

PPG 连续生理特征 感知技术及应用

PPG Continuous Physiological Feature Perception
Technology and Its Application

— 2024

心跳支付白皮书

顾问组成员

史元春、李俊奎、王维强

编写组成员

唐健凯、王运涛、李哲、朱凯、童仁玲、闫箫同、易鑫、周璐曦、刘家成、赵光烨
兴军亮、郑亮、朱丛、周莉、应丰

版权声明

本技术白皮书由清华大学与蚂蚁集团共同研究、编制而成。所有内容，包括但不限于技术方案、理论分析、实验数据、图表、代码片段等，均受到国际版权法及各国相关知识产权法律法规的保护。

未经明确书面许可，任何个人、组织或实体不得以任何形式复制、散布、修改、展示、出版、传输或利用本白皮书的部分或全部内容，包括但不限于用于商业目的。对于教育及非商业性研究用途，可依据“合理使用”原则进行有限度的引用，但需确保明确标注来源为本白皮书及其出版年份，并保持引用内容的准确性和完整性。

对于希望基于本白皮书内容进行进一步研究、开发或商业合作的机构和个人，敬请直接联系security_centre@service.alipay.com，以获取必要的授权与支持。

我们保留对任何侵犯本白皮书版权行为采取法律措施的权利。特此声明。

联合出品



数字科技



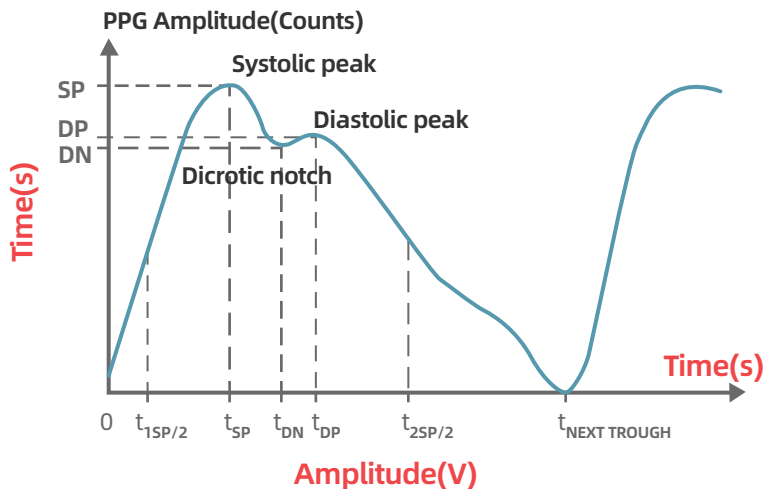
目录

01. PPG 信号是什么?	1	5.7 图像处理算法	31
02. PPG 信号如何采集	4	5.8 设备硬件	31
2.1 PPG信号采集途径	4	5.9 外界干扰	31
2.1.1 光源与光电传感器	4	06. PPG (rPPG) 信号在疾病诊断场景的应用及挑战	32
2.1.2 光线发射	8	6.1 社会价值	32
2.1.3 光传播和检测	10	6.2 应用进展及实践	32
2.1.4 信号处理	11	6.3 挑战及展望	33
2.2 PPG信号采集常用设备	15	07. PPG (rPPG) 信号在生物识别场景的应用及挑战	34
2.2.1 可穿戴设备	15	7.1 应用潜力	34
2.2.2 摄像终端	16	7.2 社会价值	36
2.2.3 医疗设备	16	7.3 应用进展及实践	37
2.2.4 头戴式设备	17	7.4 在某厂商上的应用案例	38
2.2.5 其他类型设备	17	7.4.1 设备选型及测试数据	38
03. rPPG技术	18	7.4.2 测试流程和测项	39
3.1 rPPG原理	18	7.4.3 测试指标	40
3.2 rPPG技术路线	19	7.4.4 实战总结	40
3.2.1 数据预处理	19	7.5. 挑战及展望	41
3.2.2 rPPG算法	20	08. PPG (rPPG) 信号在疲劳检测场景的应用及挑战	42
3.3 rPPG领域进展与展望	20	8.1 检测原理	42
3.3.1 应用前景	21	8.2 社会价值	42
3.3.2 技术挑战	21	8.3 应用进展及实践	42
04. PPG 信号的影响因素	23	8.4 挑战及展望	43
4.1. 影响 PPG 信号的生理因素	23	09. PPG (rPPG) 信号在情绪识别场景的应用及挑战	44
4.1.1 运动及运动伪影	23	9.1 识别原理	44
4.1.2 精神状态	24	9.2 社会价值	45
4.1.3 体温	24	9.2.1 心理健康监测与干预	45
4.1.4 腕部肌肉状态	25	9.2.2 人机交互的智能化提升	45
4.1.5 随时间的自身变化	25	9.1.3 教育领域的个性化教学	46
4.1.6 皮肤特性	26	9.1.4 市场营销与用户研究	46
4.2. 影响 PPG 信号的外部因素	26	9.1.5 社会治理与公共安全	46
4.2.1 接触压力	26	9.3 应用进展及实践	47
4.2.2 佩戴位置	27	9.4 挑战及展望	47
4.2.3 环境光照	28	9.4.1 挑战	47
05. 影响 rPPG 信号的因素	29	9.4.2 展望	48
5.1 环境光照条件	29	10. PPG (rPPG) 信号在健康检测场景的应用及挑战	49
5.2 皮肤特性	29		
5.3 测量距离和角度	30		
5.4 人体运动	30		
5.5 生理因素	30		
5.6 相机和传感器特性	30		

01

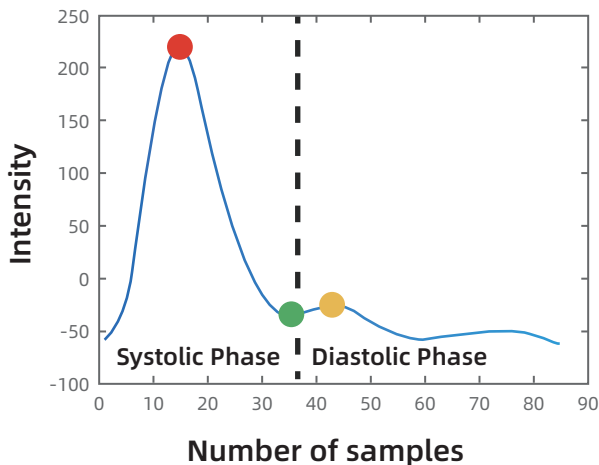
PPG 信号
是什么？

Photoplethysmographic (PPG)，即光电容积脉搏波描记法，是一种以LED光源和探测器为基础，通过测量照射在人体皮肤表面被血管等组织反射回的光的衰减程度，进而记录血管的搏动状态，同时测量脉搏波的一种测量人体生理数据的方法。PPG最早在20世纪30年代时出现，具有简便、低成本、无创等特点。这项技术最早被用于照射人体的手指和脚趾，将其结果与X光等透射光的检查结果进行比较确认。近20年内，在长期观察中确认了该技术的可行性后，PPG相关的研究逐渐增加，测量点位从单个点位扩展到多个，测量方式也从接触式发展出了非接触式，其应用范围逐渐从测量循环系统各类生理指标扩展到各方面体征，如呼吸系统等。



(图注：PPG 信号波形图)

在每次脉冲中，PPG波形包括收缩峰（systolic peak）、二尖波（dicrotic notch）和舒张峰（diastolic peak）。收缩峰（红点来源于心脏的收缩活动（contraction activity of heart）二尖波（绿点）来源于主动脉瓣的关闭（closure of the aortic valve）舒张峰（黄点）则是指血液流入外围循环。



Red: Systol peak. Green: Dicrotic notch. Yellow: Diastolic peak.
Each pulse of the PPG is divided into two phases: systolic and diastolic phases.

(图注：PPG 信号波形图)

当我们去到医院，通常都需要经历各类检查，如体温、心率、血压、呼吸频率、血氧饱和度等，这些反映人生命体征的指标能帮助本人判断当前状态，有助于旁人判断是否应采取救助，便于就医时医护人员判断病人是否危急。目前，各类生理学信号的测量方式应用了流体力学、光学等多种理论的知识，需要多种器械配合，如使用红外测温枪或水银温度计测量体温，用水银血压计测量收缩压及舒张压，使用指压法简单测算心率，用目测法估算呼吸频率、评估末梢血液循环，体内探针法测定各类血流动力学参数。而这些指标都可以通过PPG技术有所反映，可以利用PPG信号的周期计算心率，周期变化率测算心率变异性，通过不同波长的光的吸收率之比测量氧合血红蛋白及去氧血红蛋白的比例从而得出血氧饱和度，进一步可关联PPG基线变化与血压、呼吸频率的关系，PPG信号的上下极差可用于判断末梢血供情况。PPG信号以一种独特的方式，用光电信号记录人面部血管搏动、血流速度、血液状态，将这些原本需要多个设备和一定医学储备来进行测量的生理信号，提供一站式测量方案，减少普通人自行测量相关数据的器材需求，降低人们关心自己身体健康的难度。

以生命体征数据为基础，研究者不断探索PPG信号的效用，在疾病预测上取得了不菲的成果，如心血管疾病。心电图（ECG）是诊断心脏疾病的重要方式，心电图曲线可以提示如房颤、室颤、心率失常、陈旧或新发心肌梗死、传导阻滞等多种心肌相关的疾病。同步ECG与PPG信号可以发现，PPG信号同样可以反映心电特征，通过总结PPG信号的异常，可以提示人可能存在心脏疾病，从而做到对心脏疾病的早发现、早诊断、早治疗，减缓慢性疾病的病情发展，对疾病的急性发作作出预警，提高发病患者的生存率。



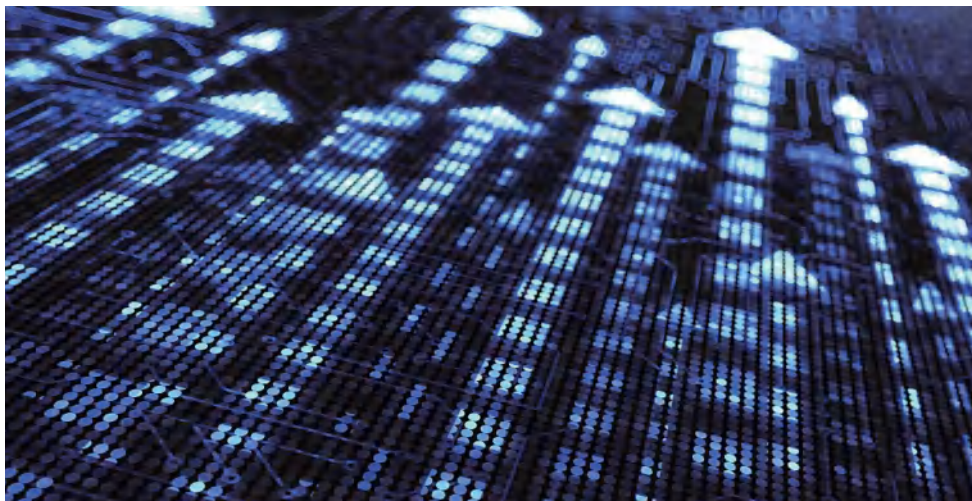
02 PPG 信号如何采集?

