

纸质机械运动机构设计研究

李龙, 刘肖健, 刘珈伊
(浙江工业大学, 杭州 310023)

摘要: **目的** 实现玩具类产品的机械运动机构的纸质化。结合纸材料的力学特性, 探索纸材料应用于机械产品制作的可行性, 以及基于纸材料的机械零件结构的设计方法。**方法** 依据纸材料本身的特性, 结合机械运动机构的传动方式, 思考纸质机械机构设计的方式, 总结出转动副、移动副、齿轮等各类典型机械运动机构纸质化设计方法, 在实现运动功能的基础上确保运动零件的力学强度。同时以纸质齿轮设计为例, 利用 CorelDraw 作为二次开发平台开发插件, 降低纸质机械机构设计的操作难度。**结论** 以机械玩具产品为案例, 对纸质材料力学特性的机械机构设计方法进行实践, 论证了低成本机械玩具创意设计方法的可行性, 为机械产品创意设计探索了新的材料选择, 也为纸产品创新发展提供了更多的设计概念。

关键词: 纸质机构; 机械机构; 机构设计; 纸材料

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)08-0168-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.08.022

Paper Machinery Movement Mechanism Design

LI Long, LIU Xiao-jian, LIU Jia-yi
(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: This thesis aims to achieve the paperization of mechanical motion mechanism of toy products. We can combine the mechanical properties of paper materials, explore the feasibility of paper materials used in the manufacture of mechanical products, as well as the design method of mechanical parts based on paper materials. By taking into account the characteristics of the paper material and the way in which the mechanical mechanism is driven, it is possible to think about the way in which the paper mechanical mechanism is designed, summarize the paper design methods of various typical mechanical motion mechanisms such as rotating pair, moving pair and gear, and ensure the mechanical strength of the moving parts while realizing the movement. At the same time, taking paper gear design as an example, we are able to use CorelDraw as a secondary development platform to develop plug-ins, and reduce the operation difficulty of paper mechanical design. Taking mechanical toys as a case to practice the design method of mechanical mechanism for mechanical properties of paper material, the feasibility of the low-cost mechanical toy creative design method is demonstrated, which explores new material choices for the creative design of mechanical products, and provides more design concepts for the innovative development of paper products.

KEY WORDS: paper mechanism; mechanical mechanism; mechanical design; paper material

纸不仅作为书写、印刷的载体, 还被用于制作各种工艺作品^[1]。纸材料具有化整为零、方便弃舍、回收率高、废旧利用、循环再生等特点^[2], 可以作为用户进行产品 DIY 的材料。相比较于金属和塑料材料,

具有无需开模、机械加工设备等优势, 适合用于制作玩具产品。纸作为产品制作材料也面临着一些问题, 如强度、刚性等力学性能的欠缺, 因此纸质机构的设计方法与金属和塑料存在一定差异。本文主要面向该

收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目 (19YJA850012)

作者简介: 李龙 (1993—), 男, 陕西人, 浙江工业大学硕士生, 主攻工业设计。

通信作者: 刘肖健 (1972—), 男, 山东人, 博士, 浙江工业大学教授, 主要研究方向为计算机辅助设计。

问题探索一些通用机构的纸质材料设计方法,并基于机械玩具实例进行设计验证。

1 纸质机构的研究现状

目前市场上的纸质机械产品主要有立体书、活动式纸玩具、产品包装、家具等几类。立体书又被称为可动书、机关书以及玩具书等^[3]。早期的立体书多为翻开书页时可在页面上自动跳出三维空间造型的书籍^[4],近期的立体书则运用了折叠、拉动、镂空等方式,使读者与书籍的互动进一步加强^[5]。哈佛大学 WYSS 研究所和麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室联合发布了一款软体机器人^[6],它能够拉起超过自身重量 1000 倍的重量,其折纸规则的变化会使机器人产生不同的运动轨迹,甚至完成三维方向的扭动。在浙江大学的《设计思维与表达》课程中^[7],学生通过纸张和电机完成一件折纸机器人作品,其不同的折纸规则产生不同运动的形式。产品包装、家具、办公用品类的纸质产品使用具有一定强度的纸板作为材料,如 Amazon 的纸箱玩具、Google 纸盒等产品。

