

针对疫情时期防护用口罩不适问题的结构改良设计

王文慧^{1,2}, 李鹏³, 杨木生¹, 巢媛¹

(1.江苏理工学院 艺术设计学院, 常州 213001; 2.东明大学 建筑与设计学院, 釜山 48520;
江苏理工学院 计算机工程学院, 常州 213001)

摘要: **目的** 针对防护用口罩在长时间穿戴时普遍存在的身体不适问题进行改良设计, 以求提高人体穿戴体验、避免不适感对人体产生负面影响。**方法** 基于 U-TRIZ 理论的解题方法, 探讨了防护用口罩的不适问题, 提出疫情突发时期物资紧缺、社会生产压力大、医护人员长时间工作等特殊情况下的口罩改良原则和结构改良设计方案, 并通过设计实践和穿戴实验对改良设计方案进行可行性验证。**结论** 经新冠肺炎疫情期间的穿戴实验证明, 可调节式口罩带、分散压力式气囊口罩沿和眼镜防滑条的口罩结构改良设计, 可有效解决现有口罩大部分不适问题。有效改善因压力不均而脸部疼痛、因口罩带拉力而耳部疼痛和眼镜滑动的问题, 有效缓解因密合度不够而眼镜起雾的问题, 使口罩的穿戴舒适度提升, 同时更加契合面部形态、缩短穿戴时间。

关键词: 疫情时期; 防护用口罩; 口罩不适问题; U-TRIZ; 结构改良设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0139-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.013

Structural Improvement Design for Uncomfortable Problems of Protective Masks During Epidemic Period

WANG Wen-hui^{1,2}, LI Peng³, YANG Mu-sheng¹, CHAO Yuan¹

(1.College of Art and Design, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2.College of Architecture and Design, Tongmyong University, Busan 48520, Korea;

3.School of Computer Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

ABSTRACT: This paper is designed to improve the discomfort problems that is common in protective masks when worn for a long time, in order to improve the wearing experience and avoid the negative impact of discomfort on the human body. Based on the U-TRIZ theory, the discomfort of protective masks is discussed. The principle of mask improvement and structural improvement design schemes for special circumstances such as shortage of materials high social production pressure and long working hours of medical staff during the outbreak of epidemic are proposed. And the feasibility of the improvement design was verified through design practice and wearing experiments. During the COVID-19, the wearing experiments showed that the adjustable respirator belt, pressure-dispersing airbag mask edges and anti-slip bars for glasses can effectively solve the most of uncomfortable problems caused by long-term wearing of existing masks. Moreover, the problem of face pain due to uneven pressure, ear pain due to the tension of the mask and glass slippage can be effectively alleviated, and the problem of glasses fogging due to insufficient fit can be effectively alleviated, and the wearing comfort of the mask can be improved. As a result, the mask can fit the face more closely, and the wearing time can be shortened.

KEY WORDS: epidemic period; protective masks; uncomfortable problems of masks; U-TRIZ; structural improvement design

收稿日期: 2021-05-09

作者简介: 王文慧 (1990—), 女, 山东人, 博士, 江苏理工学院艺术设计学院讲师, 主要研究方向为产业设计与创新。

通信作者: 李鹏 (1989—), 男, 山东人, 博士, 江苏理工学院计算机工程学院讲师, 主要研究方向为智能设计。

口罩具有防护有效、价格低廉的优点,是疫情时期常用的呼吸道防护用品。但目前口罩的舒适性较差,有面部压迫、接触不适、口罩内湿热等问题,对穿戴者的身体和心理带来负担,甚至会干扰身体的运行机能^[1]、影响医护穿戴者的工作效率^[2-3],因此改良口罩具有解决问题的现实意义。疫情是指疫病发生和发展情况,近年来,疫情的发生频率较高,已出现新冠肺炎、流感等重大疫情,对社会发展和公众健康造成威胁。疫情往往具有大规模性、突发性特点,加之口罩是易耗品,因此短时间内提供大量口罩对社会生产是一种挑战。疫情时期口罩需求量大、生产时间紧的特殊情况,使改良口罩设计有不同于平时的要求。对其进行针对性地研究可有效契合问题,争取以较低的成本和简单的工艺改善不适问题,为社会生产提供参考。

