 1999,105(2):142—153.

[10] Edward F. Sowell, Douglas C. Hittle. Evolution of building energy simulation methodology [J]. ASHRAE Trans. 1995, 101(1):850—855.

[11] H. Boyer, et al. Thermal building simulation and computer generation of nadal models[J]. Building and Environment. 1996,31(3):207—214.

[12] Richard J. Liesen, Curtis O. Pedersen. An evaluation of inside surface heat balance models for cooling load calculations [J]. ASHRAE Trans. 1997,103(1):485—502.

Study on the Number of Response Factor in Thermal Response Factor Method in Unsteady Heat Transmission of Air-conditioned Trains

QU Rui-gui¹, LI Jian-qiang¹, LIU Guang-hai²

(1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2.School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: According to the structural characteristics of air-conditioned trains and the characteristics of velocity, which is contradistinguished with buildings, using the theory about thermal response factor method and supplemental analysis by computer, this paper calculated the unsteady heat transmission of walls, analyzed the influence on the load of trains by the numbers of root. thermal response factor method is perfected, which will give a better condition to put the method into use in trains.

Key words: air-conditioned trains; response factor; unsteady heat transfer