在纸质机构设计的学术研究方面,俞梦杰通过对纸产品设计、用户创新相关理论和计算机辅助设计的研究,实现了纸质产品用户创新设计原型系统的建立^[8]。酆钰筠建立了废纸密集切割 CAD 系统基本功能架构,开发原型系统,并运用参数化技术实现废纸密集切割的快速设计^[9]。甘菁菁利用 CorelDRAW 作为二次开发平台,通过计算机设计辅助完成对原型系统的开发,实现了玩具类产品的纸质机械机构的参数设置,达到了快速设计与制作的目的^[10]。

纸质机构涉及到的机械机构类型主要包括四种:铰链、滑块、凸轮传动、齿轮传动。前三种已经有了一些设计方法见诸文献,但齿轮传动的纸质机构设计案例尚不多见。James Smith Rudolph 给出了制作纸质钟表机构所需的所有零件刀版图^[11],其中纸质齿轮的制作方法模仿金属或塑料零件的做法,用于纸质齿轮上存在很多问题,如制作过程繁琐、精度低等。

目前纸质机构的相关研究和实践主要集中在静态产品上,可活动的纸产品也只限于简单的运动形式,利用复杂机构原理的纸产品并不多见。

2 纸质机构的设计分析与方法

纸质机构设计首先需要考虑到纸材料的选用,保证其强度且裁切方便;其次选择相关机构进行系统研究,探讨机构纸质化的实现方法;最后基于具体应用背景给出完整解决方案。

2.1 纸材料的类型

常用的纸材料主要有新闻纸、胶版印刷纸、铜版纸、低定量涂布纸、白卡纸、白板纸、铸涂纸、涂布

白板纸、瓦楞纸等^[12]。考虑到纸质机构在强度、硬度方面的劣势,不仅要保证纸材料结构具有一定强度和硬度,起到运动承载作用,而且还要保证纸材料的折叠需求。综合考虑,可选用的纸材料为铜版纸、白卡纸、铸涂纸、瓦楞纸等,主要分为两类,一类是具有一定厚度的,例如瓦楞纸,另一类是具有一定硬度的,比如铜板纸、卡纸等。对于其他特殊情况,则根据需要灵活选用制作材料。

2.2 纸质机构的设计分析

常见的机械传动有带传动、链传动、摩擦轮传动、蜗轮蜗杆传动、螺纹传动和齿轮传动等方式。在传动方式纸质化中,其中部分传动方式的实现存在一定难度。本文结合具体纸质机械产品设计的需求,以齿轮传动作为传动方式,对其他机械机构常见的铰链机构、滑块机构、凸轮机构等机构的纸质化设计方法进行讨论。

在纸质机构设计中,设计方法与设计所用材料密切相关,纸材料的选择需要满足强度、硬度、耐用性等方面的要求。在选择具有一定厚度的纸材料时,例如瓦楞纸,其具有厚度的特点使得其在造型、结构和功能上具有很大的可塑空间,同时在设计时避免其他问题,通过模拟现实机构完成纸质部件的制作、拼接、穿插等工作;而在选择比较薄但具有一定硬度的纸材料时,纸质机构设计主要分为四步:首先完成设计作品的三维实体建模,其次根据各运动部件及各部件运动形式进行拆分,然后绘制各部件刀版图,刀版图中包括外部造型部分和内部固定部分,最后完成刀版图的粘贴、拼接。在此类设计方法中,只需要保证纸质机构的基本功能,切忌全盘照搬机械机构的设计方式,否则可能出现设计方案复杂、实际动手操作难度大等问题。

在实现纸质机构运动功能的基础上确保其力学强度,针对不同类型的纸材料采用的方法不同。对于具有一定厚度的纸材料,通过增加纸厚度来满足强度要求,即多层纸材料叠加。对于具有一定硬度的纸材料,刀版图中的内部固定部分成为力学强度保障的措施,内部固定部分在满足机构功能基础上保证机构强度,设计形式依据具体案例,类似于机械构件中的加强肋。除此之外,通过多次实验确定实物模型的材料、尺寸和结构,从而确保纸材料的力学强度及纸质机构的功能。

