

以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型研究

王金^{1*} 张旭伟¹ 陈剑平² 张莉莉²

1.西南石油大学机电工程学院,成都,610500

2.中国民航局第二研究所,成都,610042

摘要:动态座椅是干预久坐不适的重要手段,其中动态座椅的综合运动模型对干预效果具有重要意义。为提升动态座椅的干预效果,开展了以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型研究。开发座椅动态尺寸构建方法,一是利用可调节座椅,采集用户的舒适座椅尺寸;二是基于不同体型用户的舒适座椅尺寸差异,拟合不同体型群体的舒适座椅尺寸在时间维度上的变化趋势,从而构建动态尺寸。以乘客座椅为例,利用7个相互关联的座椅支撑性能尺寸构建动态座椅综合运动模型,采用被试内实验评估动态尺寸降低久坐不适的功效。结果显示,座高、靠背倾角、腰靠高度、腰靠厚度、颈靠厚度均具有一组动态尺寸,而座板倾角包含三组动态尺寸,颈靠高度包含两组动态尺寸,它们能够显著降低关键人体部位和整体的久坐不适。

关键词:舒适性;乘客座椅;动态尺寸;关联尺寸;支撑性能

中图分类号:U461.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Comprehensive Motion Model of Dynamic Seats Characterized by Dynamic Dimensions

WANG Jin^{1*} ZHANG Xuwei¹ CHEN Jianping² ZHANG Lili²

1.School of Mechatronic Engineering,Southwest Petroleum University,Chengdu,610500

2.The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China,Chengdu,610042

Abstract: Dynamic seats were a crucial means for intervening in prolonged sitting discomfort, and the comprehensive motion model of dynamic seats played a significant role in determining the effectiveness of intervention. To enhance the efficacy of dynamic seating interventions, a study of comprehensive motion model of dynamic seats characterized by dynamic dimensions was conducted. Firstly, a method for constructing dynamic seating dimensions was developed, involving the use of adjustable seats to collect user-specific comfortable seat dimensions. Secondly, based on the differences in comfortable seat dimensions among users with different body types, the variation trend of measured dimensions of comfortable seats for different body types over time was fitted, thereby constructing dynamic dimensions. Then, taking passenger seats as examples, a comprehensive motion model of dynamic seats was constructed using seven interrelated seat support performance dimensions. Finally, an intra-subject experiment was conducted to evaluate the effectiveness of dynamic dimensions in reducing sedentary discomfort. The results reveal that seat height, backrest inclination, lumbar support height, lumbar support thickness, and neck support thickness all include a set of dynamic dimensions, while seat pan inclination includes three sets of dynamic dimensions, and neck support height includes two sets. These dynamic dimensions significantly reduce discomfort in key body parts and overall discomfort.

Key words: comfort; passenger seat; dynamic dimension; interrelated dimension; support performance

0 引言

久坐引发骨骼和肌肉不适及伤害风险,还被证明与成年人全因死亡率、心血管疾病和II型糖尿病的发病率高度相关,因此,减少久坐不适及其

健康风险是人体工程学中一个重要的课题。坐站姿势的变化是减少久坐危害的最直接方式^[1],但在狭小的交通工具乘坐空间或在狭小工程车辆操作空间中,人们无法通过坐站姿势的变化来减轻久坐引起的肌肉和骨骼伤害。

坐姿运动可以促进躯干肌肉的交替活动,减少脊柱负担,改善人体表面压力分布,促进血液和

营养物质流动^[2],从而减轻久坐不适感。然而,用户并不都清楚如何以符合人体工程学的方式调整坐姿。如座椅内“坐立不安”运动通过调整姿势减轻受压身体部分的感知压力来缓解不适,但是这种运动存在高频低效的问题,可能导致肌肉痉挛和人体软组织拉伤。相比之下,动态坐姿(通过特定的椅子或调节组件促进坐姿中肢体的动态变化)是一种更有效的减轻久坐不适及其健康风险的干预方式^[2-3]。

实现动态坐姿的方式包括按摩组件、主动动态人椅系统和被动动态人椅系统。按摩组件有助于改善血液循环并缓解肌肉僵硬^[4-5],但其效果是短暂的,按摩停止后,肌肉僵硬会很快恢复到基线值^[6]。主动动态人椅系统使用交互式任务来鼓励或诱导用户进行主动运动,改善人体表面压力分布,增加肌肉活动并缓解久坐不适^[7-8]。但诱导式任务可能会分散驾驶或机械操作等工作的注意力,从而影响操作安全^[9]。被动动态人椅系统通过传感技术和分类算法监测、识别坐姿,并通过座椅中的移动组件来调整用户的坐姿,以纠正不良坐姿,使其符合经过人体工程学研究确定的良好坐姿。目前的研究更多关注坐姿的监测与识别,能够实现不良坐姿告警和久坐提醒^[10-13],少数研究讨论了面向静态目标^[14-15]或重复运动^[16-17]的座椅调节方式。例如,自动腰部调节系统可以实时调整靠背上的压力分布,以实现目标压力分布^[14]。缓慢、匀速且小幅度的座板-靠背角度的重复增量运动促进躯干角度动态变化^[3]。主动动态人椅系统和被动动态人椅系统统称为动态座椅。为促进动态坐姿,动态座椅中可调节部位有规律的运动模式称为座椅运动模型,多个可调节部位的协同调节称为座椅的综合运动模型。动态座椅是实现动态坐姿的有效手段,但是动态座椅中哪些部位采用何种方式规律地调节能够高效促进坐姿运动,目前依然缺乏相关研究。

相对于面向静态目标或重复运动的座椅调节方式,多目标动态适配的座椅调节策略具有更好的不适干预效果。研究发现,靠背倾斜角度和腰部支撑的多目标关联运动可以增强腰椎压力问题的改善效果^[18]。此外,座椅舒适性相关研究发现,影响乘坐舒适性的座椅因素并不是独立的,而是相互关联共同对舒适性产生影响^[19-20]。因此,研究多个关键座椅参数在关联作用下的综合运动对动态座椅系统缓解久坐不适的效果具有重要意义。

目前,座椅综合运动模型主要涉及人椅界面

压力和座椅尺寸两类表征形式。座椅尺寸被认为是影响座椅舒适性的关键^[20],然而,座椅的舒适性随乘坐时间的增加而降低^[21]。虽然提高人椅尺寸初始适配性可以延迟不适感的出现,但无法完全避免。因此,研究舒适座椅尺寸在时间维度上的需求变化即动态尺寸,对构建动态座椅的综合运动模型是一项有益的探索。本研究拟基于多个关键座椅尺寸的关联作用,提出一种以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型构建方法。

1 动态座椅综合运动模型构建方法

1.1 方法概述

图1所示为基于动态尺寸的动态座椅综合运动模型的构建方法。该方法主要包括舒适尺寸采集和动态尺寸模型构建两个部分。在第一部分,利用关键尺寸可连续调节的座椅,采集不同体型参与者不同乘坐时长的舒适座椅尺寸。在第二部分,首先利用重复测量方差分析方法检验舒适座椅尺寸在体型变量上的差异显著性,将不存在显著差异的体型归纳为一个潜在组别;然后开发潜在组别内部舒适需求差异的折中处理方法,求解潜在组别内部各变量可以共同使用的折中座椅尺

