



# 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准

GB/T 40233—2021/ISO 7726:1998

---

## 热环境的人类工效学 物理量测量仪器

Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring  
physical quantities

(ISO7726:1998,IDT)

2021-05-21发布

2021-12-01实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 前言 .....                     | III |
| 引言 .....                     | IN  |
| 1 范围 .....                   | 1   |
| 2 规范性引用文件 .....              | 1   |
| 3 一般原则 .....                 | 1   |
| 3.1 舒适与应激环境 .....            | 1   |
| 3.2 表征环境的物理量 .....           | 1   |
| 4 测量仪器 .....                 | 2   |
| 4.1 测量的物理量 .....             | 2   |
| 4.2 测量仪器 .....               | 4   |
| 5 测量方法要求 .....               | 7   |
| 5.1 一般原则 .....               | 7   |
| 5.2 与物体周围空间物理量变化有关的要求 .....  | 7   |
| 5.3 与物理量随时间变化有关的要求 .....     | 8   |
| 附录 A (资料性附录) 空气温度的测量 .....   | 9   |
| 附录 B (资料性附录) 平均辐射温度的测量 ..... | 11  |
| 附录 C (资料性附录) 平面辐射温度测量 .....  | 23  |
| 附录 D (资料性附录) 空气绝对湿度的测量 ..... | 29  |
| 附录 E (资料性附录) 空气速度测量 .....    | 38  |
| 附录 F (资料性附录) 表面温度测量 .....    | 42  |
| 附录 G (资料性附录) 操作温度测量 .....    | 43  |
| 附录 H (资料性附录) 参考文献 .....      | 45  |

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准等同采用ISO 7726:1998《热环境的人类工效学 物理量测量仪器》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 18049—2017 热环境的人类工效学通过计算PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释(ISO7730:2005,IDT)

本标准做了下列编辑性修改：

——按规范调整了附录中公式的编号。

本标准由全国人类工效学标准化技术委员会(SAC/TC 7)提出并归口。

本标准起草单位：浙江安吉椅业科技有限公司、中国标准化研究院、广东美的制冷设备有限公司、北京航空航天大学、中标能效科技(北京)有限公司、内蒙古工业大学、北京光徽德润航空技术有限公司、安吉县质量技术监督检测中心、芜湖美智空调设备有限公司、重庆大学、清华大学。

本标准主要起草人：汪洋、丁旭卫、赵朝义、王瑞、叶晓龙、郑崇开、邱义芬、冯朝卿、张佳峥、葛猛、李百战、程勇、杜顺开、梅志光、齐云、张少君、栗玮、高剑峰、马荣江。

## 引 言

本标准是应用于热环境工效学研究的系列文件之一。

此系列标准主要涉及以下方面：

- 最终确定的条款可以用于已经存在或正在起草标准的测量方法、实验或注释中；
- 制定描述热环境特征的相关物理量测试方法的规范；
- 提供解释参数的若干方法选择；
- 适用于规范舒适环境与极端环境(包括热和冷)的热环境推荐值或极限值；
- 规范个人或集体受热(冷)防护装置和过程的效果的测试方法。

任何能够达到(或超过)本标准所要求精度的测量仪器均可使用。

附录中介绍了一些物理量测量时推荐使用的仪器，这些仪器的特性会根据测量原理、结构和使用方式而有所不同。用户也可以比较市面上在售的相关仪器设备的精度，通过检查符合本标准中的规定的设备均可使用。

# 热环境的人类工效学 物理量测量仪器

## 1 范围

本标准规定了热环境物理量测量仪器的基本特征及测量方法。

本标准是为了标准化记录测试数据，从而定义了一些指标，这些定义不涉及舒适性或热应激的具体指标。

本标准适用于：

- a) 环境物理量测量仪器制造及设备使用规范；
- b) 双方就测量这些物理量拟定相关合同。

本标准适用于炎热、温和、舒适或寒冷环境对人体的影响。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 7730:1994 热环境的人类工效学通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释(Moderate thermal environments —Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort)

## 3 一般原则

### 3.1 舒适与应激环境

本标准所包含的规范和方法根据热环境对人的影响分为两类：

C类：其规格和方法主要应用在接近舒适的温和环境中进行的测量。

S类：其规格和方法主要应用在受到较高甚至极端应激环境中进行的测量。

各个类别所描述的规格和方法，均考虑了现场测量的实际可能性以及当前可用测量仪器的性能。

### 3.2 表征环境的物理量

#### 3.2.1 概述

确定舒适度或热应激的总体指标需要测量与环境有关的物理量。这些物理量可以根据其对环境的依赖程度分为基本物理量和导出物理量两类。

#### 3.2.2 基本物理量

各个基本物理量均可独立地表征环境参数。以热环境中人体建立热平衡为基础，这些物理量通常用来定义舒适或热应激的程度，具体如下：

- a) 空气温度，以热力学温度( $T_a$ ) 或摄氏温度( $t_a$ ) 表示；
- b) 平均辐射温度，以热力学温度( $T_r$ ) 或摄氏温度( $t_r$ ) 表示；平面辐射温度，以热力学温度( $T_p$ ) 或摄氏温度( $t_{pr}$ ) 表示；直接辐射的单位为 $W/m^2$ ；

- c) 空气绝对湿度,以水蒸气分压(pa)表示,单位为kPa;
- d) 空气流速(va),单位为m/s;
- e) 表面温度,以热力学温度(T。)或摄氏温度(tg)表示。

表1中列出了这些物理量与人体得热和散热的关系,还给出了另外4个物理量,它们通常是根据其测试数据估算得到的,而不是测量得到的,并不包含在本标准的其余部分。

注:平均辐射温度的概念可以用来研究人与环境之间的辐射交换。它假定通常是异质的实际环境和定义为同质的虚拟环境对人体的影响是相同的。当这个假设无效时,特别是在非对称辐射的情况下,也应该利用平面辐射温度的概念来评估来自不同区域的辐射交换及其对人体的影响程度。

表 1 人与环境热平衡分析中的主要基本物理量

| 热平衡中的元素                                                                    | ta       | t          | Va       | pa                   | l        | Ra         | M        | W        |
|----------------------------------------------------------------------------|----------|------------|----------|----------------------|----------|------------|----------|----------|
|                                                                            | 空气<br>温度 | 平均辐<br>射温度 | 空气<br>流速 | 空气绝对湿度<br>(水蒸气部分蒸汽压) | 服装<br>热阻 | 衣服蒸<br>发阻力 | 新陈<br>代谢 | 对外<br>做功 |
| 内部产热, M-W                                                                  |          |            |          |                      |          |            | √        | √        |
| 辐射传热, R                                                                    |          | √          |          |                      | √        |            |          |          |
| 对流传热, Ca                                                                   | √        |            | √        |                      | √        |            |          |          |
| 蒸发热损失<br>——通过皮肤蒸发, E<br>——通过皮肤蒸发, Ers                                      |          |            | √        | √<br>√               |          | √          | √        |          |
| 呼吸对流, Cre                                                                  | √        |            |          |                      |          |            | √        |          |
| “对流传热也受身体运动的影响。在皮肤上产生的空气速度称为相对空气速度(v <sub>m</sub> )。热传导(表面温度)对总热平衡的影响是有限的。 |          |            |          |                      |          |            |          |          |

### 3.2.3 导出物理量

导出物理量用来表征环境的一组因素,根据不同物理量所使用的传感器特性进行加权。通常这些物理量无需借助人体和热环境之间各种形式的换热量估算结果以及由此产生的热平衡和生理紧张,就可以用来定义舒适或热应激的经验指标。一些导出的物理量在具体标准中应用时会包含测量要求。

## 4 测量仪器

### 4.1 测量的物理量

#### 4.1.1 空气温度

空气温度是指人体周围空气的温度,测量方法参见附录A。

#### 4.1.2 平均辐射温度

平均辐射温度是指人体与假想外壳壁面的辐射换热量等于在实际非均匀外壳壁面中的辐射换热量时的该假象外壳的平均温度。

平均辐射温度可以用仪器测量,这种仪器可以将实际外壳壁面的普遍不均匀辐射转化为平均辐射值(参见附录B)。

黑球温度计是一种常用的测量辐射温度的仪器,根据测量到的球体温度tg以及球体周围空气的温度和流速,推导得到平均辐射温度。

在不同的被测环境下，由于黑球温度、空气温度和空气速度的测量精度不同，利用该仪器获得的平均辐射温度的测量精度会变化很大。仪器设备如果超出本标准规定的误差范围，应标明实际测量精度。