2.3 纸质机构的设计方法

铰链是运动机构中最常用的结构,从运动特征可分为两种:一是转动副的两个构件均为活动构件的活动铰链;二是转动副的两个构件中一个为固定构件的固定铰链。从铰接构件的转动范围又可分为两种:一是 360°连续转动的铰链,如曲柄上的铰链;二是在一定角度范围内摆动的铰链,如摇杆上的铰链。

针对 360° 连续转动的铰链, 纸质结构有两种做法: (1) 利用材料厚度, 即采用具有一定厚度的纸材料 (如瓦楞纸) 来制作转动件, 在设计中主要考虑铰链轴的设计, 通过两片厚纸材料互相穿插形成铰链轴, 铰链上的转动件的设计与传统机械零件相似, 纸质铰链 1 见图 1, 此方法设计的铰链机构具有制作、安装方便的优点, 但同时也存在耐用性低、磨损大的缺点; (2) 通过折叠产生空间结构, 利用具有一定硬度的纸材料 (如铜板纸、卡纸) 通过折叠、拼插、粘贴等方式组合成具有空间体积的转动件, 此方法可制作形态丰富的立体形态, 但其力学性能有一定限制, 需要从折叠结构的设计方法上进行解决, 纸质铰链 2 见图 2, 这种方式把力学性能的获取从依靠材料本身转移为依靠折叠结构的设计, 提供了一种利用设计解决问题的思路。

对于有限角度摆动的纸质铰链, 最简易的方法即利用折痕, 可以采用同一张纸材料制造出铰链及其所连接的两个转动件, 立体书的设计基本都属此类, 且纸材料在重复折叠方面的耐用性满足绝大部分情况需求。

移动副以导轨和滑块为主要构件, 滑块基于导轨

相对移动, 用于直线往复运动场合。纸材料制作导轨滑块有两种做法: (1) 利用材料厚度, 即采用具有一定厚度的纸材料制作导轨, 模拟金属导轨切槽, 在纸中切割一个镂空矩形, 纸质滑块垂直插入槽中滑动, 纸质滑块 1 见图 3; (2) 通过折叠产生空间结构, 折叠和粘贴纸材料的方法制作滑块、导轨及其他相关构件, 纸质滑块 2 见图 4。

齿轮是最复杂的零件, 利用纸材料制作齿轮有一定的难度, 一般只制作简单直齿圆柱齿轮, 能满足基本的传动功能即可。首先依据设计要求得出齿轮的传动比, 然后通过传动比确定各齿轮的齿数、半径等参数, 最后结合纸材料和设计参数确定齿轮设计方法和方案。

纸质齿轮的设计方法主要有三种: (1) 利用具有一定厚度的纸材料, 在上面绘制平面齿轮形态并切割, 若齿轮强度无法满足要求, 可根据实际情况加厚齿轮, 纸质齿轮 1 见图 5; (2) 同样利用具有一定厚度的纸材料, 将齿轮主体和轮齿以拼插方式完成齿轮的制作, 纸质齿轮 2 见图 6; (3) 利用具有一定硬度的薄纸材料, 通过切割、折叠和粘贴制作上下两半齿轮, 组合后得到完整齿轮, 纸质齿轮 3 及其转轴见图 7。

