doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.05.004

气吸捕获式苹果采摘末端执行器设计与试验

冯青春[1,2]　胡亚然[1,2]　鲁文桥[2]　薛哲浩[1,2]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘要:针对当前苹果采摘机器人夹持式末端执行器在苹果采摘过程中易损伤果实,对定位精度依赖性高以及对簇生果实适应性不足等问题,本文为满足复杂果园环境下的柔性无损采摘需求,设计了一种气吸捕获式苹果采摘末端执行器。该装置以波纹型吸盘为核心部件,利用负压吸附实现对果实的柔性捕获,并结合旋拧与拉拽动作模拟人工采摘过程,从而实现对苹果的柔性、低损伤采摘。基于负压吸附原理,建立了风机流量与吸附力之间的定量关系模型,采用 CFD 数值仿真研究了苹果姿态、吸附距离与风机流量对吸附性能的影响规律。果园采摘试验结果表明,末端执行器最大可靠吸附距离为 4.41 mm,最佳吸附角度为 0°,平均单果吸附捕获时间约为 1.97 s,吸附捕获成功率可达 91%,其中直径 70~90 mm 的中等果实采摘成功率最高,达 94.4%。

关键词:苹果采摘机器人;末端执行器;气吸捕获;负压吸附;仿真

中图分类号:TP24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)05-0050-11　　**OSID**:

Design and Experiments of Pneumatic Suction-capture End-effector for Apple Harvesting

FENG Qingchun[1,2]　HU Yaran[1,2]　LU Wenqiao[2]　XUE Zhehao[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: In dense orchard environments, apple-picking robots face significant challenges due to highly variable fruit postures, clustered fruit distribution, and severe occlusions from branches and leaves, all of which reduce the stability of suction-based acquisition and increase the risk of fruit damage. To enhance adaptability and operational reliability under such complex conditions, a pneumatic suction-twisting end-effector was developed. The device employed a compliant corrugated suction cup to achieve flexible negative-pressure adhesion and integrated a coaxial twisting-pulling mechanism that emulated the mechanical process of manual harvesting, thereby facilitating the fracture of the abscission zone and enabling low-damage fruit detachment. A quantitative model describing the relationship between blower flow rate and suction force was established based on the principles of negative-pressure adhesion. Furthermore, computational fluid dynamics was employed to analyze the effects of fruit posture, suction distance, and airflow rate on the suction flow field and surface pressure distribution. The simulation results indicated that variations in fruit posture influence suction performance primarily by altering the effective windward area and redistributing the pressure gradient over the fruit surface within the annular low-pressure field. As the suction distance increased from 1 mm to 5 mm, the surface pressure gradient decreased markedly, resulting in a substantial reduction in suction force. Increasing airflow rate strengthened the annular negative-pressure region and yielded a monotonic increase in suction force. Based on these analyses, the recommended blower operating range was determined to be approximately 15~20 kPa vacuum pressure with an airflow rate of around 240 m^3/h. Field experiments conducted in dwarf high-density orchards demonstrated that the proposed end-effector achieved a maximum reliable suction distance of 4.41 mm and was capable of reliably grasping fruit under positioning errors of up to 5 mm. The optimal suction angle was determined to be 0°. The average suction-based acquisition time per apple was 1.97 s, with an overall capture success rate of 91%. Among different fruit sizes, medium-

收稿日期:2025-12-01　修回日期:2025-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(32572207)

作者简介:冯青春(1987—),男,研究员,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail:fengqc@nercita.org.cn

sized apples (diameter 70 ~ 90 mm) exhibited the highest capture success rate, reaching 94.4%. No visible mechanical injury was observed on harvested fruit, confirming the feasibility and reliability of this design for soft and damage-free harvesting in complex orchard environments. The research result can provide theoretical support and technical reference for the structural optimization of pneumatic harvesting end-effectors and the development of intelligent robotic apple harvesting systems.

