

李晓,王鸿,范小琳,等. 实验动物生理指标遥测技术的研究现状 [J]. 中国比较医学杂志, 2026, 36(5): 137-146.  
Li X, Wang H, Fan XL, et al. Current status of telemetry technology for physiological indicators in laboratory animals [J]. Chin J Comp Med, 2026, 36(5): 137-146.  
doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2026.05.012

## 实验动物生理指标遥测技术的研究现状

李晓<sup>1,2</sup>, 王鸿<sup>1,2</sup>, 范小琳<sup>1,2</sup>, 李亮<sup>1,2</sup>, 喻伯牙<sup>1,2</sup>, 高俊宏<sup>1,2\*</sup>

(1. 兵器工业卫生研究所, 西安 710065; 2. 西安市毒理与生物效应重点实验室, 西安 710065)

**【摘要】** 生理遥测技术通过无线传输实现对自由活动状态下生物体生理参数的实时监测, 突破了传统检测方法的空间限制, 为心血管药理、神经科学及代谢研究等领域提供了真实可靠的生理数据。本文系统梳理了植入式与非植入式系统的技术原理及发展现状, 总结了传感器微型化、无线能量传输优化及智能算法应用等核心技术进展。研究进一步分析了不同实验动物模型的适配性及其在心血管、神经科学等领域的应用价值。未来发展趋势聚焦于柔性电子、智能算法与标准化操作方面持续突破以实现更精准、普适的生理监测, 结合人工智能与3D打印技术, 推动该技术在基础研究与临床转化中的广泛应用。

**【关键词】** 生理遥测技术; 植入式系统; 非植入式系统; 动物模型

**【中图分类号】** R-332; Q95-33; TH776 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856 (2026) 05-0137-10

### Current status of telemetry technology for physiological indicators in laboratory animals

LI Xiao<sup>1,2</sup>, WANG Hong<sup>1,2</sup>, FAN Xiaolin<sup>1,2</sup>, LI Liang<sup>1,2</sup>, YU Boya<sup>1,2</sup>, GAO Junhong<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Industrial Hygiene of Ordnance Industry, Xi'an 710065, China.

2. Xi'an Key Laboratory of Toxicology and Biological Effect, Xi'an 710065)

**【Abstract】** Physiological telemetry technology enables the real-time monitoring of physiological parameters in freely moving organisms using wireless transmission, thus overcoming the spatial limitations of traditional detection method. This provides reliable physiological data in fields such as cardiovascular pharmacology, neuroscience, and metabolic research. This paper systematically reviews the technical principles and current status of implantable and non-implantable systems, summarizing core technological advancements such as sensor miniaturization, optimized wireless energy transmission, and the application of intelligent algorithms. The review further analyzes the adaptability of different experimental animal models and their application value in fields such as cardiovascular medicine and neuroscience. Future developments will focus on continuing breakthroughs in flexible electronics, intelligent algorithms, and standardized operations to achieve more precise and universal physiological monitoring. By integrating artificial intelligence and 3D printing technology, telemetry technology will be widely applicable in both basic research and clinical translation.

**【Keywords】** physiological telemetry technology; implantable systems; non-implantable systems; animal models

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

[作者简介] 李晓 (1996—), 男, 硕士, 研究方向: 生物效应。E-mail: 17792491947@163.com

[通信作者] 高俊宏 (1975—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 生物效应。E-mail: gaoping2285@126.com

生理遥测技术作为现代生物医学研究的重要工具,通过无线传输的方式实现对自由活动状态下生物体生理参数的实时监测。该技术突破了传统检测方法的空间限制,避免了麻醉或物理束缚对实验数据的干扰,为心血管药理、神经科学、时间生物学等领域提供了更真实的生理数据。随着微电子技术、传感器技术和通信技术的进步,生理遥测系统在硬件微型化、多参数集成、长期稳定性等方面取得显著突破。该技术已从单一参数监测发展为多模态集成系统,覆盖心血管、神经、呼吸等多系统功能评估。在基础医学研究中,生理遥测技术对清醒自由活动动物的生理监测是揭示疾病机制和药物安全评价至关重要的一环;在临床研究中,生理遥测技术推动了个性化医疗的发展。然而,植入设备的能源供应、生物相容性及跨物种适配性等技术瓶颈还亟待优化。本文从技术分类、动物模型、应用领域及发展趋势等方面,系统地梳理了国内外研究进展。未来,通过柔性电子与仿生集成实现无感、精准的多模态监测,依托智能算法构建个体化的生理“数字孪生”并实现本地化实时分析,结合 3D 打印与个性化设计打造自反馈的诊疗闭环,将成为突破当前瓶颈,迈向全天候、自适应、个性化健康监控与疾病管理的关键路径。

## 1.1 心血管参数监测技术

### 1.1.1 植入式技术

植入式技术是通过手术将传感器或导管直接植入目标血管或心脏附近组织,以进行高精度、连续的直接测量或接触式测量。以 AXELSSON 等<sup>[1]</sup>开发的植入式多通道系统为例,其通过 800 MHz 频段同步监测血流、压力和体温,但需外置接收天线且部署成本高昂。曹开进等<sup>[2]</sup>在自发性高血压大鼠模型中对植入式遥测系统进行验证,结果显示 20:00~23:00 时段的偶测血压与 24 h 连续监测数据的相似因子达 77.8,采集结果具有较高可信度,可作为优化设备续航的新策略。VOLK 等<sup>[3]</sup>开发的射频识别植入系统采用半被动供电模式,通过 13.56 MHz 电磁场感应供能,成功实现大鼠心电、动脉血压和体温的三通道同步监测。该系统采用模块化设计,传感器模块与处理单元可分离复用,单套设备可支持 5 只大鼠的群体监测,显著降低了单个动物的监

