

气压驱动的阴茎硬度检测装置

胡晨,何涛,杜向阳

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620

【摘要】为解决传统设备无法同时检测轴向和径向硬度、使用成本高昂等问题,提出并设计一种气压驱动的阴茎硬度检测装置,包含轴向套体和气压环等组件,分别用于检测阴茎轴向和径向硬度。分析装置硬度检测原理;根据装置的结构与材料特性,通过理论分析和有限元仿真分别建立阴茎轴向、径向硬度检测模型;在室温为300 K的环境下搭建实验平台,验证气压环有限元仿真模型和阴茎硬度检测模型,并设计温度实验对模型进行温度补偿。结果表明:气压环内径变化的实测数据与仿真数据一致性较高,平均相对误差为0.79%,为径向硬度的准确检测提供基础,装置轴向硬度检测数据与薄膜压力传感器结果的平均相对误差为0.83%,径向硬度检测数据与临床使用设备RigiScan检测数据平均相对误差为3.96%,验证装置轴向、径向硬度检测模型的准确性,修正后的检测模型可适配不同环境温度,提升装置在不同环境下的检测可靠性。

【关键词】阴茎硬度;气压驱动;检测装置;有限元仿真

【中图分类号】R318;TP274.2

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2026)06-0818-07

Pneumatically driven device for penile rigidity measurement

HU Chen, HE Tao, DU Xiangyang

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: A pneumatically driven device for penile rigidity measurement is proposed to overcome the limitations of conventional devices, including the incapability of simultaneous axial and radial rigidity measurement and high operational costs. The proposed device consists of an axial sleeve and a pneumatic ring for axial and radial assessments, respectively. The measurement principle is analyzed, and based on the structural and material properties of the device, axial and radial measurement models are established through theoretical analysis and finite element simulation. An experimental platform is constructed, and experiments are conducted at room temperature at 300 K to verify the finite element model of the pneumatic ring and the penile rigidity measurement models. Further temperature experiments are performed to derive a temperature compensation model. Results show that the measured change in the inner diameter of the pneumatic ring is in good agreement with simulated data, with a mean relative error of 0.79%, supporting accurate radial-rigidity estimation. The mean relative error between axial rigidity measured by the device and thin-film pressure sensor readings is 0.83%, and that for measured radial rigidity against RigiScan measurements is 3.96%, which verifies the accuracy of the axial and radial measurement models. With temperature compensation, the measurement models remain reliable across varying ambient conditions, improving the robustness of the device in different settings.

Keywords: penile rigidity; pneumatically driven; measurement device; finite element simulation

前言

阴茎勃起功能障碍(Erectile Dysfunction, ED)是

指男性在性生活中无法达到或维持足够硬度的阴茎勃起状态以实现性交的一种情况,严重影响着患者的生活质量和心理健康^[1-2]。勃起硬度是诊断ED和评估阴茎充血状态的重要指标,同时其分为径向硬度和轴向硬度^[3]。目前临床诊断最广泛的硬度评估手段是主观评分量表和勃起监测设备,主观评分量表中勃起硬度分级^[4](Erection Hardness Score, EHS)由于其使用简单快速、成本低,应用较普遍,但依赖患者的自主评分,主观性强且量化精度较低;而RigiScan^[5]和WARM^[6]等监测设备虽然能够准确检

【收稿日期】2026-02-26

【基金项目】国家自然科学基金(52275350);上海工程技术大学国际合作科研平台建设项目(0301006)

【作者简介】胡晨,硕士研究生,研究方向:医疗器械设计及自动化,E-mail: 1850978243@qq.com

【通信作者】何涛,教授,博士,研究方向:特种机器人设计及应用,E-mail: hetao@sues.edu.cn

测阴茎径向硬度,但是设备使用成本高昂、复杂沉重且仅限医院病房使用^[7],此外无法检测阴茎轴向硬度^[8];轴向硬度的检测方式主要为轴向屈曲实验^[9],其需要注射药物维持阴茎勃起而未被广泛接受,但其检测的轴向硬度是判定患者能否完成性交的重要因素^[10]。上述方法在主观性、经济性和实用性上均存在不足,影响男性患者对于ED的预防和早期诊断。因此,开发可同步客观量化轴向与径向硬度且经济实用的装置具有迫切必要性。基于软体机器人技术的发展,俞为仁等^[11]设计一种结肠镜软体机器人,气压变化控制其弯曲性能,能够有效避免结肠镜检查中装置与器官的不必要接触。崔晓等^[12]设计一种具有软体执行器的柔性踝关节康复机器人,气动软体执行器提供较大的力矩,能顺利完成对踝关节的辅助康复训练。气压系统结构简单,同时可控制输出均匀、稳定的作用力^[13]。然而,目前尚未有研究将气压结构引入阴茎硬度检测中。