Key words: apple-picking robot; end-effector; pneumatic-capture retrieval; negative pressure adsorption; simulation

0　引言

我国是全球最大的苹果生产国,种植面积与产量约占世界总量的50%,稳居世界第一[1]。尽管我国苹果产量全球领先,但果园采摘作业仍严重依赖人工,缺乏适用于复杂环境的高效采收机械。人工采摘耗时费力、成本高昂,已成为产业发展的关键瓶颈。与国外相比,我国果园普遍存在机械化水平低、标准化种植程度不足等问题[2-4]。在此背景下,推动苹果采摘的自动化、智能化已成为农业现代化的重要发展方向。然而在实际应用中,如何降低采摘过程中的果实损伤仍是亟需突破的关键技术难题。鉴于我国苹果多以鲜食为主,对果实完整性要求极高,因此无损采摘成为末端执行器设计的核心目标[5-6]。

在现有研究中,夹持式末端执行器[7-12]是较早应用的结构,其具有通用性强、结构成熟等特点。通常通过夹紧果实后进行刚性拉拽或旋拧使果实脱落,适用于遮挡较少、空间较为开阔的作业场景。但该类结构对果实定位精度要求较高,在枝叶密集或果实成簇生长的环境中易因碰撞周围结构而造成果皮擦伤或压伤。此外,夹持式抓取本质上是机械接触方式,对苹果等果实表面存在固有损伤风险,在无损化作业需求日益增强的背景下逐渐暴露出局限性。

相比之下,吸附式末端执行器在复杂环境中更具优势,其对果实定位精度要求较低,对定位误差具有一定包容性,采用柔性吸附方式且对果实损伤较小,能够在减少机械接触的同时适应复杂空间结构。WANG 等[13]设计了带旋拧功能的多吸盘机械手用于苹果采摘,通过吸附与旋拧复合作业实现果实分离。LU 等[14]设计了 3 种不同几何形状的吸盘用于苹果采摘并测试了其性能,3 种新型末端执行器的性能均显著优于非柔性末端执行器,采摘成功率达到 87%。JO 等[15]提出了一种基于吸盘的黄瓜采摘末端执行器,该吸盘能够根据黄瓜表面和形状特征自适应调整其形状和表面参数,可吸附在黄瓜大曲率表面,采摘成功率为 86.2%,损伤率为 4.7%。

上述果实吸附部件均假设吸盘与果实紧密接触,然而,在实际应用中吸盘与果实的贴合难以实现。因此,如何在一定距离范围内利用气流实现果实捕获的研究相对较少。在已有研究中,Abundant Robotics 公司[16]提出的真空吸入式苹果采摘末端,实现了约 1 s 的高效非接触采摘;LEHNERT 等[17]设计了用于甜椒采摘的气吸式末端,通过负压吸附实现稳定抓取并有效降低果体损伤;CAO 等[18]通过数值模拟和试验揭示了不同锥型采果头外部的“远距离气流场”可提供非接触支撑作用,并建立了锥型结构参数与吸附性能之间的关系;CHEN 等[19]基于枸杞果实建立气流脱落力学模型并优化喷口参数,使脱落率和损伤率达到较优平衡;MA 等[20]则构建吸附口流量与吸附力的数值模型,对葡萄采摘中的孔径、流量及气隙进行了系统优化,实现了在完全不接触果粒的情况下对整串葡萄进行稳定吸附。这些研究说明气吸式末端执行器在复杂环境中具有明显潜力,但目前仍存在吸附力生成机理不够清晰、流量参数与吸附力缺乏定量关系、针对苹果等硬果的结构设计不足等问题,有待进一步探索。

基于上述分析,本文将研究重点由传统的贴合式吸附转向为存在一定气隙条件下的气吸式吸附,设计一种气吸捕获式末端执行器,重点研究负压吸附条件下的采摘力学机理,建立风机排量与果实吸附力之间的定量关系,并在此基础上完成末端结构设计与试验验证,验证其在复杂果园环境中实现无损、高效采摘的可行性,从而为复杂环境下苹果的高效、柔性与无损采摘提供理论支撑和技术参考。

1　采摘末端执行器工作原理

1.1　采摘目标特征分析

本文研究的采摘对象为矮化密植场景下的苹果,采摘目标苹果特征结构如图 1 所示。在果园内采集 100 个苹果样本,对苹果的直径、果实高度、果柄长度和果实质量进行测量,测得苹果的直径范围为 60.5 ~ 98.7 mm,果实的直径 D 平均为 80.0 mm;苹果果实高度 H 平均为 75 mm;果柄长度 L 平均为 16 mm;苹果质量范围为 150.5 ~ 230.0 g,果实质量 m 平均为 190 g。

