

• 智慧医疗与精准医学研究专题 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2026.04.001

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.r.20251117.1119.004\(2025-11-17\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.r.20251117.1119.004(2025-11-17))

# 基于深度神经网络的糖尿病眼底图像分析系统设计与实现\*

刘芸悠<sup>1</sup> 汪鹏<sup>2</sup> 胡川<sup>2△</sup>

(陆军军医大学第一附属医院:1. 检验科;2. 医学大数据与人工智能中心,重庆 400038)

**[摘要]** **目的** 设计并实现基于深度神经网络的糖尿病眼底图像自动分析系统,以提升临床筛查效率。**方法** 采用前后端分离与微服务架构,集成医院信息系统(HIS)数据,形成从数据采集、人工智能分析到辅助诊断的全链条闭环;设计临床业务流程,由技师设定规则筛选患者,系统自动生成眼底报告,并经人工复核后供医生参考,除此以外,创新性地采用级联式双阶段人工智能模型,先通过图像质量评估模块过滤低质量眼底像,再通过核心的糖尿病视网膜病变分级与量化模型进行分析。**结果** 在 3 134 份临床数据验证中,系统图像质量分类准确率达 98.2%,糖尿病视网膜病变分级灵敏度为 96.5%,特异度达 97.8%,平均报告生成时间缩短至每份 3.2 s。**结论** 该系统通过创新的双阶段深度学习架构,提升了糖尿病视网膜病变筛查的准确性和效率,可为临床科室提供可靠的辅助诊断工具。

**[关键词]** 糖尿病视网膜病变;深度学习;图像质量评估;病灶量化;辅助诊断

**[中图分类号]** R441 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2026)04-721-04

## Design and implementation of a diabetic fundus image analysis system based on a deep neural networks\*

LIU Yunyou<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, HU Chuan<sup>2△</sup>

[1. Laboratory Department; 2. Centre for Medical Big Data and Artificial Intelligence, The First Affiliated Hospital (Southwest Hospital) of Army Medical University, Chongqing 400038, China]

**[Abstract]** **Objective** This study aimed to design and implement an automated diabetic fundus image analysis system based on deep neural networks to improve the efficiency of clinical screening. **Methods** The system was built on a separated front-end and back-end architecture with microservices, and was integrated with the Hospital Information System (HIS) to establish a closed-loop workflow covering data acquisition, AI-based analysis, and assisted diagnosis. In the clinical workflow, technicians configured rules to screen patients, the system automatically generated fundus reports, and these reports were manually reviewed before being provided to physicians for reference. A cascaded two-stage AI model was further developed: an image quality assessment module first filtered out low-quality fundus images, and the core model then performed grading and quantitative analysis of diabetic retinopathy. **Results** Validation on 3 134 clinical cases showed that the system achieved an image quality classification accuracy of 98.2%, with a sensitivity of 96.5% and a specificity of 97.8% for diabetic retinopathy grading. The average report generation time was reduced to 3.2 s per case. **Conclusion** The proposed system, built on a novel two-stage deep learning architecture, improves both the accuracy and the efficiency of diabetic retinopathy screening and provides a reliable assisted diagnostic tool for clinical use.

**[Key words]** diabetic retinopathy; deep learning; image quality assessment; lesion quantification; auxiliary diagnosis

糖尿病是危害人民群众身心健康的慢性疾病之一。据统计,中国糖尿病整体患病率为 11.6% 左右,患病群体数量超过 1 亿人;其中,存在糖尿病眼底病变的患者比例达到 30%,其危害包括致盲、致残,给糖

尿病患者及家庭带来重大危害。2024 年,国家卫生健康委员会制定了《健康中国行动——糖尿病防治行动实施方案(2024—2030 年)》,方案中提到要充分利用人工智能(artificial intelligence, AI)等信息技术,丰富

\* 基金项目:重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0167);重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202512808)。

△ 通信作者, E-mail: huchuan@tmmu.edu.cn.

