DOI:10.11921/j.issn.2095-8382.20210312

基于有限元方法的 SMILE 角膜建模及术后变形和 应力分析

胡乾勇^{1,2},张学勇^{1,2,3},耿胜远^{1,3}

(1.安徽建筑大学 数理学院,安徽 合肥 230601; 2.安徽省建筑声环境重点实验室,安徽 合肥 230601;3.安徽建筑大学 声学研究所,安徽 合肥 230601)

摘 要:为探究飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(Small incision lenticule extraction, SMILE)术后角膜的 变形和应力变化,本文采用 Odgen 超弹本构方程来描述角膜力学行为,构建角膜有限元模型,在14、16、18 和 20 mmHg 四种眼内压作用下仿真 SMILE 角膜屈光手术矫正屈光度(-1~-6 D)、中央角膜厚度(480~630 μm)、角膜切削直径(4~8 mm)对术后角膜内表面中央顶点位移差的影响,并研究术后角膜内表面整体位 移和等效应力变化。结果表明,在相同眼内压作用下,角膜内表面中央点位移差与矫正屈光度呈近似线性增长;中央角膜越厚,角膜内表面中央点位移变化则越小;角膜切削直径越大,角膜内表面中央点位移差变化越显著。 对中央角膜厚、矫正屈光度低、切削直径小的患者,行 SMILE 术后,角膜变形较小,手术安全性高,术后不 易诱发角膜扩张膨隆。本文工作可为临床近视眼角膜 SMILE 屈光手术术前准备和术后效果预测提供参考。
 关键词:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术;矫正屈光度;有限元分析;变形;应力
 中图分类号: R779.63

Corneal Modeling and Post-operative Deformation and Stress Analysis of SMILE Based on Finite Element Method

HU Qianyong^{1, 2}, ZHANG Xueyong^{1, 2, 3}, GENG Shengyuan^{1, 3}

(1. School of Mathematics and Physics, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

Key Laboratory of Architectural Acoustic Environment of Anhui Higher Education Institutes, Hefei 230601, China;
 Institute of Acoustics, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to explore the change of deformation and stress of the cornea after the small incision lenticule extraction (SMILE), an Odgen superelastic constitutive equation was used to describe the mechanical behavior of the cornea, and corneal finite element models were constructed before and after SMILE. Under the intraocular pressures (IOPs) with 14, 16, 18 and 20 mmHg, the influence of refractive powers ($-1\sim-6$ D), central corneal thicknesses ($480\sim630$ µm), and ablation diameters ($4\sim8mm$) on the displacement difference of the central vertex of the postoperative corneal inner surface was analyzed, and the overall corneal displacement and equivalent stress changes of postoperative cornea were studied. The results showed that under the same IOP, the central displacement difference of inner surface of cornea increased linearly with the corrected diopter; the thicker the central cornea,

收稿日期: 2020-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(61471003);国家重点研发计划项目(2018YFB2003801);安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2020A0484)。

作者简介:胡乾勇(1995-),男,硕士研究生,研究方向:光电工程。

⁽C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

the smaller the central displacement of the inner surface of cornea, and the larger the diameter of corneal cutting, the more significant the change of central displacement of corneal inner surface.For patients with thick central cornea, low corrected diopter and small cutting diameter, corneal deformation is small after SMILE operation, and the operation safety is high. Furthermore, the cornea is not easy to induce dilatation and swelling after operation.For clinical myopia, this work can provide reference for preoperative preparation and postoperative prediction of corneal SMILE refractive surgery.

Key words: Small incision lenticule extraction; correction diopter; finite element analysis; deformation; stress

角膜位于眼的最前部,对眼球系统的屈光力影 响最大,约占眼球总屈光度的三分之二。近年来, 屈光不正的眼部疾病越来越常见,其发病率也逐 年上升。近视眼是最为常见的一种眼屈光不正, 临床上广泛开展的近视眼治疗方案角膜屈光手术 主要是针对眼球角膜的,如角膜放射状激光切开 术(Radial keratotomy, RK), 准分子激光角膜表面 切削术(Photorefractive keratectomy, PRK)、准分子 激光原位角膜磨镶术(Laser in situ keratomileusis, LASIK)、准分子激光上皮下角膜磨镶术(Laser subepithelial keratomileusis, LASEK)^[1-2]、角膜上皮 刀制作上皮瓣、飞秒激光进行角膜瓣切削、O值引 导和波前像差引导的"个体化"角膜切削^[3]和飞 秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (Small incision lenticule extraction, SMILE)。其中 SMILE 是近年 来最为先进的近视眼角膜屈光手术方式,因其安 全性高、治疗效果好,目前在眼科临床得到广泛 应用^[4]。