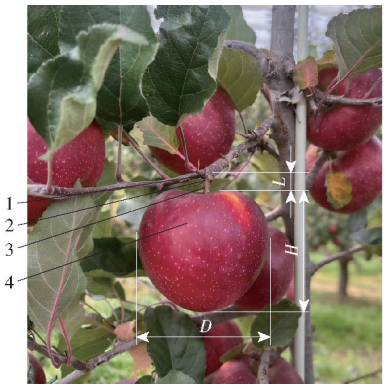


图 1 苹果特征结构图

Fig. 1 Structural diagram of apple features

1. 枝条 2. 离层区 3. 果柄 4. 果实

在苹果采摘过程中,果实特征结构主要由枝条、果柄和果实组成,其中果柄与枝条连接部位存在未木质化的离层组织,是果实分离的薄弱区域。模仿人工采摘方式,采摘过程中采用旋拧与拉拽相结合的方式实现果实分离。已有相关试验研究表明,相较于竖直方向拉拽,侧向拉拽条件下苹果果实与果梗之间所需的分离力更小。因此,采用旋拧力与水平方向拉力相结合的果实分离方式,更有利于实现果实的有效脱落[21]。

1.2 末端执行器结构

本文设计的末端执行器为气吸捕获式,具体结构如图 2 所示。主体由外壳、吸附机构及旋转驱动机构构成。其中吸附机构由硅胶真空吸盘、吸盘安装支座、气杆及驱动气缸构成,通过气缸伸缩实现吸盘轴向位移控制;旋转机构采用直流电机经齿轮组传递扭矩至气杆,驱动末端吸盘绕轴旋转。执行器工作流程分为 5 个阶段:在确定采摘目标果实位置后,执行器首先移动至目标果实区域,并调整至合适的作业位置;吸附阶段气缸伸出使吸盘接近果面,风机建立负压实现稳固吸附;旋转阶段电机驱动吸盘施加周向扭转载荷,气缸驱动执行拉拽动作,直至果实与果柄分离;当采摘完成后,通过换向阀改变气流方向,使腔体与外界连通,负压释放,果实顺利脱离吸盘,实现完整的采摘循环过程。

选用波纹型吸盘作为采摘末端,其波纹结构的柔顺性可自适应补偿苹果表面几何不规则性,通过柔性接触提升吸附稳定性。综合考虑吸盘对果实表面的贴合密封性以及旋拧传递扭矩时的刚度需求,吸盘材料选用邵氏硬度为 60 的硅胶。针对目标果实平均直径 80 mm 的特性,综合吸附力需求与几何适配性,选定吸盘直径 50 mm。该尺寸既能覆盖苹果常见直径范围(60 ~ 100 mm),又能与果实曲面实现良好的密封性与稳定性。

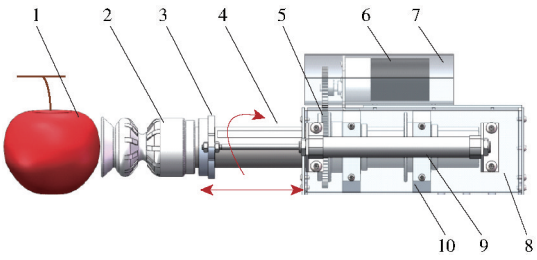


图 2 末端执行器结构图

Fig. 2 Structure diagram of end-effector

1. 苹果 2. 真空吸盘 3. 支座 4. 气杆 5. 齿轮组 6. 直流电机 7. 电机罩 8. 外壳 9. 气缸 10. 轴承座

2 吸盘吸附过程力学分析

2.1 果实吸附捕获过程位移计算

基于理论力学原理,可将苹果果柄与枝条的连接视为一个固定端约束。在该假设下,连接处所受作用可简化为拉力 F_l、法向力 F_t 以及力矩 M。其中,F_l 用于维持果柄与枝条在连接点的相对位置,F_t 则阻止果柄绕该连接点发生旋转;力矩 M 则反映了固定端约束对局部转动的限制。简化模型有助于更清晰地理解果柄与枝条连接处的受力特性。