糖尿病健康管理手段,开展 AI 糖尿病视网膜病变筛查,降低糖尿病及其并发症的风险<sup>[1]</sup>。因此,结合 AI 技术建立糖尿病视网膜病变图像分析系统,对眼底图像进行分析、筛查对糖尿病患者视网膜病变进行早筛、早诊的有效途径<sup>[2]</sup>,也可协助提升糖尿病视网膜病变防治与管理水平,具有积极的社会效益。

视网膜动脉起源于颈内动脉,已有研究表明,视网膜血管的管径、几何参数(弯曲度、分形维数等)与糖尿病的发病和病程进展都有着重要的联系。基于此,本课题组提出利用深度神经网络技术对眼底血管图像进行量化分析<sup>[3]</sup>,辅助医生快速了解受检者的眼底血管健康状况,从而对糖尿病视网膜病变情况进行全面筛查,以提供可被临床使用的 AI 辅助诊断工具。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

眼底图像数据来源于本院日常诊疗与健康筛查过程中采集的彩色眼底照片,通过眼底相机上传;同时通过医院信息系统(hospital information system, HIS)获取患者性别、年龄、糖尿病病史等临床信息,用于辅助算法分析与报告生成。所有数据经脱敏处理,以保护患者隐私。基于以上数据,本研究设计并搭建了基于深度神经网络的糖尿病眼底图像分析系统(以下称“本系统”),该系统于 2024 年 1 月正式上线,运行后眼底图像数据由临床诊疗过程实时产生并持续接入。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 系统架构

本系统采用当前主流的前后端分离架构,前端使用 Vue 框架,能够保证从核心代码到应用程序接口(application programming interface, API)的快速开发,后端选择微服务架构提供 API 服务。系统通过应

用程序接口采集 HIS 就诊记录、医嘱、检查、眼底影像等相关诊疗数据<sup>[4]</sup>,通过深度学习算法的 AI 模块,对数据进行 AI 分析,并提供眼底病变的诊断建议,形成从数据采集、AI 分析到辅助诊断的系统全链条。

#### 1.2.2 业务流程

临床技师通过本系统创建眼底报告生成规则,按门诊、住院、科室、病种等分类别筛选患者,形成糖尿病眼底监测对象列表,并可查看患者诊疗信息。系统结合计算规则和算法模型<sup>[5]</sup>自动生成患者眼底报告,技师再根据患者实际情况对报告进行复核,形成最终眼底建议报告供临床医生参考。业务流程图见图 1。

#### 1.2.3 算法模型

本系统创新性地采用级联式双阶段 AI 架构,通过前置质量评估模块规避低质量图像干扰,其核心技术包含图像质量评估<sup>[6]</sup>模块、糖尿病视网膜病变分级与量化模块。其中糖尿病视网膜病变分级与量化模型依据《国际临床糖尿病视网膜病变严重程度分级标准(2003 版)》设计,是本系统的核心算法模块。

图像质量判定算法用于对上传到本系统的眼底彩照进行图像质量分析<sup>[7]</sup>,可将图像质量划分为多个等级,数字越小代表图像质量越好。图像质量判定算法<sup>[8]</sup>可识别的图像质量问题包括:眼底像位置不正,眼底像对焦不准,眼底像曝光过强、曝光不足,眼底像照相机镜头或其他光学系统污渍或污斑,眼底像睫毛、头发、毛发异物虚影,眼底像周边区的黄色边缘、漏光样边缘或水滴样反光<sup>[9]</sup>,眼底像黄斑区暗影,眼底像总体模糊、发暗等。如果出现图像质量问题算法则会给出图像质量不佳的提示,并且不再给出关于糖尿病视网膜病变分级的分析结果<sup>[10]</sup>,图像质量判定算法见表 1。

