

文章编号:1004-7220(2016)06-0520-05

# 假肢手接受腔恒力挤压块设计

刘杰民, Daniel SU, 桑元俊, 李祥, 罗云

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 针对假肢手接受腔挤压模块的功能需求,设计一种恒力输出的挤压机构。**方法** 根据正负弹簧刚度抵消获得恒力的工作原理,基于有限元分析软件 ANSYS 进行仿真拟合,测定弹簧片的弹性刚度系数,从而计算获得正刚度弹簧的弹性刚度系数,对加工组装后的恒力挤压机构进行压力测试。**结果** 恒力机构的仿真结果与实验结果一致,并且在 3.5 mm 行程范围内实现了 2% 的压力恒定性。**结论** 实验证实了挤压单元的恒力特性,为今后的假肢手接受腔分时分区控制奠定了基础。

**关键词:** 假肢接受腔; 恒力机构; 弹簧片; 有限元分析

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3871/j.1004-7220.2016.06.520

## Design of constant-force extrusion unit for hand prosthesis socket

LIU Jie-min, Daniel SU, SANG Yuan-jun, LI Xiang, LUO Yun (*State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract:** **Objective** To design a constant-force extrusion unit to meet the functional requirements of the prosthesis socket. **Methods** Based on the operational principle that the constant-force derives from offsetting of the positive and negative stiffness, the leaf spring was simulated based on the finite element analysis software. According to the simulation result of the leaf spring, the coefficient of spring stiffness was calculated. The constant-force unit after processing and assembling was tested by compression experiment. **Results** The simulation result was consistent with experimental result and the constant force of extrusion unit obtained an error about 2% within 3.5-mm range. **Conclusions** The constant-force characteristic is confirmed by experiment, which lays the foundation of realizing the time-shared and load-bearing hand prosthesis socket.

**Key words:** Prosthesis socket; Constant-force unit; Leaf spring; Finite element analysis

接受腔设计对于假肢代偿功能和残端舒适度以及肌细胞的力学环境等都有很大影响<sup>[1]</sup>。假肢手接受腔作为假肢手和残肢连接的载体,必须实现假肢手的固定、悬吊以及力和运动的传递(即界面功能传递性)等功能。然而为了实现功能传递性,对残肢软组织进行长时间挤压会导致组织局部血液循环受阻、末端肿胀、甚至是组织坏死等一系列的安全舒适性问题<sup>[2]</sup>。因此,假肢的功能传递和舒适安全

性对界面适配特性提出了不同的要求并形成了一对矛盾。针对这一矛盾,国内外研究学者经过多方面的探索,提出了多种接受腔的设计方法。例如:Greenwald<sup>[3]</sup>设计了一种几何可变接受腔,包含多个可变液体腔囊分布,提高了适配性,均化并降低了各挤压区域的受力,避免了局部应力过大损伤皮肤组织;然而这种方式下液囊相对笨重,同时由于皮肤与界面的全接触,不易散热,出汗后容易引起湿疹,很

收稿日期:2016-05-31; 修回日期:2016-07-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013300)。

通信作者:罗云,教授,博士研究生导师,E-mail: luoyun@sjtu.edu.cn。

大程度上影响了假肢佩戴的舒适性。Alley 等<sup>[4]</sup>在分析接受腔力、运动传递原理和人体软组织生物力学特性之后,设计了以释压稳定(compression-release stabilization, CRS)接受腔为核心的高仿真假肢生机界面,并应用到美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的革命性假肢 DEKA 假肢手的研究和临床试验中;然而这种框架式接受腔由于要对部分软组织进行预压缩而产生长时间较高的压力分布,对局部软组织和皮肤不利。虽然上述设计方案在一定程度上改善性能或解决了个别问题,但仍未解决功能传递和舒适安全性这一根本矛盾。为提高假肢接受腔功能传递性的同时保证其舒适安全性,本课题组提出了分时分区承载的假肢接受腔方案。甘云等<sup>[5]</sup>设计了一种基于负刚度原理的假肢手接受腔,通过对密闭腔体单元抽真空形成的内外压力差与负刚度挤压块的压力特性作用,实现了对软组织挤压松紧的快速切换,初步实现了分时分区承载的要求。然而负刚度挤压块的压力非线性和不稳定性决定了接受腔在松紧状态切换中的不稳定性,同时由于挤压块的负刚度特性,手臂运动引起的肌肉膨胀容易导致挤压块的挤压力降低,进而产生接受腔滑移。而恒力挤压机构的恒力特性既能实现负刚度挤压块的快速切换功能,也可以解决负刚度挤压块的切换不稳定性和接受腔滑移问题。因此,需要重新设计恒力挤压块结构以实现恒力特性。

