

基于 FA/TRIZ 的错颌畸形前方牵引 矫治器设计方法研究

张芳兰, 姚宛彤, 刘龙吉

(燕山大学艺术与设计学院, 河北 秦皇岛 065000)

摘 要: 针对上颌前方牵引矫治器在使用过程中出现的舒适度低、佩戴不便等问题, 提出基于功能分析(FA)和发明问题解决理论(TRIZ)相结合的集成设计方法。通过对上颌前方牵引矫治器的功能分析, 建立功能、结构部件之间的关系, 形成部件交互矩阵。应用 TRIZ 理论分析产生交互作用的部件与子功能之间的关系, 形成功能-物场模型, 并根据模型实际效用划分其所属类别, 利用 76 个标准解寻找对应解决方法, 获得上颌前方牵引矫治器改良设计方案。利用有限元分析法(FEA)赋予相应的材质和作用力, 建立对比实验对方案进行评价分析。最终, 以上颌前方牵引矫治器的创新设计方案实施为例, 验证了该集成方法以及评价方法的可行性。

关 键 词: 错颌畸形; 前方牵引; 功能分析; 发明问题解决理论; 有限元分析

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2020030438

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2020)03-0438-08

Application research on the KJ/FA/TRIZ integration method in anterior maxillary traction appliance design

ZHANG Fang-lan, YAO Wan-tong, LIU Long-ji

(School of Art and Design, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 065000, China)

Abstract: Aimed at solving such problems as discomfort and inconvenience of the maxillary anterior traction appliance, an innovative design method based on FA and TRIZ was proposed. The relationship and the component interaction matrix between the functions and structures were established based on the FA. The TRIZ was adopted to analyze the connections between the interacted components and sub-functions, thus forming the function-field model. Its categories were divided based on the actual utility. Then 76 standard solutions were employed to address problems, thereby obtaining an improved design of appliance. Finite element analysis was made to evaluate the redesign scheme by giving the materials and forces. A comparative experiment was undertaken to evaluate the redesign scheme. Finally, the feasibility of the FA/TRIZ integration method and evaluation method was verified through the implementation of the innovative design of the maxillary anterior traction appliance.

Keywords: malocclusion; anterior traction; function analysis; theory of inventive problem solving; finite element analysis

收稿日期: 2019-12-02; 定稿日期: 2020-03-29

基金项目: 2020年度河北省教育厅普通高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2020088); 河北省社科基金项目(HB19YS004); 2018年河北省专业学位教学案例(库)立项建设项目(KCJSZ2018021)

第一作者: 张芳兰(1980-), 女, 陕西宝鸡人, 副教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为产品创新设计理论与方法、人因工程。

E-mail: fanglanzhang@163.com

安氏Ⅲ类错颌畸形是一种常见的未成年人口腔疾病。随着患者年龄增长,会造成面中部凹陷、上颌短缩和下颌前突,严重影响面容美观^[1](图1)。

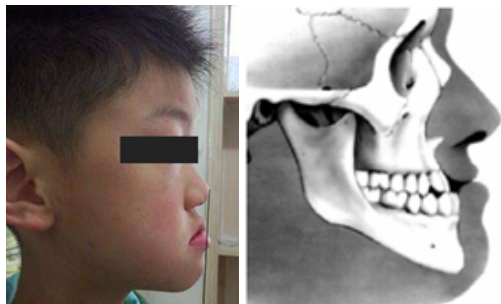


图1 安氏Ⅲ类错颌畸形
Fig. 1 Class III malocclusion

目前,上颌前牵引矫治方法是治疗此类错颌畸形的有效手段^[2-3]。生长发育高峰前期进行上颌前牵引矫治可以较好地改善Ⅲ类凹面型。若不予及时矫治,待发展成严重的骨性畸形,则需要通过正颌手术联合矫治解除畸形,增加了治疗的难度与成本。因此,对安氏Ⅲ类错颌畸形的早期干预矫治十分必要^[4]。国内外学者一直致力于提高前方牵引的矫治效果,探讨上颌前牵引的影响因素,改善上颌前牵引矫治器装置,以期获得较好的骨骼变化,达到改善凹面型目的。