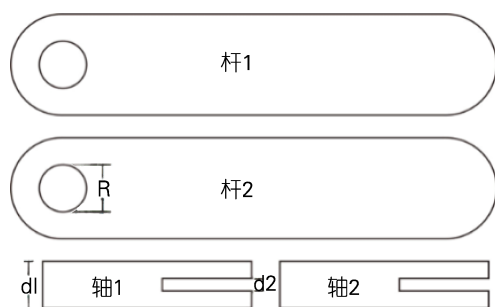


图 1 纸质铰链 1
Fig.1 Paper hinge1

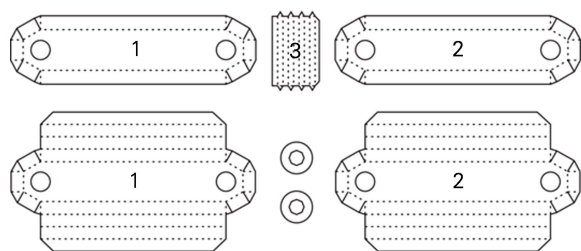
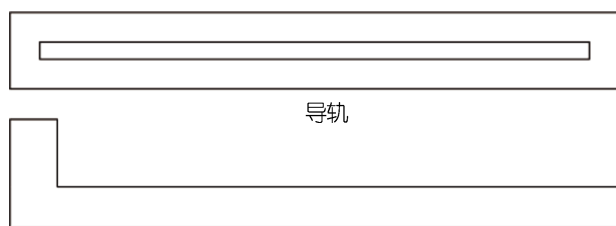


图 2 纸质铰链 2
Fig.2 Paper hinge2



滑块

图 3 纸质滑块 1
Fig.3 Paper slider1



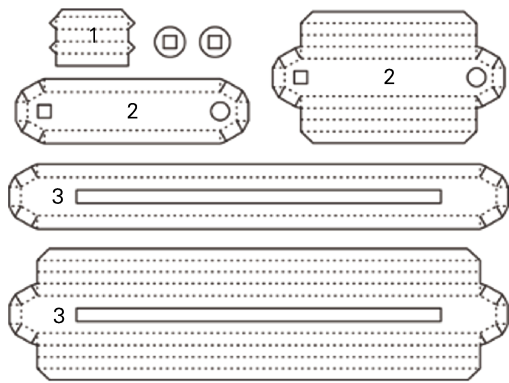


图 4 纸质滑块 2
Fig.4 Paper slider2



图 9 切割机
Fig.9 Paper cutting machine

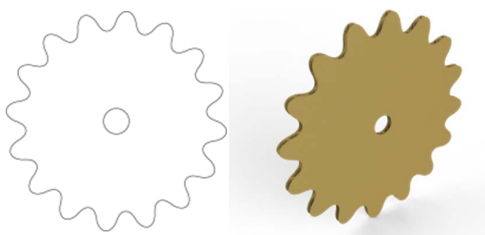


图 5 纸质齿轮 1
Fig.5 Paper gear1

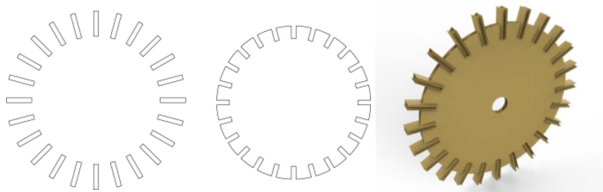


图 6 纸质齿轮 2
Fig.6 Paper gear2

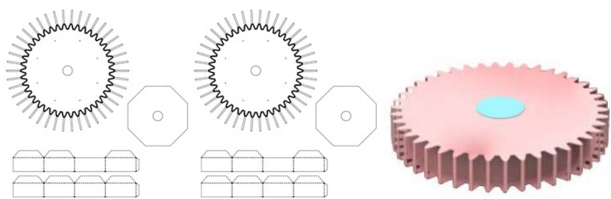


图 7 纸质齿轮 3 及其转轴
Fig.7 Paper gear3 and its axis



图 8 纸质齿轮插件
Fig.8 Paper gear plug-in

2.4 纸质机构设计与制作的软硬件支持

以纸质机构设计中的设计二维平面刀版图为例，选择 CorelDRAW 作为开发平台，软件以插件的形式运行。CorelDRAW 是一个具有图形和色彩设计功能的软件，其开发接口允许用户为其定制开发插件^[13]，通过插件将复杂操作以界面呈现，并快速准确地设计特定产品，纸质齿轮插件见图 8，用户输入所需数据便可获得齿轮刀版图。