上文提到，PPG信号可以反映大量人体生理特征，对人体健康监测具有重大意义。因此，如何采集PPG信号，尤其是如何采集到高质量的PPG信号，是使用PPG信号进行生理特征感知的重中之重。

2.1 PPG信号采集途径

2.1.1 光源与光电传感器

光源和光电传感器是PPG技术实现的基础，它们共同作用于捕捉血液容积的微小变化，从而为非侵入性生理监测提供了一种有效手段。光源和光电传感器在采集过程中的工作涉及到光信号的发射、传播、接收与转换，也会受到多种因素的影响。为了获取优质的光学信号，选取合适的光源与相应的光学传感器是PPG信号采集的重要一环。



通过光源采集PPG（光电容积描记）信号的过程，是利用光在人体组织中的吸收和散射特性来无创监测血液容积变化的一种技术。具体而言，该过程涉及使用光线照射人体的透光部位，如指尖或耳垂。光线穿透皮肤后，会部分被血液中的血红蛋白吸收，尤其是动脉血液，因为动脉血氧合程度高，吸收光的能力随心跳周期中血液容积的变化而变化。未被吸收的光线则反射或散射回传感器。通过检测这些光强度的微小变化，可以间接反映心脏搏动引起的血容量波动，从而提取出PPG信号。此信号包含了心率、血氧饱和度以及血管弹性等生理信息，广泛应用于健康监测设备，如智能手环、脉搏血氧仪等。值得注意的是，为了减轻后续信号处理（尤其是去除信号中的噪声）的负担，以及考虑到小型设备续航问题，用于采集PPG信号的光源对波长、光强、稳定性以及功耗均有较高的要求：

波长选择



目前PPG信号采集使用的主流光源主要分为3种，一是红光（600-700 nm，常用660 nm），这是由于红光能够穿透较深的皮肤和组织，适用于测量较深层的血流变化；二是红外光（700-1000 nm，常用940 nm），和红光类似，红外光也具有较好的穿透能力，可以提供更高的信噪比，尤其是在运动场景下；三是绿色光（500-600 nm，常用530 nm），和上述两种光不同，绿色光更容易被皮肤和血液吸收，适用于浅层血流变化的测量，如今我们常见的智能手表、手环使用的便是这类光源。

光源强度

采集过程中对光源的强度要求很高，其原因在于需要提高信号质量与信噪比。高强度的光源可以确保足够的光穿透组织深层，即使在血流微弱或者皮肤色素、血管深度不一的情况下，也能保证有足够的信号被光电探测器接收。这样不仅增强了信号的稳定性，减少了外界干扰（如运动伪迹、环境光线变化）的影响，还提高了测量的准确性和可靠性，确保了数据采集的高质量与临床应用的有效性。

光源稳定性

光源的稳定性对PPG信号的质量有显著影响。由于PPG信号的采集主要依靠的是光源和光电传感器的协同运作，不稳定的光源会给光电传感器接收到的信号中引入噪声，最坏的情况下，捕获到的信号的周期都有可能受到影响，这将进一步导致后续计算得到的心率等依赖于信号周期性的生理信号出现大的误差。

功耗

在可穿戴设备中，光源的功耗是一个重要考虑因素。可穿戴设备电池容量本身有限，光源功耗过高将导致设备续航能力下降，进一步使得设备其他功能的部署受限，使用者体验不佳。选择低功耗的LED光源可以有效避免上述问题的出现。



◎ 光电传感器

光电传感器是PPG（光体积描记法）信号采集中必不可少的采集工具，影响光电传感器PPG信号采集质量的因素很多，例如传感器自身特性，如光波长选择、灵敏度、响应速度能够直接影响采集效果，次要因素也包括传感器与皮肤接触的紧密度、个体差异，如肤色深浅、血管分布、血液特性等；运动伪迹，身体移动造成的信号干扰、环境光干扰等等都会影响PPG信号的形态和强度。

因此，优化传感器设计、采用有效的信号处理算法以及合理用户指导对于提高PPG信号采集的准确性和稳定性至关重要。常用的光电传感器主要有硅光电二极管、气相外延光电二极管、InGaAs光电二极管等，不同传感器有其不同优缺点。

	光谱响应范围	灵敏度	优点	缺点
硅光 电二极管	400-1100 nm	高	广泛的光谱响应范围 (能够响应从可见光到近红外光的光)	对环境温度 变化敏感
			稳定性好 (长时间使用后性能变化小)	
气相外延光 电二极管	400-1000 nm	很高	超高灵敏度 (通过内部增益机制实现信号放大)	功耗较高
				获得的信号 噪声较大
InGaAs光 电二极管	800-1700 nm	较高	近红外光响应灵敏度高	成本较高
			温度稳定性好	可见光响应 灵敏度偏低
PIN光 电二极管	400-1100 nm	中等	成本较低	灵敏度相对 偏低
			暗电流低, 背景噪声小	对环境温度 变化敏感

总结

以上介绍的四种光电二极管各有优劣，且均可用于PPG信号采集，具体应用中选取哪一种光电二极管，需要考虑应用场景与二极管的特性的契合度，最合适的就是最好的。

2.1.2 光线发射

◎ 光源定位和安装

光源应尽可能贴近皮肤，以减少光在皮肤表面散射和反射带来的影响，提升测量精确度。设计中常使用柔性材料或特定形状的外壳，使设备能更好地贴合皮肤。

● 光强控制



恒流源驱动

LED的光强与电流成正比，为了确保光强稳定，通常使用恒流源驱动LED，避免光强在测量过程中发生变化引入噪声，影响结果精确度。



光强调节

根据不同的皮肤类型和厚度，动态调节光强，确保总是有足够的光线穿透组织或被反射回接收器。

● 光束特性



光束均匀性

LED的光束需要均匀，以避免由于光强不均匀导致的信号误差。常采用光学透镜或扩散片来改善光束均匀性。



光束方向性

光束集中指向目标区域，以提高透射或反射光的强度和信噪比。设计中常采用反射罩或光学耦合器来引导光束方向。

● 脉冲调制



脉冲频率

光源以特定频率（如数百赫兹到几千赫兹）进行开关。这个频率应当与预期的心率范围明显不同，以便通过同步检测滤除环境光的干扰。



占空比控制

脉冲信号的占空比（光源开启时间与总周期的比值）可以根据需要调整。通常保持较低的占空比以节省功耗，延长设备续航时间。

● 温度控制



散热设计

LED在工作过程中会产生热量，温度变化会影响LED的光输出。有效的散热设计可以保持LED的温度稳定，进而保证光信号的稳定。

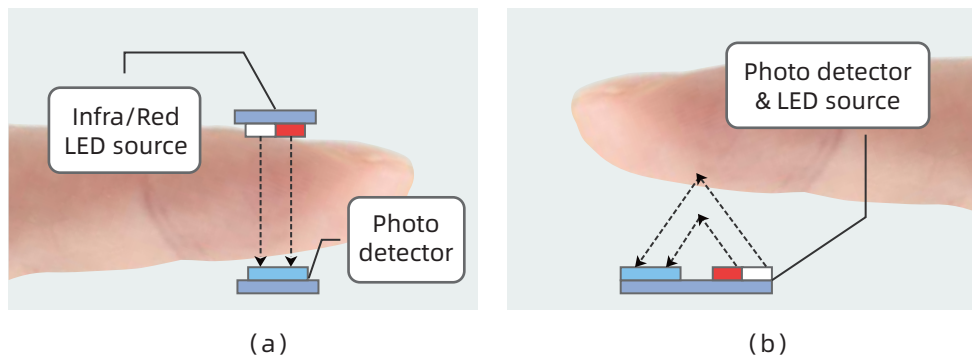


温度补偿

某些高级系统会包含温度传感器，并根据温度变化动态调整LED的驱动电流，以保持稳定的光输出。

2.1.3 光传播和检测

PPG信号的采集方法主要分为两种：透射法和反射法。



(图注：反射法与透射法示意图)

● 透射法

透射法主要利用光的吸收原理。当光通过人体组织时，不同波长的光会被血液中的成分以不同的程度吸收。通过检测透射光的强度变化，可以推算出血液中的生理信息。透射法光线的传播主要分为三个阶段。首先，光源发出光线后，光线穿过皮肤的表皮和真皮层，这些层中含有的色素（如黑色素）会吸收、散射部分光线。之后，光线继续穿透到皮下的血管层，血液中的血红蛋白（Hb）和氧合血红蛋白（HbO₂）分别吸收大量红光与近红外光，同时，由于心脏的泵血，血液量在血管中周期性变化，引起光强周期性变化。最终，光线穿出皮肤，由光电传感器接收并转化为电信号。

👍 优点

高灵敏度：透射法对光强变化敏感，可以检测到微小的血液体积变化。

准确性高：透射法通过测量光的吸收变化，能够提供精确的生理参数，如血氧饱和度。

缺点

受测量部位限制：透射法通常需要在光能够穿透的部位（如手指、耳垂）进行测量，不适用于身体较厚或光难以穿透的部位。

受环境光干扰：环境光可能会影响测量结果，因此需要采取措施（如使用滤光片或在暗室中测量）来减少干扰。

依赖血液流动：透射法依赖于良好的血液循环，因此在血液循环较差的情况下，测量结果可能不准确。

反射法

反射法主要利用光的反射原理。当光照射到人体组织表面后，部分光会被反射回光电传感器。通过检测反射光的强度变化，可以推算出血液中的生理信息。反射法光线的传播过程与透射法类似，主要的不同在于反射法收集的是人体组织（主要为血管）的反射光，反射光强度会随血管中血液量的变化而变化——当心脏收缩时，动脉血流量增加，血液吸收的光增加，反射光强度下降。