恒力结构是一种能够在一定行程范围内输出相对恒定的力的机构,由于它的被动控制结构不需要复杂的控制和反馈回路,近年来在机械领域得到了广泛应用,例如:印刷机中的送纸机构<sup>[6]</sup>、支吊管道的恒力支吊架<sup>[7]</sup>、测量软组织截面积<sup>[8]</sup>、机器人末端执行器力调节机构<sup>[9]</sup>。随着各个领域对恒力机构需求的日益增长,越来越多的恒力机构被提出。严辉等<sup>[10]</sup>利用弹簧-凸轮恒力矩机构通过与凸轮同轴的圆形转轮获得恒定拉力,李德军等<sup>[11]</sup>利用曲柄滑块机构和拉簧设计了一种恒力机构, Pedersen 等<sup>[12]</sup>利用拓扑结构和尺寸优化设计了一种恒力传递机构,Pham 等<sup>[13]</sup>利用弯曲梁和柔性铰链设计了一种双稳态的柔性恒力机构。

本文利用正刚度弹簧和负刚度弹簧片正负刚度抵消获得零刚度的原理设计了一种适应假肢接受腔

的恒力挤压结构。该恒力挤压结构基于甘云等<sup>[5]</sup>提出的负刚度挤压块结构,利用有限元仿真软件 ANSYS 获取弹簧片的仿真力学曲线,进而寻找合适的正刚度弹簧,获得相对恒定的输出挤压力曲线。最终通过对组装完成的实体模型进行力学挤压实验,证明了该恒力挤压块结构的恒力输出特性。

## 1 恒力机构设计

### 1.1 恒力机构设计要求

本文的恒力机构设计基于可变速假肢手接受腔,可变速假肢接受腔能够通过假肢接受腔的形状和体积的时序变化调整生机界面的松紧适配特性;在接受腔壁与残肢软组之间布置体积可变的挤压腔体单元,并采用主动方式控制及驱动挤压单元的形状或体积的时序变化<sup>[5]</sup>(见图 1)。

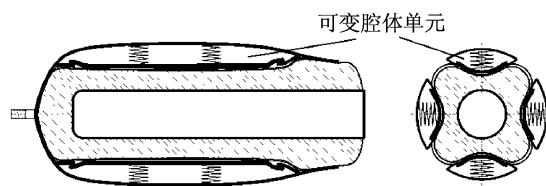


图1 可变速假肢接受腔示意图

Fig.1 Schematic of variable prosthesis socket

假肢手接受腔与肌肤软组织接触实现快速松紧切换的关键在于可变腔体单元,而可变腔体单元的核心是恒力挤压结构。为了实现挤压松紧快速切换,设计利用密闭腔体抽真空驱动和具有恒力挤压特性的可变腔体挤压单元,其原理是利用负压和恒力挤压力的作用实现松紧态快速切换的目的。因此,恒力机构的选择必须在一定的挤压行程内可逆地实现恒力挤压,快速切换则需要恒力机构在挤压过程中能量可逆地实现储存和释放。

### 1.2 恒力机构结构及工作原理

结合接受腔的使用要求,借鉴已有研究成果,设计一种简单实用的恒力挤压结构,其实质是利用正负弹簧并联组合成的零刚度复合弹性体,由于正负刚度相抵消,挤压块上压板在挤压过程当中挤压力将保持恒定。整个恒力挤压块结构包括弹簧片(4枚)、正弹簧(6枚)以及与之相配套的上挤压板和底座,具体结构如图 2(a)所示,其中弹簧片与底座以及上压板之间采用铰链连接。

图2(b)所示为恒力挤压结构的负刚度弹簧原件。当在恒力挤压结构的上压板施加压力时,弹簧片表现为负刚度特性,弹簧片产生的总弹性力为 $F_1$ ,而正刚度弹簧产生的总弹性力为 $F_2$ ,则恒力机构产生的总弹性力 $F = F_1 + F_2$ [见图3(c)]。由于