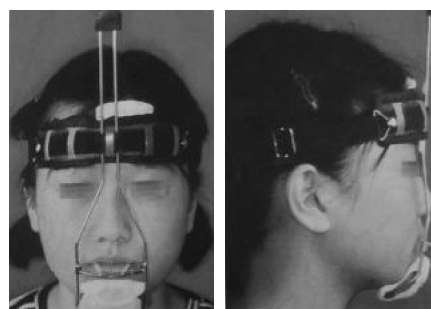
常见的矫治器主要分为复合式面弓(图2(a))和简单式面弓(图2(b))。2种矫治器在一定程度上均可以满足矫正力学需求,但未考虑患者面部形态的差异性、佩戴舒适性、面部贴合度及使用心理等问题。

发明问题解决理论(teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch, TRIZ)常与其他创新设计方法集成应用,有效解决产品设计中矛盾问题,构建系统性的创新设计方法。例如,夏文涵等^[5]将TRIZ理论与数学模型进行综合研究设计,有效地解决产品设计过程中出现的相关问题,实现预期目标需求;朱秀娟和李克天^[6]将TRIZ理论与功能分析集成,建立简略矛盾矩阵,为家电类产品创新设计提供流程思路;周升铭^[7]将可供性理论与TRIZ相结合,构建物场可供性模型,再综合其他研究方法和工具,最终形成产品系统设计模型;文献[8-9]均选用质量功能展开(quality function deployment, QFD)与TRIZ结合,将需求转化为具体性能,减少人为因素的干扰等;钱炜苗^[10]提出了一种FA/TOC/TRIZ集成方法,形成产品结构功能图和系

统结构图,为产品设计前期问题研究、方案决策研究提供了思路 and 支撑。



(a) 复式面弓
(a) Double face bow



(b) 简单式面弓
(b) Simple face bow

图2 常见矫治器

Fig. 2 Common malocclusion appliance

功能分析(function analysis, FA)是系统设计中确定产品功能结构的主要方法,有利于认识和理解产品工作原理及功能结构关系。通过对产品进行FA和结构分解,建立产品结构-功能联系。顾文斌等^[11]利用FA法对自动封装机进行解构分析,根据分功能最优解,进行结构设计,得到可以对多种尺寸的纸箱进行自动封装的产品设计方案;王峰等^[12]将功能分析法应用于PVC扣板自动包装机的设计中,最终提高设备生产效率,为同类设备设计提供了参考。

有限元分析(finite element analysis, FEA)主要利用数学近似的方法对真实的物体量进行模拟,将复杂的问题看成多个单元,并对每一单元进行求解推导,从而得到问题的解。其主要应用于机械、工程、流体、岩土、土木、桥梁、医疗等领域的模拟仿真研究,利于及时发现并解决设计问题,降低实验成本。沈仙法和崔小龙^[13]对机电产品木质包装箱进行Ansys有限元模拟,在相同载荷条件下,分析2种不同包装材质的强度和刚性,选择最合适的包装材料。胡晓颖^[14]将有限元分析引入正畸领域,探究不同力对骨骼牙齿的影响,获得最有效的矫正力大小。在设计领域,较多学者从人机工程学、

产品舒适度等角度对产品进行有限元分析研究。张磊等^[15]从人体生理结构、体压分布、材料等方面对自行车座的受力情况进行仿真评价,为自行车座设计提供规范和依据;冉令朋等^[16]分析耳机-耳廓之间的接触压强,以压强分布情况对耳机舒适性进行客观评价。

本研究将 TRIZ 理论与 FA 相结合,降低感性判断对产品的影响。再利用 FEA 工具对产品方案进行评价分析,最终获得基于 FA/TRIZ 集成方法的设计方案,完善上颌前方牵引矫治器的功能,提高佩戴舒适度。

1 FA/TRIZ 集成方法

为提高产品用户的满意度、改良现存产品缺陷,将直接获取到的用户需求(潜在需求)描述进行关联分析,梳理得出与设计直接相关的需求问题。通过 FA 确定概念设计阶段的产品功能与结构的对应关系,利用 TRIZ 寻找解决问题的标准解法,输出产品设计方案,进行有限元分析评价,得到系统的产品创新设计方法。在 TRIZ 理论中,对于物场模型的构建,一般采用直接分析法,以主观判断为主,缺乏系统的定性研究。

