

热疗机器人在网络病治疗中的应用

殷雪艳^{1,2)}, 石飞飞¹⁾, 王进强¹⁾, 宁焕生¹⁾✉

1) 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083 2) 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830023

✉ 通信作者, E-mail: ninghuansheng@ustb.edu.cn

摘要 网络病指的是因过度使用互联网或电子设备, 导致身体和心理上的一系列问题, 例如眼睛疲劳、焦虑症等。随着互联网的普及和移动设备的广泛使用, 长时间使用电脑屏幕和手机导致的网络病已成为影响人们健康的一大问题。热疗法作为治疗网络病的重要方法之一, 精准控制热疗温度是关键, 但受医师经验差异的限制, 其推广受到制约。热疗机器人基于深度学习技术精准识别热疗区域, 通过温控系统实时调节温度, 具有操作稳定、精准和高效等优点, 能够提高热疗法的安全率, 并能够避免一些人为因素带来的风险。本文围绕国内外热疗机器人在网络病治疗中的应用现状进行分析, 在此基础上, 阐述了热疗技术、目标区域导航与定位技术、机器人结构设计和安全保护技术等四方面关键技术, 并分析目前存在的不足, 系统展望了该技术在网络病治疗中的发展趋势。

关键词 网络病; 热疗; 机器人; 导航与定位; 安全保护

分类号 TG242.3

Application of hyperthermia robots in Cyber-syndrome treatment

YIN Xue-yan^{1,2)}, SHI Fei-fei¹⁾, WANG Jin-qiang¹⁾, NING Huan-sheng¹⁾✉

1) School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of Xinjiang Coal Resources Green Mining, Ministry of Education, Urumqi 830023, China

✉ Corresponding author, E-mail: ninghuansheng@ustb.edu.cn

ABSTRACT Cyber-syndrome refers to a series of physical and psychological problems, such as eyestrain and anxiety, caused by excessive use of the Internet or electronic devices. With the popularization of the Internet and the widespread use of mobile devices, Cyber-syndrome caused by prolonged use of computer screens and cell phones has become a major problem affecting people's health. In response to this problem, people have studied a variety of treatment methods, including Chinese medicine and Western medicine, in which Chinese medicine treatment focuses on the overall conditioning, through the regulation of the internal environment of the human body to achieve the therapeutic purpose, and the therapeutic effect is relatively more obvious, and the heat therapy is a traditional Chinese medicine treatment method. As one of the important methods for treating Cyber-syndrome, accurate positioning and control of heat therapy temperature is the key. Traditional heat therapy relies on manual positioning of the heat therapy area and control of the heating temperature to realize heat therapy on specific parts of the human body, and the promotion of which is greatly restricted by the difference in doctors' experience. The thermotherapy robot accurately recognizes the thermotherapy area based on deep learning technology and adjusts the temperature in real time through the temperature control system, which has the advantages of stable operation, precision and high efficiency, and can improve the safety rate of thermotherapy and avoid some risks caused by human factors. This paper analyzes the current status of the application of thermotherapy robots in the treatment of Cyber-syndrome at home and abroad,

收稿日期:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61872038)

地址: 北京市海淀区学院路 30 号

邮政编码: 100083

电话: 010-62333436

E-mail: xuebaozr@ustb.edu.cn

http://cje.ustb.edu.cn

summarizes the structure and working principle of six kinds of thermotherapy robots, and carries out a comparative analysis, and the results show that most of the existing thermotherapy robots have been realized to be used in full automation, and the traditional thermotherapy technology is equipped with artificial intelligence technologies such as big data and visualization algorithms, so that they are able to provide a more accurate and personalized treatment service, and improve the uncomfortable symptoms of Cyber-syndrome effectively. This paper then describes the key technologies from four aspects, including thermal therapy technology, target area navigation and positioning technology, robot structure design and safety protection technology, and analyzes the shortcomings. At present, the research of thermotherapy robot is still in the beginning stage, and the application in the treatment of Cyber-syndrome has not been studied in depth, and the flexibility of the robotic arm, the accuracy of the treatment for Cyber-syndrome and the treatment of doctor-patient relationship need to be further researched and explored. Finally, this paper systematically looks forward to the development trend of thermotherapy robots in Cyber-syndrome treatment, aiming to provide reference for manufacturers and researchers. As one of the important development directions of digital healthcare, the field of thermal therapy robot should be studied in depth from multiple angles in the future, such as integrating human multimodal vital signs information, integrating 5G technology, integrating human-computer interaction technology, and perfecting the evaluation system, in order to improve the flexibility, precision and intelligence of thermal therapy robots.

KEY WORDS Cyber-syndrome; thermal therapy; robot; navigation and localization; safety protection

随着信息技术的飞速发展，网络病（Cyber-syndrome）^[1-2]作为一种现代社会特有的健康问题，日益受到人们的关注。网络病通常指因长时间使用电子设备，如电脑、智能手机等，导致的一系列健康问题，例如视力下降、颈椎疾病、睡眠质量降低以及心理健康问题等^[3-4]。随着人们生活、工作和学习方式的改变，越来越多的人陷入了网络病的困扰之中。特别是在疫情期间，远程办公、在线学习等方式的普及更加加剧了网络病的发展趋势。面对这一现代健康问题，人们开始积极探索各种有效的治疗方法，包括西医和中医在内的多种治疗手段^[5]。西医采用药物治疗来缓解眼部疲劳和睡眠障碍，采用物理疗法如理疗和康复训练来减轻肌肉和关节的不适。但相对来说，西医治疗方法较为分散，中医从整体出发，通过调整人体内部环境，力求达到身心平衡。常见的中医治疗方法包括按摩、热疗法、针灸和拔罐等。这些方法能够促进血液循环，调节气血，缓解肌肉紧张，提高机体自愈能力^[6]。特别是中医按摩和热疗法，不仅能够针对网络病引起的肌肉酸痛和颈椎不适提供直接的疼痛缓解，还能改善身体的整体功能，增强免疫力。

热疗作为一种古老的中医治疗方法，历史悠久，其在缓解肌肉疼痛、促进血液循环以及改善局部组织营养状态方面具有显著效果^[7]，能有效缓解网络病的不适感。不仅适用于长期加班熬夜等职场亚健康者，也适用于身体受寒者，涵盖了多个年龄段人群。然而，传统的热疗方法（如热敷、热水浴等）往往难以精确控制热量和治疗时间，且无法将热量精确地集中在需要治疗的部位，导致效果并不明显，甚至可能对正常的组织造成伤害。此外，该过程主要依赖具备专业知识的热疗医师，对医疗资源提出了较高要求。

近年来，机器人技术和人工智能的快速发展为医疗领域带来了革命性的变化。机器人的精确操作能力和人工智能的数据分析能力^{[8]-[9]}，使得医疗过程更加高效、个性化，同时也为远程医疗和精准医疗提供了新的途径。热疗机器人基于典型的现代热疗技术，结合热能传递的物理原理和 AI 技术，通过精确控制热能的释放，以达到治疗效果，同时避免了传统热疗可能带来的烫伤风险。

热疗机器人技术是机器人领域和医学领域结合的前沿研究方向，但目前在网络病治疗方面仍处于起步阶段，仅有少部分产品实现了临床运用。因此，本文首先概述了热疗机器人的基本内容，其次对其在网络病治疗中的应用现状、关键技术，以及尚存在的问题进行了分析，最后对其在网络病治疗中的未来发展做一个展望，旨在为制造商和研究人员提供参考。