打印机、切割机等加工设备的小型化、家用化发展，为用户个性化定制的小批量生产提供了便捷方式。打印机完成刀版图从虚拟到现实的过程，一般可彩印 A3 尺寸的纸张。切割机通过软件区分刀版图的线类型，实现自动切割包装的外轮廓线和制作内部压痕，既节省时间又能保证切割精度。切割机见图 9，其底部是吸盘装置，保证纸张位置固定，顶部为放置纸张的平面，刀头分为切割和压痕刀头，其切割压力可控制。

3 纸质机构设计——以纸质绘图仪玩具设计为例

本文基于一款绘图玩具的设计对上述纸质机构的制作方法进行验证，论证其可行性。

3.1 纸质绘图仪玩具设计说明

绘图仪玩具是一种通过机械旋转机构绘制复杂

轨迹曲线的玩具产品，市面上已有的参考形态见图 10。本文基于纸材料制作绘图仪玩具，设计绘图仪玩具中各部件的刀版图，并对部件进行剪切粘合等纸材料处理操作，完成一件纸质玩具的制作。拼装完成的纸质绘图仪与画笔结合，完成图形的绘制。可替换的纸张和画笔得以让用户探究其组合方式，并制作出最终满意的作品。

3.2 纸质绘图仪玩具的设计与制作

纸质绘图仪玩具采用硬卡纸作为材料，设计方法对应为上述具有一定硬度纸材料的设计方法。本产品的设计点为机械结构的纸制化呈现，故在前期产品方案设计中需对机械结构进行解剖分析，再用纸材料进行替代设计，纸质绘图仪玩具原理的机构简图见图 11。此外，在 CorelDraw 平台上开发模拟绘图仪运动的仿真插件，验证绘图仪最终的绘制效果，通过更改绘图参数，观察绘图仪绘制曲线的结果和变化，仿真图见图 12。

对机械结构草图进行分析，根据纸质化呈现的可行性与支撑机械结构所需要的尺寸体积和纸部件数量综合考虑，对机械结构进行深入分析、优化处理，对其所需机构部件进行草图设计分析。通过对各部件的具体纸材料替代设计分析，确定基本的纸材料搭建结构方式，在机械结构的原理模型草图的基础上进行形态细化。

在底座设计中，主要考虑其支撑和固定作用，即支撑起所有其他部件的作用和其他部件在底座的安装固定作用。这些基本作用的实现，需要对底座整体结构加以设计，保证部件的安装和底座的稳定。纸质底座设计中包括底座上下外壳设计、固定上下外壳和支撑其他构件的支撑件设计以及支撑件附近的加固件设计，底座设计见图 13。

在齿轮设计中，在齿轮原模型的基础上分解齿轮，齿轮外部造型部分保证齿轮传动和耐用性，齿轮内部固定部分保证齿轮结构的稳定性。外部造型由齿轮参数决定，通过实体齿轮拆分成平面图形的方法完成设计，齿轮设计草图见图 14。在确定齿轮外部造