如图 3 所示,利用 FA/TRIZ 集成方法,可有效降低人为主观因素在产品过程中的干扰。再通过有限元分析,对产品方案进行客观的评价分析研究。具体步骤如下:

步骤 1. 建立部件交互矩阵。通过产品 FA,将产品按照使用功能和部件结构进行分解,确定部件之间的联系。结合产品的使用对象和使用环境,确定产品与患者、环境三者之间的交互关系,形成产品系统交互矩阵。

步骤 2. 构造功能-物场模型。将各子功能与发生交互关系的部件进行关联分析,确定部件之间发生交互关系所产生的作用场,形成功能-物场模型。根据交互作用产生的实际功能效应和产品需求问题,确定功能-物场模型的类型。

步骤 3. 利用 TRIZ 工具求解。寻找符合用户需求和产品结构的标准解法。根据标准解法确定方案设计方向和产品设计的方案。

步骤 4. 进行产品方案评价。将求解得到的产品创新方案与现存产品进行 FEA 分析,从产品的舒适度、结构等方面进行分析研究。最终输出基于 FA/TRIZ 集成方法的产品设计方案。

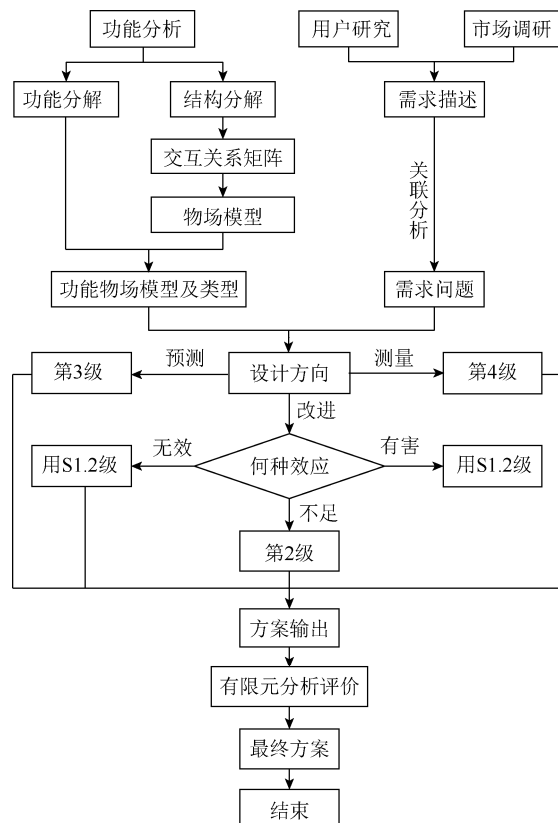


图 3 FA/TRIZ 集成模型

Fig. 3 FA/TRIZ integration model

2 上颌前方牵引矫治器设计研究

2.1 上颌前方牵引矫治器交互矩阵

功能是对某产品工作能力的形象化描述,可视为系统的输入、输出之间的关系。上颌前方牵引矫治器的黑箱模型如图 4 所示,其输入量为待矫正的牙齿、前方牵引、佩戴舒适等。输出量为矫正的牙齿、信息反馈等。因此,可确定上颌前方牵引矫治器的总功能是改变牙齿的状态。

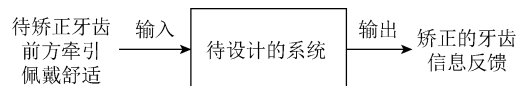


图 4 上颌前方牵引矫治器黑箱模型

Fig. 4 Black box model of maxillary anterior traction appliance

由于总功能在描述时具有抽象性和不准确性,因此对产品总功能进行分解。根据现存矫治器的功能特点以及产品总功能要求,采用由上至下的 FA 方法,用 $A_i(i=1,2,3,\dots,10)$ 表示各功能。上颌前方牵引矫治器功能分解过程如图 5 所示。

根据矫治器的部件关系,可将其分解为口外部件(支抗部件)、口内部件、连接部件、施力部件。口外部件(支抗部件)用于抵消牵引所产生的反作用

力,主要抗基部位是额部和下颌部。因此,口外部件由额垫、颏垫、连接面弓(简单式和复杂式)组成。施力部件指用弹性橡胶圈连接口外支抗部件和连接部件。连接部件分为口外和口内部分:口内部件主要指通过外力作用使牙齿趋于整齐的各类牙列矫治装置。图6为构建上颌前方牵引矫治器的结构分解图,用 $P_b(b=1,2,3,\dots,8)$ 表示各部件。