SMILE 手术基本原理是利用飞秒激光首先在 角膜基质层切削一个透镜,然后从角膜表面再制作 小切口(约2mm)并取出切削的基质层。该手术 通过改变角膜的曲率、形状和刚度,在眼内压作用 下引起角膜应力的重新分布,藉此改变角膜的有效 弹性,从而改变屈光力,达到调节其折射能力,实现 视力矫正。SMILE 手术具有微创且实施过程无需 制作角膜瓣的优势,虽然能最大程度上保持原有角 膜生物力学特性^[5],但由于术后角膜基质层变薄, 角膜刚度下降,高度近视眼矫正可能发生角膜扩张 膨隆现象,进而影响疗效。

本文通过建立角膜有限元模型,在不同眼内 压作用下,分析眼矫正屈光度、中央角膜厚度以及 SMILE 手术切削区直径对角膜内表面中央点位移 差的影响,并进一步研究 SMILE 手术前后角膜内 表面位移与等效应力分布。

1 角膜有限元模型

1.1 几何模型

角膜是整个眼球屈光系统的重要组成部分,从 外到内由上皮细胞层、前弹力层、基质层、后弹力 层、内皮细胞层五层构成,其中基质层占整个角膜 厚度的90%,由300多层平行于角膜表面的多层胶 原板与少量角膜细胞构成。Elsheikh等^[6]研究发 现角膜上皮层、前弹力层,对其生物力学特性影响 较小,角膜生物力学性能主要体现在角膜基质层。

角膜位于眼球前部,是具有一定厚度和表面 张力的椭圆形透明生物软组织,人们对其形态正 确认识则经历了一个漫长的过程。1943年 Baker^[7] 提出圆锥体截痕理论 $y^2 = 2r_0x - px^2$, Mandell 等 人在此基础上提出角膜椭球面模型^[8], Bennett 等 人认为角膜前表面为椭球面,提出角膜截面公式 $r_s^2 = r_0^2 + (1-p)y^{[9]}$, Gatinel 等人^[10]研究发现,绝 大部分正常人角膜前表面符合椭球面模型,少数为 抛物面模型,目前比较常用的有两种模型,双曲模 型来构建,其曲面方程表达式如下:

角膜前表面:

$$\frac{x^2}{R_a^2} + \frac{y^2}{R_b^2} + \frac{(z - R_c)^2}{R_c^2} = 1 \quad (R_a, R_b, R_c > 0)$$
(1)

角膜后表面:

$$\frac{x^2}{R_a^2} + \frac{y^2}{R_b^2} + \frac{\left(z - R_c - d\right)^2}{R_c^2} = 1 \ (R_a, R_b, R_c > 0)$$
(2)

式中,*R_a*,*R_b*,*R_c*分别表示角膜水平半径、垂直 半径与光轴半径,*d*表示角膜中央点厚度,*l*表示角 膜水平横经,建模使用正常人眼角膜理想曲面几何 参数^[13]见表1。

表1 正常人角膜理想曲面几何参数

Parameters	R _a /mm	R _b /mm	R _c /mm	<i>l</i> /mm	d/µm
External surface	7.845	7.723	7.742	11.8	560
Internal surface	6.847	6.731	6.716	13.58	560

考虑 SMILE 术后角膜生物力学性能变化主要 集中在中央区及旁中央区,巩膜对角膜的固定作用 很强,同时忽略角膜异质缘的影响。本文有限元模 型采用刚性约束边界条件,在 ANSYS 中约束条件, 如表 2 所示。

表 2 角膜边缘处约束

Rigid Constraint	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
Value	0	0	0	0	0	0
由于角膜	承受的	的是均	匀眼网	内压作	用,在(方真计
算时,其内部旗	施加せ	勾匀压	力,本	文压力	」条件	为 14、
16,18,20 mmH	Ig 四利	种均匀	压力。			