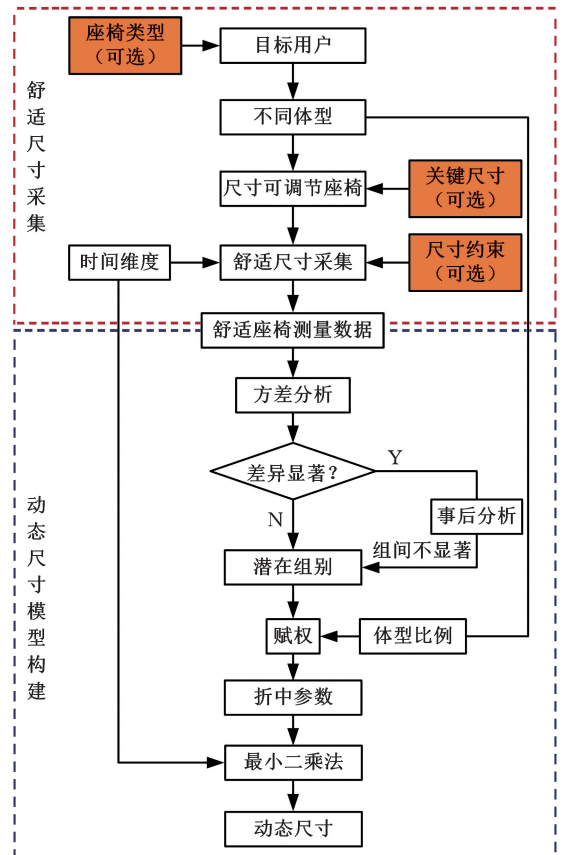


图1 动态座椅综合运动模型构建方法

Fig.1 Method for constructing a comprehensive motion model of dynamic seats

寸,并使其中体型比例更高的人感觉更舒适;最后,利用最小二乘法拟合潜在组别的折中座椅尺寸随时间变化的趋势。

本文以乘客座椅为例,对上述方法进行详细阐述,利用上述方法探索有助于降低乘客久坐不适的动态座椅的综合运动模型。

1.2 舒适尺寸采集

1.2.1 参与者

身高和 BMI 指数作为重要的人体测量特征,在本文被用于定义体型。参考一项共计 1702 个有效样本的国内客舱乘坐舒适性调查中乘客体型分布数据^[22],155~184 cm 身高占比超过 96%,且符合标准 BMI 的乘客数量占优势。为了避免身高和 BMI 指数交叉造成研究变量过多,本实验参与者的选择标准为身高 155~184 cm、体重符合标准 BMI 指数(18.5~23.9)的成年人。

本文以身高作为体型分类依据^[23-24],参考 NHANES III^[25]中关于性别混合人口的分组标准:矮(≤ 164 cm)、中(165~174 cm)、高(≥ 175 cm)的分类,同时对分类进行了细化,并以每 5 cm 作为一个身高分类,共设定了 6 个体型类别(下文用身高区间表示体型)。具体的体型摘要见表 1。最终选择了 48 名参与者,其中男性 24 名(20~39 岁),女性 24 名(20~30 岁)。参与者在过去 3 个月都有公共交通久坐经历,但近期没有身体伤痛。鉴于实验时间超过 2 h,每位参与者都获得劳务报酬。

表 1 参与者的体型摘要

Tab.1 Summary of participant's body type

体型分类	人数	平均身高/ cm	身高 标准差	BMI 平均值	BMI 标准差
155~159 cm	8	157.25	2.76	19.99	1.89
160~164 cm	8	161.88	1.46	21.05	2.00
165~169 cm	8	166.13	1.55	21.37	1.21
170~174 cm	8	171.50	1.41	20.84	1.35
175~179 cm	8	176.25	1.49	20.41	1.29
180~184 cm	8	182.88	1.06	22.38	1.69

1.2.2 实验设备

一项新的研究发现,座高、座板倾角、靠背倾角、腰靠支撑高度、腰靠支撑厚度、颈靠支撑高度和颈靠支撑厚度是决定乘客座椅支撑性能的关键尺寸,这些尺寸影响乘坐姿势和人椅界面压力分布,对乘客座椅的舒适性起着重要作用^[20]。因此,研发了这 7 个关键尺寸可调节的实验座椅,如图 2 所示。7 套电机驱动的调节系统被用来调节 7 个座椅组件,每套调节系统由一个永磁式双向直流电机和一个按钮式双向控制器组成,实现关

键尺寸双向调节。角度和距离传感器被用来测量调整后的 7 个座椅尺寸。

不同类型座椅具有不同的尺寸约束条件。除了受到使用场景和坐姿任务因素的约束外,乘客座椅还受到经济因素影响。为了增加载客量,公共交通工具的乘客座椅采用较小的空间尺寸,例如靠背倾角和座椅前后间距。当前绝大部分飞机经济舱座椅只支持最大 105°的靠背倾角调节,常见的经济舱座椅前后间距为 762 mm。因此,本研究将 105°作为靠背倾角的约束条件,762 mm 作为座椅前后间距的约束条件,探索狭小乘坐空间中的动态尺寸模型。当然,不同交通工具的乘客座椅研究需设置对应乘坐环境的尺寸约束,本文以飞机座椅空间尺寸作为约束条件,研究结果可为飞机座椅提供动态尺寸模型参考。

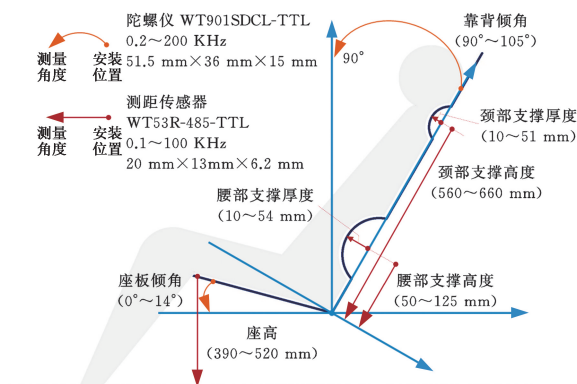


图 2 可调节座椅的可调节尺寸定义及其调节范围
Fig.2 Definition and range of adjustable dimensions of adjustable seats

1.2.3 实验程序

参与者在 2 h 的实验中,坐在可调节座椅上通过操作控制器调节 7 个座椅尺寸,以达到舒适的状态。工作人员则记录每次调节后的舒适座椅尺寸。我们建议参与者尽可能靠在椅背上,并保持轻松的坐姿,但不允许肢体活动超出座椅宽度的范围。实验中还放置了一个带腿洞的座椅,模拟前排座椅对腿部空间的限制。参与者在实验过程中可以进行闭眼休息和凝视,但不能使用手机等电子设备,也不能阅读书报杂志等。具体的实验步骤如下。