1 热疗机器人概述

医疗机器人是指各种应用于外科手术、医学培训、康复治疗等的机器人设备。根据服务对象的不同可分为医疗外科机器人、康复机器人和助老助残机器人等^{[10]-[11]}。热疗机器人就是康复机器人的分支之一，结合了现代机器人技术和热疗原理，其一般由机械臂、视觉系统、温控系统、力控系统、人工智能算法等组成^{[12]-[14]}，旨在通过精准的温度控制和操作，适应不同患者的治疗需求，图1展示了市面上常见的两款热疗机器人结构。热疗机器人的热疗过程一般包括三个阶段：定位、规划、执行。定位阶段主要是利用目标识别与定位技术对用户的治疗区域进行定位，明确热疗区域；规划阶段主要是利用智能算法将机器人、热疗位置、病人病症三者联系起来，确定相应的热疗方法和温度策略；执行阶段则是利用机械臂和温度传感器实施热疗方案，进行治疗。

相比较其他传统的治疗网络病的方式，例如古法艾灸、热敏灸治疗等^{[15]-[17]}，热疗机器人有着独特的优势。首先，热疗机器人具有较高的精确度和稳定性，能够根据患者的病情和需求进行个性化治疗；其次，热疗机器人具有无创、安全、舒适的特点，能够有效减轻患者的痛苦和不适感；此外，热疗机器人还具有较强的智能化功能，能够实现数据统计和分析，为医生提供更加便捷的诊疗服务。



图1 热疗机器人示例图像。(a) 智林热疗机器人(来源网络);(b) 千域热疗机器人(来源网络)

Fig.1 Example image of hyperthermia robots: (a) cilin hyperthermia robot (Source network); (b) chainure hyperthermia robot (Source network)

2 热疗机器人在网络病治疗中的应用

网络病，也称为计算机相关疾病，是因长时间使用计算机和其他电子设备导致的一系列健康问题^[18]。网络病是一个统称，具体包括的疾病很多，其在不同空间中所表现出的疾病类型也不同。在物理空间中表现为身体疾病，如眼睛疲劳、头晕、颈部疼痛等生理症状；在社交空间中表现为社交障碍疾病，如社交恐惧症、社会敌意等症状；在思维空间中表现为心理疾病，如孤独、抑郁和焦虑等心理症状^{[21]-[19]}。这里仅对物理空间中的计算机视觉综合征、鼠标手、颈部疲劳（电脑颈）和腰椎劳损四种典型网络病进行介绍。计算机视觉综合征（Computer vision syndrome, CVS），也称为数字眼疲劳，是指由于长期使用数字电子设备而导致的一系列视觉和非视觉体验，包括视力模糊、眼睛疲劳、眼睛干燥等眼部症状以及头痛、颈部疼痛等其他症状^{[20]-[21]}。鼠标手^[22]是指长时间或不当使用鼠标，手部肌肉长期处于疲劳状态，导致手、腕、肘等关节产生的一系列变化，典型症状包括手指麻木、疼痛无力等^{[22]-[23]}。颈部疲劳（电脑颈）和腰椎劳损是由于对着电脑，颈部和腰椎长时间不活动，导致颈椎、腰椎原本的曲度发生改变，从而出现颈部疲劳和腰椎疼痛，易发展为颈腰椎病^[24]。

网络病是由于用户长时间或过度地与网络空间互动而导致的一系列生理和心理问题，其病理机制多与长时间保持不良姿势、过度使用特定肌肉群以及电子设备的辐射等因素有关。表1列举了网

络病范畴内的计算机综合征、鼠标手和颈椎病与普通的眼疾、腱鞘炎及颈椎病的具体成因，并基于现有研究列出了两者在症状表现、治疗方法等方面的侧重点。

表 1 不同范畴内的疾病对比

Table 1 Comparison of diseases in different categories

Category	Disease Name	Causes and Symptoms	Treatment Methods	Reference
Within the scope of Cyber-syndrome	Computer Vision Syndrome	Caused by prolonged computer use, screen brightness, prolonged eye focus, etc., primarily manifested as eye fatigue and dryness	Eyelid gland massage combined with hot compress therapy	[25]
	Mouse Hand (Carpal Tunnel Syndrome)	Caused by prolonged use of mouse and keyboard, poor posture, etc., primarily manifested as wrist numbness and pain	Microwave therapy for the wrist joint	[26]
	Cervical and Lumbar Spine Disease	Caused by poor sitting posture and the "head-down" phenomenon due to prolonged internet use, primarily manifested as neck and lower back soreness and stiffness	Acupressure treatment of acupoints such as acupoints and acupoints, combined with heat-sensitive moxibustion therapy	[27],[28]
Within the scope of common diseases	Eye Diseases	A broad category influenced by environmental factors, gender, age, congenital factors, etc., not limited to specific triggers, primarily manifested as glaucoma, strabismus, etc	Acupuncture, proper rest relief, surgical treatment	[25],[29]
	Tendonitis	Caused by excessive use of a specific tendon during physical labor, primarily manifested as hand stiffness, pain, and limited movement	Acupotomy, local closure, massage relief	[30]
	Cervical and Lumbar Spine Disease	Age-related degeneration, trauma, physical labor, etc., primarily manifested as radiating pain with numbness	Physical therapy, drug therapy, surgical intervention	[31]

传统热疗设备如温灸盒、温灸筒之类的器具不能控制温度，且热疗区域的温度分布也不均匀，治疗的效果难以量化。萧文科等^[32]研制了可穿戴艾叶暖宫贴设备，采用石墨烯加热膜提供热量，能够实现温度控制和温度检测。张雪涛等^[33]设计了自动除灰热敏灸装置，可实现精准控温。徐成淼^[34]设计了一款灸疗推拿一体化中医理疗仪软硬件平台，通过 COMSOL 软件对热疗过程中的皮肤温度进行仿真分析，确定了合适的施灸温度和高度，使热疗效果最优化。除温度问题外，人工热疗对医师的技术要求较高，而培养一名合格的医师需要耗费大量的时间，从而导致了热疗方法难以广泛应用。南昌中医药科创城^[35]展示了一款热敏灸机器人，通过和医师人机交互的方式，使得医师能从重复的工作中解放出来，为更多的患者服务。李树佳^[36]研发了一款中医热敏灸机器人，通过机械臂代替人力模拟热疗过程，减少对医师的依赖。钟义^[37]提出了一套智能艾灸机器人系统，以自动化艾灸替代人工，且能够复现艾灸的传统手法，并调控热疗温度。这些结合了现代机器人技术的新型热疗仪在一定程度上提高了热疗的使用疗效，且更加安全、便捷，是未来热疗设备发展的方向。

按摩也是理疗的一种，其可以快速缓解身体的各种不适症状，如腰痛、颈椎疲劳等，按摩后可以促进血液循环，放松肌肉^{[38]-[39]}。在传统热疗方法的基础上，结合按摩手法可以有效缓解上述所提到的四种典型网络病症状。针对计算机视觉综合征，通过按摩睑板腺联合热敷疗法可以有效缓解眼部疲劳；针对鼠标手症状，高京荣^[40]对劳宫穴施力，辅以艾灸热疗法来治疗“鼠标手”；电脑颈的主要疼痛点在肩部和颈部连接的肌肉纤维，一般取冈上肌阿是穴及颈肩部周围的肩井、肩贞穴位进行治疗^[27]。电脑腰背综合征导致的腰椎劳损多与腰背肌纤维损伤有关，中医上选取大椎、至阳、膈穴等穴位来治疗，配合热敏灸法修复损伤，疗效较为明显^[28]。热疗机器人通过热力效果和特定的按摩手法对相关穴位施力，进而达到放松肌肉群、缓解疲劳的目的，能有效改善网络疾病。

以下是国内外一些典型的热疗机器人在网络病治疗中的应用介绍。

2.1 国内典型热疗机器人介绍

2.1.1 灵手艾灸理疗机器人

灵手艾灸理疗机器人由深圳灵手科技公司开发，融合协作机械臂、艾灸理疗头、视觉系统、显控系统、柔性力控系统、功能按键等模块形成有机整体^[12]。同时配备万向轮，便于移动，如图 2(a) 所示。该机器人基于视觉系统对人体治疗区域进行穴位识别，通过回旋灸、往复灸、雀啄灸等多种