限位销的作用,恒力挤压元件变形范围被限制在 $X_1$ 与 $X_0$ 之间。因此,通过改变弹簧片和线性弹簧的参数,保证 $F$ 在 $X_0 \sim X_1$ 之间平缓稳定,可以使设计的挤压结构获得相对稳定的恒力输出。

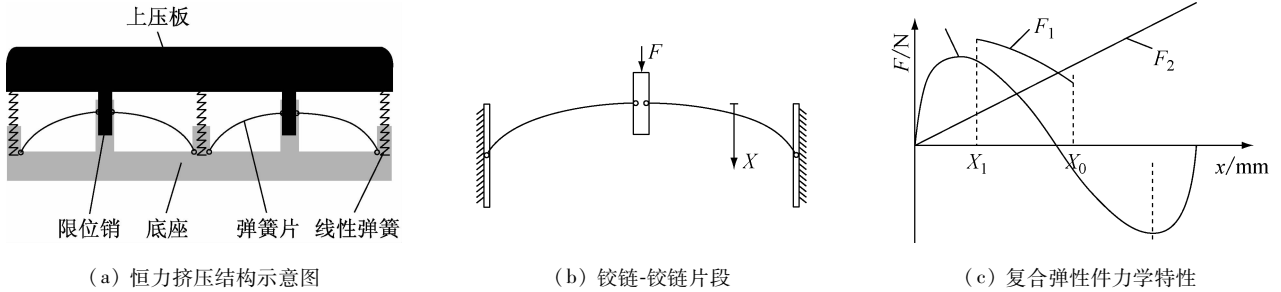


图2 恒力挤压单元示意图及其机构力学特性

Fig.2 Schematic and mechanical properties of the constant-force extrusion unit (a) Schematic of constant-force extrusion unit, (b) Hinge to hinge, (c) Mechanical properties of composite elastic element

### 1.3 恒力机构仿真设计

弹簧片的铰链-铰链片段可简化为伪刚体模型进行数学模型计算<sup>[14]</sup>,但是计算的过程相对比较复杂且近似处理较多,可能影响到结果的准确性,故从弹簧片的有限元仿真计算角度出发设计恒力机构。根据假肢手接受腔的腔体设计要求,给定弹簧片的原始长度为20 mm,宽度为6 mm,厚度为0.4 mm,弯曲弧对应的圆心角为 $45^\circ$ (见图3)。

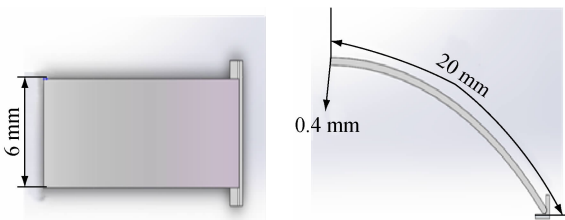


图3 恒力机构弹簧片及底座仿真模型示意图

Fig.3 Simulation model of the leaf spring and the base in constant-force unit

仿真模型包括弹簧片和底座两部分,接触部分采用圆柱弧面连接,保证弹簧片能够正常地转动。对弹簧片的顶端上边线 $X$ 、 $Z$ 方向的自由度约束,使其只能在竖直方向上自由运动,弹簧片与底座间建立接触对,底座底面 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向自由度全约束,在弹簧片顶端上边线中点施加竖直方向的位移载荷(7 mm),材料选用普通的不锈钢和ABS塑料[见图

4(a)]。从图4(b)可以看出,弹簧片在4~7 mm之间呈现出接近线性的负刚度特性,根据1.2节提到的恒力挤压机构的组成和工作原理,挤压块的恒力 $F = F_1 + F_2$ ,即保证 $K_1 + K_2 = 0$ ( $F_1$ 、 $K_1$ 表示4枚弹簧片产生的总弹性力和总弹性刚度系数, $F_2$ 、 $K_2$ 表示6枚弹簧的总弹性力和总弹性刚度系数)。单枚弹簧片仿真结果获得的曲线后半段(4~7 mm处)