平均辐射温度是相对于人体来定义的。球形温度计的形状可以根据人体坐姿情况下身体的形状作出合理的近似。椭球形传感器在直立位置和坐姿位置都能更接近人体形状。

平均辐射温度也可以根据周围壁面温度的测量值、壁面的尺寸以及它们相对于人体的位置来计算(几何形状因子计算)(参见附录B)。

平均辐射温度也可以用人体在六个相反方向上平面辐射温度的投影面积系数加权来估算，也可以通过测量不同方向上的辐射量来估算。

其他测量仪器或计算方法，可以使用后续条款中规定的精度来确定平均辐射温度。

#### 4.1.3 平面辐射温度

平面辐射温度是指封闭空间的平均温度，其一侧平面的辐射换热量与实际的非均匀环境相同。

“净”辐射计是经常用来测量平面辐射温度的仪器(参见附录C)。它能够从环境与物体表面之间交换的净辐射热量以及辐射计表面温度来确定平面辐射温度。

可以使用由反射盘(抛光)和吸收盘(涂黑)组成的辐射计来测量平面辐射温度。

平面辐射温度也可以根据环境中参与换热物体表面温度和表面与平面单元之间的形状因子来计算(参见附录C)。

辐射温度不对称性是指两个相对小平面单元之间的平面辐射温度的差(见平面辐射温度的定义)。

辐射温度的不对称性是在平均辐射温度不能完全描述当前辐射环境的情况下使用，例如当辐射来自具有明显热不均匀性的空间相对部分时。

非对称辐射场的定义与作为参考的平面单元的位置有关，需要通过该参考平面单元的法线方向精确地指定辐射场。

辐射温度不对称性是根据两个相反方向的平面辐射温度的测量值来测量或计算得到的。

任何能够测量或计算辐射温度不对称性或平面辐射温度的仪器或方法，只要精度能够达到本标准后续条款要求的均可使用。

#### 4.1.4 湿度

相对湿度是指空气中水蒸气的含量与其在给定温度和压力下饱和状态水蒸气含量的关系。与相对湿度或饱和度等物理量不同的是，空气的绝对湿度表征了空气中水蒸气的实际含量。

计算人体与环境间通过蒸发产生的热交换，应当考虑到空气的绝对湿度，通常表现为水蒸气分压的形式。湿空气混合物的水蒸气分压，是指在相同温度下水蒸气单独占据湿空气的体积时所产生的压力。

绝对湿度可以直接测定(露点仪、电解仪)，也可以通过同时测量多个量(空气的相对湿度和温度；湿球温度和空气温度)间接得到(参见附录D)。

干湿球温度计是一种常用的湿度测量装置。它能够从空气温度的测量值 $t_a$ 和湿球温度的测量值 $t_w$ 来确定空气的绝对湿度。只有在设备设计良好、使用过程中严格遵守预防措施的情况下，测量精度才能符合本标准的规定。

任何测量精度达到后续条款要求的装置，均可以用于测量空气的绝对湿度。

#### 4.1.5 空气流速

空气流速(矢量)是由大小和方向决定的。在热环境中考虑的是空气的流动速率，即测量点的流速矢量的大小(参见附录E)。

空气流速 $v_a$ ，在空间中的任意点都随时间变化，需记录速度波动。气流可以用平均速度 $\bar{v}_a$ 来描述，其定义为在固定时间间隔(测量周期)内速度的平均值，以及速度的标准偏差SD，公式如下：

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2}$$

式中，  
va—— 测量周期内“i”时刻的速度，单位为米每秒(m/s)。  
气流的湍流强度TU， 定义为标准偏差除以平均速度，通常用百分数表示：

$$TU = \frac{SD}{\bar{v}_a} \times 100$$

4.1.6 表面温度

表面温度是指给定表面的温度。通常用来评估人体由于平均辐射/平面辐射温度产生的与环境的换热。也可以用于评估身体与特定表面之间直接接触的效果。表面温度可以用附录 F 中给出的方法测量，测量方法包括：

- 接触式温度计，传感器与表面直接接触。这种传感器可能会改变测量点的热流量，进而影响测量结果。
- 红外传感器，测量表面辐射热通量并将其转换为温度。这种测量方法可能受到待测物体表面发射率的影响。

4.2 测量仪器

4.2.1 基本物理量测量仪器的特性

表2总结出了各个基本物理量传感器的测量范围，测量精度和90%响应时间。这些特性被认为是设备的最低要求。根据需求和技术制造的难度，可以指定更为精确的技术指标要求。因此，对于某些非常精确的热应激测量可能需要使用具有S级测量范围和C级精度的仪器。

本标准中，传感器的时间常数被认为在数值上等于传感器输出所需的时间，以响应被测环境量的阶跃变化达到其最终稳态值的63%而无超调。响应时间是指在实际测量中，被测物理量(例如温度计的温度)可以被认为足够接近真值的确切数字之后的时间，可以用时间常数来计算。

经过2倍~3倍时间常数的时间后，达到90%的响应时间。在进行测量之前，等待时间至少需要相当于响应时间。

表 2 测量仪器的特性

| 物理量  | 符号 | C类(舒适)  |                                                   |                    | S类(热应激)    |                                                                                                                           |                   | 注释                                         |
|------|----|---------|---------------------------------------------------|--------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|
|      |    | 测量范围    | 精度                                                | 响应时间(90%)          | 测量范围       | 精度                                                                                                                        | 响应时间(90%)         |                                            |
| 空气温度 | ta | 10℃~40℃ | 要求：±0.5℃<br>理想：±0.2℃<br>这些水平至少应保证偏差<br> t-ta =10℃ | 尽可能最短。被指定为测量仪器的特性值 | -40℃~+120℃ | 要求：<br>-40℃~0℃：±(0.5+0.01 ta)℃<br>>0℃~50℃：±0.5℃<br>>50℃~120℃<br>±[0.5+0.04(ta-50)]℃<br>理想：要求精度/2<br>这些水平至少应保证偏差t，-ta =20℃ | 被指定为测量仪器的特性值，尽可能短 | 空气温度传感器应有效地防止来自热壁或冷壁的热辐射的影响。可取1 min内的指示平均值 |

表 2(续)