艾灸传统技术实现热疗过程。灵手热疗机器人操作智能化，通过显控选择手法即可启动，结束之后自动复位，全程无需人为干预。

热疗过程中，该机器人针对不同网络病的症状识别相应穴位，例如手部穴位、颈肩部等，对人体进行非创伤性浅表局部加热按摩，缓解网络病所带来的不适感，同时不会造成不可逆的热损伤反应。

2.1.2 秀域超 V 热动力 AR 机器人

超 V 热动力 AR 机器人由遨博智能、集成伙伴瀚维、终端客户秀域联合开发，实现了协作机器人、视觉系统、力控系统、温控系统、大数据系统和远红外线诊疗等设备的结合^{[12]、[41]}，如图 2(b) 所示。该机器人以遨博的柔性化协作机械臂为核心，配备人体工学亲肤设计的末端工具，通过 3D 结构光视觉扫描，机器人自动对理疗按摩区域进行三维感知，为不同人群诊疗分析形成专属数据库。且可根据远红外诊疗、靶向热疗等诊疗结果自动调节诊疗能量输出，利用大数据计算呼吸频率、体温等数据并自动记忆按摩轨迹，从内置健康方案，到数字化信息跟踪记录，提供更加个性化、智能化的热疗服务。该机器人搭配店面管理系统使用，根据大数据分析人体信息，自动给出热疗方案，热疗过程的初期设置无需操作人员干预，基于大数据生成的热疗方案，医师可根据患者的年龄、患病时间和患者热疗过程中的感受等信息实时进行调整。

超 V 热动力 AR 机器人着眼于“热”，能够快速提升治疗区域温度，刺激筋膜，安全控温，对于长时间使用网络导致的颈腰椎疼痛能有效改善。

2.1.3 热奈 AI 机器人

热奈 AI 机器人由德壹机器人有限公司研发，由 6 轴高精度协作机械臂、智能温控、六维力传感技术和大数据等技术组成，如图 2(c) 所示。其基于 AI 视觉算法自研人体自适应体系，能精准识别人体轮廓、经络。并利用温控系统和传感器技术根据不同人体接受程度生成舒适、有效的温度恒定值。用户在使用该机器人时由 GENAY 智能控制面板控制，该面板由德壹 PC 端客户管理系统统一管理，能够同时控制多个房间的热疗情况，实时调整。

热奈 AI 机器人采用 3+3 激活免疫疗法，重点对腰椎部分进行调理，其产生的温热效应能增加毛细血管网的开放数，增强血液循环，降低肌肉和结缔组织张力，能够有效缓解腰部痉挛减轻疼痛，重点改善网络病中的腰部疾病、鼠标手。

2.1.4 钧控 JFR-6 艾灸机器人

钧控 JFR-6 艾灸机器人由上海钧控机器人有限公司研发，由 6 自由度机械臂、操作显控系统、激光红外定位系统、模块化艾灸头、自动清烟系统、数字化康养管理系统等部分组成^[12]，如图 2(d) 所示。其对古法艾灸技术进行了深入的学习与传承，通过对传统艾灸手法的精细分析和模拟，成功复刻了专业艾灸师的手法。同时使用人工智能、机器人和大数据等技术，在解决烟味、人工占用等痛点问题的基础上，结合舌诊仪智能分析提供更个性化、更精准的艾灸康养方案。同时，该机器人搭载高精度机械臂、距离传感器和温度传感器，根据人体姿态和体表温度自动调节位置和温度，为人体进行安全保护。用户热疗开始前，首先钧控机器人通过其公司产品智能舌诊仪判断出患者自身的病症，为患者推荐精准的服务项目。然后钧控门店管家根据选择的项目，将标准灸程一键下发至医师和指定机器人，医师根据灸程在艾灸机器人的操作显控系统上操作，利用机器人上两个激光红外点进行虚实结合定位，快速地为患者进行艾灸热疗，可在显控系统上实时查看服务进度和设备状态。

该机器人作用于痛点及其周围组织，在缓解疼痛、放松肌肉、调理亚健康等方面，均表现出显著优势，通过热力效果能有效缓解长期使用网络导致的干眼症和颈部疲劳。



图 2 国内典型热疗机器人图像。(a) 灵手热疗机器人^[12]; (b) 秀域超 V 热动力 AR 机器人 (来源网络); (c) 热奈 AI 机器人 (来源网络); (d) 钧控 JFR-6 艾灸机器人 (来源网络)

Fig.2 Typical images of domestic hyperthermia robots: (a) LSCURE hyperthermia robot^[12]; (b) Showyu augmented reality (Source network); (c) Genay AI Robot (Source network); (d) Junctrl JFR-6 Robot (Source network)

2.2 国外典型热疗机器人介绍

2.2.1 Phill Robot

Phill Robot 由美国 Albotics 公司研发, 由 3 自由度机械臂、传感摄像头、超声波按摩头等部分组成, 如图 3(a)所示。该机器人搭载 AI 功能, 通过传感摄像头和 AI 功能对用户治疗区域扫描, 自主规划热疗路径和方式。同时, 该机器人采用折叠设计, 可以轻松收纳在床头, 体积仅为传统床头柜大小的三分之二。用户可以通过“Phill Robot”应用程序连接手机, 调节热疗模式和温度。

该机器人作用于颈椎、腰部、肩部和背部, 在震动、捶打按摩的基础上, 通过超声波按摩头释放热力, 缓解疲劳疼痛, 改善网络病症。

2.2.2 Cebalair Human Tecar

Cebalair Human Tecar 是意大利的一款智能热疗仪器, 与传统意义的机器人不同, 其不包含机械臂结构, 主要由热疗头、传导线、使用面板等部分构成, 如图 3(b)所示。该仪器依赖射频热疗的原理, 借助两种特定类型的电极, 输出安全的电磁射频信号, 让组织产生内源热, 激活组织自身的新陈代谢, 缓解疲劳疼痛, 从而达到热疗效果。该仪器需要依靠医师来进行一定的操作, 根据用户自身需求设定热疗模式, 进而使用热疗头来进行热疗。

该仪器通过深层热疗的方式, 将热力传导到组织深部, 能够缓解和治愈身体各部位疼痛, 如颈椎病、腰椎病等, 针对网络病治疗疗效明显。

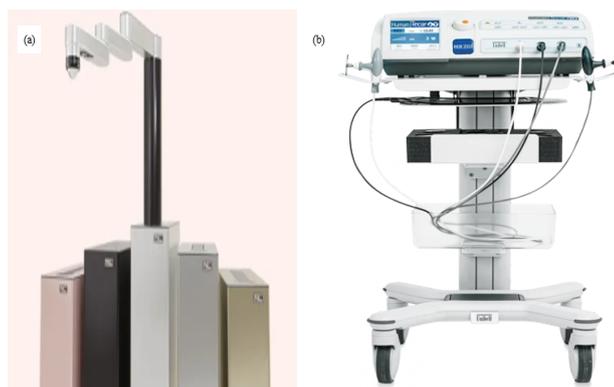


图3 国外典型热疗机器人图像。(a) 菲尔机器人 (来源网络); (b) 赛芭莱儿 (来源网络)

Fig.3 Typical images of foreign hyperthermia robots: (a) Phill Robot (Source network); (b) Cebalair Human Tecar (Source network)

热疗作为我国传统医学的治疗手段之一，其在我国发展迅速，出现了许多热疗机器人品牌，而国外对热疗机器人的研制却寥寥无几。综合所介绍的六款国内外热疗机器人内容分析，具体对比总结见表2。总之，目前的热疗机器人产品在网络病治疗上基本已实现自动化操作，无需人工参与，同时配备的温控系统能够实时调节热疗温度，具有高效性、个性化和安全性等优点，应用前景广泛。

