

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209473

# 台式显微仪器的“人仪一体化”作业空间设计原则与评估方法

王 勇<sup>1,2</sup>, 谭久彬<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学建筑学院 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对生物显微镜的使用需求,提出一种台式显微仪器的“人仪一体化”作业空间设计原则。“人仪一体化”的作业空间以操作者为中心,最大程度地提高操作者的作业效率和舒适度,减轻作业疲劳;针对生物显微镜的作业特点及工作路径,设计了 3 种作业空间布局方案;利用 Jack 软件对不同方案进行了任务用时和能耗评价;完成了作业姿态的操作舒适性对比实验,并对颈肩部主要肌肉的表面肌电均方根(RMS)值进行了配对  $T$  检验。结果表明转向一侧的头夹肌及对应一侧的胸锁乳突肌最为敏感、载荷变化较大,其 RMS 的平均变化率分别为 56.4% 和 8.4%,并结合操作者主观评价最终确定了重叠型为最优布局形式。此评估方法验证了“人仪一体化”作业空间设计原则的有效性,可为相关显微仪器设备的作业空间设计起到一定指导作用。

**关键词:**人仪一体化;生物显微镜;作业空间;表面肌电;Jack 仿真

**中图分类号:** TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

## “Human-instrument integration” design principle and assessment method for workstation of desktop microscopic instruments

Wang Yong<sup>1,2</sup>, Tan Jiubin<sup>2</sup>

(1. School Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** One kind of “human-instrument integration” principle for designing workstations of desktop microscopic instruments which can provide better user experience is proposed in this article. The workstation based on the principle takes the operator as the center. In this way, the efficiency and comfort level are maximized, and the operating fatigue is reduced. Aiming at the operation characteristics and work path of the biological microscope, three kinds of workstation layout schemes are designed. The software Jack is used to evaluate operating time and energy consumption. The comparison experiment for operation comfort of the working postures is completed. The RMS of surface EMG for the main muscles of the neck and shoulder is tested by paired  $T$  test. The results show that the splenius capitis on the turning side and the sternocleidomastoid on the corresponding side are the most sensitive with bigger load variation, and the average RMS change rates are 56.4% and 8.4% respectively. Combined with the subjective evaluation of operators, the more comfortable overlapped type is finally determined as the optimal layout. The assessment method verifies the effectiveness of the “human-instrument integration” principle, which can provide guidance for the workstation design of related microscopic instruments.

**Keywords:** human-instrument integration; biological microscope; workstation; surface EMG; Jack simulation

## 0 引 言

生物显微镜等台式显微仪器的作业空间作为操作者

与仪器设备时时交互的活动空间,直接影响操作者的作业行为与作业感受。基于人机工程学进行作业空间设计对于提高作业效率、舒适度,减轻作业疲劳起到极其重要的作用。职业生物显微镜操作者通常需要每天持续 6~8 h

的作业,由于操作时间长、坐姿不舒适以及操作过程复杂等原因,致使操作者颈肩部及背部肌肉承受过多的载荷,造成一定程度的肌肉骨骼疲劳、疼痛甚至损伤<sup>[1-3]</sup>。针对这类问题,显微仪器制造商和相关学者们从人机工程学的角度对显微镜及其作业空间进行了设计研究。

2007年,蔡司 Zeiss 公司联合产品安全和人机工程学认证机构开始研发最符合人机工程学的实验室显微镜。基于筛选的显微镜用户人机工程学标准,设计了可调节目镜高度和角度的人机显微镜,确保使用者以合理的姿势舒适地工作<sup>[4]</sup>。徕卡、奥林巴斯针对激光共聚焦显微镜等高端仪器产品,通过设置遥控手轮实现远程控制,可满足操作者对显微镜和测控软件协同作业的需求。此类显微仪器的作业空间布局多采用直线型,显微镜与显示器分别位于两个独立工作台。芬兰 Tampere 大学的 Sillanpää 等<sup>[5]</sup>通过设计桌面可升降、可调节手臂支撑桌板的显微镜操作台减缓使用疲劳。日本名古屋大学的 Takeshi 等<sup>[6]</sup>研究了普通座椅、高椅、站姿3种条件下使用显微镜时使用者肌肉骨骼的疲劳程度。英国学者 Vijendren 等<sup>[7]</sup>通过设计匹配耳鼻喉手术显微镜的姿势支持椅,延迟了颈部的疲劳感觉,也消除了不同资历的临床医生之间的使用差异。