1.2 本构方程

角膜是生物软组织材料,具有滞后、松弛、蠕变 及非线性的应力 – 应变关系等黏弹力学性能。张 迪等人^[14]采用二阶 Odgen 模型拟合兔角膜膨胀实 验数据,结果显示拟合优度 R²大于 0.8。为使有限 元仿真特性更接近真实角膜,本文利用 ANSYS 材 料属性曲线拟合功能对文献给出的实验数据^[15]进 行拟合,结果显示采用二阶 Odgen 函数拟合效果最 佳,图 1 为拟合效果图。



图 1 Odgen 模型拟合效果

Ogden 应变能函数如下:

$$W = \sum_{i=1}^{N} \frac{u_i}{a_i} \left(\lambda_1^{a_i} + \lambda_2^{a_i} + \lambda_3^{a_i} - 3 \right) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d_i} \left(J - 1 \right)^{2i} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \tag{4}$$

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{V}{V_0} \tag{5}$$

式中, λ_1 , λ_2 , λ_3 表示材料在三个主方向上的伸 长率, L_0 表示原长, ΔL 表示拉伸增量,J表示弹性 体积比,对不可压缩材料 J=1, V_0 表示原体积,V表 示膨胀后体积; u_i , a_i ,N表示材料参数,为达到函数 收敛稳定性要求,一般要求 N<3,文中 N取 2, u_i , a_i 是通过实验数据拟合 ogden 本构方程后反推得到 的与角膜剪切模量相关的参数; d_i 表示材料不可压 缩特性参数,角膜视为不可压缩材料, d_i 近似取 0。

拟合得到本构模型参数,见表3所示。

表 3 Odgen 拟合参数

Parameters	u_1	<i>u</i> ₂	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	d_1	d_2
Value	275.280	275.345	22.598	22.619	0	0

本文采用 PLANE182 单元类型,该单元具有塑 性、超弹性、应力刚度、大变形和大应变特性,可模 拟接近不可压缩和完全不可压缩的超弹材料的变 形,也可作为轴对称单元。应用 ANSYS 软件首先 建立角膜四分之一模型,然后利用轴对称得到完整 角膜模型,如图 2 所示。



图 2 角膜有限元模型

1.3 网格密度验证

对中央角膜厚度为 560μm 的模型进行试算, 给模型施加 20 mmHg 均匀压力值,通过对角膜内 表面顶点位移量分析来验证网格密度对有限元计 算精度影响,图 3 给出的是术前角膜模型内表面顶 点位移随网格密度的拟合变化曲线(采用4阶多 项式拟合,拟合优度 R²=0.986 6)。网格密度小于 0.3 mm 时计算数值开始趋于稳定,当网格密度介 于 0.13 mm 至 0.22 mm 时,计算位移偏差小于 0.01

um,最为稳定,与 Ariza-Gracia 等人^[16] 网格密度验 证结果相似。本文在有限元分析计算时,网格密度 取 0.15 mm。



图 3 角膜内表面顶点位移与网格密度变化曲线

1.4 手术消融曲线

在 SMILE 屈光手术中,飞秒激光对基质层的 消融厚度由消融函数决定^[17],本文采用 Munnerlyn 等人^[18]提出的经典消融曲线函数,计算公式如 下:

$$Tx = \sqrt{r_i^2 - x^2} - \sqrt{r_f^2 - x^2} + \sqrt{r_f^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} - \sqrt{r_i^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2}$$
(6)

$$D = \left(n-1\right) \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_f}\right) \tag{7}$$

式中 Tx 是角膜消融厚度,x 表示离视轴的水 平距离(0~S/2),S 是手术切削直径,r_i为角膜消融 前曲率半径,即有限元模型光轴半径 R_c,r_f为角膜 消融后曲率半径,D 表示矫正屈光度,n 表示角膜 屈光指数,值取 1.376。

图 4(a) 为角膜切削示意图, 图 4(b) 为消融



曲线图,当角膜消融直径为6mm,矫正屈光度分别为-1~-6D时,需要切削的角膜消融厚度。

2 仿真及结果分析

临床手术中通常把手术前后角膜内表面中央 点位移差作为评价角膜变形的一个重要参量^[19-20],角膜内表面中央点位移差定义为 Δ M=M_B-M_A,其中 M_A,M_B分别表示 SMILE 术前、术后角膜 内表面中央点的位移。

采用 ANSYS 软件对 SMILE 术前术后角膜分 别进行有限元建模,在14、16、18和20mmHg(1 mmHg=0.133 KPa)四种眼内压作用下,仿真矫正屈 光度数、中央角膜厚度、SMILE 手术切削直径对中 央点位移差的影响。

