

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711073

# 新人体焓分析模型在建筑热舒适评价中的应用

王永杰<sup>1,2</sup>,赵  蕾<sup>1,2</sup>,范可新<sup>1,2</sup>,杨  柳<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院,西安 710055; 2. 环境工程重点实验室(西安建筑科技大学),  
西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 建筑学院,西安 710055)

**摘  要:** 为探究人体焓分析法在评估室内热环境状态中的应用,严格根据新陈代谢焓的定义,在已有的两种焓分析模型基础上,首先提出了更合理的新陈代谢焓计算方法,建立了新的两节点焓分析模型. 然后利用 ASHRAE 数据库中的实验数据验证了所建立模型的可靠性. 最后,揭示了人体焓交换速率、焓损失速率随室内、外环境参数的变化规律. 研究表明:新的新陈代谢焓计算方法能更准确地进行人体焓分析;焓损失速率比焓交换速率占新陈代谢焓率的比例大;操作温度 25 ℃ 时,焓交换速率主要包含辐射焓率和对流焓率;操作温度 32 ℃ 时,蒸发焓率和呼吸焓率则是焓交换速率的主要组成部分;人体焓损失速率在操作温度较低或较高条件下均出现极值,将其单独用于人体热舒适评价不妥,结合焓损失速率和焓交换速率两者可更好地评价室内热环境状态;最小焓损失速率和最小焓交换速率在给定室内条件下,均在室外高温低湿工况下出现;室外温度比室外相对湿度更强烈地影响人体焓损失速率和人体焓交换速率.

**关键词:** 人体焓模型; 新陈代谢焓; 焓损失速率; 焓交换速率; 热舒适

**中图分类号:** TU111      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0186-08

## A set of new human body exergy analysis model and its application in evaluating indoor thermal comfort conditions

WANG Yongjie<sup>1,2</sup>, ZHAO Lei<sup>1,2</sup>, FAN Kexin<sup>1,2</sup>, YANG Liu<sup>3</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
2. Key Laboratory of Environmental Engineering (Xi'an University of Architecture and Technology), Xi'an 710055, China;  
3. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** To explore the application of human body exergy analysis method in evaluating thermal comfort conditions of indoor environment, a more feasible method based on the definition of metabolic exergy was proposed to calculate human body metabolic exergy rate after comparison with two existing calculation methods. Then a new two-node human body exergy analysis model validated by ASHRAE thermal comfort database was proposed. Results indicate that exergy rates were more precise if the sum of warm and humid metabolic exergy rates was calculated based on clearly-defined energy metabolism by heat and moisture. The proportion of exergy consumption rate to metabolic rate was greater than that of the exergy exchange rate. The exergy exchange rate mainly consisted of convection and radiation exergy rate when the operative temperature was 25 ℃, while it consisted of evaporation and respiration exergy rate at 32 ℃. The exergy consumption rates reached extreme values at both lower and higher operative temperatures, and hence using the index alone as a thermal comfort evaluation parameter was inappropriate. It was more appropriate to consolidate exergy exchange rate with exergy consumption rate as a human body thermal comfort estimating index. The minimum values of aforementioned two terms, for a given indoor parameter, appeared at a greater outdoor air temperature and a lower outdoor relative humidity. The outdoor air temperature had a stronger impact on exergy exchange rate and exergy consumption rate than outdoor relative humidity.

**Keywords:** human body exergy model; metabolic exergy; exergy consumption rate; exergy exchange rate; thermal comfort

随着经济发展,人们对于室内环境的要求不断

提升. 室内外噪声、室内空气温度、相对湿度、空气流动速度、平均辐射温度直接影响到室内人体的舒适状况. 此外,室外温度、湿度和人体自身的健康状况等<sup>[1]</sup>也会影响人体的舒适感. 目前主要有: 平均预测投票(PMV)、自适应模型和焓分析等 3 种方法被用于研究室内人体的热舒适状况<sup>[2]</sup>. PMV-PPD 是

收稿日期: 2017-11-14  
基金项目: 国家杰出青年基金(51325803)  
作者简介: 王永杰(1993—),男,硕士研究生;  
杨  柳(1970—),女,教授,博士生导师  
通信作者: 赵  蕾,leizhao0308@hotmail.com

Fanger<sup>[3]</sup> 基于热力学第一定律和实验研究提出,该方法给出了热感觉投票与周围环境参数之间关系,未考虑人体适应性;自适应方法基于自由运行建筑的相关研究得出,表明中性温度与室外月平均温度存在线性关系,而未考虑室内参数对人体舒适感的影响;焓分析方法则结合热力学第一定律和热力学第二定律,探究人体的热舒适状况,兼顾了室内、外环境参数的影响,可用于自由运行建筑和机械通风、空调建筑的热环境评价。因此,近年来采用人体焓分析方法来进行建筑环境热舒适评价已成为这一领域的研究方向之一。

基于人体热模型可建立人体的焓分析模型。目前,主要有 Gagge 等<sup>[4]</sup> 和 Ferreira 等<sup>[5]</sup> 分别提出的人体两节点热模型和多节点热模型用于人体热舒适研究。人体两节点热模型包括皮肤层和核心层;人体多节点热模型包含 15 个椭圆柱体。2004 年 Prek<sup>[6]</sup> 基于两节点模型提出了一种人体焓模型,研究表明人体最小焓损失速率和人体的热舒适期望相关。Shukuya 等<sup>[7]</sup> 提出的稳态和非稳态人体两节点焓分析模型,可进行人体热舒适状态分析。Mady 等<sup>[8]</sup> 结合人体能量代谢的不可逆性提出了另一种多节点人体焓分析模型。结果指出:室内空气参数与人体焓交换速率(对流、辐射、蒸发、呼吸 4 项焓之和)、焓损失速率存在一定关系,可将焓交换速率作为室内人体热舒适状况的评价指标<sup>[9]</sup>。Wu 等<sup>[10]</sup> 忽略了人体内部的焓损失,结合两节点人体热模型得到新的人体焓分析模型,研究指出:随着室内操作温度的升高,人体焓损失速率和人员工作效率呈现负相关。