优点

测量部位多样：由于不依赖于光的穿透，反射法不受组织厚度限制，可以在多个部位进行测量，如手腕、前额、胸部等，适用范围广。

便于集成：反射法传感器可以集成到可穿戴设备中，如智能手表、手环等，方便日常使用。

缺点

信号易受噪声影响：由于反射光强较弱，信号容易受到环境光和运动伪影的干扰，需要有效的信号处理算法来过滤噪声。

信号强度较低：反射信号的强度通常比透射信号弱，可能需要更高灵敏度的传感器和更高的光源强度。

2.1.4 信号处理

PPG信号的原始数据往往受到多种因素的影响，需要进行一系列的信号处理步骤以获得清晰的波形和准确的生理参数。

信号放大

模拟信号放大



使用高增益运算放大器（Op-Amp）对原始PPG信号进行放大，确保信号在后续处理前的幅度足够强。

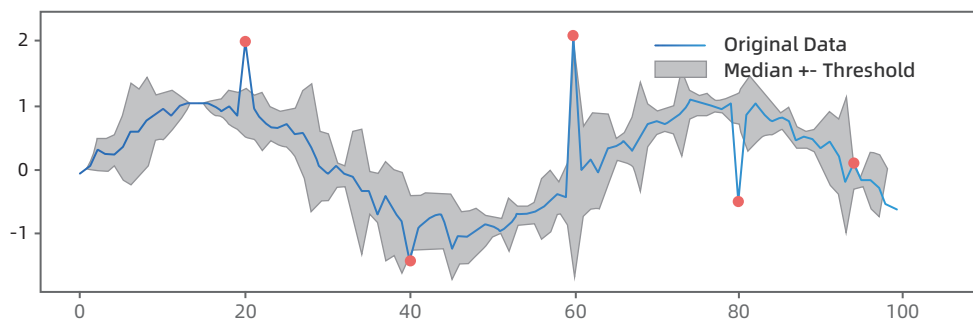
自动增益控制（AGC）



设计并实现AGC电路，动态调整放大倍数，根据输入信号的强度自动调节输出信号的幅度，避免信号过载或过小。

去噪

Original Data with Bands representing Upper and Lower limits



（图注：奇异点检测）

带通滤波



使用带通滤波器去除低频（如呼吸引起的基线漂移）和高频（如肌电噪声、环境光干扰）成分，只保留心率范围内的信号（0.5到4 Hz）。

自适应滤波



采用LMS（Least Mean Squares）自适应滤波器，根据参考信号（如加速度计信号）动态去除运动伪影，调整滤波器参数，使其能够适应不同的运动状态。

小波变换



进行小波变换，将信号分解到不同尺度上，对每个尺度上的信号进行去噪处理，然后重建信号。小波变换能够有效去除不同频率成分的噪声。

● 信号平滑

移动平均滤波

计算当前样本点和其前后若干样本点的平均值，以平滑信号。常用的窗口长度为3到5个样本点。

指数平滑

应用指数平滑方法，计算当前样本点和之前样本点的加权平均，选择适当的平滑参数，使得信号平滑效果最佳。

● 信号滤波

低通滤波

使用低通滤波器（如巴特沃斯滤波器）去除信号中的高频噪声，只保留低频成分。设计滤波器时，需要考虑其截止频率和阶数。

高通滤波

采用高通滤波器去除低频基线漂移，确保信号的基线稳定。常用的高通滤波器类型包括巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器。

● 信号增强

信号平均

对多个心跳周期的信号进行平均，以减少随机噪声的影响，增强心跳特征。计算多个心跳周期的平均波形，提高信号的稳定性。

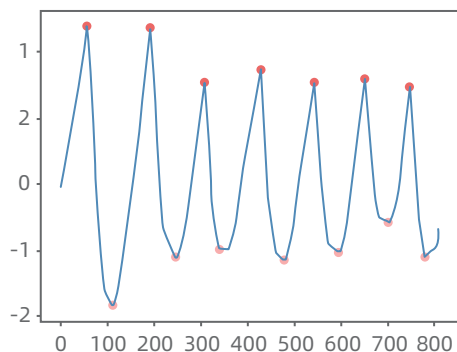
归一化

对信号进行归一化处理，使其幅值在一定范围内，有助于消除由于不同测量条件导致的幅值差异。常用的归一化方法包括最小-最大归一化和均值-标准差归一化。

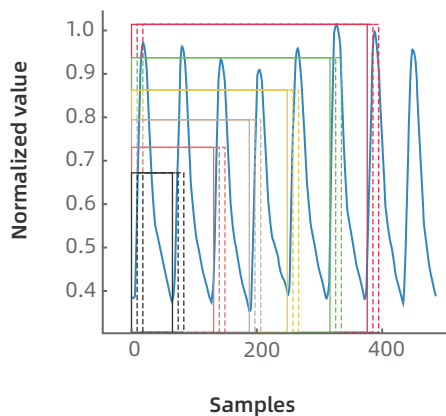
● 特征提取

心率提取

通过检测PPG信号中的峰值，计算心跳间隔（RR间期），从而计算出心率（bpm）。常用的峰值检测算法包括自适应阈值法和滑动窗口法。



（图注：峰值检测）



（图注：滑动窗口）

● 数据分析

🕒 统计分析

计算心率的平均值、标准差等统计指标，评估心率的稳定性和变异性。常用的统计指标包括均值、方差和标准差。

📊 频域、时域分析

对PPG信号进行傅里叶变换，分析其频谱特性，从中提取出与心率和呼吸相关的频率成分；分析信号的时域特征，如脉搏波形的上升时间、下降时间、波形宽度等，评估心脏健康状态。

2.2 PPG信号采集常用设备



PPG（光电容积脉搏波）信号采集设备广泛应用于各种类型的设备，包括可穿戴设备、摄像终端、医疗设备和头戴式设备等，从个人健康监测到临床应用，涵盖了生活的多个方面。以下是常见的PPG信号采集设备：

2.2.1可穿戴设备

智能手表

Apple Watch: 配备了PPG传感器和ECG传感器，用于心率监测、血氧水平测量和心脏疾病风险预测。

Fitbit: 多款Fitbit手表（如Charge系列、Versa系列）内置PPG传感器，提供心率监测和睡眠分析功能。

华为: 华为智能手表（如GT系列、FIT系列）采用PPG传感器来监测心率和压力水平。



（图注：智能手表）

智能手环

小米手环:内置PPG传感器，用于心率监测和运动记录。

华为手环:配备PPG传感器，提供全天候心率监测和睡眠分析。

2.2.2 摄像终端

三星Galaxy系列

部分Galaxy手机背面配备PPG传感器，用户可以通过手机应用进行心率和血氧水平测量。

华为手机

一些华为手机（如Mate系列）也内置PPG传感器，用于健康监测。

此外，其他带有摄像功能的手机、平板、电脑，均可借助内置rPPG信号提取算法的第三方软件实现PPG的测量。

2.2.3 医疗设备

便携式心率监测仪

Biobeat: 提供可穿戴PPG设备，用于监测心率、血压和血氧水平，常用于远程医疗和临床试验。

Nonin: 生产各种医疗级PPG设备，广泛应用于医院和临床环境，用于血氧饱和度（SpO₂）和心率监测。

🕒 监护仪

Philips IntelliVue: 该系列监护仪集成了PPG传感器，提供实时的心率和血氧监测。

GE Healthcare: 其生产的监护设备也包括PPG功能，用于全面的患者生命体征监测。

2.2.4 头戴式设备

🕒 智能耳机

Jabra Elite Sport: 配备PPG传感器，可以监测心率和运动数据。

Bose SoundSport Pulse: 内置PPG传感器，提供心率监测功能。

🕒 虚拟现实（VR）头显

Oculus Quest: 尽管目前并没有配备PPG传感器的VR设备，但不少商业巨头如苹果、微软，都对此有所计划，预计不远的未来会出现具有独立测量心率功能的VR设备出现。



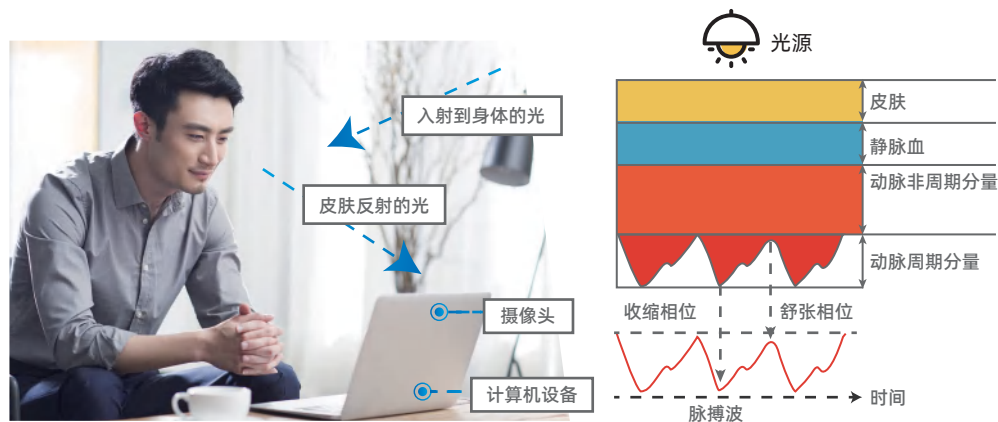
(图注：虚拟现实（VR）头显)

03 rPPG 技术

Remote Photoplethysmographic (rPPG)，即远程光电容积描记技术，是当前国际上前沿的非接触式生理指征监测手段。

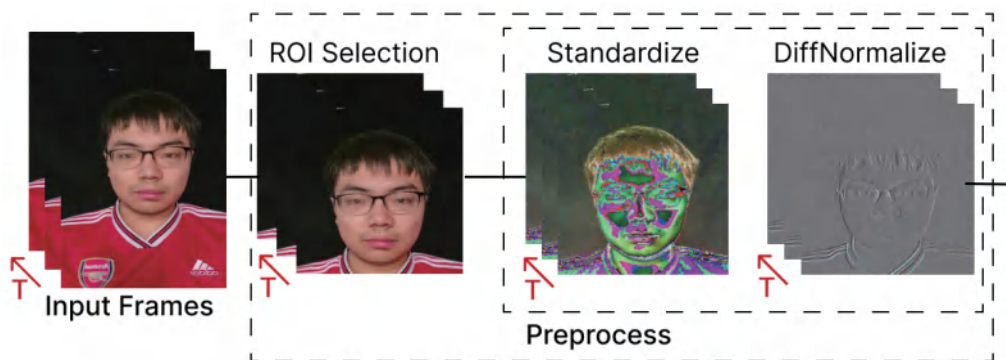
3.1 rPPG原理

人体每次心跳引起的血液流动会造成皮肤组织的微血管中血量的周期性变化，进而导致皮肤吸收和反射光具有周期性规律，具体表现为皮肤表面颜色的周期性变化，尽管人眼无法分辨这一微小变化，但是通过摄像机可以检测到——得益于现代摄像机内置的高灵敏度传感器，通过分析该信号可以获取脉搏率、呼吸率和血氧饱和度等生理指标。



(图注：基于摄像头的远程生理感知原理)

3.2 rPPG技术路线



(图注：数据处理流程图)