2.1 矫正屈光度对术后角膜中央点位移差影响

SMILE 角膜屈光手术模型,选用角膜厚度参数 560 µm,切削直径 6 mm,矫正屈光度为-1~-6 D (中低度近视眼),共 6 组角膜屈光手术。图 5 给 出的是在 14、16、18 和 20 mmHg 四种眼内压下,角 膜内表面中央点位移差与矫正屈光度关系曲线图。 从图中可以看出在相同眼内压作用下,角膜内表面 中央点位移差与矫正屈光度呈近似线性增长。这 种现象可能解释为 SMILE 角膜屈光微创手术,由 于矫正度数增大,角膜消融深度增加,角膜残余基 质层变薄,进而角膜整体刚度下降较大,更易变形。 此外,从图 5 中也可以发现,视力矫正同样屈光度 情况下,眼角膜内表面中央点位移差受眼压波动影 响较大,个体眼内压越大,角膜内表面中央点位移 差亦越大,即越易变形,因而眼内压亦是角膜变形 的一个重要因素。本文仿真结果与 SMILE 临床术



(b)不同矫正屈光度下的角膜消融厚度

图 4 角膜屈光手术切削示意图及消融曲线

后角膜内表面中央点位移差(4.11µm±2.35µm) 临床研究结果在同一量级上^[21]。



图 5 术后眼内压作用下,角膜内表面中央点位移差与矫 正屈光度关系曲线

2.2 角膜厚度对术后角膜中央点位移差影响

为了解行 SMILE 术后人群角膜内表面中央点 位移差随个体眼角膜厚度的差异变化情况,现模型 设置眼球矫正屈光度为-6D,切削直径为6mm,中 央角膜厚度(Central corneal thickness,CCT)则分别 取 480、510、540、570、600 和 630 μm 的 6 组数据 进行有限元分析。

图 6 给出的是在 14、16、18 和 20 mmHg 四种 眼内压作用下,角膜内表面中央点位移差与中央角 膜厚度关系曲线。从图 6 中可以看出,中央角膜越 薄,眼内压越大,角膜内表面中央点位移变化越显 著,越易变形。在相同眼内压作用下,中央角膜越 厚,角膜内表面中央点位移变化则越小,即不易变 形。因而可以得出,中央角膜厚度较大的患者比中 央角膜厚度较薄的患者,在行 SMILE 术后,存在术 后角膜膨隆,引发继发性圆锥角膜的概率要小,手 术相对则更为安全有效。



2.3 切削直径对术后角膜中央点位移差影响

在 SMILE 手术中,角膜的切削直径是视力矫 正的一个重要参量。现设置角膜矫正屈光度为 -6 D,中央角膜厚度为 560 μm,切削直径则分别取 4、5、6、7 和 8 mm,通过建立 SMILE 角膜屈光手术 模型,进行有限元分析。

在14、16、18和20mmHg四种眼内压下,切削 直径与术后角膜中央点位移差关系曲线,如图7所 示。从图中可以看出,角膜内表面中央点位移差与 切削直径呈现明显的非线性递增关系。在相同眼 内压作用下,切削直径越大,角膜内表面中央点位 移差变化越显著;眼内压越大,相同切削直径下的 中央点位移差也越大。因而,在行 SMILE 术时,患 者术区切削直径应结合眼内压情况进行选择。



图 7 术后眼内压作用下,角膜内表面中央点位移差与切 削直径关系曲线

为了更全面了解 SMILE 术后角膜整体的变形 情况,下面利用有限元模型对角膜内表面的形变及 等效应力进行分析。

2.4 SMILE 术后角膜内表面位移及等效应力分 布变化

采用眼中央角膜厚度 560 μm,切削直径为 6 mm 的 SMILE 有限元模型,分析比较了眼内压为 16 mmHg 时,屈光度为 -2、-4、-6 D 的 3 组矫正屈 光度手术情况。

图 8 给出的是 SMILE 术后内表面等效应力沿 径向变化曲线,图 9 是 SMILE 术后内表面位移沿 径向变化曲线。从图 8、图 9 中可以看出,在手术 区域(半径 0~3 mm),近视眼 SMILE 术后整体角 膜的应力及形变均比正常眼角膜高;角膜厚度和消 融直径一定时,行 SMILE 术后,在相同眼内压作用 下,矫正屈光度越大,术后手术区域内应力更为集

