

针刺疗法的力学基础*

季恒¹, 谭为康¹, 巫桐雨¹, 舒文雅¹, 吴啸²,
亚晓旭³, 纪昌春⁴, 王欣君⁵, 韩玉龙¹

1. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016;
2. 南京纯白矩阵科技有限公司, 南京 210000;
3. 首都医科大学附属北京中医医院, 北京 100010;
4. 陕西省中医医院, 西安 710003;
5. 南京中医药大学 针药结合教育部重点实验室, 南京 210023)

(我刊青年编委韩玉龙来稿)

摘要: 针刺疗法的有效性已被大量研究证实,许多国家将其纳入医疗系统.但是,针刺疗法的发展仍存在一些挑战,如针刺过程量化方法缺乏、针刺技术传承困难、穴位定位精确度不足等.随着近年来多学科交叉的发展,尤其是工程科学与医学的结合,为解决针刺技术中存在的问题提供了新的思路和方法.该文综述了针刺技术中力学核心要素的历史发展,包括力学刺激工具(针具)、针刺过程(刺入及行针阶段)和力学刺激对象(穴位)三个部分.通过对这三个力学要素的剖析,总结了其对针刺过程和治疗效果的量化研究及影响.同时,梳理了在针刺量化研究中的力学实验及模型,深化了对针刺过程的理解.总结了针刺机器人前沿的研究成果,及其在提升针刺技术传承、推动针灸国际化进程中的作用.最后,展望了针刺力学研究的发展方向.

关键词: 针刺力学; 力学刺激核心要素; 针刺力学模型; 针刺机器人

中图分类号: O34; Q66 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450132

The Mechanics Basis of Acupuncture Therapy

Ji Heng¹, Tan Weikang¹, Wu Tongyu¹, Shu Wenya¹, Wu Xiao²,
Ya Xiaoxu³, Ji Changchun⁴, Wang Xinjun⁵, Han Yulong¹

1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R.China;
2. White Matrix Inc., Nanjing 210000, P.R.China;
3. Department of Dermatology of Beijing Hospital of Traditional Chinese Medicine, Beijing 100010, P.R.China;

* 收稿日期: 2024-05-10; 修订日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(32271296;12202193;82074560);针药结合教育部重点实验室开放课题(zykf202308);陕西高校青年创新团队

作者简介: 季恒(2000—),男,硕士生(E-mail: jiheng0012@163.com);
亚晓旭(1988—),男,主治医师,硕士(E-mail: jamesyxx@163.com);
纪昌春(1984—),男,副主任医师,博士,硕士生导师(E-mail: doctor612526@126.com);
王欣君(1977—),男,副主任医师,博士,硕士生导师(通讯作者. E-mail: nj_drwang@163.com);
韩玉龙(1988—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: hanyulong@nuaa.edu.cn).

引用格式: 季恒,谭为康,巫桐雨,舒文雅,吴啸,亚晓旭,纪昌春,王欣君,韩玉龙. 针刺疗法的力学基础[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(6): 803-822.

4. *Shaanxi Hospital of Traditional Chinese Medicine, Xi'an 710003, P.R.China;*
5. *Key Laboratory of Acupuncture and Medicine Research of Minister of Education, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, P.R.China)*
(Contributed by HAN Yulong, M.AMM Youth Editorial Board)

Abstract: The effectiveness of acupuncture therapy has been confirmed by numerous studies and incorporated into healthcare systems in many countries. However, the acupuncture therapy still faces some challenges, such as insufficient quantification of the acupuncture process, difficulties in inheriting acupuncture techniques, and inadequate accuracy in acupoint positioning. With the development of interdisciplinary integration in recent years, particularly the integration of engineering and medicine, new perspectives and methods have been proposed to address these challenges in acupuncture techniques. The historical development process of the core mechanical elements in acupuncture techniques was reviewed, including the mechanical stimulation tools (needles), the mechanical stimulation stages (insertion and manipulation stages), and the mechanical stimulation targets (acupoints). Through a comprehensive analysis of these 3 mechanical elements, their quantification and impacts on the acupuncture process and therapeutic effects were summarized. Meanwhile, relevant mechanical experiments and models conducted in quantitative acupuncture research were comprehensively recommended, to deepen the understanding of the acupuncture process. Then the cutting-edge research achievements in acupuncture robots were summed up, aimed to enhance the inheritance of acupuncture techniques and promote its international standardization process. Finally, this article outlines the future research direction of acupuncture mechanics.

Key words: acupuncture mechanics; core elements of mechanical stimulation; acupuncture mechanics model; acupuncture robot

0 引 言

根据世界卫生组织(WHO)2020年全球报告,针灸疗法在世界各地应用广泛^[1],已被193个国家和地区所接受^[2]。此外,一些国家已经将针灸纳入医疗保险和法律法规,并逐渐将其融入主流医疗体系^[3]。在美国,针灸从业者每年进行的针刺治疗次数超过了1 000万次;在英国,临床医生每年操作的针刺治疗次数超过了400万次^[4]。各国临床实践的增加为临床研究提供了大量的数据,证实了针刺穴位的有效性^[5],引起了科学工作者们的极大兴趣。

尽管中医针灸源自道医针灸,但两者存在较大的差异^[6]。从理论依据来看,中医针灸是根据阴阳五行学说和《黄帝内经》进行辨证施针施治。而道医针灸则是依据《道德经》《黄帝内经》进行辨证施治,是以形神兼治为手段的医学,从而发展为“道医学”流派^[6]。在穴位选择和行针手法上,道医针灸与一般针灸有着明显的区别,尤其在行针手法上更为独特,常常出现相同穴位但手法不同,疗效迥异的情况^[7]。因此,对于道医特殊的行针手法进行详细描述是非常必要的。道医对中医的理论发展起到了积极的推动作用,并对现代化中医的保护和传承起到了重要作用。

不论是道医针灸或是中医针灸,虽然存在差异,但是针灸的内在力学方法和原理是统一且较为普适的。在针灸学的范畴中,既存在针刺疗法,也包括艾灸疗法^[8]。其中,针刺疗法是中医学极其重要的组成部分,其产生疗效的作用基础包括针刺技术和针刺对象(包含经络、穴位)两方面。对于针刺技术,本质上是手持针发力,使针灸针在体内进行运动的过程。目前是“心传口授”的传承模式,此模式仍存在针刺过程难以量化的问题。例如,行针手法操作是否准确、针刺是否得气,造成不同人操作的效果差异较大。与单一力学刺激相比,针刺结合艾灸形成的温针疗法中存在热-力耦合刺激,物理过程更为复杂且难以科学描述。对于针刺对象(包含经络、穴位),也存在穴位的量化问题。例如,古代触摸诊穴的机制不清晰,造成针灸初学者选穴困难。为了解决这些问题,本文认为针刺疗法和力学学科交叉能够实现穴位选取、针刺技术的定性和定量描述,形成针刺疗法的标准和规范,突破针刺技术“心传口授”的传承模式,极大推进针刺疗法的广泛应用和针灸事

业的复兴。

本文从力学和中医多学科交叉的角度,系统综述了针刺入穴位的物理过程、针刺过程量化描述方法、针刺疗法的标准化等研究,希望为解决针刺过程量化方法缺乏、针刺技术传承困难、穴位定位准确度不足和针灸医师短缺等问题提供研究思路。本文首先总结了针刺中力学核心要素(针具、针刺过程、穴位)的历史演化,其次探讨了不同要素对针刺力学过程和疗效的影响。此外,综述了相关的力学实验和模型,并归纳了针刺机器人的现代化成果。最后,展望了针刺力学研究的未来方向。

1 针刺中的力学核心要素

1.1 力学刺激工具——针具的历史演化

针具的历史演化经历了起源、形成、完善、创新四个阶段(图1)。砭石是针具的“起源”阶段,出现了软组织感染的切开技术;九针是针具的“形成”阶段,出现了对内外科各科疾病的刺破、切割、提插、捻转等成体系的针刺技术动作;特种针具是针具的“完善”阶段,针对特种疾病、特种部位发明出了长度、直径、形状特殊的针刺工具;现代创新针具是针具的“再创新”阶段,结合现代科学技术,出现了精准化和复合化的现代针刺技术^[9],其中针刺机器人是现代科技与针刺技术相结合的最新成果。

从力学的角度看,人们之所以不断推动针具的历史演变,实质上是被针刺疗法中的力学运用越来越精准的需求所推动。起源阶段的砭石太粗糙,在使用过程中难以避免操作损伤,无法进一步提高治疗痈疡类疾病的疗效。在龙山文化遗址中发现石器时代的锥形砭石,只能用作简单切开的力学刺激^[10]。形成阶段的九针更精细,能够实现多种精准操作,既降低了损伤,又提高了疗效,扩大了疾病治疗范围。西汉时期由长毫针形成的金针^[11],可用于各种疑难病症。九针中的锋针在北宋时期,开始被称为三棱针,在主治范围、放血量等方面更加完善,用来达到刺血泻络的功效^[12]。完善阶段的特种针具,则是由于疾病部位的精准操作要求而出现的,扩展了针具的外科适应症范围。如明清时期出现的蟒针,由长针和大针演变而来^[13],用于治疗多种脑病。在创新阶段,现代声、光、电、热等物理化学技术发展,以及现代医学对人体更为深刻的认识,大大提高了针具的安全性和可操作性,并且创新出了大量新式针具。如行针手法量化仪器的发展^[14],手术机器人的研发^[15],针刺机器人的研究^[16],使针刺技术呈现精准化、复合化的发展。针具演变的多样性,为找出适合不同病情治疗的针具创造了条件,推动了针刺技术的进步,提高了治疗的安全性和有效性。

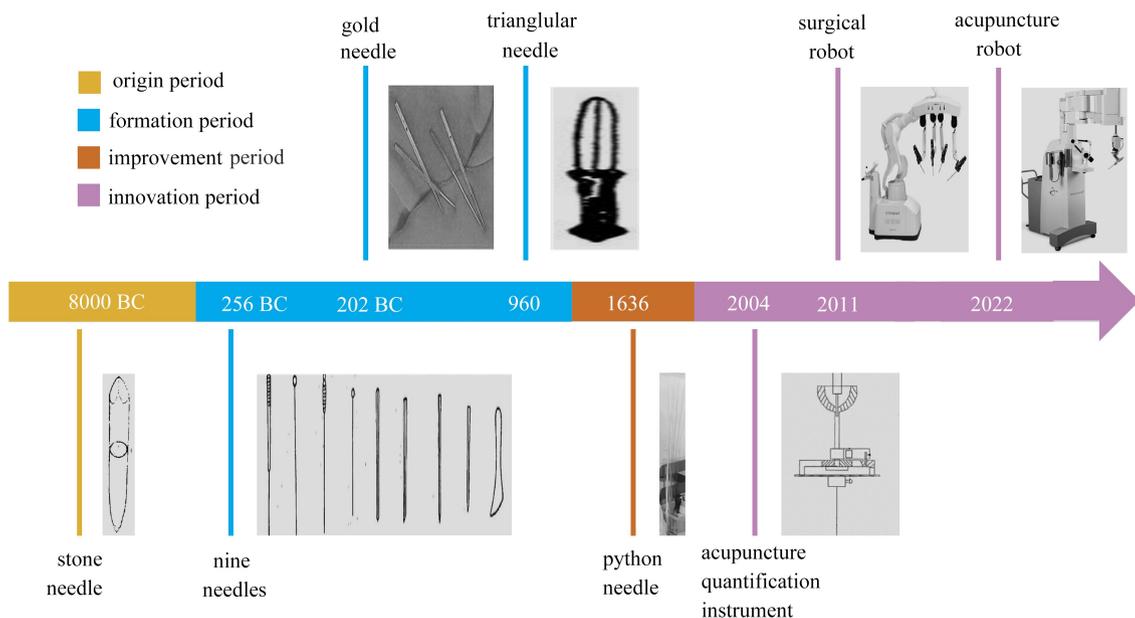


图1 力学刺激工具的历史演变

Fig. 1 The historical evolution of mechanical stimulation tools

从针具材料的角度来看,伴随人类历史的发展,冶炼金属的能力不断提升,符合时代发展的针具材料也

不断更新迭代。在石器时代,砭石针为主要的针刺工具。到了殷商时期,铜的合金冶炼技术发展较为成熟,青铜针的出现标志着金属针具时代的开始。青铜针材质较硬,较砭石更为锋利,针身更细、更光滑,但是其韧性仍较差。其行针手法是以单纯针刺为主^[17]。从原始社会走向封建社会,生产力得到了大幅度提升,冶铁技术推动了铁制针具的产生。铁针质地较为粗糙,且缺少韧性、弹性。这一时期的手法轨迹主要是直线型,均以提插手手法为主,流畅的捻转手法则较难实现,这可能与此时期冶铁合金技术尚不能生产出具有较好韧性和硬度的合金针有关。到了南北朝时期,锻化处理技术更为成熟。这一时期出现了金针、银针,其质地较软,不易折断,针体较粗^[18],不宜进行大幅度的行针操作。金银针由于材质稀缺、不耐高温、强度不够等缺点,未能普及使用^[17]。近代以来,由于合金冶炼技术的大幅度提升,针刺实践过程中多使用不锈钢针^[18]。不锈钢针综合了其他金属针具的一些优点,如不易弯折、锐利、光滑等,其柔韧性、粗细度均较合适。针具材料的创新和变革有力促进了针刺医学的发展,针具材料的历史演变,不仅在临床上使得传统针刺疗法得到进步,还使得软组织损伤治疗范围得到提高,同时也为无痛无伤的针灸疗法的发展奠定了物质基础。然而,针具的材料是否对刺激量、治疗效果存在影响还未有定量报道,探索适合于不同症状的针具材料是未来的研究方向之一。