测成本。张燕华等<sup>[4]</sup>在巴马小型猪模型中成功植入压力导管至腹主动脉,同步记录心电、血压和体温参数,证实植入子可稳定工作 3~4 周。这类植入式系统的优势在于信号保真度高,但存在手术创伤风险和电池寿命限制的缺点<sup>[5]</sup>。

### 1.1.2 非植入式技术

非植入式技术通过体表接触式传感器或间接测量装置无创获取心血管信号。杨李厂等<sup>[5]</sup>研发的马甲式心电监测系统采用柔性电极贴片和呼吸绑带,在巴马小型猪清醒状态下获得的 P~R 间期( $97 \pm 11$ ) ms 和 QTc 间期( $271 \pm 19$ ) ms 等关键参数,与麻醉状态相比心率变异系数降低 42%。徐敏<sup>[6]</sup>开发的马甲式食蟹猴遥测系统,采用弹性织物集成心电电极和加速度计进行信号采集,可有效避免外科手术对动物的影响。在柔性电子技术应用方面近期进展颇丰。YOO 等<sup>[7]</sup>研发的可拉伸表皮电极,其杨氏模量与皮肤匹配( $<100$  kPa),在灵长类动物运动中仍能维持稳定的心电信号质量。KIM 等<sup>[8]</sup>研制的可拉电极阵列,可承受 30%应变,能适应皮肤运动,还有封装层确保其水下的正常工作,通过多波长光子设计,实现心率、氧合、UV 剂量、肤色等多参数监测。刘艳菊等<sup>[9]</sup>开发的尾套法血压监测系统通过周期性充气袖带实现犬类血压间接测量,但存在采样频率受限(200 Hz)、数据离散度大(收缩压标准差达 18.8 mmHg)等技术缺陷。FISH 等<sup>[10]</sup>的犬类开放场实验表明,配备遥测背心会导致犬类心率下降 8%、焦虑评分降低 34%,证实设备物理约束对生理参数存在显著影响。该研究采用了 emkaPACK 非侵入式系统,采样频率达 10 Hz,发现 Lomir 材质背心通过压力效应产生类 ThunderShirt 镇定作用,这对实验动物福利和药物评价准确性具有双重意义。

## 1.2 神经活动与代谢指标监测技术

非植入式方法的精度、可靠性和稳定性目前普遍低于植入式方法,尤其对深层组织或复杂介质。神经活动监测技术以植入式遥测系统为主,通过开颅或微创手术将电极或传感器直接放置于脑实质、硬膜下/外等目标神经组织处或颅内压(intracranial pressure, ICP)等邻近部位。ANTES 等<sup>[11]</sup>对 247 例(含 10 例儿童)患者进行的临床研究结果表明,Raumedic NEUROVENT-P-

tel 传感器植入后 3 个月内的总体并发症率为 7.3%,包括脑出血(0.4%)、癫痫(4.5%)等严重并发症。而 PEDERSEN 等<sup>[12]</sup>在对儿童 ICP 监测的长期研究中显示,32 例传感器仅出现 1 例浅表感染和 1 例皮肤侵蚀,证明了该技术的安全性。姚元生等<sup>[13]</sup>开发了植入式无线遥测系统用于清醒自由活动状态下大鼠胃肌电信号的采集,该系统通过将电极固定于胃窦浆膜层,成功记录了消化期的慢波频率为每分钟(4.76±0.09)次和消化间期Ⅲ相慢波频率为每分钟(4.90±0.14)次的肌电活动特征,并验证了多潘立酮对胃肌电活动的增强效应(慢波幅度提升 52.8%),该研究突破了传统麻醉状态对生理信号的影响,为胃肠动力研究提供了新方法。植入式与非植入式遥测系统技术的对比如表 1 所示。

## 2 生理遥测技术在实验动物中的应用进展

### 2.1 啮齿类动物模型

啮齿类动物因其体积小、繁殖快的特点,成为生理遥测技术优化的重点对象。VOLK 系统采用 8 层 PCB 天线设计(电感量 4.26 μH),在 0.6~2.2 A/m 场强下实现 15 cm 通信距离,植入体的重量仅 7 g,满足大鼠长期携带需求。该系统配备 Atmel ATMEGA165PV 低功耗微控制器和 128 kb 存储模块,支持 477 Hz 采样频率下的心电信号采集,电压分辨率达到 3.4 μV<sup>[3]</sup>。罗华<sup>[14]</sup>构建基于超低功耗蓝牙(blue tooth low energy, BLE)的物联网遥测系统,验证了在 12 h/12 h 光暗循环条件下,大鼠的体温和活动度节律与环境周期吻合,证明系统适用于时间生物学研究。

KING 等<sup>[15]</sup>采用植入式无线电遥测技术,发现其可连续 72 h 记录小鼠血糖波动,可作为糖尿病模型研究的新途径。潘水珍等<sup>[16]</sup>在大鼠腹腔植入遥测设备,研究发现黑夜平均心率(349.2 bpm)显著高于白昼(300 bpm),且植入手术后需 14 d 恢复,生理指标才趋于稳定。

### 2.2 犬类动物模型

比格犬的心血管系统与人类高度相似,是安全药理学研究的首选模型。刘艳菊等<sup>[9]</sup>建立的血管通路(vascular access port, VAP)模型通过颈动脉导管植入术,实现了直接测量清醒犬血压。术后采用 1000 IU/mL 肝素钠周期性封管,导管通畅率保持 90%以上超过 4 周,该模型在阿齐沙坦酯药效试验中,检测到舒张压下降幅度达 23.6 mmHg( $P<0.01$ ),验证了系统灵敏度。