对于作业空间的人机工程学评估,多采用表面肌电测试(surface electromyography, SE)及虚拟仿真评价的方式。Jennie 等<sup>[8]</sup>应用 sEMG 评估了4种条件下女性操作者在循环装配工作中肩部斜方肌的活动情况。Ebrahimi 等<sup>[9]</sup>对地毯编织传统和人机作业空间中的人体肩部及后背肌肉活动做了评估研究。Maria 等<sup>[10]</sup>研究视频显示器屏幕高度对其工作姿势和颈肩肌肉肌电活动的影响,得出在屏幕高度较高的坐姿下,颈部明显变得更直立,颈部负荷减小。Ethan 等<sup>[11]</sup>、Karthek 等<sup>[12]</sup>、Alberto 等<sup>[13]</sup>基于 sEMG 分别评估了不同姿态下使用平板电脑和移动电话时颈肩部的肌肉活动,以及修正的 NIOSH 方程的可靠性。国内学者王琳等<sup>[14]</sup>应用表面肌电信号结合生物力学理论研究了颈部肌肉的疲劳特性。Hovanec<sup>[15]</sup>提出在虚拟环境中利用虚拟人进行姿态模拟,评价产品的安全性和可靠性。Schaub 等<sup>[16]</sup>利用虚拟人仿真评估整个产品生命周期,通过人机工程学相关分析减少人体作业载荷。

综上所述,相关研究者们通过对显微镜的目镜、调焦手轮以及显微镜工作台、手臂和头部支架的人机设计减少了使用者在操作显微镜时的疲劳程度。蔡司显微镜制造商在显微镜人机设计方面给出了部分理论依据,表明对显微镜进行人机工程学方面的研究与设计是十分必要的。对于作业空间设计的评估,国内外学者应用了表面肌电实验和虚拟仿真的方法,但是没有将其应用于台式显微仪器作业空间设计的评估中。目前,国内关于仪器设备的人机工程学研究还比较薄弱,而基于人机工程学的

的台式显微仪器作业空间设计的研究几乎是空白。

基于上述问题,本文针对高端台式显微仪器作业空间设计原则与评估方法展开研究。以一种激光扫描共聚焦生物显微镜作业空间为例,依托人机工程学作业空间设计理论,根据该显微镜作业流程与特点提出台式显微仪器作业空间设计原则;依据该台式显微仪器作业空间设计原则构建3种生物显微镜作业空间布局;通过 Jack 软件仿真与表面肌电实验相结合的方法评估筛选最优方案,以期证明提出的台式显微仪器作业空间设计原则的有效性。

## 1 生物显微镜作业空间分析

### 1.1 作业空间

作业空间是指在工作系统中为操作者提供的活动空间,包括机器、设备、工具、用具、被加工物件所占有的空间总和。作业空间的设计对人的行为、舒适感与心理满足感有重大影响,而其设计的重要方面之一就是各组成元素在作业空间中的布置问题。本文针对激光扫描共聚焦生物显微镜的工作特点,以作业空间布置为核心展开研究,基于人机工程学理论提出一种台式显微仪器作业空间设计原则。

### 1.2 生物显微镜作业特点与作业路径分析

激光扫描共聚焦生物显微镜具有利用计算机对所观察的对象进行数字图像处理观察、分析和输出的特点。显微镜主体、计算机系统及其操作台构成了其作业空间的主体。

激光共聚焦生物显微镜系统,包括控制柜、显微镜主体、显示器工作台3部分,构成直线型布局形式,如图1所示。此显微镜系统作业过程如下:1)显微镜设备及操作系统初始化;2)放置观测样本及粗调显微镜;3)精调显微镜与操作显微镜测控软件。工作路径为A区→B区←→C区,如图2所示。



图1 生物显微镜系统

Fig. 1 Biological microscope system

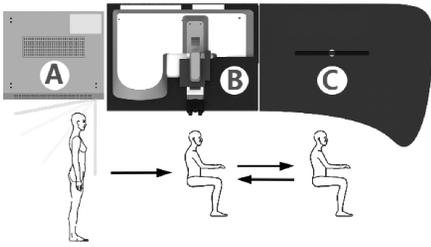


图2 操作人员工作路径

Fig. 2 Operating path of biological microscope

首先,操作者打开控制柜中的电源、激光器、滤光轮、机箱等设备开关,启动激光共聚焦生物显微镜系统。然后将准备好的样品放置载物台上相应位置,调节显微镜并观测,调至适宜状态后移动座椅至显示器位置进行显微镜测控软件操作,调节显微镜细准焦螺旋与操作测控软件需同时反复多次。因此,显微镜主体与电脑工作台之间的路径距离决定了作业效率与操作的舒适性。

## 2 台式显微仪器作业空间设计原则

### 2.1 作业空间布局设计原则

作业空间布局总体原则为重要性原则、使用频率原则、功能原则、使用顺序原则。即最优先考虑能实现系统作业目标的最重要元件;经常使用的元件应置于作业者易见易及的位置;按功能性相关关系编组排列;按元件使用顺序排列布置<sup>[17]</sup>。