1.2 力学刺激过程——针刺过程的历史演化

在力学刺激的历史演化中,针刺过程分为刺入和行针手法阶段。刺入阶段指抵达病灶的过程,行针手法阶段指施针并得气的过程。刺入和行针手法阶段均对治疗疗效有着重要的影响,比如针刺深度、行针频率、行针时间、行针间隔等力学参数,这些参数在历史实践中逐渐发展并完善。

对于刺入阶段涉及的力学参数,包括载荷大小、针刺深度、针刺速度等。由于其中一些参数的记载较少,本小节的叙述将以针刺深度为主。在《针灸甲乙经》卷三载:“上星一穴……刺入三分”“合谷……刺入三分”,对每一个腧穴的针刺深度进行了具体的阐述,古代医师对于针刺的深浅已有初步的定量标准^[19]。元代窦汉卿《针经指南》描述:“随吹下针,至六七分,肾肝之部,停针……然后针至三四分,及心肺之部……。”转换为国际长度单位可以确定,提插的幅度约为 10 mm,针刺深度约为 20 mm^[20]。明代杨继洲《针灸大成·三衢杨氏补泻》中描述:“渐渐运入一寸之内,三出三入,慢提紧按……退至五分之中,三入三出……”,同样转换为国际长度单位,提插的幅度约为 16.5 mm,针刺深度约为 33 mm^[21]。如今,随着中医科学化的进程,应从科学的角度研究针刺力学问题,其中力学刺激量是一个纯量学问题,需要对力学刺激过程中不同影响因素进行量化描述。

行针手法阶段指对刺入人体的针体做提插或捻转等动作,使受针者达到得气的阶段。得气是指病人出现酸、麻、胀、重等感觉,同时行针者觉得针下沉紧,则是针刺产生疗效的关键^[22]。有学者研究表明,得气是由于细胞外基质的组成变化进一步调整了力学信号在细胞间的传递^[23]。在手法操作针体时,胶原纤维细胞外基质发生变形,从而将力学信号传递给纤维原细胞等,这种力学信号的连续传递可以引导得气现象并产生针刺疗效^[24]。因此,在传统的针刺典籍中,行针手法被广泛研究并记载^[25]。在《黄帝内经》所在的古典医籍时期,“切而转之”“微旋徐而推之”或“刺之切而伸之”中的伸和推是指提插手手法(图 2(a)),指利用针灸针的直线运动进行机械力刺激;旋和转是指捻转手法(图 2(b)),指利用针灸针的旋转运动进行机械力刺激^[26]。在《针灸问对》中,有“摇以行气”的记载,其中的摇法是指手持针柄,将针身轻轻摇动的方法^[27](图 2(c))。在《医学入门》中,“将大指爪从针尾刮到针腰,此刮法也”。其中的刮法是指向上刮带有提力,向下刮带有插力,同时带动针柄摆动的手法^[28](图 2(d))。

随着现代研究的深入,行针手法由单一的垂直力或水平力向多种作用力相结合的方向发生改变,并不断演变。这样的演变规范了操作者在临床实践中的手法,即根据不同的病因选用不同的手法。中华人民共和国成立后的《针灸学》教材按照针刺不同阶段,将行针手法分为基本手法和辅助手法两类。提插、捻转为基本手法,主要用于促使针刺得气和进行治疗操作;搓柄法、摇法、飞法等为辅助手法,主要用于增强和引导针感(表 1^[29])。其中的搓柄法是捻转与提插的复合作用力,这样的复合应用有很大的临床价值。随着行针手法的发展,搓柄法逐渐被飞法取代。原因在于其容易因捻转变紧,令肌纤维缠针,而产生剧痛、滞针现象,初学者难以掌握。指甲刮针柄也慢慢演变为中指爪甲刮柄法(简称刮柄法),用食指或中指弹动针柄发展为用手指弹动就称为弹动法。除此以外,震颤法的使用频次和病种数在辅助行气手法中高于搓柄法,贯穿行针手法演变的

始终,是一种高频率的提插与捻转相结合的多作用力手法^[29]。手法种类的演变明晰了针刺技术操作的要求,为解决行针手法的传承和教学问题提供了理论上的指导,促进了行针手法技术规范化的进程,使利用力学原理对针刺过程量化描述成为可能。

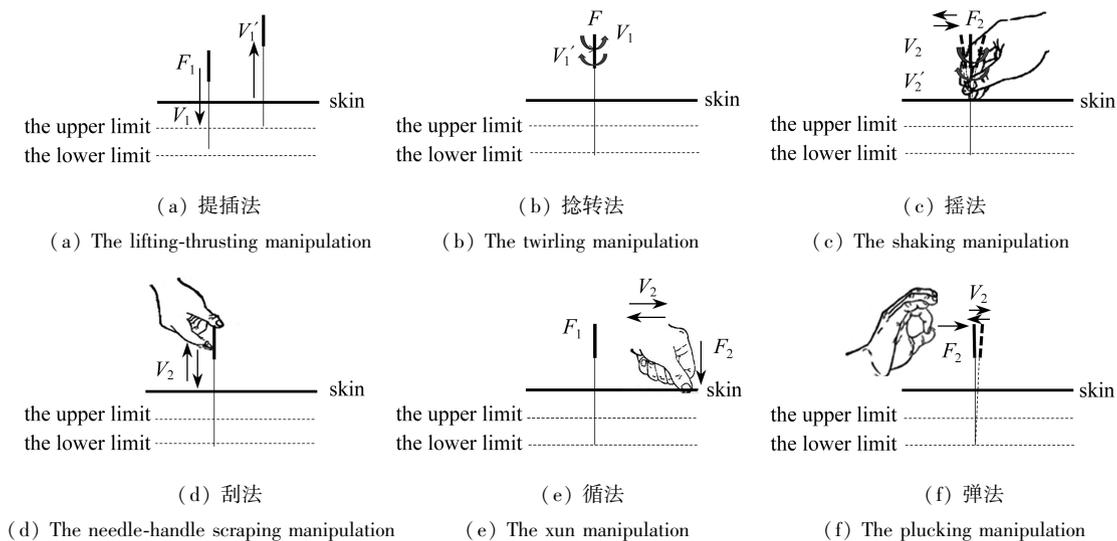


图 2 行针手法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of acupuncture manipulations

表 1 辅助行针手法近代历史演变^[29]

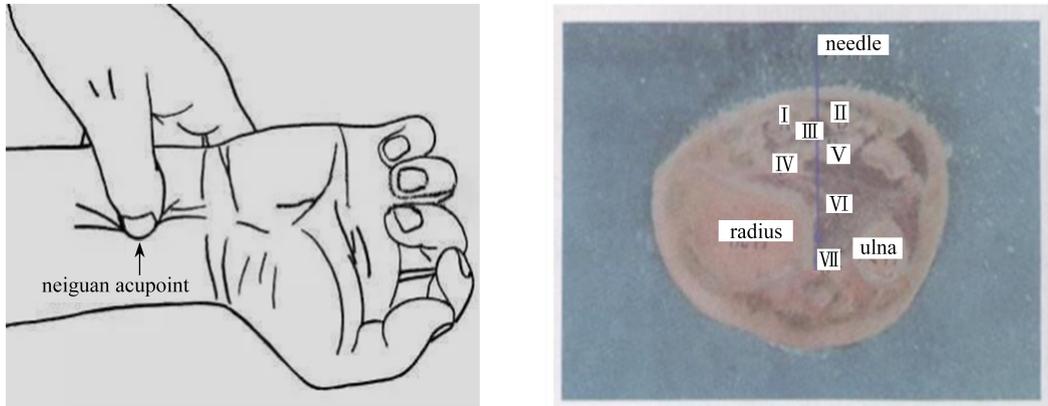
Table 1 The modern historical evolution of auxiliary acupuncture manipulations^[29]

	time					
	1961	1964	1975	1979	1997	2016
auxiliary acupuncture manipulations	nail scratching needle-handle	needle-handle	needle-handle	needle-handle	needle-handle	needle-handle
	scraping manipulation	scraping manipulation	scraping manipulation	scraping manipulation	scraping manipulation	scraping manipulation
	knocking needle-handle	plucking manipulation	plucking manipulation	plucking manipulation	plucking manipulation	plucking manipulation
	plucking manipulation					
	sticking and vibrating manipulation					
		zhixun manipulation		xun manipulation	xun manipulation	
				needle-twisting manipulation		
				shaking-handle manipulation	shaking manipulation	

1.3 力学刺激对象——穴位定义的历史演化

穴位是产生针刺疗效的作用基础,穴位接受针刺力学刺激,将针刺刺激产生的物理信号转换为能引起机体效应的生物信号,通过调节经络系统,激发和强化机体对靶器官的良性调节功能,从而达到防病治病的目的^[30]。大量实验证明针刺穴位的临床疗效优于非经非穴,针刺肺俞穴能够提高人体的肺活量^[31],而针刺非经非穴位区则无此作用;在醒脑开窍法中,针刺内关穴能有效改善脑梗塞急性期神经功能缺损^[32],该针法疗效明显优于非经非穴位组。通过将穴位与非穴位区进行比较,发现针刺只有作用于穴位才能有一定的临床效果。但是穴位的定义仍不清楚,古代触摸诊穴机制也不清晰,需要定量描述穴位热学、电学、力学以揭示其机制。

作为力学针刺的对象,穴位的定义随着解剖学的发展由传统中医理论向现代化理论演变.在传统中医理论中,穴位又称腧穴,包含经穴、经外奇穴、阿是穴等.在《灵枢·小针解》中记载:“节之交,三百六十五会者,络脉之渗灌诸节者也”,即腧穴是脏腑经络气血输注于躯体外部的特殊部位,所以腧穴和脏腑气血相通^[33].这些古代传承下来的穴位常常利用触摸法来确定穴位,但缺乏精确的现代解剖学和生理学依据.近年来,由大量解剖研究发现,“穴位”本质上是神经支配着的密集的、易兴奋的皮肤-肌肉-神经三者的复合体^[34](图3,其中I、II、V为肌腱;III为指浅屈肌;IV为指深屈肌;VI为旋前方肌;VII为骨间膜),大多位于肌肉之间或肌肉和骨骼之间的结缔组织层^[35].原林等^[36]根据筋膜所处的解剖学部位,研究发现,针刺过程中所刺激的穴位组织是结缔组织的富集区.其中,皮下疏松结缔组织和肌间隔疏松结缔组织处穴位最多.楼新法等^[37]通过解剖已知穴位,进行穴位形态学的研究,也发现穴位是由多种组织共同构成的立体空间结构,与含有神经、血管的结缔组织密切相关.穴位的解剖学基础对人们想要了解穴位相关的特殊形态学结构有着重要作用.