近年来,口罩舒适性受到国内外学者的关注,研究主要集中在现有口罩的不良影响和针对性改良两个方面。其中陈美玉等人对市场上常见口罩的过滤特征和舒适性进行了研究,并指出 N95 等功能性口罩的舒适性较差有待改进^[4]。丁文彬等人对市场上常见口罩的防护效果进行了综合评估,并指出部分口罩不契合国人脸型,需要改进^[5]。T Johnson 对口罩等呼吸防护设备对人体呼吸、热感、心理和行为的影响进行了综述,为更好地穿戴和改良口罩提供参考^[1]。Sara M Locatelli 等人研究了医护人员穿戴口罩的不适感及其对工作效率的不良影响^[2]。Aliya S Baig 等人指出穿戴不适感使医护人员难以坚持佩戴 N95 口罩,并指明亟需改良的问题^[6]。研究口罩不良影响的学者普遍认为目前口罩舒适性较差,对防护效果、人身健康和工作效率产生不好的影响,口罩改良有较大的发展空间。另外,蔡莽等人使用 3D 打印技术实现 N95 口罩的个性化定制,有效提高了穿戴舒适度^[7]。Peggy PL Or 等人研究了提高 N95 口罩穿戴舒适性的环境因素^[3]。George Niezgoda 等人对不同形制的 N95 口罩进行定量测试,表明折叠式口罩比杯型口罩的密闭压力小,使穿戴者的主观舒适度和穿戴配合度更高^[8]。以上学者从不同角度对提高口罩的舒适性进行了探索,针对性地解决了部分口罩不适问题,但没有涉及疫情等特殊时期的口罩改良设计。

本文针对防护用口罩普遍存在的穿戴不适问题及其不良影响,基于 U-TRIZ 理论提出疫情时期口罩的改良原则、结构改良设计方法,并进行实践实验以检验改良设计的有效性。

1 防护用口罩及其不适问题

防护用口罩是指戴在口鼻部位用于隔绝口鼻与外部环境接触、过滤进出空气,以达到阻挡有害物质侵入穿戴者呼吸道的防护用品。口罩的防护效力主要依靠两方面条件:一是材料阻隔有害物质穿过的能力,二是口罩和人脸的密合程度,即取决于材料的防

护力和结构的合理程度。

防护用口罩根据外形,可分为平板式、折叠式和杯形 3 种。平板式口罩便于携带,但密合性差;折叠式口罩便于携带,密合性较好;杯型口罩形如杯状,材料挺阔不易变形,呼吸空间大但不方便携带,密合性较好。

防护用口罩根据佩戴方式,可分为头戴式、耳戴式和颈戴式 3 种。头戴式穿脱麻烦,但可以使整个头部分担压力,一般适合长时间佩戴;耳戴式穿脱方便,但使耳部承担压力;颈戴式是耳戴式的改良样式,用 s 钩、一些软质材料连接件连接耳带转变成颈戴,其舒适性高于耳戴式,但穿脱麻烦、使颈部受力,总体不如头戴式。