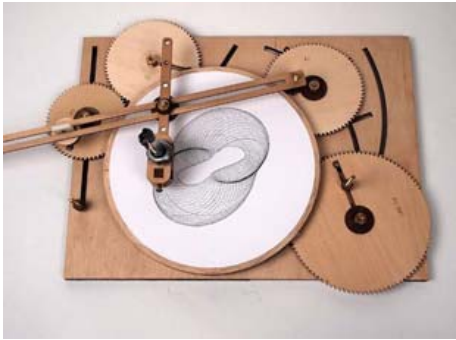


图 10 参考形态
Fig.10 Reference form

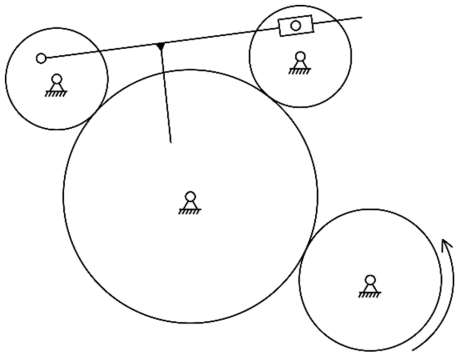


图 11 机构简图
Fig.11 Institutional figure

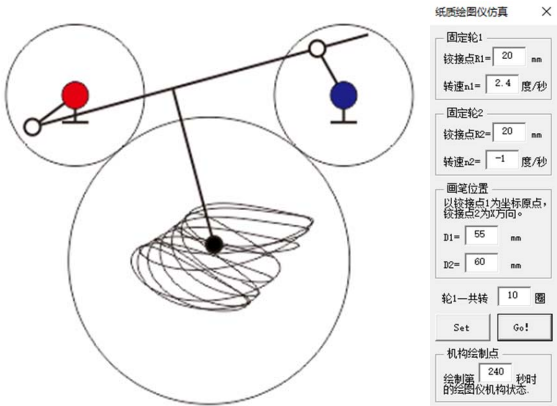


图 12 仿真图
Fig.12 Simulation figure

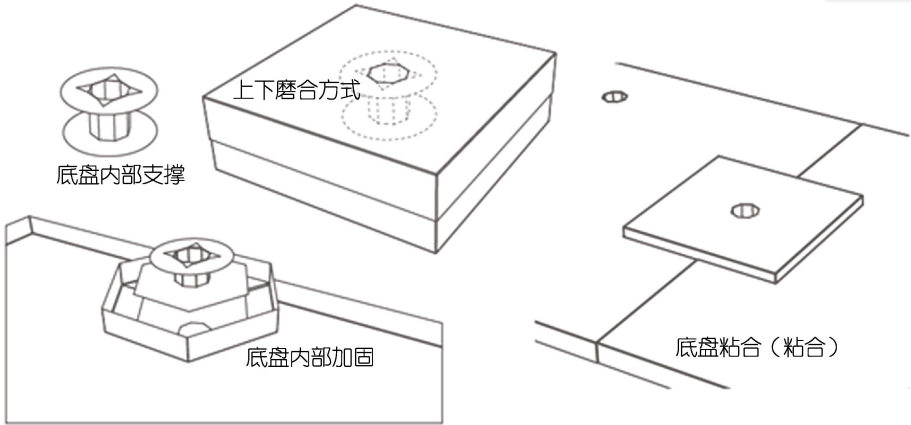


图 13 底座设计
Fig.13 Base design sketch

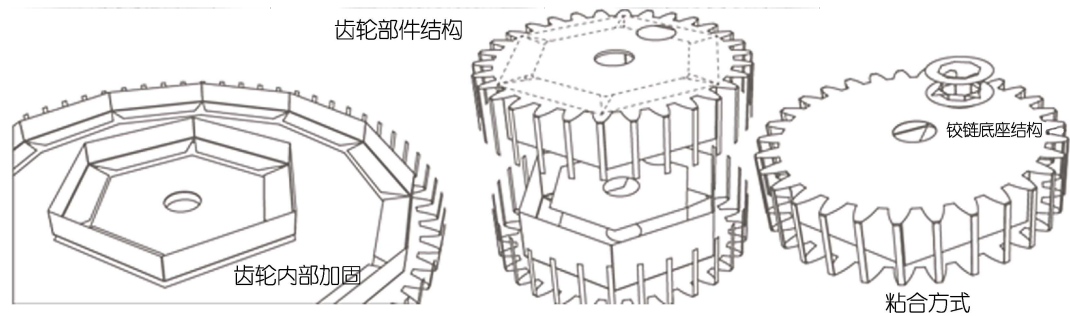


图 14 齿轮设计草图
Fig.14 Gear design sketch

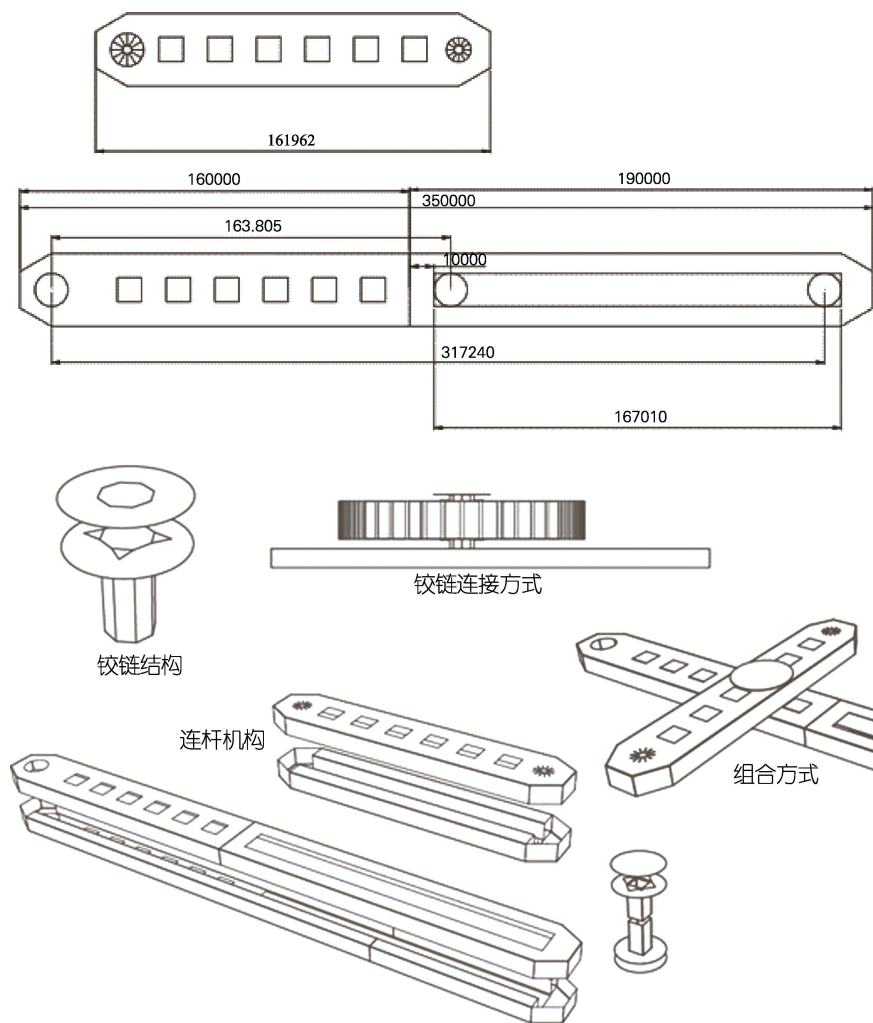


图 15 铰链、滑块和连杆设计草图
Fig.15 Hinge, slider and link design sketch