(a) 内关穴位置

(a) The position of the neiguan acupoint

(b) 内关穴立体几何结构

(b) The 3D geometric structure of the neiguan acupoint

图3 内关穴示意图^[38]Fig. 3 Schematic diagram of the neiguan acupoint^[38]

2 针刺中的力学过程和问题

结合上述针刺过程中不同的力学核心要素,来描述其中的力学过程和存在的问题.针刺过程就是针具穿刺皮肤、肌肉、肌腱等多种组织的过程,受到以下三个因素的影响:刺激工具的力学参数(几何形状)、针刺过程的力学参数(幅度、频率、速度变化等)以及刺激对象的物理性质(电学、热学、力学),这些因素对针刺力学过程和治疗效果有重要影响^[39].

2.1 针具的主要力学参数——几何构型、材料

力学刺激工具的力学参数包括了针具的几何构型和材料,对针刺的力学过程具有重要影响,有利于提高疾病治疗的有效性和安全性,并推动针刺技术的进步.

针具按几何构型一般分为医用针(斜面针、棱形针、三面针)、锥形针、平头针和球形针(图4^[40]).在针刺的过程中,针具需要足够的穿刺能来克服穿刺阻力做功,刺破皮肤并抵达穴位.其中既存在针具与皮肤之间的摩擦,也存在应变能或断裂能^[41].针具的几何构型对最大穿刺阻力、摩擦和穿刺能等具有重要影响.穿刺阻力所需要的穿刺能取决于两种能量的贡献,即储存在皮肤中的应变能或裂纹扩展的断裂能^[42].摩擦的变化受针具几何构型的影响较大,有研究表明最大穿刺阻力取决于针具与组织接触面积的大小^[43].想要减少摩擦带来穿刺阻力变化的影响,需要利用不同几何构型的针具调节接触面积.对于穿刺能的能量来源,医用针与非医用针有很大不同.医用针穿刺组织是一个经过缓慢切割逐渐进入组织的过程,实验证实当针力达到最大穿刺阻力后,略有下降,然后达到平缓^[44],这主要与断裂能有关^[45].然而,非医用针穿刺组织是一个突然穿刺组织的过程,实验证实球形针在最大穿刺阻力下发生瞬间穿刺,这主要与皮肤本身的应变能有关^[43].因此,将Lake等^[46-47]提出的裂纹扩展原理推广到针刺过程的情况下,断裂表面积单位增加所对应的总能量释

放率 G 为

$$G = T + P, \quad (1)$$

其中, P 为穿刺能, T 为应变能或断裂能. 总断裂能 G 是恒定的, 断裂能或应变能 T 的增加对应于穿刺能 P 的减少. 由此看出, 不同几何构型的针具导致针刺过程的穿刺能所需要的能量形式发生变化, 掌握这种变化规律有助于实现力学刺激的精准控制, 从而推动针刺治疗逐渐走向合法化和规范化, 让世界不再排斥针刺, 让世界能看见中国的针刺.

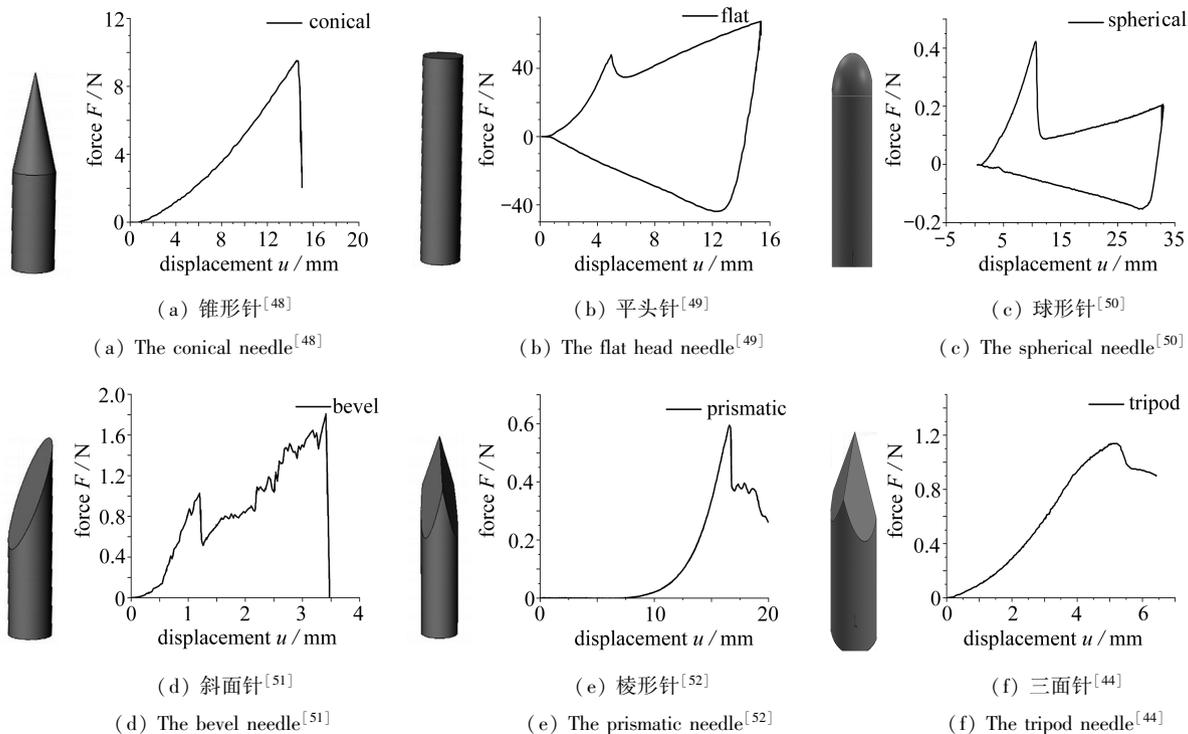


图4 不同几何形状针头对应的载荷-位移图^[40]

Fig. 4 Load-displacement diagrams corresponding to needles with different geometric shapes^[40]

2.2 针刺过程的主要力学参数

针刺过程包括了刺入阶段和行针手法阶段, 其中刺入阶段已在 2.1 小节中进行了详细的叙述, 此处只围绕行针手法阶段中的力学参数展开. 在行针手法阶段中, 如提插、捻转等不同的行针手法有不同的针刺轨迹, 可以通过幅度、频率、速度变化等力学参数来定量刺激量. 力学刺激量的大小与针刺疗效密切相关, 不同的力学刺激量所取得的临床疗效也不相同^[53]. 现阶段, 中医领域主要关注行针手法是否能够达到得气的效果, 与之相关的主要力学参数难以定量描述.

捻转手法可用幅度、频率、时间 3 个刺激变量进行定量描述并探究与补泻手法的关系^[54]. 捻转手法中的幅度是指圆周运动角度, 频率是指单位时间的针刺次数, 时间是指单次治疗的行针操作时间. 石学敏院士等提出, 捻转时小幅度、高频率是补法, 大幅度、低频率是泻法^[55], 施行捻转补泻手法的最佳持续时间是每个穴位 1~3 min 左右^[56]. 胡银娥和刘堂义等^[57]对捻转手法进行量化, 小刺激量捻转幅度 90°, 频率 60 次/min; 中刺激量 360°, 频率 120 次/min; 大刺激量 720°, 频率 180 次/min. 高武^[58]在《针灸聚英》中独独保留单次捻转完成频率的要求, 而对幅度、总捻转时间并未提出要求. 可见, 捻转补泻手法中频率或许处于核心的地位, 这需要进行进一步研究^[54].

提插手法可用作用力大小、速度变化、幅度 3 个刺激变量进行定量描述刺激量大小并探究与补泻手法的关系^[59]. 古代医师用“轻”“重”指提插用力大小, 反映了下插与上提的手感阻力差别, 上提阻力小, 手下感“轻”, 下插阻力大, 手下感“重”. 用“急”“慢”指提插运动的速度变化, 其中“急”指补法下插阶段和泻法上提阶段的速度变化, “慢”指泻法下插阶段和补法上提阶段的缓慢复位、速度无变化^[59]. 在补时“轻手”, 用力小, 速度变化小, 刺激量也就小; 泻时“手要重”, 用力大, 速度变化大, 刺激量也就大^[60]. “豆许”“一寸”指提

插手法中幅度,即指针体垂直运动的范围.幅度对提插手法的刺激量进行量化,小刺激量提插幅度小于5 mm,中刺激量为5~10 mm,大刺激量大于10 mm^[60].幅度、作用力大小和速度变化是提插补泻手法的重要参数,它们一起构成了表现力学刺激量的综合指标.

2.3 穴位物理性质

穴位是疾病的反应点,内脏出现病理变化时,相关穴位也随之出现感觉异常、组织结构改变等病理反应,这些穴位的力学、电学、热学等物理特性也会出现对应变化^[61].同时,穴位特性的研究不应被局限在单一物理特性的分析框架内,而应全面考量热-力-电生理的复杂耦合作用.这一点对于揭示结合了热、力多重刺激的温针灸疗法机理尤为重要.在针灸疗法中,把艾条段固定在针具的针柄上,将针刺疗法和艾灸疗法结合在一起形成温针灸疗法^[62](图5),功效大于单独的针刺疗法或艾灸疗法.温针灸将两种传统中医疗法相结合,需要量化穴位处的力学、热学特性^[63]并深入探索力-热耦合行为,这对穴位问题的定量化描述具有重要意义.

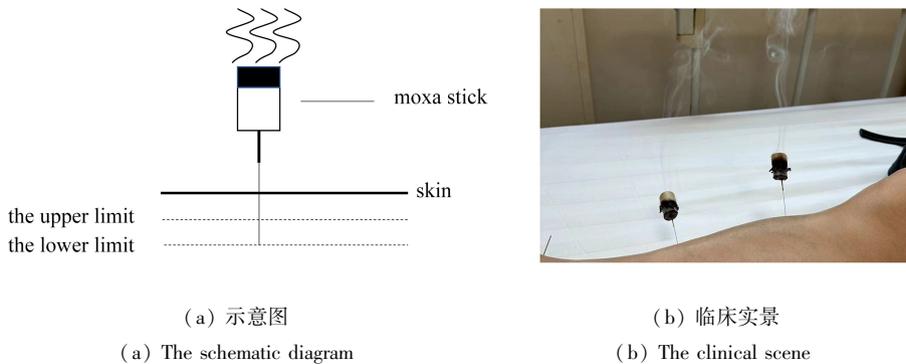


图5 温针灸

Fig. 5 The warm acupuncture and moxibustion

对人体穴位力学特性进行研究发现,穴位处所受的机械力刺激比起非穴位处更敏感,会发生形态改变(皮下增厚、粗糙等)或功能改变(酸胀、刺痛)^[64],其原因是穴位处组织因神经源性炎性反应而使皮肤处于水肿等高张力病理状态^[65].穴位处的形态变化,导致刚度大于非穴位处,临床常常利用按压诊法和压痛仪检测法来确定穴位^[66-67].施静等^[66]实验发现压痛点出现在穴位上及其附近,故而目前对皮肤等穴位主要组成部分的力学性能研究仍然停留在宏观层面,缺少对穴位处各个组织的弹性模量等性能的测量实验.

对人体穴位热学特性的进行研究,通过检测人体穴位处和非穴位处红外辐射的光谱信号,发现它们的热学反应是不一样的^[68](图6(a)、6(b)、6(c)).穴位与非穴位区的红外辐射强度的差别较大,引起这种差异的主要原因是人体体表的温度以及温度分布的非均匀性^[69].所以,人体的红外辐射特性,大多数都是对人体的红外温度变化进行研究.张明健等^[70]发现穴位热学特性能够客观反映机体的寒温变化,非穴位则不能反映温度变化.穴位红外辐射温度会随月经出现而发生周期性变化,证实了穴位经络功能与体内红外传输有密切关系.因此观察穴位区与非穴位区红外辐射的光谱,掌握穴位红外辐射温度的相关数据,进一步研究穴位的热学特性,对选择定量穴位的技术有重大意义.