防护用口罩根据防护对象的差别有多种分类,不同国家的类别标准也不甚相同,以中国为例,防护用口罩共 5 种:自吸过滤式防颗粒物呼吸器符合 GB 2626-2019 标准,对颗粒物的过滤效率达到 90% 以上,防范新冠肺炎时所用的 KN95 就是其中的一种,此类口罩多为耳戴折叠式,少量为杯型头戴式。日常防护型口罩符合 GB/T 32610-2016 标准,主要针对民用日常防护,对空气污染环境中颗粒物的过滤效率达到 80% 以上,防范雾霾时所用的 PM2.5 口罩就是其中一种,此类口罩的定位是日常民用易耗品,多为耳戴折叠式。一次性使用医用口罩符合 YY/T 0969-2013 标准,有良好的细菌过滤效率和通气阻力舒适性,但密合性和血液阻隔性较差,适用于普通医疗环境下的一般防护,此类口罩为耳戴平板式。医用外科口罩符合 YY 0469-2011 标准,有良好的细菌过滤效率、合成血液穿透阻力,对颗粒的过滤效率有限($\geq 30\%$),适用于临床医务人员在有创操作等过程中佩戴,此类口罩为耳戴或头戴的平板式口罩。医用防护口罩符合 GB 19083-2010 标准,有良好的颗粒过滤效率、合成血液穿透阻力、通气阻力、表面抗湿性、密合性、总适合因数,此类口罩为杯型头戴式或折叠头戴式。

目前常见的口罩形制为耳戴平板式、耳戴折叠式和头戴杯形式,在文献整理、调查问卷的基础上用定性评价的方式总结出常见口罩形制及其不适感见表 1。耳戴平板式口罩的不适感较少,而耳戴折叠式和头戴杯型的不适感较多,主要有耳部受力疼痛、口罩带长度不合、面部压迫、接触刺痒、呼吸阻力、口罩内湿热、眼镜易滑动、眼镜起雾问题。其中,呼吸阻力和口罩内湿热可通过呼气阀实现较大程度的改善,但呼气阀不能应用于医用防护口罩^[9]和兼需保护周围环境的防护口罩,因此需要依靠研发兼具防护和透气能力的新型材料,而其他问题则可以通过结构改良来缓解。

2 疫情时期防护用口罩的结构性改良原则

口罩作为个人呼吸道防护的主要设备,最首要的功能就是保护口鼻免受外界侵害,因此改良舒适性的

表 1 常见口罩形制及其不适感
Tab.1 Shape and discomfort of common masks

形制	常见适用类别	典型样例	形制特点	穿戴不适感
耳戴 平板式	一次性使用医 用口罩；医用 外科口罩		罩面材料软，厚度约 0.5~1 mm；密合性差； 质量轻不对耳朵产生 压力不适感；呼吸阻 力小	口罩覆盖处有湿热感
耳戴 折叠式	自吸过滤式防 颗粒物呼吸 器；日常防护 型口罩		罩面材料较软，厚度 约 2~3 mm；密合性较 好；方便携带和穿脱	为保证高密合度而紧绷带子时耳部往往受 力疼痛；鼻骨、颧骨处有压迫感；口罩内 部湿热感较明显；眼镜易滑动；部分呼吸 阻力较大；眼镜偶尔起雾
头戴 杯形	自吸过滤式防 颗粒物呼吸 器；医用防护 口罩		罩面材料硬挺，厚度 约 3~5 mm，不易变 形；呼吸空间大；密 合性相对最好	口罩带为长度有限的松紧带，无法顾及个 体头围差异，会导致松垮或紧绷；为保证 高密合度而紧绷带子时，面部尤其是鼻骨、 颧骨、下巴压迫感明显；口罩内部湿热感 明显；眼镜易滑动；部分有接触刺痛感； 部分呼吸阻力较大；眼镜偶尔起雾

前提是保证口罩防护效力不受损耗。其次，现实使用中口罩的实际舒适性低于理论舒适性^[3]，因此在舒适性评价中不仅要关注定量评价，更应关注实际穿戴情景下的定性评价，并根据现实需要进行改良。最后，疫情发生时短时间内会耗用大量防护口罩，提供大量口罩对社会生产也是一种挑战，因此在改良时也要顾及生产成本、生产能力等现实因素，即符合社会生产能力，具有可实现性。

2.1 保证防护效力

目前口罩的防护效力主要依靠两方面条件：一是材料阻隔有害物质穿过的能力，二是口罩和人体的密合程度。以 N95 口罩为例，罩面材料对病毒的过滤效率在 95%以上，具有较好的隔离病毒能力，在实际使用中，为了避免密合度不够造成有害物侵入，医护人员不惜对脸部造成压迫而勒紧口罩带。对口罩进行改良时不仅要保证罩面材料的防护力不受影响，还要保证口罩与人脸的密合程度不会降低。