### 2.3 小型猪模型

巴马小型猪因心脏解剖结构与人类相似度达 87%,成为心血管研究中的常用动物<sup>[17,18]</sup>。杨李厂等<sup>[5]</sup>应用无创遥测技术监测自由活动状态下巴马小型猪的心脏生物电数据,存在心电图左偏和 T 波倒置现象。张燕华等<sup>[4]</sup>通过股动脉导管植入术构建的模型,实现了收缩压(133~155 mmHg)和 QT 间期(291~374 ms)的精确监测,发现其心率(82±11) bpm 与人类差异仅 8%,显著优于食蟹猴(差异 32%)和比格犬(差异 45%)<sup>[19]</sup>。陈亮等<sup>[20]</sup>在巴马小型猪研究中采用 EMKA 遥测系统,发现收缩压昼夜差异达 6.76 mmHg,不适合作为心血管系统的研究系统。

### 2.4 非人灵长类模型

非人灵长类动物在遗传学、生理学和解剖学等各方面与人类高度相似<sup>[21]</sup>。TREFRY 等<sup>[22]</sup>在

表 1 植入式与非植入式遥测系统技术对比  
Table 1 Comparison of implantable and non-implantable telemetry system technologies

特征 Characteristics	植入式 Implantable	非植入式 Non-implantable
监测参数 Monitoring parameters	核心生理指标 Core physiological indicators	体表信号为主 Primarily surface signals
数据连续性 Data continuity	长期连续(受电池限制) Long-term continuous operation (battery-limited)	短期连续 Short-term continuous
动物影响 Animal influence	手术创伤风险 Surgical trauma risk	行为干扰可能 Behavioral interference
典型应用 Typical applications	心血管药效评价 Cardiovascular pharmacodynamic evaluation	行为-生理同步监测 Behavior-physiology synchronization monitoring

食蟹猴脑炎模型中部署的 DSIHD-S11 系统,整合脑电、心电、血压、体温和三维加速度传感器,首次揭示病毒攻击下神经-心血管耦合反应的时空特征。美国食品药品监督管理局最新指导原则要求新药必须提供清醒灵长类 QT 间期数据。针对狨猴等小型灵长类,李娜等<sup>[23]</sup>优化了腹主动脉导管植入技术,采用 HD-511 传感器实现了连续 3 周稳定监测。卢祺炯等<sup>[24]</sup>利用 DSI 遥测系统建立恒河猴模型,显示特非那定使 QTc 间期延长 40 ms,与临床不良反应高度一致。KAISER 等<sup>[25]</sup>利用马甲式外部遥测系统观察了猴的生活环境对生理信号的影响,但上述研究或者是在麻醉、束缚状态下进行,或者应用了遥测系统但观察指标数量少,范围窄。不同物种间基础生理参数的总结如表 2 所示。

### 3 生理指标遥测核心技术

#### 3.1 传感器技术

微机电系统 (micro-eelectro-mechanical system, MEMS) 技术推动传感器尺寸突破毫米级限制。曹开进等<sup>[2]</sup>采用 TA11PA-C40 传感器,可同步记录血压、心率等参数,通过 Dataquest 4.33 软件实现数据可视化处理。CAMPIGOTTO 等<sup>[26]</sup>研发的眼压监测隐形眼镜,在直径 14.5 mm 的曲面基底上集成微流控通道,通过角膜曲率变化引起的液体位移实现眼压无线监测。罗华<sup>[14]</sup>开发的物联网大鼠节律监测系统,将 3 轴加速度计和温度传感器集成于 4.5 g 头部装置,采样率达 100 Hz。KOZLER 等<sup>[27]</sup>使用的 DSI 系统,其 ICP 传感器采用压阻式原理,通过硅膜片形变检测压力变化,测量精度误差低于 0.1 mmHg。而平均动

表 2 不同物种间的基础生理参数

Table 2 Fundamental physiological parameters across different species

参数 Parameters	心率/bpm Heart rate	收缩压/mmHg Systolic blood pressure	QTc 间期/ms QTc interval
巴马猪 <sup>[4]</sup> Bama pig	82±11	143±11	293±15
比格犬 <sup>[9]</sup> Beagle dog	164±31	172±15	289±17
食蟹猴 <sup>[19]</sup> Cynomolgus monkey	158±28	115±9	337±17
人类 Humanity	72±12	120±10	420±25

脉压 (mean arterial pressure, MAP) 传感器则基于导管尖端微型应变片,实现动脉内直接测量,采样频率可达 1 kHz。此类传感器的生物相容性涂层 (如聚对二甲苯) 可减少组织排斥反应,延长植入寿命至数月<sup>[28]</sup>。CHUNG 等<sup>[29]</sup>发明的“生物邮票”厚度仅 0.3 mm,可贴附皮肤连续监测心电图 (electrocardiogram, ECG) 7 d,数据通过蓝牙传输至智能手机。这些创新案例共同表明, MEMS 技术正推动医疗监测领域向微型化、智能化、系统化全面迈进,为实现全域、全时、无感的精准健康监测奠定了坚实基础。

#### 3.2 无线能量传输

传统植入系统依赖电池,植入体内的植入子供电采用的是内置纽扣电池供电,平均寿命仅 3~6 个月,限制长期研究<sup>[30,31]</sup>。YOO 等<sup>[7]</sup>开发的微波无线充电模块,在 3 cm 组织穿透深度下实现 63% 的传输效率,使恒河猴脑深部电刺激装置实现永久植入。美国国防部 DARPA 项目开发的生物燃料电池,利用组织液中的葡萄糖氧化反应产生电能,在犬模型中实现持续 12 个月的稳定供电<sup>[32]</sup>。国内李娜等<sup>[23]</sup>在狨猴心电监测中采用可更换皮下感应线圈,电池续航延长至 18 个月。供电技术的突破与传感器微型化的发展相辅相成,共同解决了长期植入应用的“续航”与“体积”两大核心瓶颈,为构建永久、无感、自维持的下一代生物电子医学系统奠定了坚实基础。