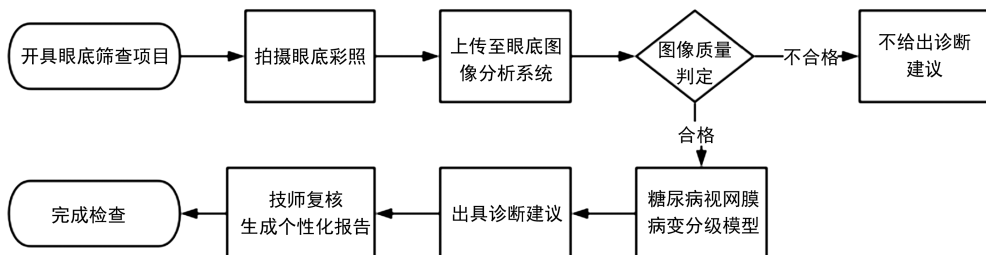


图 1 业务流程图

表 1 图像质量判定算法

检测维度	算法实现	判定标准
结构定位	U-Net 分割视盘/黄斑区域, 计算中心偏移量	偏移量 > 15% 图像宽度则判定异常
清晰度	频域高频能量占比(S) = $\frac{\sum_{u,v \in HF} \ DFT(I)\ ^2}{\text{总能量}}$	等级 1: S ≥ 0.40; 等级 2: 0.25 ≤ S < 0.40; 等级 3: 0.15 < S < 0.25; 等级 4: S ≤ 0.15
曝光异常	对比标准眼底库分布分析直方图 D <sub>KL</sub>	等级 1: D <sub>KL</sub> ≤ 1.0; 等级 2: 1.0 < D <sub>KL</sub> ≤ 3.0; 等级 3: 3.0 < D <sub>KL</sub> ≤ 5.0; 等级 4: D <sub>KL</sub> > 5.0 或直方图集中于 98% 像素

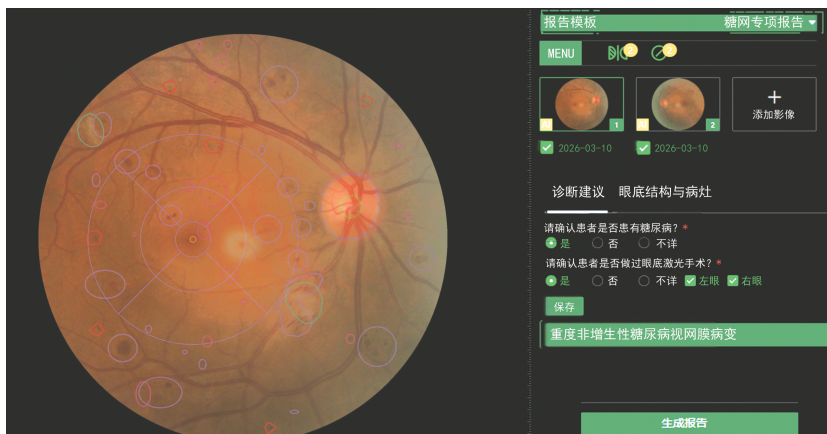
续表 1 图像质量判定算法

检测维度	算法实现	判定标准
异物检测	YOLOv7 检测睫毛/毛发虚影	等级 1:覆盖关键区域=0;等级 2:覆盖关键区域为>0 且<2%;等级 3:覆盖关键区域为 2%~5%;等级 4:覆盖关键区域>5%
光学污染	$S_{low} < 30 \cap V_{high} > 200$	等级 1:斑块数量=0;等级 2:斑块数量=1;等级 3:斑块数量=2;等级 4:斑块数量≥3

U-Net:一种基于卷积神经网络的架构;DFT:离散傅里叶变换;DKL:KL 散度(Kullback-Leibler divergence),衡量两个概率分布差异的指标;YOLOv7:YOLO 系列目标检测算法的第七个主要版本;清晰度:等级 1(优)、等级 2(良)、等级 3(差)、等级 4(极差);曝光异常:等级 1(正常)、等级 2(轻度异常)、等级 3(中度异常)、等级 4(重度异常);异物检测:等级 1(无)、等级 2(轻微)、等级 3(中度)、等级 4(重度); $S_{low}$ :像素的饱和度, $S_{low} < 30$  表示饱和度低; $V_{high}$ :像素明度, $V_{high} > 200$  表示亮度高;光学污染:等级 1(无)、等级 2(轻微)、等级 3(中度)、等级 4(重度)。

若图像质量判定算法认为图像质量可接受,糖尿病视网膜病变分级算法会进一步分析图像对应的糖尿病视网膜病变分级,并根据分析的结果在图像自动分析结果区给出无糖尿病视网膜病变、疑似轻度非增生性糖尿病视网膜病变、疑似中度非增生性糖尿病视

网膜病变、疑似重度非增生性糖尿病视网膜病变、疑似增生性糖尿病视网膜病变等分级结果,该分级的结果用于在生成的报告中给出是否需要转诊的建议。糖尿病视网膜病变分级结果如图 2 所示。