### 2.2 台式显微仪器作业空间设计原则拟定

台式显微镜作业空间设计要遵循作业场所布置的总体原则,依据其作业性质拟定作业空间设计原则。此台式生物显微仪器的调节与测控软件操作是实现整个作业目标最为重要的环节,且二者为一个整体、操作相辅相成。根据作业空间布局的重要性原则,显微镜设备与电脑显示器的位置关系是此作业空间设计优先考虑的核心内容。显微镜与显示器形成“控制”与“显示”的核心工作区域,操作者频繁往返于二者之间,其使用频率最高。此显微仪器系统的操作极其考察操作者的经验与耐心,其作业空间的设计要充分考虑操作者动作的习惯性、同时性以及动作的经济性,避免承担扭曲姿态,使之最大程度地提高操作者的作业效率和舒适度,减轻作业疲劳。

基于上述要求,提出台式显微仪器“人仪一体化”的作业空间设计原则,即作业路径最短、作业过程能耗最低、作业姿态最舒适的设计原则。

### 2.3 生物显微镜作业空间设计

依据台式显微仪器“人仪一体化”的作业空间设计原则对一种激光共聚焦生物显微镜系统进行作业空间设计。根据作业任务可知,显微镜设备与电脑显示器处于

此操作系统的核心工作区域,在显微镜位置确定的情况下布置显示器位置。

显示器的位置设定要遵循常规操作中视野与视距的基本要求。依据人体测量学数据可知,在头部和两眼处于放松状态下,人眼最佳的水平观察视野为视中心线左右各 $55^\circ$ 范围内,从人体轴线至视屏中心的最大阅读距离为 $710\sim 760\text{ mm}$ 。根据此设备工作路径与人的操作习惯,电脑显示器通常放置在主体设备右侧,操作者在作业过程中通过扭转颈部、转动躯干完成作业任务。综合上述视域要求,预设电脑显示器的放置位置如图3所示,两种显示器放置位置的视角分别为 $15^\circ$ 、 $55^\circ$ ,视距为 $750\text{ mm}$ 。

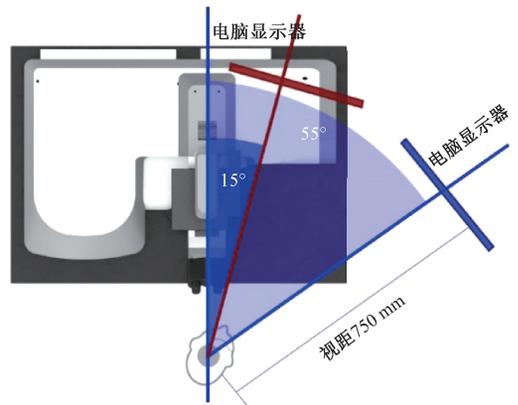


图3 显示器放置位置

Fig. 3 CRT location placed

依据上述“人仪一体化”的作业空间设计原则,现列出3种作业空间设计方案,分别为弧型布局、 $\Gamma$ 型布局和重叠型布局,如图4所示。

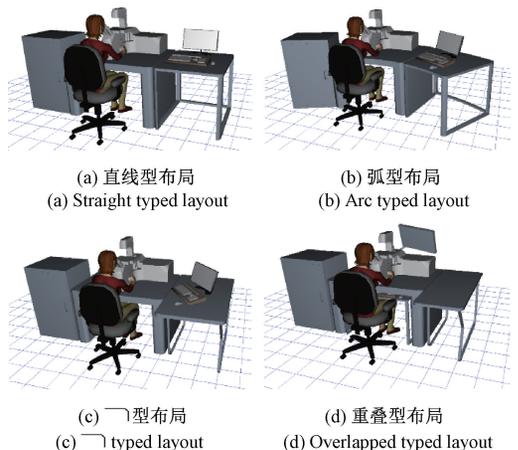


图4 工作台布局方案

Fig. 4 Workstation layout scheme

上述设计的3种工作台布局不能直观判断出哪种布局形式的工作效率和操作舒适度最高。因此,利用Jack软件仿真评估作业空间操作作用时与能耗,通过表面肌电实验评估作业空间的舒适度,以筛选最优的布局方案。

### 3 作业空间操作作用时与能耗 Jack 仿真评价

#### 3.1 仿真评估环境

Tecnomatix Jack 是德国西门子公司开发的一款仿真软件。本文利用 Jack 软件对生物显微镜原空间布局(直线型)以及上述3种新布局形式进行仿真分析。主要仿真指标包括完成一次作业任务用时以及任务新陈代谢能量消耗两项,根据工作特点选择预定时间分析工具(predetermined time, PT)和新陈代谢能量消耗支出工具(metabolic energy expenditure, MEE)。完成任务所用时间反应布局方案的效率高,新陈代谢能量消耗则是表示作业人员疲劳程度的重要指标。