1) 在实验开始前,向参与者宣读实验内容、程序和动作规范,并对座椅调节操作进行培训。

2) 进入正式实验时,参与者第一次操作 7 个按钮控制器调节 7 个座椅尺寸,直至达到满意的乘坐体验。

3) 在首次调节后的 2 h 内,参与者每 15 min 调节一次座椅尺寸,直至达到满意的乘坐体验。每次调节座椅的时间没有限制。每次座椅调节

后,工作人员记录调节后的舒适座椅尺寸。实验场景如图 3 所示。



图 3 试验设备与场景

Fig.3 Experimental equipment and scenarios

实验收集了 6 组不同体型的参与者在 2 h 内的 9 个时间点的舒适座椅尺寸,涉及一个主体间因素(6 个体型组别)和一个主体内因素(9 个时间组别)。

1.3 动态尺寸模型构建方法

1.3.1 舒适座椅尺寸的差异分析

本文利用 SPSS 软件进行重复测量方差分析,检验主体间效应(即不同体型乘客舒适座椅尺寸之间的差异),检验主体内效应(即不同时间的舒适座椅尺寸之间的差异),并通过事后比较明确哪些组别间的差异达到显著。基于差异分析结果,将舒适座椅尺寸不存在显著差异的体型归类为一个潜在组别,存在显著差异的分别归类为多个潜在组别。某个指标的尺寸在体型变量上存在不止一个潜在组别,则意味着不同体型旅客所需要的舒适座椅尺寸具有较大差异,不同潜在组别需要不同的舒适尺寸。

1.3.2 折中座椅尺寸计算

潜在组别内部的舒适座椅尺寸不存在显著差异,则认为存在一个折中座椅尺寸能够满足潜在组别内部不同体型参与者的舒适需求。将潜在组别内部对应的体型分布比例作为权重,或者仅目标国家或地区人体尺寸分布比例作为权重^[26],对潜在组别中不同体型对应的舒适座椅尺寸进行赋权求和,得到潜在组别共同使用的折中座椅尺寸,以提高人椅尺寸的适配性。单个座椅指标的折中座椅尺寸计算过程如下。

1) 时间维度上,不同体型的舒适座椅测量数据平均值。体型分类被作为一个集合 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_z\}$, $1 \leq z \leq 6$, 体型 B_z 包含 N 个参与者。 t 表示采集舒适座椅测量数据的第 t 个时间点, $0 \leq t \leq 9$ 。 M 表示座椅指标测量值, M_{N_t} 表

示体型 B_z 中第 N 个参与者在时间 t 的舒适座椅测量数据。 A 表示座椅测量数据平均值, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_t\}$ 。 A_{tB_z} 表示体型 B_z 的所有参与者在第 t 个时间点的舒适座椅尺寸的平均值:

$$A_{tB_z} = \frac{\sum_N M_{N_t}}{N} \quad (1)$$

2) 不存在显著差异的体型按照对应体型分布比例进行赋权求和,得到可共同使用的折中座椅尺寸。假设体型 B_1, B_2, \dots, B_z 对应的舒适座椅测量数据平均值 A 不存在显著差异,那么 B_1, B_2, \dots, B_z 被认为是一个潜在组别。一个潜在组别中的不同体型可以采用同一个折中座椅参数 C , $C = \{C_1, C_2, \dots, C_t\}$, C_t 表示潜在组别折中座椅尺寸在时间 t 的值。

假定潜在组别中不同体型的人数为 H , $H = \{H_{B_1}, H_{B_2}, \dots, H_{B_z}\}$, W 表示体型分布比例(参考一项共计 1702 有效样本的国内客舱舒适调查的乘客体型分布比例^[22],见图 4)。 W_{B_z} 表示体型 B_z 在潜在组别中的人数比例:

$$W_{B_z} = \frac{H_{B_z}}{\sum_z H_{B_z}} \quad (2)$$

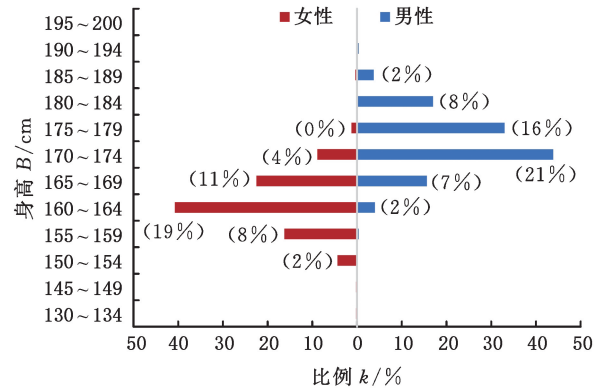


图 4 乘客体型分布比例

Fig.4 Distribution proportion of passenger body types

将潜在组别中不同体型 B_1, B_2, \dots, B_z 对应的体型分布比例 W 作为权重,对 B_1, B_2, \dots, B_z 对应的舒适座椅测量数据平均值 A 进行赋权求和,得到潜在组别可以共同使用的折中座椅参数 C :

$$C_t = \sum_z W_{B_z} A_{tB_z} \quad (3)$$

1.3.3 潜在组别的折中座椅尺寸随时间变化的趋势

在久坐不适的烦躁情绪影响下,参与者能够判断接下来需要更大或更小的尺寸,但对调节幅度的敏感性降低。为求解动态座椅的一种稳健和可追溯的动态尺寸,研究利用最小二乘法拟合折

中座椅参数 C , 使得求解的动态尺寸与实际尺寸之间误差的平方和最小。

假定 C 在时间维度上的集合为 $\{(1, y_1), (2, y_2), \dots, (t, y_t)\}$, y_t 表示时间 t 对应的折中座椅参数, 设定 t 和 y_t 的可拟合函数关系为: $J = f(t)$, 且 $f(t)$ 满足误差平方和 s_{ϵ^2} 最小:

$$\min s_{\epsilon^2} = \sum_{t=1}^9 [y_t - f(t)]^2 \quad (4)$$

满足误差平方和最小的 $f(t)$ 作为拟合曲线, 表示潜在组别的折中座椅尺寸在时间维度上的趋势 $J, J = \{J_1, J_2, \dots, J_t\}$ 。 J_t 表示潜在组别折中座椅参数在时间 t 的趋势值。不同潜在组别的折中座椅尺寸的变化趋势值 J_t 构成了动态座椅综合运动模型的动态尺寸。

表 2 不同体型参与者在不同乘坐时长的舒适座椅尺寸差异检验

Tab.2 Verification of differences in comfortable seating dimensions for participants of different body types and different ride durations