型的基础上，完成齿轮内部固定部分的设计，根据齿轮的实际尺寸确定固定件的数量和尺寸，图 11 中的齿轮设置有一圈固定件和内外两圈固定件的形式，固定件的作用类似于机械构件中加强肋，其余设计部分为其他构件安装、固定所考虑。

铰链、滑块、连杆的纸质化设计方法如上文所述，铰链、滑块和连杆设计草图见图 15。

纸质绘图仪玩具效果见图 16、纸质绘图仪玩具实物见图 17，采用粉色与蓝色的 250 g 珠光卡纸为纸制机械玩具的制作材料，用纸材料来组成底盘、齿轮、插销与连杆四个部分，将四个部分按照不同的处理方式拼装完成后，通过手摇齿轮上的手柄驱动整个纸制绘图仪运作，在纸上用画笔留下轨迹，改变连杆的组合方式绘制出图形。

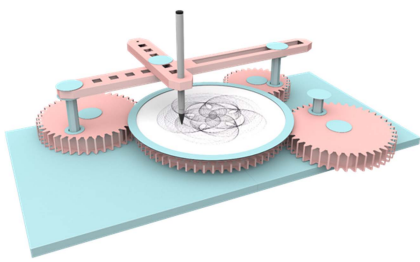


图 16 纸质绘图仪玩具效果
Fig.16 Paper plotter toy renderings

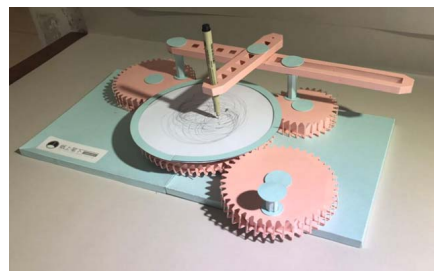
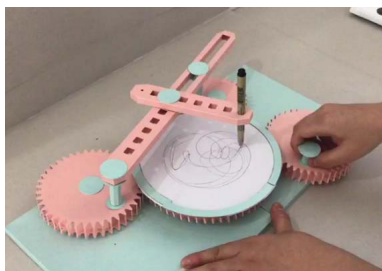