2.2 关注实境体验

目前口罩的不适问题是普遍的，究其根本是缺乏对人体工学的应用和对穿戴体验的重视。实验室中的舒适性测试往往是在规定情境下、按照规定动作得出结论，而真实的应用情况远比这复杂^[3]。在改良时应注重实际使用的反馈，避免理论和实践脱节，增加其适体性和功能性^[10]。

2.3 符合社会生产能力

疫情爆发时往往社会动荡、物资紧张，短时间内生产大量口罩对社会生产是极大的挑战，因此在解决不适问题时应充分考虑社会的生产能力，尽可能地压

缩成本、简化工艺，不要脱离实际。如定制等方法虽然有出色的舒适度，但短期内难以实现量产，并不适合疫情时期。在考虑现有资源、生产能力、生产周期的基础上提出恰当的方案，既不要过多的增加生产成本，又一定程度的缓解现有问题，是疫情时期改良设计较为恰当的选择。

3 基于 U-TRIZ 理论的防护用口罩结构改良设计

TRIZ 理论（Unified теории решения изобретательских задач，统一的发明问题解决理论）是清华大学学者张武城及其团队在经典 TRIZ 理论上提出的分支理论。主张通过重视分析问题、梳理问题中隐含的逻辑链及其形成机制，找到解决问题的“最优”突破点，即在现有的资源条件下（知识、技术、时间和成本等）以最小的代价，最高效地得到“理想化最终结果”（Ideal Final Result, IFR）^[11]。将 U-TRIZ 理论应用于防护用口罩的改良中^[12-13]，基于疫情突发时期物资紧缺的情况，用尽可能低的成本解决口罩的穿戴不适问题，以减少对穿戴者心身健康的伤害和工作效率的影响。

基于 U-TRIZ 的防护用口罩结构改良设计框架见图 1，在聚焦口罩现有不适问题的基础上，以口罩“保护人体”的功能为导向，以口罩各部分的固有属性为核心，如口罩带是用于固定口罩的弹力绳、口罩面是具有过滤空气中有害物的软性或硬性材料，结合疫情时期特殊的外部环境，根据“40 条发明原理”中的“分割”“多维化”“预先作用”进行如下的结构改良设计。

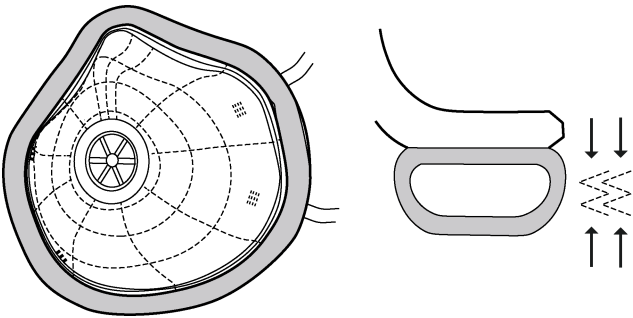


图 3 分散压力式气囊口罩沿
Fig.3 Pressure-dispersed airbag mask edge

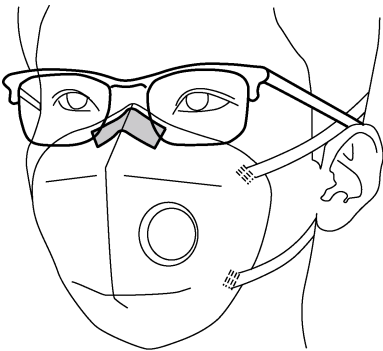


图 4 眼镜防滑条
Fig.4 Anti-slip bars for glasses

3.3 眼镜防滑条

目前口罩表面的摩擦力难以使眼镜固定，因此频繁的滑动位移需要人手扶正，这干扰了穿戴者的注意力和工作。根据“40 条发明原理”中的“预先作用”，即在合适的位置预先安置物体，使其在适当的时机发挥作用而避免浪费时间。可在鼻梁上方的口罩上设计一块摩擦力较大的眼镜防滑条对眼镜起到固定作用。眼镜防滑条面积不宜过大以免影响口罩的透气性，长度在 5~8 cm，宽度在 2~3 cm，可适应圆形、方形等大多数形状的眼镜，眼镜防滑条见图 4。眼镜防滑条工艺简单、制作成本极低，可有效解决眼镜滑动问题，为穿戴者节约大量时间。