吸附过程中,苹果受到来自吸盘吸力 F_d 作用,沿吸附方向发生位移 x,这个位移是由果实绕着固定端约束旋转而产生的。同时旋转也会使果实的中心从初始位置移动到实际位置,并且会在竖直方向产生一定的位移 y,使其与吸力作用线有所偏移,如图 3 所示,x、y 的位移关系式为

$$\begin{cases} x = \left(L + \dfrac{H}{2\cos\alpha_0}\right)(\sin\alpha - \sin\alpha_0) \\ y = \left(L + \dfrac{H}{2\cos\alpha_0}\right)(\cos\alpha_0 - \cos\alpha) \end{cases} \tag{1}$$

式中 α_0——苹果果柄与竖直方向的初始夹角

α——吸附过程苹果果柄的夹角

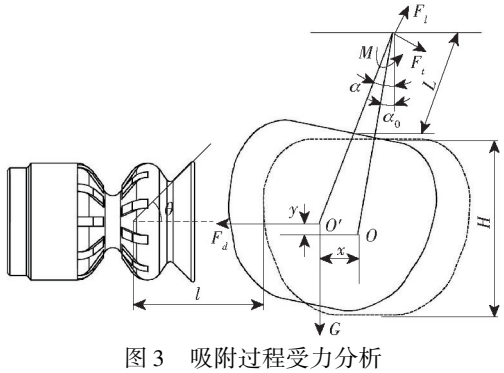


图 3 吸附过程受力分析

Fig. 3 Force analysis during adsorption process

2.2 果实吸附捕获过程受力分析

果实吸附捕获过程中,吸盘前方的苹果首先受到空气流动推动,在真空压力协同效应下逐渐靠近吸盘表面。气流绕过静止苹果时,在其表面产生气

动力，表现为绕流阻力[22-23]。该阻力构成驱动苹果进入吸附状态的外力来源，可视为吸附力，其计算公式为

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \tag{2}$$

式中　A——迎风面积　　v——气流速度

ρ——空气密度，取 1.2 kg/m^3

C_d——绕流阻力系数

在流体力学中[24-25]，气体绕物体流动时的阻力系数通常分为 3 个区域，即 Stokes 区、Allen 区和 Newton 区，不同区域中阻力系数不同，为判定物体所属的流动区域，可采用粒径法对阻力系数区域进行划分。由物体粒径 d_e 与粒径因子 T 的关系可将阻力系数划分为 3 个区间：$d_e \leqslant 2.2T$，$2.2T < d_e \leqslant 20.4T$，$20.4T < d_e \leqslant 1\,100T$。其中

$$T = \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_a - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

式中　μ——空气动力粘度，取 1.82×10^{-5} Pa·s

ρ_a——苹果密度

通过公式(3)计算可得到苹果粒径均超过 $20.4T$，处于 Newton 区，阻力系数 C_d 为 0.44。

对于开口锥角为 2θ 的吸盘(θ 为吸盘锥角，本文 θ 取 45°)，在其内部真空压力作用下，吸盘前方气流呈放射状锥形分布[26]。所有具有相同速度的气流点可视为以锥顶为球心的系列球面。设苹果被吸附的临界位置与锥顶距离为 l，则该位置截面积 S 可表示为

$$S = 2\pi l^2 (1 - \cos\theta) \tag{4}$$

假设气体为等熵，通过截面的气体体积流量与通过吸盘内的气体体积流量相等，截面上的各点速度近似相等。根据质量守恒定律，则距离锥顶 l 处的气流速度 v_l 为

$$v_l = \frac{Q}{2\pi l^2 (1 - \cos\theta)} \tag{5}$$

式中　Q——通过吸盘内的流量

将公式(5)代入式(2)，吸附力 F_d 可表示为

$$F_d = \frac{D^2 \rho C_d Q^2}{32\pi l^4 (1 - \cos\theta)^2} \tag{6}$$

吸附过程果实受力分析如图 3 所示，苹果能够被吸附至吸盘必须满足条件

$$\begin{cases} F_d - F_l \sin\alpha + F_t \cos\alpha \geqslant 0 \\ F_l \cos\alpha - F_t \sin\alpha + G = 0 \\ F_d \left[\left(L + \dfrac{H}{2\cos\alpha_0} \right) \cos\alpha + y \right] - \\ \quad \left[G \left(L + \dfrac{H}{2\cos\alpha_0} \right) \sin\alpha + M \right] \geqslant 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中　G——苹果重力　　M——弯矩