#### 3.3 数据传输与分析算法

基于 BLE 和紫蜂技术的短距传输仍是主流方案,但存在多设备干扰问题。PEDERSEN 等<sup>[12]</sup>在儿童 ICP 监测中采用 MICS 频段 (402~405 MHz),传输距离扩展至 15 m,误码率低于  $10^{-6}$ 。DOMINGUES 等<sup>[30]</sup>开创性地将 850 nm 近红外光用于大鼠神经信号传输,在 10 mm 组织厚度下达到 5 Mbps 速率,为高密度脑电监测提供新方案。现代系统普遍采用自适应滤波与机器学习算法处理噪声。KOZLER 等<sup>[27]</sup>通过小波变换去除大鼠运动伪影,使 ICP 信号信噪比提升 40%。GKROUZOU DI 等<sup>[33]</sup>提及的心率变异性分析模块则采用 Pan-Tompkins 算法精准识别 R 波,误差率 < 0.5%。杜超等<sup>[34]</sup>开发的生理遥测系统在载人航天任务中表现卓越,其心电采样率 500 Hz、呼吸信号分辨率 12 bit 的设计,可捕获发射段 1 m

旋转半径下 95 r/min 超重环境下 0.1 mV 级信号变异,支持 1~3 名航天员的实时波形对比,满足任务指挥的决策需求。该团队提出基于最小二乘的基线拟合算法,在 30 s 窗口内实现呼吸过零点检测准确率 100%。相较于传统包络线法,计算复杂度从  $O(n^2)$  降至  $O(n)$ ,更适合航天实时系统。然而,上述传统算法虽能高效执行去噪、波形检测等特定任务,但在从海量、多模态数据中挖掘深层次的生理模式与预测性知识方面,其能力存在固有局限。相比之下,深度学习算法可挖掘海量遥测数据的潜在价值。例如,卷积神经网络已实现心律失常自动分类,准确率 97.8%<sup>[35]</sup>。长短期记忆网络则能预测血压波动趋势(平均绝对误差为 2.1 mmHg)<sup>[36]</sup>。欧盟 H2020 计划资助的 NEUROSKY 项目,整合脑电、肌电、眼动和代谢参数,构建“数字孪生”模型,全面评估患者状态,通过深度学习构建意识状态预测模型,准确率达 89.3%<sup>[37]</sup>。这些技术进步正从根本上改变医疗数据的获取与利用方式,推动医疗模式从孤立的、回顾性的诊断,向连续的、数据驱动的、可预测的“数字孪生”健康管理范式转变,开启个性化医疗的新篇章。

## 4 应用领域拓展

### 4.1 安全药理与研究标准化

清醒动物心血管评估是药物开发的关键环节。根据国际实验动物评估认证协会 2023 最新指南要求,植入手术需提供无菌操作证明,术后观察期不少于 72 h,设备校准需符合 ISO 13485 标准<sup>[38]</sup>。以下文献中操作均满足该要求。刘艳菊等<sup>[9]</sup>建立比格犬颈动脉 VAP 模型,证实阿齐沙坦酯可使收缩压降低( $28 \pm 3$ ) mmHg,验证系统灵敏度。心电遥测已成为心血管药效评估的金标准,实验动物遥测数据质量受手术操作、设备校准、环境干扰等多因素影响。GKROUZOU DI 等<sup>[33,39]</sup>指出,尽管 ECG 遥测植入手术报告质量参差不齐,仅 23% 文献详细描述无菌操作,38% 报告描述麻醉方式,23% 说明术后镇痛方案,但严格标准化操作是确保由此获得的数据具备高可信度的根本前提。潘水珍等<sup>[16]</sup>结合遥测与肺功能检测,发现多索茶碱 80 mg/kg 可显著升高大鼠收缩压(升高 3.25 mmHg)并缩短 QA 间期( $P < 0.01$ );

该研究建立了心血管-呼吸系统联合评价范式,为支气管扩张剂的安全性评价提供新标准。

### 4.2 神经科学研究

无线脑电遥测为癫痫和睡眠研究提供了新工具。姚元生等<sup>[13]</sup>通过胃肌电遥测发现多潘立酮使慢波幅度提升 82%,揭示了胃肠动力药的中枢作用途径。深部脑刺激研究中,KOZLER 等<sup>[27]</sup>采用双频遥测同步记录大鼠海马 theta 节律(4~12 Hz)与运动皮层高频振荡(80~120 Hz),发现空间记忆编码的跨频段耦合机制,并对自由活动大鼠连续 72 h ICP/MAP 监测,研究表明,水中毒诱导的脑细胞水肿可使 ICP 从基线 5.3 mmHg 上升至 10.8 mmHg ( $P < 0.01$ ),同时脑灌注压(cerebral perfusion pressure, CPP)通过脑血管自动调节机制维持在 70 mmHg 以上,验证了遥测数据揭示代偿性血压升高的可靠性。值得注意的是,该团队发现 36 h 内短暂 CPP < 70 mmHg(临界值)的频发事件,提示结合行为学同步记录的必要性。近红外光谱可同步监测脑氧饱和度,与 ICP 联合预测缺血阈值,微透析模块的加入,使神经递质(如谷氨酸)的动态检测成为可能。张彦瑾<sup>[40]</sup>通过脑电遥测发现笑气暴露后神经递质的时空变化规律,研究发现  $\theta$  波功率增加与乙酰胆碱浓度呈正相关( $r = 0.79$ ),而  $\alpha$  波(8~12 Hz)功率降低与 GABA 减少同步( $r = 0.83$ ),证实了神经递质-脑电振荡的耦合机制。

