

一种可自动检测并自适应调节屈光度的智能近视眼镜设计研究

李武君 林 敏

广东交通职业技术学院 智慧交通学院, 广东 广州 510800

摘要: 本文针对验光滞后和缺乏主动干预的问题, 提出了一套智能眼镜解决方案。这副眼镜集成了自动验光、动态变焦和近视防控功能。它内置 Shack-Hartmann 波前传感器, 可以定时测量佩戴者的屈光状态, 再用电润湿液体透镜, 实现在 $\pm 3\text{D}$ 范围内的电控连续变焦。镜片外围区域采用了近视性离焦设计, 专门用来抑制儿童和青少年的近视加深。文中具体阐述了硬件架构和复合镜片剖面设计, 讨论了测量和闭环控制算法, 还进一步分析了“恢复视力”这一目标在现有证据下的现实边界。

关键词: 智能眼镜; 自动验光; 波前传感; 电润湿液体透镜; 近视性离焦

0 引言

近视已经成了一个全球性难题, 尤其在中国, 青少年近视率长期居高不下。Holden 团队分析了 145 项研究, 他们发现, 早在 2000 年, 全球有 14 亿人近视。放眼 2050 年, 这个数字预计会暴涨到 47.6 亿——差不多全球一半人口, 高度近视人数也将飙升到 9.4 亿左右。

而现有的矫正方法, 其实有两个大问题。先说验光, 大多还得跑医院或眼镜店。对孩子们来说, 度数一年能涨 0.5 到 1.0 D, 可换镜时间通常拖得太久, 往往一年才换一次。这中间一大片时间里, 眼镜度数跟不上, 孩子基本处于“欠矫”状态。尴尬的是, 这种状态本身反而可能让近视进展得更快。再看镜片, 大部分单光镜片只是矫正视力, 根本没考虑干预近视发展。

其实十年下来, 随机对照试验已经反复证明, 在镜片外围设计近视性离焦可以真的减缓眼轴拉长。比如香港理工大学研发的 DIMS 镜片, 两年实验下来, 参与试验组的近视进展比只戴普通单光镜的孩子慢了 52%。这种设计对眼轴生长和屈光状态的影响还得到了后续的数据支持。再看 MiSight 双焦软镜, 三年试验结果显示, 屈光度上升少了 59%, 眼轴增长慢了 52%。

把三件事放进同一副眼镜——随时测度数、自动调度数、主动干预进展——是本 研究的设计目标。下文给出整机架构、镜片光学设计、算法方案与安全性讨论。

1 系统总体架构

整机由验光、变焦、感知、主控供电、移动端五个子系统构成, 硬件架构见图 1。

验光模块是整个系统的核心。镜框上边嵌着一颗 850 nm 的垂直腔面发射激光器 (VCSEL), 光线通过分光器顺着视轴

直接投向视网膜。眼底把光反射回来, 这些散射光穿过瞳孔, 再被微型透镜阵列分成几十束子光束, 最后在 CMOS 传感器上投下一个光斑阵列。只要检查这些光斑偏离理想位置的距离, 就能得到波前的斜率, 进一步拟合之后, 球镜、柱镜以及高阶像差一目了然。这其实就是 Shack-Hartmann 法则。台式验光仪用的原理, 便携式设备也拿它当底层。Liang 等人在 1997 年最早把它用在人眼活体测量上。测量过程中, 系统会引导佩戴者盯着远目标, 同时施加雾视, 确保睫状肌充分放松。

变焦模块选用电润湿液体透镜。两种不混合的液体在管腔里形成一个弯月状界面, 只需调节电压, 就能改变固液表面的张力, 直接调整透镜曲率, 进而实现焦距的连续变化。Kuiper 和 Hendriks 已经证明了这个结构具备自定心和高光学质量, 并且口径缩小时性能反而提升, 很适合在眼镜这种微型场合里用。Berge 和 Peseux 的电润湿变焦透镜算是这条技术路线的鼻祖。镜片口径在 10 到 15 毫米之间时, 响应速度快到毫秒级, 持续工作功耗仅为毫瓦级别。

