

体温调节数学模型的生物物理学研究

鲜学义 韩相田 关鲁波 庞 诚

(航天医学工程研究所, 北京)

提 要

本文对六节段 25 单元体温调节数学模型作了简介。结合国人的特点确定了模型中节段或单元的体表面积、容积、热容量和产热量等生物物理参数的数值, 并对模型预测人体的直肠温度和平均皮肤温度的结果进行了实验检验。

前 言

人体体温调节数学模型的研究至今已 50 多年的历史, 于 20 世纪 60 年代得到发展, 当时相继提出了二节段模型和三节段 6 单元模型, 70 年代提出了六节段 25 单元和 41 单元模型, 美国在载人航天中进行了初步应用, 获得了较好的结果^[1], 80 年代西德学者采用不划分节段而用数学系统分析来研究体温调节系统, 由于方法过于复杂, 尚属起步阶段, 还未在国际科学社会推广和应用, 目前最有影响的仍是 Stollwijk 的六节段 25 单元模型^[2]。

体温调节数学模型的主要功能是能够预测人体在各种温度环境下的热状态, 为人类进行各种作业活动提供监督手段, 并为工程上环境温控系统优化设计提供依据。我们选择 Stollwijk 模型结合中国人的特点进行了模型的可行性研究, 本文着重介绍研究中的生物物理学

情况。

体温调节数学模型图解

人体体温调节过程是十分复杂的, 图解是对实际体温调节系统的简单化和形象化, 并为进一步用数学描述打下基础。体温调节反馈控制系统分为受控系统和控制系统(图 1), 受控系统的受控对象为身体热容, 受控制量为身体温度。控制系统由三个部分组成, 第一部分为检测器, 即存在于身体各组织中的温度感受器, 第二部分为控制器, 即体温调节中枢, 第三部分为效应器, 即肌肉, 汗腺和血管。温度感受器, 检测身体温度并把这种信息反馈输入中枢, 与基准(参考点)温度相比较, 得到差值, 触发控制中枢给出寒颤, 出汗, 血管舒缩控制指令。效应器接受控制指令把它转化成相应的体内产热, 体表蒸发散热, 体内热量传输的动作, 以对抗环境或体内代谢对受控系统的干扰, 从而达到对

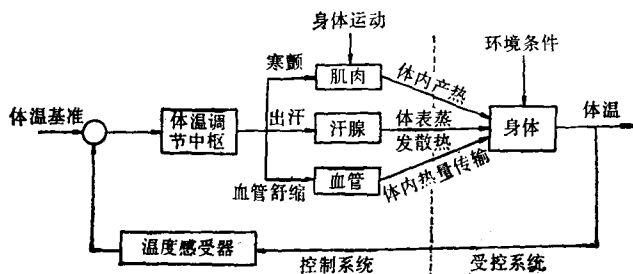


图 1 人体温度调节系统的框图

身体的控制,使处于热平衡状态。

体温调节数学模型简述和生物物理数据

模型把人体划分成六段,分别为头部、躯干、臂(上臂、前臂)、手、腿(大腿、小腿)和足,头部的几何形状设为球体,其余各段设为圆柱体。每段又分成同心的四层,由内向外为核心层、肌肉层、脂肪层和皮肤层,分别以 $N = 4 * I - 3$, $N = 4 * I - 2$, $N = 4 * I - 1$, $N = 4 * I$ 表示。 I 代表段, $I = 1$ 为头部, $I = 2$ 为躯干, $I = 3$ 为臂部, $I = 4$ 为手部, $I = 5$ 为腿部,

$I = 6$ 为足部。六段一共 24 层,另外躯干部还存在中心血室,通过血流联结于各层,因此,总共为 25 部分(或称 25 个单元),中心血室为第 25 单元。在模型各层的描述中,往往也以 N , $N + 1$, $N + 2$, $N + 3$ 分别表示核心、肌肉、脂肪和皮肤层。