### 4.3 代谢监测与时间生物学研究

动态血糖监测突破传统点检测局限。KING 等<sup>[15]</sup>开发的植入式小鼠血糖仪,每 10 s 记录 1 次间质液葡萄糖浓度,准确反映餐后血糖波动曲线。诺和诺德公司在此基础上集成微透析模块,实现血糖-乳酸同步监测,为糖尿病模型提供多维度代谢评估。Mini Mitter 公司的植入式血糖传感器,通过葡萄糖氧化酶电流法实现每 5 min 动态监测,误差率 < 7%<sup>[41]</sup>。

节律监测需要长达数月的连续数据。李娜等<sup>[23]</sup>的研究数据显示,清醒猕猴昼夜心率差异达每分钟 72.73 次,白天每分钟( $256.85 \pm 25.76$ )次,夜晚每分钟( $148.12 \pm 15.94$ )次,MAP 昼夜波动 27.5 mmHg,证实了生物节律对心血管参数的显著调节作用。该模型已成功用于 QT 间期延长药物的安全性评价。罗华<sup>[14]</sup>设计的大鼠节律系

统,通过小波变换提取活动度周期成分,发现光周期改变可使体温节律相位偏移(6.2±0.8)h,该团队进一步建立基于马尔可夫模型的行为识别

算法,准确率达 93.7%,实现自主活动与摄食行为的自动分类。不同应用领域中使用的技术方法的核心优势与关键缺陷如表 3 所示。

表 3 不同应用领域中使用的技术方法对比

Table 3 Comparison of technical methods used in different application areas

动物模型 Animal models	体型特点 Physical characteristics	植入式技术 Implantable technology		非植入式技术 Non-implantable technology		典型应用场景与技术组合 Typical application scenarios and technology combinations
		适用参数 Applicable parameters	优势与挑战 Advantages and challenges	适用参数 Applicable parameters	优势与挑战 Advantages and challenges	
小鼠/大鼠 Mouse/rat	小型啮齿类 Small rodents	动脉血压、心电图、脑电、体温、深层生化指标 Arterial blood pressure, electrocardiogram, electroencephalogram, body temperature, deep biochemical indicators	优势:数据精准、金标准 挑战:手术创伤大、设备尺寸与重量限制严格、电池寿命有限、成本高 Advantages: precise data, gold standard Challenges: significant surgical trauma, strict constraints on device size and weight, limited battery life, high cost	活动度、体表体温、心电图 Mobility, skin temperature, electrocardiogram	优势:无创、应激小、适合长期行为学观察 挑战:心血管等核心参数监测精度不足、信号易受运动干扰 Advantages: non-invasive, minimal stress, suitable for long-term behavioral observation Challenges: insufficient accuracy in monitoring core parameters such as cardiovascular function; signals are susceptible to interference from movement	神经科学/心血管研究:必须采用植入式 代谢/行为学研究:可组合使用(植入式测核心指标+非植入式监测活动度) Neuroscience/cardiovascular research: implantable devices must be used Metabolic/behavioral research: a combination approach is permissible (implantable devices for core metric measurement + non-implantable devices for activity monitoring)
兔/豚鼠 Rabbit/guinea pig	中型 Medium-sized	动脉血压、心电图、脑电、体温 Arterial blood pressure, electrocardiogram, electroencephalogram, body temperature	优势:数据质量高 挑战:仍需手术,但对体型限制减小 Advantages: high data quality Challenges: surgery is still required, but body shape restrictions are reduced	心电图、呼吸、体温 Electrocardiogram, respiration, body temperature	优势:可开发专用马甲或背带,适用性比啮齿类提升 挑战:依从性问题(动物会啃咬设备),毛发影响电极接触 Advantages: custom vests or harnesses can be developed, offering greater adaptability than rodent models Challenges: compliance issues (animals may chew on equipment), and fur may interfere with electrode contact	安全药理:优先选择植入式以获得可靠血压数据 短期药效筛选:可尝试优化后的非植入式心电图监测 Safety pharmacology: prioritize implantable devices to obtain reliable blood pressure data Short-term efficacy screening: consider optimized non-implantable electrocardiogram monitoring
比格犬 Beagle dog	大型 Large-sized	动脉血压血管通路,术后护理复杂,(金标准)、动物福利要求高 心电图、体温 Arterial blood pressure (gold standard method for regulatory toxicology studies), electrocardiogram, body temperature	优势:技术成熟,是法规毒理研究的标准方法 挑战:需要外科手术建立血管通路,术后护理复杂,动物福利要求高 Advantages: technologically mature, serving as the standard method for regulatory toxicology studies Challenges: requires surgical establishment of vascular access, involves complex postoperative care, and demands high standards for animals welfare	心电图、呼吸、活动度、无创血压(尾套法) Electrocardiogram, respiration, range of motion, non-invasive blood pressure (cuff method)	优势:无手术创伤,动物恢复快,福利更好 挑战:无创血压数据离散度大,准确性不如植入式;佩戴马甲可能产生应激或镇定效应 Advantages: no-surgical trauma, faster animals recovery, and improved welfare Challenges: non-invasive blood pressure data exhibits high variability and lower accuracy compared to implanted devices; wearing vests may induce stress or sedation effects	法规要求的研究:必须使用植入式 早期筛选/长期行为观察:可优先采用非植入式,或作为植入式数据的补充 Regulatory-mandated studies: implantable devices must be used Early screening/long-term behavioral observation: non-implantable devices may be prioritized or used to supplement implantable data