表2 国内外热疗机器人对比

Table 2 Comparison of hyperthermia robots at home and abroad

	R&D company	Name	Hyperthermia type	Acupoint Identification method	Usage	Advantages	Targeted Cyber-syndrome
domestic	LSCURE	Moxibustion Therapeutic Robot	Local hyperthermia	visual system	complete automation	Realize a variety of traditional moxibustion techniques	Mouse hand、Computer neck、Lumbar strain
	Showyu	Super V Thermal Power AR Robot	infrared hyperthermia、Targeted hyperthermia	3D structured light visual scanning	complete automation	Provide personalized services based on big data technology	Computer neck、Lumbar strain
	Deyeemed	Genay AI Robot	Surface hyperthermia	AI vision algorithm	semi-automatization	High accuracy in recognizing body contours and target heat therapy areas	Mouse hand、Lumbar strain
	Junctrl	JFR-6 Robot	Surface hyperthermia	Laser infrared positioning system	semi-automatization	Tongue diagnostic instrument intelligent analysis to provide personalized, precise hyperthermia program	CVS、Computer neck
	Albotics	Phill Robot	Ultrasonic hyperthermia	Sensor camera	complete automation	Folding design for easy storage; The user can adjust the temperature manually	Computer neck、Lumbar strain
abroad	Cebalair	Human Tecar	radiofrequency hyperthermia	artificial recognition	hand operation	The use of electromagnetic radio frequency signals to generate internal heat, directly to the tissue	Computer neck、Lumbar strain

3 热疗机器人关键技术

本节将深入探讨热疗机器人的四个关键技术，它们相互关联，共同构成了热疗机器人的核心技术体系，如图4所示。热疗技术是热疗机器人的基础技术原理，提供了热疗机器人工作的理论支撑；目标区域导航与定位技术是实现精准治疗的关键。它依赖于先进的视觉识别技术、传感器融合技术和深度学习算法等，确保机器人能够针对特定区域进行有效的热疗；机器人结构设计包括了其本体结构、感知技术和运动控制技术等内容，是整体设计的核心构造部分。一个高效、稳定、灵活且用户友好的机器人结构，不仅能够提高治疗效率，还能够确保患者在使用过程中的舒适度；安全保护技术是整个系统的关键部分，它确保了热疗机器人在提供治疗的同时，能够最大限度地保护患者的安全，减小因操作不当或设备故障带来的风险。

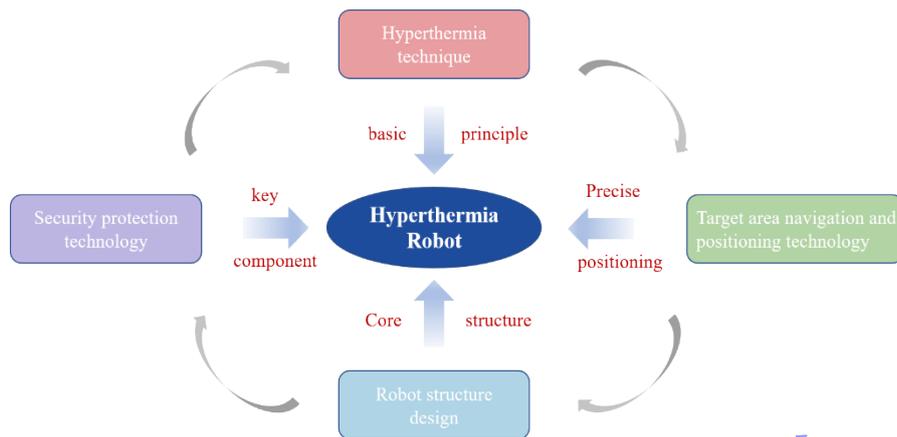


图 4 关键技术逻辑

Fig.4 Key technology logic image

3.1 热疗技术

热疗技术利用不同形式的热量来治疗各种疾病和伤害。从中医的角度来看，热疗的主要原理是疏通经络、调和阴阳、温通经络、祛寒除湿等^[42]。通过温热的方式，可以疏通阻塞的气血，改善身体的健康状况。同时，提高体温可以加快血液流动速度，帮助放松身体，缓解疼痛。

通常使用的热疗技术有以下几种：

深部热疗（Deep hyperthermia, DH）。它是将电磁波辐射直达深部组织的一种物理疗法，电磁波会促使细胞内的分子发生持久的振动^[43]，生成大量的热，将热量直达肌体深部组织，有效地促进肌肉组织上的新陈代谢，改善血液循环，提升组织细胞的通透性，有利于水肿的吸收，从而改善患者的压迫症状，达到缓解疼痛的目的。常见的方法有超声波热疗和射频热疗。

表面热疗（Surface hyperthermia, SH）。它将热量直接应用于身体的表面部分，加热人体的表层组织（如皮肤和表层肌肉等），促进血液循环，帮助代谢废物排出，松解肌痉挛，以此来产生治疗效果^[7]。表面热疗还可刺激皮肤的感受器，改善局部的神经传导，减轻疾病所带来的痛感。常见的热疗工具有热水袋、电热垫和热毛巾等。

全身热疗（Whole Body Hyperthermia, WBH）。它利用红外线、射频、微波等加温方式来提高体温，利用热作用及其继发效应来激活全身的血液循环和组织的代谢，缓解疲劳，从而达到全身治疗的效果。其主要的加热方式有：体表加温法（如红外线辐射法、水浴法、微波加温法等）和体外循环血液加温法^[44]。

局部热疗（Local hyperthermia, LH）。它是一种将热量应用于患者特定部位的治疗方法，热量提高会增加局部血流，提高氧气和营养物质的供应，同时帮助消除代谢废物和毒素，从而实现治疗目的。常见的方式有热泥浴、局部热蜡疗法和蒸汽包裹等^[7]。

对上述的热疗技术分类概括总结见表 3。由表 3 可知，不同热疗技术之间存在热疗深度和热疗面积的区别，各自有其独特的应用场景和治疗机制。目前已有一些关于应用热疗法治疗网络相关疾病的研究。陈白玲^[43]采用深度热疗法配合拉伸按摩手法来缓解颈部疼痛，实验结果表明热疗在缓解患者颈部疼痛方面有一定功效；程相甫^[17]采用“悬灸”的表面热疗法来治疗眼部问题，针对眼部特定穴位进行热疗，改善眼周循环，提高眼局部组织细胞的分泌能力，改善因用网过久而导致的眼干涩等眼部疾病。黄海^[45]采用局部热疗结合推拿手法来治疗腰椎疼痛问题，热疗可直接扩张腰部的毛细血管，使得血管壁通透性增加，促进局部代谢和组织修复，从而缓解用网导致的腰椎疼痛。

表 3 热疗技术分类

Table 3 Classification of hyperthermia technique

Hyperthermia type	Mode of heating	Area / Depth	Common Method
-------------------	-----------------	--------------	---------------

Whole Body Hyperthermia	infrared ray、radio frequency、Microwave	Whole body	Surface heating method(Infrared radiation method、immersion method、Microwave heating method)、Cardiopulmonary bypass blood heating
Local hyperthermia Deep hyperthermia	direct heating electromagnetic radiation	Local body deep tissue	Hot mud bath、local heat wax therapy Steam wrap Ultrasonic hyperthermia、radiofrequency hyperthermia
Surface hyperthermia	direct heating	body surface	hot-water bag、electrically heated pad、hot towel

3.2 目标区域导航与定位技术

精确的目标区域导航与定位技术是确保热疗疗效和安全性的关键，热疗机器人需要在患者体内或体表精确定位治疗区域。热疗目标区域主要包括局部疼痛区域、关节部位和穴位等，这些区域的精确定位是热疗机器人研究的一个重要问题。常用的热疗机器人导航与定位技术主要包括：激光导航、多传感器融合、视觉导航识别等技术。