对人体穴位电学特性的研究发现,穴位处与非穴位处相比较,低电阻特征并非普遍存在,而低惯性特征则具有普遍性^[71-72].低电阻特征通过伏安面积来反映,伏安面积为增程与横轴构成的几何面积加上减程与横轴构成的几何面积,可折算成电阻值^[73];低惯性特征通过惯性面积来反映,惯性面积为增程与减程构成的几何面积.与非穴位相比,惯性面积越小,则穴位对电能传输的畅通性更高^[73].伏安面积和惯性面积是伏安特性曲线的量化指标,通过对伏安特性曲线的量化分析,来描述穴位与非穴位的区别.伏安特性曲线具有非线性、惯性两大特征^[73](图6(d)、6(e)、6(f)).非线性特征由于组成穴位的介质在空间分布上是不均匀和各向异性的,穴位电阻具有不同于线性电阻的典型特征^[74].惯性特征是指伏安曲线的增程曲线与减程曲线之间不重合.其中穴位惯性面积比伏安面积更能敏感地反映人体病理变化,应是今后穴位电学特性研究的重要指标.但是,由于惯性面积测量难度较大,目前仍然以伏安面积的研究为主.因此,通过对人体穴位动态非线性低电阻特征的检测,分析出人体经络脏腑病变情况,可以进行定量的中医辨证诊断和治疗^[75].

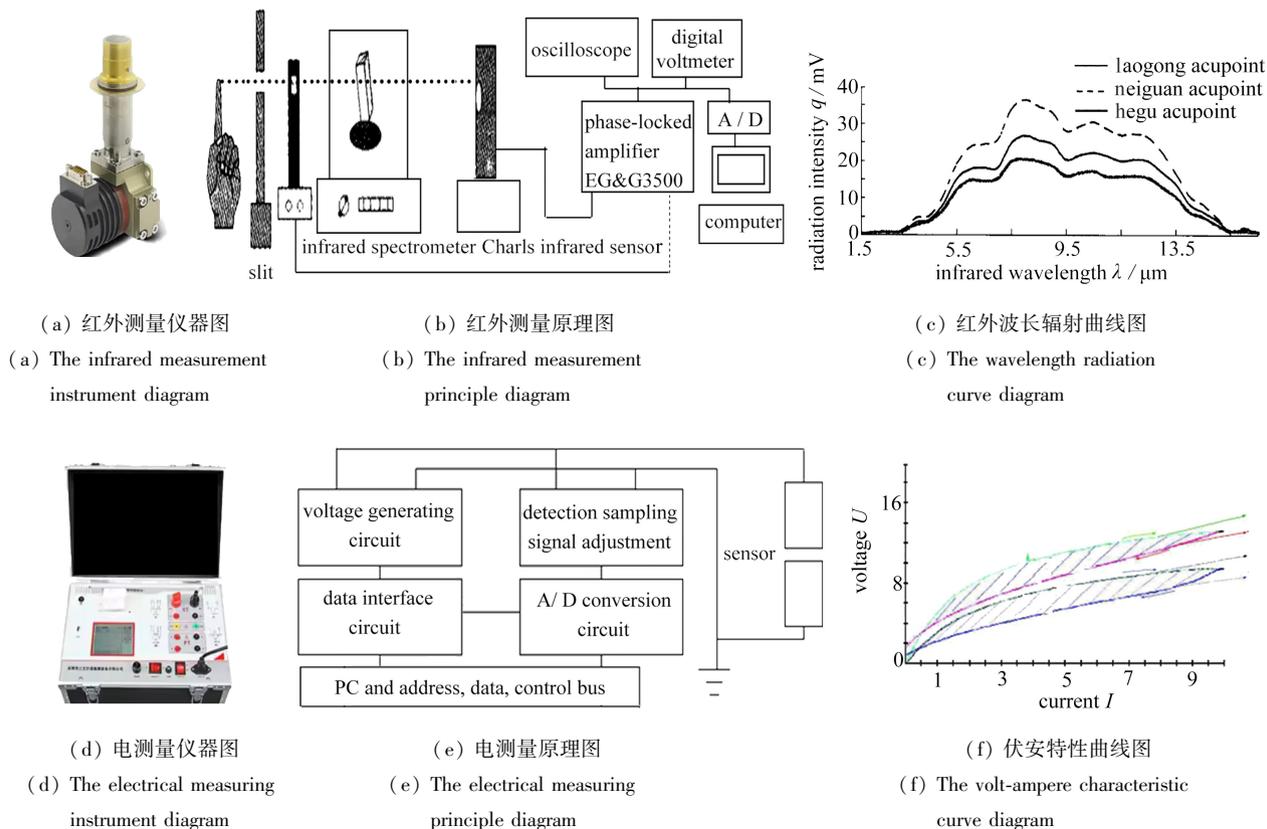


图 6 不同针灸测量手段原理及数据图^[69,74-75]

Fig. 6 The principle and data chart of different acupuncture measurement methods^[69,74-75]

3 刺入中的力学实验方法与理论模型

3.1 刺入过程的力学实验

在刺入过程中, 针具刺入皮肤表皮组织, 刺入是通过穿刺、撕裂或破裂等方法进行组织切割, 破开皮肤组织^[76], 抵达病灶. 该过程中, 针具需要足够的穿刺能来克服穿刺阻力做功, 刺破皮肤并抵达穴位. 其中既存在针具与皮肤之间的摩擦, 又存在材料中的应变能或裂纹扩展的断裂能^[41]. 通常将针刺入和皮肤之间的交互分为三个阶段, 即压痕阶段、穿刺阶段和针轴刺入阶段^[40].

压痕阶段即从针具尖端接触皮肤组织边界开始, 到突破组织边界(图 7(a)). 在压痕阶段, 针具的穿刺能仅取决于弹性形变, 随着载荷增加, 皮肤的形变超过一定的临界值, 达到应变能失效值, 组织就会产生裂缝, 针具就开始穿刺组织^[77]. Nguyen 等^[48] 搭建了 1137 通用试验机平台, 描述了皮肤的压痕过程, 测量了最大穿刺力, 发现最大穿刺力与针具尖端的几何构型相关, 提出了一种基于应变能随穿刺深度变化来评估穿刺过程中断裂能的方法. Fakhouri 等^[49] 搭建了针具在深压痕条件下进行软物质穿刺的实验平台, 测量了最大穿刺力和临界穿刺深度, 得出了主要的破坏模式——临界应力失效. 当针具移动到组织边界时, 针具尖端处的载荷增加, 接触区域周围组织的应力也增加. 根据 Kobayashi 等^[78] 搭建的横向针刺牛肝实验平台, 一旦这些应力超过临界值, 组织就会产生裂缝, 针就会开始穿刺组织.

穿刺阶段在皮肤组织边界被突破时开始, 在皮肤组织边界从针具尖端滑向针轴时结束(图 7(b)). 最大穿刺力与皮肤的固有应变能有关^[79], 通过穿刺各种类皮肤材料, 可以给针刺治疗提供量化数据, 帮助了解针刺对穴位组织的力学作用以及与生理反应之间的关联. 由于硅橡胶的韧性等本构模型接近于皮肤等软物质, Shergold 等^[80] 使用不同针头分别对硅橡胶进行穿刺实验, 发现橡胶出现不同的裂纹扩展形式. 但橡胶仍有局限性, 由于凝胶具有大应变弹性和热变异性的特性, 更加接近皮肤性能, Barney 等^[81] 采用数字图像相关 (DIC) 技术对针体刺入软固体 PDMS 时的应力应变场进行量化. 由于凝胶组织学单一, 不能完全模拟皮肤组织学, 而且研究发现当针头穿过皮肤组织内部边界时, 新刺入组织层的韧性明显低于现有组织层的韧性, 导

致裂纹不稳定扩展^[82],所以有必要进一步利用动物皮肤组织进行试验.Ocal等^[83]测量了牛肝各组织的弹性模量,Gokgol等^[84]连续两次刺入牛肝同一点测定各组织的断裂韧性,均证实了深层组织的韧性低于表层组织.这些实验有助于解释针刺的疗效和机制,并为针刺治疗的优化和标准化提供科学依据.

针轴刺入阶段开始于针轴和皮肤组织的接触(图7(c)).在这一阶段,所受到的穿刺阻力由两方面构成:针尖受到的切割力,以及由于针轴和组织之间接触面积增加而产生的摩擦力.Hing等^[85]搭建了双C臂透视实验装置,测量了切割力,提出了针具的轴向力由切割力和摩擦力组成的假设.这些实验可以帮助优化针刺技术、对针刺刺激量进行量化,并提高针刺过程的安全性和治疗效果.

综合现有研究来看,针刺的治疗效果是多种因素综合作用的结果,这些因素包括针刺过程和对对象等.因此,在对针刺过程进行研究时,需要结合力学实验与力学模型进行综合分析.

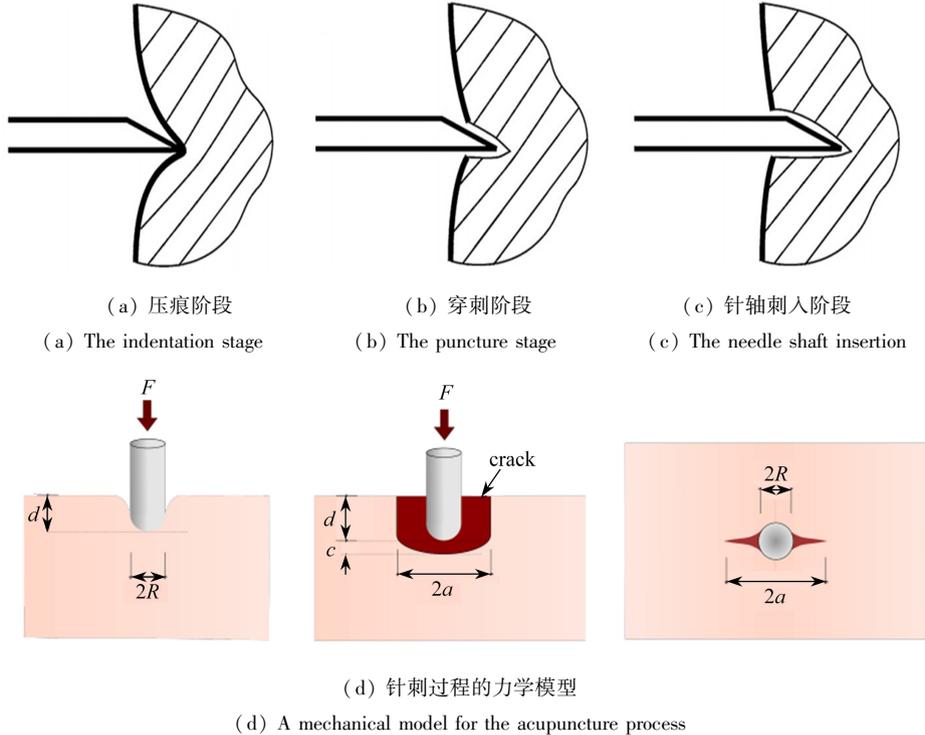


图7 针刺过程的基本阶段^[40,76]

Fig. 7 Basic stages of the needle insertion^[40,76]

3.2 刺入过程的力学模型

在深入研究针刺过程时,实验与理论模型的结合是不可或缺的.特别是针对针刺入皮肤这一关键步骤,我们通常采用实验手段来模拟和观察其过程,并借助多种力学模型对这些实验进行理论上的描述和预测.现有力学模型主要围绕针刺入的三个阶段展开,即压痕阶段、穿刺阶段和针轴刺入阶段^[40].