续表3

动物模型 Animal models	体型特点 Physical characteristics	植入式技术 Implantable technology		非植入式技术 Non-implantable technology		典型应用场景与技术组合 Typical application scenarios and technology combinations
		适用参数 Applicable parameters	优势与挑战 Advantages and challenges	适用参数 Applicable parameters	优势与挑战 Advantages and challenges	
非人灵长类 Non-human primates	大型、高智能 Large-sized, highly intelligent	动脉血压、心电图、脑深部信号 Arterial blood pressure, electrocardiogram, deep brain signals	优势: 获取高质量生理数据的唯一方式 挑战: 手术难度和成本最高, 伦理审查严格, 设备需极度坚固耐用以防动物破坏 Advantages: the only method for obtaining high-quality physiological data Challenges: highest surgical difficulty and cost, stringent ethical review requirements, and equipment must be extremely robust and durable to withstand animals tampering	心电图、活动度、体温(肛温探头) Electrocardiogram, mobility, body temperature (rectal probe)	优势: 马甲式系统应用广泛, 减少长期植入手术需求 挑战: 动物易适应并玩弄设备, 导致数据丢失或损坏; 体表信号稳定性挑战大 Advantages: vest-style systems are widely applicable and reduce the need for long-term implant surgeries Challenges: animals readily adapt to and manipulate the devices, leading to data loss or corruption; significant challenges exist in maintaining stable surface signals	神经科学: 必须采用植入式脑部设备 心血管安全药理: 倾向于植入式。 行为药理: 可采用马甲式非植入系统进行初步筛查 Neuroscience: implantable brain devices must be used Cardiovascular safety pharmacology: prefers implantable devices Behavioral pharmacology: non-implantable vest-type systems may be used for preliminary screening
	小型猪 Miniature pig	大型 Large-sized	动脉血压、心电图 Arterial blood pressure, electrocardiogram	优势: 心血管结构与人类相似, 植入数据价值高 挑战: 皮肤厚, 皮下脂肪多, 手术切口易感染, 术后护理关键 Advantages: cardiovascular structure is similar to humans, making implanted data highly valuable Challenges: thick skin and abundant subcutaneous fat increase susceptibility to surgical site infections, making postoperative care critical	心电图 Electrocardiogram	优势: 已有成功应用案例 挑战: 皮肤导电性差, 体毛茂密, 电极接触是主要技术难点 Advantages: proven successful application cases Challenges: poor skin conductivity and dense body hair pose significant technical hurdles for electrode contact

## 5 总结与展望

生理遥测技术经过多年发展, 已形成从单参数检测到多模态融合、从短期记录到长期监测的技术体系。植入式设备实现心电、体温、血压同步采集, 体积缩小至毫米级, 同时柔性电子技术已初步解决穿戴设备与生物组织的机械失配问题, 在灵长类动物运动中维持了心电信号稳定性, 并为无创多参数监测提供了可能。无创技术突破显著, 光学无线通信利用近红外光穿透组织实现

10 mm 深度数据传输。无线能量传输和射频识别技术延长植入设备寿命, 蓝牙/云平台实现远程监护, 云数据库支持多中心数据共享。智能算法的赋能升级与闭环应用, 当前算法已应用于信号降噪、特征识别及疾病预警。昼夜节律研究依赖连续监测, 余弦法模型精准解析心率变异性; 自学习阈值算法提升 R 波检出率至 99.9%。

当前生理遥测技术的深入应用仍面临多重挑战。在器件层面, 植入式设备易引发纤维包裹, 且约 70% 的传感器在植入 3 个月后出现显著基线漂

移,影响长期稳定性;在系统层面,设备在不同模型(如从啮齿类到大型动物)间的移植适配性差,常需复杂的定制化设计;此外,运动伪影等干扰也持续制约着如呼吸率等参数的计算精度。但是柔性电子、生物可降解材料和人工智能等前沿领域的进展,正为破解这些瓶颈提供全新路径。展望未来,生理遥测技术将呈现以下发展趋势:

(1) 柔性电子技术将会致力于在材料、结构和集成度上实现突破。一方面,需开发具有更高生物相容性与自愈能力的可降解材料,以将设备的连续贴附周期延长数周甚至数月,并最大程度减轻长期使用引发的炎症反应;另一方面,通过仿生微结构设计,使设备能完美贴合关节、胸腔等动态曲面,从根本上消除运动伪影对心电、呼吸等关键信号的干扰。最终目标是在单一柔性基底上,实现电生理、光学、力学等多种传感器的异构集成,构建“电子皮肤”式的多模态感知平台,从而彻底替代现有的马甲、背心等束缚式设备,实现无感、精准、全面的生理监测。

(2) 在智能算法层面,未来的关键发展路径在于:需着力开发高效的时空对齐算法,以整合高维遥测、行为视频与环境参数,从而构建能够精准映射生理状态的“数字孪生体”,实现跨模态数据的深度关联与动态预测。同时,有待将轻量化 AI 模型部署于资源受限的植入式设备端,实现本地化实时智能决策,从而大幅降低无线传输能耗,并提升闭环控制系统(如神经调控)的响应速度。此外,应积极探索利用生成对抗网络等前沿技术合成稀缺的病理生理数据,以突破动物实验的样本量瓶颈,为训练更鲁棒、更具泛化能力的诊断模型提供数据基础。

(3) 在 3D 打印与系统架构层面,未来将致力于实现植入设备的个性化定制与智能化集成。首先,需基于个体的医学影像数据,使用生物相容性材料打印出与解剖形态完美匹配的支架,并原位集成传感与刺激单元;其次,需优化无线能量传输系统,显著提升其功率密度与长期可靠性,为永久植入设备供能;最终,将生理信号遥测单元与微刺激器或药物泵深度融合,构建具有感知-决策-执行能力的自反馈闭环系统,为实现自适应的神经调控或精准药物释放奠定基础。