激光导航技术使用激光扫描仪或其他三维传感器来获取患者身体表面的空间数据，从而为热疗机器人构建精确的三维模型^[46]。这些数据不仅提供了患者体表的几何信息，还能生成患者体表的三维坐标系统，辅助热疗机器人在治疗过程中精确地定位目标区域。激光导航定位具有高精度的特点，能够在毫米级别上测量患者身体的每个细节，尤其适用于深部热疗，其治疗区域可能深藏于体内或体表的某些细小部位，传统的视觉识别无法达到足够的精度，而激光导航技术可以为机器人提供高分辨率的空间数据，使其能够准确追踪和调整治疗部位，确保治疗过程中加热元件始终对准目标区域，减小定位误差。激光导航不仅限于静态环境，在动态治疗过程中，激光扫描仪能够持续监测患者的姿势和体表的变化，实时提供反馈数据。如果患者因不适或体位变化而调整位置，激光导航技术能帮助热疗机器人动态调整运动路径，确保热疗区域的精确性。

多传感器融合技术通过综合来自不同传感器的数据（例如位置传感器、图像传感器等），为热疗机器人提供全面的感知能力^[47]。在复杂的治疗环境中，单一传感器往往难以满足高精度定位的需求，而多传感器融合技术通过融合不同来源的信息弥补了这一局限性。图像传感器（例如摄像头）与温度传感器结合，能够更加智能地分析和应对患者体表的变化。摄像头可以实时识别体表标记或治疗区域的变化，传感器融合技术将这些视觉信息与温度数据整合，帮助机器人更好地判断加热元件的位置是否需要调整，或者治疗策略是否需要优化。这种多传感器融合技术不仅提升了治疗的精确性，也使机器人能够适应复杂环境中的动态变化，提升了智能反馈和自适应调整的能力。

视觉导航技术依赖于摄像头和计算机视觉系统，通过实时捕捉图像来识别和追踪目标区域^[48]。通过摄像头采集的图像数据，热疗机器人可以定位和识别患者的体表标记，例如特定的穴位或热疗参考点等，利用计算机视觉算法对这些数据进行处理，并生成目标区域的空间坐标，辅助机器人实时调整运动轨迹。与传统的视觉识别技术不同，现代的视觉导航技术通常结合图像处理算法，当患者在治疗过程中因不适而调整姿势时，摄像头能够识别到体位的变化，并通过图像处理算法重新计算和调整热疗区域的定位，确保机器人始终能够在动态的环境中准确地识别目标区域。视觉导航因其直观性与实时性的特点，适用于表面热疗或需要精确定位体表标记的治疗，例如对肌肉、关节以及皮肤等表层区域的治疗尤为有效。

通过结合计算机视觉、传感器、激光导航等多种技术，热疗机器人能够在治疗过程中实现高精度、高效能的治疗。但尽管目前的目标区域导航与定位技术比较成熟，其在实际应用中仍面临一些挑战。不同患者的体型和体表特征差异等因素可能会影响热疗机器人的定位精度，尤其是在进行穴位治疗时，人体的差异性会导致热疗位置的偏移误差较大。随着深度学习等技术的不断进步，目前已经开发了许多新的定位方式，比如利用神经网络定位、算法定位等，结合患者的体型、治疗需求等个性化因素来调整热疗位置，提高精准度。张秋云^[49]等人就提出了一种基于遗传算法优化 BP 神经网络的机器人穴位坐标预测方法，利用遗传算法弥补 BP 神经网络的缺陷，提高神经网络的预测精度。结果验证该方法对穴位定位有较高的精度和预测准确性。未来的热疗机器人应在治疗精度、适应性和智能化方面不断突破，进一步提升患者的治疗体验。

3.3 机器人结构设计

热疗机器人具备物理形态，能够与物理世界（即患者及其治疗需求）进行交互，并通过感知、调整和优化操作来执行任务，主要由移动底盘、机械臂、机械手等部分组成，其结构设计是一个复杂的过程，根据结构特点可以分为仿生式、便携式和平台式三种^[50]。人体手臂特有的关节结构使其具有操作灵活、操作精度高、工作范围广等特点，仿生式机械手通常模仿人体手臂的外观和结构，具有多个关节和自由度，以实现类似于人体手臂的运动学功能，如图 5(a)。便携式机器人设计更加轻巧，便于携带和移动，具有高速、轻载的特点，使用场景更为广泛，如图 5(b)。平台式机器人通常安装在固定的平台上，配备的机械臂围绕平台进行操作，具有较大的工作空间，同时操作过程也更加地稳定可靠，如图 5(c)。



图 5 三类机器人结构图像. (a) 仿生式机械手^[51]; (b) 便携式机器人^[52]; (c) 平台式机器人^[12]

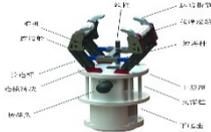
Fig.5 Three kinds of robot structure images: (a) Bionic manipulator^[51]; (b) Portable robot^[52]; (c) Platform robot^[12]

现有的热疗机器人大多为平台式结构，其固定平台的设计能够让患者在治疗过程中保持平躺姿势，提升患者的舒适度。而目前国内外对于便携式结构和仿生式结构的热疗机器人研究较少，尤其是仿生式结构，大多仅仅具有按摩功能，不能实现热疗技术。赵维超^[50]等人提出了一款针对人体肩颈部的 6 自由度按摩机器人，采用单手仿生式机械手，可实现指揉、指按、指捏、振动 4 个按摩动作。余可等人^[50]研究的仿生按摩手采用了模块化设计，四个手指左右对称，通过舵机调整远指端手指位姿，推杆调整近指端关节位姿实现指揉、捏拿、滚压等手法。未来可以考虑在机械手部配备加热元件和温控系统，将热源集成在机器人的手部，进一步实现热疗功能。表 4 列举了以上三类结构对应的部分热疗机器人产品及其具体结构描述。

表 4 三类机器人对比

Table 4 Comparison of three types of robots

Mechanical Structure	R&D Institution	Name	Specific Structural Description	Physical drawing ^{[53]-[55]}
Platform Type	LSCORE	Moxibustion Therapeutic Robot	Platform-type structure, integrates collaborative robotic arms, moxibustion therapy head, vision system, display control system, flexible force control system, function buttons, and other modules to form an organic whole	
	Jiangxi University of Chinese Medicine	Thermo-sensitive Moxibustion Robot	Platform-type structure, consisting of a fixed platform, robotic arms, moxibustion actuators, etc	

Portable Type	Gachon Medical University, Korea	Bamk-001 Abdominal Thermal Massage Device	Portable structure, uses airbags and thermoelectric modules to apply pressure and heat to the patient's abdomen, simulating thermal therapy	
Bionic Type	Anhui University of Technology	Shoulder and Neck Massage Robot	Bionic robotic arm with 6 degrees of freedom, flexible in performing various massage actions	
	Jiangnan University	Bionic Massage Hand	Modular bionic robotic hand with a four-finger symmetrical structure, adjusting the position of the fingers and joints to perform various massage techniques	

在实际应用中，每种结构类型都有其特定的应用场景和优势，但无论是哪种结构，都需要强大的感知与运动控制技术来支持其高效、准确地执行任务。在感知技术层面，热疗机器人通过传感器（如温度传感器、压力传感器、位置传感器等）实时感知治疗区域的状态。触觉和视觉信息是描述热疗按摩类机器人当前交互状态的两种重要信息^[50]。触觉方面主要利用力信息感知，机械臂末端搭载力传感器，检测当前施加的力度等信息；视觉感知主要通过搭载深度相机、摄像头等来获取视觉信息。通过多传感器融合技术，热疗机器人可以利用传感器的反馈信息来实现对环境的高精度实时感知，调整加热温度、位置或治疗策略等。在控制技术层面，热疗机器人不仅需要具备感知、导航与定位能力，还需要具备能够精确控制机器人运动到达指定区域或位置的能力。目前，机器人控制技术较为成熟，通过对机器人建立运动学和动力学模型，采用基于全局线性化的控制、基于近似线性化的控制等方法，实现较为稳定的控制^[56]。传统的运动控制采用 PID 控制技术，通过比例、积分和微分控制信号来调节控制器的输出，从而实现稳定控制。而热疗机器人在运动过程中受到的阻力（如各部件的摩擦力、机械臂抬起时的阻力等）构成了机器人动力学控制中的不确定因素，此时采用 PID 控制技术的控制精度较低，应与鲁棒控制、自适应控制、滑膜控制、模糊逻辑控制等经典的机器人控制策略进行结合，保证热疗手法的实现。