在压痕阶段中,经常通过压痕深度的变化来构建力学模型.Fregonese^[50]发现针具和材料之间的关系可以用无量纲力 $F_i/(\mu R^2)$ 和无量纲位移 d/R 来描述.对于非常小的压痕深度 ($d/R \ll 1$),可根据线弹性球形压痕的 Hertz 模型得到关系式:

$$\frac{F_i}{\mu R^2} \approx \frac{16}{3} \left(\frac{d}{R} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

其中, F_i 是压痕阶段施加在针具上的力, R 是针具半径, μ 是材料的剪切模量, d 是刺入深度.Fakhouri等^[49]用 Neo-Hookean 模型描述了深压痕过程中皮肤的大应变行为,预测大深度下 ($d/R \gg 1$) 的针刺载荷为

$$P = -\sigma_c R^2 = 0.26Ed^2 + \frac{8}{3} ERd, \quad (3)$$

其中, P 是压痕阶段施加在针具上的载荷, σ_c 是临界应力, R 是针具半径, E 是材料的弹性模量, d 是刺入深度.以上针对深压痕阶段的力学模型分析显示,针具的几何构型对该阶段材料压痕响应的影响很小.在压痕

过程中,材料中积累的所有应变能可以立即且完全地用于成核和扩展裂纹,进而使针具能够穿刺材料。

在穿刺阶段,研究者们采用了多种力学模型来预测和模拟这一过程。其中,Fregonese 等^[77]认为针穿刺材料所需的机械功 W_p 主要由断裂能 W_f 和间距能 W_s 两部分组成(图7(d))。断裂能是形成裂纹并扩展裂纹所需的能量,而间距能是需要克服摩擦来打开裂缝使针具可以滑进去所需的能量,得到的机械总功表达式为

$$W_p = 2ad \left(1 + \frac{c}{d} \right) G_c + \mu R^2 \hat{h} d, \quad (4)$$

其中, G_c 是材料韧性, μ 是材料的剪切模量, $2ad(1+c/d)$ 是裂纹面积, $2a$ 是裂纹扩展的长度,比率 c/d 取决于材料的性质,并与比率 R/d 成比例, \hat{h} 是无量纲参数,是比值 α/R 的函数。由以上公式计算出针在深度 d 处穿透试件所需的总功,对 d/R 求导,求得针具作用力

$$\frac{F_p}{\mu R^2} = 2 \frac{G_c}{\mu R} \frac{a}{R} + \hat{h}. \quad (5)$$

根据最小能量原理,我们假定裂纹尺寸达到 a^* 时,针穿入试样所需的力最小。这意味着在裂纹扩展过程中,裂纹尺寸 a 会不稳定增加,直到达到临界尺寸 a^* 后,裂纹扩展停止。在穿刺阶段,由于摩擦力的存在,模型预测显示穿刺力与针具半径相关,从而分析不同半径对皮肤组织的穿透力学作用。Azar 等^[86]建立了断裂力学模型,当锥形针具穿刺组织时,裂纹在其尖端扩展,整个针刺过程的能量平衡方程如下:

$$Fdu + dU_i = J_{IC}dA + d\Delta + Pdu, \quad (6)$$

其中, Fdu 是针刺入力 F 对增量 du 所做的功, U_i 是压痕前材料内部存储的应变能, $J_{IC}dA$ 是断裂能, J_{IC} 是临界断裂韧性, dA 是裂纹面积增量, $d\Delta$ 是存储应变能的变化量, Pdu 是摩擦力 P 沿着针轴所做的功。在穿刺阶段,由于针具位移等于裂纹扩展,因此针刺力所做的功为

$$Fdu = J_{IC}dA + d\Delta + Pdu, \quad (7)$$

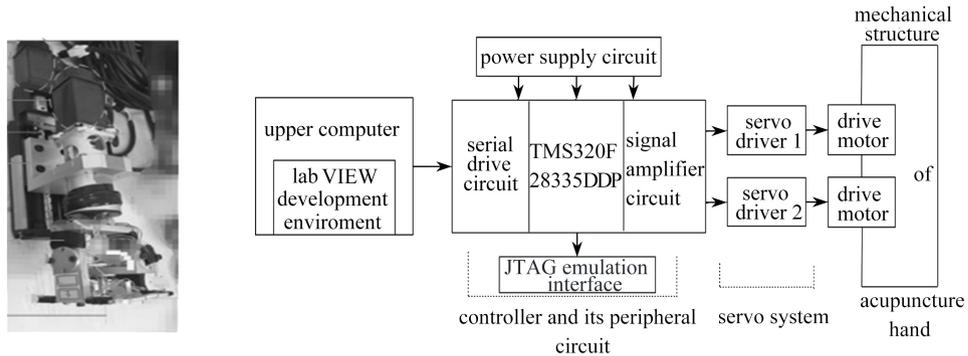
其中, $d\Delta$ 是单位长度楔形打开裂缝所做的功。考虑楔形扩展的半径变化从 0 到 R , $d\Delta$ 可以用变形模型来计算^[80]。在 Shergold 模型和 Fleck 模型中,裂纹宽度则是针具半径 R 、临界断裂韧性 J_{IC} 、剪切模量 μ 、应变硬化 α 的函数。

在针刺入过程的研究中,除了考虑与刺入作用力相关的力学模型外,皮肤的本构力学模型对于针刺过程的理解也具有重要意义。Muthukumar 等^[76]建立了线弹性材料本构力学模型,用于分析针头刺入凝胶时周围的应力分布。然而,在皮肤力学特性的研究中,大多数文献都倾向于采用非线性材料本构模型,以更准确地描述皮肤的复杂力学行为。同时,关于皮肤的力学非线性描述,如黏弹性、超弹性或黏-超弹性本构模型,在学术界仍存在着持续的讨论和争议。Ocal 等^[83]建立了黏弹性组织模型,运用斜坡保持实验来研究软材料的时间依赖性和应力松弛行为。Misra 等^[87]建立了超弹性模型,以高效率地模拟手术工具和组织相互作用。Davira 等^[88]建立了超弹性黏性模型,量化了随深度变化的刺入力,并获得了微针尖端和皮肤附近的应力分布。许多力学模型虽然考虑了皮肤的一些复杂的材料力学特征,如各向异性和黏弹性^[89],但它们通常将皮肤视为一种均匀的材料,从而忽略了表皮、真皮层和皮下组织的个体贡献。因此, Flynn 等^[90]将表层视为超弹性,将真皮、皮下视作黏弹性,建立了多层皮肤力学模型以模拟针刺入多层皮肤的过程。

目前,力学模型主要围绕不同针刺阶段的能量方程和皮肤的本构特征研究。然而,基于穴位组织三维结构建立的力学模型很少,亟需构建皮肤-肌肉-神经三者复合体的立体组织学力学模型来深入探索针灸的生物学效应。此外,现有的力学模型中大多是采用均匀速度穿刺样品,而速度变化是提插手法中的核心参数,建立变速情况下的针刺入力学模型能更准确地反映实际针灸操作中的力学变化。需要指出的是,虽然只考虑力场的针刺力学模型在量化针刺力学、研究材料失效机制以及优化针刺疗效等方面发挥着重要作用,但针灸的力学建模不应被局限在单一的力学分析框架内,而应全面考量热-力-电生理的复杂耦合作用。这一点对于揭示结合了热、力多重刺激的温针灸疗法机理尤为重要。当前有关针灸热-力-电生理耦合方面的研究近乎空白,因此亟须构建一个更为全面、精确的针灸力学模型。这一模型不仅能够为量化针刺对组织的力学效应和生理效应提供科学依据,更将极大地推动针灸学科的现代化进程,为针灸技术的创新与发展提供坚实的理论基础。

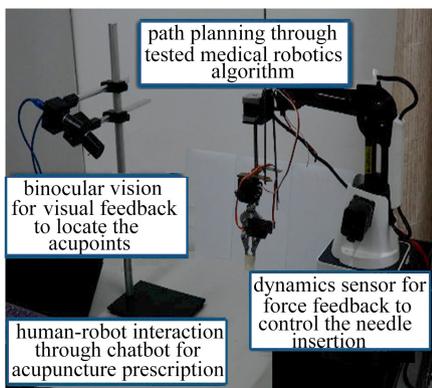
4 针刺机器人

随着全球范围内对针刺疗法关注度的不断提升,结合医疗机器人的飞速进步,针刺机器人领域迎来了前所未有的发展机遇.针刺机器人分为针刺教学机器人和针刺治疗机器人两大类(图8).教学机器人包含了行针手法量化仪器,通过主要力学参数,为针刺技术传承的问题提供了有益的工具,这使得教学机器人的研发迈入了前所未有的发展阶段.同时,利用手术机器人系统进行临床手术操作,收集针刺入的力数据并建立理论模型,为治疗机器人的实现提供理论上的参考和硬件上的支持^[91].治疗机器人以手术机器人为基础,为针刺过程穴位定位准确度不足、针灸医师市场需求较高等问题,提供了切实可行的解决方案.



(a) 教学机器人

(a) The teaching robot



(b) 治疗机器人

(b) The treatment robot

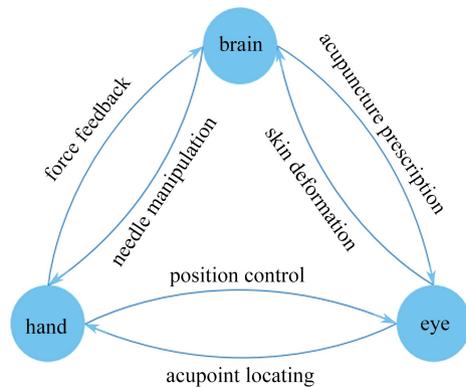


图8 针刺机器人的样机与原理图^[97,104]

Fig. 8 The robot prototype and the schematic diagram^[97,104]

为了更好地发展教学机器人和理解针刺力学过程来定量力学刺激量,人们不断开发行针手法量化仪器,来量化针刺的作用力大小、作用力方向、幅度、频率等变量.针具的作用力大小、作用力方向可能产生不同的针刺疗效,可以作为行针手法量化刺激量的有效参数.丁光宏等^[14]利用压电陶瓷片,研发了针体传感器仪器,将测量提插力和捻转力传感器集成在针具上,比较了不同作用力方向的波形图,观察了针体受力的波形与数值,将其作为反映行针手法的定量指标;李庆华等^[92]应用等截面悬臂梁式弹性敏感元件结构,对针体传感器仪器进行改进,更适合推广.针体上的受力在针刺过程中变化十分敏感,输出力-时间波形图及其变化规律可以判断作用力大小和方向,清楚识别行针手法的类别,达到了对行针手法的科学定量描述.同时,决定行针手法刺激量的参数也与频率和幅度有关.刘堂义等^[93]利用运动传感器实时捕捉针的位置,获取了10位针灸专家的捻转幅度及频率等数据,发现同一专家在捻转幅度及频率上均能体现补泻的定性特征,且动作的稳定性很高.然而,对于捻转手法技能参数的数据监测仍不全面.李靖等^[94]运用高精度的三维动作测量系统,并采用了对照试验设计,实时捕捉固定在食指上近红外光传感器的移动,采集了行针手法的幅度和频率数据.

实验发现,不同专家实施同一捻转手法时,虽然捻转幅度及频率的数据大小不一致,但变化较小,体现出良好的稳定性^[94]。

借助量化仪器对这些主要力学参数的量化描述,有助于提高学徒对针刺技术的掌控感和自信心,减少过深刺入的风险,从而降低患者损伤的可能性,提高针刺治疗效果的可预测性。设计更精准的量化仪器,进一步推动行针手法量化、规范化,对于针刺学科的传承与发展至关重要。行针手法量化的最终目的还是为了将行针手法准确无误地教给下一代中医人,让针刺学科得到传承与发扬,推动针刺技术这样的中华瑰宝逐步挺进国际化的进程。

在教学机器人进一步的研制过程中,为了解决针刺技术传承中行针手法的熟练度不足、穴位选取等关键问题,研究者们进行了创新性的设计与实践。针对针刺初学者常常面临行针手法熟练度不足的问题,需要指导掌握行针手法。韩国庆熙大学的研究团队^[95]研发了记录针具位置的教学机器人,并通过实时反馈针具运动轨迹与预期行针手法的差异,改善了初学者行针操作时的运动表现。针对穴位选取的问题,基于数字经络理论的智能针刺机器人提供了新的思路^[96]。依据穴位的等比例性,研究者们将国家标准穴位数据通过编程实现迭代法来作出数字化经络图,与古籍对照基本重合,并经过临床证实该经络图的有效性。这种机器人根据数字化经络图能够自动定位和分配穴位,极大地提高了选穴的准确性和效率。这些教学针刺机器人的研发,不仅为行针手法的量化、规范化提供了新的技术方法,而且为针刺技术的传承和创新提供了新的可能性。通过将传统技术与现代科技手段相结合,将针刺技术数据转化为数字化信息,为教学机器人的研发提供了丰富的数据支持和理论依据。