图 17 纸质绘图仪玩具实物
Fig.17 Paper plotter toy figure

4 结语

基于纸材料的特性,探索机械机构设计的纸质化途径,借助软硬件技术支持,通过实验的方法解决纸质材料力学强度不足以及平面化难度大的困难,总结出转动副、移动副、齿轮等各类典型机械运动机构纸质化的设计方法,并通过纸质绘图仪玩具案例验证纸质机构制作的可行性,为纸质机构设计打开新的创意空间。

参考文献:

- [1] 白雪莹. 浅谈衍纸工艺的艺术呈现[J]. 艺术教育, 2017(11): 155-156.
BAI Xue-ying. Art Presentation of Yan Paper Craft[J]. Art Education, 2017(11): 155-156.
- [2] 胡雪琪. 纸材料在产品中的特性思考[J]. 时代教育, 2016(3): 254-255.
HU Xue-qi. Thinking on the Characteristics of Paper Materials in Product Design[J]. Time Education, 2016(3): 254-255.
- [3] 黄婕. 西方早期立体书常见样式设计解析[J]. 大众文艺, 2018(23): 118-119.
HUANG Jie. Analysis of Common Style Designs in Western Early Pop-Up Books[J]. Popular Culture & Arts, 2018(23): 118-119.
- [4] 欧阳予婧. 立体书籍结构设计[J]. 设计, 2017(2): 122-123.
OUYANG Yu-jing. Pop-Up Book Structure Design[J]. Design, 2017(2): 122-123.
- [5] 赵瑶迪. 跃然纸上一立体书籍设计探究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2017.
ZHAO Yao-di. Jump On the Paper-The Study of Pop-Up Book Design[D]. Nanjing: Nanjing University of the Arts, 2017.
- [6] 二氧化硅 2012. 当折纸遇上机器人, 这波操作已经被哈佛、MIT 和浙大同学们玩到惊艳[EB/OL]. (2018-04-26) [2019-10-26]. http://www.360doc.com/content/18/0406/14/11646305_743296271.shtml.
- [7] 设计思维 ALPZJU. 不加特效! 不是科幻! 纸片“折出”机器人! [EB/OL]. (2017-06-26)[2019-10-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/XLrzhQ5IMR10U3aBighnrw>.
Design Thinking ALPZJU. No Special Effects Not a Science Fiction The Paper “Folds Out” the Robot [EB/OL]. (2017-06-26)[2019-10-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/XLrzhQ5IMR10U3aBighnrw>.
- [8] 俞梦杰. 纸产品的用户创新技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
YU Meng-jie. Study on the User Innovation Design of Paper Product[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [9] 郦钰筠. 基于纸品巧利用的创新设计系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
LI Yu-jun. Research on Paper Recycling Based Innovative Design System[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [10] 甘菁菁. 纸质机械运动机构设计研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
GAN Jing-jing. Design Research of Paper Machinery Movement Mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [11] JAMES S. Make your Own Working Paper Clock[M]. US: HarperCollins US, 1983.
- [12] 王睦德, 徐猛. 常用印刷纸张特性及运用范围[J]. 印刷世界, 2008(11): 39-41.
WANG Mu-de, XU Meng. Common Printing Paper Characteristics and Application Range[J]. Print World, 2008(11): 39-41.
- [13] 杨莉. 基于 CorelDraw 二次开发的河系渐变效果实现[J]. 现代测绘, 2019(2): 51-53.
YANG Li. Realization of River Gradient Effect Based on Secondary Development of CorelDraw[J]. Modern Surveying and Mapping, 2019(2): 51-53.