

[带电作业]

超特高压带电作业人员的 热舒适性研究

文/国网金华供电公司 秦威南 方玉群 潜力群 赵俊杰 蒋卫东 陈晨

通过对作业人员体表典型区域的温度测量，找到需要降温的重点区域。在此基础上，建立人体传热学模型，分析附带强制对流换热风扇的微循环系统对于人体穿着屏蔽服后的降温效果。然后通过引入热舒适评价指标预测平均投票数PMV和预测不满意百分数PPD，得到人体穿着降温屏蔽服后的热舒适标准评价体系。

带电作业用屏蔽服具有屏蔽高压电场的作用，使等电位作业人员能够安全地进行等电位作业。由于屏蔽服的屏蔽效率高（通常达40~60 dB），其透气性能很差。若在夏天或天气温度较高时穿戴，可能会使作业人员出现不同程度的热应激现象。轻则导致大量出汗和表现力下降，重则导致中暑，甚至威胁到作业人员的生命安全。热舒适系统是一种帮助人类在各种温度环境下获得热舒适的微系统，它将热学微系统与服装相结合，依据环境温度变化自动调节服装内微气候，以保证人体处于热舒适状态，目前已在工业、医疗、航空、体育和民生等领域得到了广泛应用。而针对超特高压带电作业用屏蔽服的热舒适性研究则少有文献报道，实际生产中也有有效的降温手段，致使气温较高时的等电位带电作业开展困难，带电消缺工作受到限制。

本文首先对穿着超特高压屏蔽服作业人员体表典型区域的温度进行测量，分析得到作业人员需要降温的重点区域。在此基础上，从生物传热学的角度出发，基于Pennies生物传热学方程建立人体传热学模型，分析附带强制对流换热风扇的微循环系统对于人体穿着屏蔽服后的降温效果。然后通过引入热舒适评价指标预测平均投票数

（Predicted Mean Vote, PMV）和预测不满意百分数（Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD），得到人体穿着降温屏蔽服后的热舒适标准评价体系。研究结果可为具有降温效果的超特高压带电作业用屏蔽服的设计提供参考。

研究方法

1. 人体的热平衡及散热方程

人体为维持正常的体温，必须使身体产生的热能和散发的热能保持平衡。如果将人看作一个系统，则人与环境的热交换同样遵守热力学平衡定律。因此，可以用热平衡方程来描述人与环境间的热交换，Pennies生物热平衡方程为

$$\rho c = \frac{\partial T(X,t)}{\partial t} = \nabla k \nabla [T(X,t)] + Q_m(X,t) + Q_r(X,t) + \omega_b(X) \rho_b c_b [T_a - T(X,t)]$$

式中， ρ 、 c 、 k 分别为人体组织的密度（ kg/m^3 ）、比热容（ $\text{J/kg}\cdot\text{K}^{-1}$ ）和热导率（ $\text{W/m}\cdot\text{K}^{-1}$ ）； T 为人体组织的温度，K； ω_b 为人体各部位血液灌注率， ml/s ； T_a 为动脉血温度，K； Q_m 为人体组织代谢热量， W/m^3 ； Q_r 为空间加热产生的体积热源强度， W/m^3 ； X 为直角坐标系的3个分量 x 、 y 和 z 。

基金项目：国网浙江省电力有限公司科技项目（5211JH16000D）

人体的散热主要3种：对流、辐射和蒸发，可描述为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T_a - T_f) + \sigma \epsilon(T_a^4 - T_f^4) + Q_e$$

式中， h_c 为人体皮肤表面的对流换热系数， $W/m^2 \cdot K^{-1}$ ； T_a 、 T_f 分别为人体皮肤表面和周围空气的温度，K； ϵ 为人体表面的黑度； σ 为玻尔兹曼常数； Q_e 为人体皮肤表面的水分蒸发热损失度， W/m^2 。

2. 屏蔽服内温升特征及温控需求测试

以人体体表温度作为主要研究的生理指标，研究带电作业人员穿着特高压屏蔽服后热环境对生理参数及热舒适的影响。

测试者共为3人，身高在175~178 cm，体重65~75 kg，测试者身体健康，参加试验前具有良好的睡眠以及饮食，避免激烈运动，严禁试验前吸烟，喝酒。体表温度测量点布置如图1所示。