4 疫情时期防护用口罩的结构性改良实践

口罩带用弹力皮筋和按扣制作，皮筋宽 8 mm，



图 5 改良后口罩
Fig.5 Modified mask

按扣尺寸为 10 mm×6 mm×3mm。气囊条用软性硅胶材料制作，硅胶条侧面为空心半圆形，宽 8 mm，高 6 mm，壁厚 1 mm。眼镜防滑条用聚酯材料制成的海绵纸制作，尺寸为 50 mm×20 mm×1 mm，将其粘合在口罩上，改良后口罩见图 5。

耳朵勒痕对比见图 6。在温度 20 ℃、湿度 50% 的室内穿戴改良前后的口罩各 1 h。在口罩带方面：原口罩需要手工打结来调节长度以保证高密合度，打结及后续调整共用时 76 s；穿戴过程中口罩带勒住耳部造成难以接受的不适，使耳根处泛红，见图 6a。改良后的口罩穿脱相对方便，穿戴用时 13 h，穿戴过程中没有对耳部造成压力，见图 6b。面部印痕对比见图 7。在口罩沿方面：原口罩对鼻骨、颧骨、下巴的压力明显，其中颧骨处受压疼痛和接触刺痒感使被测者难以坚持长时间穿戴；穿戴过程中有眼镜起雾现象；摘下口罩后面部发红、有印痕，见图 7a。改良后的口罩穿戴过程中面部没有疼痛感；口罩密合度有所提高；眼镜起雾现象减轻；口罩对面部造成的印痕较浅，见图 7b。在眼镜防滑条方面：原口罩使眼镜易滑动，被测者在穿戴原口罩的 1 小时里扶眼镜 89 次；改良后口罩使眼镜相对固定，被测者在穿戴改良后口罩的一小时里扶眼镜 15 次，次数明显下降。实验证明结构改良设计可解决现有口罩因压力不均而脸部疼痛、因口罩带拉力而耳部疼痛和眼镜滑动的问题，有效缓解因密合度不够而眼镜起雾的问题，使口罩的穿戴舒适度提升，同时更加契合面部形态、缩短穿戴时间。

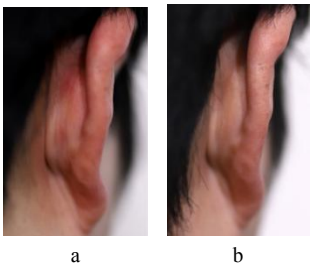


图 6 耳朵勒痕对比
Fig.6 Ear scars comparison



图 7 面部印痕对比
Fig.7 Facial impressions comparison

表 2 改良后口罩和常见口罩的舒适度评分
Tab.2 Comfort rating between exiting mask and modified mask

	改良 A	A	B	C	改良 D	D	E	F
								
口罩带	8.5	5.5	4.5	5.7	8.8	4.4	4.5	4.5
口罩沿	7.5	5.6	4.9	5.7	7.0	6.7	6.1	6.3
眼镜	8.7	5.9	5.7	5.0	9.2	3.9	3.8	3.3

为验证结构改良设计在实际穿戴中的效果而设计如下穿戴实验：选取 18~58 岁的测试者共 10 人，职业涉及教师、学生、售货员、办公室职员、露天执勤人员、车间工人、退休人员。测试时间为 2020 年 3 月 5 日至 3 月 24 日，正值全民戴口罩预防新冠肺炎的时期。为避免人工干预对结果的影响，不设置固定的穿戴时长、地点和穿戴中动作，使被测者按个人生活需要同往常一样穿戴。