| 物理量          | 符号              | C类(舒适)             |                                                                                                                          |                              | S类(热应激)            |                                                                                                                                                                                                 |                                        | 注释                                                                                               |
|--------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              |                 | 测量范围               | 精度                                                                                                                       | 响应时间(90%)                    | 测量范围               | 精度                                                                                                                                                                                              | 响应时间(90%)                              |                                                                                                  |
| 平均辐射温度       | $t_{\text{r}}$  | 10℃~40℃            | 要求: ±2℃<br>理想: ±0.2℃<br>普通可用的设备很难甚至不可能达到如此水平。当无法实现时, 请表明实际的测量精度                                                          | 尽可能最短。被指定为测量仪器的特征值           | —40℃~+150℃         | 要求:<br>—40℃~0℃: ±(5+0.02  $t_{\text{a}}$  )℃<br>>0℃~50℃: ±5℃<br>>50℃~150℃: ±[5+0.08( $t$ , —50)]℃<br>理想:<br>—40℃~0℃: ±(0.5+0.01  $t$ ,)℃<br>>0℃~50℃: ±5℃<br>>50℃~150℃: ±[0.5+0.04( $t$ , —50)]℃ | 被指定为测量仪器的特性值, 尽可能短                     | 当测量是以一个黑色的球体进行时, 根据环境和 $v_{\text{a}}$ , $t_{\text{a}}$ 和 $t$ 的不准确性, 有关平均辐射温度的误差可以为C类的±5℃和S类的±20℃ |
| 平面辐射温度       | $t_{\text{pr}}$ | 0℃~50℃             | 要求: ±0.5℃<br>理想: ±0.2℃<br>这些水平至少应保证偏差 $t_{\text{p}} - t_{\text{a}} < 10℃$                                                | 尽可能最短。被指定为测量仪器的特性值           | 0℃~200℃            | 要求:<br>—60℃~0℃: ±(0.1+0.1  $t_{\text{pr}}$  )℃<br>0℃~50℃: ±1℃<br>50℃~200℃: ±[1+0.1( $t_{\text{pr}} - 50$ )]℃<br>理想: 要求精度/2<br>这些水平至少应保证偏差  $t_{\text{gr}} - t_{\text{a}}$   < 20℃               | 被指定为测量仪器的特性值, 尽可能短                     |                                                                                                  |
| 空气流速         | $U_{\text{a}}$  | 0.05 m/s<br>1 m/s  | 要求: ±(0.05+0.05 $v_{\text{a}}$ )m/s<br>理想: ±(0.02+0.07 $v_{\text{a}}$ )m/s<br>无论在一个立体角内流动的方向如何, 这些水平都应该得到保证<br>(:)=3π sr | 要求:<br>0.5 s<br>理想:<br>0.2 s | 0.2 m/s<br>20 m/s  | 要求: ±(0.1+0.05 $v_{\text{a}}$ )m/s<br>理想: ±(0.05+0.05 $v_{\text{a}}$ )m/s<br>无论在一个立体角内流动的方向如何, 这些水平都应该得到保证<br>(:)=3π sr                                                                         | 被指定为测量仪器的特性值。为了测量湍流程度, 需要一个小响应时间, 尽可能短 | 除了不定向气流的情况外, 无论空气方向如何, 空气速度传感器都可测量速度。可取3 min内的平均值和标准偏差                                           |
| 绝对湿度表示为部分蒸汽压 | $p_{\text{a}}$  | 0.5 kPa<br>3.0 kPa | ±0.15 kPa<br>这些水平至少应保证偏差  $t$ , — $t_{\text{a}}$   ≥ 10℃                                                                 | 尽可能最短。被指定为测量仪器的特性值           | 0.5 kPa<br>6.0 kPa | ±0.15 kPa<br>这些水平至少应保证偏差  $t_{\text{r}} - t_{\text{a}}$   ≥ 20℃                                                                                                                                 | 被指定为测量仪器的特性值, 尽可能短                     |                                                                                                  |

表 2(续)

| 物理量                                                                | 符号 | C类(舒适)                                       |                      |                              | S类(热应激)                                                                     |                                                                                                                           |                              | 注释 |
|--------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----|
|                                                                    |    | 测量范围                                         | 精度                   | 响应时间(90%)                    | 测量范围                                                                        | 精度                                                                                                                        | 响应时间(90%)                    |    |
| 表面温度                                                               | 1  | 0℃~50℃                                       | 要求: ±1℃<br>理想: ±0.5℃ | 尽可能最短。被指定为测量仪器的特征值           | —40℃~+120℃                                                                  | 要求:<br>$< -10℃: \pm [1 + 0.05(-t_s - 10)]℃$<br>$-10℃ \sim 50℃: \pm 1℃$<br>$> 50℃: \pm [1 + 0.05(t_s - 50)]$<br>理想: 要求精度/2 | 被指定为测量仪器的特性值, 尽可能短           |    |
| 定向辐射                                                               | rd | —35 W/m <sup>2</sup><br>+35 W/m <sup>2</sup> | ±5 W/m <sup>2</sup>  | 要求:<br>1.0 s<br>理想:<br>0.5 s | —300℃~+100℃<br>100℃~1000℃<br>1000 W/m <sup>2</sup><br>2500 W/m <sup>2</sup> | ±5 W/m <sup>2</sup><br>±10 W/m <sup>2</sup><br>±15 W/m <sup>2</sup>                                                       | 要求:<br>1.0 s<br>理想:<br>0.5 s |    |
| 注: 在某些热环境(如钢、煤、玻璃工业)的工作场所, 可能需要高于本表中平面辐射和表面辐射的范围。仪器制造商需说明扩展范围的准确性。 |    |                                              |                      |                              |                                                                             |                                                                                                                           |                              |    |

传感器的响应时间并不完全取决于传感器(质量、表面积、保护罩的存在), 也取决于环境条件, 例如与被测量有关的因素(空气速度、辐射等), 有必要指出测试条件, 表3中列出了标准环境条件(C类和S类)。只要与被测量所考虑条件不矛盾, 都应作为参考。

此外, 空气温度、平均辐射温度、辐射温度不对称性、空气流速和湿度的测量精度也取决于其他变量的影响。因此, 表2中规定的精度应符合表3中规定的环境条件。

表 3 测定传感器时间常数的标准环境条件

| 传感器响应时间的测量 | 标准环境物理量         |                 |                |                |
|------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|            | t <sub>a</sub>  | t <sub>r</sub>  | p <sub>a</sub> | 0 <sub>a</sub> |
| 空气温度       |                 | =t <sub>a</sub> | 任意             | <0.15 m/s      |
| 平均辐射温度     | =t <sub>r</sub> |                 | 任意             | <0.15 m/s      |
| 绝对湿度       | =20℃            | =t <sub>a</sub> |                | 根据测量方法确定       |
| 空气流速       | =20℃            | =t              | 任意             |                |
| 平面辐射温度     | =20℃            | =t <sub>a</sub> | 任意             | <0.15 m/s      |
| 表面温度       | =20℃            | =t <sub>a</sub> | 任意             | <0.15 m/s      |

#### 4.2.2 多参数集成测量仪器的特性

任何集成多个变量测量的测量仪器, 其测量间隔、响应时间和精度都应等于或优于相应的单个

变量。

## 5 测量方法要求

### 5.1 一般原则

测量环境物理特性的方法应考虑到这些物理量在空间和时间上的变化。

热环境可能随水平位置而变化，所以需要考虑到每个人在不同地点工作的时长。热环境也可能在垂直方向上有所变化，详见5.2。

如果要测量操作温度，参考附录G给出的测量方法。

### 5.2 与物体周围空间物理量变化有关的要求

如果在特定时刻，认为空气温度、辐射、空气流速和湿度在对象周围几乎是均匀的，那么从生物气候的观点来看，该环境可以被认为是“同质的”。也就是说，当这些物理量与它们作为位置平均值计算的空间平均数值之间的偏差不超过测量精度(表2中所要求的)乘以系数X（在表4中列出）得到的数值。这种情况在空气温度、空气流速和湿度测量时比较常见，但在辐射温度测量时不常见。

**表4 同质和稳态环境的标准**

| 物理量                                             | C类(舒适)<br>系数X | S类(热应激)<br>系数X |
|-------------------------------------------------|---------------|----------------|
| 空气温度                                            | 3             | 4              |
| 平均辐射温度                                          | 2             | 2              |
| 辐射温度不对称性                                        | 2             | 3              |
| 空气平均流速                                          | 2             | 3              |
| 蒸汽压力                                            | 2             | 3              |
| 各单项量与其平均值之间的偏差应小于通过本表中的适当因子X乘以所需测量精度(表2)所得到的偏差。 |               |                |

当环境过于复杂时，应在被试者或其周围的几个位置测量物理量，并考虑所获得的部分结果，以确定在评估舒适度或热应激时要考虑的量的平均值。结合以前对于工作场所或与之类似的场所热应激的研究分析，以确定某些物理量是否以均匀的方式分布。通常情况下，如果房间或工作地点环境条件不易确定，则只能在选定的有限区域内考虑舒适性或热应激指标。如果数据解释存在争议，则以推测环境异质性的测量值作为参考。

表5根据所考虑的环境和测量规格类型，给出了用于测量这些物理量平均值的基本量和加权系数。

**表 5 环境物理量的测量高度**

| 传感器位置 | 计算平均值测量的加权系数 |    |      |    | 推荐高度(仅供参考) |       |
|-------|--------------|----|------|----|------------|-------|
|       | 同质环境         |    | 异质环境 |    | 坐姿         | 站立    |
|       | C类           | S类 | C类   | S类 |            |       |
| 头部    |              |    | 1    | 1  | 1.1 m      | 1.7 m |
| 腹部    | 1            | 1  | 1    | 2  | 0.6 m      | 1.1 m |
| 踝关节   |              |    | 1    | 1  | 0.1 m      | 0.1 m |