新陈代谢焓包括湿代谢焓和热代谢焓,但已有的人体焓分析模型中,一种是将体内热代谢速率等同于新陈代谢率来计算热代谢焓,并计算了人体核心层和皮肤层的湿代谢焓,两者之和作为新陈代谢焓,但存在热能焓的能量基数中包含着湿代谢能量的问题<sup>[7,11-12]</sup>;而另一种方法则采用新陈代谢能与卡诺效率的乘积来计算新陈代谢焓<sup>[6,10]</sup>,并未考虑湿代谢焓。上述两种计算方法对新陈代谢的内涵理解模糊,导致人体焓损失速率和焓交换速率计算结果不准确。因此,本文提出先计算出代谢湿所携带的能量,用新陈代谢能减去湿代谢能得到代谢热能,再分别计算新陈代谢热焓和湿焓的方法。接着,对比了本文算法与其他两种不同算法所得到的新陈代谢焓,利用它们与 PMV、操作温度之间的关系合理性,来表明本文所提计算方法的正确性与合理性,进而提出新的人体两节点焓分析模型。之后,结合 ASHRAE 实验数据验证本文所建模型的可靠性。最后,运用本文所建模型计算给出人体焓交换速率和

焓损失速率,并探究两者与室内、室外环境参数之间的关系。指出可用人体焓损失速率与焓交换速率的结合来评估人体在建筑中的热舒适状态。

## 1 人体焓模型

### 1.1 人体热模型

人体是能量守恒的开口系统。不考虑维持生命所需要食物,人体代谢 $\dot{M}$ 是体内各器官正常工作的主要动力。部分新陈代谢产能通过对外做功而消耗,而净代谢能量 $\dot{M} - \dot{W}$ 以人体呼吸产生的热湿交换以及皮肤表面的热湿交换方式传递到周围环境。人体的能量平衡(如图 1 所示)可表示为

$$\dot{M} - \dot{W} = \dot{Q}_{\text{res}} + \dot{Q}_{\text{sk}} + \dot{S} = (\dot{C}_{\text{res}} + \dot{E}_{\text{res}}) + (\dot{E}_{\text{sk}} + \dot{C} + \dot{R}) + (\dot{S}_{\text{cr}} + \dot{S}_{\text{sk}}).$$

式中: $\dot{M}$  为人体新陈代谢率,  $\text{W}/\text{m}^2$ , 它由人体的基础代谢率 $\dot{M}_{\text{act}}$ 和肌肉颤抖产生的附加代谢率 $\dot{M}_{\text{shiv}}$ 组成; $\dot{Q}_{\text{res}}$  为显热流率 $\dot{C}_{\text{res}}$ 和潜热流率 $\dot{E}_{\text{res}}$ 组成的人体呼吸热湿交换能量流率,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\dot{S}$  为核心层储能率 $\dot{S}_{\text{cr}}$ 和皮肤层储能率 $\dot{S}_{\text{sk}}$ 组成的人体储能率,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\dot{W}$  为人体对外做功功率,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\dot{Q}_{\text{sk}}$  为人体皮肤表面汗液蒸发换热流率 $\dot{E}_{\text{sk}}$ 、辐射换热流率 $\dot{R}$ 和对流换热流率 $\dot{C}$ 传递的总能量流率,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

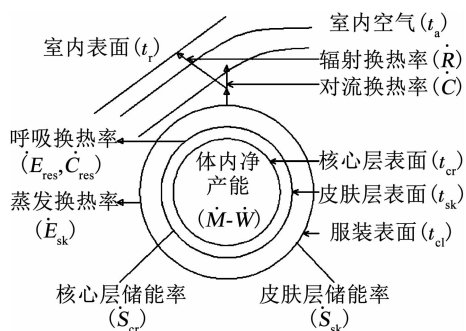


图 1 人体的能量平衡

Fig. 1 Human energy balance system

Harris 等<sup>[13]</sup> 提出的人体基础代谢率计算公式如下,考虑了不同性别、年龄、身高、体重等因素的影响。

$$\dot{M}_{\text{act-male}} = \frac{3.2224 + 0.6687m + 24.23l - 0.3295a}{0.202m^{0.425}l^{0.725}},$$

$$\dot{M}_{\text{act-female}} = \frac{32.7454 + 0.466m + 8.74l - 0.2281a}{0.202m^{0.425}l^{0.725}}.$$

式中: $\dot{M}_{\text{act-male}}$ 、 $\dot{M}_{\text{act-female}}$  分别为男性和女性的基础代谢率,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $m$  为体重,  $\text{kg}$ ;  $l$  为身高,  $\text{m}$ ;  $a$  为年龄。

人体核心温度只能在较小的温度范围内波动。

当周围环境温度低于人体皮肤表面温度时,为降低核心层温度波动,人体体温调节系统启动,由此增加的代谢率为

$$\dot{M}_{shiv} = 19.4(34 - t_{sk})(37 - t_{cr}).$$

式中:  $t_{cr}$ 、 $t_{sk}$  分别为人体核心层和皮肤层温度<sup>[14]</sup>, °C.

## 1.2 人体焓模型

由任意状态可逆变化到周围环境状态时,理论上能够转变为有用功的能量称之为焓. 室内热环境受室外参数的影响,人体与室内环境之间的换热与室内环境参数有关,室外空气状态做为焓值计算的参考点,其影响作用被引入到人体焓平衡方程(如图 2 所示)中,方程可表示为

$$\dot{E}x_{cons} = \dot{E}x_M - \dot{E}x_W - \dot{E}x_S - \dot{E}x_{Res} - \dot{E}x_{Skin}. \quad (1)$$

式中:  $\dot{E}x_{cons}$  为人体焓损失速率, W/m<sup>2</sup>;  $\dot{E}x_M$  为人体新陈代谢焓率, W/m<sup>2</sup>;  $\dot{E}x_S$  为人体储存焓率, W/m<sup>2</sup>;  $\dot{E}x_W$  为人体对外所做机械功率, W/m<sup>2</sup>;  $\dot{E}x_{Res}$  为呼吸焓流率, W/m<sup>2</sup>;  $\dot{E}x_{skin}$  为人体通过皮肤换热的焓流率, W/m<sup>2</sup>.