热疗机器人从大型的平台式结构发展到便携式结构，再到未来的仿生式机械手结构，其小型化和模块化的趋势愈加明显，这两点也是未来热疗机器人机械结构设计重点。同时，随着深度学习技术的发展和运用，基于深度学习和强化学习的机器人控制技术、多模态感知技术将得到进一步发展，推动热疗机器人的感知和控制能力进一步提升。

3.4 安全保护技术

热疗机器人是个复杂的系统，在应用中直接与人进行交互，为保证其安全可靠地运行，热疗机器人的安全保护技术不容忽视，主要从温度保护层面、人机交互保护层面和机械结构保护层面进行研究。

温控系统是实现温度保护的主要方法。徐炜君^[57]设计的智能艾灸设备中温控系统采用了 PID 控制算法，实现对热疗温度、时间的精准智能控制。白善明^[58]在艾灸机器人中引入了温度监测与反馈系统，能够实时反馈患者表皮温度的变化，据此调节机械臂的运动轨迹、高度等参数。在热疗过程中，通过安装在机器人手部和加热设备上的温度传感器，可以实时监测热量释放和患者皮肤接触部位的温度，确保热疗过程中的舒适度与安全性。

人机交互保护从材料和结构两方面进行考虑。从材料上看，由于部分热疗机器人直接接触人体的特殊性，在接触部位应尽可能采用橡胶、气囊等软质材料^{[59]、[60]}，避免因摩擦导致患者皮肤破损等隐患。从结构上看，在治疗过程中要求机器人工作可控，因此，在交互设计时应考虑急停按钮设计。当患者在治疗过程中感到身体异常时可通过手中的急停按钮紧急停止治疗，增强热疗机器人的安全性。

机械结构保护是针对设备紧急断电或停止时的情况，主要考虑对平台和机械臂的控制。为保证

患者的安全，当患者按下急停按钮或设备突发断电时，热疗床体平台应考虑手动调节平台下降工作的实现，同时应将机械臂、机械手等治疗装置与人体快速脱离以保证患者安全。

4 热疗机器人的发展趋势

随着科技的不断进步，特别是人工智能和机器人技术发展，医疗领域已经见证了一系列创新设备的诞生^{[61]-[62]}，这些设备在提高治疗效率和患者舒适度方面显示出巨大潜力。热疗机器人亦发展迅速，其在网络病治疗中的应用进展引人注目。热疗机器人的设计和开发，体现了对传统中医热疗法的现代诠释和技术升级。从过往传统热疗的老中医手工识别定位到 AI 视觉算法等识别技术，提高了热疗区域识别的准确性，同时解决了医师经验不足和短缺的问题。从古法艾灸棒到结合机器人技术的艾灸热疗法，提升了热疗的智能化程度以及安全性。通过精确控制温度和热量分布，热疗机器人能够针对不同网络病的特定部位提供定制化的治疗方案，从而在缓解疼痛、肌肉疲劳以及促进血液循环中发挥重要作用。

目前，现有的热疗机器人在网络病治疗中的应用仍存在着一些亟待解决的问题。

(1) 机械臂灵活度不够。机械臂的灵活度是机器人性能的一个重要指标，而控制策略则直接影响到机械臂的响应速度、精确度以及不同任务场景的适应性。常见的控制策略有基于模型的控制策略、基于数据的控制策略等，这些单一的控制策略难以实现复杂的位置控制需要，难以达到人类关节的灵活程度，在热疗过程中无法全面灵活地照顾到所有热疗位置。

(2) 针对网络病治疗的方法不够精准。热疗机器人在网络病治疗中的应用主要依赖于对患者病情的准确诊断和对热疗参数的精确控制。由于网络病的种类繁多，病情复杂多变，目前的多数热疗机器人在识别和处理这些复杂病情时仍存在一定的局限性，治疗方法大众化，精准度较低。

(3) 医患关系变得不够人性化。热疗机器人代替了传统热疗医师，对于患者来说，使用不能沟通交流的机器人代替热疗医师对其进行治疗，缺少了沟通与关爱等，可能会使患者产生担忧，甚至恐惧心理。

结合上述实际问题，热疗机器人未来发展趋势总结如下。

(1) 提升个性化水平。在考虑温度、距离等因素的基础上，通过支持向量机、卷积神经网络等视觉感知算法，结合人体生理特征，如脑电、脑功能图、血氧等多模态生命体征信息，实时监测其生命体征，根据这些信息的变化智能调整热疗方案，实现基于人体多模态生理特征的闭环控制，提升治疗的个性化、精准化水平。

(2) 提升人机交互能力。融合多模态人机交互技术，使热疗机器人能充分理解人的自然语言、识别人的面部情绪、获取人的肢体行为等多模态信息，能够及时对患者的反馈做出回应，保证患者的体验感与安全感。

(3) 融合 5G 技术实现远程治疗。将 5G 技术融入热疗机器人设备与医师的实时通讯中，结合 AI、VR/AR 等新兴技术实现远程诊断、远程热疗，推进智慧医疗的建设。

(4) 完善评价体系。基于专家系统对热疗机器人的热疗过程设计一套热疗评价系统，采集热疗过程的位置、力度、温度等信息，与专家系统库内的数据进行对比分析，更加有效地评估热疗机器人的性能、提高治疗的质量和准确性。

5 结论

本文从热疗机器人在典型网络病治疗应用需求出发，介绍了六种国内外典型热疗机器人产品，并对热疗技术、目标区域导航与定位技术、机器人结构设计和安全保护技术四大关键技术进行了分析。由此可以看出，热疗机器人在网络病治疗中的应用具有很大的潜力和价值，其正在发展成为一个新兴的、前沿的发展领域，是数字化医疗的重要发展方向之一，未来研究应注重提升热疗机器人的灵活化、精准化与智能化水平。