针对以上问题,本文提出并设计一种气压驱动的阴茎硬度检测装置,包含气压环和轴向套体等组件,装置对勃起的阴茎施加标准作用力,根据稳态的气压值计算阴茎硬度;轴向和径向硬度检测模型分别通过理论分析推导和有限元仿真分析拟合获得;最后设计实验进行模型验证及温度补偿。该装置面向居家自测场景,自动化程度高,开机后会自动进行零点校准,消除环境气压的影响,同时人为干涉较少,用户佩戴后操作按键,装置可自动适应阴茎尺寸并固定,夜间能够自动检测径向硬度和轴向硬度,为ED诊治提供更加便携、低成本的客观量化工具。

1 装置结构及检测原理介绍

1.1 装置结构设计

装置根据气压变化对阴茎进行径向、轴向硬度检测,主要由头部气压环、根部气压环、轴向套体、轴向运动活塞等组成,如图1所示。模拟阴茎简化为轴对称的双层圆柱体结构,保留阴茎勃起硬度的主要承载层白膜和支撑阴茎勃起的海绵体^[14]。国内成年男性阴茎在自然疲软与充分勃起状态下的平均长度分别为74.2和124.2 mm,平均直径为27.18和34.21 mm^[15]。装置气压环初始内径 d 设计为36 mm,气压环高度 H 为17 mm,轴向套体长度 L 为210 mm,轴向运动活塞杆长 B 为60 mm。

1.2 轴向硬度检测

轴向硬度检测借鉴轴向屈曲实验方法,本装置适用于夜间阴茎自然勃起^[16],不需要服用药物,同时阴茎受到两个气压环的支撑,其与轴向运动活塞的碗状头具有较好的同轴度。向轴向套体与轴向运动

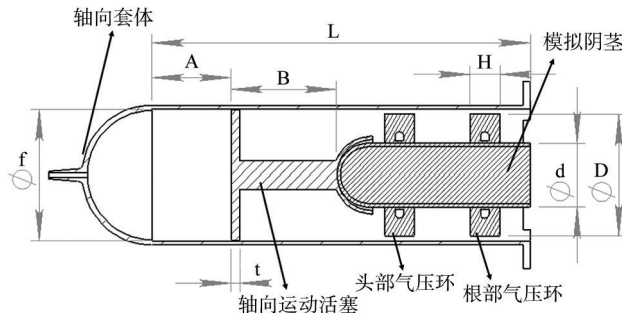


图1 装置结构剖视图

Figure 1 Cut-away view of the device structure

活塞形成的密闭气腔中注入气体使其对勃起阴茎施加标准轴向力 $F_{sz}=15\text{ N}$ ^[9],将阴茎不发生任何形变,受到实际作用力 F_{az} 仍维持 F_{sz} 的理想状态作为阴茎轴向100%硬度的参考点,定义阴茎轴向硬度 H_z :

$$H_z = \frac{F_{az}}{F_{sz}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, F_{az} 为轴向运动活塞对阴茎施加标准轴向力后因气压变化输出的实际轴向力,实际使用时装置难以直接测量此作用力,但轴向套体和轴向运动活塞不容易发生变形,活塞受气压作用沿套体壁前后运动,阴茎所受实际轴向力 F_{az} 与实际平衡气压 P_{az} 的关系由理论分析推导获得:

$$F_{az}(P_{az}) = S \cdot P_{az} - F_f = 0.4298 P_{az} - 2.63 \quad (2)$$

式中, S 为活塞的截面积, F_f 为活塞与轴向套体的摩擦力,实验测得为2.63 N, P_{az} 为阴茎硬度与实际轴向力达到平衡后装置内的实际平衡气压。因此得到阴茎轴向硬度 H_z :

$$H_z(P_{az}) = (0.02865 P_{az} - 0.1753) \times 100\% \quad (3)$$

1.3 径向硬度检测

径向硬度借鉴RigiScan的检测方式,采用柔性气压环代替刚性绳索拉力传感器,向气压环注入气体对阴茎施加标准径向力 $F_{sr}=2.78\text{ N}$ ^[3],将阴茎不发生任何形变,受到实际作用力 F_{ar} 仍维持 F_{sr} 的理想状态作为阴茎径向100%硬度的参考点,定义阴茎径向硬度 H_r :

$$H_r = \frac{F_{ar}}{F_{sr}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, F_{ar} 为气压环对阴茎施加标准径向力后因气压变化输出的实际径向力,气压环内表面与阴茎贴合,实际阴茎受到作用力会发生变形,其硬度与气压环输出的实际径向力 F_{ar} 达到新的平衡。同样装置难以直接测量气压环输出的 F_{ar} ,因此通过气压环内的实际平衡气压 P_{ar} 间接计算,但还受到勃起阴茎直径 d_e 的影响,建立三者之间的关系:

$$F_{ar} = f(d_e, P_{ar}) \quad (5)$$

式中, d_e 和 P_{ar} 均与气压环充气变形情况有关, 由于其材料特性和复杂的几何结构, 在充气过程中呈现出显著的材料非线性与几何非线性, 难以通过理论分析获得, 故本文采用有限元仿真的方法进行分析。

d_e 通过气压传感器根据内径 D 与气压 P 的关系进行检测, 此模型由气压环的充气空载仿真获取。初始状态气压环与阴茎表面存在间隙, 装置以恒定速度注入气体, 使其内径 D 逐步收缩, 系统监测气压增长率是否发生突跃, 判定气压环内表面与阴茎接触, 取接触时气压环内径 D 作为勃起阴茎直径 d_e 。