导出物理量应根据表5中提供的信息来选择。平面辐射温度、平均辐射温度和绝对湿度通常仅在中心位置测量，此时，应参照确定应力指数或热舒适指数的通用标准，并优先于本标准。

不同的传感器应放置在表5所示的人体正常进行活动的高度。当不可能中断正在进行的活动时，有必要将传感器置于与人体所处的位置大致相同的区域(在结果中应该提及该测量细节)。

### 5.3 与物理量随时间变化有关的要求

人体周围的物理量可能随时间的变化而变化，主要由以下两个原因造成：

- a) 由于给定的活动，物理量可能随着外部事件的变化而变化，例如伴随着工业制造活动过程；
- b) 由于不同环境中人体的移动(例如，靠近机器的温暖环境和舒适的休息环境)，物理量也会发生变化。

当用于描述暴露水平的物理量实际上与时间无关时，就认为环境相对于对象是静止的，例如，当这些参数的波动相对于平均时间值不超过所需测量精度(表2中所要求的)乘以相应因子(表4中列出的)而获得的值时，就可以认为是相对静止的。

需要注意的是，用来描述热量暴露水平(新陈代谢、能量效率、服装热阻)的其他量也可以根据其随时间变化情况而定。

当一个环境不能被认为是与对象相对静止时，应该注意到其物理量的主要变化是时间的函数(用于本系列的其他标准中，以便确定总体舒适度或热应激指数)。数据的测量时间和解释将取决于所使用的舒适度或热应激指数。此信息应参考相应标准。

## 附录 A (资料性附录) 空气温度的测量

### A.1 概述

确定人体水平对流传热时，应当考虑空气温度。虽然通常认为这个量的测量很简单，但是如果不采取一些预防措施，实际上可能会导致较大的误差。

### A.2 温度测量原则

通过测量某些物理量的连续函数来获得温度：固体长度、液体体积、电阻、电动势。

无论测量到的物理量如何，传感器只能测量其自身的温度，而且该温度可能与要测量的流体（例如空气）的温度不同。

### A.3 使用温度传感器时应采取的预防措施

#### A.3.1 减少辐射的影响

应注意避免探头受到来自邻近热源的辐射，因为在这种情况下测量的温度不是空气的实际温度，而是空气温度和平均辐射温度之间的温度中间值。

如下所示的方法可以减少各种辐射对探头的影响：

- a) 减少传感器的发射系数，当传感器由金属制成时使用抛光的传感器，或者当传感器为绝缘类型时使用反射涂料覆盖的传感器。
- b) 减少传感器和相邻墙壁之间的温差。由于不可能改变外壳壁面的温度，所以在传感器和壁面之间设置一个或多个反射屏。因此，将传感器附近空气“视为”一个壁面，其辐射温度随着反射屏数量的增加逐渐接近传感器的温度。

反射屏实际上可以由薄的（0.1 mm 或 0.2 mm）反射金属片（例如铝）制成。当反射屏单独使用时，如果没有强制通风，最内侧的屏应与传感器隔开一个足够大的空间，使空气能够通过自然对流在室内循环。

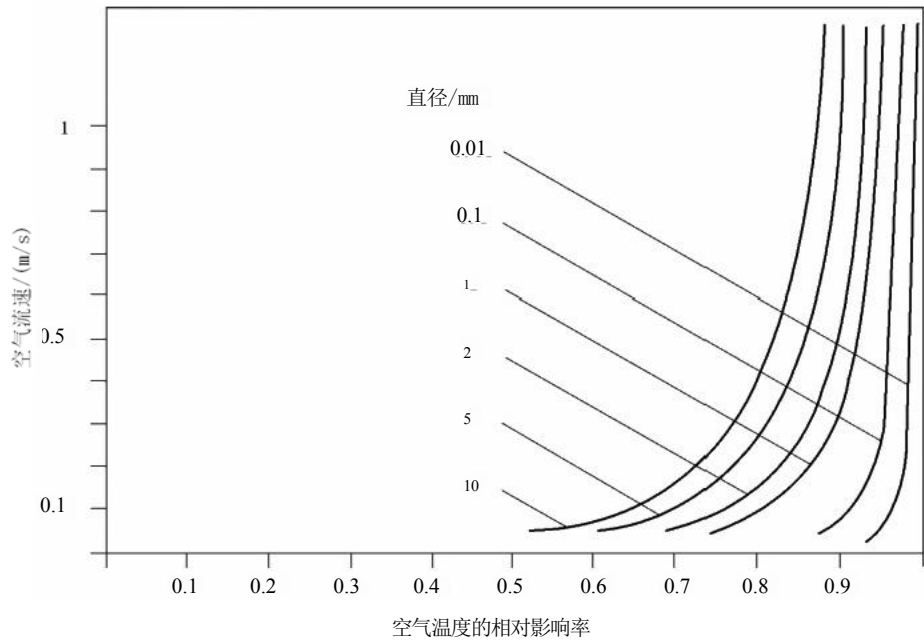
- c) 通过强制通风（机械式或电动风机）增加传感器周围空气流速以及减小传感器尺寸（热敏电阻、热电偶）来提高传感器的对流换热系数。

某些设备如果同时使用上述三种保护手段，可以使得测量误差较小。

图A.1 显示了空气速度和传感器尺寸对未屏蔽辐射情况下空气温度测试结果的相对影响规律。测量的温度可以表示为  $X \times t_a + (1-X) \times t_r$ ，其中  $X$  是空气温度的相对影响。图A.1 中表面传感器尺寸（直径）和空气速度均对测试结果有显著影响。该图基于球体的热交换计算（参见附录B）。计算中假定传感器的发射率为 0.95。

例如：假如传感器直径为 1 mm，空气流速为 0.15 m/s，传感器的温度 =  $0.85t_a + 0.15t_r$ 。

该图仅用于提供信息，不应用于纠正测量。



图A.1 不同风速和不同传感器直径对空气温度测量的相对影响(小直径)

### A.3.2 传感器的热惰性

放置在特定环境中的温度计不会立即显示空气温度，需要一段时间才能达到平衡。测量应该在至少等于1.5倍于传感器响应时间之后进行读数。

下列情况温度计将会响应得更快：

- 温度传感器越小、越轻，其比热容越低。
- 与环境的热交换越好。在传感器的水平位置上通过增加对流传热系数可以提高温度计的响应速度。

### A.4 温度传感器类型

- a) 膨胀式温度计：
  - 1) 液体膨胀温度计(水银温度计)；
  - 2) 固体膨胀温度计。
- b) 电子温度计：
  - 1) 可变电阻温度计：
    - 铂电阻；
    - 热敏电阻。
  - 2) 基于产生电动势的温度计(热电偶)。
- c) 压力温度计(液体压力随温度变化)。

## 附录 B

### (资料性附录)

### 平均辐射温度的测量

#### B.1 概述

人体所接收或失去的净辐射热量是其暴露部位与周围各种热源交换的所有辐射换热量的代数和。知道发射源尺寸、位置和热特性(表面温度和发射率)以及人体暴露部分和衣服部分的面积,就能够对各个辐射换热量进行计算。然而,一旦辐射热源的数量很多或形状复杂时,这种方法就会变得复杂和耗时。

本附录的目的是:

- 描述一种通过测量黑球表面温度、球体外侧空气温度和空气流速以确定平均辐射温度的方法;
- 归纳其他测量平均辐射温度的方法;
- 指出用角系数计算平均辐射温度的原理。