参考文献

- [1] Shi F F, Ning H S, Chen L M, et al. Cyber-Syndrome: Concept, Theoretical Characterization, and Control Mechanism. *Tsinghua Science and Technology*, 2024, 29(3): 721-73
- [2] Ning H S, Dhelim S, Bouras M A, et al. Cyber-Syndrome and its Formation, Classification, Recovery and Prevention. *IEEE Access*, 2018, 6: 35501-35511
- [3] Mork R, Falkenberg H K, Fostervold K I, et al. Discomfort glare and psychological stress during computer work: subjective responses and associations between neck pain and trapezius muscle blood flow. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2020, 93(1): 29-42
- [4] Zheng Y, Wei D, Li J, et al. Internet Use and Its Impact on Individual Physical Health. *IEEE Access*, 2016, 4: 5135-5142
- [5] Wang W X, Zhao Z, Ning H S. A tree-based corpus annotated with Cyber-Syndrome, symptoms, and acupoints. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 482
- [6] Li J N, Zeng Q Q, Bi Y P. Progress of clinical research on the treatment of chronic fatigue syndrome by external therapeutic method of Chinese medicine. *Information on Traditional Chinese Medicine*, 2024, 41(05): 82-86
(李敬楠, 曾俏俏, 毕响鹏, 等. 中医外治法治疗慢性疲劳综合征临床研究进展. 中医药信息, 2024, 41(05): 82-86)
- [7] Tang J T, Guo J, Yang B, et al. History and Prospects of Hyperthermia. *Science & Technology Review*, 2014, 32(30): 15-18
(唐劲天, 郭静, 阳兵, 等. 热疗的发展历程与展望. 科技导报, 2014, 32(30): 15-18)
- [8] Lu L, Lu T, Tian C, et al. AI: Bridging Ancient Wisdom and Modern Innovation in Traditional Chinese Medicine. *JMIR Medical Informatics*, 2024, 12(1): e58491
- [9] Ma X X, Wang S F, Wei Z H, et al. Application of Artificial Intelligence in Traditional Chinese Medicine Diagnosis Based on Medical Big Data. *World Chinese Medicine*, 2023, 18(11): 1579-1582
(马欣欣, 万生芳, 魏昭晖, 等. 医疗大数据背景下的人工智能在中医诊断中的应用研究. 世界中医药, 2023, 18(11): 1579-1582)
- [10] Schleer P, Drobinsky S, de la Fuente M, et al. Toward versatile cooperative surgical robotics: a review and future challenges. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2019, 14: 1673-1686
- [11] He B W, Zhang Y, Deng Z, et al. Research progress of medical robot and medical engineering integration technology. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(5): 681-690
(何炳蔚, 张月, 邓震, 等. 医疗机器人与医工融合技术研究进展. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 681-690)
- [12] Liu Z L, Du J J, Li J H, et al. Application Status and Prospect of Massage Physiotherapy Robots. *China Medical Device Information*, 2024, 30(1): 83-86+174
(刘志龙, 杜加军, 李俊桦, 等. 按摩理疗机器人应用现状及展望. 中国医疗器械信息, 2024, 30(1): 83-86+174)
- [13] Dang L, Shi Q. Research on Chinese Traditional Medical Massage Robotic Products Usability Design Process. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1650(2): 022014
- [14] Chen R J, Gu Y C. Design of Medical Robot Based on Image Recognition. *Modern Computer (Professional Edition)*, 2018, (25): 83-88
(陈润杰, 古宇成. 基于图像识别的医疗机器人设计. 现代计算机(专业版), 2018, (25): 83-88)
- [15] Du J, Zhang J L, Zheng F, et al. Application Research Progress in Moxibustion of Eye // *China Association for Acupuncture and Moxibustion. New Era, New Thinking, New Leap and New Development -- 2019 Annual Meeting of the Chinese Acupuncture and Moxibustion Society and its 40th Anniversary Review Proceedings*. China Academy of Chinese Medical Sciences; Henan University of Chinese Medicine; TC DAY OF THE SOURCE Co. LTD, 2019: 5
(杜佳, 张佳乐, 郑凡, 等. 眼部艾灸应用的研究进展//中国针灸学会. 新时代 新思维 新跨越 新发展——2019 中国针灸学会年会暨 40 周年回顾论文集. 中国中医科学院研究生院; 河南中医药大学; 天才天之源集团有限公司, 2019:5)
- [16] Wei M Q, Dong L. Research Progress on External Therapy of Traditional Chinese Medicine in the Treatment of

- Periarthritis Humeroscapularis. *Medical Innovation of China*, 2024, 21(04): 162-166
(魏孟奇, 董林. 中医外治法治疗肩周炎的研究进展. 中国医学创新, 2024, 21(04): 162-166)
- [17] Tian M. Progress of TCM external treatment of dry eye in recent 5 years. *Zhongguo Xiangcun Yiyao*, 2024, 31(05): 73-75
(田曼. 近 5 年干眼症的中医外治法治疗进展. 中国乡村医药, 2024, 31(05): 73-75)
- [18] Liu H, Yao X X, Yang T, et al. Cooperative Privacy Preservation for Wearable Devices in Hybrid Computing Based Smart Health. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, PP: 1-1
- [19] Shi F F, Ning H S, Dhelim S. A Tutorial of Cyber-Syndrome viewed from Cyber-Physical-Social-Thinking Space and Maslow's Hierarchy of Needs. *arXiv*, 2021, 2111.02775
- [20] Pavel I A, Bogdanici C M, Donica V C, et al. Computer Vision Syndrome: An Ophthalmic Pathology of the Modern Era. *Medicina-Lithuania*, 2023, 59(2): 412
- [21] Anbesu E W, Lema A K. Prevalence of computer vision syndrome: a systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 1801
- [22] Watanabe T, Xia C, Fujita K, et al. Screening for Carpal Tunnel Syndrome Using Daily Behavior on Mobile Devices. *Computer*, 2023, 56(9): 62-70
- [23] Osiak K, Elnazir P, Walocha J A, et al. Carpal tunnel syndrome: state-of-the-art review. *Folia morphologica*, 2022, 81(4): 851-862
- [24] Song D, Park D, Kim E, et al. Neck muscle fatigue due to sustained neck flexion during smartphone use. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2024, 100: 103554
- [25] Ma J, Hu W D, Wen Z H, et al. Development and current status of computer vision syndrome. *Journal of Clinical Ophthalmology*, 2010, 18(03): 273-278
(马进, 胡文东, 文治洪, 等. 计算机视觉综合征的发展和现状. 临床眼科杂志, 2010, 18(03): 273-278)
- [26] Zhang X L, Zheng Y Q, Qu Y, et al. Analysis of therapeutic effect for carpal tunnel syndrome treated with a combination of behavior therapy, physical therapy and pharmacotherapy. *Journal of Clinical Neurology*, 2021, 34(04): 273-276
(张晓黎, 郑永强, 屈勇, 等. 行为、物理疗法联合药物对腕管综合症的疗效分析. 临床神经病学杂志, 2021, 34(04): 273-276)
- [27] Wang Q X. *Observation On Clinical Curative Effect Of Warming Needling Moxibustion Combined With Directional Penetration Medicine Of Traditional Chinese Medicine In Treating Wind-cold-damp Type Supraspinatus Tendonitis* [Dissertation]. Heilongjiang: Heilongjiang University of Chinese Medicine, 2023
(王庆鑫. 温针灸结合中医定向透药治疗风寒湿型冈上肌腱炎的临床疗效观察[学位论文]. 黑龙江: 黑龙江中医药大学, 2023)
- [28] Mao Q D Z, Cheng L H. Acupuncture combined with heat-sensitive moxibustion in the treatment of computerized low back syndrome in 48 cases. *Jiangxi Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2014, 45(06): 61-62
(毛庸东子, 程立红. 针刺结合热敏灸治疗电脑腰背综合征 48 例. 江西中医药, 2014, 45(06): 61-62)
- [29] You Y Q, Lu H. Acupuncture for Common Eye Diseases. *China Glasses Science-Technology Magazine*, 2020, (12): 111-113
(游雅琪, 鲁海. 针灸对于常见眼部疾病的治疗. 中国眼镜科技杂志, 2020, (12): 111-113)
- [30] Ma W L, Cheng C S, Zha Z Q, et al. Experience of Chunsheng Cheng in treating stenosing tenosynovitis of finger flexor tendons (tendon paralysis) by applying the theory of tendon diseases. *China's Naturopathy*, 2023, 31(10): 13-15
(马文龙, 程春生, 查朱青, 等. 程春生运用筋病理论治疗指屈肌腱狭窄性腱鞘炎(筋痹)经验. 中国民间疗法, 2023, 31(10): 13-15)
- [31] He X M. Application and Progress of Conservative Treatment Methods of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine in Cervical Spondylosis. *Chinese and Foreign Medical Research*, 2023, 21(08): 162-165
(何鑫淼. 中西医结合保守治疗方法在颈椎病中的应用及进展. 中外医学研究, 2023, 21(08): 162-165)
- [32] Xiao W K, Zheng S C, Gan Y X, et al. Design and Development of Wearable Artemisiae Argyi Folium Uterus Sticker Based on Graphene Far Infrared Heating. *Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World*