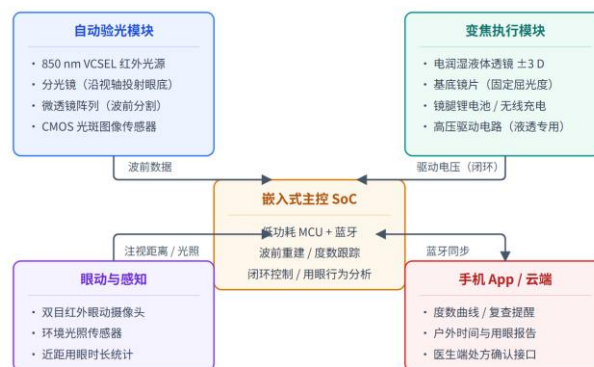


图1 智能近视眼镜系统硬件架构

感知与控制部分包括双目红外眼动摄像头（用瞳孔-角膜反射法）、环境光照与距离传感器、低功耗 SoC 主控芯片，以及无线充电的镜腿锂电池。主控芯片负责闭环算法运行，同时可以通过蓝牙和手机实时同步数据。斯坦福大学的 Autofocals 样机已经验证了“眼动追踪+液体透镜+深度传感器融合”这套组合能够真正落地，而且用户能接受。现在这个设计又进一步，把自动验光系统的光路也整合进了镜架。

2 镜片光学设计

这款镜片有三层结构，具体如图 2。最外层是按照最近的验光数据磨制的基底矫正镜片，负责大部分屈光度，比如 -3.00 D 。中间是电润湿液体透镜层，可以在 -3 到 $+3\text{ D}$ 之间连续微调，既补偿日常的小幅度数变化，也提供阅读时需要的加光。最靠近眼睛的一面是离焦功能区，中央 9 mm 直径为清晰矫正区，外圈到 33 mm 之间密布了大约 400 个 $+3.50\text{ D}$ 的微透镜段，这一设计和 DIMS 方式一致^[2]。佩戴者通过中心区域获得清晰视力，同时周边视网膜长时间接受近视性离焦信号，持续产生干预刺激。

Alvarez 双片滑动透镜是另一条可行的变焦路线^[9]，无液体、可靠性好，但需要微型电机驱动，镜片厚度也不易做薄，本文将其保留为防漏液备份方案。

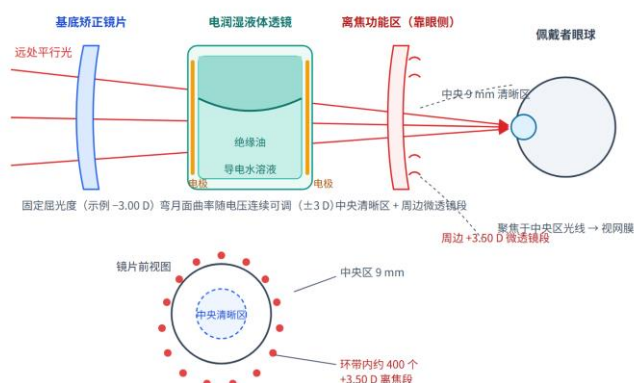


图2 复合镜片光学剖面（上）与前视图（下）

3 算法设计

验光算法一共分四步。先提取光斑阵列的质心，然后计算波前斜率，接着用 Zernike 多项式做最小二乘拟合，最后通过二阶项系数解出球镜和柱镜。为了抑制调节带来的波动，每次测量都在雾视提示下连续采集 8 到 10 帧，取中位数结果。系统每天定时测量 4 到 6 次，一天不会少。

度数跟踪算法直接对这些测量结果做指数滑动平均。只要检测到度数在两周时间里持续漂移超过 0.25 D ，系统就会自动

更新液体透镜的补偿基准，并推送复查建议——儿童用户则直接提醒家长。我们这里有意不做“足矫追涨”。自动系统主要负责把矫正维持在临床合理范围，正式调整处方还得有执业验光师把关。

干预算法分两块。第一块是光学干预，也就是始终在线的周边离焦镜片。第二块是行为干预，统计环境光照和近距离用眼的时长，如果户外光照时间累计不足，系统会弹出提醒。背后依据很扎实，引用了何明光团队在广州 12 所小学的整体随机对照试验：每天只要多增加 40 分钟户外活动，三年下来，近视发病率就从 39.5% 降到 30.4% 。