黑球温度计在本附录中用作物理量测量(平均辐射温度)的工具。

#### B.2 使用黑球温度计测量平均辐射温度

##### B.2.1 黑球温度计

黑球温度计包含一个黑色的球体,球体中央放置一个温度传感器,该传感器可以是如同水银温度计的玻璃泡、热电偶或铂电阻等。

黑球理论上可以具有任何直径,但是用于计算平均辐射温度的方法取决于球体的直径,因此使用这些公式时通常推荐使用直径为0.15 m 的黑球。

应该注意的是,球体的直径越小,空气温度和空气速度的影响越大,从而导致平均辐射温度的测量精度降低。

为了使球体的外表面吸收外界壁面的辐射,球体的表面应当通过电化学涂层,或者至少要涂上一层亚光黑漆。

##### B.2.2 测量原理

黑色球体应放置在要测量平均辐射温度 $T_r$ 的实际腔体中。由于来自空间内不同热源的辐射以及在对流交换的影响下,球体在热交换的作用下逐渐趋于热平衡。

根据热平衡时的球体温度可以确定 $T_r$ 。

然后,置于球体内部的温度传感器测量平均辐射温度。实际上,球体内表面(薄的)的温度和球体外表面(封闭空间)的温度几乎等于球体外表面的平均温度。

**注:**在本标准后续条款中,球体表面温度和放置在其内部的传感器温度表达式是相同的。

球体与环境之间的热交换平衡由方程给出:

$$q_r + q_c = 0 \quad \dots\dots\dots(B.1)$$

式中:

$q_r$ ——外界壁面与球体之间的辐射热交换量,单位为瓦特每平方米( $W/m^2$ );

$q_c$ ——空气与球体之间的对流热交换量,单位为瓦特每平方米( $W/m^2$ )。

外界壁面与球体之间的辐射传热，通过平均辐射温度表示如下：

$$q_r = \epsilon_{\text{eg}} \sigma (T_4^4 - T_g^4) \quad \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

式中：

$\epsilon_{\text{eg}}$ ——黑色球体的发射率(无量纲)；

$\sigma$ ——斯忒藩-玻耳兹曼常数，单位为瓦特每平方米四次方开尔文  
 $[(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))]$ ,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

$T_4$ ——平均辐射温度，单位为开尔文(K)；

$T_g$ ——黑球温度，单位为开尔文(K)。

空气在外壳和球体之间的对流热交换量通过式(B.3) 给出：

$$q_c = h_{\text{cg}} (T_a - T_g) \quad \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

式中：

$h_{\text{cg}}$ ——黑球表面对流换热系数，单位为瓦特每平方米开尔文 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 。

自然对流情况下：

$$h_{\text{cn}} = 1.4 \left( \frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}$$

强制对流情况下：

$$h_{\text{ce}} = 6.3 \frac{v_a^{0.5}}{D^{0.4}}$$

式中：

$D$ ——球体直径，单位为米(m)；

$v_a$ ——球体表面空气流速，单位为米每秒(m/s)。

在C类环境中，采用能够给出最大值的对流换热系数。在S类环境中，可以采用与之前相同的方法，或者更简单地，直接采用强制对流的传热系数。

黑球与环境的热平衡方程表示如下：

$$\epsilon_{\text{eg}} \sigma (T_4^4 - T_g^4) + h_{\text{cg}} (T_a - T_g) = 0 \quad \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

平均辐射温度由下式给出：

$$\overline{T_r} = 4 \sqrt{T_g^4 + \frac{h_{\text{cg}}}{\epsilon_{\text{eg}} \sigma} (T_g - T_a)} \quad \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

通过自然对流，可以得到：

$$\overline{T_r} = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{0.25 \times 10^8}{\epsilon_{\text{eg}}} \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad \dots\dots (\text{B.6})$$

在标准球体 $D=0.15$  m,  $\epsilon_{\text{eg}}=0.95$  (亚光黑漆) 的情况下式(B.6) 变为：

$$t_2 = [(t_g + 273)^4 + 0.4 \times 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \times (t_g - t_a)]^{1/4} - 273 \quad \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

通过强制对流，可以得到：

$$\overline{T_r} = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v_a^{0.5}}{\epsilon_{\text{eg}} \times D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

在标准球体情况下：

$$t_2 = [(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times v_a^{0.6} (t_g - t_a)]^{1/4} - 273 \quad \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

实际上，这是最常用的计算平均辐射温度的表达式。它仅适用于标准球体的强制对流。

图 B.1 显示了球体上空气温度和平均辐射温度的相对影响。

例如：

对于一个球体直径为100 mm，空气流速为0.35 m/s，球体温度为：

$$t_g = 0.6 t_a + 0.4 t_r$$

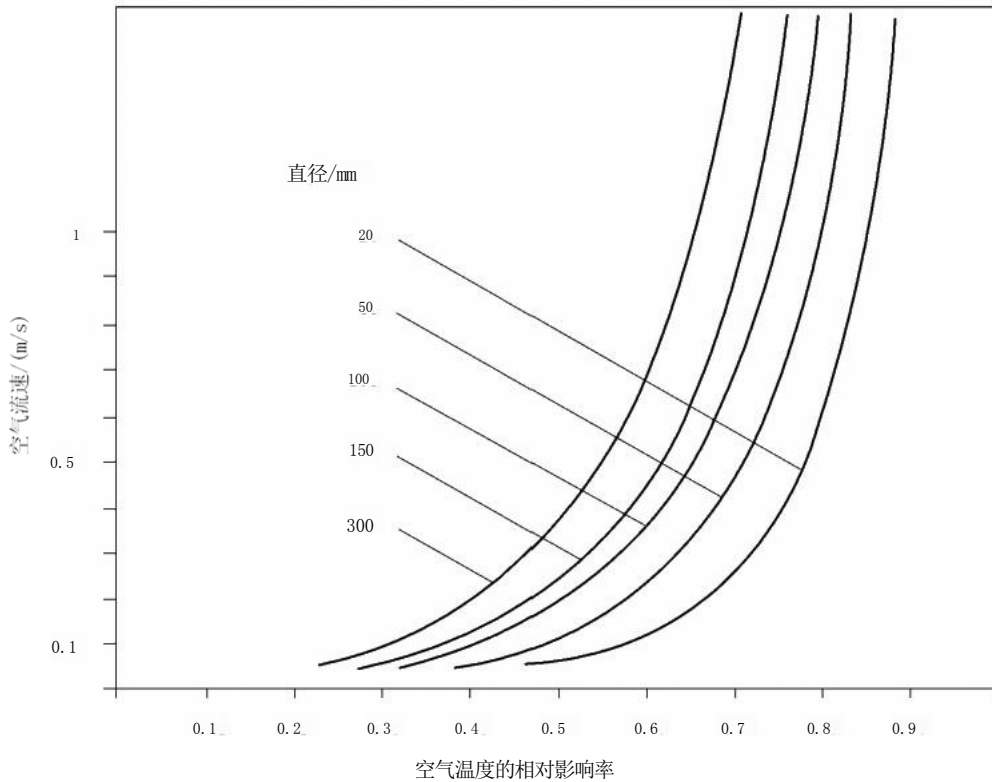


图 B.1 不同风速和球体直径下，空气温度和平均辐射温度对球体温度的相对影响

例如：

在使用标准黑球温度计获得环境参数如下：

$t_g=55\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

$v_a=0.3\text{ m/s}$

球体表面的交换系数计算如下：

——自然对流情况下：

$$h_{\text{自}} = 1.4 \left( \frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1.4 \left( \frac{55 - 30}{0.15} \right)^{0.25} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

— 强制对流情况下：

$$h_{\text{强}} = 6.3 \frac{v_a^{0.5}}{D^{0.4}} = 6.3 \times \frac{(0.3)^{0.5}}{(0.15)^{0.4}} = 6.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

因此将使用强制对流的交换系数。

根据式 (B. 9) 计算平均辐射温度：

$$t_2 = [(55+273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times v_a - 6(55-30)]^{1/4} - 273$$

$t_2=74.7\text{ }^{\circ}\text{C}$

如果使用具有以下特征的黑球进行测量：

$D=0.1\text{ m}$

$E_g=0.95$

黑球测量温度为  $53.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

然后根据式 (B.8) 计算平均辐射温度：

$$\bar{t}_r = \left[ (53.2 + 273)^4 + \frac{1.1 \times (0.3^{0.5})}{0.95 \times (0.10^{0.4})} \times (53.2 - 30) \right]^{1/4} - 273 = 74.7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