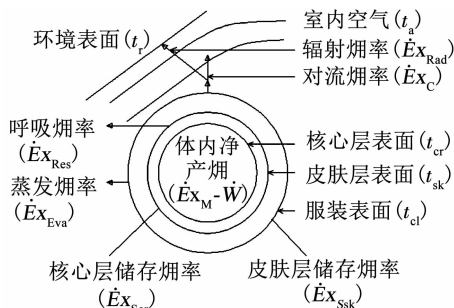


图 2 人体的焓平衡

Fig. 2 Human exergy balance system

### 1.2.1 新陈代谢焓

人体新陈代谢包含物质代谢和能量代谢,是体内全部有序化学变化的统称. 新陈代谢率等于热代谢率与湿代谢率之和. Shukuya 等<sup>[7,12]</sup>认为新陈代谢产能  $\dot{M}$  包含体内热代谢能和湿代谢能,而 Prek 等<sup>[6,10]</sup>则认为新陈代谢能量等于体内热代谢能,并不包新陈代谢湿所携带的能量. 继而有两种不同的人体新陈代谢焓计算模型.

**模型 1** 由 Shukuya 等<sup>[15]</sup>提出. 该模型中人体新陈代谢焓由热代谢焓、核心层湿代谢焓和皮肤层湿代谢焓 3 部分组成,计算公式如下:

$$\dot{E}x_M = (\dot{M}_{act} + \dot{M}_{shiv}) \left(1 - \frac{T_o}{T_{cr}}\right) +$$

$$\dot{V}_{w-core} \rho_w \{c_{pw} (T_{cr} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cr}}{T_o}) +$$

$$0.4606 T_o \ln \frac{p_{vs}(T_o)}{p_{vo}} \} + \dot{V}_{w-skin} \rho_w \{c_{pw} (T_{sk} - T_o - T_o \ln \frac{T_{sk}}{T_o}) + 0.4606 T_o [\ln \frac{p_{vs}(T_o)}{p_{vo}} + \frac{p - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \frac{p - p_{vr}}{p - p_{vo}}] \}. \quad (2)$$

**模型 2** 用新陈代谢率和卡诺效率的乘积来计算,如

$$\dot{E}x_M = (\dot{M}_{act} + \dot{M}_{shiv}) \left(1 - \frac{T_o}{T_{cr}}\right). \quad (3)$$

式中:  $T_o$  为计算焓的室外参考温度, K;  $T_{sk}$ 、 $T_{cr}$  分别为皮肤层和核心层温度, K;  $c_{pw}$ 、 $c_{pv}$  分别为水和水蒸气的比热, J/(kg·K);  $\dot{V}_{w-core}$ 、 $\dot{V}_{w-skin}$  分别为人体核心层和皮肤层湿代谢的水量, (m<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup>;  $\rho_w$  为水的密度 kg/m<sup>3</sup>;  $p_{vo}$ 、 $p_{vr}$ 、 $p_{vs}(T_o)$ 、 $p$  分别为室外、室内水蒸气分压力, 室外饱和水蒸气分压力和大气压力, kPa.

上述计算模型中对新陈代谢能的计算方法存在不足,本文提出先计算新陈代谢产湿和新陈代谢热所携带的能量,接着确定两者对应焓值并求和得出新陈代谢焓的计算模型. 新陈代谢等于代谢热能和湿代谢能之和:

$$\dot{M} = \dot{M}_{act} + \dot{M}_{shiv} = \dot{M}_H + \dot{M}_W. \quad (4)$$

式中:  $\dot{M}_H$ 、 $\dot{M}_W$  分别为体内代谢的热能以及湿代谢携带的能量, W/m<sup>2</sup>, 代谢湿包含人体核心层和皮肤层的产湿. 核心层代谢的湿通过呼吸传递到周围环境, 呼吸换气量与代谢率呈现线性关系<sup>[15]</sup>:

$$\dot{m}_{res} \approx 1.2 \times 10^{-6} \dot{M},$$

式中:  $\dot{m}_{res}$  为人体呼吸换气量, m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>). 可计算得出人体呼出气体中包含的水蒸气质量, 即可得到核心层的湿代谢量<sup>[15]</sup>  $\dot{V}_{w-core}$ .

皮肤层的湿代谢量通过人体排汗蒸发和扩散传递到周围环境, 可通过下式确定<sup>[15]</sup>:

$$\dot{V}_{w-skin} \rho_w \approx w \cdot \dot{E}_{max} / 2450.$$

式中:  $\dot{E}_{max}$  为最大人体蒸发换热率, W/m<sup>2</sup>;  $w$  为皮肤湿度. 两者可通过 ASHRAE 手册(2013)<sup>[14]</sup>提供的公式计算得到.

综上所述,人体的湿代谢量为

$$\dot{m} = (\dot{V}_{w-core} + \dot{V}_{w-skin}) \rho_w = \dot{V}_{w-core} \rho_w + w \cdot \dot{E}_{max} / 2450,$$

式中:  $\dot{m}$  为体内代谢的总湿量, kg/(s·m<sup>2</sup>). 湿代谢对应的总能量<sup>[14]</sup>为

$$\dot{M}_W = 0.001 \dot{m} h,$$

式中  $h$  为体温下水的焓值, kJ/kg.

进而通过式(4)可得体内代谢热能. 因此,本文提出的新的新陈代谢焓计算模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{E}x_M &= (\dot{M} - \dot{M}_w) \left(1 - \frac{T_o}{T_{cr}}\right) + \\ &\dot{V}_{w-core} \rho_w \left\{ c_{pw} (T_{cr} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cr}}{T_o}) + \right. \\ &0.460 \, 6 T_o \ln \frac{p_{vs}(T_o)}{p_{vo}} \left. \right\} + \dot{V}_{w-skin} \rho_w \left\{ c_{pw} (T_{sk} - T_o - \right. \\ &T_o \ln \frac{T_{sk}}{T_o}) + 0.460 \, 6 T_o \left[ \ln \frac{p_{vs}(T_o)}{p_{vo}} + \right. \\ &\left. \frac{p - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \frac{p - p_{vr}}{p - p_{vo}} \right] \left. \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中:第 1、2、3 项分别为新陈代谢热焓、核心层代谢湿焓以及皮肤层代谢湿焓. 本文大气压力选定为 101.325 kPa, 人体对外做功率为零.