在教学机器人不断完善的同时,积累了针刺量化、穴位量化的实验基础,很多治疗机器人开始应用起来。早在20世纪90年代,国际上就已经有关于智能针刺机器人研发的相关报道。具有临床实用价值的针刺机器人需要满足三个条件^[97]:第一,能够自动定位穴位。在针刺操作中,穴位的准确定位至关重要。不准确的穴位定位可能导致医疗事故,如气胸等^[98]。机器人系统通过高精度的定位和控制系统,可以极大地减少定位不准确的事。第二,能够通过行针手法稳定地给予穴位力学刺激。第三,需要保证得气,这通常利用脑电信号分析来判断,该条件目前仍比较难以实现。治疗针刺机器人最早是由Litscher等在1997年提出的高科技针刺设备^[99],该机器人基本满足临床条件,利用局部三维建模进行穴位的视觉定位,通过脑电信号分析来进行得气感判断。近年来,Mahesh等^[100]研发了针刺机器人,该机器人利用电极刺激扳机给予稳定的力学刺激,通过包含精准穴位位置的手掌模型来定位穴位。梁繁荣等^[101]研制出了一种治疗偏头痛的智能治疗机器人,包括偏头痛诊疗头套、穴位检测模块、穴位定位模块、针灸治疗模块、显示单元和语音播报单元等模块。偏头痛诊疗头套中设置许多对应于多个穴位的针具;穴位检测模块包括信号采集单元和信号处理单元;穴位定位模块通过设于针具内的图像采集装置来对应穴位检测模块上传的数据。郭杰等^[102]研发了基于核磁图像导航的前列腺针刺治疗机器人,该机器人能通过核磁共振图像确定会阴穴,通过光学编码器配合相应转换模块控制位移,通过核磁兼容气缸和超声波电机混合驱动针刺速度。这些机器人专利的研发促进了针刺力学量化的研究和智能机器人的技术进步。随着研究的深入,针刺机器人的研发也逐渐从针对某一细节的优化转向更全面的考虑。上海交通大学Su等^[103]研制出的手-眼-力三者协调的针刺机器人,可以根据皮肤形变来修正针刺力度,实现了更精确的控制。治疗机器人的研制,提高了治疗效果和安全性,缓解了针刺医师短缺的问题。同时,研究者通过治疗机器人收集大量的临床数据,进行量化研究,改进治疗方法,优化治疗机器人的疗效。

尽管针刺机器人的发展已取得了显著成果,然而如何将中医经络穴位的理论知识与现代机器人技术更紧密地结合仍是该领域的核心挑战。比如,针刺机器人在个性化治疗方面存在短板。在中医理论中,一个穴位往往与多种症状相关联,而一组穴位也可能共同作用于一种症状。因此,如何根据病人的具体病情和个体特点,将已有的症穴关系转化为实际可行的针灸处方,是当前针刺机器人研发面临的重要挑战。这需要我们向针灸临床数据数字化的方向努力,通过收集和分析大量临床数据,为机器人提供更为精准和个性化的治疗方案。我国的“十四五”规划纲要中,明确提出了推进针刺行业高质量发展的要求。这无疑为针刺行业的持续健康发展以及针刺机器人的推广应用提供了强大的政策支持和市场动力。随着针刺机器人的不断研发和应用,我们有望大幅减轻临床医生的工作负担,提高医疗资源的利用效率,让更多的人受益于针灸的智慧。

5 结论与展望

针刺疗法的有效性已经被大量实验所证实,其研究方向包括针刺技术和针刺对象两方面.长期以来,学界聚焦于针刺对象研究,形成了多个假说理论.然而,对针刺技术的研究却极其匮乏.为了更全面地理解针刺技术,本文综述了力学与针刺技术相结合的研究进展,旨在揭示针刺入穴位的力学行为,并解释针刺疗效的机制.首先,总结了针刺过程中的力学核心要素(针具、针刺过程、穴位)的历史演化,为深入理解针刺技术提供了重要的背景信息.接着,文中着重讨论了力学要素对于针刺疗效及针刺过程的影响,凸显出力学变化在针刺过程中的关键作用.此外,通过综述相关的实验方法和力学模型,本文为理解针刺过程中的力学行为提供了重要支持.推动行针手法定量化、规范化对于针灸学科的传承与发展具有关键意义.这不仅可以确保宝贵的行针手法得到准确的传承,让针灸学科持续发扬光大,更是为了让这一蕴含数千年中华文化的瑰宝逐步迈向国际化的轨道.

针刺力学理论的发展对针刺过程和治疗效果进行量化,可以为数字化穴位提供理论指导,可以解决针刺手法的传承问题,促进中医现代化进程.发展针刺力学理论,对行针手法进行量化,有助于解释针刺疗效的机理,为技术的创新和新工具的发展提供了理论指导.针刺力学理论将中医与现代科学相结合,提供科学的方法研究针刺的机制和效应,并应用于针刺治疗的实践中.这种融合能够提高针刺治疗的科学性、可靠性和有效性,使针刺在现代医疗体系中发挥更大的作用.

针刺机器人的未来发展需要解决得气问题,可以研发脑机接口来判断得气与否,将脑科学与中医学相结合.随着技术的不断进步,针刺机器人也需要承担起关键的数据采集任务.通过深入的大数据分析和挖掘,我们将能够更深入地理解针刺技术的力学机制,进一步优化针刺方案,实现更加精准和个性化的治疗.这种变革不仅将显著提升针刺治疗的临床效果,还将为针刺技术的传承提供强有力的支撑.因此,针刺机器人将不再仅仅局限于教学和治疗工具的角色,它们将成为临床工作中不可或缺的辅助测量仪器.通过提供准确的力学数据支持,这些机器人将助力医生做出更科学的决策,推动针刺疗法向更高水平迈进.

参考文献(References):

- [1] WHO benchmarks for the practice of acupuncture: CC BY-NC-SA 3.0 IGO[R]. Geneva; World Health Organization, 2020.
- [2] 刘保延. 以疗效为导向,以结局管理为抓手,“说明白、讲清楚”中医针灸的疗效[J]. 中国针灸, 2022, **42**(1): 1. (LIU Baoyan. Take curative effect as the guide, take outcome management as the starting point, and “explain clearly and clearly”[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2022, **42**(1): 1. (in Chinese))
- [3] 杨宇洋, 沈志祥, 吴中朝, 等. 针灸学科“一带一路”发展的战略规划[J]. 中国针灸, 2017, **37**(4): 343-348. (YANG Yuyang, SHEN Zhixiang, WU Zhongchao, et al. Strategy programming for acupuncture development along One-Belt-One-Road countries[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2017, **37**(4): 343-348. (in Chinese))
- [4] ZHANG Y Q, JING X, GUYATT G. Improving acupuncture research: progress, guidance, and future directions[J]. *BMJ*, 2022, **376**: o487.
- [5] 王永宝. 试议中医针灸学中的力学现象[J]. 医用生物力学, 1996, **11**(2): 129. (WANG Yongbao. Discussion on mechanical phenomena in acupuncture and moxibustion of traditional Chinese medicine[J]. *Medical Biomechanics*, 1996, **11**(2): 129. (in Chinese))
- [6] 胡浩婷, 郝新鸿. 道医鲍姑在科学史中的矛盾形象研究[J]. 科技传播, 2023, **15**(3): 27-33. (HU Haoting, HAO Xinhong. Research on the contradictory image of Taoist doctor BaoGu in the history of science[J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2023, **15**(3): 27-33. (in Chinese))
- [7] 刘正才. 道家针灸特殊手法及应用[J]. 浙江中医杂志, 1998, **33**(3): 99-101. (LIU Zhengcai. Taoist acupuncture and moxibustion special manipulation and its application[J]. *Zhejiang Journal of Traditional Chinese Medicine*, 1998, **33**(3): 99-101. (in Chinese))
- [8] 彭增福, 许能贵, 卞兆祥, 等. 论干针疗法是针灸学的一部分[J]. 中国针灸, 2017, **37**(6): 663-667. (PENG

- Zengfu, XU Nenggui, BIAN Zhaoxiang, et al. Discussion on “dry needling” being part of acupuncture[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2017, **37**(6): 663-667. (in Chinese))
- [9] 王诚尧, 周燕, 朱洁好, 等. 针具变革推动下针刺技术体系的创新与发展[J]. 中医杂志, 2021, **62**(5): 375-380. (WANG Chengyao, ZHOU Yan, ZHU Jieyu, et al. Innovation and development of acupuncture techniques driven by needling instruments changes[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2021, **62**(5): 375-380. (in Chinese))
- [10] 叶又新. 早期锥形砭石: 砭石形制试探之二[J]. 山东中医学院学报, 1986, **10**(1): 48-55. (YE Youxin. Early cone-shaped belittling stone[J]. *Journal of Shandong College of Traditional Chinese Medicine*, 1986, **10**(1): 48-55. (in Chinese))
- [11] 魏稼. 黄石屏的针灸学说[J]. 中医药通报, 2006, **5**(2): 14-16. (WEI Jia. HUANG Shiping's acupuncture and moxibustion theory[J]. *Traditional Chinese Medicine Bulletin*, 2006, **5**(2): 14-16. (in Chinese))
- [12] 郑则宝, 郭义, 陈泽林, 等. 三棱针疗法的历史沿革考[J]. 针灸临床杂志, 2007, **23**(2): 1-3. (ZHENG Zebao, GUO Yi, CHEN Zelin, et al. History and successive changes of therapy of triangle-edged needle[J]. *Clinical Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2007, **23**(2): 1-3. (in Chinese))
- [13] 刘宝华, 孟宪典, 孙廷宝. 蟒针的临床应用与研讨[J]. 中医外治杂志, 1996(2): 44-46. (LIU Baohua, MENG Xiandian, SUN Tingbao. Clinical application and discussion of python needles[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine External Treatment*, 1996(2): 44-46. (in Chinese))
- [14] 丁光宏, 沈雪勇, 陶岳辉, 等. 针刺手法与针体受力参数的对比研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2004, **23**(4): 334-341. (DING Guanghong, SHEN Xueyan, TAO Yuehui, et al. The contrast research between acupuncture manipulations and the parameters of force acting on needle[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2004, **23**(4): 334-341. (in Chinese))
- [15] 杜祥民, 张永寿. 达芬奇手术机器人系统介绍及应用进展[J]. 中国医学装备, 2011, **8**(5): 60-63. (DU Xiangmin, ZHANG Yongshou. Introduction and application progress of Da Vinci surgical robot system[J]. *China Medical Equipment*, 2011, **8**(5): 60-63. (in Chinese))
- [16] LI C, ZHANG T, WANG H, et al. Advanced surgical tool: progress in the clinical application of intelligent surgical robot[J]. *Smart Medicine*, 2022, **1**(1): e20220021.
- [17] 郭太品, 任玉兰, 刘沂滩, 等. 古代冶炼工艺技术与毫针的形质及手法演变[J]. 中医杂志, 2014, **55**(19): 1626-1629. (GUO Taiping, REN Yulan, LIU Yiwei, et al. Technics of ancient time metallurgical and the evolution of shapes and manipulation of filiform needles[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2014, **55**(19): 1626-1629. (in Chinese))
- [18] 田海林, 王勇. 银质针疗法在教学中的应用[J]. 现代医药卫生, 2006, **22**(18): 2909-2910. (TIAN Hailin, WANG Yong. The application of silver needle therapy in teaching[J]. *Modern Medicine and Health*, 2006, **22**(18): 2909-2910. (in Chinese))
- [19] 秦晨阳, 卓碧芳, 张梦龙, 等. 针刺手法量学研究进展[J]. 中医药学报, 2022, **50**(5): 115-119. (QIN Chenyang, ZHUO Bifang, ZHANG Menglong, et al. Research progresses on acupuncture manipulation quantitative science[J]. *Acta Chinese Medicine and Pharmacology*, 2022, **50**(5): 115-119. (in Chinese))
- [20] 董兰. 古代度量衡语词研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2013. (DONG Lan. Study on the words of weights and measures in ancient times[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2013. (in Chinese))
- [21] 曾武秀. 中国历代尺度概述[J]. 历史研究, 1964(3): 163-182. (ZENG Wuxiu. Overview of scales in Chinese history[J]. *Historical Research*, 1964(3): 163-182. (in Chinese))
- [22] 沈龙, 樊小农, 熊俊, 等. 近 10 年针刺量化研究状况的分析和思考[J]. 辽宁中医杂志, 2010, **37**(3): 519-521. (SHEN Long, FAN Xiaonong, XIONG Jun, et al. Some ideas on rehabilitation of acupuncture on hemiplegia of stroke[J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2010, **37**(3): 519-521. (in Chinese))
- [23] BRAND R. What do tissues and cells know of mechanics? [J]. *Annals of Medicine*, 1997, **29**(4): 267-269.
- [24] ZHANG D, DING G, SHEN X. Development of research on the connective tissues and acupuncture[J]. *Acupuncture Research*, 2004, **29**(1): 77-81.
- [25] 丁光宏, 沈雪勇, 戴建华, 等. 中医针刺过程中针体受力的动态监测系统研制[J]. 生物医学工程杂志, 2003, **20**(1): 121-124. (DING Guanghong, SHEN Xueyong, DAI Jianhua, et al. Research and development on the