随机选取折叠式和杯型口罩各一个进行改良，和改良前及市面上常见的其他 4 个品牌的口罩进行对比实验，被测者根据主观感受对口罩的舒适性进行评分，0 分为极不适，10 分为极舒适，改良后口罩和常见口罩的舒适度评分见表 2。实验表明，改良后口罩的舒适性高于市面上常见的其他口罩，其中可调节式口罩带对提升耳戴式口罩的舒适感更明显，改良气囊沿对提升杯型口罩的舒适感更明显，眼镜防滑条适用于各种形制的口罩并有良好的表现。

5 结语

口罩作为疫情时期重要的防护用品有耳部受力疼痛、口罩带长度不合、面部压迫、接触刺痒、呼吸阻力、口罩内湿热、眼镜易滑动、眼镜起雾等问题，对穿戴者身心健康和工作效率造成不好的影响。而疫情时期物资紧缺的客观环境和大量的口罩需求，需要口罩成本低廉易生产。以不影响防护功用为前提，以压缩成本易生产为导向，基于 U-TRIZ 理论通过可调节式口罩带、分散压力式气囊口罩沿、防滑眼镜条的结构性改良设计，可针对性的解决现有口罩的大部分不适问题，有效改善因压力不均而脸部疼痛、因口罩带拉力而耳部疼痛和眼镜滑动的问题，有效缓解因密封度不够而眼镜起雾的问题，使口罩的穿戴舒适度提升，同时更加契合面部形态、缩短穿戴时间。呼吸阻力过大和湿热不适问题虽然可通过呼气阀进行一定程度的缓解，但更应寄希望于既有良好透气性，又能有效阻隔有害物质的新型材料的研发。

参考文献：

- [1] JOHNSON A T. Respirator Masks Protect Health but Impact Performance: a Review[J]. Journal of Biological Engineering, 2016, 10(1): 4.
- [2] LOCATELLI S M, LAVELA S L, GOSCH M. Health Care Workers' Reported Discomfort While Wearing Filtering Face-Piece Respirators[J]. Workplace Health & Safety, 2014, 62(9): 362-368.
- [3] PEGGY P O, JOANNE W C, THOMAS K W. A Study of Environmental Factors Affecting Nurses' Comfort and Protection in Wearing N95 Respirators During Bed-side Procedures[J]. Clinical Nursing, 2018(27): 1477-1484.
- [4] 陈美玉, 周莹莹, 王红红, 等. 市场口罩的过滤特征与舒适性分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2018, 31(3): 281-288.
CHEN Mei-yu, ZHOU Ying-ying, WANG Hong-hong, et al. Filtering Characteristics and Comfort Performance of the Masks in the Market[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2018, 31(3): 281-288.
- [5] 丁文彬, 贾晓东. 常见自吸过滤式口罩的防护效果综合评估[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(5): 428-433.
DING Wen-bin, JIA Xiao-dong. Comprehensive Assessment on Protective Performance of Common Self-inhalation Filter Type Respirators[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2018, 35(5): 428-433.
- [6] ALIYA S B, CAPRICE K, AARON E, et al. Health Care Workers' Views about Respirator Use and Features That Should be Included in the Next Generation of Respirators[J]. American Journal of Infection Control, 2016, 38(1): 18-25.
- [7] MANG C, HUI L, SHENGGAN S, et al. Customized Design and 3D Printing of Face Seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2018, 15(3): 226-234.
- [8] GEORGE N, JUNG H K, RAYMOND J, et al. Flat Fold and Cup-Shaped N95 Filtering Facepiece Respirator