为获取装置平衡时气压环内实际平衡气压 P_{ar} , 需通过气压环与可变形模拟阴茎进行接触仿真, 向气压环内注入标准气体质量 m_s , 使气压环对阴茎施加 F_{sr} , 根据仿真结果提取 F_{ar} 与 P_{ar} 的数据, 拟合得到 F_{ar} 与 d_e 、 P_{ar} 的关系。由于气压环对不同直径的勃起阴茎施加标准径向力 F_{sr} 所需注入的标准气体质量 m_s 不相同, 需先通过气压环与硬质模拟阴茎的接触仿真获取标准注入气体质量 m_s 与勃起阴茎直径 d_e 的关系。

2 有限元仿真模型构建

2.1 气压环仿真模型

在 ANSYS Workbench 中基于前文给出的气压环几何模型构建流固耦合 (FSI) 仿真系统^[17], 将内部空腔抽取体积划分为流体计算域, 并设置为恒温 300 K 的理想气体, 气管接口面定义为质量流率入口 (Mass Flow Inlet), 其余壁面设置为耦合界面; 在结构域中, 对应设置耦合面, 在 Fluent 与 Mechanical 之间交换流体作用力与结构变形信息, 气压环外表面施加固定位移约束, 材料使用 Neo-Hookean 超弹性模型^[18]表征, 可准确描述气压环变形且参数简单, 计算收敛性好, 其应变能密度函数为:

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad (6)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (7)$$

$$D_1 = \frac{2(1 - 2\nu)}{E} \quad (8)$$

式中, μ 为剪切模量, 橡胶材料为 0.05 MPa, 泊松比 ν 为 0.49, 材料近似为不可压缩。气压环网格采用四面体与局部六面体过渡、最小单元 0.5 mm, 流体网格为空腔六面体网格、边界层加密 5 层、首层厚度 0.1 mm。在气压环进行空载仿真时, 其内表面可自由膨胀, 初始状态结构无预应力, 流体初始压力为环境大气压, 流体进口施加质量流率为 0.000 15 kg/s, 运行 1 s, 记录每个时间步流体域气压、体积及气压环内径变化量。

2.2 模拟阴茎仿真模型

研究发现阴茎勃起时其周径会增长 2~3 cm^[19], 故选择 32.0~35.5 mm 之间, 步长 0.5 mm 的 8 个不同直径的阴茎, 并将其简化为刚性体, 对以上气压环与硬质模拟阴茎进行接触仿真, 获取标准注入气体质量 m_s 与直径 d_e 的关系。随后使用 8 个同样直径下 4 种硬度的可变形模拟阴茎^[20]进行接触仿真, 根据各模拟阴茎直径 d_e 输入受到标准径向力所需的标准气体质量 m_s , 记录各模拟阴茎的仿真数据。可变形模拟阴茎参考 EHS 评分标准^[21-22]。Cheng 等^[23]研究发现阴茎白膜弹性模量随着 EHS 等级提升而显著升高, 海绵体硬度变化不大, 模拟阴茎选择 Neo-Hookean 超弹性材料模型^[24], 建立对应 EHS I~IV 级硬度的 4 个模拟阴茎, 海绵体弹性模量取均值 9.3 kPa, 白膜弹性模量取值见表 1, 其为国际通用的 EHS 评分标准与白膜弹性模量^[23]、RigiScan 检测硬度的映射关系^[25-26]。

表 1 EHS 标准及对应关系
Table 1 EHS standard and its correspondence

EHS 等级	阴茎状态	白膜弹性模量 E /kPa	RigiScan 等效硬度
I 级	疲软	32.6	<30%
II 级	略硬, 可弯曲, 挤压有明显痕迹	54.9	30%~60%
III 级	较硬, 挤压有轻微痕迹, 弯曲弧形	128.0	60%~70%
IV 级	坚挺, 挤压坚硬无压痕, 无法弯曲	223.2	>70%