- dynamic system for detecting the force of acupuncture needles during the acupuncture process in the clinical practice of traditional Chinese medicine[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2003, **20**(1): 121-124. (in Chinese)
- [26] 陆寿康, 刘清国, 杨华元. 中国针灸技术方法[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013. (LU Shoukang, LIU Qingguo, YANG Huayuan. *Acupuncture Techniques and Methods in China*[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013. (in Chinese))
- [27] 邱曼丽, 韩嫣, 孙开龙, 等. 短刺的历史演绎运用[J]. 针灸临床杂志, 2020, **36**(11): 78-82. (QIU Manli, HAN Yan, SUN Kailong, et al. Historical evolvement and application of short needling[J]. *Clinical Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2020, **36**(11): 78-82. (in Chinese))
- [28] 徐向东. 运针手法的分析和归类[J]. 上海针灸杂志, 1994, **13**(3): 130-131. (XU Xiangdong. Analysis and classification of acupuncture techniques[J]. *Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 1994, **13**(3): 130-131. (in Chinese))
- [29] 冒金锋, 张建斌, 张双双, 等. 历版《针灸学》教材中毫针行针法的演变[J]. 针刺研究, 2018, **43**(6): 394-397. (MAO Jinfeng, ZHANG Jianbin, ZHANG Shuangshuang, et al. Evolvement of acupuncture needle manipulation techniques described in textbooks of *Acupuncture and Moxibustion* of successive editions[J]. *Acupuncture Research*, 2018, **43**(6): 394-397. (in Chinese))
- [30] 吴焕淦. 针灸疗效与穴位[J]. 中国中西医结合杂志, 2012, **32**(11): 1452-1457. (WU Huanguan. Acupoint and therapeutic efficacy of acupuncture-moxibustion[J]. *Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine*, 2012, **32**(11): 1452-1457. (in Chinese))
- [31] 赵宁侠, 郭瑞林, 任秦有, 等. 针刺肺俞穴及非经非穴对肺功能影响的对照研究[J]. 中国针灸, 2003, **23**(8): 25-26. (ZHAO Ningxia, GUO Ruilin, REN Qinyou, et al. Effects of acupuncture of Feishu (BL13) and non-point on pulmonary function[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2003, **23**(8): 25-26. (in Chinese))
- [32] 倪丽伟, 申鹏飞, 张智龙, 等. “醒脑开窍”与非经非穴针刺对脑梗塞急性期神经功能影响的多中心随机对照研究[J]. 中华中医药杂志, 2011, **26**(5): 894-897. (NI Liwei, SHEN Pengfei, ZHANG Zhilong, et al. Effect on neural function of Xingnao Kaiqiao and non-acupoint in treating acute cerebral infarction[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2011, **26**(5): 894-897. (in Chinese))
- [33] 蔺晓源, 李西林. 读《黄帝内经》中经络腑脏表里关系[J]. 陕西中医学院学报, 2007(6): 47-48. (LIN Xiaoyuan, LI Xilin. Reading the relationship between meridians, acupoints, and internal organs in the *Yellow Emperor's Inner Canon*[J]. *Journal of Shaanxi College of Traditional Chinese Medicine*, 2007(6): 47-48. (in Chinese))
- [34] 刘克, 李爱辉, 王薇, 等. 穴位的外周神经密集支配及其易反射激活特性[J]. 针刺研究, 2009, **34**(1): 36-42. (LIU Ke, LI Aihui, WANG Wei, et al. Dense innervation of acupoints and its easier reflex excitatory character in rats[J]. *Acupuncture Research*, 2009, **34**(1): 36-42. (in Chinese))
- [35] LINDE K, STRENG A, JURGENS S, et al. Acupuncture for patients with migraine: a randomized controlled trial[J]. *Acupuncture to Treat Migraine Headaches*, 2005, **293**(17): 2118-2125.
- [36] 原林, 姚大卫, 唐雷, 等. 针灸经穴的数字解剖学研究[J]. 解剖学报, 2004, **35**(4): 337-343. (YUAN Lin, YAO Dawei, TANG Lei, et al. A study on morphological basis of Chinese acupuncture and moxibustion from digital human body [J]. *Acta Anatomica Sinica*, 2004, **35**(4): 337-343. (in Chinese))
- [37] 楼新法, 蒋松鹤, 徐向党. 穴位高密度区的解剖学研究[J]. 针灸临床杂志, 2003, **19**(6): 7-8. (LOU Xinfu, JIANG Songhe, XU Xiangdang. Anatomical study on high-density areas of acupoints[J]. *Clinical Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2003, **19**(6): 7-8. (in Chinese))
- [38] 夏冬冬, 王湖冰, 谷禾, 等. 内关穴形态学特征及其临床意义[J]. 中国针灸, 2010, **30**(12): 1003-1006. (XIA Dongdong, WANG Hubing, GU He, et al. Morphologic characteristics and clinical significance of neiguan[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2010, **30**(12): 1003-1006. (in Chinese))
- [39] ANDERSON P S L. Making a point: shared mechanics underlying the diversity of biological puncture[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2018, **221**(22): jeb187294.
- [40] DENNIS J, DANKELMAN J, JOHN J. Needle-tissue interaction forces: a survey of experimental data[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2012, **34**(6): 665-680.
- [41] VU B, VU-KHANH T, LARA J. Effect of friction on cut resistance of polymers[J]. *Journal of Thermoplastic*

- Composite Materials*, 2005, **18**(1): 23-35.
- [42] MONTANARI M, BRIGHENTI R, TERZANO M, et al. Puncturing of soft tissues: experimental and fracture mechanics-based study[J]. *Soft Matter*, 2023, **19**(20): 3629-3639.
- [43] NGUYEN C T, VU-KHANH T. Mechanics and mechanisms of puncture of elastomer membranes[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, **39**(24): 7361-7364.
- [44] DOLEZ P, VU-KHANH T, GUERO G, et al. Influence of medical needle characteristics on the resistance to puncture of protective glove materials[J]. *Journal of Advanced Materials International*, 2008, **5**(1): 101-364.
- [45] NGUYEN C T, VU-KHANH T, LARA J. A study on the puncture resistance of rubber materials used in protective clothing[J]. *Journal of ASTM International*, 2005, **2**(4): 1-14.
- [46] LAKE G, YEOH O H. Effect of crack tip sharpness on the strength of vulcanized rubbers[J]. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 1987, **25**(6): 1157-1190.
- [47] LAKE G J, YEOH O H. Measurement of rubber cutting resistance in the absence of friction[J]. *International Journal of Fracture*, 1978, **14**: 509-526.
- [48] NGUYEN C T, VU-KHANH T. Mechanics and mechanisms of puncture by medical needles[J]. *Procedia Engineering*, 2009, **1**(1): 139-142.
- [49] FAKHOURI S, HUTCHENS S B, CROSBY A J. Puncture mechanics of soft solids[J]. *Soft Matter*, 2015, **11**(23): 4723-4730.
- [50] FREGONESE S. Mechanics of needle insertion and deep penetration in soft solids[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2022.
- [51] BAO Y D, QU S Q, QI D B, et al. Investigation on puncture mechanical performance of tracheal tissue[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022, **125**: 104958.
- [52] CAPEK L, HAMRIKOVA P, DZANOVA S, et al. Needle penetration forces into textile prostheses and skin: experimental study[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2021, **113**(8): 1723-1730.
- [53] 李凌鑫, 孟智宏, 石学敏. 针刺刺激量影响因素研究进展[J]. 新中医, 2012, **44**(5): 121-123. (LI Lingxin, MENG Zhihong, SHI Xuemin. Research progress on factors influencing acupuncture stimulation volume[J]. *Journal of New Chinese Medicine*, 2012, **44**(5): 121-123. (in Chinese))
- [54] 张赛男, 王欣君, 张建斌, 等. 捻转补泻手法要素源流梳理与分析[J]. 针刺研究, 2019, **44**(6): 454-458. (ZHANG Sainan, WANG Xinjun, ZHANG Jianbin, et al. Analysis on the origin and development of elements of reinforcing and reducing needling techniques[J]. *Acupuncture Research*, 2019, **44**(6): 454-458. (in Chinese))
- [55] 石学敏, 张存生, 刘白雪, 等. 捻转补泻手法的应用及其量学概念[J]. 中国医药学报, 1987(5): 16-17. (SHI Xuemin, ZHANG Cunsheng, LIU Baixue, et al. The application and quantitative concepts of twisting, turning, supplementing and reducing techniques[J]. *Acta Medica Sinica*, 1987(5): 16-17. (in Chinese))
- [56] 卞金玲, 张春红. 石学敏院士针刺手法量学的概念及核心[J]. 中国针灸, 2003, **23**(5): 287-289. (BIAN Jinling, ZHANG Chunhong. The concept and core of acupuncture techniques quantitative study by academician SHI Xuemin[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2003, **23**(5): 287-289. (in Chinese))
- [57] 胡银娥, 刘堂义, 唐文超, 等. 针刺手法仿真的研究及思考[J]. 生物医学工程学杂志, 2011, **28**(4): 830-833. (HU Yin'e, LIU Tangyi, TANG Wenchao, et al. Thoughts on and probes into a computer simulation of acupuncture manipulation[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2011, **28**(4): 830-833. (in Chinese))
- [58] 高武. 针灸聚英[M]. 风车文化出版社, 1999. (GAO Wu. *Accumulation of Acupuncture*[M]. Windmill Culture Press, 1999. (in Chinese))
- [59] 侯晓菲, 王欣君, 张建斌, 等. 提插补泻手法要素源流梳理及核心技术[J]. 中国针灸, 2019, **39**(7): 729-733. (HOU Xiaofei, WANG Xinjun, ZHANG Jianbin, et al. Summary and core technique on the origin and evolution of reinforcing-reducing manipulation achieved by lifting and thrusting the needle[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2019, **39**(7): 729-733. (in Chinese))
- [60] 袁宜勤, 海月明, 顾星, 等. 针刺手法规范化的初步研究[J]. 中医药学刊, 2002, **20**(2): 230-231. (YUAN Yiqin, HAI Yueming, GUN Xing, et al. Preliminary study on the standardization of acupuncture techniques[J]. *Chi-*