- Science and Technology*, 2021, 23(10): 3496-3502
(萧文科, 郑世超, 甘彦雄, 等. 基于石墨烯远红外加热的可穿戴艾叶暖宫贴设计与开发. 世界科学技术-中医药现代化, 2021, 23(10): 3496-3502)
- [33] Zhang X T, Wang H X, Wang Z, et al. Development and characteristics of automatic ash-removal heat-sensitive moxibustion device. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, 2023, 43(05): 597-599
(张雪涛, 王含笑, 王震, 等. 自动除灰热敏灸装置的研制与特点. 中国针灸, 2023, 43(05): 597-599)
- [34] Xu C M. *Research of an integrated TCM therapy instrument for moxibustion therapy and massage therapy* [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021
(徐成淼. 灸疗推拿一体化中医理疗仪的研制[学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021)
- [35] Kuang R X. *Identification and Localization of Human Backed Acupoints Based on Deep Learning* [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2023
(况荣欣. 基于深度学习的人体背部穴位的识别与定位[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023)
- [36] Li S J. *Vision modeling and automatic trajectory planning of TCM moxibustion robot* [Dissertation]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2021
(李树佳. 中医热敏灸机器人的视觉建模及轨迹自动规划[学位论文]. 广东: 广东工业大学, 2021)
- [37] Zhong Y. *Development of Intelligent Moxibustion Robot* [Dissertation]. Jiangsu: Southeast University, 2021
(钟义. 智能艾灸机器人研制[学位论文]. 江苏: 东南大学, 2021)
- [38] Yang J, Lim K H, Mohabbat A B, et al. Robotics in Massage: A Systematic Review. *Health Services Research and Managerial Epidemiology*, 2024, 11
- [39] Xu B Y. *Research on The Design of Waist Massage Products for Young People Based on Acupoint Autonomous Positioning* [Dissertation]. Xian: Xi'an University of Technology, 2024
(徐碧阳. 基于穴位自主定位的青年群体腰部按摩产品设计研究[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024)
- [40] Gao J R. Acupuncture and moxibustion at Laogong acupoint for mouse hand. *Electronic Journal of Clinical Medical Literature*, 2019, 6(52): 18+20
(高京荣. 艾灸劳宫穴治疗鼠标手. 临床医药文献电子杂志, 2019, 6(52): 18+20)
- [41] Zha Q L. *Research on Key Technologies of TCM Massage Robot* [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023
(查庆林. 中医按摩机器人关键技术研究[学位论文]. 上海: 上海应用技术大学, 2023)
- [42] Feng C, Zhou S, Qu Y, et al. Overview of Artificial Intelligence Applications in Chinese Medicine Therapy. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2021
- [43] Chen B L. *The research of alleviate limited mobility of neck by manual stretching combined with thermotherapy(deep hyperthermia instrument INDIBA)* [Dissertation]. Beijing: Capital University of Physical Education And Sports, 2015
(陈白玲. 热疗(深部温热仪 INDIBA)配合手法拉伸用于缓解颈部活动受限的研究[学位论文]. 北京: 首都体育学院, 2015)
- [44] Lei J H, Wang R S. Research Progress of Whole Body Hyperthermia. *Medical Recapitulate*, 2009, 15(04): 582-584
(雷金华, 王仁生. 全身热疗的研究进展. 医学综述, 2009, 15(04): 582-584)
- [45] Huang H. *The clinical observation of Dicogenic low back pain treated by the massage combined with thermotherapy* [Dissertation]. Hubei: Hubei university of Chinese Medicine, 2013
(黄海. 推拿手法结合热疗治疗椎间盘源性下腰痛的临床疗效观察[学位论文]. 湖北: 湖北中医药大学, 2013)
- [46] Li J L, Cao X X, Wang H R, et al. Technical research and implementation of improving the laser navigation precision of mobile robots. *Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2020, 2(03): 4-10
(李金龙, 曹喜信, 王浩然, 等. 提升移动机器人激光导航精度的技术研究与实现. 微纳电子与智能制造, 2020, 2(03): 4-10)
- [47] Zhang W Q. Intelligent Mobile Robot Technology Status and Prospects. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2016, (08): 130

- (张文前. 智能移动机器人技术现状及展望. 电子技术与软件工程, 2016, (08): 130)
- [48] Li L, Ye T, Tan M, et al. Present state and future development of mobile robot technology research. *Robot*, 2002, (05): 475-480
(李磊, 叶涛, 谭民, 等. 移动机器人技术研究现状与未来. 机器人, 2002, (05): 475-480)
- [49] Zhang Q Y, Zhang Y, Li C, et al. Application of BP neural network based on genetic algorithm optimization in Chinese medicine massage robot. *Applied Science and Technology*, 2017, 44(2): 73-77
(张秋云, 张莹, 李臣. 遗传算法优化 BP 神经网络在中医按摩机器人中的应用. 应用科技, 2017, 44(2): 73-77)
- [50] Sun C F, Tang X Y, Shi P, et al. Research progress and key technology analysis of massage robot at home and abroad. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 2024, 43(02): 166-174
(孙晨飞, 唐心意, 石萍, 等. 国内外按摩机器人研究进展及关键技术分析. 生物医学工程研究, 2024, 43(02): 166-174)
- [51] Minyong P, Mouri K, Kitagawa H, et al. Hybrid impedance and force control for massage system by using humanoid multi-fingered robot hand // *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Canada, 2007: 3021-3026
- [52] Zhou Z, Wang Y, Zhang C, et al. Design and Massaging Force Analysis of Wearable Flexible Single Point Massager Imitating Traditional Chinese Medicine. *Micromachines*, 2022, 13(3): 370
- [53] Choi, Y.I, Kim, K.O, Chung, J.W. et al. Effects of Automatic Abdominal Massage Device in Treatment of Chronic Constipation Patients: A Prospective Study. *Dig Dis Sci*, 2021, 66(9): 3105-3112
- [54] Zhao W C. *The design and research of the mechanism of the massage manipulator* [Dissertation]. Anhui: Anhui University of Technology, 2018
(赵维超. 按摩机械手机构的设计与研究[学位论文]. 安徽: 安徽工业大学, 2018)
- [55] Yu K, Ning M, Huang B, et al. Design and Research of a New Type of Massage Hand Based on Chinese Massage. *Massage*, 2021, 37(03): 22-28
(余可, 宁萌, 黄彪, 等. 基于中医推拿的新型按摩手的设计与研究. 机械设计与研究, 2021, 37(03): 22-28)
- [56] Lan F B, Zhao W B, Zhu K, et al. Development of Mobile Manipulator Robot System with Embodied Intelligence. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(01): 139-148
(兰泮卜, 赵文博, 朱凯, 等. 基于具身智能的移动操作机器人系统发展研究. 中国工程科学, 2024, 26(01): 139-148)
- [57] Xu W J, Liu F H, Tao D H, et al. Development and application of an intelligent moxibustion equipment. *Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2017, 51(5): 17-19
(徐炜君, 刘凤辉, 陶东华. 一种智能艾灸设备的研制与应用. 上海中医药杂志, 2017, 51(5): 17-19)
- [58] Bai S M, Cui J, Zhang Z D, et al. Manipulative Control Algorithm of Moxibustion Robot Based on 6-DOF Manipulator. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(6): 2403-2410
(白善明, 崔娟, 张志东, 等. 基于六自由度机械臂的艾灸机器人手法控制算法. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2403-2410)
- [59] Lu S Y, Li C. Research progress of key technology of Chinese medical massage robot. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2017, 32(1): 9
(鲁守银, 李臣. 中医按摩机器人关键技术研究进展. 山东建筑大学学报, 2017, 32(1): 9)
- [60] Dani A, Kan Z, Kamalapurkar R, et al. Editorial: Safety in Collaborative Robotics and Autonomous Systems. *Front Robot AI*, 2022, 9: 949214
- [61] Sadeghi Z, Alizadehsani R, CIFCI M A, et al. A review of Explainable Artificial Intelligence in healthcare. *Computers and Electrical Engineering*, 2024, 118: 109370
- [62] Wani A N, Kumar R, Mamta, et al. Explainable AI-driven IoMT fusion: Unravelling techniques, opportunities, and challenges with Explainable AI in healthcare. *Information Fusion*, 2024, 110: 102472