中,角膜变形较大,尤其角膜顶点附近(0~0.3 mm) 变形最为明显。主要原因是随着矫正度数的增加, 激光消融深度变大,残留基质层变薄,刚度变小。 因此,对高度近视患者,应综合考虑术前角膜厚度 与眼内压因素,合理设置激光切削深度和直径,避 免术后出现角膜膨隆的风险。从图8、图9中也可 以看出,在手术区域,位移和应力从角膜中央顶点 到术区边缘均越来越小,而内表面应力在靠近角膜 边缘处开始线性抬升,相反位移变化渐小。可能的 原因是建模时角膜缘处采用了刚性约束,在该处造 成内表面应力出现增大而位移减小现象。



图 8 SMILE 术后内表面等效应力沿径向变化曲线



图 9 SMILE 术后内表面位移沿径向变化曲线

3 结语

本文建立角膜有限元模型,分析了矫正屈光 度、角膜厚度及切削直径对 SMILE 术后角膜中央 顶点位移差的影响,并对术后角膜内表面位移、等 效应力进行有限元分析。仿真结果显示,SMILE 术 后在眼内压作用下角膜后表面中央区(0-3 mm) 位移较术前有轻微的前移,与 Wang 等人^[22]的研 究结论基本一致。相比 LASIK 手术^[23],SMILE 术 后角膜变形更小,术后更加稳定。在正常眼内压 (8~21 mmHg)作用下,中央角膜厚,矫正屈光度低, 切削直径小的患者,行SMILE术后,角膜变形较小, 手术安全性高,术后不易诱发角膜扩张膨隆。本文 工作对活体角膜生物力学性能研究具有一定的理 论意义,在临床近视眼行 SMILE 手术术前预测、术 后效果评估方面具有参考价值。

参考文献:

- Guo H, Hosseini-Moghaddam S M, Hodge W.Corneal biomechanical properties after SMILE versus FLEX, LASIK, LASEK, or PRK: a systematic review and metaanalysis[J].BMC Ophthalmology, 2019, 19(1):167.
- [2] 金丽娟.眼科 LASIK 与 LASEK 手术治疗高度近视眼的临床效果 [J].临床医学研究与实践,2018,3(15): 87-88.
- [3] 张华,高少芳,赵欣,等.个体化Q值引导去瓣LASEK 手术治疗高度近视的临床疗效观察[J].临床合理用药 杂志,2018,11(19):54-56.
- [4] 秦洁,付婷婷,唐琪,等.SMILE 与FS-LASIK 术后角膜 生物力学变化的 Meta 分析 [J]. 眼科学,2019,8(3):9.
- [5] 吴文静.飞秋激光小切口基质内透镜取出术(SMILE) 术后视觉质量和生物力学及相关临床和基础研究[D]. 天津:天津医科大学,2017.
- [6] Elsheikh A, Alhasso D, Rama P.Assessment of the epithelium's contribution to corneal biomechanics[J].
 Experimental Eye Research, 2008, 86 (2):445-451.
- Baker T Y.Ray tracing through non-spherical surfaces[J].
 Proceedings of the Physical Society, 1943, 55 (5): 361–364.
- [8] Mandell RB. Mathematical model of the corneal contour[J]. Br J Physiol Opt, 1971, 27: 183–197.
- [9] Bennett A G, Rabbetts R B.What radius does the conventional keratometer measure?[J].Ophthalmic and Physiological Optics, 1991, 11 (3):239-247.
- [10] Gatinel D, Haouat M, Hoang-Xuan T.A review of mathematical descriptors of corneal asphericity[J].Journal Francais d'Ophtalmologie, 2002, 25 (1):81-90.
- [11] Cano D, Barbero S, Marcos S.Comparison of real and computer-simulated outcomes of LASIK refractive surgery[J].Josa A, 2004, 21 (6):926-936.
- [12] 唐聪恺. 眼角膜三维模型构建及其基于有限元的生物 力学分析 [D]. 厦门:厦门大学,2006.
- [13] 邵婷婷.正常成年国人角膜数学模型的建立 [D]. 温州: 温州医科大学,2006.