- nese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2002, **20**(2): 230-231.(in Chinese))
- [61] 张龙早, 毛慧娟, 秦梦, 等. 甲状腺功能减退患者太渊穴伏安特性[J]. 上海针灸杂志, 2020, **39**(6): 647-650. (ZHANG Longzao, MAO Huijuan, QIN Meng, et al. Current-voltage characteristics of Taiyuan (LU9) in patients with hypothyroidism[J]. *Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2020, **39**(6): 647-650. (in Chinese))
- [62] 贺成功, 黄学勇, 龙红慧, 等. 温针灸疗法及其应用[J]. 中医学报, 2015, **30**(1): 143-145.(HE Chenggong, HUANG Xueyong, LONG Honghui, et al. Therapy and application of warm acupuncture and moxibustion[J]. *China Journal of Medicine*, 2015, **30**(1): 143-145.(in Chinese))
- [63] 程珂, 丁轶文, 沈雪勇, 等. 温针灸的传热学研究[J]. 上海针灸杂志, 2007, **26**(8): 32-36.(CHENG Ke, DING Yiwen, SHEN Xueyong, et al. Study of heat conduction of warming acupuncture[J]. *Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2007, **26**(8): 32-36.(in Chinese))
- [64] 袁佳琦, 王欣君. 针刺补泻手法的作用基础和力学要素[J]. 时珍国医国药, 2023, **34**(3): 662-664.(YUAN Jiaqi, WANG Xinjun. The basis and mechanical elements of the acupuncture tonifying and reducing technique [J]. *Lishizhen Medicine and Material Medica Research*, 2023, **34**(3): 662-664. (in Chinese))
- [65] 何伟, 吴美玲, 景向红, 等. 穴位的本态; 穴位组织细胞化学的动态变化[J]. 中国针灸, 2015, **35**(11): 1181-1186.(HE Wei, WU Meiling, JING Xianghong, et al. Entity of acupoint: kinetic changes of acupoints in histo-cytochemistry[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2015, **35**(11): 1181-1186.(in Chinese))
- [66] 施静, 王健, 王渊, 等. 心绞痛牵涉痛与穴位敏化的关系[J]. 针刺研究, 2018, **43**(5): 277-284.(SHI Jing, WANG Jian, WANG Yuan, et al. Correlation between referred pain region and sensitized acupoints in patients with stable angina pectoris and distribution of sensitized spots in pats with myocardial ischemia[J]. *Acupuncture Research*, 2018, **43**(5): 277-284.(in Chinese))
- [67] 曹乾安, 章海凤, 李琳慧, 等. 支气管哮喘患者力敏膻穴分布特征及其规律的临床观察[J]. 中国针灸, 2020, **40**(2): 169-172.(CAO Qian'an, ZHANG Haifeng, LI Linhui, et al. Clinical observation on the distribution characteristics and rules of pressing sensitive acupoints in bronchial asthma patients[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2020, **40**(2): 169-172.(in Chinese))
- [68] 丁光宏, 沈雪勇, 褚君浩, 等. 中医灸与人体穴位红外辐射光谱特性研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2002, **21**(4): 356-360.(DING Guanghong, SHEN Xueyong, ZHU Junhao, et al. A study on the infrared radiation spectral characteristics of traditional Chinese medicine moxibustion and human acupoints[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2002, **21**(4): 356-360.(in Chinese))
- [69] 丁光宏, 姚伟, 褚君浩, 等. 人体手臂部几个穴位与非穴位区红外辐射光谱特征[J]. 科学通报, 2000, **45**(23): 2530-2535.(DING Guanghong, YAO Wei, ZHU Junhao, et al. Infrared radiation spectral characteristics of several acupoints and nonacupoint areas on the human arm[J]. *Scientific Bulletin*, 2000, **45**(23): 2530-2535.(in Chinese))
- [70] 张明健, 刘君, 林杪, 等. 对原发性痛经寒凝血瘀证患者任、督、冲三脉经穴热学特性的研究[J]. 北京中医药大学学报, 2022, **45**(12): 1266-1276.(ZHANG Mingjian, LIU Jun, LIN Miao, et al. Thermal characteristics of conception vessel, governor vessel, and thoroughfare vessel acupoints in patients with primary dysmenorrhea with syndrome of cold coagulation and blood stasis[J]. *Journal of Beijing University of Traditional Chinese Medicine*, 2022, **45**(12): 1266-1276.(in Chinese))
- [71] 魏建子, 周钰, 沈雪勇, 等. 伏安特性与穴位功能特异性[J]. 上海针灸杂志, 2003, **22**(9): 18-20.(WEI Jianzi, ZHOU Yu, SHEN Xueyong, et al. Volt-ampere characteristics and functional specificity of acupoints [J]. *Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2003, **22**(9): 18-20. (in Chinese))
- [72] 沈雪勇, 王彩虹, 张一和, 等. 胃炎患者穴位伏安曲线的定性定量分析[J]. 上海针灸杂志, 1998, **17**(4): 3-5. (SHEN Xueyong, WANG Caihong, ZHANG Yihe, et al. Qualitative and quantitative analysis of acupoint voltammetry curves in patients with gastritis[J]. *Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 1998, **17**(4): 3-5.(in Chinese))
- [73] 周钰, 王捷生, 沈雪勇, 等. 经穴伏安特性研究及其临床应用前景[J]. 上海针灸杂志, 2005, **24**(3): 30-32. (ZHOU Yu, WANG Jiesheng, SHEN Xueyong, et al. Study on the volt-ampere property of meridional points and the prospect of its clinical application[J]. *Shanghai Journal of Acupuncture and Moxibustion*, 2005, **24**

- (3): 30-32. (in Chinese))
- [74] 沈雪勇, 魏建子, 张一和, 等. 人体穴位伏安特性研究[J]. 中国针灸, 2006, **26**(4): 267-271. (SHEN Xuyong, WEI Jianzi, ZHANG Yihe, et al. Study on volt-ampere (V-A) characteristics of human acupoints[J]. *Chinese Acupuncture and Moxibustion*, 2006, **26**(4): 267-271. (in Chinese))
- [75] 王亚盛, 许萍. 人体经络动态电阻检测电路的设计[J]. 传感器技术, 2004, **23**(10): 45-47. (WANG Yasheng, XU Ping. Design of test circuits for human meridian dynamic resistance[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, **23**(10): 45-47. (in Chinese))
- [76] MUTHUKUMAR M, BOBJI M, et al. Needle insertion-induced quasiperiodic cone cracks in hydrogel[J]. *Soft Matter*, 2021, **17**(10): 2823-2831.
- [77] FREGONESE S, BACCA M. Piercing soft solids: a mechanical theory for needle insertion[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, **154**: 104497.
- [78] KOBAYASHI Y, SATO T, FUJIE M G. Modeling of friction force based on the relative velocity between liver tissue and needle for needle insertion simulation[C]//*2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Minneapolis, MN, USA, 2009: 5274-5278.
- [79] LIU J, JIANG Z, HU N, et al. Fluctuation of puncture force in medical needle puncture of soft solids[J]. *Polymer Testing*, 2023, **128**: 108218.
- [80] SHERGOLD O A, FLECK N A. Experimental investigation into the deep penetration of soft solids by sharp and blunt punches, with application to skin piercing[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2005, **127**(5): 838-848.
- [81] BARNEY C W, CHEN C, CROSBY A J. Deep indentation and puncture of a rigid cylinder inserted into a soft solid[J]. *Soft Matter*, 2021, **17**(22): 5574-5580.
- [82] MAHVASH M, DUPONT P E. Fast needle insertion to minimize tissue deformation and damage[J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, **2009**: 3097-3102.
- [83] OCAL S, OZCAN M U, BASDOGAN I, et al. Effect of preservation period on the viscoelastic material properties of soft tissues with implications for liver transplantation[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2010, **132**(10): 101007.
- [84] GOKGOL C, BASDOGAN C, CANADINC D. Estimation of fracture toughness of liver tissue: experiments and validation[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2012, **34**(7): 882-891.
- [85] HING J T, BROOKS A D, DESAI J P. Reality-based needle insertion simulation for haptic feedback in prostate brachytherapy[C]//*Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, FL, USA, 2006: 619-624.
- [86] AZAR T, HAYWARD V. Estimation of the fracture toughness of soft tissue from needle insertion[C]//*Proceedings of the Biomedical Simulation: 4th International Symposium*. London, UK, 2008, **5104**: 166-175.
- [87] MISRA S, RAMESH K, OKAMURA A M. Modeling of tool-tissue interactions for computer-based surgical simulation: a literature review[J]. *Presence-Virtual and Augmented Reality*, 2008, **17**(5): 463-491.
- [88] DAVIRA P W, BENJAMIN G S, JUAN L M, et al. Microneedle insertion into a visco-hyperelastic model for skin for healthcare application[C]//*2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference*. San Diego, CA, USA, 2021: 1481-1489.
- [89] 温广全, 纪小刚, 段玉顺, 等. 考虑材料参数不确定性的皮肤伤口缝合力预测模型[J]. 应用数学和力学, 2023, **44**(4): 441-449. (WEN Guangquan, JI Xiaogang, DUAN Yushun, et al. A prediction model for skin wound suture forces with uncertain material parameters[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, **44**(4): 441-449. (in Chinese))
- [90] FLYNN C O, MCCORMACK B A. A three-layer model of skin and its application in simulating wrinkling[J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2009, **12**(2): 125-134.
- [91] SIMONE C, OKAMURA A M. Modeling of needle insertion forces for robot-assisted percutaneous therapy [C]//*Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington DC, USA, 2002: 2085-2091.
- [92] 李庆华, 李付国, 艾炳蔚. 中医针刺手法用传感针的研制[J]. 传感技术学报, 2006, **19**(2): 285-288. (LI Qing-

- hua, LI Fuguo, AI Bingwei. Research of detecting acupuncture needle for acupuncture manipulation[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(2): 285-288. (in Chinese))
- [93] 刘堂义, 杨华元, 蒯乐, 等. 提插、捻转类针刺手法物理参数分类及其特征[J]. 针刺研究, 2010, **35**(1): 61-66. (LIU Tangyi, YANG Huayuan, KUAI Le, et al. Classification and characters of physical parameters of lifting-thrusting and twirling manipulations of acupuncture[J]. *Acupuncture Research*, 2010, **35**(1): 61-66. (in Chinese))
- [94] 李靖, GRIERSON L, WU M X, 等. 捻转针刺手法的运动学及动力学特征研究[J]. 针刺研究, 2013, **38**(5): 415-419. (LI Jing, GRIERSON L, WU M X, et al. Research on action features of acupuncturist experts' acupuncture needle twirling skills[J]. *Acupuncture Research*, 2013, **38**(5): 415-419. (in Chinese))
- [95] JUNG W M, LIM J, LEE I S, et al. Sensorimotor learning of acupuncture needle manipulation using visual feedback[J]. *Public Library of Science*, 2015, **10**(9): 139340.
- [96] 张竞心, 孙琦, 林祺, 等. 数字经络智能针灸机器人的研发思路探讨[J]. 中医药导报, 2018, **24**(19): 66-68. (ZHANG Jingxin, SUN Qi, LIN Qi, et al. Research and development of digital meridian intelligent acupuncture and moxibustion robot[J]. *Introduction to Traditional Chinese Medicine*, 2018, **24**(19): 66-68. (in Chinese))
- [97] XU T, XIA Y. Guidance for acupuncture robot with potentially utilizing medical robotic technologies[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, **2021**: 8883598.
- [98] GODSON D R, WARDLE J L. Accuracy and precision in acupuncture point location: a critical systematic review[J]. *Journal of Acupuncture Meridian Studies*, 2019, **12**(2): 52-66.
- [99] LAN K C, LITSCHER G. Robot-controlled acupuncture: an innovative step towards modernization of the ancient traditional medical treatment method[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, **6**(3): 87.
- [100] MAHESH M, VIKRANT K, OMKAR K. Design and implementation of acupressure therapy using pancake vibrators to trigger palm points[J]. *International Journal of Advances in Science Engineering Technology*, 2016, **4**(4): 99-102.
- [101] 梁繁荣, 杨洁, 任玉兰, 等. 一种治疗偏头痛的智能循证针灸诊疗仪: CN201210227536.8[P/OL].[2024-05-10]. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/061201142679.html>. (LIANG Fanrong, YANG Jie, REN Yulan, et al. An intelligent evidence-based acupuncture diagnosis and treatment instrument for migraine: CN201210227536.8[P/OL].[2024-05-10]. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/061201142679.html>. (in Chinese))
- [102] 郭杰, 姜杉, 冯文浩, 等. 基于核磁图像导航的前列腺针刺手术机器人[J]. 机器人, 2012, **34**(4): 385-392. (GUO Jie, JIANG Shan, FENG Wenhao, et al. A robot for prostate needle insertion surgery based on MRI guidance[J]. *Robot*, 2012, **34**(4): 385-392. (in Chinese))
- [103] SU J, ZHU Y, ZHU M. Hand-eye-force coordination of acupuncture robot[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 82154-82161.
- [104] 邓斌, 马明宇, 王江, 等. 针刺手法量化机器手的设计与分析[J]. 传感器与微系统, 2018, **37**(9): 57-59. (DENG Bin, MA Mingyu, WANG Jiang, et al. Design and analysis of quantitative robot hand for acupuncture manipulation[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, **37**(9): 57-59. (in Chinese))