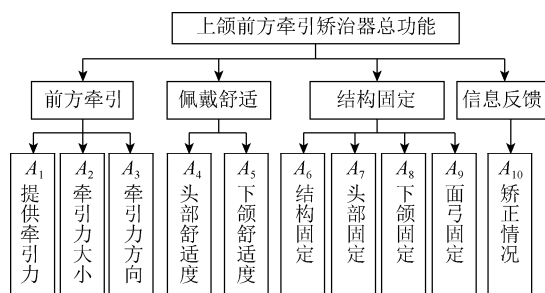


图5 上颌前方牵引矫治器功能分解

Fig. 5 Functional decomposition of maxillary anterior traction appliance

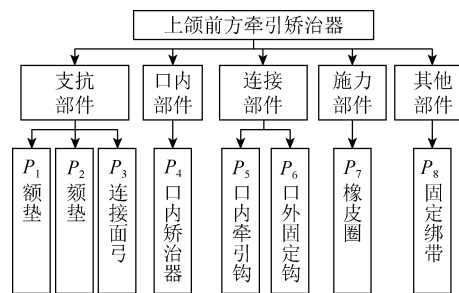


图6 上颌前方牵引矫治器结构分解

Fig. 6 Structural decomposition of maxillary anterior traction appliance

对矫治器、作用对象及环境三者共同构成的上颌前方牵引矫治系统进行分析。根据矫治器佩戴要求,将作用部位细分为:头部、额部、下颌、口内矫治器;根据调研分析可知,作用环境主要为家庭。通过对矫治器的结构分解以及作用特点分析,构建交互关系矩阵。如图7所示,其中“o”为存在交互关系;“-”为忽略交互关系;“×”为无直接交互关系。

		上颌前方牵引矫治器						对象				环境
		固定绑带	额垫	颏兜	连接面弓	橡皮圈	口外固定钩	头部	额部	下颌	口外矫治器	家族
上颌前方牵引矫治器	固定绑带	-	-	×	×	×	×	○	×	×	×	×
	额垫	-	-	×	○	×	×	×	○	×	×	×
	颏兜	×	×	-	○	×	×	×	×	○	×	×
	连接面弓	×	○	○	-	×	○	×	×	×	×	×
	橡皮圈	×	×	×	×	-	○	×	×	×	○	×
	口外固定钩	×	×	×	○	○	-	×	×	×	×	×
对象	头部	○	×	×	×	×	×	-	×	×	×	-
	额部	×	○	×	×	×	×	×	-	×	×	-
	下颌	×	×	○	×	×	×	×	×	-	×	-
	口内矫治器	×	×	×	×	○	×	×	×	×	-	-
环境	家族	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-

图7 上颌前方牵引矫系统交互矩阵

Fig. 7 Interaction matrix of maxillary front traction and straightening system

2.2 上颌前方牵引矫治器功能-物场模型

物场模型是TRIZ理论中问题分析工具之一,其将所有功能分解为2种物质和一种场。其中,物质可指任意实体,如:产品零部件、系统等,用“S”表示;场可以是一种资源或能量,如:机械场、电场、化学场等,用“F”表示。

根据物与场的交互作用,可将物场模型分为4类:有效完整的系统(A):系统功能元素完整有效。不完整系统(B):系统功能元素缺失。不足的完整系

统(C):效应未能有效实现,或效应不足。有害的完整系统(D):产生与预期效应相反的、有害的效应。

将交互作用产生的效应与功能元进行匹配,构建功能交互模型,分析部件交互方式,确定交互作用的场,形成完整的功能-物场模型。根据前期的产品调研和用户研究,探究表中功能-物场模型在实现功能过程中出现的效应,确定模型所属类型。用 $M_a(a=1,2,3,\dots,9)$ 表示模型编号, S_1 表示物质1, S_2 表示物质2, F 表示作用场(表1)。

表 1 上颌前方牵引矫治器功能-物场模型
Table 1 Function field model of maxillary anterior traction appliance