具体操作如下:1)在 Jack 软件中导入显微镜系统的4种布局场景;2)依据我国成年人人体测量数据构建人体模型,调整模型姿态;3)利用预定时间分析工具分析整个操作流程的完成时间;4)利用新陈代谢能量支出工具分析整个操作流程的能量消耗。Jack 中构建的4种布局模型,即直线型布局、弧型布局、 $\cap$ 型布局和重叠型布局(如图4所示)。显微镜操作为坐姿轻负荷作业,对于操作者的性别、身高体重无特别限制,此仿真选择中国 P50 女人体模型,座椅为高度可调节带轮转椅。一个作业周期需完成4组任务动作,分别为操作电控柜、放置观测样本、调节显微镜准焦螺旋和交替操作显微镜准焦螺旋与电脑显示器。

#### 3.2 完成观测任务用时分析

完成一个作业任务所用时间由完成各子作业基本动作所需时间累加而成。在软件平台的预定时间分析工具中,根据上述定义的作业任务,设置动作参数。通过软件仿真最终得到直线型布局、弧型布局、 $\cap$ 型布局和重叠型布局完成一个作业周期所用时间如表1所示。其中直线型布局由于工作路径最长,在执行子任务“交替操作显微镜准焦螺旋与电脑显示器”时需移动椅子,作业耗时最长;另外3种布局由于路径相对较短,用时均小于直线型,其中弧型和 $\cap$ 型布局的显示器均放置右侧且与人眼观测中心成角在 $45^\circ \sim 55^\circ$ ,作业过程中操作者通过轻微移动、转身或扭转头部等动作完成工作任务,由于 $\cap$ 型布局较弧型布局更为紧凑,路径短于弧型布局,其耗时小于弧型布局;重叠型布局将显示器与显微镜重叠排布,布局形式更为紧凑,故用时最短,工作效率高。

表1 Jack 软件仿真能量消耗表

Table 1 Energy consumption based on Jack simulation

布局类型	完成时间/ min	能量消耗总量/ kcal	能量消耗率/ (kcal·min <sup>-1</sup> )
直线型	18.8	37.8	2.01
弧型	17.1	33.0	1.93
$\cap$ 型	16.7	31.5	1.89
重叠型	15.8	24.6	1.56

#### 3.3 新陈代谢能量消耗分析

新陈代谢能量消耗是评估作业人员疲劳程度的重要指标。Jack 的能量消耗仿真是基于美国密歇根州立大学的 Garg 等<sup>[18]</sup>建立的数学模型。能量消耗由两个基本的组成部分,即基础能量消耗和任务能量消耗,如式(1)所示。

$$E_{\text{job}} = \frac{\sum E_{\text{posi}} t_i + \sum E_{\text{taskj}} t_j}{T} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{job}}$ 为工作的平均能量消耗率; $E_{\text{posi}}$ 为维持基础代谢和姿势的能量消耗率; $t_i$ 为维持各基本姿势的时间; $E_{\text{taskj}}$ 为稳态下完成各子任务新陈代谢能量消耗; $t_j$ 为指定完成各项子任务所持续的时间; $T$ 为总工作时间。

在软件平台的 MEE 工具中,依次导入上述4种作业空间完成一个作业任务周期的时间、坐姿和站姿占比,以及各子作业任务的动作参数。计算得到各项具体任务的能量消耗结果(如表1所示)。其中直线型布局能量消耗率最高,另外3种布局形式能耗率均小于直线型、 $\cap$ 型布局和重叠型布局能耗率较低。

从整个过程的能量消耗评估结果可见,能量消耗与作业时间成正比,而作业时间又取决于工作路径的长短,即作业路径短、耗时少、消耗能量低。交替观测显微镜与操作电脑显示器是消耗时间的主要工作部分。直线型布局显示器与显微镜距离最长,操作者需要往复移动,因此能量消耗率最高;弧型和 $\cap$ 型布局的显示器均放置右侧且与人眼观测中心成角在 $45^\circ \sim 55^\circ$ ,作业过程中操作者需扭转头部或移动位置完成工作任务,耗时相对较多,能量消耗率较高,总能耗较多;重叠型布局显示器放置于与人眼观测中心成角 $15^\circ$ 的位置,在交替操作显微镜与显示器过程中不产生位移、不需要大角度扭转头部,耗时少,能量消耗率低,总能量消耗最少。

综上所述,完成任务用时和能耗率仿真结果表明 $\cap$ 型布局和重叠型布局为较优的布局方案,但作业时的操作舒适性及颈肩部肌肉的疲劳特性需通过表面肌电实验对颈肩部的肌肉载荷进行进一步评定。

## 4 作业空间操作舒适性表面肌电实验评价

作业空间操作舒适性指的是生物显微镜操作者在不同作业空间布局下的操作舒适程度,其大小与肌肉的载荷密切相关,舒适性的评价分为主观评价和客观评价。

### 4.1 表面肌电信号获取方案

实验召集 8 名男性和 2 名女性志愿者作为被测者,平均年龄 25.6 周岁,男性平均身高 179.1 cm,平均体重 74.8 kg;女性平均身高 163 cm,平均体重 50.5 kg。被测者均签署了知情同意书且受试者没有患过骨骼肌肉疾病,且不是敏感性皮肤。实验前 24 h 受试者未进行剧烈运动,熟悉了实验要求与实验方法。