#### 参考文献:

- [ 1 ] AXELSSON M, DANG Q, PITSILLIDES K, et al. A novel, fully implantable, multichannel biotelemetry system for measurement of blood flow, pressure, ECG, and temperature [J]. *J Appl Physiol*, 2007, 102(3): 1220-1228.
- [ 2 ] 曹开进, 李自强, 贺英菊, 等. 植入式遥测技术偶测血压方法探究 [J]. *中国病理生理杂志*, 2014, 30(11): 2108-2112.  
CAO K J, LI Z Q, HE Y J, et al. Measurement of casual blood pressure by implantable telemetry [J]. *Chin J Pathophysiol*, 2014, 30(11): 2108-2112.
- [ 3 ] VOLK T, GORBEBY S, BHATTACHARYYA M, et al. RFID technology for continuous monitoring of physiological signals in small animals [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2015, 62(2): 618-626.
- [ 4 ] 张燕华, 刘天斌, 曲庆美, 等. 巴马小型猪植入式遥测动物模型的建立及应用 [J]. *药物评价研究*, 2022, 45(10): 2049-2053.  
ZHANG Y H, LIU T B, QU Q M, et al. Establishment and application on implantable telemetry animal model of Bama miniature pigs [J]. *Drug Eval Res*, 2022, 45(10): 2049-2053.
- [ 5 ] 杨李厂, 周文兵, 丁隽, 等. 巴马小型猪心脏生物电特性遥测 [J]. *实验动物与比较医学*, 2017, 37(5): 410-413.  
YANG L C, ZHOU W B, DING J, et al. Investigation on electrocardiogram of Bama minipigs by telemetry [J]. *Lab Anim Comp Med*, 2017, 37(5): 410-413.
- [ 6 ] 徐敏. 食蟹猴微创马甲式遥测系统的建立 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.  
XU M. Construction of jacketed external telemetry system on cynomolgus monkey [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [ 7 ] YOO S, LEE J, JOO H, et al. Wireless power transfer and telemetry for implantable bioelectronics [J]. *Adv Healthc Mater*, 2021, 10(17): e2100614.
- [ 8 ] KIM J, SALVATORE G A, ARAKI H, et al. Battery-free, stretchable optoelectronic systems for wireless optical characterization of the skin [J]. *Sci Adv*, 2016, 2(8): e1600418.
- [ 9 ] 刘艳菊, 葛鹏, 徐德璐, 等. 比格犬生理遥测系统的建立 [J]. *中国比较医学杂志*, 2019, 29(10): 40-46.  
LIU Y J, GE P, XU D L, et al. Establishment of a physiological telemetry system in beagle dogs [J]. *Chin J Comp Med*, 2019, 29(10): 40-46.
- [ 10 ] FISH R E, FOSTER M L, GRUEN M E, et al. Effect of wearing a telemetry jacket on behavioral and physiologic parameters of dogs in the open-field test [J]. *J Am Assoc*

- Lab Anim Sci, 2017, 56(4): 382-389.
- [11] ANTES S, TSCHAN C A, OERTEL J M. An operative technique combining endoscopic third ventriculostomy and long-term ICP monitoring [J]. Childs Nerv Syst, 2014, 30(2): 331-335.
- [12] PEDERSEN S H, NORAGER N H, LILJA-CYRON A, et al. Telemetric intracranial pressure monitoring in children [J]. Childs Nerv Syst, 2020, 36(1): 49-58.
- [13] 姚元生, 郑丽飞, 朱进霞. 采用植入式生理信号无线遥测系统记录清醒大鼠自由活动状态下胃的肌电信号 [J]. 首都医科大学学报, 2017, 38(2): 227-231.  
YAO Y S, ZHENG L F, ZHU J X. Study on the gastric myoelectric signal recording by implantable radiotelemetry in conscious rats with free movement [J]. J Cap Med Univ, 2017, 38(2): 227-231.
- [14] 罗华. 基于物联网的大鼠节律信号遥测系统及其近日节律算法模型的研究 [D]. 四川: 四川大学, 2021.  
LUO H. An IoT-based telemetry system for rat rhythm signals and study on its circadian algorithm mode [D]. Sichuan: Sichuan University, 2021.
- [15] KING A J F, KENNARD M R, NANDI M. Continuous glucose monitoring in conscious unrestrained mice [J]. Methods Mol Biol, 2020, 2128: 225-239.
- [16] 潘水珍, 张利棕, 潘永明, 等. 生理遥测和全体积描记法联用观测清醒大鼠昼夜节律变化及其在多索茶碱安全药理学中的应用 [J]. 中国实验动物学报, 2017, 25(4): 438-443, 449.  
PAN S Z, ZHANG L Z, PAN Y M, et al. Application of implantable telemetry and whole-body plethysmography to observe the changes of circadian rhythm in conscious rats and its application in pharmacological safety evaluation of doxofylline [J]. Acta Lab Anim Sci Sin, 2017, 25(4): 438-443, 449.
- [17] 邹迪莎, 于健. 巴马小型猪动物模型在医学领域的研究进展 [J]. 中国畜牧兽医, 2017, 44(4): 1128-1134.  
ZOU D S, YU J. Research progress on animal models of Bama miniature pigs in the field of medicine [J]. China Anim Husb Vet Med, 2017, 44(4): 1128-1134.
- [18] 杨李厂. 上海巴马小型猪血清生化 and 心脏生物电特性研究 [J]. 上海农业科技, 2015(5): 72-73.  
YANG L C. Study on serum biochemical and cardiac bioelectricity characteristics of Shanghai Bama miniature pig [J]. Shanghai Agric Sci Technol, 2015(5): 72-73.
- [19] 操佳佳. 清醒巴马小型猪与食蟹猴循环系统功能特点的比较 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.  
CAO J J. The comparison of characteristics of circulatory system functions between conscious Bama minipigs and cynomolgus monkeys [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [20] 陈亮, 潘永明, 朱科燕, 等. 基于遥测技术对巴马小型猪部分生理指标的观测 [J]. 中国比较医学杂志, 2014, 24(7): 30-36.  
CHEN L, PAN Y M, ZHU K Y, et al. Measurement of physiological parameters in Bama minipigs by telemetry technology [J]. Chin J Comp Med, 2014, 24(7): 30-36.
- [21] 徐敏, 朱建国. 氯胺酮麻醉对食蟹猴血压的影响研究 [J]. 中国动物保健, 2015, 17(1): 71-73.  
XU M, ZHU J G. Effects of blood pressure in Cynomolgus monkeys with ketamine anesthesia [J]. China Anim Health, 2015, 17(1): 71-73.
- [22] TREFRY J C, ROSSI F D, ACCARDI M V, et al. The utilization of advance telemetry to investigate critical physiological parameters including electroencephalography in cynomolgus macaques following aerosol challenge with eastern equine encephalitis virus [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2021, 15(6): e0009424.
- [23] 李娜, 王文誉, 何巍, 等. 生物遥测技术监测清醒状态下普通棉耳猕猴的心电生理特性 [J]. 实验动物与比较医学, 2015, 35(6): 490-494, 509.  
LI N, WANG W Y, HE W, et al. Monitoring on cardiovascular and physiology characteristics of conscious common cotton-eared marmoset by telemetry [J]. Lab Anim Comp Med, 2015, 35(6): 490-494, 509.
- [24] 卢祺炯, 陈敏华, 徐聪, 等. 应用植入遥测技术对恒河猴部分生理指标的观测 [J]. 中国比较医学杂志, 2018, 28(1): 100-107.  
LU Q J, CHEN M H, XU C, et al. Observation of several physiological indexes of rhesus monkeys by implantable telemetry technology [J]. Chin J Comp Med, 2018, 28(1): 100-107.
- [25] KAISER R, TICHENOR S, REGALIA D, et al. Evaluation of jacketed external telemetry in multiple social housing paradigms for cynomolgus monkey [J]. J Pharmacol Toxicol Meth, 2015, 75: 180.
- [26] CAMPIGOTTO A, LEAHY S, ZHAO G, et al. Non-invasive intraocular pressure monitoring with contact lens [J]. Br J Ophthalmol, 2020, 104(9): 1324-1328.
- [27] KOZLER P, MARESOVA D, POKORNY J. Intracranial pressure and mean arterial pressure monitoring in freely moving rats via telemetry; pilot study [J]. Neuro Endocrinol Lett, 2019, 40(7/8): 319-324.
- [28] HIPLOYLEE C, COLBOURNE F. Intracranial pressure measured in freely moving rats for days after intracerebral hemorrhage [J]. Exp Neurol, 2014, 255: 49-55.
- [29] CHUNG H U, KIM B H, LEE J Y, et al. Binodal, wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care [J]. Science, 2019, 363(6430): eaau0780.