模型	功能元	S ₁	S ₂	F	类型
M ₁	A ₄ A ₇	固定绑带	头部	力场	C
M ₂	A ₆ A ₉	额垫	连接面弓	机械场	C
M ₃	A ₄	额部	额垫	力场	D
M ₄	A ₈ A ₉	额兜	连接面弓	机械场	A
M ₅	A ₅	下颌	额兜	力场	D
M ₆	A ₃ A ₉	连接面弓	口外固定钩	机械场	A
M ₇	A ₁ A ₂ A ₃	橡皮圈	口外固定钩	力场	C
M ₈	A ₁ A ₂ A ₃	橡皮圈	口内矫治器	力场	C
M ₉	A ₁₀	橡皮圈	-	-	B

2.3 上颌前方牵引矫治器方案求解

为准确提取到上颌前方牵引矫治器的使用需求和过程产生的潜在需求问题。本研究采用用户访谈、文献检索、资料查找、专家访问等综合方法进行前期调研，并对获取的问题描述进行分类研究，确定 7 个上颌前方牵引矫治器中存在的待解决问题需求，分别用 N₁~N₇ 表示需求编号：N₁=佩戴舒适度、N₂=简单面弓影响视线、N₃=复杂面弓影响睡眠、N₄=额兜压迫、N₅=监测矫正状况、N₆=控制作用力、N₇=佩戴不便。

TRIZ 通过对大量专利等分析研究，将发明问题分为标准问题和非标准问题 2 类。其中标准问题主要指基于技术系统进化可以改良和解决问题的方法。针对标准问题的解决办法称为发明问题标准解法。标准解法共分为 5 级，18 个子级，共计 76 个^[17]。根据表 2 可知模型 M₁~M₉ 所属类型，其中：模型 M₁ 属于 C 类物场模型，用 M₁ 表示模型，如图 8 所示。

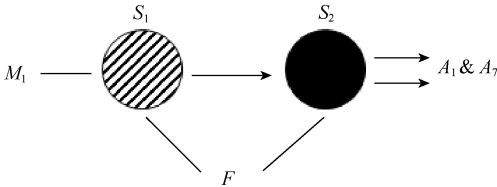


图 8 M₁ 功能-物场模型
Fig. 8 M₁ Function field model

结合前期调研分析，在使用上颌前方牵引矫治器时，会出现绑带不牢固、佩戴不合适等问题。因此，对照发明问题标准解法，寻找最合适的解决方案。

在实现功能 A₄ 和 A₇ 时，出现效应不足的问题，参考发明问题标准解法(76 个标准解)，找到解决问题的方法。最终选择第 2 级中加强物场模型“使用毛细管和多孔物质(S2.2.3)”、“动态性(S2.2.4)”和“构造物质(S2.2.6)”解决问题。因此，各功能-物场模型解决方案见表 2。

表 2 功能-物场模型标准解决方案
Table 2 Standard solution of function field model

模型	标准解	需求
M ₁	S2.2.3; S2.2.4; S2.2.6	N ₁ N ₇
M ₂	S2.2.4	N ₂ N ₃
M ₃	S1.2.2	N ₁
M ₄	...	...
M ₅	S1.2.2; S2.2.6	N ₄
M ₆	...	...
M ₇	S2.2.1; S4.2.4	N ₆
M ₈	S2.2.1; S4.2.4	N ₆
M ₉	S1.1.1; S3.2.1	N ₅

研究分析可知模型 M₁ 在产生效应时存在 N₁~N₇ 的需求问题，且模型 M₁ 关联的部件为固定绑带和头部(忽略)，因此依据存在的需求问题对固定绑带进行方案求解分析。对其他模型进行分析，确定部件与待解决需求问题的直接联系，结合部件所属模型及类别，进行方案设计研究，最终获得产品设计方案。如图 9 所示，其中“+”为增加结构，“-”为替代结构。

根据产品设计方案进行研究，最终得到产品改良设计方案，如图 10 所示。

改良后的上颌前方牵引矫治器具有动态调节和实时监测功能。矫治器头圈可根据不同患者头部大小进行弹性变化，面弓部分可进行横向滑动，患者可根据使用需求进行面弓调节。如图 11(a)所示，在夜间使用时可将面弓移到中间位置，降低夜间佩戴对睡眠的影响。如图 11(b)所示，在白天使用时，可将面弓移到两侧位置，降低面弓对视线的影