对每段各层之间的换热情况作如下假设:

① 各层之间只有径向导热热流,节段之间没有传导热流。② 中心血室通过血流与各单元进行对流换热(图 2)。由此建立各单元的热平衡方程式:

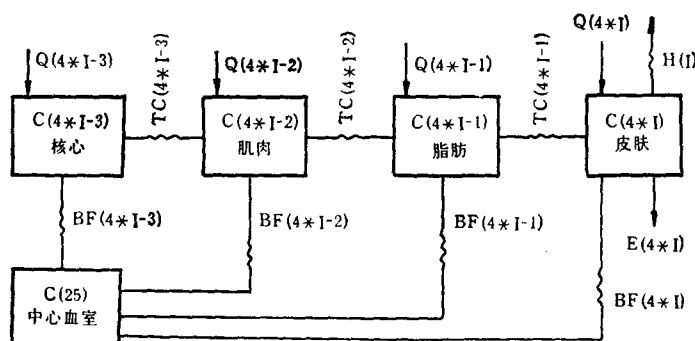


图 2 节段 I 的四个单元的热交换图

Q : 产热量; C : 热容量; TC : 传热系数; BF : 中心血流; H : 综合热传递系数; E : 蒸发散热量

$$\begin{aligned} \text{核心层: } m(N) * C(N) * F(N) &= Q(N) - BC(N) - TD(N) - E(N) \\ &= Q(N) - BC(N) - TD(N) - E(N) - RA(I) - CV(I) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{肌肉层: } m(N+1) * C(N+1) * F(N+1) &= Q(N+1) - BC(N+1) + TD(N) - TD(N+1) - E(N+1) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{脂肪层: } m(N+2) * C(N+2) * F(N+2) &= Q(N+2) - BC(N+2) + TD(N+1) - TD(N+2) - E(N+2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{皮肤层: } m(N+3) * C(N+3) * F(N+3) &= Q(N+3) - BC(N+3) + TD(N+2) - TD(N+3) - E(N+3) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{中心血室: } m(25) * C(25) * F(25) &= - \sum_{k=1}^{24} BC(k) \end{aligned} \quad (5)$$

上式中 m : 重量, 公斤; C : 比热, 千焦耳/公斤·℃; F : 温度变化率, ℃/小时; Q : 产热量, 瓦; BC : 中心血室血流与各单元对流换热流量, 瓦; TD : 单元间传导热流量, 瓦; CV : 对流换热流量, 瓦; RA : 辐射换热流量, 瓦; E : 蒸发换热流量, 瓦。(1) 式中 E 表示头部和躯干核心向呼吸道散热量, (2) 式中 E 表示头部和躯干肌肉向呼吸道散热量, (3) 式中 E 表示头部脂肪向呼吸道散热量, (4) 式中 E 表示皮肤以蒸发方式向外界环境的散热量。

(1) — (5) 式分别应用于各节段, 可以得到 25 个微分方程, 这些方程就是体温调节的主体

数学模型,方程中除 F 项外,其它各项均可以通过一系列子模型进行确定数量值^[2],最后求解出 F 项,知道了各单元的温度变化率,也就知道了人体各部位的温度分布(即人体的温度分布场)以及各部位温度的动态变化。

体温调节有关的数据很多,不可能一一通过自己实验后提出。为此,我们挑选了五名年龄在 20—23 岁的男性青年进行了实验,并参考

了部分文献资料,确定了结果。

1. 人体各段的体表面积和容积

全身的体表面积由测量受试者的身高和体重按下列公式计算:

$S = 0.0061H + 0.0128G - 0.1529$ (6)