部位	检验项		Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	P	η^2
座高	主体内	时间	1844.920	3.221	572.731	1.995	0.113	
		时间×体型	4418.621	16.106	274.340	0.956	0.509	
	主体间		12207.401	5	2441.480	0.999	0.430	
座板倾角	主体内	时间	16.784	3.695	4.543	1.117	0.349	
		时间×体型	89.930	18.474	4.868	1.197	0.268	
	主体间		772.652	5	154.530	4.754	0.002	0.361
靠背倾角	主体内	时间	19.584	4.986	3.928	2.297	0.057	
		时间×体型	31.344	24.928	1.257	0.735	0.817	
	主体间		44.149	5	8.830	1.572	0.189	
腰靠高度	主体内	时间	1932.366	2.979	648.649	1.069	0.365	
		时间×体型	11743.968	14.895	788.434	1.299	0.213	
	主体间		25444.324	5	5088.865	1.341	0.266	
腰靠厚度	主体内	时间	3052.074	3.261	936.054	14.423	0	0.256
		时间×体型	1171.843	16.303	71.879	1.108	0.354	
	主体间		1825.824	5	365.165	0.565	0.726	
颈靠高度	主体内	时间	3147.366	2.920	1077.811	1.346	0.263	
		时间×体型	14348.301	14.601	982.711	1.227	0.262	
	主体间		158053.907	5	31610.781	4.421	0.003	0.345
颈靠厚度	主体内	时间	444.171	4.389	101.209	2.109	0.075	
		时间×体型	2166.801	21.943	98.745	2.058	0.055	
	主体间		2499.678	5	499.936	0.638	0.672	

注: $\eta^2 \geq 0.14$ 表示高度关联强度; $0.14 > \eta^2 > 0.06$ 表示中度关联强度; $\eta^2 < 0.06$ 表示低度关联强度。

主体内效应检验结果显示, 在 7 个座椅参数中, 只有腰靠厚度 ($F = 14.423, P < 0.001$) 在时间维度上存在显著差异。此外, 体型对座椅参数的影响不会随着时间的变化而发生变化 (时间×体型均有 $P > 0.05$)。在主体间效应检验中, 不同体型的参与者在舒适座板倾角 ($F = 4.754, P < 0.01$) 和颈靠高度 ($F = 4.421, P < 0.01$) 方面存在显著差异。为进一步研究体型间的具体差异, 对座板倾角和颈靠高度进行事后分析。

2.2 体型组别差异的事后比较

主体间效应检验结果表明, 不同体型的参与

2 动态座椅综合运动模型构建结果

2.1 舒适座椅尺寸的差异比较结果

进行主体内效应检验之前, 分别对 7 个座椅参数的测量数据进行球形检验。结果显示, 所有参数的球形检验 P 值均小于 0.05, 表明数据不符合球形假设。此外, 球形度值 $W < 0.75$ 。同时, 主体内效应在 Multivariate Tests 中的四种检验结果 (Pillai's Trace, Wilks' Lambda, Hotelling's Trace 和 Roy's Largest Root) 与一元方差分析结果一致。基于这些一致结果, 我们选择采用一元方差分析结果中 Greenhouse-Geisser 的校正结果进行主体内效应检验。主体内效应和主体间效应检验的结果见表 2。

者在舒适座板倾角和颈靠高度上存在显著差异。基于这一结果, 以 6 个体型组别作为分组变量, 对座板倾角和颈靠高度在不同体型组别间的差异进行事后比较。方差同质性检验结果显示, 6 组座板倾角的方差不符合同质性假定 ($F = 31.306, P < 0.001$), 因此选用 Tamhane's T2 方法进行事后比较, 结果见表 3。

座板倾角与体型变量存在高度关联 ($\eta^2 = 0.361$), 即座板倾角的变异量有 36.1% 可以由用户体型变量解释。就不同体型的舒适座板倾角差异而言, 体型 180~184 cm 显著大于其他体型; 体

表 3 不同体型的座板倾角差异事后比较

Tab.3 Post hoc comparison of differences in seat plate inclination angles of different body types

第 1 组 体型分类	第 2 组 体型分类	平均值 差值/(°)	标准 误差	显著 性	95%置信区间	
					下限	上限
155~159 cm	160~164 cm	-1.042	0.370	0.057	-2.102	0.018
	165~169 cm	-0.462	0.370	0.813	-1.522	0.598
	170~174 cm	-1.828 *	0.373	0	-3.074	-0.582
	175~179 cm	-1.993 *	0.370	0	-3.053	-0.933
	180~184 cm	-4.122 *	0.370	0	-5.182	-3.062
160~164 cm	165~169 cm	0.580	0.370	0.621	-0.480	1.640
	170~174 cm	-0.786	0.370	0.277	-1.846	0.274
	175~179 cm	-0.951	0.370	0.107	-2.011	0.109
165~169 cm	170~174 cm	-1.366 *	0.370	0.003	-2.426	-0.306
	175~179 cm	-1.531 *	0.370	0.001	-2.591	-0.471
	180~184 cm	-3.660 *	0.370	0	-4.720	-2.600
170~174 cm	175~179 cm	-0.165	0.370	0.998	-1.225	0.895
	180~184 cm	-2.294 *	0.370	0	-3.354	-1.234
175~179 cm	180~184 cm	-2.129 *	0.370	0	-3.189	-1.069

注：“*”表示平均值差异达到显著。

型 170~174 cm、175~179 cm 显著大于体型 155~159 cm、165~169 cm；体型 170~174 cm 与 175~179 cm 之间没有显著差异；体型 155~159 cm 与 165~169 cm 之间没有显著差异。因此，可以将 155~169 cm 归为一个潜在组别，采用相同的座板倾角，将 170~179 cm 归为另一个潜在组别，将 180~184 cm 作为第三个潜在组别。

6 组颈靠高度的方差不符合同质性假定 ($F = 32.370$, $P < 0.001$)，因此选用 Tamhane's T2 方法进行事后比较，结果见表 4。

表 4 不同体型的颈靠高度差异多重比较

Tab.4 Multiple comparisons of neck height differences among different body types

第 1 组 体型分类	第 2 组 体型分类	平均值 差值/cm	标准 误差	显著 性	95%置信区间	
					下限	上限
155~159 cm	160~164 cm	-6.458	5.208	0.908	-23.87	10.95
	165~169 cm	-9.458	5.208	0.654	-26.87	7.95
	170~174 cm	-15.833	5.208	0.102	-33.24	1.58
	175~179 cm	-42.014	5.208	0	-59.43	-24.60
	180~184 cm	-51.681	5.208	0	-69.09	-34.27
160~164 cm	165~169 cm	-3.000	5.208	0.997	-20.41	14.41
	170~174 cm	-9.375	5.208	0.663	-26.79	8.04
	175~179 cm	-35.556	5.208	0	-52.97	-18.14
	180~184 cm	-45.222	5.208	0	-62.63	-27.81
165~169 cm	170~174 cm	-6.375	5.208	0.913	-23.79	11.04
	175~179 cm	-32.556	5.208	0	-49.97	-15.14
	180~184 cm	-42.222	5.208	0	-59.63	-24.81
170~174 cm	175~179 cm	-26.181	5.208	0	-43.59	-8.77
	180~184 cm	-35.847	5.208	0	-53.26	-18.44
175~179 cm	180~184 cm	-9.667	5.208	0.632	-27.08	7.74