3.2.1 数据预处理

通过摄像头获取到的视频含有大量冗余数据，且可能存在质量过低的数据，无法直接用于模型训练，故需要对采集到的数据进行预处理。一般而言，数据预处理包含（按先后顺序）选取感兴趣部位（ROI区域）、标准化、差分归一化。

通过面部识别算法，我们可以实现对人脸的精准捕获（ROI区域），舍弃人脸周围的环境图像数据，提升训练数据质量。

标准化的主要目的是将输入图像帧的像素值调整到一个统一的范围，减少由于光照变化、摄像头设置差异等外部因素引起的偏差，从而突出皮肤颜色的细微变化。通常，这一步会涉及将图像中的像素值减去它们的均值，然后除以标准差。这样处理后的图像会有一个零均值和单位方差，从而消除整体亮度或颜色的变化，使得后续的分析更加可靠。

差分归一化旨在进一步放大皮肤颜色的微小变化。通过对标准化后的图像进行帧间差分

处理，提取图像帧之间的细微变化。这一过程通常包括对连续图像帧进行像素差异计算，重点分析这些变化。随后，这些差异会经过归一化处理，使得结果更加稳定并易于进一步的信号提取。差分归一化后的图像会显示出比原始图像更加明显的颜色变化区域，特别是与生理信号相关的皮肤区域。这些变化将被用于后续的rPPG信号提取。

3.2.2 rPPG算法

用于预测rPPG信号的算法主要分为两大类：非监督算法和监督算法。

非监督算法本质上是使用统计学手段对数据进行分析的方法。对预测rPPG信号而言，非监督算法指的是基于视频中人体皮肤的周期性颜色变化和 PPG 强相关的机理，通过对视频色彩空间的投影和变换实现对静态人体视频的 rPPG 信号提取。常见的用于rPPG信号预测的非监督算法包括Green、ICA、CHROM、POS、PBV。

监督算法使用带标签的数据集来训练算法，以预测结果和识别模式。具体而言，监督算法通过学习视频数据和对应PPG信号之间的关联，实现通过视频预测rPPG信号这一功能。常见的用于rPPG信号预测的监督算法包括DeepPhys、PhysNet、PhysFormer、Effcient-Phys-C。

随着 rPPG 技术的发展，rPPG 的应用场景从实验室的静止面部视频逐步拓展到多元复杂的运动状态视频，这对 rPPG 算法的鲁棒性提出了更高要求。在这种噪声环境中，监督学习的算法展示出了很强的抗干扰能力和跨数据集泛化能力，占据了优势地位。

3.3 rPPG领域进展与展望

rPPG领域的关注度近年来还在持续上升，目前该领域的算法在一些实验室数据集如PURE和UBFC已经取得不错的效果。在室内静止状态下，该技术远程估计心率的误差可以低于3次/分钟，基本达到消费级健康产品可用的水准。然而在一些边际条件，如面部运动、变化光照、高原低压和较深肤色的场景，该技术的性能仍然有长足的提升空间。

3.3.1 应用前景

基于视频的非接触式生理指征感知技术在多个领域中具有广阔的应用前景。摄像头的普及性和可用性为这项技术的广泛部署提供了基础条件，尤其在车载和居家等特殊环境中，rPPG技术能够提供便捷的生理指征数据，而不会对用户的工作造成干扰。具体来说：

-  **普适性：**全球摄像头出货量已达7.2亿台，具备了极大的规模，显示出巨大的应用潜力。
-  **多种生理指标的测量：**相比依赖于穿戴设备的特定传感器，rPPG技术通过软件创新实现了生理指征检测的扩展性。
-  **特定场景中的应用潜力：**在车载、居家等环境中，rPPG技术能够提供无感、非接触的生理数据，便于进行日常健康监测。

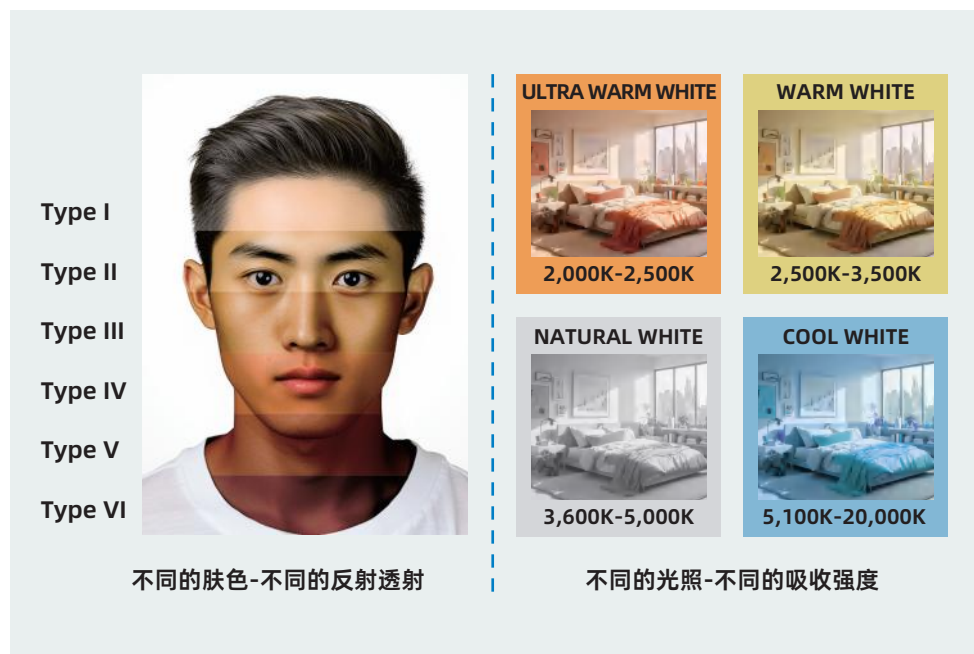
远程生理感知技术在监测心率变异性（HRV）、血压、和血氧饱和度（SpO₂）等关键生理指标方面同样显示出巨大的潜力。一些方法可以借助面部可见光成像和红外热成像中估计HRV参数提高了测量的精确性和实用性。在血压监测方面，利用摄像头获取的远程光电容积描记图（rPPG）信号已被研究用于无创血压监测，为高血压患者提供了一种连续监测的新途径。对于血氧饱和度，远程生理感知技术同样表现出前景。通过分析皮肤反射的光的变化来推测血红蛋白的分量，可以无创地监测个体的SpO₂。

总体来说，这些技术的发展提高了医疗监测的便捷性和实时性，展示了其在未来关键领域的巨大潜力。

3.3.2 技术挑战

rPPG技术随着网络、芯片、图像技术等的发展相较过去已有长足的进步，但仍然有不少技术挑战需要解决。如图十三所示，rPPG技术面临的技术挑战，主要体现在：

- ④ 开放环境中光学环境复杂多变。在开放环境中光线强度、方向和色温等因素可能随时发生变化，这些变化会对rPPG技术的信号提取造成干扰，影响生理参数的准确性和稳定性。因此，在不同光照条件下保持算法鲁棒性是关键技术难题。
- ④ 端侧算力与隐私约束感知效能。在移动设备和嵌入式系统的有限计算资源限制了复杂算法的运行，同时隐私保护要求对数据传输和存储提出了严格的限制。因此，开发轻量级算法和高效的数据处理流程，同时确保隐私保护，是提升rPPG技术效能的重要方向。
- ④ 自主可控生理指征的感知平台。在特定任务中，感知平台必须具备高度的自主性和可控性，确保在关键时刻能够独立运行，并保证数据安全和服务可靠。研制基于国产化器件的rPPG感知平台，是实现技术大规模应用的保障。



(图注：开放场景具有变化光照、运动伪影等导致的技术挑战以及不同肤色透射系数的技术挑战)

04

PPG 信号
的影响因素

PPG信号通常使用血氧仪测量。血氧仪通过检测脉搏带来的微小交流信号来提取PPG信号。然而，这些交流信号通常仅仅为非脉搏的直流信号的1%~3%。因此，PPG信号容易受到各种因素的影响。我们将分为生理因素和非生理因素分别阐述它们对PPG信号检测的可能影响。

4.1 影响 PPG 信号的生理因素

4.1.1 运动及运动伪影

血氧仪最早用于手术室中对麻醉患者的血氧检测。但现在，血氧仪被越来越多地集成在各式各样的可穿戴式设备上，以方便人们可以在各种使用场景下测量PPG信号。然而，人体的各种有意识和无意识的运动会一定程度上干扰PPG信号的检测。

运动伪影是指在进行医学信号检测时，由于患者身体内部或者整体自主运动（如行走、身体晃动等）、不自主运动（如肠胃蠕动、吞咽、肌肉颤动等）或扫描设备与患者之间的相对运动（如运动时手环与手腕的间隙变化等）造成的信号失真现象。

运动伪影对脉搏血氧仪的影响可能是显著的。在血氧检测方面，Petterson等人于2007年讨论了运动伪影可能影响血氧检测的两种模型。第一种模型假设，由于运动引起的红光和红外信号之间路径长度变化所产生的噪声，会同等地叠加在红光和红外信号上。因此，随着噪声的增加，R比值（血氧指标，为红光交流直流比与红外光交流直流比的比值）接近1，对应于恒定的SpO₂读数，通常约为85%。进而血氧仪输出恒定血氧值，有较大检测误差。第二种模型假设低氧血液在静脉中晃动，导致静脉血局部扰动，增加了PPG信号的交流分量，使设备无法区分动脉和静脉脉动，从而影响了R比值的计算。

上述的路径长度变化模型，可以用传感器相对皮肤的相对运动和接触力，以及传感器的重量来解释。同时，由于传感器会受到静脉脉搏的影响，传感器的放置位置也会影响检测的信噪比。造成运动伪影的因素包括：传感器重量、传感器相对于皮肤的相对运动、在运动过程中传感器与皮肤之间形成的空气间隙、传感器与皮肤之间的接触力变化，以及传感器在身体的位置。这些因素产生的运动伪影将影响PPG信号测量的偏差、方差以及信噪比。

4.1.2 精神状态

研究表明，心理压力会增加PPG信号的脉搏变异性。一般来说，心理压力的特征可大致分为状态特征和特质特征。其中状态特征通常表现在行为上，可以通过各种心理测量量表进行评估，如DASS、压力指数等。而特质特征则表现在各种生理信号中，例如脑电图、呼吸、心电图、皮肤电活动、血压、肌电图和光电容积描记（PPG）。这些信号与自动神经系统的活动有关，自动神经系统的活动是由心理压力触发的，通常被称为“战斗或逃跑”反应。