### 1.2.2 储存焓

人体储热率等于皮肤层与核心层储热率之和, 即:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{cr} &= (1 - \alpha_{sk}) \frac{mc_{p,b} dt_{cr}}{A_D d\tau}, \\ \dot{S}_{sk} &= \alpha_{sk} \frac{mc_{p,b} dt_{sk}}{A_D d\tau}, \end{aligned}$$

式中: $c_{p,b}$  为人体比热,  $J/(kg \cdot K)$  ( $= 3 \, 490$ );  $\alpha_{sk}$  为皮肤层质量占体重的比例;  $\tau$  为时间,  $s$ ;  $A_D$  为皮肤表面积,  $m^2$ . 人体的储存焓率可由下式确定:

$$\dot{E}x_S = \frac{\left[ (1 - \alpha_{sk}) mc_{p,b} \frac{dt_{cr}}{d\tau} \left(1 - \frac{T_o}{T_{cr}}\right) + \alpha_{sk} mc_{p,b} \frac{dt_{sk}}{d\tau} \left(1 - \frac{T_o}{T_{sk}}\right) \right]}{A_D},$$

式中考虑稳态, 该值为零.

### 1.2.3 呼吸焓

人体核心层与周围环境通过呼吸直接进行的热交换包含显热(对流换热)和潜热(核心层湿代谢产湿的扩散和蒸发)两部分, 可由下式确定:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{res} &= \dot{C}_{res} + \dot{E}_{res} \approx 0.001 \, 4 \dot{M} (34 - t_a) + \\ &0.017 \, 3 \dot{M} (5.867 - p_{vr}), \end{aligned}$$

式中  $t_a$  为室内空气温度,  $^{\circ}C$ .

排出与吸入气体的焓值之差为呼吸换热对应的焓率. 其计算式可依据文献[10]和湿空气焓的定义<sup>[16-17]</sup>得到, 可表示为

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{Res} &= \frac{\dot{m}_{res}}{A_D} \left\{ (c_{pa} + W_{ex} c_{pv}) (T_{cr} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cr}}{T_o}) + \right. \\ &R_a T_o \left[ (1 + 1.608 W_{ex}) \ln \frac{1 + 1.608 W_o}{1 + 1.608 W_{ex}} + \right. \\ &1.608 W_{ex} \ln \frac{W_{ex}}{W_o} \left. \right] \left. \right\}. \end{aligned}$$

式中: $W_o$ 、 $W_{ex}$  为室外空气含湿量和呼出气体的含湿量,  $g/kg$ ;  $c_{pa}$  为干空气比热(1 005),  $J/(kg \cdot K)$ ;  $R_a$  为气体常数,  $J/(kg \cdot K)$ .

### 1.2.4 皮肤的热质交换焓

人体皮肤表面与周围环境间的热质交换以皮肤表面水分的蒸发与扩散、辐射以及对流的方式进行, 即

$$\dot{Q}_{sk} = \dot{E}_{sk} + \dot{C} + \dot{R}.$$

皮肤表面水分蒸发换热由体温调节产生的汗液蒸发和由于周围空气与皮肤表面的水蒸气分压力差而导致的扩散构成, 可通过下式计算:

$$\dot{E}_{sk} = w \frac{p_{sk,s} - p_{vr}}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl} h_e)}.$$

式中: $R_{e,cl}$  为着装蒸发阻力系数,  $(m^2 \cdot kPa)/W$ ;  $p_{sk,s}$  为皮肤温度下饱和水蒸气分压力,  $kPa$ ;  $h_e$  为人体蒸发换热系数,  $W/(m^2 \cdot kPa)$ .

蒸发换热对应的蒸发焓可通过下式计算<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{Eva} &= V_{w-skin} \rho_w \left\{ c_{pv} \left( T_{cl} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cl}}{T_o} \right) + \right. \\ &0.460 \, 61 T \left[ \ln \left( \frac{p_{vr}}{p_{vo}} \right) + \frac{p - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \frac{p - p_{vr}}{p - p_{vo}} \right] \left. \right\}. \end{aligned}$$

式中  $T_{cl}$  为人体着装表面温度,  $K$ .

人体皮肤表面显热换热包含对流换热和辐射换热. 对流热交换量可用下式计算:

$$\dot{C} = f_{cl} h_{e,cl} (T_{cl} - T_a).$$

式中: $T_a$  为室内环境空气温度,  $K$ ;  $h_{e,cl}$  为人体着装表面对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $f_{cl}$  为人体着装面积与裸露体表面积之比.

$f_{cl}$  可通过 ASHRAE(2013)<sup>[14]</sup> 推荐公式确定:

$$\begin{aligned} f_{cl} &= \begin{cases} 1 + 0.2 I_{cl}, I_{cl} < 0.5 \text{ clo}; \\ 1.05 + 0.1 I_{cl}, I_{cl} > 0.5 \text{ clo}, \end{cases} \\ h_{e,cl} &= \begin{cases} 8.3 v_a^{0.6}, 0.2 < v_a < 4.0; \\ 3.1, 0 < v_a < 0.2. \end{cases} \end{aligned}$$

式中: $I_{cl}$  为服装热阻,  $\text{clo}$ ;  $v_a$  为空气流速,  $m/s$ .

对流换热的焓可通过下式确定:

$$\dot{E}x_C = f_{cl} h_{e,cl} (T_{cl} - T_a) \left(1 - \frac{T_o}{T_{cl}}\right).$$

皮肤表面与外界之间的辐射换热量为

$$\dot{R} = f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_r^4).$$

式中: $\varepsilon$  为发射率( $= 0.95$ );  $f_{eff}$  为服装有效系数;  $T_r$  为室内空气平均辐射温度,  $K$ ;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数.