由此得到了图 B.1 中考虑环境的平均辐射温度特性曲线。

**B.2.3 使用黑球温度计时应采取的预防措施**

**B.2.3.1** 由于外部热环境的辐射经常是热应激的主要因素之一，因此不正确的平均辐射温度测定可能会导致在这个应激的整体评估中有很大误差。

**B.2.3.2** 在非均匀辐射的情况下，有必要使用三个黑球温度计。当辐射不均匀时，测量单个点上的黑球温度并不代表被试物体接收的总辐射场。因此，需将黑色地球仪放置在本标准中规定的高度(头部、腹部、踝关节)，并且使得每个黑球接收到的辐射非常接近位于同一水平面上的身体该部分接收到的辐射。按照本标准定义的系数，对指定水平的测量结果的平均值，得到平均辐射温度。

例如：

位于人的头部，腹部和脚踝处的三个黑球温度计测量值分别用以下三个平均辐射温度表示：

$$tr_1 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 50^{\circ}\text{C}$$

$$ts = 40^{\circ}\text{C}$$

在辐射和高温应激方面，环境是不均匀的。平均辐射温度应通过表4的加权系数来计算，如下所示：

$$t_r = \frac{1 \times 25 + 2 \times 50 + 1 \times 40}{4} = 41 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

但是，如果仅使用放置在腹部水平上的单个黑球仪进行测量，则测量误差约为9℃。

**B.2.3.3** 根据黑球的物理特性和环境条件，黑球温度计的响应时间约为20 min~30 min。连续读取此温度将使热平衡更容易记录。由于其较高的热惰性，黑球温度计不能用来确定迅速变化的环境的辐射温度。

**B.2.3.4** 使用黑球计测量平均辐射温度的准确性在很大程度上取决于环境的其他特征值。在每一种情况下，都应进行检查，以确定所取得的精度是否符合本标准要求的值，如果不满足，说明实际准确度。

**B.2.3.5** 使用黑球温度计来评估人体接受的平均辐射温度是一个近似的方法，因为人体与黑球的形状不同。特别是相对于站着或坐着的人来说，通过黑球温度计测出的来自天花板或地板的辐射会偏高。

投影面积系数如表B.1 所示的椭球体可以认为更接近人体的形状。表B.1 显示了人体，椭圆体和球体的投影面积系数。预计面积系数为 $A_p/A_r$ ，其中 $A_p$  是沿一个方向投影的面积， $A_r$  是总辐射面积。这个系数与人体或传感器的形状有关，并表明来自不同方向的辐射的相对重要性。

椭球轴的倾角取决于人体的位置：站立时轴垂直；坐姿时轴倾斜30°；平卧时轴水平。

**B.2.3.6** 在暴露于短波辐射(例如太阳辐射)的情况下使用黑球温度计需要在球体上使用涂层(例如中灰色)，对于短波辐射具有与外表面大致相同的吸收率，使得其对于短波辐射的吸收率与穿衣人员的外表面大致相同(除了测量WBGT 时，不同量之间的权重中已经考虑了这一因素)。对于长波辐射，涂料的发射率应该约为0.95。另一种方法是使用黑球温度计，并考虑到穿着衣服的吸收率来计算平均辐射温度。

**表B.1 投影面积系数**

| 人体姿态 | 传感器类型 | 上/下  | 左/右  | 前/后  |
|------|-------|------|------|------|
| 站立   | 人体    | 0.08 | 0.23 | 0.35 |
|      | 椭球体   | 0.08 | 0.28 | 0.25 |
|      | 球体    | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| 坐姿   | 人体    | 0.18 | 0.22 | 0.30 |
|      | 椭球体   | 0.18 | 0.22 | 0.28 |
|      | 球体    | 0.25 | 0.25 | 0.25 |



### B.3 其他测量方法

#### B.3.1 双球辐射计

在这种方法中，使用具有不同发射率的两个球体(一个黑色的和一个抛光的)。当两个球体被加热到相同的温度时，它们的对流换热损失相同。由于黑球的发射率高于抛光球，因此两个球体的热量供应存在差异，这个差异就是热辐射的量。

为了估计平均辐射温度，需要测试传感器的发射率和温度。

平均辐射温度由以下等式计算：

$$\overline{T_r}^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma(\epsilon_b - \epsilon_p)} \quad \text{.....(B.10)}$$

式中：

$T_r$ —— 平均辐射温度，单位为开尔文(K)；

$T_s$ —— 传感器温度，单位为开尔文(K)；

$P_p$ —— 抛光球体的热供应量，单位为瓦特每平方米(W/m<sup>2</sup>)；

$P_b$ —— 黑色球体的热供应量，单位为瓦特每平方米(W/m<sup>2</sup>)；

$\epsilon_p$ —— 抛光球体的发射率；

$\epsilon_b$ —— 黑色球体的发射率；

$\sigma$  —— 斯忒藩-玻耳兹曼常数，单位为瓦特每平方米四次方开尔文  
[W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]， $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)。

可以使用更接近人体形状的椭圆形传感器来代替圆球体。

#### B.3.2 恒定空气温度传感器

采用这种测试方法时，要求把传感器(球体，椭球体)温度控制在与周围空气温度相同的条件下，测试时没有对流换热损失，传感器的加热量(冷却量)等于辐射热损失(或增益)。

平均辐射温度由以下等式计算：

$$\overline{T_r}^4 = T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma \epsilon_s} \quad \text{.....(B.11)}$$

式中：

$T_r$ —— 平均辐射温度，单位为开尔文(K)；

$T_s$ —— 传感器温度，单位为开尔文(K)；

$P_s$  —— 传感器的必要加热量(冷却量)，单位为瓦特每平方米(W/m<sup>2</sup>)；

$\epsilon_s$  —— 传感器的发射率；

$\sigma$  —— 斯忒藩-玻耳兹曼常数，单位为瓦特每平方米四次方开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]。

### B.4 平均辐射温度的计算方法

#### B.4.1 根据周围表面的温度计算

平均辐射温度可以用如下参数计算：

—— 周围表面温度；

—— 人与周围表面之间的角系数，即周围各表面的形状、大小，以及与人有关的相对位置的函数。由于大多数建筑材料具有高发射率( $\epsilon$ )，所以可以忽视反射。即假定房间中的所有表面都是黑体。

然后使用式(B.12) 计算:

$$T_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-N} \quad \text{.....(B.12)}$$

式中:

$T_r$  ——平均辐射温度, 单位为开尔文(K);

$T_n$  ——表面N 的温度, 单位为开尔文(K);

$F_{p-N}$  ——人体与表面N 间的角系数。

由于角系数的总和为1, 因此平均辐射温度的四次方将被视为等于周围表面温度四次方根据各个角系数的大小加权的平均值。

在矩形表面的情况下, 可以根据图 B.2~ 图 B.5 估算角系数( $F_{p-n}$ )。角系数也可以根据图 B.6 中的公式计算, 其中AC、BC 分别为按图B.2~图 B.5 的  $a/c$ 、 $b/c$  计算。图B.2~ 图 B.5 假设表面和人体之间有一定的距离。对于靠近人的地板或其他表面, 利用图B. 2~图 B. 5 计算这些表面的角度因子会偏小。但对于典型的室内环境, 对平均辐射温度的影响将小于1 K。

如果外壳壁面的表面只有相对较小的温度差, 式(B.12) 可以简化为以下线性形式:

$$T_r = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_N F_{p-N} \quad \text{.....(B.13)}$$

换言之, 平均辐射温度被计算为根据各个角系数的大小加权的周围温度的平均值。式 (B. 13) 计算出的平均辐射温度总是比式 (B. 12) 略低, 但在大多数情况下差异很小。例如, 如果环境的一半( $F_{p-N} = 0.5$ ) 的温度比另一半高10 K, 则根据式(B.12) 和 式(B.13) 计算的平均辐射温度之间的差异只有0.2℃。但是, 如果表面之间的温度存在较大差异, 则使用式(B.13) 的误差可能相当大。如果上述示例中的温差为100 K, 则根据式(B.13) 计算的平均辐射温度约低10 K。

#### B.4.2 根据平面辐射温度计算

平均辐射温度可以根据下述参数计算:

——六个方向的平面辐射温度 $t_p$ (参见附录C);