响。在矫治器额兜部分增加了距离传感器和红外传感器，可实时监控牙齿的位移变化和佩戴矫治的时长，同时在口外固定钩上增加压力传感器，可以监测对牙齿施加拉力的情况，为远程医疗提供数据支持。

$N_1 \sim N_7$	固定绑带	额垫	额兜	连接面弓	橡皮圈	口外固定钩
N_1	(+) 软质头垫	(+) 软质额垫	-	-	-	-
N_2	-	(+) 滑轨	-	(-) 伸缩结构	-	-
N_3	-	(+) 滑轨	-	(-) 伸缩结构	-	-
N_4	-	-	(+) 软质额垫	-	-	-
N_5	-	-	-	-	(+) 距离传感器 红外传感器	-
N_6	-	-	-	-	(+) 压力传感器	(+) 压力传感器
N_7	(-) 头箍式结构	-	-	-	-	-

图 9 产品设计方向
Fig. 9 Product design direction

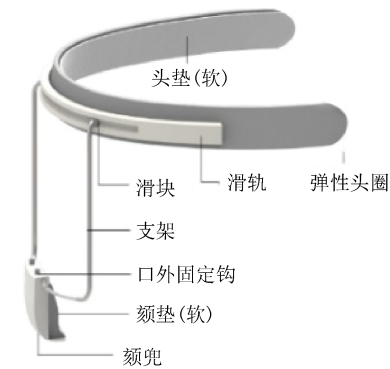


图 10 上颌前方牵引矫治器改良方案
Fig. 10 Improvement plan of maxillary anterior traction appliance

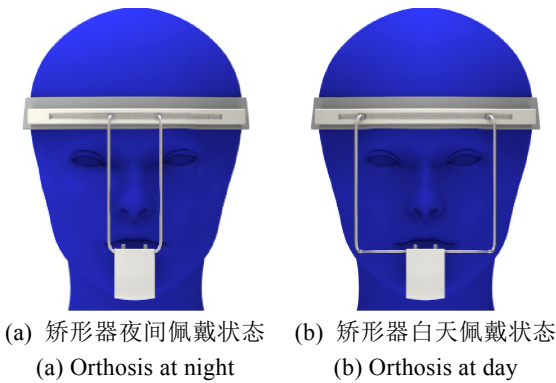


图 11 矫形器两种佩戴状态
Fig. 11 Two wearing states of orthosis

3 方案评价

3.1 有限元分析评价

采用 Abaqus 有限元仿真分析方法，需要对模型进行材料的定义、仿真模型的前处理、边界条件的设定、舒适性评价等操作。

根据研究对象的特性赋予模型相应的材质，以模拟材料真实的物理属性，为仿真分析做前期的准备。本研究将矫正器简化为包含 3 种材料属性的部件，分别为 ABS 部件、金属材质连接杆部件，以及海绵材质头带软垫，上述材料具体参数见表 3。

为了更好地模拟矫正器的受力情况，将矫形器各部件进行规范处理，减少面的数量和曲线的数量，保障网格划分的精确和标准。为保障网格划分的精度，获得模型的精确解，本研究采取全局细化

网格处理方法。同时，将额兜部分设定为 XYZ 方向约束，头圈部分设定 Z 方向约束，对口外固定钩施加 8 Pa 大小的压强。

表 3 材料属性				
Table 3 Material properties				
材料	材料属性	重度(kN/m ³)	弹性模量(MPa)	泊松比
ABS	弹性	10.5	2 200	0.394
金属	弹性	78.5	200 000	0.300
海绵	弹性	48.4	10	0.100