辐射换热的焓可通过下式<sup>[18]</sup>确定:

$$\dot{E}x_{Rad} = f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_r^4) \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_r} + \frac{1}{3} \frac{T_o^4}{T_r^4}\right).$$

## 2 新陈代谢焓计算方法的对比

新陈代谢焓计算方法的合理性对人体焓分析存在较大影响, 下面将对比上述 3 种方法的人体新陈

代谢焓率计算结果,来探究本文所提方法的正确性.

采用式(2)、(3)、(5)对应的3种新陈代谢焓率的计算模型得到了不同操作温度下的新陈代谢焓率,根据ASHRAE手册<sup>[14]</sup>推荐公式得到相应状态下的PMV值,计算结果如图3所示. 计算条件为:室内空气温度和平均辐射温度取值范围为18℃~34℃,室内相对湿度50%,风速0.1 m/s,服装热阻0.61 clo,基础代谢率1 met,室外温度32℃,室外相对湿度60%.

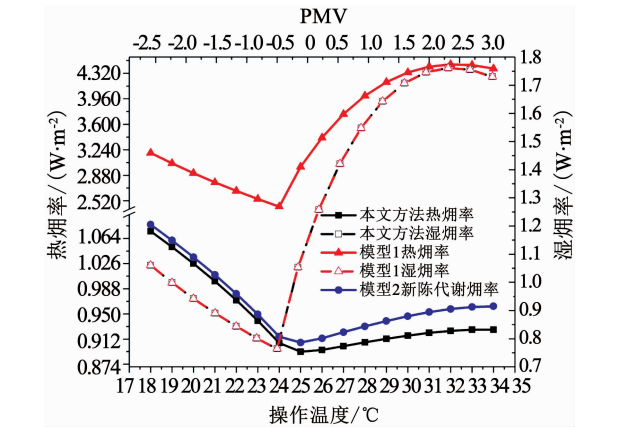


图3 新陈代谢热、湿焓率和操作温度、PMV之间关系

Fig. 3 Human metabolic warm exergy rate, humid exergy rate as a function of operative temperature and PMV

图3表明,3种模型在本质上是有所区别的. 模型1所得的新陈代谢热焓和本文提出模型所得的新陈代谢热焓在操作温度较低时均随着操作温度的降低而增大. 原因是当室内空气温度低于人体皮肤温度时,人体体温调节系统在降低核心层流向皮肤层的血液流量的同时增加肌肉颤抖,使人体核心温度在较小范围内波动. 当室内环境温度高于人体热中性温度对应的皮肤温度,人体处于较暖和的环境;此时人体与室内环境的对流和辐射热交换量将逐渐下降;随着操作温度升高,体温调节产生的汗液分泌量增加,人体与周围环境主要通过水分的蒸发和扩散来维持核心温度在较小范围内波动,与此同时代谢热焓率和代谢湿焓率均呈现增加趋势. 此外,图3还表明,本文模型得到的新陈代谢湿焓值与模型1的计算结果相等,其最小值均为0.764 W/m<sup>2</sup>,且均出现在操作温度24℃时,此时的PMV值为-0.501. 可见,本文计算方法得到的代谢湿焓是正确的. 综上所述,模型1将代谢热能等于新陈代谢总能量来确定热代谢焓,但该能量中包括湿代谢能;模型2将热量焓等于新陈代谢焓,并未计算代谢湿所携带的能量;而本文首先分别计算热代谢能和湿代谢能来确定新陈代谢能,进而提出更准确的新陈代谢焓计算

方法.

### 3 人体焓分析模型计算结果的验证

为了验证本文所建人体焓分析模型的可靠性,根据ASHRAE实验数据库<sup>[19]</sup>中给出的部分热舒适实验参数及相应的PMV值,利用该焓分析模型计算了相同工况下人体焓损失速率,计算条件和结果详见表1.

表1 用于验证模型的数据以及焓损失速率计算结果

Tab. 1 Data used for model validation and the calculation results of human body exergy consumption rate

| $t_o/^\circ\text{C}$ | $t_r/^\circ\text{C}$ | $\Psi_a/\%$ | $I_{cl}/\text{clo}$ | $t_a/^\circ\text{C}$ | $\Psi_0/\%$ | $\dot{M}_{act}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ | PMV   | $\dot{E}x_{cons}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ |
|----------------------|----------------------|-------------|---------------------|----------------------|-------------|----------------------------------------------|-------|------------------------------------------------|
| 27.5                 | 21.35                | 68.4        | 0.58                | 20.8                 | 75.45       | 1.0                                          | -0.94 | 2.151                                          |
| 32.1                 | 23.37                | 35.9        | 0.55                | 22.5                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.56 | 1.868                                          |
| 32.1                 | 23.78                | 35.3        | 0.56                | 22.8                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.41 | 1.801                                          |
| 32.1                 | 23.67                | 37.4        | 0.56                | 22.8                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.38 | 1.762                                          |
| 31.3                 | 23.60                | 59.3        | 0.56                | 23.1                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.26 | 1.548                                          |
| 31.3                 | 23.90                | 58.9        | 0.56                | 22.5                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.22 | 1.517                                          |
| 31.3                 | 23.94                | 58.8        | 0.56                | 23.4                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.14 | 1.607                                          |
| 31.0                 | 24.26                | 62.4        | 0.56                | 23.5                 | 72.00       | 1.1                                          | -0.08 | 1.605                                          |
| 31.3                 | 24.44                | 58.5        | 0.56                | 23.9                 | 72.00       | 1.1                                          | 0     | 1.699                                          |
| 31.3                 | 24.75                | 58.8        | 0.56                | 24.1                 | 72.00       | 1.1                                          | 0.11  | 1.738                                          |
| 30.7                 | 24.82                | 62.6        | 0.56                | 24.5                 | 75.45       | 1.1                                          | 0.21  | 1.772                                          |
| 31.7                 | 24.93                | 62.9        | 0.56                | 24.5                 | 75.45       | 1.1                                          | 0.26  | 1.775                                          |
| 30.9                 | 25.55                | 63.3        | 0.56                | 24.9                 | 72.00       | 1.1                                          | 0.36  | 1.829                                          |
| 30.7                 | 26.66                | 63.4        | 0.56                | 25.7                 | 75.45       | 1.1                                          | 0.42  | 1.870                                          |
| 30.7                 | 26.05                | 58.7        | 0.56                | 25.4                 | 75.45       | 1.1                                          | 0.49  | 1.976                                          |

注:  $\Psi_a$ 、 $\Psi_0$ 分别为室内外环境相对湿度.