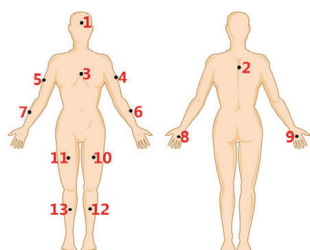


图1 人体体表温度测试点分布图

按照夏季屏蔽服人员的正常穿着方式，直接穿着屏蔽服，进行客观温度测试。测试者在进入测试环境后先适应0.5 h，然后开始测试。在试验过程中一直保持静坐状态，活动量统一，约为1 met（基础代谢产热量约 $50 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ），相当于轻活动量范围。测试人体体表各部位温度，每5 min记录一次数据，受试者测试时间为0.5 h。下表给出了测试的4种工况环境。

表 4种不同测试工况

工况	环境温度/℃	相对湿度/ R_H (%)
1	24	55
2	29	72
3	34	72
4	39	55

统计上述3位测试者的测试结果，得到健康男青年体表温度范围在外界环境温度24℃下为33.32~35.36℃；外界环境温度29℃下为34.13~35.73℃；外界环境温度34℃下为35.67~36.32℃；外界环境温度39℃下为35.69~36.21℃。随着外界环境温度的升高，最高部位与最低部位之差分别为：2.04℃、1.60℃、

0.65℃和0.52℃。可见其温度差随着外界环境的升高在逐渐降低。不同外界环境下的体表平均温度分别为：33.84℃、34.71℃、35.95℃和35.90℃，在外界环境温度为在24~34℃区间，最高温度出现在额头，最低温度出现在小腿。在外界环境为39℃时，最高温度为手背部位，剩下额头、背部、胸部、上臂和小臂温差很小，最低温度为小腿部位，其次为大腿。

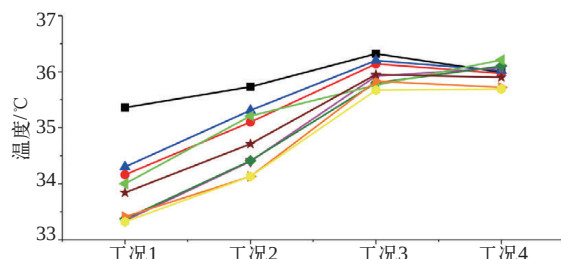


图2 不同工况下的体表各部位温度分布

根据被测试者描述，在工况2时身体感到有些许偏热，在工况3、4时感到很热，这说明带电作业人员穿着屏蔽服在天气温度较高时应当采取降温措施，特别是要对人体的额头和胸背部降温。

3. 人体降温体表—降温屏蔽服—外界环境的传热简化模型

针对带电作业人员作业时感到燥热的情况，在屏蔽服内使用附带强制对流换热风扇，此时的传热过程更加复杂。因此在满足工程实际要求的情况下，根据人体皮肤、服装和环境的传热特点，对系统进行热分析时做出以下假设：①取降温屏蔽服的人体体表为研究对象；②由于环境温度比较均匀，假设降温屏蔽服覆盖人体体表部分的温度差别不大，且降温屏蔽服具有同一初始温度；③假设降温屏蔽服材料与皮肤紧密接触，接触热阻可忽略；④假设图1中由环境经降温屏蔽服至人体的传热热流沿垂直于体表的方向进行；⑤假设皮肤及降温屏蔽服材料的物性参数为常数。图3所示即为“人体降温体表—降温屏蔽服—外界环境”的传热过程，图4为带有强迫风循环的降温服。

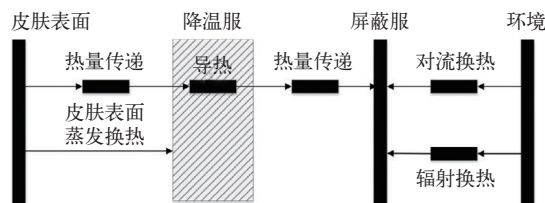


图3 人体体表—屏蔽服—外界环境传热过程



图4 带有强迫风循环的降温服

4. 人体热舒适度评价指标

首先给出预测平均投票数PMV, 该指标表示大多数人对热环境的平均投票值, 共有7级感觉, 即-3 (冷), -2 (凉), -1 (稍凉), 0 (中性), 1 (稍暖), 2 (暖), 3 (热)。由于PMV的最初试验对象是西方国家的1 396位受试者, Fanger教授在文献中提到, 针对不同国家和气候, 应分别乘以0.5~1.0的修正系数, 对于中国, 这一系数应为0.7, 因此得到适应中国地区的PMV指标。