自动神经系统进一步分为两个分支，即交感神经系统和副交感神经系统。交感神经系统的激活与心率的增加有关，而副交感神经系统的激活与心率的减少有关。自动神经系统的两个分支之间的变化可通过心率变异性（HRV）进行评估。因此，由于PPG信号的脉搏率变异性（PRV）与HRV高度相关，心理压力会对PPG信号产生影响。

由于心理压力和PPG的脉搏变异性有直接关联，目前有许多研究已经尝试使用PPG信号进行心理压力检测和分类。传统的心理压力检测通常使用由ECG导出的心率变异性（HRV）。然而，为了追求普适性、实时性和非侵入性，从而使被测者能够不受任何不便地进行检测，基于PPG的检测算法已成为更主流的研究课题。

4.1.3 体温

PPG测量精度的重要的限制因素是温度，这一点经常被忽视。过往研究认为，局部皮肤和室温条件对脉搏血氧仪中PPG质量的有影响，会严重影响基于PPG信号的信息提取精度。例如，在进行SpO₂测定时，低温条件显著降低PPG信号质量和所测得的SpO₂估计值的准确性。温

暖的温度条件显著提高了PPG信号的质量。提高幅度高达4倍，并提高了SpO₂的估计精度。因而，需要保持温暖的温度条件才能进行可靠的PPG采样。

在使用指夹式血氧仪测量时，冰冷的手指可能会提供不准确的脉搏血氧计读数。不过，像摩擦双手这样的简单解决方案可能会解决这个问题。然而，手指自然非常冷的人或室温保持在20°C的重症监护病房的患者都可能受到这一问题的影响。

此外，皮肤表面温度变化对血压、心率、心搏出量和总外周血阻力(TPR)等心血管特征有影响。因此，必然会影响到同样反应心血管和脉搏特征的PPG信号。

4.1.4 腕部肌肉状态

PPG信号在腕部受到肌肉状态的影响是一个重要但较少研究的领域。肌肉活动引起的微小运动可以导致所谓的组织运动伪影，这种现象在手腕PPG可穿戴设备中尤为突出。这些微运动改变了PPG传感器与皮肤组织之间的接触力和耦合，进而改变了反射光的光路，从而掩盖了真实的心率信号。尽管运动伪影通常通过加速度计检测，但组织运动伪影并不总是被加速度计所捕捉到，这增加了准确估计心率的挑战性。

因此，在开发和使用手腕PPG设备时，需要认真考虑肌肉状态对信号的潜在影响。未来的研究可以进一步探索如何减少或校正这种运动伪影，以提高PPG技术在运动监测和健康诊断中的精确性和可靠性。

4.1.5 随时间的自身变化

PPG信号随时间的自身变化规律主要体现在心脏周期和外部因素的综合影响上。心脏周期中的每一次收缩和舒张都会引起动脉血液容量的变化，从而在PPG信号中表现为周期性的波动。这些波动的频率和幅度可以反映心率和血流动力学状态。此外，PPG信号还会受到呼吸、血压变化、体温以及情绪波动等外部因素的影响。这些外部因素会引起PPG信号的短期和长期变化。例如，呼吸会引起信号中小幅度的周期性变化，而血压的变化可能会导致信号幅度的显著波动。

随着时间的推移，PPG信号还可能受到传感器位置移动、皮肤接触状态变化以及环境光干扰等因素的影响，从而导致信号质量的不稳定。因此，理解和分析PPG信号的时间变化规律，对于准确解读生理参数和提高监测设备的可靠性具有重要意义。

4.1.6 皮肤特性

肤色对PPG信号会产生一定影响，主要体现在光的吸收和散射特性上。不同肤色的个体对特定波长的光的吸收能力不同，较深的皮肤吸收绿光和红光更多，而较浅的皮肤则吸收较少，直接影响了PPG信号的强度和清晰度。此外，皮肤色泽不同还会导致光在皮肤组织中的散射路径差异，使得从血管反射回来的光信号更加复杂和多样化。深色皮肤通常会引入更多的环境光干扰或背景噪音，增加了信号的噪音水平，从而使得PPG信号的分析 and 解读更加复杂和挑战性。

因此，当使用PPG技术进行生理监测或医疗诊断时，需要充分考虑和校正不同肤色对信号的影响，以确保数据的准确性和可靠性。研究表明，特别是在体育活动中，皮肤黑色素较高的个体可能会影响可穿戴设备测量的准确性，原因是肤色深可能导致PPG传感器发射的光被吸收较多。同时，肥胖体质可能对信号也有影响，皮肤较厚可能导致PPG传感器发射的光线难以抵达血管。

为了优化PPG技术在不同人群中的应用，未来的研究可能需要进一步考虑肤色和其他个体特征的综合影响，以提高其在生理监测和医疗领域的精确度和适用性。

4.2 影响 PPG 信号的外部因素

4.2.1 接触压力

PPG信号的质量在很大程度上受传感器与皮肤之间接触压力的影响，这在身体活动和自由生活条件下尤为明显。

接触压力不仅影响传感器与测量部位之间的相对运动，特别是在身体活动期间，还会改变动脉的几何形状，导致压缩变形。此外，传感器与皮肤之间的接触压力会改变皮下灌注，最终阻碍微循环血液流动。这些变化会导致PPG波形峰值的失真，并可能引发心率计算的错误，限制了基于PPG的设备在生理监测中的实际应用。

理论上，在跨膜压力条件下，可以获得振幅最高的最佳PPG信号，但不足或过量的接触压力会导致信号振幅低、信噪比差以及波形失真。过往研究还表明，接触压力对SpO₂也有影响，随着接触压力的增加，SpO₂会降低。然而，由于受试者在年龄、性别和动脉硬度等方面存在广泛变异性，评估合适的接触力范围仍然具有挑战性。因此，为了确保PPG传感器在各种条件下的精度，需要仔细调节和优化传感器与皮肤之间的接触压力。

4.2.2 佩戴位置

PPG信号的质量和准确性在很大程度上受到血氧仪佩戴位置的影响。不同部位的皮肤厚度、血流量和组织结构各异，这些因素都会对PPG信号产生显著影响。例如，手指和耳垂由于血流丰富且皮肤较薄，通常能够提供更强的信号和更高的信噪比。而手腕和前额等部位，由于皮下组织较厚，血流量相对较少，可能会导致信号较弱，噪音较大。此外，佩戴位置的稳定性也至关重要，手指和耳垂相对较少受到运动伪影的影响，而手腕在活动中易产生移动，导致信号失真。因此，为了获得最准确的PPG信号，选择适当的佩戴位置至关重要，应优先选择那些血流丰富且稳定的部位，如手指或耳垂。

需要说明的是，最佳的血氧仪佩戴位置随需要解决的问题而不同。在血氧测量问题中，不同身体部位测得的PPG信号在呼吸频率的准确性上存在显著差异。在正常呼吸条件下，手臂、前额和腕下方的PPG信号偏差较小，信号质量较高，而其他部位则偏差较大。尤其是前额部位测得的PPG衍生呼吸频率与参考呼吸频率之间的线性关系最强，其次是耳垂、手指、手臂和手腕。在深呼吸条件下，除前额外，所有测量部位的呼吸频率偏差均不显著，手指位置的呼吸频率偏差最小且一致性最好。因此，对于正常呼吸模式，前额是最佳测量部位，而在深呼吸模式下，手指是最佳选择。这些发现表明，优化血氧。

4.2.3 环境光照

PPG在实际应用中受到环境光照的显著影响，这是一个重要的技术挑战。环境光照的变化直接影响PPG传感器接收到的光信号质量和稳定性。特别是在户外或光线强烈的环境中，来自太阳光或人工光源的强烈光线可以混淆或干扰传感器接收的皮肤反射信号。

根据Shafer的二色反射模型，PPG信号由与照射光照强度成正比的心率相关部分和环境噪声组成。环境光照增加会导致背景噪声的增加，这些噪声可能掩盖或混淆真实的脉搏信号，影响心率和生理参数的准确测量。此外，环境光照的频繁变化还可能引起传感器信号的漂移，使得信号分析和数据解释变得更加复杂。

远程光电容积脉搏波（rPPG）信号的采集受环境光影响更大。环境光照的变化不仅会影响背景噪声的强度，还会使得照射光照强度随时间不规则变化，进而引起PPG信号产生不规则形变和漂移。

为了克服环境光照对PPG技术的负面影响，研究人员不断努力改进传感器设计和信号处理算法，以提高其抗干扰能力和环境适应性。这些努力包括优化传感器的灵敏度和动态范围，采用滤波技术来减少背景噪声，以及开发智能算法来自动校正或补偿环境光的影响。

综上所述，理解和管理环境光照对PPG信号的影响至关重要，这将直接影响到PPG技术在健康监测、运动科学和医疗诊断等领域的应用可靠性和精确性。

05 影响 rPPG 信号的因素

远程光电容积描记术（rPPG）在实际应用中面临着一些挑战，较为突出的是如何从复杂的视频信号中高精度地分离和提取这些极为微弱的生理信号。此过程极易受到外界多种因素的干扰，包括但不限于环境光照条件的波动、被测者肤色和皮肤类型的变化、面部表情或肢体运动引起的遮挡与形变，以及相机自身参数设置的差异等。以下重点介绍不同因素的影响及可能产生的结果。

5.1 环境光照条件

◎ 光照强度

过强或过弱的环境光照都可能影响rPPG信号的质量。强光可能导致传感器饱和，弱光则可能导致信号噪声增加。

◎ 光源类型

不同类型的光源（自然光、白炽灯、荧光灯等）具有不同的光谱分布，可能影响rPPG信号的波形和幅度。

◎ 光线变化

环境光线的快速变化可能引入噪声和伪影。

5.2 皮肤特性

◎ 肤色

不同肤色对光的吸收和反射特性不同，可能影响rPPG信号的强度和质量。较深的肤色通常吸收更多的光，这会导致信号幅度减小。

◎ 皮肤状态

皮肤的油脂、汗水和化妆品等可能影响光的反射和吸收，从而影响信号质量。

5.3 测量距离和角度

◎ 距离

测量设备与皮肤之间的距离过大可能导致信号减弱和噪声增加。适当的距离可以优化信号采集。

◎ 角度

光源和传感器的入射角和反射角不合适可能影响信号的检测，导致信号质量下降。

5.4 人体运动

◎ 微小运动

即使是微小的面部运动如眨眼、面部表情变化也可能引入伪影，影响rPPG信号的稳定性。

◎ 大幅运动

头部转动、身体移动等大幅运动会显著影响信号质量，甚至导致信号丢失。

5.5 生理因素

◎ 血流动力学变化

个体的血压、心率变异性和外周血管的状态等都会影响rPPG信号的特征。

◎ 呼吸

呼吸引起的皮肤微小位移和血流变化可能引入低频噪声，影响信号质量。

5.6 相机和传感器特性

● 分辨率和帧率

相机的分辨率和帧率直接影响rPPG信号的采集质量。较高的分辨率和帧率可以提供更多的细节和更高的时间分辨率。

● 动态范围

相机的动态范围越大，越能有效捕捉不同光照条件下的信号，减少饱和和欠曝光现象。

5.7 图像处理算法

● 去噪算法

有效的去噪算法可以减少环境噪声和传感器噪声，提高信号质量。

● 信号提取算法

不同的信号提取和处理算法对rPPG信号的敏感度和准确性不同。优化的算法可以提高心率和生理参数的测量精度。

5.8 设备硬件

● 光源稳定性

光源的稳定性影响信号的一致性。闪烁或不稳定的光源会引入噪声和伪影。

● 传感器质量

高质量的传感器可以提高信号采集的精度和可靠性。

5.9 外界干扰

● 电磁干扰

周围电子设备的电磁辐射可能干扰rPPG信号，导致信号质量下降。

● 振动和冲击

设备受到的振动和冲击可能引入额外的噪声和伪影。

06

PPG (rPPG) 信号在疾病诊断场景的应用及挑战

6.1 社会价值

目前，我国心血管病患者已突破3.3亿，每年因心血管疾病死亡的人数在总死亡人数的比例超过40%，在各类疾病的患者死亡人数中排第一位。心血管疾病对国民生命健康造成了极大的影响，因此，为了降低心血管疾病对人民的生命健康的威胁，加强对心血管疾病的预防，争取对心血管疾病早诊断、早治疗，是我国公共卫生政策的一项重要内容。