3 仿真结果与分析

3.1 气压环内径与气压模型

气压环内径变化仿真结果如图 2 所示, 随着注入

气体质量的增大, 内部气压升高, 气压环内表面均匀收缩, 内径 D 在前期近似线性减小, 后期非线性加剧, 内径收缩速度快, 材料进入大变形区域。提取仿真

中气压环内径 D 与气压 P 的数据进行二次多项式拟合,采用最小二乘法回归得到:
 $D(P)=a_0+a_1P+a_2P^2=35.884-0.1584P-0.0029P^2(9)$
式中, D 的单位为mm, P 的单位为kPa,该拟合模型平

均相对误差为2.63%,表示原始数据和拟合曲线拟合度的确定系数 R^2 达到0.9986,可准确表征气压环的变形行为。

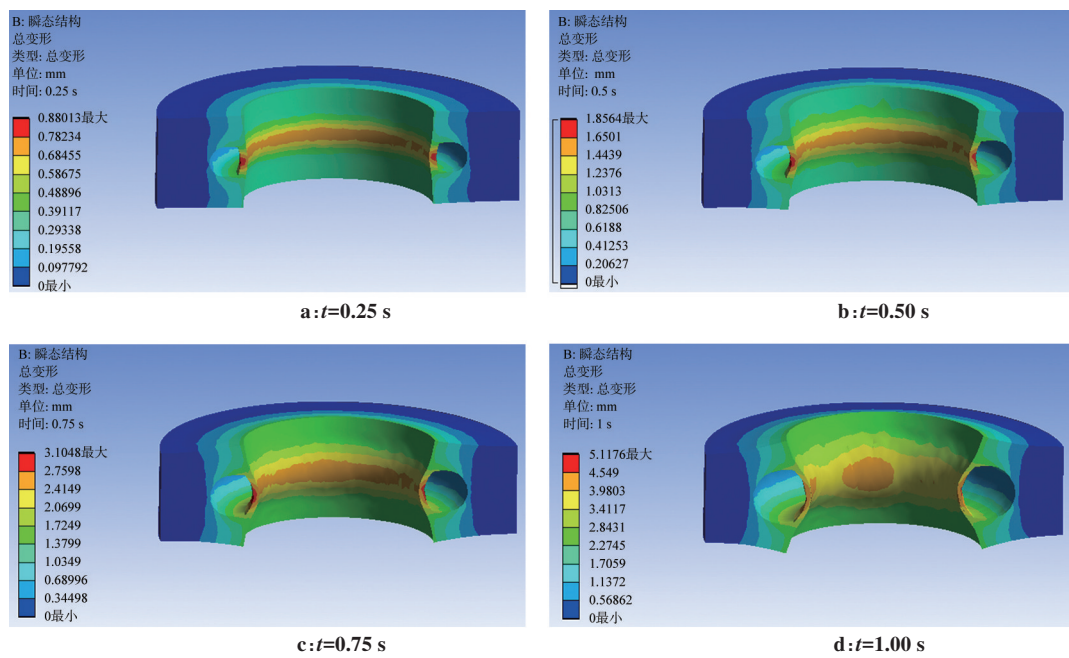


图2 各时刻气压环内径位移云图
Figure 2 Displacement contour maps of the inner diameter of pneumatic ring at various time points

3.2 径向硬度检测模型

在接触仿真中,初始时气压环内径变化与上述模型保持一致,与模拟阴茎接触后,开始输出径向力并不断增加,径向力通过力反应获取,提取径向力为2.78 N时所需注入的标准气体质量 m_s ,同样使用二次多项式拟合得到标准注入气体质量 m_s 与勃起阴茎直径 d_e 的关系:

$$m_s(d_e) = 296.96 - 14.862d_e + 0.1871d_e^2 \tag{10}$$

式中, d_e 的单位为mm, m_s 的单位为mg,平均相对误差为4.89%,确定系数 R^2 为0.9961。

针对不同的勃起阴茎直径 d_e ,分别计算施加标准力所需的标准气体质量 m_s ,使气压环对不同直径的可变形模拟阴茎进行接触仿真,提取实际径向力 F_{ar} 和实际平衡气压 P_{ar} 数据,采用二次响应面回归拟合得到 F_{ar} 与 d_e 、 P_{ar} 的关系:

$$F_{ar}(d_e, P_{ar}) = \beta_0 + \beta_1 d_e + \beta_2 P_{ar} + \beta_3 d_e^2 + \beta_4 d_e P_{ar} + \beta_5 P_{ar}^2 \\ = -155.598 + 6.0811d_e - 0.8752P_{ar} + 0.0431d_e^2 - 0.0588d_e P_{ar} + 0.00429P_{ar}^2 \tag{11}$$

式中, d_e 的单位为mm, P_{ar} 的单位为kPa,平均相对误差为6.89%,确定系数 R^2 为0.921,代入阴茎径向硬度计算公式,得到阴茎径向硬度 H_r 与气压 P_{ar} 、直径 d_e 的