- [30] DOMINGUES A R, PEREIRA D, SILVA M F, et al. An optical wireless communication system for physiological data transmission in small animals [J]. *Sensors*, 2025, 25(1): 138.
- [31] 罗章源. 低功耗植入式无线遥测刺激系统设计与实现 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2015.  
LUO Z Y. Design and implementation of a low-power wireless telemetry implantable stimulation system [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2015.
- [32] MARKERT M, TRAUTMANN T, KRAUSE F, et al. A new telemetry-based system for assessing cardiovascular function in group-housed large animals. Taking the 3Rs to a new level with the evaluation of remote measurement via cloud data transmission [J]. *J Pharmacol Toxicol Methods*, 2018, 93: 90–97.
- [33] GKROUZOU DI A, TSINGOTJIDOU A, JIRKOF P. A systematic review on reporting of refinement measures in mouse ECG telemetry implantation surgery [J]. *Lab Anim*, 2023, 57(1): 9–25.
- [34] 杜超, 周淦, 刘贵聪, 等. 航天员生理遥测数据处理算法的研究与应用 [J]. *电子技术应用*, 2023, 49(1): 102–106.  
DU C, ZHOU G, LIU G C, et al. Research and application of astronauts' physiological telemetry data processing algorithm [J]. *Appl Electron Tech*, 2023, 49(1): 102–106.
- [35] HANNUN A Y, RAJPURKAR P, HAGHPANAHI M, et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network [J]. *Nat Med*, 2019, 25(1): 65–69.
- [36] UKAWA N, SAITOH T, NIIZEKI K. Continuous systolic blood pressure estimation using pulse arrival time and pulsatile systolic area of pulse wave [J]. *Trans Jpn Soc Med Biol Eng*, 2017, 55: 470–470.
- [37] ALEXANDRA G, ANASTASIA T, PAULIN J. A systematic review on reporting of refinement measures in mouse ECG telemetry implantation surgery [J]. *Lab Anim*, 2022, 244: 113645.
- [38] ISO 13485: 2016 Medical devices—Quality management systems—Requirements for regulatory purposes [S].
- [39] GKROUZOU DI A, TSINGOTJIDOU A, JIRKOF P. A systematic review on the reporting quality in mouse telemetry implantation surgery using electrocardiogram recording devices [J]. *Physiol Behav*, 2022, 244: 113645.
- [40] 张彦瑾. 笑气吸入暴露致认知障碍研究 [D]. 北京: 军事科学院, 2021.  
ZHAN Y J. Study on cognitive impairment caused by nitrous oxide [D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2021.
- [41] PFÜTZNER A, TENCER B, STAMM B, et al. Miniaturization of an osmotic pressure-based glucose sensor for continuous intraperitoneal and subcutaneous glucose monitoring by means of nanotechnology [J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4541.

〔收稿日期〕2025-07-15