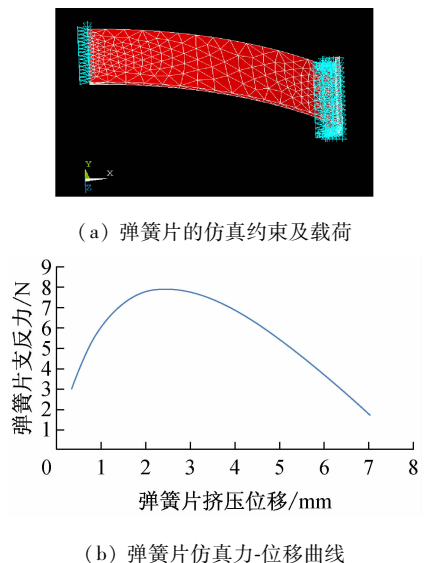


图4 弹簧片仿真约束载荷及仿真结果

Fig.4 Simulation constraints and result of the leaf spring (a) Simulation constraints and loads of the leaf spring, (b) Displacement-force curve of the leaf spring

的弹性刚度系数为  $-6.387 \text{ N/mm}$ , 经计算可获得单枚弹簧的弹性刚度系数应为  $1.596 \text{ N/mm}$ 。

图5所示为拟合叠加后的恒力曲线, 其中长虚线表示4枚弹簧片的总弹性力  $F_1$ , 短虚线表示6枚弹簧的总弹性力  $F_2$ , 实线表示最终的拟合合力  $F$ 。从图5可以看出, 在挤压位移  $4 \sim 7 \text{ mm}$  处, 挤压力基本上保持恒定。

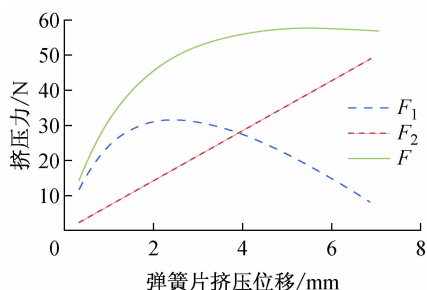


图5 恒力机构的恒力拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of the constant-force unit

## 2 恒力机构测试

### 2.1 恒力机构模型加工

为了证明恒力挤压机构的恒力特性, 需要对恒力挤压机构进行模型加工。恒力挤压机构的底座、上压板和连接轴采用3D打印加工, 材料为ABS; 弹簧片采用激光线切割加工, 并进行弯曲处理, 材料为不锈钢。弹簧片的尺寸依据1.3节中有限元仿真模拟的参数, 弹簧选择拟合确定的刚度系数为  $1.6 \text{ N/mm}$  的弹簧。图6(a)所示为装配前的恒力机构组件和装配后的恒力机构实体模型。

### 2.2 恒力机构验证

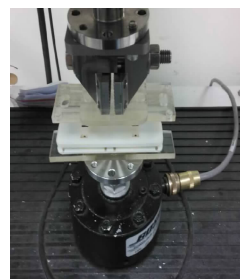
图6(b)所示为测试恒力机构力-位移曲线的实验平台, 实验装置为Bose压力机(Bose Electroforce 3330 Test Instruments, 美国)。将恒力挤压机构水平放置在压力平台上, 使用特别加工的表面光滑的上下夹具挤压恒力机构, 从虚接触(上夹板与恒力机构上压板处于部分接触状态)状况开始对恒力机构施加  $0.2 \text{ mm/s}$  的挤压位移, 测量相应挤压位移下的压力, 恒力结构上压板与基底接触时停止挤压, 最终获得恒力机构力-位移曲线。

恒力挤压机构在安装前自然状态下的挤压行程约为  $6 \text{ mm}$ 。图6(c)所示为恒力挤压块在安装前的力-位移曲线, 对比图5的仿真实验结果可知, 仿真

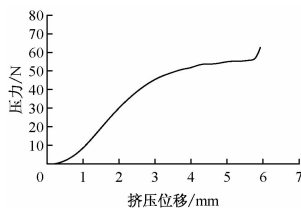
结果和实验结果基本一致。安装后由于轴销的限位作用, 挤压行程约为  $3.5 \text{ mm}$  且基本上处于恒力挤压状态, 位移在  $0 \sim 1.5 \text{ mm}$  范围内。由于上夹块与恒力机构处于虚接触状态, 压力随位移急剧增大, 在  $1.5 \sim 4 \text{ mm}$  的位移范围内呈现接近恒定的力, 力的波动在  $3 \text{ N}$  以内, 相对误差小于  $2\%$ , 说明恒力的恒定性较高[见图6(d)]。