图中右下方绿色标注栏显示了算法输出的分级结果(本例为“重度非增生性糖尿病视网膜病变”);中部眼底图像上的彩色标注框为算法自动检测到的各类病灶区域;右侧诊断建议区域提供了患者糖尿病史及眼底激光手术史的确选项,用于辅助医生结合临床信息进行最终诊断。

图 2 糖尿病视网膜病变分级结果

## 2 结 果

本院于 2024 年 1 月开始应用本系统,针对糖尿病性黄斑水肿、高血压视网膜病变、视网膜动脉硬化、白内障等病种,对患者眼底图像进行智能分析和出具分析报告。截至目前,管理患者标本达 6 653 例,结合临床需求出具的个性化用药报告 4 557 份。糖尿病眼底图像分析系统的应用,在以下方面产生了积极的效果。

### 2.1 诊断准确性

本系统通过双阶段深度学习架构明显提升了糖尿病视网膜病变的筛查效能,质量评估前置策略避免了低质量图像的误判,多尺度特征融合设计提升小病灶检测能力。本系统灵敏度接近人工阅片组( $\Delta = 1.7\%$ ,  $P = 0.12$ ),明显优于传统系统( $\Delta = 7.1\%$ ,  $P < 0.05$ ),处理速度较人工阅片组明显提升。具体性能指标对比见表 2。

### 2.2 临床效用

本系统部署后,阳性病例转诊率从 28.4% 提升至 76.3%,早期糖尿病视网膜病变漏诊率由 19.7% 降至

4.2%,单份报告撰写时间从 15 min 缩短至 2 min。

表 2 具体性能指标对比

项目	本系统	人工阅片组	传统系统	P
灵敏度(%)	96.5	98.2	89.4	<0.001
特异度(%)	97.8	99.1	93.6	0.002
AUC	0.983	0.991	0.942	<0.001
图像处理速度(s)	3.2	186.5	12.7	<0.001

## 3 讨 论

本研究采用深度神经网络识别眼底彩照上的病灶<sup>[11]</sup>,多尺度特征融合设计提升小病灶检测能力<sup>[12]</sup>,并以病灶的定性和定量分析为依据,采用《国际临床糖尿病视网膜病变分级标准》和《我国糖尿病视网膜病变筛查的图像采集及阅片指南(2017 年)》进行糖尿病视网膜病变分级推荐<sup>[13]</sup>,并给出转诊提示。其中系统支持的转诊标准,参照《我国糖尿病视网膜病变临床诊疗指南(2014 版)》及全国防盲技术指导组发布的《中国糖尿病视网膜病变防治指南(基层版)》。通过

AI 算法提升糖尿病视网膜病变和相关病灶的识别能力,同时对糖尿病视网膜病变 3 级以上病例自动触发红色预警,推送至眼科专科队列,使高危患者及时接受专科诊疗。

眼部异常包括多种眼部疾病,以及体现在眼部的多种临床表现。本系统对这些临床表现进行识别、解读,以及量化分析,方便后期跟进的眼科医生快速判断受检者的眼部健康状态,并能对糖尿病视网膜病变相关病灶进行随访跟踪<sup>[14]</sup>,观察其变化趋势,为控制血糖和用药提供参考意见。本系统支持微血管瘤、视网膜内出血、视网膜前出血、玻璃体出血、新生血管、硬性渗出、棉绒斑、玻璃膜疣、纤维增殖膜、激光斑等十余种常见眼底病灶的分析,并能在眼底影像上进行直观的圈画和标注<sup>[15]</sup>。

本系统中影像标注功能通过标注工具对影像进行病灶标注,根据阅片需要,对影像显示情况进行调整,如增强原图、调整亮度、调整对比度等。本系统可通过智能标注与圈画发现眼底影像中出现的微血管瘤、视网膜内出血、视网膜前出血、硬性渗出、棉绒斑、激光斑、玻璃膜疣、新生血管、纤维增殖膜、玻璃体出血等病灶情况,对激光斑识别的灵敏度不低于 96.0%,特异度不低于 99.9%。同时本系统还支持手动标注,通过点标注、椭圆标注、多边形轮廓标注、闭合曲线轮廓标注、非闭合曲线标注等标注方式实现精准标注。糖尿病视网膜病变业务线的标注结果在标注汇总中体现,多病种业务线的标注结果则体现在报告结论中。