表1表明,人体焓损失速率随着PMV值的上升呈现先减小后增加的趋势,最小值为1.517 W/m<sup>2</sup>,此时PMV值为-0.22,即人体最小焓损失速率与热中性的稍冷侧存在对应关系. 这说明本文模型所得计算结果和PMV指标的对应关系与其他学者给出的结论一致<sup>[8-11]</sup>.

可见,本文所建立的人体焓分析模型能更加合理地确定人体的各项代谢焓率,亦可揭示出人体最小焓损失速率出现在PMV指标的稍冷侧的规律. 因此,该焓分析模型可用于人体各项焓率计算及热舒适状况分析.

## 4 结果和讨论

### 4.1 人体焓分布情况

式(1)表明,人体新陈代谢焓等于焓损失及焓交换之和. 图4给出了图3中操作温度25℃、32℃

时用本文焓模型计算所得的焓分布情况.

图 4 显示, 焓损失速率占新陈代谢焓率的比例随操作温度的升高呈现增大的趋势; 而且焓交换速率明显比焓损失速率占新陈代谢焓率的比例小. 当操作温度较低, 如为 25 ℃ 时, 焓交换主要成分是对流焓和辐射焓, 两项之和共占焓交换的 78.99%, 而呼吸传热产生的呼吸焓以及水分蒸发产生的蒸发焓仅占约 21%. 这是由于环境温度为 25℃ 时, 人体处于热舒适状态, 主要以热对流、热辐射方式与外界换热, 体温调节系统几乎不发生作用, 汗液量较少, 水分蒸发和扩散所产生的焓较少. 但是, 当操作温度较高, 如为 32 ℃ 时, 蒸发焓和呼吸焓与对流焓和辐射焓相比, 占焓交换率的比例相当. 这是由于操作温度为 32 ℃ 时, 人体主要通过湿交换与周围环境维持热平衡, 体温调节作用下散湿量增加, 相应的焓交换率上升.

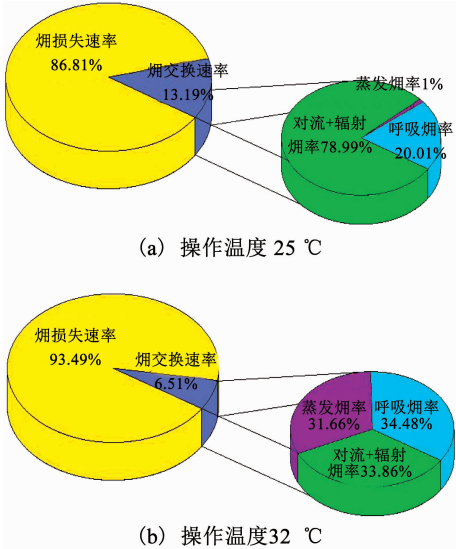


图 4 焓分布图

Fig. 4 Exergy distribution

4.2 人体焓交换速率、焓损失速率与室内环境状态的对应关系

以往研究表明, 人体最小焓损失速率与热舒适评价指标 PMV 值的热中性相关. 而人体焓损失速率和焓交换速率是不可分割的, 也就是说两者与室内环境参数都是密切相关的, 如图 5 所示. 针对机械通风和自然通风建筑的夏季工况进行计算, 基础代谢率为 1 met, 室外温度 32 ℃, 风速 0.1 m/s, 室内相对湿度 50%, 室外相对湿度 60%, 服装热阻 0.61 clo, 室内空气温度等于室内平均辐射温度, 且在 18℃ ~ 41℃ 之间.

图 5 表明, 随着操作温度的升高, 人体焓交换速率和焓损失速率呈现不同的变化趋势. 在操作温度接近热中性温度时焓交换速率较大, 而焓损失速率

较小; 比如, 在操作温度 24 ℃ 时焓交换速率数值为 0.265 W/m<sup>2</sup>, 对应的焓损失速率为 1.430 W/m<sup>2</sup>, 此时 PMV 值为 -0.501, 操作温度在规范给出的热舒适温度范围内. 然而, 图 5 还显示, 焓损失速率曲线在操作温度超过规范的推荐值后, 若操作温度继续升高则会呈现下降趋势, 最小值出现在高温工况. 比如操作温度为 41 ℃ 时, 人体焓交换速率为 0.038 W/m<sup>2</sup>, 相应焓损失速率为 1.401 W/m<sup>2</sup>, 但是, 此时 PMV 值却达到了 3. 图 5 还表明: 人体焓损失速率在较低和较高操作温度下出现极小值点, 而相应焓交换速率不是极值点; 人体最大焓交换速率相应的操作温度为 26 ℃, 此时 PMV 值为 0.185. 因此, 最小焓损失速率出现在热中性的稍冷侧<sup>[6,10,12]</sup> 仅适用于空调建筑室内环境温度范围. 对于自然通风建筑, 人体焓损失速率在室内环境状态下可能出现两次极小值, 热舒适状态点与较大的焓交换速率点存在关系. 因此, 综合焓交换速率和焓损失速率两个参数能更准确地评估不同建筑中人体的热舒适状况.