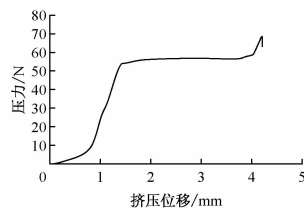
(a) 恒力单元实体模型



(b) 恒力单元测试实验装置



(c) 压力随位移变化曲线  
(安装前)



(d) 压力随位移变化曲线  
(安装后)

图6 恒力机构测试实验装置及实验结果

Fig.6 Experiment setup of the constant-force unit and experimental result (a) Solid model of the constant-force unit, (b) Experiment setup of the constant-force unit, (c) Displacement-force curve of the processing model (before installing), (d) Displacement-force curve of the processing model (after installing)

## 3 结论

本文通过铰接-铰接典型负刚度模型与正刚度弹簧设计了假肢手接受腔恒力挤压机构, 依据有限元分析得到的负刚度弹簧片的力学数据, 计算获得合适的正刚度弹簧的参数。基于此方法对正刚度弹簧进行筛选, 与加工后的弹簧片和上压板底座装配完成恒力挤压结构, 并对恒力机构进行实验测试, 最终恒力机构实现了  $2\%$  范围内的输出恒定性, 恒定性较高, 为后续假肢手接受腔分时分区控制奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 但建波, 蒋文涛, 刘展, 等. 下肢截肢残端肌肉萎缩的生物力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(6): 580-584.  
 DAN JB, JIANG WT, LIU Z, *et al.* Advances of residual limb muscle atrophy in biomechanics research [J]. J Med Biomech, 2011, 26(6): 580-584.
- [2] MAK AF, ZHANG M, BOONE DA. State-of-the-art research in lower-limb prosthetic biomechanics-socket interface: A review [J]. J Rehabil Res Dev, 2001, 38(2): 161-174.
- [3] GREENWALD RM, DEAN RC, BOARD WJ. Volume management: Smart variable geometry socket (SVGS) technology for lower-limb prostheses [J]. J Prosthet Orthot, 2003, 15(3): 107-112.
- [4] ALLEY RD, WILLIAMS TW 3rd, ALBUQUERQUE MJ, *et al.* Prosthetic sockets stabilized by alternating areas of tissue compression and release [J]. J Rehabil Res Dev, 2011, 48(6): 679-696.
- [5] 甘云, 李祥, 桑元俊, 等. 界面压力可控式假肢接受腔设计[J]. 上海交通大学学报, 2013, 49(11): 106-113.
- [6] 张海燕, 赵亚鹏, 张景霞. 印刷机恒力机构大拉簧的优化设计[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 38-40.
- [7] 姚如一, 胡家辛. 恒力弹簧支吊架的优化设计[J]. 机械科学与技术, 1995(2): 3-6.
- [8] 倪国新, 成海平, 吴宗耀. 恒力法测量制动对兔髌韧带截面积的影响[J]. 医用生物力学, 1999, 14(1): 54-57.  
 NI GX, CHENG HP, WU ZY. The constant pressure micrometer for measuring the effects of immobilization on cross-sectional area of patellar tendon [J]. J Med Biomech, 1999, 14(1): 54-57.
- [9] LAN CC, WANG JH, CHEN YH. A compliant constant-force mechanism for adaptive robot end-effector operations [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage: IEEE, 2010: 2131-2136.
- [10] 严辉, 李路明, 郝红伟, 等. 一种恒力机构的设计与测试[J]. 中国科技论文在线, 2009, 4(8): 550-554.
- [11] 李德军, 刘洋. 曲柄滑块恒力机构的设计[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(11): 54-56.
- [12] PEDERSEN CBW, FLECK NA. Design of a compliant mechanism to modify an actuator characteristic to deliver a constant output force [J]. J Mech Design, 2005, 128(5): 1101-1112.
- [13] PHAM HT, WANG DA. A constant-force bistable mechanism for force regulation and overload protection [J]. Mech Mach Theory, 2011, 46(7): 899-909.
- [14] HOWELL LL. 余跃庆(译). 柔顺机构学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.