对心血管疾病的诊断主要依靠监测血流动力学的各类指标，临床上常见的检测方式分为侵入式和非侵入式。侵入式检测包括动脉导管置管、冠脉造影等，这样的检测方法具有快速、直接、干扰小的优点，更适合于严重冠脉狭窄、心肌梗死、心力衰竭、休克等危重患者，对设备要求高，同时存在疼痛、感染风险。非侵入式检测包括超声心动图、柯氏音血压测量法、生物电阻抗血流动力测定等，这类检测方法无创、简单、成本较低，临床工作中十分常见，但准确性较低，容易被其他疾病影响检测结果，其结果的判定也需要相对专业的知识。两类检测方法各有利弊，它们的弊端又各自限制了它们走进寻常百姓家的路途，因此一种能结合二者优点的便捷的监测方式对加强心血管疾病监测、诊断是相当必要的。

6.2 应用进展及实践

近二十年来，有关PPG信号的研究越发深入，有关PPG信号与生理信号的关联也经过了相当严密的验证，PPG信号与心率、心律、血压、血容量的关联已经得到了证实，辅助心血管系统疾病诊断也有了一些证据。

● 心率

PPG测量心率的原理相对简单，但是受到采集部位、身体运动、噪声等干扰较大。在算法考虑去除运动伪影、使用绿光减少噪声带来的影响后，PPG信号计算的心率和临床测量值的平均误差仅有2.4次/分钟。同时，一些临床试验已经证明了PPG和心电图（ECG）的测量值在低频情况下相差较小，高频情况下差距相对较大，但总体存在较强正相关性。

● 心律

一项基于PPG检测心律失常的模型发现，PPG信号脉冲峰值间隔以及血氧饱和度信号特征可以用于获取脉搏变异性，进一步获取心律的变化，用于判断患者是否需要住院治疗。另外一些研究显示，基于PPG信号的算法对房颤诊断准确率超过90%，与ECG同时进行，对房颤的诊断准确率更高。PPG的应用可以与24hECG等互补，降低房颤等心律异常患者的漏诊、误诊。

● 辅助诊断心血管疾病

在一些研究中，研究者针对低血压、缺血性卒中、急性心肌梗死、睡眠呼吸暂停综合征等疾病的患者采集PPG信号，并与ECG信号进行对比，发现PPG信号在心跳、呼吸异常的时间点同时产生异常的比例相当高，对异常信号的敏感度高，说明PPG同样具有监测疾病发生的能力。

6.3 挑战及展望

由于操作水平、运动状态、采集部位等对PPG信号的质量影响较大，PPG想广泛应用于日常生活还要走很长一段路。此外，PPG信号与ECG信号之间的关联还需要更科学的解释，也需要更多临床证据从原理和结果上共同证明PPG的可靠程度。相比于ECG等临床常用的检测手段，PPG信号仅需移动设备就可以获取，检测简单获取容易，是一种更贴近日常生活的监测方式，也拥有更广阔的应用空间。

PPG应用于心血管疾病的监测，将缩短普通人识别急性心脏疾病的时间，为急性发作患者争取宝贵的治疗时间，也可以更早分辨出潜在的心血管疾病患者，减少此类疾病对我们健康的威胁。

07

PPG (rPPG) 信号在生物识别场景的应用及挑战

7.1 应用潜力

近年来，随着人工智能技术的持续进步，各个领域对其优势和挑战的关注日益增加。身份认证是一个特别关键的领域。身份认证的目的是通过私人信息验证用户身份，授予对系统的访问权限，并确保用户信息的保护。传统的身份识别方法主要依赖密码。然而，随着技术的发展，生物识别技术逐渐取代了传统密码，成为当代身份识别中的主要方法之一。

目前，指纹识别和面部识别是最广泛采用的生物识别方式，它们之所以广受欢迎，是因为具有极高的识别准确度和无需记忆的便捷性。然而，随着技术的进步，传统的面部识别和指纹识别变得容易受到未经授权的使用。因此，探索可用于身份验证的其他生理信号变得至关重要。

光电容积脉搏波信号（PPG）是一种简单且易于获取的生理信号，在医学中广泛用于测量心率和血氧饱和度。它通常基于照明，通过测量人体组织对光的反射和吸收来获取各种生理数据。由于肌肉、骨骼、血管和其他连接组织对光吸收率的影响，PPG信号的波形呈现个体差异，因此具有身份验证的潜力。



表1心电信号(Electrocardiograph, ECG)
和光学体积描记术(Photoplethysmograph, PPG)
与其他生物特征识别的比较

生物特征	优势	缺陷
ECG	普遍性 / 隐蔽性好 / 易获取	接触式采集 / 时刻变化
脑电信号	普遍性 / 隐蔽性好	设备昂贵 / 易受噪声干扰 / 时刻变化
面部	易测量 / 设备廉价	易模仿 / 受光线和能见度影响
指纹	高性能 / 不易变化	接触式采集
步态	易于采集 / 设备廉价	性能较差 / 时刻变化
虹膜	高性能	设备昂贵
掌纹	易采集 / 不易变化	接触式采集
PPG	易采集 / 高隐蔽性 / 设备廉价	性能较差 / 时刻变化
声纹	设备廉价	性能较差

(表注: PPG生物识别与其他类型生物识别的对比)

先前的研究已经证明了PPG信号在认证任务中的几个优点:

 **容易获取**——PPG信号可以通过摄像头或传感器从人体的各个部位非侵入式地收集, 常见的采集位置包括耳垂、面部、指尖和手腕。此外, PPG传感器广泛集成到各种可穿戴设备中, 使PPG信号高度可获取。

 **难以伪造**——与面部识别和指纹技术相比, PPG信号不太直观。潜在的冒名顶替者可以容易地获得面部特征和指纹, 而PPG信号微弱且不易察觉, 因此更能抵抗伪造。

💖 **生命体征**——由于PPG信号基于心跳的周期性，只有活体个体才能产生PPG信号，从而增加了欺诈使用的难度。

如今，人们身边的可穿戴设备愈加多样。智能手机、手环、手表、耳机、指环等相继出现。这为基于生理信号的身份认证提供了发展的土壤，让多设备间相互认证的身份验证任务变得可行且有价值。同时，多设备的使用，也提高了用户对信息安全和私人化的要求，增加了对探索新型的更难被盗用的身份验证方法的需求。此外，许多新兴的可穿戴式设备难以支持传统的身份验证方式，反而更支持只需要小型传感器就能工作的生理信号身份验证。

7.2 社会价值

光电容积描记法（PPG）信号在身份识别上的社会价值巨大。在当今信息高度发达的社会中，身份认证变得越来越重要，尤其是在物联网（IoT）和智能家居时代，身份识别的安全性直接关系到个人财务安全和生命安全。PPG信号作为一种非侵入性且成本低廉的生物识别技术，能够提供高效、安全的身份验证手段。

首先，PPG信号难以被盗取或复制，这为防止身份冒充和信息泄露提供了天然的保障。由于每个人的血液动力学和心血管系统具有独特性，PPG信号能够准确地反映个人的生理特征，从而实现高精度的身份识别。其次，PPG具备内在的防伪和活体检测功能，能够有效防止伪造和冒充行为，提高了身份识别的可靠性。这一特性在金融、医疗和国防等高安全性领域尤为重要。

此外，PPG信号采集仅需简单的LED和光电二极管设备，成本低廉，操作简便，适用于各种场景，尤其是对资源有限的环境具有重要意义。在智能家居中，PPG信号可以用于访问控制、设备解锁等，提升家庭安全性和用户体验。在物联网设备中，PPG信号可以用于设备间的身份验证，确保设备之间的通信安全。

在医疗领域，PPG信号的应用更是为患者提供了方便、无创的身份验证方式，减少了对传统生物识别手段如EEG、ECG等依赖，提升了医疗服务的效率和患者体验。例如，在医院中，PPG

信号可以用于患者身份确认，确保医疗记录的准确性和隐私性。同时，PPG信号还可以用于远程医疗，通过便携设备采集患者的生理数据，实现远程诊断和监测，降低医疗成本，提升医疗资源的利用率。

PPG信号在身份识别上的应用不仅提升了安全性和可靠性，还具有显著的经济效益和社会价值。它为构建更加安全、便捷的现代社会提供了坚实的技术支撑。随着技术的不断进步和应用的拓展，PPG信号在身份识别领域的价值将进一步得到体现，为社会的安全和发展做出更大的贡献。

7.3 应用进展及实践

由于PPG信号身份识别的准确性尚无法保证，PPG信号在身份识别的工作仍处于研究阶段。早期研究主要集中于利用手指数据进行PPG身份识别，采用了模糊逻辑和线性判别分析（LDA）等分类方法，显著提高了准确性。此外，研究人员还利用手工设计的特征进行预测学习，提取了多达40个特征，并与k最近邻（k-NN）分类器结合使用，取得了良好的效果。

近期的研究探索了结合聚类技术和深度学习方法的两阶段方法。通过利用手工特征进行聚类，然后应用受限玻尔兹曼机和深度置信网络，研究人员分析了在流动环境中使用绿光从手腕获得的PPG信号，显示出未来无需特征提取、完全依赖神经网络进行识别的潜力。此外，研究人员还通过提取PPG信号的固有属性，如峰值数量、峰值间隔及上升和下降斜率等，提高了用户验证的准确性。