模型:

$$H_r(d_e, P_{ar}) = (-55.98 + 2.1874d_e - 0.3148P_{ar} + 0.0155d_e^2 - 0.0212d_e P_{ar} + 0.00154P_{ar}^2) \times 100\% \tag{12}$$

图3展示检测径向硬度与气压、直径的关系,根据检测所得的 d_e 和 P_{ar} 可计算阴茎径向硬度。

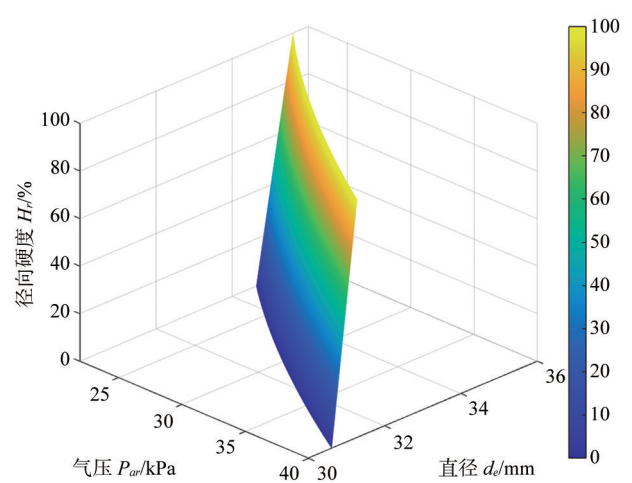


图3 径向硬度拟合曲面
Figure 3 Fitted surface for radial rigidity

4 实验验证与模型修正

4.1 系统搭建

制作气压环、轴向套体等实物,购买5个不同硬度的硅胶阴茎假体,分别进行气压环内径测试与装置硬度检测,5个阴茎假体分别模拟勃起时不同硬度的状态,其对应的RigiScan硬度约为85%、75%、60%、40%和25%,其外观均相同,头部直径约34 mm,根部约35 mm,长度120 mm。图4为模拟阴茎与检测部件的实物。此外,装置在实际使用时会受到外界环境气压、温度的影响,装置零点校准能减小环境气压对结果数据的干扰,而以上模型均在环境温度300 K的条件下得到,因此需设计实验对模型进行温度补偿,分别将装置置于温度为288.15、300.00、308.15 K的测试房中进行实验。



图4 检测部件实物图

Figure 4 Photograph of the measurement components

在气压环内径测试中,搭建多级可调气压测试平台,采用电子游标卡尺测量内径,XGZP6847气压传感器记录气压变化。实验在每一气温下的0~36 kPa内,以3 kPa为步长,共39个气压点,依次加载,在数据达到稳态后获取气压环内径,每个实验点重复测量5次后取平均值。

在阴茎假体硬度测试中,测试房环境温度为300 K,使用薄膜压力传感器验证轴向硬度检测模型,引入RigiScan设备验证径向硬度检测模型。将薄膜压力传感器(量程0~10 N,精度±1%)粘贴于轴向运动活塞碗状内表面进行轴向力检测,两个气压环分别套设于阴茎假体头部34 mm和根部35 mm的环面上,固定轴向套体和阴茎假体的底部,调整气压使气压环与阴茎紧贴、轴向运动活塞碗状头部与阴茎假体头部相抵,通过向装置注入气体分别对阴茎施加标准径向力和轴向力,当装置实际输出的作用力与阴茎硬度达到平衡时读取气压传感器和薄膜压力传感器的两项数据,不同硬度的阴茎假体实验分别重复5次并取均值。在RigiScan设备检测时,将两个阴茎圈分别套设于阴茎假体头部和根部的两个测试位置,

选取设备正常运行状态的5个硬度数据取均值。此外,分别再将装置置于温度为288.15和308.15 K的测试房中进行实验,对检测模型进行温度修正。

4.2 气压环空载内径测试

图5展示气压环内径 D 随气压 P 变化的实验数据与仿真模型的对比曲线,结果表明仿真与实验在整体趋势上高度一致,平均相对误差仅为0.79%,验证模型的可靠性,高压区的平均绝对误差较低压区的0.18 mm增大至0.32 mm,主要原因为材料发生大变形,但最大误差小于0.5 mm,满足设计精度要求。

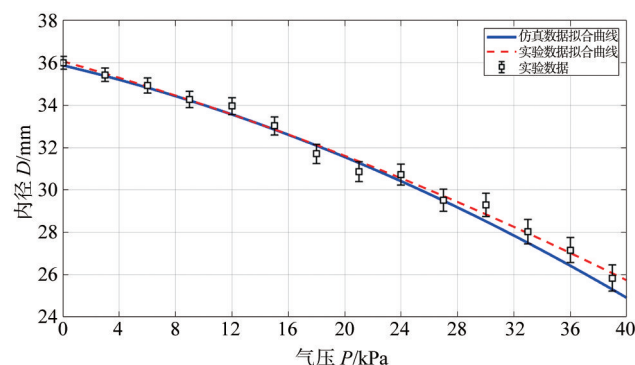


图5 内径与气压模型对比图

Figure 5 Inner diameter-air pressure comparison

由于零点校准同时也减小装置内部封闭气体受到温度变化的影响,环境温度主要通过改变材料性能对检测结果产生影响,为保持原模型对气压和直径的灵敏度结构不变,采用缩放因子补偿温度导致的整体增益漂移,由最小二乘拟合得到气压环内径的修正模型:

$$D^*(P, T) = [1 + c_1(T - 300)](a_0 + a_1P + a_2P^2) = [1 + 0.0022(T - 300)](35.884 - 0.1584P - 0.0029P^2) \quad (13)$$