式中 H 为身高,厘米; G 为人体重量,公斤。求出了总体表面积 S ,米²,然后按照我国烧伤学九分法确定身体各段的表面积,结果见表 1。

表 1 人体各段体表面积值

姓 名	总体表面积 (m ²)	各 段 表 面 积 (m ²)					
		头 (6%)	躯干 (30%)	上肢 (13%)	手 (5%)	下肢 (39%)	足 (7%)
董××	1.8587	0.1115	0.5576	0.2416	0.0929	0.7249	0.1301
陈××	1.7677	0.1061	0.5303	0.2298	0.0884	0.6894	0.1237
赵××	1.7346	0.1041	0.5204	0.2255	0.0867	0.6765	0.1214
张××	1.7091	0.1025	0.5127	0.2222	0.0855	0.6665	0.1196
王 ×	1.6105	0.0966	0.4832	0.2094	0.0805	0.6281	0.1127
$\bar{x} \pm SD$	1.7361 ± 0.0902	0.1042 ± 0.0054	0.5208 ± 0.0270	0.2257 ± 0.0117	0.0868 ± 0.0045	0.6771 ± 0.0352	0.1215 ± 0.0063

注:颈部 3% 划入躯干,因此头部和躯干分别为 6%, 30%。

各段体容积测试时首先以解剖学为依据定出分界线,然后分别在水容积器中测定,由于正常呼吸状态时躯干段机能残气和潮气的影

响,因此,最后人体容积和躯干段容积确定应从实测容积扣除这种影响,所测数据见表 2。

表 2 身体各段容积

受试者	体 重 (公斤)	体容积 (升)	各 段 容 积 (升)					
			头	躯 干	臂 部	手	腿 部	足
王 ×	58.70	53.98	2.53	22.40	4.59	0.64	22.17	1.65
张××	62.55	57.46	2.94	22.55	4.13	0.86	24.99	1.99
陈××	67.89	62.64	3.13	23.42	5.58	0.94	27.30	2.27
董××	72.42	66.69	3.42	27.89	5.27	0.96	26.85	2.30
赵××	63.45	58.71	3.50	23.94	4.68	0.89	23.57	2.13
$\bar{x} \pm SD$	65.00 ± 5.28	59.90 ± 4.90	3.10 ± 0.39	24.04 ± 2.24	4.85 ± 0.58	0.86 ± 0.13	24.98 ± 2.17	2.07 ± 0.26

2. 人体每段四层的重量和热容量

由表 2 已知人体的总重量和容积分别为 65 公斤和 59.90 升,根据公式:

$D = \frac{G}{V}$ (7)

可求得人体组织的平均密度。式中 D 为密度,公斤/升; G 为人体重量,公斤; V 为总容积,升。经计算 $D = 1.085$ 公斤/升,该数值与国外模型中采用假设人体密度为 1 相比,更切合人体的

实际。

根据各段容积及全身各组织的平均密度两者的乘积便为各段的重量,然后按照 Scammon 等人研究的段层之间百分比分配(表 3),计算每段各层之重量。由于身体组织的比热,按前人的工作骨骼为 2.1 千焦耳/公斤·℃,脂肪为 2.5 千焦耳/公斤·℃,其它组织为 3.8 千焦耳/公斤·℃,最后将各层重量乘以相应的比热,则得各层之热容量。

表 3 每段各层占每段总重量的百分比

段	核 心			肌肉	脂肪	皮肤
	骨骼	内脏	总计			
头部	30.35	44.53	74.88	9.21	9.21	6.72
躯干	6.90	28.90	35.80	43.66	17.24	3.30
臂部	21.39	10.48	31.87	47.43	13.74	6.80
手部	34.33	4.48	38.81	10.45	22.34	28.36
腿部	24.28	9.28	33.56	49.28	41.51	5.80
足部	38.14	6.19	44.33	7.22	22.68	24.74

由于血液热容量为 9.41 千焦耳/℃, 因此, 实际躯干核心的热容量应减去此值。

3. 人体代谢率

我们所选受试者其基础代谢率为 82.42 瓦^[3]。Aschoff 和 Wever 估算了脑代谢率为总基础代谢率的 16%, 躯干核心为它的 56%, 皮肤、脂肪和肌肉则为 18%, 其余 10% 为骨骼和结缔组织代谢率。其中皮肤、脂肪和肌肉等组织则按它们在各段所占的重量, 再作具体分配, 便可得到 24 个单元的基础代谢分配结果。