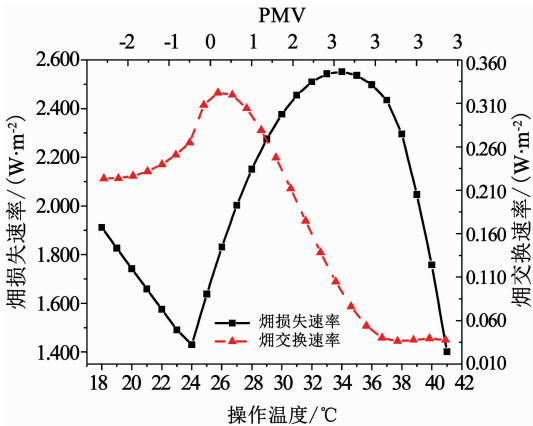


图 5 焓损失速率、焓交换速率和操作温度关系图

Fig. 5 Change of exergy consumption rate and exergy exchange rate with operative temperature

ISO 国际标准、ASHRAE 手册(2013) 和中国标准 GB/T 50785 均表明: 人体所处的环境参数处于 PMV - PPD 方法给出的热舒适参数区间时, 人体是舒适的, 但忽略了室外环境参数与人体自适应能力, 而只关注了室内环境参数对人体热舒适感之间的影响. 实际中, 室外状态参数改变也会影响人的热舒适状况. 自适应模型则主要关注了主观适应性, 揭示出人体的热中性温度会随着室外月平均温度的改变呈现线性变化趋势, 但却没有涉及室内参数的影响. 焓分析法综合了室内、外参数的影响所得到的焓损失速率和焓交换速率能更准确地反映建筑室内、外环境对人体的综合作用, 揭示出其对人体热舒适感的影响, 找出使人体最舒适的室内外环境状态参数,

能更好地反映不同建筑内人体的热舒适状况. 因此各类建筑室内环境的热舒适状况均可用焓分析方法有效评估.

#### 4.3 人体焓交换速率、焓损失速率与室外环境参数的对应关系

室外环境参数变化会明显影响室内环境, 进而影响人体各项焓值结果. 对于非空调建筑, 室外参数改变后, 人会通过行为调节, 如更换着装、开闭窗户等, 以及自身生理调节而使自己感到热舒适; 不同季节人体的适应性不同会使人们在空调建筑中设定不同的空调系统运行状态以维持室内参数处于热舒适范围内. 上述变化与调整均会导致人体焓分析结果的改变. 因此, 绘制了人体焓交换速率、焓损失速率随室外温度和湿度变化的关系曲线, 如图 6、7 所示. 计算工况: 平均辐射温度与室内空气温度 ( $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 相同; 空气流速  $0.15\text{ m/s}$ ; 服装热阻  $0.61\text{ clo}$ ; 基础代谢率  $1\text{ met}$ ; 室内相对湿度  $50\%$ .

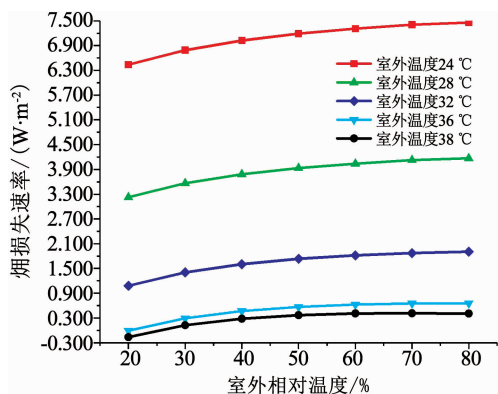


图 6 焓损失速率和室外空气温度、相对湿度的关系

Fig. 6 Exergy consumption rate as a function of outdoor air temperature and relative humidity

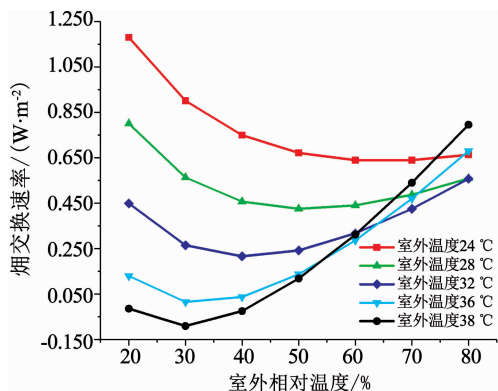


图 7 焓交换速率和室外空气温度、相对湿度的关系

Fig. 7 Exergy exchange rate as a function of outdoor air temperature and relative humidity

图 6 显示: 随着室外空气温度的上升, 人体焓损失速率在室外相对湿度不变时呈现下降趋势; 当室外温度不变时, 却随着室外相对湿度的增大而呈现

上升趋势. 即: 在给定的室内环境参数下人体最小焓损失速率出现在室外高温低湿的工况下. 图 7 显示: 随着室外温度上升, 人体焓交换速率在室外相对湿度较低时呈现下降趋势; 当室外相对湿度较高时, 随室外空气温度升高则先减小后增加. 对于较低的室外相对湿度, 室外温度升高相同的量 (如  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 所引起的焓交换速率的变化量远大于室外相对湿度较高时同样的室外温度升高量所引起的变化量. 综上所述, 室内环境参数一定时, 人体最小焓交换速率出现在室外高温低湿的情况下. 图 6、7 还表明, 焓损失速率和焓交换速率均会受到室外空气温度和室外相对湿度的影响. 但是, 室外相对湿度的影响较弱.

## 5 结 论

1) 本文严格根据新陈代谢的定义, 提出了更为合理的新陈代谢焓计算方法. 基于 ASHRAE 热舒适实验数据对所建模型可靠性的验证, 表明该模型可用于对人体热舒适状况的焓分析.

2) 人体焓损失速率在操作温度较低或较高条件下均会出现极值, 单独将其作为评价建筑室内热环境状况的指标不妥. 综合焓损失速率和焓交换速率二者能更好地评价室内热环境舒适与否.

3) 室内热环境参数确定时, 在室外高温低湿的情况下, 人体焓交换速率、焓损失速率均出现最小值. 焓损失速率和焓交换速率均会受到室外空气温度和室外相对湿度的影响. 但室外空气温度比室外相对湿度更明显地对人体焓交换速率和人体焓损失速率产生影响.