——人体在六个方向上的投影面积系数。

在表B.1 中给出了向上、向下、向左、向右、向前、向后六个方向的投影面积系数。

然后通过将六个方向平面辐射温度的测量值乘以表 B.1 中给出的相应投影面积系数, 将得到的数据相加再除以投影面积因子之和, 得到平均辐射温度。

对于坐姿下的人体:

$$t_r = \frac{0.18(t_{p[上]} + t_{p[下]}) + 0.22(t_{p[右]} + t_{p[左]}) + 0.30(t_{p[前]} + t_{p[后]})}{2(0.18 + 0.22 + 0.30)}$$

对于站立下的人体:

$$t_r = \frac{0.08(t_{p[上]} + t_{p[下]}) + 0.23(t_{p[右]} + t_{p[左]}) + 0.35(t_{p[前]} + t_{p[后]})}{2(0.08 + 0.23 + 0.35)}$$

式中:

$t_r$  ——平均辐射温度, 单位为开尔文(K);

$t_{pe}$  ——平面辐射温度, 单位为开尔文(K)。

如果人的方向不固定, 则使用右/左和前/后投影面积系数的平均值。计算公式可以简化为:

坐姿 $t_r = 0.13(t_{p[上]} + t_{p[下]}) + 0.185(t_{p[右]} + t_{p[左]} + t_{pr[前]} + t_{pr[后]})$

站立 $t_r = 0.06(t_{p[上]} + t_{p[下]}) + 0.220(t_{p[右]} + t_{p[左]} + t_{p[前]} + t_{p[后]})$

#### B.5 其他辐射热流量

##### B.5.1 总则

有些仪器可以测量辐射热流, 以瓦特每平方米计。下文介绍了如何将其转换为平均辐射温度或平

面辐射温度。为了通过确定辐射源平面描述钢铁、玻璃工业中及冷库中的气体加热系统和建筑物中的太阳辐射等场景下的辐射热流，需使用定向辐射量(单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^2$ )来测量辐射热流量。

### B.5.2 绝对辐射热流

绝对辐射热流 $E_s$ 是表示辐射能量的基本物理量，表面发射热能的速率取决于它的绝对温度。绝对辐射热流定义为单位面积沿一个方向发射的总能量。

$$E_{\text{abs}} = \sigma \epsilon_s T^4$$

式中：

$E_s$ ——表面的发射率(无量纲数)；

$\sigma$ ——斯特藩-玻尔兹曼常数，单位为瓦特每平方米四次方开尔文  
 $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)]$ ,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ；

$T$ ——表面温度，单位为开尔文(K)。

### B.5.3 有效辐射热流

常用有效辐射热流来测量和描述人体在给定的封闭环境中接收到的辐射，以瓦特每平方米表示( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

有效辐射热流定义为外壳墙壁与人体之间的辐射换热。体表平均温度为 $32^\circ\text{C}$ ，人体发射率为0.95。利用这些值，可以计算出平均辐射温度：

$$t_r = (t_b + 273)(1 + 2.146 \times 10^{-3} \times E) 0.25 \quad \text{—273}$$

式中：

$t_r$ ——平均辐射温度，单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ )；

$t_b$ ——参考体温，单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ )；

$E_e$ ——在六个方向上测量的平均有效辐射热流量，单位为瓦特每平方米( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

通过上式，有效的辐射流量也可以转换成体表温度。与此类似，平面辐射温度 $t_{pr}$ 也可以从单向测量的有效辐射热流计算出来：

$$t_{pr} = (t_b + 273)(1 + 2.146 \times 10^{-3} \times E_e) 0.25 \quad \text{—273}$$

式中：

$t_{pe}$ ——平面辐射温度，单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ )；

$t_b$ ——参考体温，单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ )；

$E_e$ ——有效辐射热流量，单位为瓦特每平方米( $\text{W}/\text{m}^2$ )，单向测量。

如果已知平均辐射温度或平面辐射温度，则可以使用上述等式来计算相应的有效辐射热流量。

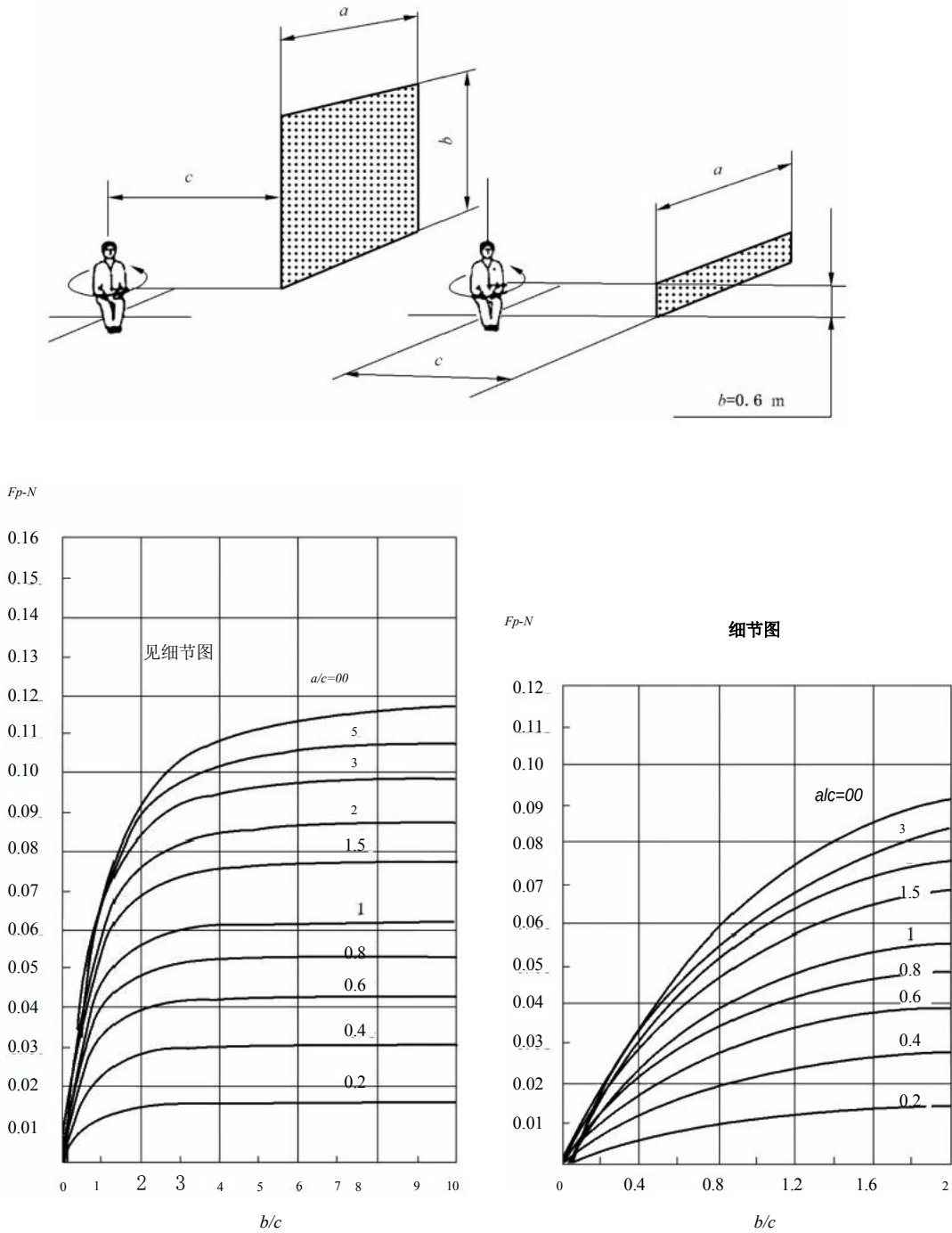


图 B.2 当人体围绕垂直轴旋转时，坐着的人与垂直矩形（高于或低于他的中心）之间的角系数的平均值  
（在知道人体位置而不知道人体朝向时使用）

例如：  
 $a=4\text{ m}$ ; $b=3\text{ m}$ ; $c=5\text{ m}$ ; $b/c=0.6$ ; $a/c=0.8$ ;  
 $F_{p-a}=0.029$ 。