本文实验主要目的是检验 T 型布局 and 重叠型布局的颈部肌肉载荷,进而从操作舒适性和肌肉疲劳角度对比筛选设计方案。因此实验中显微镜操作者按照设计方案处于两个姿态:1) 颈部右转 15°,头部上仰 10°,双目距显示器中心 750 mm;2) 颈部右转 55°,头部水平向下 10°,双目距显示器中心 750 mm。操作者观测显示屏图像中心点,身体躯干保持竖直,手臂位于操作台上获得支撑,双手位于目镜调节旋钮处,座椅高度按个人身高调节,如图 5 所示。每位被测者保持两个姿态各 10 min,中间休息 15 min。颈肩部主要肌肉的肌电信号被采集,实验期间保持电极贴片的布置。



图 5 颈肩部肌肉肌电实验

Fig. 5 SEMG experiment of neck and shoulder muscles

### 4.2 肌电数据采集与处理

人体颈部肌肉分布密集,选取肌肉时要考虑与头部扭转、伸屈主要相关的肌肉群又要兼顾肌肉群特征的可测量性,故选择头夹肌、斜方肌、胸锁乳突肌为主要研究对象。本文主要对被测者双侧的 3 个肌肉群进行表面肌电信号采样,电极片粘贴位置如图 6 所示。

颈肩部肌肉的肌电数据由美国 Biopac 公司的 16 通道多导生理记录仪 MP150 进行采集。电极贴片为一次性心电贴片(力雅上海),该贴片为 Ag/AgCl 贴片,直径

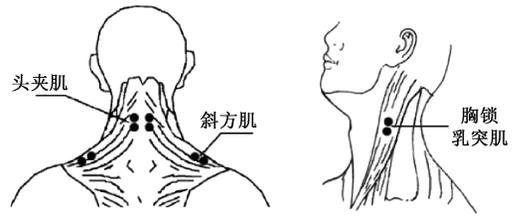


图 6 电极片粘贴位置

Fig. 6 Electrode location pasted

52 mm。实验前首先用 75% 医用酒精擦拭被测区域,待干燥后将电极片平行于肌纤维粘贴于肌肉表面,两贴片中心平均间隔 20 mm。

采集的肌电信号经过系统配置的 EMG100c 模块进行放大和预处理,增益设置为 5 000,采样频率为 1 000 Hz,高通滤波器的数字设为 500 Hz,低通滤波器的数值设为 1 Hz。

初始数据经 1 s 平均获得均方根(RMS)数据,如式(2)所示。剔除波动较大数据,将处理后的 RMS 数据在时域内取平均值。记录被测者两个姿态下各通道肌电幅值的 RMS 均值。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T sEMG^2(t) dt} \quad (2)$$

应用 SPSS25 对处理后的实验数据进行配对 T 检验。差异显著性通过统计  $p$ -values 来确定,若  $p < 0.01$  为差异性极其显著性,  $0.01 < p < 0.05$  为差异性显著,  $0.05 < p < 0.10$  为有差异趋势,  $p > 0.1$  为没有差异性。选取两姿态 RMS 值有差异的肌肉进行重点分析,特别是被测肌肉的 RMS 值及其变化率。

### 4.3 主观评价

被测者实验后需要回答如下两个主观感受问题。

- 1) 相对于姿态 1,姿态 2 时颈肩部肌肉的感觉如何(非常疲惫—疲惫—相同—舒适—非常舒适)?
- 2) 比较两种姿态,感觉哪部分颈肩部肌肉的差异更明显?

### 4.4 结果及讨论

针对头部右转 15°,后伸 10°和右转 55°,前屈 10°的两个姿态测得的肌电值,进行处理得到 10 min 的 RMS 均值,再进行配对 T 检验,得到的统计结果如表 2 所示。

表 2 中的 RMS 差均值为 10 名被测者姿态 1 与姿态 2 的肌电幅值之差的平均值,负值为变大,正值为变小,其中双侧头夹肌、左侧斜方肌、左侧胸锁乳突肌均值变大,左侧胸锁乳突肌 RMS 差的均值最大为 -0.13 V,右侧斜方肌和右侧胸锁乳突肌变小,均为 0.017 V;标准差反应 10 名被测者 RMS 差值的波动大小,其中左侧胸锁乳突肌的标准差最大为 0.134 V,右侧胸锁乳突肌标准差最小为 0.025 V;表中上下限为 95% 置信区间的 RMS 差