令 $t = L + \dfrac{H}{2\cos\alpha_0}$，联立公式(7)和公式(1)可得

$$F_d \geqslant \frac{Gt\sin\alpha + M}{t\cos\alpha_0} \tag{8}$$

果柄对果实施加的弯矩 M 取决于果柄与枝条弹性铰链的抗弯特性。在弹性范围内，有

$$M = k_0 (\alpha - \alpha_0) \tag{9}$$

式中　k_0——弯曲刚度系数

根据式(1)可得

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{x}{t} + \sin\alpha_0 \right) \tag{10}$$

将式(1)、(9)、(10)代入式(8)，可得

$$F_d \geqslant \frac{Gx + Gt\sin\alpha_0 + k_0 \left(\arcsin \left(\dfrac{x}{t} + \sin\alpha_0 \right) - \alpha_0 \right)}{t\cos\alpha_0} \tag{11}$$

考虑采摘机器人通过视觉系统识别果实坐标，但受成像噪声、标定及运动学误差影响，末端执行器定位精度有限，吸盘并不能接触到苹果端面形成密封，文献与试验结果表明，吸盘与苹果端面相距位置偏差一般不超过 5 mm，该定位误差范围参考了已有果园采摘机器人视觉定位精度的试验结果[27-29]。当吸盘与苹果端面最大距离为 5 mm 时，通过前期测量与观察，取苹果最大质量为 230.0 g，苹果的生长角度多为 60°～90°，α_0 取 0.524 rad，通过上述理论计算分析可得实现稳定吸附所需的临界吸附力为 1.63 N，达到所需求吸附力的流量为 208.97 m^3/h。

3　仿真试验

3.1　仿真试验设置

通过上述分析可知影响吸附力的主要因素包括吸附距离、气体流量及迎风面积。苹果姿态通过改变迎风面积影响吸附力，吸附距离和流量则直接影响气流速度分布。为探讨各因素对吸附性能的影响规律，并确定风机选型参数，采用 CFD (Computational fluid dynamics)方法开展数值仿真研究[30]。

吸附距离定义为苹果端面与吸盘中心的间距，考虑到采摘机器人视觉定位系统的精度限制，设定吸附距离范围为 1～5 mm。鉴于果实形态不规则，吸附效果会受到影响。在设定 5 mm 定位误差条件下，仿真分析不同姿态苹果捕获效果。苹果姿态通过姿态角 θ_0 表征，苹果自然生长时果梗-花萼轴与枝条夹角多为 60°～90°，果实呈下垂分布。吸盘水平吸附苹果侧面时，该下垂姿态可等效为吸盘中心轴与苹果横径之间的夹角变化，因此本文将 θ_0 的取

值范围设定为 -30° ~30°,以模拟自然姿态下的吸附工况。为探究气体流量对吸附性能的影响并确定实现最大吸附距离的最小流量,流量范围设定为 160 ~240 m^3/h。试验指标为苹果所受吸附力,通过 Fluent 软件的监控功能计算苹果所受的吸附力,仿真试验参数如表 1 所示。

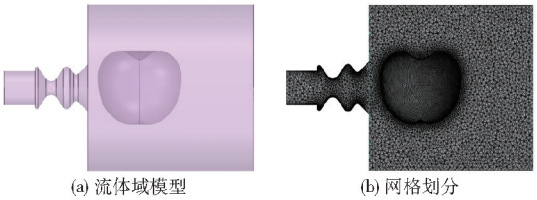
表 1 试验参数

Tab. 1 Parameters of experiment

姿态角 θ_0/(°)	吸附距离 x/mm	流量 Q/($m^3 \cdot h^{-1}$)
-30	1	160
-15	2	180
0	3	200
15	4	220
30	5	240