- Face Seal Area and Pressure Determinations: a Stereophotogrammetry Study[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2013, 10(8): 419-424.
- [9] 国家市场监督管理总局. GB 19083-2010, 医用防护口罩技术要求[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2010. State Administration for Market Regulation. GB 19083-2010, Technical Requirements for Protective Face Mask for Medical Use[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration, 2010.
- [10] 靳文奎, 何人可. 基于三维人体测量的穿戴式工业产品造型适配性设计研究[J]. *包装工程*, 2018, 39(4): 123-126. JIN Wen-kui, HE Ren-ke. Adaptability Design of Wearable Industrial Products Based on 3D Anthropometry[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(4): 123-126.
- [11] 张武城, 赵敏, 陈劲, 等. 基于 U-TRIZ 的 SAFC 分析模型[J]. *技术经济*, 2014, 33(12): 7-13. ZHANG Wu-cheng, ZHAO Min, CHEN Jin, et al. SAFC Analysis Model Based on U-TRIZ[J]. *Technology Economics*, 2014, 33(12): 7-13.
- [12] 李兰友, 印志鸿, 陆金桂, 等. 基于 U-TRIZ 理论的产品概念设计 SAFC 模型分析[J]. *包装工程*, 2020, 41(20): 124-130. LI Lan-you, YIN Zhi-hong, LU Jin-gui, et al. SAFC Model Analysis of Product Conceptual Design Based on U-TRIZ Theory[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(20): 124-130.
- [13] 朱芳芳, 赵锋. 基于 U-TRIZ 理论的家庭应急产品开发设计研究[J]. *包装工程*, 2018, 39(14): 29-33. ZHU Fang-fang, ZHAO Feng. Research on Development and Design of Household Emergency Products based on U-TRIZ Theory[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(14): 29-33.
- [14] 程宁波, 吴志明. 服装压力舒适性的研究方法及发展趋势[J]. *丝绸*, 2019, 56(3): 38-44. CHENG Ning-bo, WU Zhi-ming. Research Method and Development Tendency of Garment Pressure Comfort [J]. *Journal of Silk*, 2019, 56(3): 38-44.
- [15] ARAKI T, KIMURA T. Oily Surface Adhesive Room Temperature Curing Type Organopolysiloxane Composition and Seal: US, 12/510675[P]. 2012-03-01.

(上接第 111 页)

- [36] ALONSO-GONZALEZ M J, S HOOGENDOORN-LANSER, N VAN OORT, O CATS, S HOOGENDOORN. Drivers and Barriers in Adopting Mobility as a Service (MaaS): a Latent Class Cluster Analysis of Attitudes[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 132: 378-401.
- [37] HO C Q, C MULLEY D A. Public Preferences for Mobility as a Service: Insights from Stated Preference Surveys[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 131: 70-90.
- [38] LILJAMO T, H LIIMATAINEN, M POLLANEN R UTRIAINEN. People's Current Mobility Costs and Willingness to Pay for Mobility as a Service Offerings [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 163: 99-119.
- [39] HIRSCHHORN F, PAULSSON A, SRENSEN C H, et al. Public Transport Regimes and Mobility as a Service: Governance Approaches in Amsterdam, Birmingham, and Helsinki[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 130(7): 35-45.
- [40] AUDOUIN M, FINGER M. The Development of Mobility-as-a-service in The Helsinki Metropolitan Area: a Multi-level Governance Analysis[J]. *Research in Transportation Business and Management*, 2018, 27: 24-35.
- [41] SCHIKOFSKY J, DANNEWALD T, KOWALD M. Exploring Motivational Mechanisms behind the Intention to Adopt Mobility as a Service (MaaS): Insights from Germany[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 131: 296-312.
- [42] 胡飞. 服务设计范式与实践[M]. 南京: 东南大学出版社, 2019. HU Fei. *Service Design: Paradigm and Practice*[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2019.
- [43] ZHANG Z, TAFRESHIAN A, MASOUD N. Modular Transit: Using Autonomy and Modularity to Improve Performance in Public Transportation[C]. Beijing: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014.
- [44] ACKERMAN, E. Nutonomy to Test world's Fully Autonomous Taxi Service in Singapore This Year[J]. *Spectrum*, 2016, 42(5): 17-26.