3.2 结果对比

为了便于结果分析，计算过程沿头圈环向设置监测路径，获得头圈的等效位移和应力曲线，如图 12 所示。

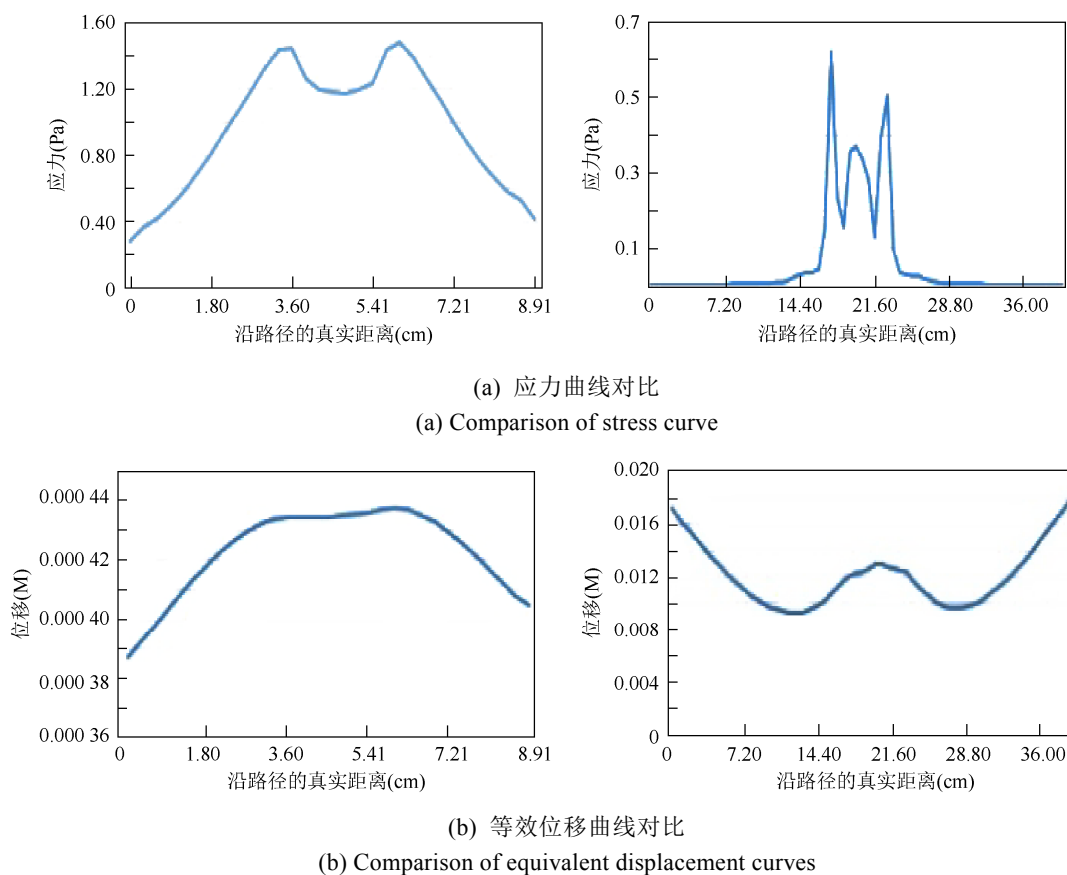


图 12 应力和等效位移曲线对比图

Fig. 12 Comparison of stress and equivalent displacement curve

根据图 12(a)所示,改良前后矫形器应力变化趋势相同,根据对应力大小分析发现:原矫形器的应力最大值为 1.48 Pa,改良后矫形器应力最大值为 0.62 Pa。通过对矫形器的改良,将应力减少 58.1%。对头部的压迫力减少,提高佩戴的舒适度;通过对等效位移曲线分析,发现改良后的位移值大于原矫形器位移,分析可知:改良后矫形器头圈围长要大于原矫形器。因此,改良后矫形器头圈两端的等效位移变化较大。