(下转第112页)

真实的体验,又属于"以虚生实"的表现手法。传 统文化中形容"虚实"的关系,正是所谓"实处之 妙,皆因虚处而生"。这种"以虚代实"的手法全 然不同于西方戏剧的写实性。"虚实交错"的表达 手法,应用在动画电影的叙事中,能够发挥出绝佳 的表达效果,并毫无疑问能为国产动画电影探索其 民族化叙事风格提供帮助。

4 结语

中国动画的民族化表达之路任重而道远。当 代的中国动画人要解决好造型、表演、叙事的民族 化问题,使动画作品的形式与内容达到民族风格的 统一,不仅需要具有民族文化知识的基础,还需要 在审美及哲学层面上对民族文化有更深的体认,更 需要在心理上树立民族表达的自觉和自信。中国 的动画电影,无论是汲取传统民族文化的养分进行 创新转化,还是学习、借鉴西方优秀的文化和技术, 与当代生活相结合,都不能迷失自己的发展方向, 丢弃自身的民族特质。如此,才能得到其他民族的 认同,在世界动画领域占据一席之地。

参考文献:

[1] 聂欣如.什么是动画 [M].上海:复旦大学出版社,2016.

(上接第84页)

- [14] 张迪, Muhammad A.Khan, 秦晓, 等. 基于膨胀实验数据 获取角膜屈光手术后力学参数的方法初探 [J]. 中国医 学物理学杂志, 2018, 35 (4): 449-454.
- [15] 王秀玲,李爽.正常与病态眼角膜拉伸力学的特性[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2010,14(46):8590-8593.
- [16] Ariza-Gracia M Á, Zurita J F, Piñero D P, et al.Coupled biomechanical response of the cornea assessed by noncontact tonometry. A simulation study[J].PLoS One, 2015, 10(3):e0121486.
- [17] 沈建新,周振江.屈光性近视远视矫正的角膜消融深度计算[J].中国生物医学工程学报,2005,24(4):461-467.
- [18] Munnerlyn C R, Koons S J, Marshall J.Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 1988, 14(1): 46-52.

- [2] 上海电影史料编辑组.上海电影史料[Z].上海电影局 史志办公室,1995:330.
- [3] H.G. 布洛克(H.Gene Blocker). 现代艺术哲学[M]. 滕 守尧,译.成都:四川人民出版社,1998:224.
- [4] 塞巴斯蒂安·德尼斯.动画电影[M].谢秀娟,译.杭州: 浙江大学出版社,2013:38.
- [5] Michael Barrier. Hollywood Cartoons; American animation in its golden age[M]. New York; Oxford University Press, 2003;257–347.
- [6] 徐秀明,葛红兵.中国动画理论批判:形式主义、古典 主义与体制艺术[J].上海师范大学学报(哲学社会科 学版),2013,42(6):109-117.
- [7] Robert McKee. Story:substance, structure, style, and the principles of screenwriting[M]. New York:Harper Collins Publishers, 2011:33.
- [8] Syd Field.Screenplay: foundations of screenwriting[M]. New York: Random House USA, 2011.
- [9] E·M·福斯特.小说面面观[M].冯涛,译.上海:上海译 文出版社,2016.
- [10] 宗白华.宗白华全集(第2卷)[M].合肥:安徽教育出版社,1994.
- [11] 聂欣如.新中国动画的"民族性"问题[J].艺术百家, 2018,34(1):157-163,226.
- [12] 费穆.风格漫谈 [N].香港.大公报·电影圈,1950.
- [13] 赵沛霖.兴的源起——历史积淀与诗歌艺术[M].北京: 中国社会科学出版社,1987.
- [19] Pandolfi A, Fotia G, Manganiello F.Finite element simulations of laser refractive corneal surgery[J].
 Engineering With Computers, 2008, 25 (1):15-24.
- [20] 陈修国,沈珉,王雁,等.LASIK 术后角膜变形和应力的 有限元分析 [J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志,2019, 21(2):110-116.
- [21] 王敏,蔡劲峰,芮燕君,等.飞秒 SMILE 与飞秒 LASIK 术后远期泪膜与角膜稳定性的比较研究 [J]. 国际眼科 杂志,2016,16(12):2288-2291.
- [22] Wang B J,Zhang Z Y,Naidu R K, et al.Comparison of the change in posterior corneal elevation and corneal biomechanical parameters after small incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted LASIK for high myopia correction[J].Contact Lens and Anterior Eye, 2016, 39 (3):191-196.
- [23] 赵立全,李良毛,刘俊,等.飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术与飞秒激光制瓣LASIK治疗近视及散光术后1年随访效果观察[J].海南医学,2019,30(6):759-762.