4. 人体有效血流量

对于建立模型亦需要有效血流量的基础值及其在各单元的分配, 我们引用 Stolwijk 报道的 285.13 升/小时作依据^[2], 根据一些学者研究, 该值对六段 24 单元的分配, 可按下述原则确定, 头部核心占 45 升/小时, 躯干核心占 210 升/小时, 其它各段核心以及肌肉、脂肪按产生 1.163 瓦热时需 1.2 升/小时血流换算, 所剩皮肤血流按 Hertzman 等^[4]研究的血流流向不同皮肤区域的分布比例确定, 最后可得到我们所选受试者基础血流量在各单元的数值。

5. 人体蒸发散热量

人体以不显汗和显汗蒸发方式, 不断地把热散失到周围环境中去, 因此蒸发散热是体温调节的一条重要途径。为了模型模拟, 必须事先确定基础蒸发散热量及其在各单元的分配, 一般认为基础蒸发散热量为基础代谢产热的 25%, 由此, 我们所选受试者经确定, 蒸发散失的热量为 20.61 瓦, 它在各单元的分配比例, 通过呼吸道(即躯干核心)散热 1/3, 通过皮肤表面散热 2/3, 后者再按不同段表面积进行分配。

除躯干核心以外的其它段核心以及肌肉、脂肪不存在蒸发散热; 因此为零值。通过上述确定原则, 即可得到基础蒸发散热在各单元的分配数值。

6. 25 个单元的参考点温度

参考点温度在实现体温调节中是重要的标准, 它与体温反馈信息的差值直接决定控制的途径和动作的大小。据我们所查资料, 目前国外有两种数据, 一种是 Lawrence H. Kuznetz 的报道, 该数值均偏高, 经计算平均皮肤温度可达近于 35℃, 另一种为 Stolwijk 的报道, 平均皮温在公认的温热舒适范围之内。显然前一种参考点温度值不宜于作基准, 而后一种参考点温度引入模型供本研究所用, 目前较为适宜, 见表 4。

表 4 25 个单元的参考点温度 (TSET(N)) (℃)

段	核 心	肌 肉	脂 肪	皮 肤
头	36.96	35.07	34.81	34.58
躯干	36.89	36.28	34.53	33.62
臂部	35.53	34.12	33.59	33.25
手部	35.41	35.38	35.30	35.22
腿部	35.81	35.30	35.31	34.10
足部	35.14	35.03	35.11	35.04

7. 各系数的数值

在体温调节数学模型中还必须确定受控系统和控制系统有关的系数, 它们是总的皮肤温度感受器在节段 I 的分配比例 (SKINR(I)), 出汗指令分配到节段 I 的系数 (SKINS(I)), 节段 I 的皮肤血管扩大和缩小指令系数 (SKINV(I)),

表 5 各系数的数值

符 号	头	躯干	臂部	手部	腿部	足部
SKINR(I)	0.210	0.420	0.100	0.040	0.200	0.030
SKINS(I)	0.081	0.481	0.154	0.031	0.218	0.035
SKINV(I)	0.132	0.322	0.095	0.121	0.230	0.100
SKINC(I)	0.010	0.050	0.190	0.200	0.200	0.350
CHILM(I)	0.020	0.850	0.050	0.000	0.070	0.000
WORKM(I)	0.000	0.300	0.080	0.010	0.600	0.010
HC(I)	3.00	2.11	2.11	4.00	2.11	4.00
HR(I)	4.80	4.80	4.20	3.61	4.20	4.00
H(I)	1.35	5.29	1.69	0.76	3.79	1.04