4 结束语

(1) 本研究构建了基于 FA/TRIZ 集成创新方法模型,并将其应用于上颌前方牵引矫治器改良设计中。通过有限元分析评价,验证了该集成方法的可行性。

(2) 通过构建部件交互矩阵原型,形成了产品功能-物场模型,为产品方案设计确定方向。

(3) 以患者为中心,对错颌畸形前方牵引矫形器进行改良设计,最终提高了产品的矫治效果和佩戴舒适度。

参考文献

- [1] 傅民魁. 口腔正畸专科教程[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2007: 51-57.
FU M K. Course of orthodontics[M]. Beijing: People's Health, 2007: 51-57 (in Chinese).
- [2] MANDALL N, COUSLEY R, DIBIASE A, et al. Early class III protraction facemask treatment reduces the need for orthognathic surgery: a multi-centre, two-arm parallel randomized, controlled trial[J]. Journal of Orthodontics, 2016, 43(3): 164-175.
- [3] NGAN P, YIU C. Evaluation of treatment and posttreatment changes of protraction facemask treatment using the PAR index[J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2000, 118(4): 414-420.
- [4] 李小兵. 儿童错牙合畸形早期矫治的必要性和方法[J]. 中国实用口腔科杂志, 2013, 6(12): 709-717.
LI X B. The necessity and methods of early correction of malocclusion in children[J]. Chinese Journal of Practical Dentistry, 2013, 6(12): 709-717 (in Chinese).
- [5] 夏文涵, 王凯, 李彦, 等. 基于 TRIZ 的管道机器人自适应检测模块创新设计[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 58-67.
XIA W H, WANG K, LI Y, et al. Innovative design of pipeline robot adaptive detection module based on

- TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 58-67 (in Chinese).
- [6] 朱秀娟, 李克天. TRIZ理论和功能分析在小家电设计中的应用研究[J]. 现代制造工程, 2016(8): 95-100.
- ZHU X J, LI K T. Research on the application of TRIZ theory and function analysis in the design of small household appliances[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016 (8): 95-100 (in Chinese).
- [7] 周升铭. 基于物—场可供性模型提升产品设计质量的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- ZHOU S M. Research on improving product design quality based on material field availability model[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [8] 石元伍, 郑孝成. 关于 GQFD-TRIZ 集成方法在警用无人机设计中的应用研究[J]. 图学学报, 2019, 40(2): 296-302.
- SHI Y W, ZHENG X C. Application of GQFD-TRIZ integration method in police UAV design[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(2): 296-302 (in Chinese).
- [9] 苏晨, 章莎莉, 肖莉. 基于 QFD 和 TRIZ 的瓦楞纸板生产线造型设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(20): 118-124.
- SU C, ZHANG S L, XIAO L. Research on modeling design of corrugated board production line based on QFD and TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(20): 118-124 (in Chinese).
- [10] 钱炜苗. 基于功能分析、约束理论和 TRIZ 创新设计理论的产品改进设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- QIAN W M. Research on product improvement design based on functional analysis, constraint theory and TRIZ innovation design theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011 (in Chinese).
- [11] 顾文斌, 张晓武, 王怡. 基于功能分析法的自动封装机设计[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 158-162.
- GU W B, ZHANG X W, WANG Y. Design of automatic packaging machine based on functional analysis[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2019, 48 (3): 158-162 (in Chinese).
- [12] 王峰, 王智伟, 陆有春, 等. 基于功能分析法的 PVC 扣板自动包装机设计[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 198-203.
- WANG F, WANG Z W, LU Y C, et al. Design of PVC gusset automatic packaging machine based on functional analysis[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 198-203 (in Chinese).
- [13] 沈仙法, 崔小龙. 机电产品木质包装箱的有限元分析与研究[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 103-108.
- SHEN X F, CUI X L. Finite element analysis and research on wooden packaging box of mechanical and electrical products[J]. Packaging Engineering, 2019, 40 (19): 103-108 (in Chinese).
- [14] 胡晓颖. 上颌牵引应力分布三维有限元分析及 Angle's 错牙合上颌前牵引临床矫治研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2012.
- HU X Y. Three dimensional finite element analysis of maxillary traction stress distribution and clinical correction of angle's malocclusion and maxillary anterior traction[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2012 (in Chinese).
- [15] 张磊, 张芳燕, 刘洋铭. 自行车鞍座设计的人机工程学分析及测评方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(6): 118-120, 142.
- ZHANG L, ZHANG F Y, LIU Y M. Ergonomic analysis and evaluation method of bicycle saddle design[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(6): 118-120, 142 (in Chinese).
- [16] 冉令鹏, 王崴, 丁日显, 等. 舒适性耳机半参数化设计优化研究[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2015, 23(6): 646-650.
- RAN L P, WANG W, DING R X, et al. Semi parametric design optimization of comfortable earphones[J]. Journal of Audiology and speech diseases, 2015, 23(6): 646-650 (in Chinese).
- [17] ZHANG F L, YANG M L, LIU W D. Using integrated quality function deployment and theory of innovation problem solving approach for ergonomic product design[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 76: 60-74.