注：“*”表示平均值差异达到显著。

颈靠高度与体型变量存在高度关联 ($\eta^2 = 0.345$)，即颈靠高度的变异量有 34.5% 可以由用

户体型变量解释。就不同体型的舒适颈靠高度差异而言，体型 175~179 cm、180~184 cm 显著大于体型 155~159 cm、160~164 cm、165~169 cm、170~174 cm；体型 175~179 cm 与体型 180~184 cm 之间没有显著差异；体型 155~159 cm、160~164 cm、165~169 cm、170~174 cm 之间也没有显著差异。因此，可以将 155~174 cm 归为一个潜在组别，采用相同的颈靠高度，将 175~184 cm 归为另一个潜在组别。

2.3 动态座椅综合运动模型的动态尺寸

差异检验结果显示：身高为 155~184 cm 的标准体重者在座高、靠背倾角、腰靠高度、腰靠厚度、颈靠厚度五个座椅尺寸上可以采用同一个折中座椅尺寸。然而，155~169 cm、170~179 cm、180~184 cm 这三个潜在组别需要采用不同的座板倾角。159~174 cm、175~184 cm 这两个潜在组别需要采用不同的颈靠高度。

利用式(3)计算出潜在组别可以共同使用的折中座椅尺寸 C ，并在时间维度上得到 9 个变化值(图 5 中的灰色圆圈表示不同体型舒适座椅测量数据平均值 A)。

为了避免过拟合现象，式(4)采用二项式最小二乘法对折中座椅尺寸变化值 C_i 进行趋势拟合，以求解变化趋势 J (见图 5 中红色曲线，其中 R^2 表示拟合优度)。不同体型组别在不同时间对应的座椅尺寸构成了动态座椅综合运动模型的动态尺寸。

以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型显示，舒适的座高、靠背倾角、腰靠高度、腰靠厚度、颈靠厚度在 155~184 cm 的体型区间内不存在显著差异，因此它们的动态尺寸只有一组(见图 5a、图 5c、图 5d、图 5e、图 5g)，但并不存在单一的座板倾角和颈靠高度能够同时满足 155~184 cm 体型用户的舒适需求。

在动态座椅综合运动模型中，座板倾角包括三组动态尺寸，分别适配 155~169 cm、170~179 cm、180~184 cm 这三个体型群体(见图 5b)。这三组座板倾角动态尺寸与体型呈正相关。有研究表明，舒适座板倾角在不同人体测量特征上存在较大差异^[17]。这与坐姿时膝盖的高度相关，即身高越高，膝高就越高，从而导致大腿与座板平面之间的夹角越大。因此，身高较高的人需要更大的座板倾角来提供大腿的支撑。此外，受限的座椅前后间距导致身高越高的人越需要通过前伸小腿来调节膝关节的应力，这会增加人椅座面的剪切力。通过增加座板倾角可以部分抵消剪切力的影响。

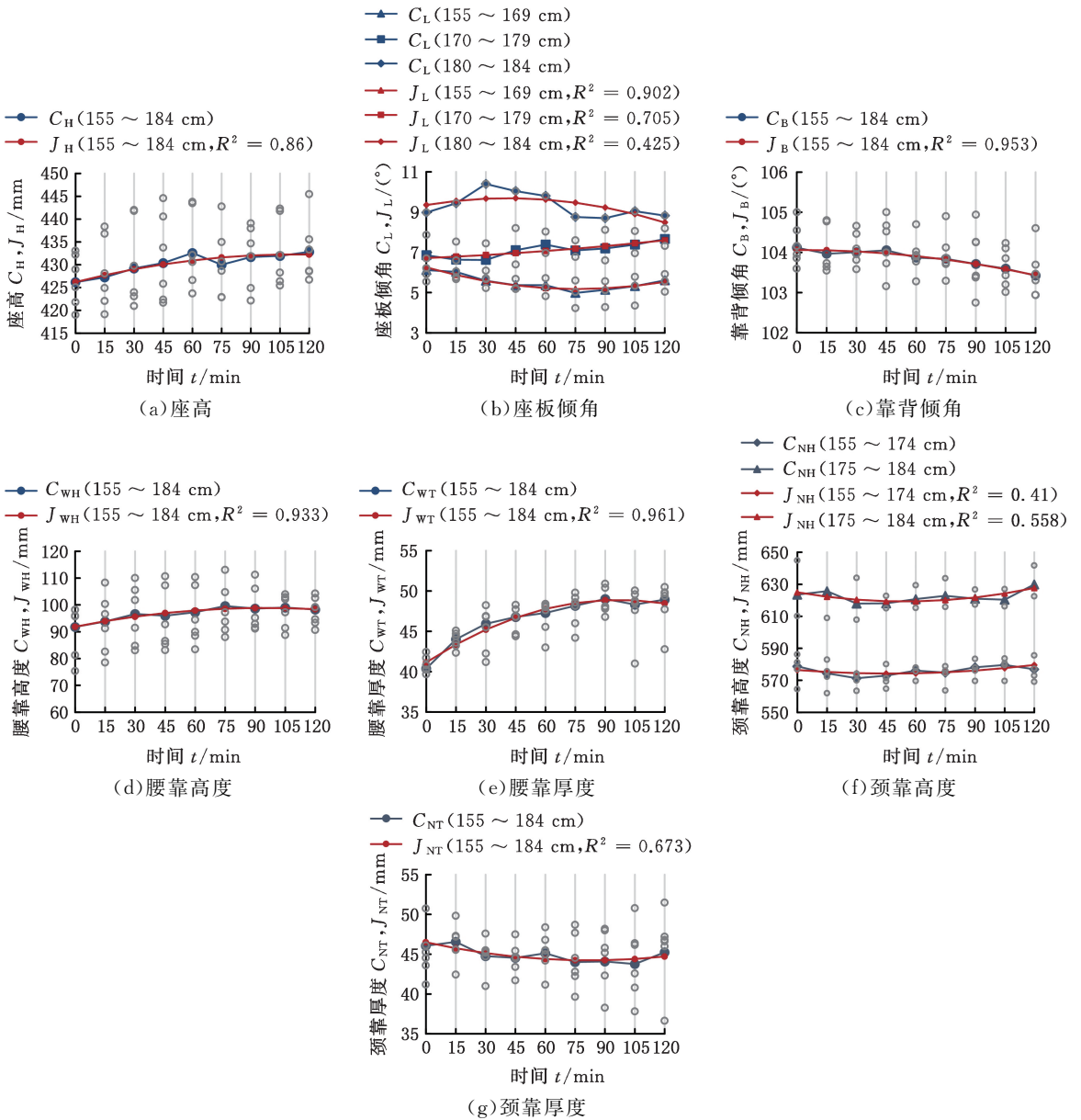


图5 动态座椅综合运动模型的动态尺寸

Fig.5 Dynamic dimensions of a comprehensive motion model of dynamic seats

颈靠高度包括两组动态尺寸,分别适配155~174 cm和175~184 cm两个体型群体(见图5f)。颈靠高度的动态尺寸与体型呈正相关。这与人体坐姿时颈椎点的高度相关,颈靠高度稍小于坐姿时颈椎点高度。这一差异的重要原因之一是在测量人体尺寸时采用了挺直脊柱的坐姿,用于确定颈椎点高度的标准,然而,在舒适的坐姿中,身体倾向于放松的姿势,导致颈椎点的高度降低。其次,相对于肩背区域,颈部对压力更敏感^[21]。因此,颈靠的最凸点高度稍小于坐姿时颈椎点的高度。