## 参考文献

- [1] FRONTCZAK M, WARGOCKI P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments[J]. Building and Environment, 2011, 46(4): 922. DOI:10.1016/j.buildenv.2010.10.021
- [2] SCHWEIKER M, SHUKUYA M. Adaptive comfort from the viewpoint of human body exergy consumption[J]. Building and Environment, 2012, 51: 351. DOI:10.1016/j.buildenv.2011.11.012
- [3] FANGER P O. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering[M]. IS. I. J: Copenhagen Danish Technical Press, 1970.
- [4] GAGGE A P, STOLWIJK J A J, NISHI Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. ASHRAE Transaction, 1971, 77(1): 21
- [5] FERREIRA M S, YANAGIHARA J I. A transient three-dimensional heat transfer model of the human body[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36: 718. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.010
- [6] PREK M. Exergy analysis of thermal comfort[J]. International

Journal of Exergy, 2004, 1 (3) : 303. DOI:10.1504/ijex.2004.005559

[7] SHUKUYA M, SAITO M, ISAWA K, et al. Low exergy systems for high-performance buildings and communities [R]. [S.l.]: Annex 49 Summary Report, 2011. DOI:10.18086/swc.2011.18.05

[8] MADY C E K, FERREIRA M S, YANAGIHARA J I, et al. Modeling the exergy behavior of human body [J]. Energy, 2012, 45(1) : 546. DOI:10.1016/j.energy.2012.02.064

[9] MADY C E K, FERREIRA M S, YANAGIHARA J I, et al. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 577. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.039

[10] WU Xiaozhou, ZHAO Jianing, OLESEN B W, et al. A novel human body exergy consumption formula to determine indoor thermal conditions for optimal human performance in office buildings [J]. Energy and Buildings, 2013, 56: 48. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.10.010

[11] ALA-JUUSELAA M, SHUKUYA M. Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland [J]. Energy and Buildings, 2014, 76: 249. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.02.067

[12] SIMONE A, KOLARIK J, IWAMATSU T, et al. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation [J]. Energy and Buildings,

2011, 43(1) : 1. DOI:10.1016/j.enbuild.2010.08.007

[13] HARRIS J A, BENEDICT F G. A biometric study of human basal metabolism [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1918, 4 (12) : 370. DOI:10.1073/pnas.4.12.370

[14] ASHRAE. ASHRAE Handbook; Fundamentals [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013

[15] SHUKUYA M, IWAMATSU T, ASADA H. Development of human-body exergy balance model for a better understanding of thermal comfort in the built environment [J]. International Journal of Exergy, 2012, 11(4) : 493. DOI:10.1504/ijex.2012.050260

[16] BEJAN A. Advanced engineering thermodynamics [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997

[17] SHUKUYA M, HAMMACHE A. Introduction to the concept of exergy for a better understanding of low temperature heating and high temperature cooling systems [M]. Espoo, Finland: VTT Tiedotteita-Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 2002

[18] PETELA R. Exergy of heat radiation [J]. Journal of Heat Transfer, 1964, 86(2) : 187. DOI:10.1115/1.3687092

[19] ASHRAE. ASHRAE Grant-In-Aid Funds; Human Thermal Comfort Database Project [Z]. 2016

(编辑 张 红)

(上接第 89 页)

[8] 陈霞, 刘双. 海军装备领域人因工程研究现状及发展 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(4) : 8

CHEN Xia, LIU Shuang. Present status and trend of naval equipment human factors engineering [J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(4) : 8. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7619.2017.04.002

[9] 张帅, 余隋怀, 陈登凯, 等. 载人潜水器深海作业舱室热舒适性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(4) : 32

ZHANG Shuai, YU Suihuai, CHEN Dengkai, et al. Thermal comfort analysis of deep-sea operating cabin of manned submersible [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(4) : 32. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201712133

[10] 初建杰, 裴卉宁, 余隋怀, 等. 民航客舱舒适度评估指标体系及评估方法研究 [J]. 人类工效学, 2017, 23(3) : 50

CHU Jianjie, PEI Huining, YU Suihuai, et al. Study on evaluation index system and method of civil aircraft cabin comfort [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2017, 23(3) : 50. DOI: 10.13837/j.issn.1006-8309.2017.03.0010

[11] 王文军, 余隋怀, 初建杰, 等. 飞机驾驶舱舒适性参数可视化技术 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34(4) : 647

WANG Wenjun, YU Suihuai, CHU Jianjie, et al. The visualization technology of the comfort parameter in aircraft cockpit [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(4) : 647. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2015.0431

[12] 潘静, 初建杰, 闫妍, 等. 基于 JACK 的空间站实验舱内工作姿势的工效学分析 [J]. 电子设计工程, 2015, 23(5) : 34

PAN Jing, CHU Jianjie, YAN Yan, et al. Ergonomics analysis of work postures in space laboratory based on JACK [J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(5) : 34. DOI:10.3969/j.issn.1674-6236.2015.05.011

[13] 苏胜, 王晗宇. 基于 JACK 软件进行人机工程仿真分析的要点 [J]. 工业设计, 2017(11) : 115

SU Sheng, WANG Hanyu. Core elements of ergonomic simulation analysis based on JACK [J]. Industrial Design, 2017(11) : 115. DOI:10.3969/j.issn.1672-7053.2017.11.051

[14] 徐平, 章勇, 徐伯初, 等. JACK 虚拟技术在列车卧铺爬梯设计中的应用研究 [J]. 机械设计, 2013, 30(12) : 104

XU Ping, ZHANG Yong, XU Bochu, et al. Research on the application of JACK virtual technology in the design of train sleeping ladder [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(12) : 104. DOI:10.3969/j.issn.1001-2354.2013.12.026

[15] 刘社明, 王小平, 陈登凯, 等. 基于 JACK 的驾驶舱仿真及人机工效分析 [J]. 计算机与现代化, 2013(8) : 106

LIU Sheming, WANG Xiaoping, CHEN Dengkai, et al. Cockpit simulation and ergonomics analysis based on JACK [J]. Computer and Modernization, 2013(8) : 106. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2013.08.027

[16] 张帅, 叶聪, 何卫平, 等. 载人潜水器坐底过程人因失效预测研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2) : 290

ZHANG Shuai, YE Cong, HE Weiping, et al. Research on method of human failure prediction in the process of landing manned submersibles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2) : 290. DOI: 10.11990/jheu.201609053

[17] 雷家峰, 马英杰, 杨锐, 等. 全海深载人潜水器载人球壳的选材及制造技术 [J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2) : 179

LEI Jiafeng, MA Yingjie, YANG Rui, et al. Material selection and manufacturing technology of manned spherical shell for deep manned submersible [J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2) : 179. DOI: 10.3724/SP.J.1224.2016.00179

(编辑 张 红)