式中, T 为环境温度,单位为K,该修正模型可检测不同环境温度下气压环的内径值,对于温度为288.15 K时的内径数据,修正模型的均方根误差由0.593 mm降低至0.228 mm,相较于原模型有显著改善。

4.3 阴茎假体硬度测试

使用加入薄膜压力传感器的装置和RigiScan设备对不同硬度的阴茎假体进行轴向和径向硬度测试,实验结果的对比如图6所示,5个阴茎假体使用装置检测轴向硬度与薄膜压力传感器检测硬度的均方根误差为0.005 9,平均相对误差为0.83%,装置检测径向硬度与RigiScan检测硬度的均方根误差为0.020 3,平均相对误差为3.96%,其中径向硬度检测数据与RigiScan检测误差较大的主要原因为仿真时的模拟阴茎与阴茎假体存在细微差别,阴茎假体制

作更为细节,模拟阴茎表面的具体纹路和血管组织,导致阴茎等效直径出现偏差,但硬度数据误差小于4%,满足设计要求。

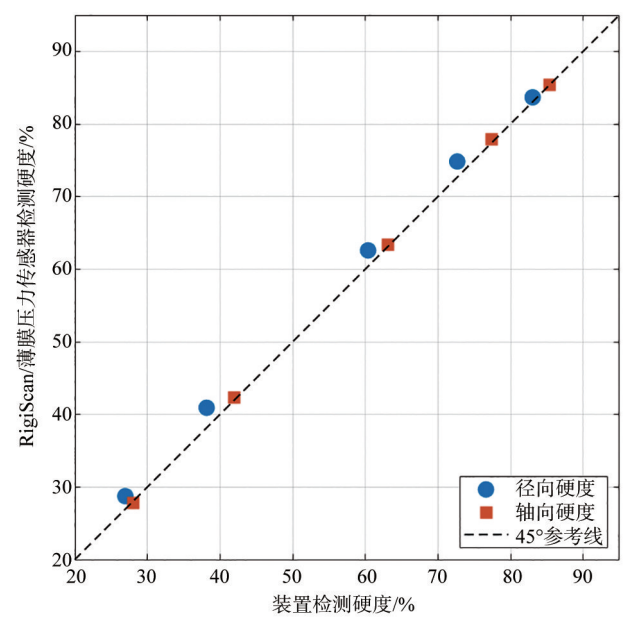


图6 硬度检测结果对比
Figure 6 Comparison of rigidity measurement results

根据不同温度下的检测结果如图7所示,不同的使用环境温度会对检测结果产生微小影响,使用同样方法获得修正后的径向硬度检测模型和轴向硬度检测模型:

$$H_{az}^*(P_{az}, T) = [1 + 0.00015(T - 300)](0.02865P_{az} - 0.1753) \times 100\% \quad (14)$$

$$H_{ar}^*(d_e, P_{ar}, T) = [1 + 0.00067(T - 300)] \times (-155.598 + 6.0811d_e - 0.8752P_{ar} + 0.0431d_e^2 - 0.0588d_eP_{ar} + 0.00429P_{ar}^2) \times 100\% \quad (15)$$

式中, T 为环境温度,单位为K,经过温度补偿的检测模型能够覆盖不同使用环境,提升装置检测的准确性。

5 结 论

本文提出一种气压驱动的阴茎硬度检测装置,设计包含气压环、轴向套体与运动活塞等组件,通过有限元仿真方法获得气压环内径与气压模型,在气压环内径实验中,实测数据与仿真模型的误差控制在1%之内,验证气压环内径与气压的模型,同时对模型进行温度补偿,得到 $D^*(P, T) = [1 + 0.0022(T - 300)](35.884 - 0.1584P - 0.0029P^2)$,该模型用于检测勃起阴茎直径进而进行硬度检测;通过理论分析