4 讨论：这个方案能把视力“恢复”到正常吗

轴性近视的核心问题在于眼轴增长，按现有证据，这属于不可逆转的生理变化。现在所有被认可的干预措施都只能延缓或阻断近视进展，没有哪种眼镜能让真性近视自然回到正视状态。正因如此，这套设计对“改善视力”有三层定义：第一，随时准确矫正度数，减少因矫正不足造成的视疲劳和近视加深风险；第二，通过周边离焦设计和用眼习惯干预，减缓度数进展速度，从而降低佩戴者成年后最终的近视度数和高度近视并发症风险；第三，对于调节痉挛导致的假性近视，雾视放松和调节训练确实有可能恢复，系统每天验光时自动带入雾视训练，其本身就是一种调节训练。市面上很多宣称“戴镜即治愈近视”的产品其实都没有对照试验支持，本方案每一原理都基于严格的随机对照试验，这是核心的不同。

在安全性方面，这个设计严格遵循三项要求：首先，进入眼部的红外功率必须低于 IEC 62471 标准中的一类豁免限值；其次，自动调焦的频率和幅度受到控制，防止干扰佩戴者本身的调节功能；最后，所有屈光和用眼数据都根据医疗器械隐私规范，包括加密保护，确保信息安全。

5 结论

这篇文章设计了一款自动验光型智能近视眼镜。镜框里集成了 Shack-Hartmann 波前传感器，可以实现周期性的自动验光；电润湿液体透镜让眼镜能够连续变焦补偿。镜片的周边离焦区域结合用眼行为管理，构成一个完整的近视防控闭环。每项技术都有现有文献或商业产品支持，所以不是简单地停留在概念层面。实际工程挑战主要在于微型光路的像质控制，以及整机的功耗问题——如何兼顾高性能和低能耗，是接下来的关键。下一步，我们会开始制作原型机。首先，要验证它和台式验光仪的测量结果一致。之后，准备开展小样本佩戴实验，关注儿童和青少年佩戴时的度数跟踪精度和防控实际效果。

参考文献:

- [1] Holden B A, Fricke T R, Wilson D A, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050[J]. Ophthalmology, 2016, 123(5): 1036-1042.
- [2] Lam C S Y, Tang W C, Tse D Y Y, et al. Defocus Incorporated Multiple Segments (DIMS) spectacle lenses slow myopia progression: a 2-year randomised clinical trial[J]. British Journal of Ophthalmology, 2020, 104(3): 363-368.
- [3] Zhang H Y, Lam C S Y, Tang W C, et al. Defocus Incorporated Multiple Segments spectacle lenses changed the relative peripheral refraction: a 2-year randomized clinical trial[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2020, 61(5): 53.
- [4] Chamberlain P, Peixoto-de-Matos S C, Logan N S, et al. A 3-year randomized clinical trial of MiSight lenses for myopia control[J]. Optometry and Vision Science, 2019, 96(8): 556-567.
- [5] Liang J, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(11): 2884-2892.
- [6] Kuiper S, Hendriks B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1128-1130.
- [7] Berge B, Peseux J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting[J]. The European Physical Journal E, 2000, 3(2): 159-163.
- [8] Padmanaban N, Konrad R, Wetzstein G. Autofocals: evaluating gaze-contingent eyewear for presbyopes[J]. Science Translational Medicine, 2019, 11(499): eaav6187.
- [9] Alvarez L W. Two-element variable-power spherical telescope objective[J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(7): 823-824.
- [10] He M, Xiang F, Zeng Y, et al. Effect of time spent outdoors at school on the development of myopia among children in China: a randomized clinical trial[J]. JAMA, 2015, 314(11): 1142-1148.

作者简介: 李武君(1995—), 男, 汉族, 籍贯广东, 学士, 助理实验师, 主要研究方向为:电子信息工程技术; 林敏(1984—), 女, 汉族, 籍贯广西, 硕士, 通信技术高级工程师, 主要研究方向为:移动通信和物联网通信。