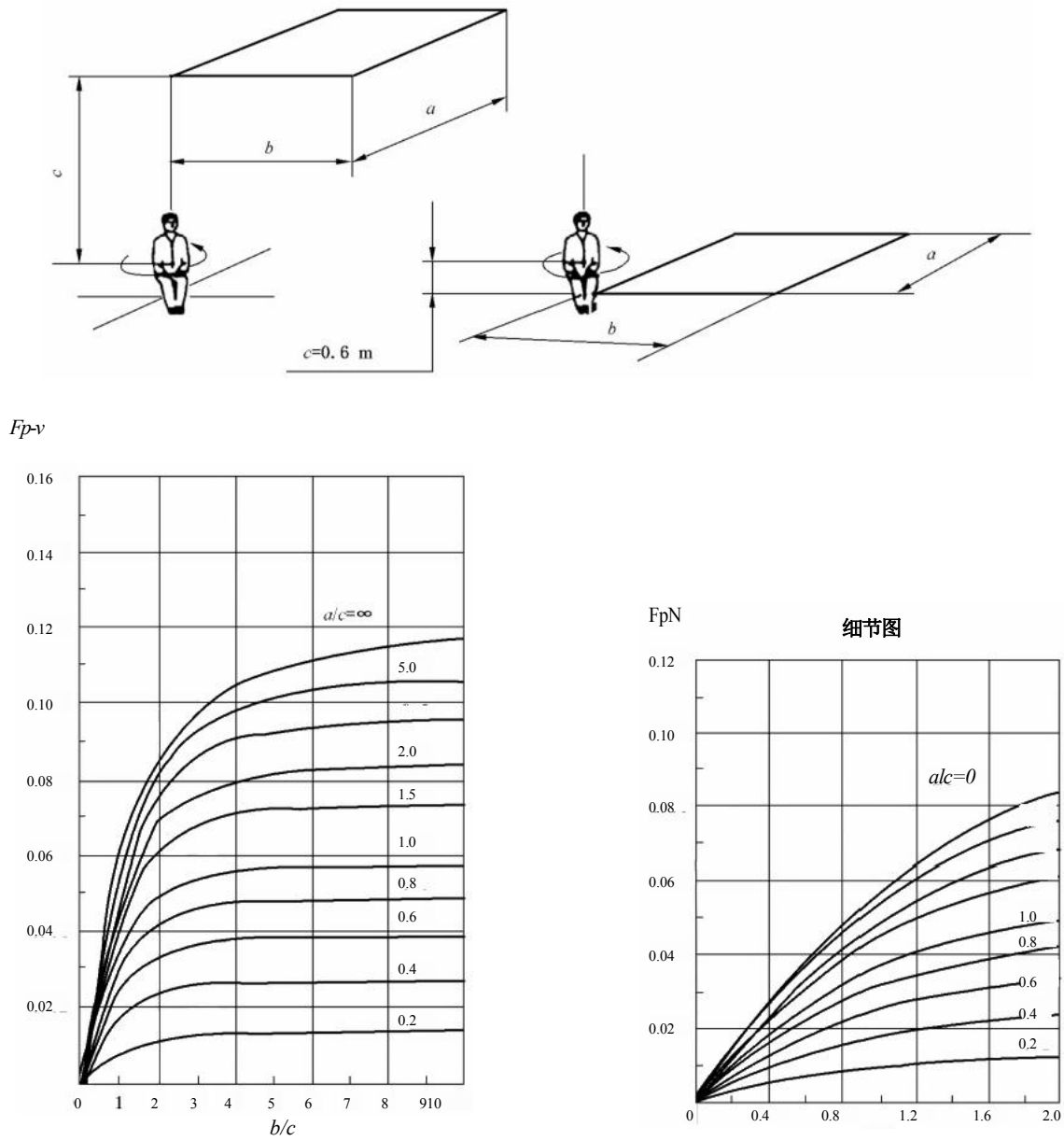


图 B.3 当人体围绕垂直轴旋转时,坐着的人与水平矩形(在天花板或地板上)之间的角系数的平均值  
(在知道人体位置而不知道人体朝向时使用)

例如:

$a=3\text{ m}$ ;  $b=6\text{ m}$ ;  $c=2\text{ m}$ ;  $b/c=3.0$ ;  $a/c=1.5$ ;

$F_{p-a}=0.067$ 。

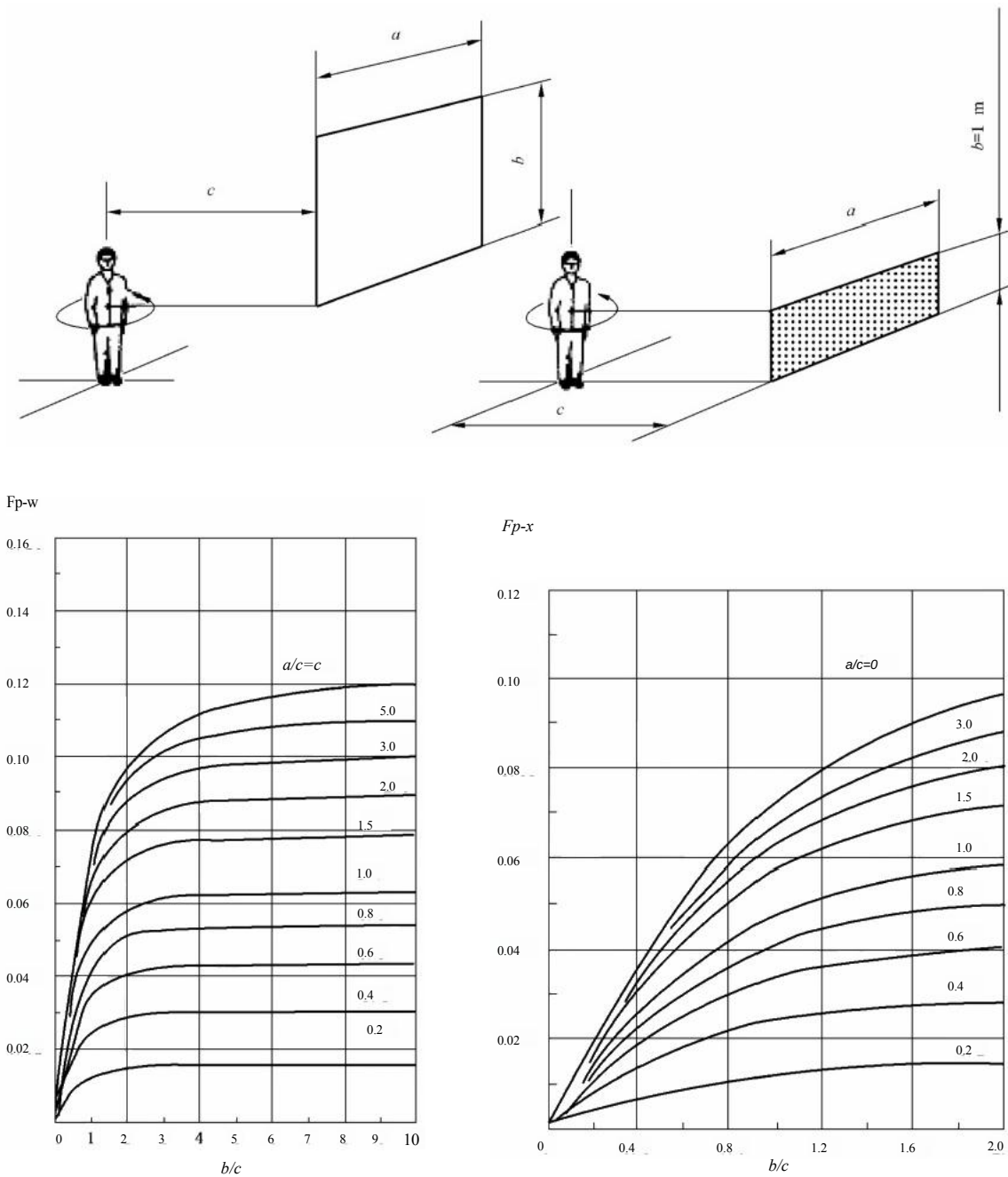


图 B.4 当人体围绕垂直轴旋转时，站立的人与垂直矩形(高于或低于他的中心)之间的角度系数的平均值(在知道人体位置而不知道人体朝向时使用)

例如:

$a=4.5$      $m; b=2.0$      $m; c=3.0$      $m; b/c=0.67; a/c=1.5;$

$Fp-a=0.047$ 。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/876014152225010153>