随着深度学习领域的发展，进一步结合深度学习模型如卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）进行特征提取和识别的方法，为解决PPG信号在有运动伪影环境下的准确性和稳定性提供了新的解决方案。在最近的文献中，越来越多的研究重点放在深度学习模型中提取特征的研究，使用深度神经网络以端到端的方式直接从原始信号中提取特征信息。这些努力极大促进了基于PPG的身份验证领域的发展。

7.4 在某厂商上的应用案例

目前市面上大部分的智能手表或手环都具备PPG 传感器及imu传感器，能实时捕捉到佩戴者的ppg信号以及imu数据。选用其中一款智能手表作为本方案的应用案例，验证PPG信号在做身份识别上准确性和稳定性。

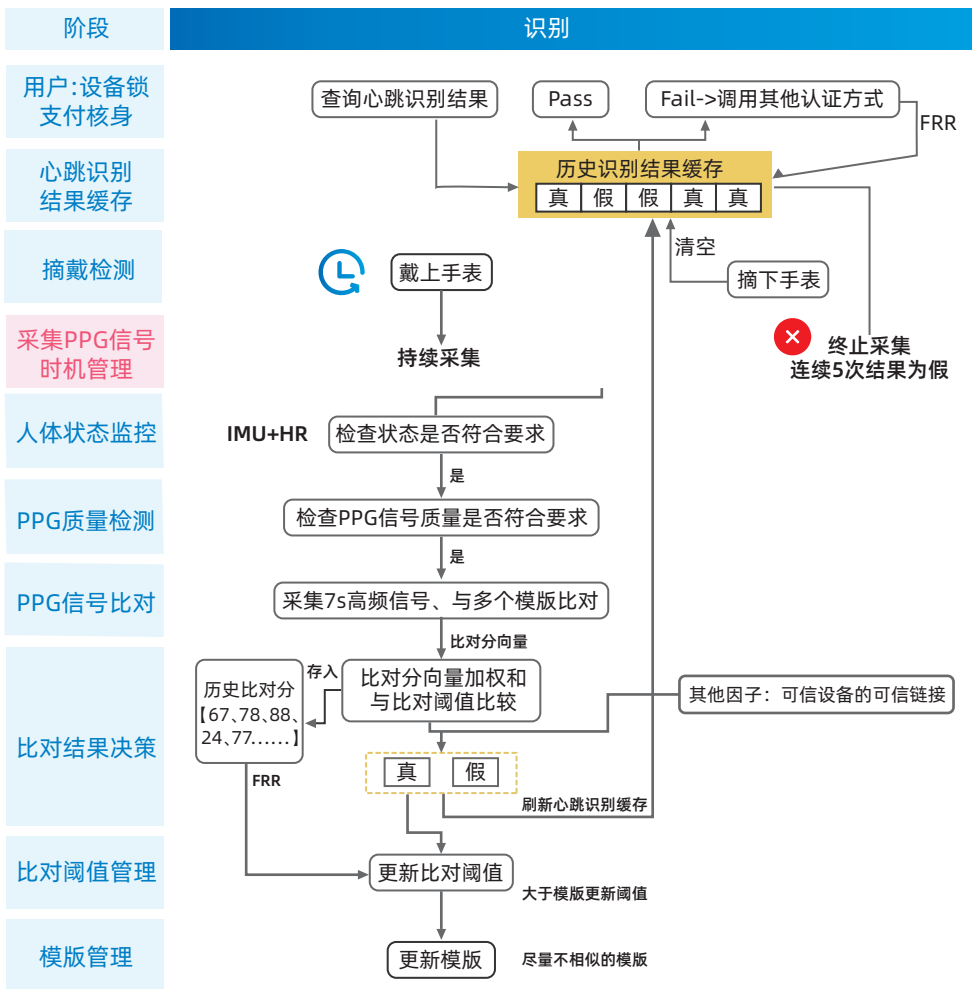
7.4.1 设备选型及测试数据

我们选用智能手表或手环中常见的100hz采样频率的ppg信号，光源采用红光、红外（IR）及绿光三种不同感应光，并同步获取imu运动数据作为运动状态的辅助检测手段。在30个受试者上采集真实测试数据，采集模式如下：

状态	躯干状态	手部状态	采集时长	数量
半静态 另一只手可玩手机 或进行小幅动作	坐	手臂水平 表朝上（<45度）	6min	至少30人
动态	自由（建议行走玩手机）		5min	至少30人

（表注：上述真实测试数据来自的受试者是训练数据中没有包含的人员ID）

7.4.2 测试流程和测项



采集上述30人的数据，分别标记为 A~Z，AA~AZ

每个人的静态/动态 PPG 及 IMU 数据总计 11min, 约 660 秒, 每 15 秒切为一个 slice, 送入心跳识别, 比如 A 的数据后会被切为 A1~A44, 每段 15 秒。

我们在这样的openset测试集通过以下几个纬度来测量准确性和稳定性：

● FAR FalseAcceptRate

A 的错误接受率=预测为 A 数据个数/非 A 的所有数据个数（B~ZZ）

FAR=平均值（A的错误接受率、B的错误接受率、C的错误接受率....）=FPR false positive rate

1-FAR = TNR true negative rate

● FRR FalseRejectRate

A 的错误拒绝率=预测为非 A 数据个数/A 的所有数据个数（A1~A44）

FRR=平均值（A 的错误拒绝率、B 的错误拒绝率、C 的错误拒绝率....）

1-FRR = TPR（true positive rate）

● 动态可用率和静态可用率

动态可用率=运动数据中通过质量打分的 slice 个数/所有人运动的slice 总个数

静态可用率=静坐数据中通过质量打分的 slice 个数/所有人静坐的slice 总个数

7.4.3 测试指标

	数据集	预测适合比对/静坐	运动数据适合比对的比例
Imu运动检测	30人	99.47%	0.83%
ppg质量检测	30人	89.80%	1.78%

Imu运动检测	数据集	FAR	FRR
	30人(10模板)	0.233%	7.053%

（表注：目前far达到0.24%以内的时候，frr约7%）

7.4.4 实战总结

在真实受试者上利用已有的传感器及配置来实现方案原型，并达到了FAR-0.3%以下，FRR-7%，可以看出ppg信号除了做健康监测外，还可以完成更多比如智能核身这样的识别任务，并可以通过手表或者手环上的其他可用传感器进一步提高整体方案的可用性。

7.5 挑战及展望

光电容积描记（PPG）信号在身份识别中的应用也面临着严峻的挑战。其中较为重要的两个技术难题是消除PPG信号中运动伪影和PPG时变特性带来的影响。

基于PPG的生物识别技术的过往研究所使用的数据，大多为医疗中心提供的医疗数据，属于静态环境中的临床信息。由于在数据采集时，病人无法正常运动，因此这些医疗数据中采集的PPG信号信噪比高，运动伪影不明显。但在日常生活中，特别是部署在可穿戴设备上的身份验证模块所采集的PPG信号，由于测量设备随身体运动的晃动，受到运动伪影的影响较大。目前，虽然已经有研究开始使用运动过程中采集的PPG信号进行研究，但方法的准确性和稳定性尚难以保证，并且这些数据也受制于实验室的采集环境，与实际使用有一定差距。

PPG信号由于会受到运动状态、情绪、佩戴位置、接触压力等因素的影响，本身就存在一定的不稳定性。由于被采集者每时每刻的身体状况不同，运动状态不同，同一被测者的PPG信号在不同时间也有一定差异。这对PPG信号跨时段的验证准确性造成了巨大挑战。其实，不仅是PPG信号，基于各种时序性信号的身份验证问题都面临着跨时段准确性大幅度下降的问题。针对这一问题，研究者提出了许多解决方案，但目前还有没有很好的解决。

展望未来，PPG信号的身份验证技术将迎来更广泛的应用和显著的进步。随着深度学习模型如卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）的不断发展，PPG信号的特征提取和识别将变得更加高效和准确。这些先进的算法能够在更复杂和动态的环境中运行，有效减少运动伪影的影响，从而提高实际应用中的稳定性和可靠性。

此外，PPG信号的非侵入性和便捷性使其在可穿戴设备和移动设备上的应用前景广阔。通过集成到智能手表、健身追踪器等设备中，PPG信号身份验证可以为用户提供连续、实时的安全验证功能。这不仅提升了用户体验，还为移动支付、医疗健康监控等领域提供了新的安全解决方案。

未来的研究将进一步优化PPG信号处理算法，开发更加智能和自适应的模型，以应对不同用户群体和使用场景的需求。随着技术的不断进步和应用范围的扩展，基于PPG信号的身份验证有望成为下一代生物识别技术的重要组成部分，为各行各业提供更加安全和便捷的身份验证手段。

08

PPG (rPPG) 信号在疲劳检测场景的应用及挑战

8.1 检测原理

在疲劳检测场景中，rPPG（无接触光学心率测量）信号被用来反映人体的疲劳程度，其原理主要基于以下几点：



心率变化与疲劳关系

疲劳状态会显著影响心率的稳定性和频率，具体而言，疲劳时，心率通常会表现出不规律性或增加的趋势。通过分析rPPG信号中的心率变化模式，可以推断出驾驶员或操作员的疲劳程度。



生理响应的反映

rPPG信号不仅反映心率变化，还间接反映出其他生理响应，如血流量的变化和心率的变异性（HRV）。这些参数对于评估疲劳状态具有重要意义，因为疲劳会影响自主神经系统的调节，导致HRV的变化。

8.2 社会价值

及时检测和预警驾驶员或操作员的疲劳状态有助于减少交通事故和工作场所事故的发生，从而提升整体安全性。管理和监控工作人员的疲劳状态，可以优化工作安排的休息时间，提高生产效率和服务质量。此外，对于长时间从事需要高度注意力的工作人群，如司机、护士等，有效管理疲劳有助于保护他们的身体和心理健康。

8.3 应用进展及实践

由于当前技术限制，将rPPG技术投入疲劳监测场景应用的案例并不多，主要集中在日常生活压力检测方面，不过，鉴于rPPG信号采集十分便捷，其在车辆安全、工业生产，健康管理等方面具有巨大的发展潜力。

8.4 挑战及展望

尽管rPPG技术展现出广泛的应用潜力，其发展路径上仍横亘着几大挑战。首要挑战在于环境因素的干扰，如光线变化、面部运动或遮挡物，这些都可能影响信号的准确性和稳定性。其次，个体差异，包括肤色、年龄、皮肤条件等，对信号质量的影响也是研究中亟需克服的问题。再者，算法的复杂性和计算效率之间的平衡，如何在保证高精度的同时实现低功耗、实时处理，是技术落地的关键。最后，隐私保护问题也不容忽视，特别是在公共场所应用时，如何确保采集到的生物特征信息不被滥用，是rPPG技术推广的重要前提。