表2 右转15°和55°两姿态RMS配对T检验表

Table 2 Pair T test of RMS at right turning 15° and 55°

被测颈肩肌肉	RMS差 均值/V	标准差/ V	下限/ V	上限/ V	双结尾 p值
1 右头夹肌	-0.060	0.043	-0.091	-0.029	0.002
2 右斜方肌	0.017	0.052	-0.020	0.054	0.324
3 右胸锁乳突肌	0.017	0.025	-0.000	0.035	0.054
4 左头夹肌	-0.016	0.089	-0.080	0.048	0.583
5 左斜方肌	-0.029	0.111	-0.108	0.051	0.435
6 左胸锁乳突肌	-0.130	0.134	-0.023	-0.003	0.013

值的极限值;双结尾p值反应配对的肌肉RMS差值的差异显著性,其中右侧头夹肌的p值最小为0.002,极其显著,左侧胸锁乳突肌的p值为0.013,差异显著,右侧胸锁乳突肌的p值为0.054,具有差异趋势,其余肌肉的p值均大于0.1,没有差异性,不具有统计学意义。

右侧头夹肌的肌电RMS差值极其显著,如图7所示。由于被测者之间肌肉的放电水平不同,需要进行归一化以利于肌电值的组间比较,将RMS的差值除以每位被测者姿态1的RMS再乘以100%,如式(3)所示。图7中柱状图浅色代表姿态1(右转15°,后伸10°)的RMS值,被测者2最大为0.18V,被测者7最小为0.074V;柱状图深色部分为姿态2(右转55°,前屈10°)与姿态1肌电RMS的变化值,其中被测者10的变化值最大为0.125V,被测者4的变化值最小为0.005V,被测者的右侧头夹肌RMS差值均为正值,说明在姿态2下的肌肉载荷均大于姿态1;RMS差值的百分比也均为正值,其中最大为被测者10,RMS增大了133.6%,最小也为被测者4,RMS增大了5.8%,进一步说明姿态2时的右侧头夹肌载荷普遍增大。

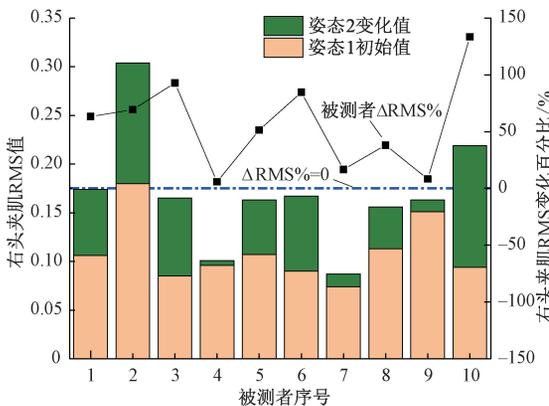


图7 右头夹肌RMS值及两姿态RMS变化百分数

Fig. 7 Right splenius capitis RMS and percentage change

$$\Delta RMS\% = \frac{RMS_2 - RMS_1}{RMS_1} \times 100\% \quad (3)$$

左侧胸锁乳突肌的肌电RMS差值变化显著,如图8所示,浅色柱状图代表姿态1(右转15°,后伸10°)的左侧胸锁乳突肌RMS值,被测者4最大为0.167V,被测者2和7最小为0.075V;柱状图深色部分为姿态2(右转55°,前屈10°)与姿态1左侧胸锁乳突肌肌电RMS的变化值,叠加到浅色柱状图上方为正值,代表肌电值变大,叠加到浅色柱状图下方为负值,代表肌电值变小,其中被测者1的变化值最大为0.038V,被测者2的变化值最小为-0.012V,除了被测者2,其余被测者的左侧胸锁乳突肌RMS差值均为正值,说明在姿态2下的肌肉载荷大于姿态1;RMS差值的百分比最大为被测者1,RMS增大了24.2%,增大最小为被测者9,RMS增大了4.1%,被测者2的RMS在姿态2较姿态1减小了15.5%,推测有可能在姿态2时左侧胸锁乳突肌测试通道的电极出现问题,产生误差,但总体上姿态2时的左侧胸锁乳突肌载荷普遍增大。