3 动态座椅综合运动模型有效性评估

3.1 基于被试内设计的动态尺寸有效性评估

为了验证上述研究中动态尺寸对降低久坐不

适的有效性,采用被试内设计进行了两个评价实验:动态尺寸舒适性评价实验和静态尺寸舒适性评价实验。每个实验持续2 h,并在之前进行了舒适尺寸采集实验的参与者群体中,随机邀请了30名参与者进行测试。

在动态尺寸舒适性评价实验中,按照座椅综合运动模型 J_i 设置了动态尺寸。而在静态尺寸舒适性评价实验中,按照 J_1 设置了静态尺寸。在每个实验的第60 min和第120 min,参与者使用人体部位不舒适量表(图6)对人体的不同部位和整体舒适性进行评价。评价采用5级标度法,范围从“没有不舒适”到“极端不舒适”。为了确保实验的可靠性,动态尺寸和静态尺寸评价实验在完全相同的实验场所中进行,并且两个评价实验之间间隔了1周时间。

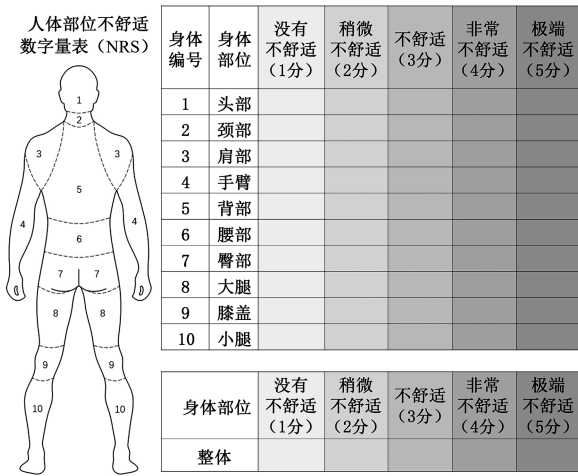


图 6 人体部位不舒适评价量表

Fig.6 Human body discomfort evaluation scale

研究采用配对样本 T 检验方法,对比了采用动态尺寸和静态尺寸时,在 1 h 和 2 h 的人体部位不舒适评价均值之间的差异显著性。对比结果用于评估基于上述动态尺寸的动态座椅综合运动模型在降低久坐不适方面的效果。

基于被试内设计的动态尺寸有效性对比评估结果见表 5。

结果显示,动态尺寸在 1 h 和 2 h 对于 10 个人体部位和整体的不适评价均值低于静态尺寸,即使用动态尺寸引发更低的不适感。具体而言,在颈部、背部、腰部、臀部以及整体不舒适评价上,动态尺寸和静态尺寸之间的差异在 1 h 和 2 h 都达到了显著水平($P < 0.05$)。然而,肩部和大腿的不适评价差异仅在 1h 达到显著水平($P <$

表 5 动态尺寸舒适性和静态尺寸舒适性的差异检验结果

Tab.5 The difference test results between dynamic size comfort and static size comfort

身体部位	时间/h	配对变量	平均数	个案数	标准差	标准误差	t 值	P 值
颈部	1	动态尺寸	1.97	30	0.890	0.162	3.525	0.001
		静态尺寸	1.67	30	0.758	0.138		
	2	动态尺寸	2.03	30	0.890	0.162	3.010	0.005
		静态尺寸	1.70	30	0.702	0.128		
肩部	1	动态尺寸	1.37	30	0.615	0.112	2.112	0.043
		静态尺寸	1.23	30	0.504	0.092		
	2	动态尺寸	1.43	30	0.626	0.114	1.000	0.326
		静态尺寸	1.33	30	0.547	0.100		
背部	1	动态尺寸	1.53	30	0.730	0.133	2.504	0.018
		静态尺寸	1.27	30	0.450	0.082		
	2	动态尺寸	1.80	30	0.847	0.155	2.971	0.006
		静态尺寸	1.57	30	0.817	0.149		
腰部	1	动态尺寸	1.73	30	0.828	0.151	2.804	0.009
		静态尺寸	1.47	30	0.629	0.115		
	2	动态尺寸	2.07	30	1.081	0.197	2.504	0.018
		静态尺寸	1.80	30	0.887	0.162		
臀部	1	动态尺寸	1.70	30	0.915	0.167	2.262	0.031
		静态尺寸	1.50	30	0.682	0.125		
	2	动态尺寸	2.43	30	0.935	0.171	3.791	0.001
		静态尺寸	2.00	30	0.947	0.173		
大腿	1	动态尺寸	1.33	30	0.479	0.088	2.112	0.043
		静态尺寸	1.20	30	0.407	0.074		
	2	动态尺寸	1.67	30	0.922	0.168	1.720	0.096
		静态尺寸	1.50	30	0.820	0.150		
整体	1	动态尺寸	2.00	30	0.643	0.117	3.808	0.001
		静态尺寸	1.67	30	0.606	0.111		
	2	动态尺寸	2.53	30	0.937	0.171	3.010	0.005
		静态尺寸	2.20	30	0.887	0.162		

注:表中仅保留存在显著差异的部位。

0.05),在 2 h 则未达到显著水平($P > 0.05$)。另外,头部、手臂、膝盖、小腿的不适评价差异在 1 h 和 2 h 均未达到显著水平($P > 0.05$)。因此,动态尺寸并不能有效降低所有人体部位的久坐不适,例如头部、手臂、膝盖、小腿、肩部和大腿,但在降低颈部、腰部、背部、臀部和整体不舒适上具有显著性。相关研究发现,与乘坐舒适性相关的 5 个

关键人体部位中背部、腰部和臀部对乘坐舒适性的影响权重较大,肩部和大腿则较小^[27]。因此动态尺寸在降低关键人体部位的久坐不适问题上是有有效的。

动态座椅降低人体部位久坐不适的效果与动态座椅中可调节的座椅参数相关。本研究中,动态调节腰靠高度、腰靠厚度、颈靠高度、颈靠厚度

和靠背倾角可以对腰部、背部和颈部形成动态刺激。动态调节座板倾角和座高则对臀部形成动态刺激。因此,本文提出的动态尺寸对颈部、腰部、背部和臀部的不适干预效果显著,降低人体整体不适感知的效果显著。

3.2 综合运动模型构建方法创新性讨论

本文提出了一种以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型的构建方法。主要创新如下:

1)以动态尺寸为表征的座椅运动模型。动态尺寸为座椅运动模型提供了一种新的表征形式。目前,动态座椅的运动模型主要以压力的合理分布为导向,例如静态目标压力分布^[14]或者压力重复性变化^[28],而忽略了人体在坐姿中的角度和轮廓变化。本文基于舒适座椅尺寸随时间变化的趋势构建了动态尺寸,能够更好地适应用户在使用座椅过程中不同姿势和运动需求,更全面地考虑座椅对人体的支撑性能。

2)多尺寸关联作用下的座椅综合运动模型。干预久坐不适的动态坐姿是一种综合的人椅交互行为,涉及多种坐姿运动类型的联动,因此需要综合的座椅运动去实现。为实现这一目标,本研究利用7个相互关联的座椅支撑性能尺寸构建座椅综合运动模型,实现人体坐姿时小腿-大腿-躯干角度和背部轮廓的关联变化^[20]。相对于单个腰部支撑或座板-靠背角度变化,多个关键尺寸关联作用的座椅运动模型能够准确模拟综合性的人椅交互行为,并且更符合人体通过“坐立不安”运动缓解久坐不适的自然补偿机制。

3)基于潜在群体的座椅尺寸设计方法。人体测量特征是座椅尺寸设计的主要依据^[21, 29]。然而,人体测量特征的多样性和不适感知主观性,导致为不同测量特征乘客提供定制化的动态尺寸是困难的。因此,本研究通过将舒适座椅尺寸中无显著差异的体型归类为潜在群体来解决这个问题。潜在群体的形成表明存在一个舒适座椅尺寸,能够满足这个群体中不同体型变量的舒适要求。为了确定这个舒适座椅尺寸,研究使用了潜在群体中不同体型的舒适座椅测量数据的平均值,并根据不同体型对应的人数占比进行加权求和。这样的加权计算使得座椅尺寸更贴近占主导地位体型比例的乘客需求。潜在群体的划分和加权有助于提升座椅尺寸与不同体型的适配关系,最大程度地满足不同体型用户的舒适性需求。本研究局限性如下:

1)座椅动态尺寸构建方法需要根据具体座椅类型和使用场景设置可调节的关键参数和尺寸约

束等。本研究以乘客座椅为例,将飞机经济舱座椅的空间尺寸作为尺寸约束,因此研究结果仅适用于飞机经济舱座椅的动态座椅设计。若要寻求其他类型乘客座椅的久坐干预,需要基于本研究提出的动态尺寸构建方法,设定对应的尺寸约束,进行针对性研究。

2)本研究参与者体型参考了一项国内飞行乘客的体型分布数据,研究结果仅适用于中国或乘客体型相似的地区。若要探索适用于更广泛市场的乘客座椅,需要纳入更大的体型范围,以进行舒适测量数据的采集和分析。

3)文中仅探讨了以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型,若要实现更好的久坐干预效果,有必要进一步研究动态座椅的轻量化和控制系统等。

4 结论

1)本研究提出了动态尺寸构建方法,可以根据不同座椅类型设置可调节的关键参数和尺寸约束,从而提高了座椅动态尺寸构建方法的适用性。该方法为乘客甚至驾驶员的动态座椅综合运动模型构建提供了有价值的方法借鉴。

2)动态座椅综合运动模型包括座高、座板倾角、靠背倾角、腰靠高度、腰靠厚度、颈靠高度和颈靠厚度这7个关键参数的关联运动。该模型能够准确地模拟综合性的人椅交互行为,并且更符合人体通过复杂的综合运动来缓解久坐不适的自然补偿机制。

3)座椅动态尺寸构建方法基于不同体型特征乘客舒适尺寸需求的差异性分析,探讨了舒适需求的共性,并提出了基于体型比例赋权的舒适尺寸差异折中处理方法,以最大化共性需求的舒适效应。这不仅提高了动态尺寸对不同体型特征群体的适应性,同时减少了动态尺寸的运动维度,从而有助于提高动态座椅的运动效率。

4)以飞机乘客座椅为例的动态座椅综合运动模型中,座高、靠背倾角、腰靠高度、腰靠厚度、颈靠厚度均只需要一组动态尺寸即可满足155~184 cm乘客在2 h的持续乘坐中的舒适性。而座板倾角根据体型差异需要三组动态尺寸,颈靠高度需要两组动态尺寸。

5)在2 h的持续乘坐中,以动态尺寸为表征综合运动的动态座椅能够显著降低关键人体部位(颈部、背部、腰部、臀部)和人体整体的不舒适感。

参考文献:

[1] 高莹,李青阳,王健.久坐间断的生理学基础及干预

- 效应[J]. 中国公共卫生, 2022, 38(12):1623-1629.
- GAO Ying, LI Qingyang, WANG Jian. Physiological Effects of Breaking Up Prolonged Sitting Time: a Review[J]. Chinese Journal of Public Health, 2022, 38(12):1623-1629.
- [2] O'SULLIVAN K, O'KEEFFE M, O'SULLIVAN L, et al. The Effect of Dynamic Sitting on the Prevention and Management of Low back Pain and Low Back Discomfort: a Systematic Review[J]. Ergonomics, 2012, 55(8):898-908.
- [3] VARELA M, GYI D, MANSFIELD N, et al. Engineering Movement into Automotive Seating: Does the Driver Feel More Comfortable and Refreshed? [J]. Applied Ergonomics, 2019, 74:214-220.
- [4] KETT A R, SICHTING F. Sedentary Behaviour at Work Increases Muscle Stiffness of the Back: Why Roller Massage Has Potential as an Active Break Intervention [J]. Applied Ergonomics, 2020, 82: 102947.
- [5] KERAUTRET Y, Di RIENZO F, EYSSAUTIER C, et al. Selective Effects of Manual Massage and Foam Rolling on Perceived Recovery and Performance: Current Knowledge and Future Directions toward Robotic Massages[J]. Frontiers in Physiology, 2020, 11:598898.
- [6] ERIKSSON CROMMERT M, LACOURPAILLE L, HEALES L J, et al. Massage Induces an Immediate, Albeit Short-term, Reduction in Muscle Stiffness[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2015, 25(5):e490-e496.
- [7] BOUWENS J M A, FASULO L, HIEMSTRA-VAN MASTRIGT S, et al. Effect of In-seat Exercising on Comfort Perception of Airplane Passengers [J]. Applied Ergonomics, 2018, 73:7-12.
- [8] HIEMSTRA-VAN MASTRIGT S, KAMP I, van VEEN S A T, et al. The Influence of Active Seating on Car Passengers' Perceived Comfort and Activity Levels[J]. Applied Ergonomics, 2015, 47:211-219.
- [9] LAMPE D, DEML B. Reducing Passive Driver Fatigue through a Suitable Secondary Motor Task by Means of an Interactive Seating System[J]. Applied Ergonomics, 2022, 103:103773.
- [10] KOREA K U S, KIM W. Smart Chair Cover for Posture Correction [J]. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2019, 7(8):191-196.
- [11] JEONG H, PARK W. Developing and Evaluating a Mixed Sensor Smart Chair System for Real-time Posture Classification: Combining Pressure and Distance Sensors[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2021, 25(5):1805-1813.
- [12] 房志远, 石守东, 郑佳馨, 等. 基于神经网络的骨骼特征融合下坐姿快速识别[J]. 传感技术学报, 2022, 35(5):613-620.
- FANG Zhiyuan, SHI Shoudong, ZHENG Jiaqing, et al. Fast Recognition of Sitting Posture Based on Neural Network under Bone Feature Fusion[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(5):613-620.
- [13] RAN Xu, WANG Cong, XIAO Yao, et al. A Portable Sitting Posture Monitoring System Based on a Pressure Sensor Array and Machine Learning [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331:112900.
- [14] CAMPOS G H, XI F J. Pressure Sensing of an Aircraft Passenger Seat with Lumbar Control[J]. Applied Ergonomics, 2020, 84:103006.
- [15] 杨洋, 程尚坤, 齐健, 等. 基于人机工效学的农机座椅自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6):434-442.
- YANG Yang, CHENG Shangkun, QI Jian, et al. Design and Test of Automatic Leveling System for Agricultural Machinery Seat Based on Ergonomics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):434-442.
- [16] BAUMGART C, FREIWALD J, KÜHNEMANN M, et al. Foam Rolling of the Calf and Anterior Thigh: Biomechanical Loads and Acute Effects on Vertical Jump Height and Muscle Stiffness [J]. Sports, 2019, 7(1):27.
- [17] Van VEEN S A T, ORLINSKIY V, FRANZ M, et al. Investigating Car Passenger Well-being Related to a Seat Imposing Continuous Posture Variation[J]. Journal of Ergonomics, 2015, 5(3): 1000140.
- [18] MCGILL S M, FENWICK C M J. Using a Pneumatic Support to Correct Sitting Posture for Prolonged Periods: a Study Using Airline Seats[J]. Ergonomics, 2009, 52(9):1162-1168.
- [19] WEGNER M, MARTIC R, FRANZ M, et al. A System to Measure Seat-human Interaction Parameters Which Might Be Comfort Relevant[J]. Applied Ergonomics, 2020, 84:103008.
- [20] WANG Jin, ZHI Jinyi, DU Yang, et al. A Method Identifying Key Optimisation Points for Aircraft Seat Comfort[J]. Ergonomics, 2021, 64(3): 287-304.
- [21] HIEMSTRA-VAN MASTRIGT S, GROENEST-EIJN L, VINK P, et al. Predicting Passenger Seat Comfort and Discomfort on the Basis of Human, Context and Seat Characteristics: a Literature Review[J]. Ergonomics, 2017, 60(7):889-911.
- [22] WANG Jin, ZHI Jinyi, XIANG Zerui, et al. Enhancing Aircraft Cabin Comfort to Compete with

- High-speed Trains: a Survey in China[J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2021, 31(3):300-315.
- [23] WANG Xuguang, CARDOSO M, BEURIER G. Effects of Seat Parameters and Sitters' Anthropometric Dimensions on Seat Profile and Optimal Compressed Seat Pan Surface[J]. Applied Ergonomics, 2018, 73:13-21.
- [24] LI Wenhua, YU Suihuai, YANG Haicheng, et al. Effects of Long-duration Sitting with Limited Space on Discomfort, Body Flexibility, and Surface Pressure[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2017, 58:12-24.
- [25] National Center for Health Statistics. Plan and Operation of the Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988-94. Series 1: Programs and Collection Procedures[M]. Hyattsville: U. S. Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Health Statistics, 1994.
- [26] 范沁红, 江星辰, 武学良, 等. 基于理想压力的机车座椅优化设计与舒适度试验研究[J]. 机械工程学, 2022, 58(10):383-394.
FAN Qinrong, JIANG Xingchen, WU Xueliang, et al. Experimental Research on Optimization Design and Comfort of Locomotive Seat Based on Ideal Pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10):383-394.
- [27] 黄深荣, 张志飞, 袁泉, 等. 人体各部位对坐姿静态舒适性的权重系数[J]. 汽车工程, 2016, 38(7):889-895.
HUANG Shenrong, ZHANG Zhifei, YUAN Quan, et al. Weight Coefficients of Different Body Parts to Whole Body in Terms of Static Comfort in Sitting Posture [J]. Automotive Engineering, 2016, 38(7):889-895.
- [28] SCHNEIDER L, SOGEMEIER D, WEBER D, et al. Effects of a Seat-integrated Mobilization System on Long-haul Truck Drivers Motion Activity, Muscle Stiffness and Discomfort during a 4.5-h Simulated Driving Task[J]. Applied Ergonomics, 2023, 106:103889.
- [29] ANJANI S, LI Wenhua, RUITER I A, et al. The Effect of Aircraft Seat Pitch on Comfort[J]. Applied Ergonomics, 2020, 88:103132.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:**王金*, 男, 1991年生, 博士、讲师。研究方向为工业设计、人机功效、舒适性。E-mail:344105692@qq.com。
- 本文引用格式:**
王金, 张旭伟, 陈剑平, 等. 以动态尺寸为表征的动态座椅综合运动模型研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(3):623-633.
WANG Jin, ZHANG Xuwei, CHEN Jianping, et al. Research on Comprehensive Motion Model of Dynamic Seats Characterized by Dynamic Dimensions[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):623-633.
-
- (上接第 622 页)
- [17] De MOERLOOSE P, MAENHOUT B. A Two-stage Local Search Heuristic for Solving the Steel-making Continuous Casting Scheduling Problem with Dual Shared-resource and Blocking Constraints[J]. Operational Research, 2023(23):1-2.
- [18] 李焱, 唐倩, 刘联超, 等. 基于改进蚁群算法的汽车混流装配调度模型求解[J]. 中国机械工程, 2021, 32(9):1126-1133.
LI Yi, TANG Qian, LIU Lianchao, et al. An Improved ACO Algorithm for Automobile Mixed-flow Assembly Scheduling Problems [J], China Mechanical Engineering, 2021, 32(9):1126-1133.
- [19] 路浩, 陈洋, 吴怀宇, 等. 受路网和测量约束的变电站巡检机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2021, 32(16):1972-1982.
LU Hao, CHEN Yang, WU Huaiyu, et al. Path Planning of Substation Inspection Robot under Road Network and Measurement Constraints[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(16):1972-1982.
- (编辑 胡佳慧)
-
- 作者简介:**李毅仁, 男, 1974年生, 正高级工程师、博士研究生。研究方向为生产计划与调度。发表论文 10 余篇。E-mail:liyiren@hbisco.com。袁帅鹏*(通信作者), 男, 1993年生, 讲师、博士。研究方向为智能优化算法。发表论文 10 余篇。E-mail:yuansp@ustb.edu.cn。
- 本文引用格式:**
李毅仁, 王柏琳, 袁帅鹏, 等. 考虑结晶器在线调宽浇次计划的改进蚁群算法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(3):614-622.
LI Yiren, WANG Bailin, YUAN Shuai-peng, et al. An Improved Ant Colony Algorithm for Cast Plan Considering Online-width-adjustment Technology of Crystallizers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):614-622.