计算结果与分析

首先通过人体降温体表-降温屏蔽服-外界环境的传热简化模型计算得到穿着降温马甲时人体表面的温度分布。然后以此结果作为激励源, 进一步建立人体三维模型计算人体的整体温度分布。最后结合PMV和PPD评价指标对带有强迫风循环的降温屏蔽服进行热舒适性评价。

1. 带有强迫风循环降温时的体表温度

在背部模型上加入了16个简易的风扇阵列模型, 用以讨论背部加入风冷的实际降温效果。几何模型如图5所示, 以背部某一区域为计算单元, 模型附着有风扇单元。

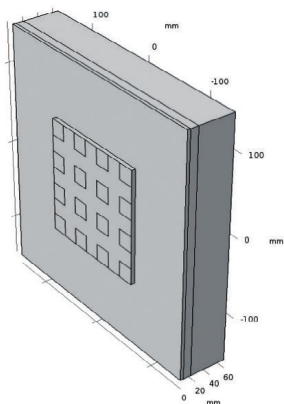


图5 附带风扇的人体背部区域三维简化模型

首先计算不同环境温度下 (20 ℃、25 ℃、30 ℃、35 ℃、40 ℃) 人体穿着特高压带电作业屏蔽服后人体背部组织的整个温度分布, 取肌肉层新陈代谢率为2 100 W/m³, 血液灌注率为

0.000 7 ml/s, 皮肤表面的边界条件设置为对流换热边界条件, 并设定环境条件为自然对流, 换热系数为10 W/(m²·K)。

风扇阵列区域的皮肤表面温度下降比较明显, 计算结果表明从环境温度20 ℃升温至40 ℃时, 其体表温度的舒适度也在逐渐下降, 从图6可以看到当风力越大时, 如50 W/(m²·K), 皮肤表面温度比自然对流状况下降了约2 ℃, 且整个背部组织的温度均有所下降。

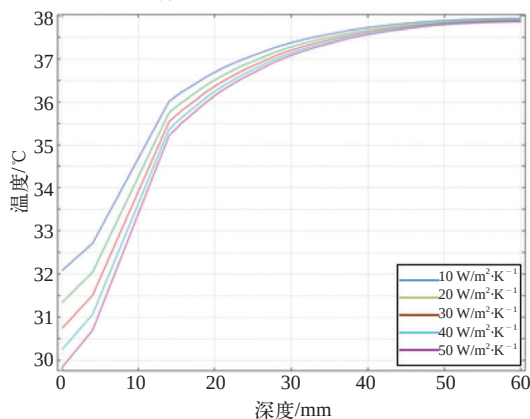


图6 体表温度分布曲线

2. 人体三维温度场计算结果与分析

在带有强迫风循环的体表温度场计算结果基础上, 建立人体三维模型并进行计算, 设置环境温度为30 ℃, 强迫风循环对流换热系数为50 W/(m²·K), 人体温度为37 ℃。人体高1.8 m, 采用有限元计算方法, 网格划分如图7所示。



图7 人体模型网格剖分

计算结果如图8所示。可以看到, 人体内散热点主要集中在胸腹部, 其次为面部, 结果说明散热装置设计为马甲型是合理的。由于穿着带有风扇的降温服, 体表最低温度只有约28 ℃, 而人体最热的胸腹部区域由于采取了降温措施, 也能使人体的热舒适感有所提高。

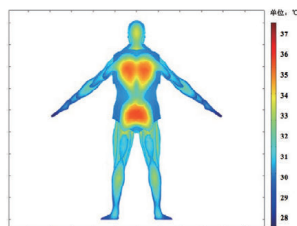


图8 人体温度分布图

3. 人体热舒适度评价

进一步考虑带电作业人员的热舒适度情况，计算人体的PMV预测平均投票数、PPD预测的不满意百分数、服装表面最适宜温度和热舒适系统输出能量结果分别如图9~图12所示。