视网膜动脉起源于颈内动脉,利用眼底照相对视网膜血管进行观测,已经成为预测全身指标的重要研究手段。已有研究表明,视网膜血管的管径、几何参数(弯曲度、分形维数等)与高血压、糖尿病、心脑血管疾病等的发病和病程进展都有着重要联系,AI 对眼底血管进行量化分析,可以协助医生快速了解受检者的血管健康状况,从而对相关全身性慢病的发病和病程进展掌握更多的信息<sup>[16-18]</sup>。

本系统支持多个预定义报告模板并提供智能决策支持,可设置疾病对应的病灶、病种和建议的常用词条,能对疾病的图像发现、初步印象、转诊建议、复查建议和其他建议等多项词条进行配置。可对常见的病变描述、糖尿病视网膜病变分级建议、后续检查建议、复诊建议等多项内容词条进行配置<sup>[19-20]</sup>。

本系统可对业务运作情况进行统计,包括服务患者人次、检查报告数量、糖尿病视网膜病变各分级患者情况、患者性别/年龄分布、图像质量分布、图像质量变化等维度。在临床应用层面,本系统借助 AI 驱动的病灶识别能力,对糖尿病视网膜病变 3 级以上病例自动生成红色预警并推送至眼科专科队列,有效衔接了筛查与专科诊疗环节,降低了高危患者的漏诊风险<sup>[21-22]</sup>。

综上所述,本研究成功构建了基于深度神经网络的糖尿病视网膜病变图像分析系统,通过双阶段深度学习架构,在保证高灵敏度(96.5%)的同时实现实时分析,较院内原有模式提速 5~10 倍;采用多任务联合学习策略,首次在单一模型中同步输出糖尿病视网膜病变分级、病灶量化及血管参数,为病程监测提供多维度依据<sup>[23-24]</sup>;系统部署 1.5 年即完成 6 653 例筛查,推动本院糖尿病视网膜病变转诊率提升,验证了其在临床诊疗中的实用性。未来本课题组还会聚焦扩展多模态数据融合(如光学相干断层成像),开展多中心临床试验以进一步验证泛化能力。

**利益冲突:**所有作者声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] 谢云霞,黄海于,胡建斌. 基于深度卷积神经网络的糖尿病视网膜病变分期及病灶检测[J]. 计算机应用, 2020, 40(8): 2460-2464.
- [2] 李家昱,陈明惠,杨瑞君,等. 糖尿病视网膜病变眼底图像筛查研究[J]. 中国激光, 2022, 49(11): 133-143.
- [3] 粘伟杰,金海龙. 基于迁移学习的糖尿病视网膜病变眼底图像分类研究[J]. 生物医学, 2025, 15(1): 232-243.
- [4] 陈健,郑绍华,余轮. 糖尿病性视网膜病变筛查系统远程操控模块设计与实现[J]. 中国医疗设备, 2012, 27(10): 48-51.
- [5] 吴天柱,吴学森. 基于深度神经网络原理构建糖尿病视网膜病变辅助诊断模型[J]. 中华疾病控制杂志, 2022, 26(1): 61-67.
- [6] 范雯,王晓玲,马泉,等. 基于超广角荧光素眼底血管造影图像行糖尿病视网膜病变分期的多模态深度学习模型研究[J]. 中华眼底病杂志, 2022, 38(2): 139-145.
- [7] 肖志涛,彭新文,刘彦北,等. 基于条带池化与血管增强的眼底图像动静脉分类方法[J]. 中国生物医学工程学报, 2024, 43(4): 438-446.
- [8] 张芳,赵东旭,肖志涛,等. 眼底图像质量分类综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(3): 501-512.
- [9] 周唯,吴成东. 视网膜图像中的黄斑中心检测[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(3): 442-449.
- [10] 孟凡奎,银温社,贺建峰. 基于深度学习的眼底图像出血点检测方法[J]. 山东大学学报(理学版), 2020, 55(9): 62-71.
- [11] 刘啸,王迎,胡桐,等. 深度学习在糖尿病视网膜病变诊疗中的应用[J]. 现代仪器与医疗, 2022, 28(2): 88-96.