HC(I) HR(I) H(I) 瓦/米²·℃

SKINC(I))以及人体做功增加的代谢率在节段1肌肉里的分配比例(WORKM(1))和总寒颤在各节段肌肉中的分配比例(CHILM(I)),另外,还有对流、辐射及综合散热系数(HC(I)、HR(I)、H(I)),上述各系数的数值基本以1977年Konz^[5]报道的为准,见表5。

模型预测和实验结果比较

实验研究表明,在稳定状态条件下,模型对人体热状态预测是比较好的,而非稳态条件下,模型预测结果的精确度与可靠性将如何,是实验着重回答的问题。实验按如下安排进行,五名健康男性受试者,以裸体状态首先在28℃室温,相对湿度63%,风速0.05米/秒条件下静坐半小时,然后突然暴露到环境温度45℃,相对湿度39%,风速0.05米/秒条件下静坐1小时,最后迅速回到28℃室温,相对湿度65%,风速0.05米/秒环境静坐半小时。整个实验过程中测量了受试者的直肠温度(T_r)和平均皮肤

温度($\bar{T}_s$),实测值与同样条件下的预测值比较见图3。

从图3中可以看出, T_r 和 $\bar{T}_s$ 预测值和实验值的比较,在初始阶段和高温阶段二者之间的符合性较好, T_r 的最大偏差为0.38℃, $\bar{T}_s$ 最大偏差为0.54℃,大多数情况下小于0.3℃,仅从高温回到28℃条件时,预测值比实验值偏离较大,预测的 T_r 偏低, $\bar{T}_s$ 偏高。影响的原因,我们认为是模型的血管收缩动态反应较慢,致使环境温度降低后,皮肤血流量仍较大,从而使 $\bar{T}_s$ 偏高,因此继续散失较多的热量,使预测的 T_r 偏低。

上述比较提出了一个值得注意的问题,说明体温调节模型中,有关外周血管模型还有不够完善的地方,有待今后进一步研究和解决。

总之,所建立的数学模型,基本能反映人体温度调节的过程和机理,证明了数学模拟体温调节的可行性和所确定的生物物理参数值的可用性。

本文计算值由北京航空学院寿荣中教授和何慧娟老师提供,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Waligora, J. M.: NASA SP-379, 1976, 1.
- [2] Stolwijk, J. A. J.: NASA CR-1855, 1971, 1.
- [3] 毛继文等:《心导管检查及诊断》,吉林人民出版社,1979,57页。
- [4] Hertzman, A. B. et al.: *J. Appl. Physiol.*, 1948, 1, 234.
- [5] Konz, S. et al.: *Computers in Biology and Medicine*, 1977, 7(1), 71.

[本文于1987年10月13日收到]

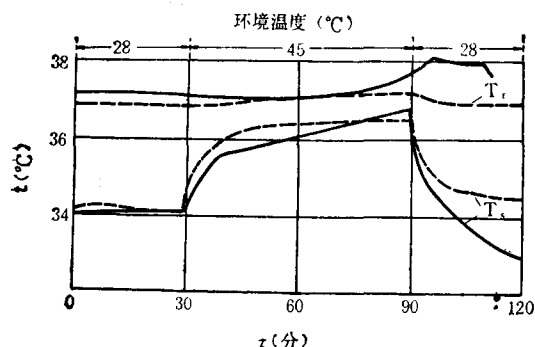


图3 计算结果和实验结果的比较
—— 试验值 ---- 计算值

余 刊 出 售 启 事

本刊尚有少量存刊,如下:

年份	期	单价
1978	2,6	0.30 元
1979	2—6	0.45 元
1980	1,3,4,5	0.45 元
1981	3,4,6	0.50 元
1982—1984	1—6	0.50 元

1985	1—6	0.81 元
1986—1987	1—6	1.12 元

有购买者,请写明所需年、期及册数,并将款汇至北京市中关村中国科学院生物物理研究所转《生物化学与生物物理进展》编辑部。款到后即按购刊者姓名和地址寄刊。

《生物化学与生物物理进展》编辑部