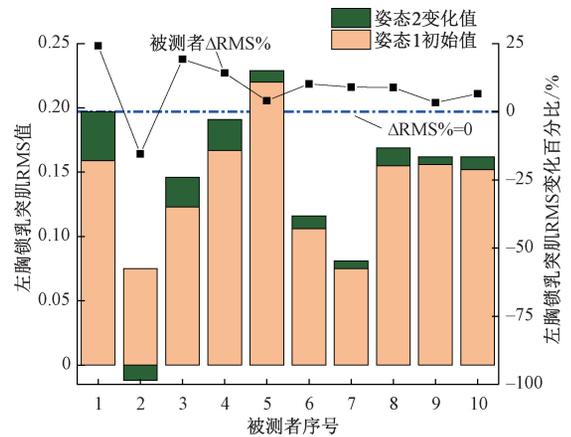


图8 左胸锁乳突肌RMS值及两姿态RMS变化百分数

Fig. 8 Left sternocleidomastoid RMS and percentage change

总结10名被测者右侧头夹肌、左侧胸锁乳突肌RMS%的平均变化率,可以看出两姿态下右侧头夹肌的RMS%的变化均值最大为56.4%,且差异极其显著,说明右转55°时其载荷变化最大;其次为左侧胸锁乳突肌RMS变化率增大8.4%,且差异显著,说明右转角度增大时载荷增大。结合颈肩部肌肉的力学模型<sup>[19-20]</sup>,当头部右转时,右侧头夹肌和左侧胸锁乳突肌同时收缩,进而产生转矩带动头部产生转动;同时当头部向后伸展时,双侧胸锁乳突肌载荷减小,头夹肌载荷增大,当头部前屈时,双侧胸锁乳突肌载荷大,头夹肌载荷变小。本文实验姿态1和姿态2分别为右转15°和后展10°,以及右转55°

和前屈 $10^\circ$ 的复合姿态,但后展和前屈的角度不大,且观察显示器中心的动作存在主观差异(头部前倾、视角不变或头部水平、视角向下),因此从RMS变化率看并不明显;由于实验中规定了手部动作,需放在调焦旋钮上,且小臂均有桌面支撑,因此两侧的斜方肌RMS值变化也不明显。

人体表面肌电测量受多重因素影响,波动较大,主要包括电极粘贴的肌肉位置、电极自身的质量及可靠性、电极在实验受力状态中是否存在松动现象、以及实验中被测者是否有异动、周围环境是否隔振等。图8中被测者2的左侧胸锁乳突肌RMS值变小推断可能是电极在实验过程中没有固定好,产生了松动造成的。

10名被测者的主观评价结果如表3所示,姿态1下感觉非常舒适8人,舒适2人;姿态2下感觉非常不适7人,不适3人;两姿态下差异部位肌肉感觉右后颈差异大的有9人,左前颈差异大的1人。从主观评价的结果看姿态2情下载荷大,特别是右后颈及左前颈部的肌肉。

表3 颈肩部肌肉载荷主观评价

Table 3 Subjective assessment of neck shoulder muscles load

评价	姿态1(右转 $15^\circ$ )		姿态2(右转 $55^\circ$ )		差异部位	
	非常舒适	舒适	非常不适	不适	右后颈	左前颈
人数	8	2	7	3	9	1

综上所述,操作者颈肩部肌肉中右侧头夹肌、左侧胸锁乳突肌最为敏感,载荷变化较大,其RMS的平均变化率分别为56.4%和8.4%,反映出右转 $15^\circ$ 的姿态比右转 $55^\circ$ 的姿态更为舒适。操作者主观评价与客观评价一致,可以得出对应姿态1的重叠型布局较姿态2的“一”型布局具有更好的操作舒适性,长时间操作重叠型布局更不易产生疲劳现象。

#### 4.5 作业空间布局方案确定

通过Jack软件仿真及表面肌电信号的测量及分析,最终确定重叠型为最优布局方案。重叠型作业空间符合“人仪一体化”的作业空间设计原则,将电脑与显微镜操作集成在同一作业空间,形成一个核心作业区域,避免以往两个工作区域的往复操作。显示器位于显微镜主体后右侧上方,即人体仰头约 $15^\circ$ 的视域范围内,通过独立支架调整位移、角度,可根据需要加减显示器。工作台台面中间区域下方安置独立键盘架,使其独立于显微镜的气浮平台,避免产生人为干扰,并便于扩展右侧工作空间及放置观测样品、资料以及执行相关实验动作。作业空间整体效果如图9所示。



图9 作业空间整体设计方案

Fig. 9 Overall design scheme of workstation

## 5 结 论

本文基于人机工程学理论,以操作者为中心,依据激光扫描共聚焦生物显微镜特征提出台式显微仪器作业空间设计原则,采用仿真与表面肌电实验分析相结合方法对其作业空间设计进行了评价,主要结论如下。

1) 针对生物显微镜的使用需求提出一种台式显微仪器“人仪一体化”的作业空间设计原则,即作业路径最短、作业过程能耗最低、作业姿态最舒适。

2) 提出了一种通过Jack仿真和表面肌电实验相结合的作业空间布局评估方法,Jack仿真可初步评估设计方案的操作用时和能量消耗,表面肌电实验评估不同操作姿态下颈肩部肌肉的载荷,进而结合主观评价推断操作时的舒适性以及疲劳情况。

3) 通过Jack仿真和表面肌电评估确定了重叠型为最优方案。重叠型作业空间符合“人仪一体化”的作业空间设计原则,验证了设计原则的有效性。

此设计原则和评估方法可为国内研发相关仪器设备的人机设计提供一定借鉴与参考。舒适高效的作业空间还应综合考虑对操作者作业心理的影响以及与整体作业环境的相关性,未来将进一步展开相关研究。

#### 参考文献

- [1] JAIN G, SHETTY P. Occupational concerns associated with regular use of microscope[J]. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 2014, 27(4):591-598.
- [2] GUPTA A, MHASKE S, AHMAD M, et al. Ergonomic Microscope: Need of the hour[J]. Journal of Clinical and Diagnostic Research, 2015, 9(5):62-65.
- [3] VIJENDREN A, DEVEREUX G, TIETJEN A, et al. The Ipswich Microbreak Technique to alleviate neck and shoulder discomfort during microscopic procedures [J]. Applied Ergonomics, 2020, 2(83):102679.