展望未来，rPPG技术的前景充满无限可能。随着深度学习、计算机视觉技术的持续进步，以及新型传感器技术的开发，rPPG的精度和鲁棒性有望大幅提升，使其能在更多复杂场景下稳定工作。跨学科研究，比如结合生理心理学，将深化我们对人体生理信号的理解，开拓更多基于生理反应的情绪识别、压力管理等应用场景。同时，加强数据加密、匿名化处理等隐私保护措施，建立严格的数据使用规范，将是推动rPPG技术普及与信任度提升的关键。总之，rPPG技术正逐步成为连接人体生理信息与数字世界的桥梁，其深入发展和广泛应用，将深刻改变我们监测、理解和改善人类健康的模式。



09

PPG (rPPG) 信号在情绪识别场景的应用及挑战

9.1 识别原理

通过rPPG信号实现情绪识别主要基于情绪对自主神经系统（ANS）的影响。自主神经系统包括交感神经系统和副交感神经系统，它们共同调节心率、呼吸、血压等生理参数。当个体经历不同的情绪状态时，ANS的活动水平会发生变化，从而导致心率和血液循环的变化。rPPG信号可以捕捉这些变化，进而推断情绪状态。

血液体积变化与心率



rPPG通过摄像头捕捉面部皮肤的细微色彩变化，这些变化由心脏泵血导致的血液体积变化所引起。血液体积的周期性变化会影响皮肤的光反射特性，从而在摄像头采集到的视频信号中表现为周期性的光强度波动。通过特定的信号处理算法，这些波动可以被提取并转换为心率信号。

心率变异性（HRV）与情绪



心率变异性（HRV）是心跳间隔时间的变异性，是衡量自主神经系统活动的重要指标。不同情绪状态下，HRV的特征表现不同。一般来说，放松状态下的HRV较高，而压力或紧张状态下的HRV较低。通过分析rPPG信号中的HRV特征，可以推断个体的情绪状态。

光反射特性与血液含氧量



除了心率，rPPG信号还可以反映血液中的含氧量变化。不同情绪状态可能导致呼吸模式的变化，从而影响血液含氧量。通过分析rPPG信号中的光反射特性变化，可以进一步丰富情绪识别的特征集。

9.2 社会价值

9.2.1 心理健康监测与干预

提高心理健康监测的可及性

心理健康问题已成为全球性公共卫生挑战，但传统的心理健康监测方法往往依赖于问卷调查和自我报告，这些方法存在主观性强、覆盖面有限等问题。rPPG技术可以通过摄像头实时监测个体的情绪状态，无需特定设备或专业场所，极大地提高了心理健康监测的可及性。

早期发现和预防心理疾病

通过持续监测个体的情绪状态，rPPG技术可以帮助及早发现情绪异常状况，并提供及时的心理干预，预防心理疾病的发生和发展。

9.2.2 人机交互的智能化提升

改善用户体验

在智能家居、智能手机、车载系统等领域，rPPG情绪识别技术可以根据用户的情绪状态自动调整系统设置，提升用户体验。以车载系统为例，当系统识别到驾驶员处于愤怒、急躁等具有攻击性的负面情绪中时，可以提前提醒并安抚情绪，避免“路怒症”爆发，大大提升交通安全。

提高人机交互的自然性和情感性

情绪识别技术可以使人机交互更加自然和情感化。通过实时了解用户的情绪状态，系统可以做出更加人性化的反应，从而提高交互体验。目前的人工智能多停留在回答问题层面，能提供的情绪价值微乎其微，如若人工智能具备了识别用户情绪的能力，它们将不再是无情的问答机器，而是能够分享快乐，分担痛苦的虚拟伙伴。这有望为抑郁症、孤独症等心理疾病带来新的治疗方式。

9.2.3 教育领域的个性化教学

④ 实时情绪反馈，优化教学过程

在教育领域，rPPG情绪识别技术可以实时监测学生的情绪状态，给予教师和教育系统实时反馈。通过了解学生在学习过程中的情绪变化，教师可以调整教学方法和节奏，提供更个性化的教学服务，提升学习效果。

④ 远程教育中的应用

在远程教育中，教师难以通过传统方式了解学生的学习状态和情绪变化。rPPG情绪识别技术可以填补这一空白，帮助教师在远程教育中更好地了解学生的情绪状态，提供针对性的指导和支持。

9.2.4 市场营销与用户研究

④ 精准营销与用户反馈

在市场营销中，了解消费者对产品或广告的情绪反应对于制定有效的营销策略至关重要。rPPG情绪识别技术可以实时捕捉消费者在观看广告或体验产品时的情绪变化，提供更精准的用户反馈和市场分析。

④ 用户体验优化

rPPG技术可以帮助企业在产品开发和 Service 设计中更好地了解用户的情绪反应，进行针对性的优化，从而提升用户体验和满意度。

9.2.5 社会治理与公共安全

④ 公共场所的情绪监测

在公共场所，rPPG技术可以用于情绪监测，帮助及时发现和应对突发事件。

④ 心理健康公共服务

政府和公共服务机构可以利用rPPG技术提供广泛的心理健康服务，通过情绪监测和分析，识别需要心理干预的群体，提供及时的支持和服务，促进社会整体的心理健康水平提升。

9.3 应用进展及实践

目前由于技术限制，rPPG在情绪识别方面的实际应用较少，大部分仍处于试验阶段。预计随着技术发展，未来将会有大批相关产品面世。

9.4 挑战及展望

9.4.1 挑战

尽管rPPG技术在情绪识别中展现出巨大潜力，但其实际应用仍面临多种挑战。主要包括信号噪声干扰、个体差异、环境光影响、情绪识别的准确性和鲁棒性、隐私和数据安全等方面。



信号噪声干扰

rPPG信号容易受到外界环境的干扰，如光线变化、面部表情变化、头部运动等。这些因素会引入噪声，影响信号的准确提取和分析。



个体差异

不同个体的皮肤颜色、血管分布、面部结构等存在差异，这些差异会影响rPPG信号的采集和分析。这使得统一的情绪识别模型难以适应所有个体。



环境光影响

环境光变化会显著影响rPPG信号的质量，尤其是在自然光线条件下，光线的强度和角度变化会对信号造成干扰。



情绪识别的准确性和鲁棒性

情绪状态的复杂性和多样性，以及情绪反应的个体差异，使得情绪识别的准确性和鲁棒性成为一大挑战。



隐私和数据安全

rPPG情绪识别涉及个体的生理数据和隐私信息，如何确保数据的安全和隐私保护，避免数据滥用和不当使用，是技术应用过程中需要重点考虑的问题。

9.4.2 展望

尽管面临诸多挑战，rPPG情绪识别技术的发展前景依然广阔。通过以下几个方面的努力，rPPG技术有望实现更广泛的应用和更高的社会价值。

- 信号处理技术的改进 -

未来，随着信号处理技术的不断进步，rPPG信号的提取和分析将更加精准。先进的算法和深度学习技术将进一步提升信号质量和情绪识别的准确性。

- 多模态数据融合 -

通过结合多种生理和行为数据，可以获得更全面的情绪信息，提升情绪识别的准确性和全面性。例如，结合面部表情、语音、眼动等数据，可以更准确地反映个体的情绪状态。



- 个性化模型构建 -

利用大数据和个性化建模技术，针对不同个体建立个性化的情绪识别模型，提高模型的适应性和准确性。通过个性化模型，可以更好地适应不同个体的生理和行为特征。

- 隐私保护和数据安全 -

采用先进的隐私保护技术和数据管理规范，确保用户数据的安全性和隐私性。

10

PPG (rPPG) 信号在健康检测场景的应用及挑战

● 睡眠监测场景

健康睡眠是美国心脏协会颁布的最新版专家建议中的生命健康八要素之一。睡眠障碍是当下带给人较大困扰的疾病之一，对睡眠质量的评估则是诊断睡眠相关疾病的重要方式。目前临床常用的睡眠监测仪器需要脑电、呼吸、血压、血氧等多维度的检测的配合，医院可以提供的设备数量有限，其放置也需要特别注意，一个周期内能提供给患者进行监测的设备较少。

据研究，PPG信号可以以心率、心率变异性等生理信号为基础，判断、区分睡眠的不同阶段，监测睡眠的连续性，识别呼吸暂停事件，评估睡眠质量，帮助患者了解自身睡眠情况，为用户提供个性化的睡眠建议，辅助医生了解患者长期睡眠状态。

● 卒中风险预警

卒中指的是突发且进展迅速的脑缺血性或脑出血性疾病，预后较差，急性事件发生后，患者可能有长时间不能自理的情况，需要花费大量的人力物力辅助功能锻炼来恢复。如果能在卒中前有效识别危险的血流动力学信号，可以通过早治疗改善患者的血管状态，降低卒中的可能，明显改善预后。

PPG信号可以通过检测血流变化来了解血管健康状况，有潜力在早期阶段预测卒中风险；通过监测心率变化识别房颤、室颤等高风险事件，及时提醒急性事件发生可能。在一些研究中，研究人员通过PPG信号，通过评估动脉硬化程度、血压变化和心率变异性来预测卒中风险，其预测结果可信，但研究人员还指出，该模型的预测准确度可以进一步提高。

● 驾驶员脑血管疾病监测

随着基础设施建设的完善，我国公共交通的运载量逐年上升，私家车数量也在不断攀升。无论哪种出行方式，驾驶员的技术和健康状态是保证他们对交通工具良好操控的基础。近些年，偶有报道因司机突发心脑血管疾病产生的交通事故，对人民生命安全和财产安全都造成了不良影响。为了减少此类事件发生，对驾驶员进行一定程度上的健康监测是有必要的。目前已经有一些针对驾驶员的基于PPG的心脑血管疾病监测模型，研究发现，PPG信号对此类疾病的识别准确度高于50%。此外，由于数据集不平衡，模型准确性的调整有一定难度，可能需要进一步扩大数据范围、调整测试方式完成对PPG模型的优化，最终投入使用。

以上只是PPG信号进行健康监测的几个场景，远远不能包含PPG的所有可使用场景。在健康监测这个目标方向上，PPG已经开创了一条崭新的赛道，它有着其他设备所欠缺的灵活性、使用便利程度，其准确性及可靠程度已经得到了一些实验的证实。PPG想投入大范围应用，还需要迈过几道难关，包括设备影响、噪声干扰、使用方式的误差、准确性提高以及因果关系验证。对以上几个问题进行优化之后，PPG完全有能力走入千家万户，成为人民生命安全的一道防线，为我国公共卫生事业的发展作出重要贡献。