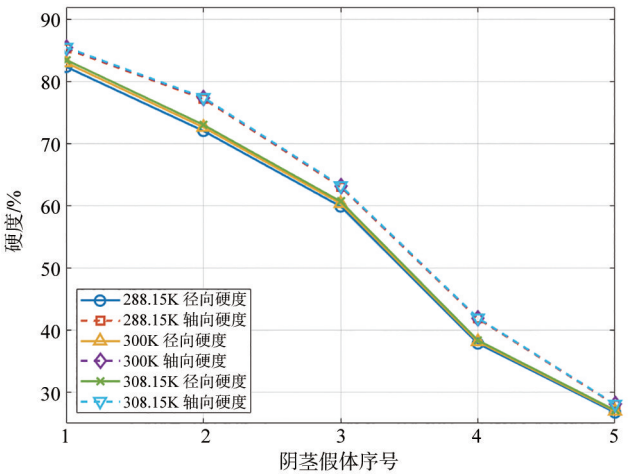


图7 不同温度下装置检测结果
Figure 7 Device measurement results at different temperatures

推导和有限元仿真分析拟合得到阴茎轴向和径向硬度检测模型,并通过温度实验分别得到修正模型: $H_{az}^*(P_{az}, T) = [1 + 0.00015(T - 300)](0.02865P_{az} - 0.1753) \times 100\%$ 和 $H_{ar}^*(d_e, P_{ar}, T) = [1 + 0.00067(T - 300)](-155.598 + 6.0811d_e - 0.8752P_{ar} + 0.0431d_e^2 - 0.0588d_eP_{ar} + 0.00429P_{ar}^2) \times 100\%$,修正后的模型能覆盖日常应用,提升装置使用的可靠性。在温度为300 K的测试房中,装置检测轴向硬度与薄膜压力传感器检测硬度的均方根误差为0.0059,平均相对误差为0.83%,使用装置检测径向硬度与RigiScan检测硬度的均方根误差为0.0203,平均相对误差为3.96%,表明阴茎轴向、径向硬度检测模型具有可靠性。该装置实现在不同实验环境中对不同直径、不同硬度阴茎的无创量化检测,推广应用后可为患者提供更加便捷和有效的检测手段。在后续研究中,将继续开发相应的应用程序,形成更全面、更智能的检测管理系统,提高患者生活质量和心理健康。

【参考文献】

[1] Salonia A, Bettocchi C, Boeri L, et al. European association of urology guidelines on sexual and reproductive health-2021 update: male sexual dysfunction[J]. Eur Urol, 2021, 80(3): 333-357.
[2] McCabe MP, Sharlip ID, Atalla E, et al. Definitions of sexual dysfunctions in women and men: a consensus statement from the fourth international consultation on sexual medicine 2015[J]. J Sex Med, 2016, 13(2): 135-143.
[3] 袁亦铭,周苏,张凯. 阴茎勃起硬度的评估[J]. 中华男科学杂志, 2010, 16(7): 642-645.
Yuan YM, Zhou S, Zhang K. Methods for evaluation of penile erection hardness[J]. National Journal of Andrology, 2010, 16(7): 642-645.
[4] Mulhall JP, Levine LA, Jünemann KP. Erection hardness: a unifying factor for defining response in the treatment of erectile dysfunction[J]. Urology, 2006, 68(Suppl 3): 17-25.
[5] Levine LA, Carroll RA. Nocturnal penile tumescence and rigidity in men without complaints of erectile dysfunction using a new quantitative analysis software[J]. J Urol, 1994, 152(4): 1103-1107.
[6] Wang XY, Wang RJ, Zhang YY, et al. A wearable adaptive penile rigidity monitoring system for assessment of erectile dysfunction[J]. Microsyst Nanoeng, 2024, 10(1): 131.