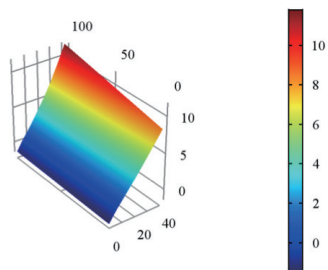


图9 PMV预测平均投票数

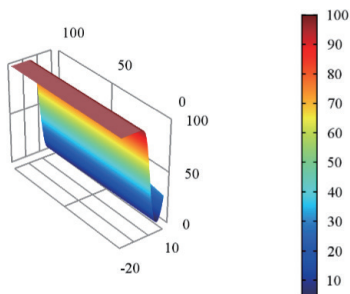


图10 PPD预测的不满意百分数

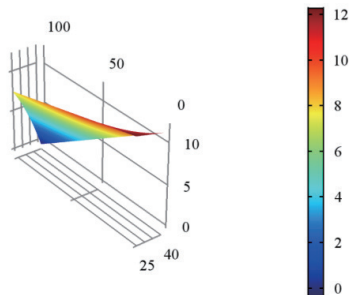


图11 服装表面最适宜温度

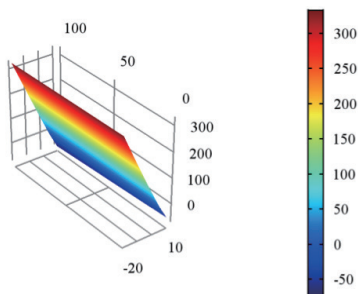


图12 热舒适系统输出能量

得到以下分析结果：

1) 人体对环境温度的变化较为敏感，而人体对相对湿度的要求相对较宽。随着温度的升高，人体的热舒适度随之下降，成线性关系。湿度也

与热舒适度成线性关系，只是其斜率较小，但是随着温度的升高，人体对湿度的敏感性也越来越高，尤其是高温高湿区域，几乎100%的人感觉到不舒服。这是因为高温天气时，人体出汗较多，而湿度越高，越不利于汗液的蒸发，因此人体感觉越不舒服。

2) 当人体的活动状态一定时，即新陈代谢率稳定时，人体感觉最舒适的服装表面温度与环境的温湿度关系不大。即人体感觉舒适时，服装表面温度与体表温度较为接近。

3) 热舒适系统的输出制冷量也分别与环境的温湿度成线性关系，且当人体的活动状态一定时，即新陈代谢率稳定时，各斜率与曲面的斜率关系相同。需要说明的是制冷量在正数区域，即人体感觉“稍凉”的情况，此时热舒适系统应该提供相应的热量，而不是冷量。

结束语

超特高压带电作业人员的热舒适性研究对于保障带电作业人员安全、高效和舒适地开展带电作业有着重要意义。基于Pennes生物传热学方程，在人体背部简化模型基础上建立人体三维数值模型，分析了热舒适系统介入后的屏蔽服内微环境人体能量平衡，并且引入建筑环境中热舒适评价指标PMV、PPD，从而得到人体穿着屏蔽服后的热舒适标准的研究体系，得到以下结论：

1) 采用风扇阵列的方式来对人体进行降温，根据计算结果可知，在夏季使用风扇来对人体进行散热，具有一定的降温效果。如果环境温度进一步提高，则需要进一步完善热舒适系统（例如采用风扇+相变材料的方法）来提供更优化的制冷方案，以使得人体达到热舒适性更好的状态。

2) 夏季时，环境温湿度的变化与PMV均呈现线性关系，当外界环境温度为25~28℃、湿度在20%~80%之间时，人体穿着特高压带电作业屏蔽服感觉比较舒适（ $-1 < PMV < 1$ ， $PPD \leq 10\%$ ）；当环境温度超过28℃时，屏蔽服需要采取降温措施，否则会使作业人员感到闷热、汗流浹背，严重时可能使人员中暑，造成安全事故。

3) 屏蔽服内需要输入的制冷量与环境温度和湿度均成线性关系，各斜率与曲面PMV的斜率关系相同，环境温度越高，需要的制冷量越大。EA

（收稿日期：2018.06.29）

（编辑：朱金凤）