- [4] SILVIA Z. Breakthrough in ergonomics for laboratory and clinical microscopes [J]. *Microscopy Today*, 2013 (9): 18-21.
- [5] SILLANPÄÄ J, NYBERG M, LAIPPALA P. A new table for work with a microscope, a solution to ergonomic problems [J]. *Applied Ergonomics*, 2003, 34 (6): 621-628.
- [6] TAKESHI E, TOMOHIDE K, TATSUKI I, et al. Effects of adjustable sit-stand VDT workstations on workers' musculoskeletal discomfort, alertness and performance[J]. *Industrial Health*, 2008 (46): 497-505.
- [7] VIJENDREN A, DEVEREUX G, KENWAY B, et al. Effects of prolonged microscopic work on neck and back strain amongst male ENT clinicians and the benefits of a prototype postural support chair[J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2019, 25(3): 402-411.
- [8] JENNIE A J, DIVYA S, SVEND E M. Consistent individual motor variability traits demonstrated by females performing a long-cycle assembly task under conditions differing in temporal organization [J]. *Applied Ergonomics*, 2020 (85):103046.
- [9] EBRAHIMI M, AZGAHINI MR, NAZARI J, et al. Assessment of shoulder and lower back muscles activities of carpet weaver's in the traditional and ergonomic workstations using electromyography [J]. *Journal of Health and Safety at Work*, 2021(11):196-212.
- [10] MARIA B, HIROSHI J, MIDORI S, et al. Sitting posture and neck and shoulder muscle activities at different screen height settings of the visual display terminal[J]. *Industrial Health*, 1997(35):330-336.
- [11] ETHAN C D, KAITLIN M G. The influence of a semi-reclined seated posture on head and neck kinematics and muscle activity while reading a tablet computer [J]. *Applied Ergonomics*, 2017 (60):342-347.
- [12] KARTHEEK R S, RAVI C A, JEONG H K, et al. Armrests and back support reduced biomechanical loading in the neck and upper extremities during mobile phone use[J]. *Applied Ergonomics*, 2018 (73):48-54.
- [13] ALBERTO R, TIWANA V, SERGIO I, et al. Surface electromyography for risk assessment in work activities designed using the "revised NIOSH lifting equation" [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2018 (68):34-45.
- [14] 王琳, 付荣荣, 张陈, 等. 基于生物力学分析 Q 值对颈肌疲劳的反映效果 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4): 878-885.
- WANG L, FU R R, ZHANG CH, et al. Biomechanics-based investigation on the relation between index Q and cervical muscle fatigue[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017,38(4):878-885.
- [15] HOVANEK M. Digital factory as a prerequisite for successful application in the area of ergonomics and human factor [J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2016, 18(1): 35-45.
- [16] SCHAUB K, MUHLSTEDT J, ILLMANN B, et al. Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the ergonomics assessment worksheet' (EAWS)[J]. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 2012, 3 (3): 398-403.
- [17] 丁玉兰. 人因工程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2011: 140.
- DING Y L. Human factor engineering [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011:140.
- [18] GARG A, CHAFFIN D, HERRIN G. Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs[J]. *American Industrial Hygiene Association (S0002-8894)*, 1978, 8(39): 661-674.
- [19] MORONEY S, SCHULTZ A, MILLER J. Analysis and measurement of neck loads[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 1988, 6(5):713-720.
- [20] PAGE Á, DE ROSARIO H, GÁLVEZ J A, et al. Representation of planar motion of complex joints by means of rolling pairs. Application to neck motion[J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 44(4):747-750.

## 作者简介



王勇,2007年于哈尔滨工业大学获硕士学位,现为哈尔滨工业大学博士研究生,讲师,主要研究方向为仪器产品人因学。

E-mail: wangyong77@hit.edu.cn

Wang Yong received her M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2007. She is currently a Ph.D. candidate and lecturer at Harbin Institute of Technology. Her main research interests include human factors engineering for instruments.



谭久彬(通信作者),中国工程院院士,哈尔滨工业大学精密仪器工程研究院院长,长期致力于高端装备制造中的超精密测量与仪器工程研究。

E-mail: jbtan@hit.edu.cn

Tan Jiubin (Corresponding author) is currently an academician of Chinese Academy of Engineering. He is the dean of the Precision Instrument Engineering Research Institute of Harbin Institute of Technology. He has long been committed to the research of ultra-precision measurement and instrument engineering for high-end equipment manufacturing.