- [7] Matsumoto S, Takeuchi Y. A prototyping of penile tumescence continuous observation device[J]. *Adv Biomed Eng*, 2020, 9: 167-171.
- [8] 申思远, 方冬, 彭靖, 等. 阴茎勃起硬度评估方法的发展[J]. *中国男科学杂志*, 2023, 37(3): 98-105.
Shen SY, Fang D, Peng J, et al. Development of methods for assessing penile erectile hardness[J]. *Chinese Journal of Andrology*, 2023, 37(3): 98-105.
- [9] Goldstein I, Auerbach S, Padma-Nathan H, et al. Axial penile rigidity as primary efficacy outcome during multi-institutional in-office dose titration clinical trials with alprostadil alfadex in patients with erectile dysfunction. Alprostadil Alfadex Study Group[J]. *Int J Impot Res*, 2000, 12(4): 205-211.
- [10] Miranda E, Hallan B, Nascimento B, et al. Validation of a digital rigidometer for the evaluation of erection hardness during in-office rigidity assessment in patients with erectile dysfunction[J]. *J Sex Med*, 2023, 20(S1): qdad060.116.
- [11] 俞为仁, 陈刚, 曹倩倩, 等. 基于有限元的结肠镜软体机器人设计仿真及优化[J]. *液压与气动*, 2023, 47(4): 157-164.
Yu WR, Chen G, Cao QQ, et al. Design, simulation and optimization of colonoscopy soft robot based on finite element method[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023, 47(4): 157-164.
- [12] 崔晓, 王宇轩, 王伟波, 等. 柔性踝关节康复机器人设计与控制[J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(6): 1-5.
Cui X, Wang YX, Wang WB, et al. Design and control of flexible ankle rehabilitation robot[J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(6): 1-5.
- [13] 姚立纲, 李敬仪, 东辉. 气动软体机械臂模块变刚度性能分析[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(9): 36-44.
Yao LG, Li JY, Dong H. Variable stiffness analysis on a pneumatic soft manipulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(9): 36-44.
- [14] Akbarzadeh Khorshidi M, Bose S, Watschke B, et al. Characterisation of human penile tissue properties using experimental testing combined with multi-target inverse finite element modelling[J]. *Acta Biomater*, 2024, 184: 226-238.
- [15] 王存同. 国内外成人阴茎长度及周长的系统分析与比较研究[J]. *中国性科学*, 2020, 29(9): 143-148.
Wang CT. Systematic review and comparative study on length and circumference of penis of adults at home and abroad[J]. *Chinese Journal of Human Sexuality*, 2020, 29(9): 143-148.
- [16] Zou ZJ, Lin HC, Zhang Y, et al. The role of nocturnal penile tumescence and rigidity (NPTR) monitoring in the diagnosis of psychogenic erectile dysfunction: a review[J]. *Sex Med Rev*, 2019, 7(3): 442-454.
- [17] 李逸非, 钱付平, 胡文元, 等. 基于流固耦合的褶式滤筒脉冲清灰特性的数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2025, 25(3): 249-260.
- Li YF, Qian FP, Hu WY, et al. Numerical simulation of pulse soot removal characteristics of pleated cartridge based on fluid-solid coupling[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2025, 25(3): 249-260.
- [18] 肖锐, 向玉海, 钟旦明, 等. 考虑缠结效应的超弹性本构模型[J]. *力学学报*, 2021, 53(4): 1028-1037.
Xiao R, Xiang YH, Zhong DM, et al. Hyperelastic model with entanglement effect[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(4): 1028-1037.
- [19] 李健琪, 李铮, 赵福军. 男性勃起功能障碍的诊疗进展[J]. *临床外科杂志*, 2023, 31(2): 117-121.
Li JY, Li Z, Zhao FJ. Progress in the diagnosis and treatment of erectile dysfunction in men[J]. *Journal of Clinical Surgery*, 2023, 31(2): 117-121.
- [20] Drlik P, Červenka V, Červenka J. Biomechanical simulation of Peyronie's disease[J]. *Appl Bionics Biomech*, 2021, 2021: 6669822.
- [21] 金森, 颜建飞, 齐信王, 等. 彩色多普勒超声结合阴茎勃起硬度分级对勃起功能障碍的诊断价值研究[J]. *中国性科学*, 2023, 32(8): 5-8.
Jin M, Yan JF, Qi XW, et al. Study on the diagnostic value of color Doppler ultrasound combined with erectile hardness scale for erectile dysfunction[J]. *Chinese Journal of Human Sexuality*, 2023, 32(8): 5-8.
- [22] Illiano E, Trama F, Ruffo A, et al. Shear wave elastography as a new, non-invasive diagnostic modality for the diagnosis of penile elasticity: a prospective multicenter study [J]. *Ther Adv Urol*, 2021, 13: 17562872211007978.
- [23] Cheng H, Niu ZC, Xin FY, et al. A new method to quantify penile erection hardness: real-time ultrasonic shear wave elastography[J]. *Transl Androl Urol*, 2020, 9(4): 1735-1742.
- [24] Fereidoonhezad B, Akbarzadeh Khorshidi M, Bose S, et al. Development of in silico models to guide the experimental characterisation of penile tissue and inform surgical treatment of erectile dysfunction[J]. *Comput Biol Med*, 2023, 166: 107524.
- [25] 刘永辉, 刘卓杰, 张亚男, 等. 硝西泮对RigiScan检测夜间阴茎肿胀和硬度结果的影响[J]. *新医学*, 2024, 55(6): 411-420.
Liu YH, Liu ZJ, Zhang YN, et al. Effect of nitrazepam on nocturnal penile tumescence and rigidity measurement by RigiScan[J]. *Journal of New Medicine*, 2024, 55(6): 411-420.
- [26] 陈超豪, 李春梅, 陈映鹤, 等. 勃起功能障碍患者勃起硬度评分与夜间勃起功能的关系研究[J]. *浙江医学*, 2019, 41(18): 1994-1996.
Chen CH, Li CM, Chen YH, et al. Erectile hardness in patients with erectile dysfunction Relationship between score and nocturnal erectile function study[J]. *Zhejiang Medical Journal*, 2019, 41(18): 1994-1996.

(编辑:陈丽霞)