3.2 仿真建模

利用 Solidworks 2022 软件创建吸盘与苹果的三维模型,构建直径为 80 mm 的苹果等效模型。吸盘外部流场建模为直径和高度均为 160 mm 的圆柱域,导入有限元分析前处理软件 Space Claim 中抽取流体域,如图 4 所示。网格划分采用非结构化四面体网格,并在苹果周围流体区域进行网格细化。边界条件设置压力进口,设为标准大气压,出口设置不同的流量,所有壁面采用无滑移边界条件。数值计算选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,求解器采用基于压力的 SIMPLE 算法。初始化完成后设置迭代步数为 1 000 步,各项参数收敛后停止计算。在计算流体动力学分析中,将气室内流体看作连续相,流动过程遵守质量守恒和动量守恒定律,满足连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。



(a) 流体域模型 (b) 网格划分

图 4 仿真模型

Fig. 4 Simulation models

3.3 仿真结果分析

3.3.1 不同苹果姿态下对吸附力的影响

苹果的初始吸附姿态对吸附性能具有显著影响,不同的姿态角会改变吸附流场的结构分布以及果面上的压力特征。图 5 展示了 5 种姿态角下的仿真结果。由图可见,随着姿态的变化,苹果与吸附流之间的耦合关系产生明显差异,其所受吸附力呈现不同程度的减小趋势,吸附力随着迎风面积的减小而下降。同时,在吸附流场中,吸盘外部形成的环状压力梯度场对整体流动结构的影响远大于果实自身的几何干扰。由于苹果具有不均匀的外形特征,姿态变化实际上改变了果实在压力梯度场中的空间分布比例,从而引起果面压力梯度的重新分布,这是吸附力变化的主要原因。当苹果处于垂直状态、吸盘保持水平吸附姿态时,吸附力达到最大值,抗外界干扰能力也最强,不易发生果实脱落现象。

3.3.2 吸盘与果实表面的距离对吸附效果的影响

对不同吸附距离条件下的吸附流场进行仿真分析,结果如图 6 所示。随着吸附距离的增加,苹果逐渐远离吸盘,其与吸附流之间的耦合效应减弱,吸盘内部涡旋也随之减小,流场特征逐渐趋近于空载状态。从吸附力变化的角度来看,随着苹果与吸盘间距增大,苹果表面压力梯度显著降低,同时苹果在环形压力梯度场中所占比例下降,从而导致吸附力减弱。相反,当吸附距离减小时,苹果与吸附流之间的耦合作用增强,局部涡旋现象更为明显,这一变化有助于提升苹果表面的压力梯度,使得吸附力呈指数型增长。总体而言,吸附距离对吸附性能具有显著影响。随着距离的增大,负压作用衰减、吸附力逐渐减弱;当距离过大时,吸盘产生的负压不足以实现对果实的稳定吸附,可能导致采摘失败。

3.3.3 不同风机流量对吸附效果的影响

为探究不同流量条件下吸附流场的特性,基于吸附距离 5 mm 进行仿真分析。如图 7 所示,随着流量递增,吸盘核心区流速与负压梯度显著增强,湍流涡旋强度与影响范围同步扩展。苹果表面受流场作用的有效区域面积变化不显著,但环状压力梯度场强度呈现明显提升,导致苹果表面压力分布由低压区向高压区转变,整体压力差增大,吸附力随流量增加呈单调上升趋势。流量主要是通过影响环状压力梯度场的强度,从而改变苹果表面压力梯度强度,进一步影响苹果所受吸附力。

针对 5 mm 距离处苹果可靠吸附需克服 1.63 N 脱离力的需求,通过积分苹果表面轴向应力定义吸附力,并结合出口负压进行吸附性能量化评估。当流量为 180 m^3/h 时即可达到最小吸附力阈值 1.63 N,对应吸盘上端负压约为 11.5 kPa。仿真得到的结果要小于理论计算值,其原因是 CFD 仿真在真实几何条件下考虑了局部节流、三维湍流以及结构对压力场的作用,理论计算与仿真之间的差异来源于前者的理想化假设使其具有一定保守性,而仿真能更准确反映实际流动特性,因此仿真结果更接近真实工况,可作为系统性能设计的依据。由于实际系统中存在管路沿程损失、局部阻力损失以及吸盘结构阻力等因素,风机需要提供更高的性能才能使吸

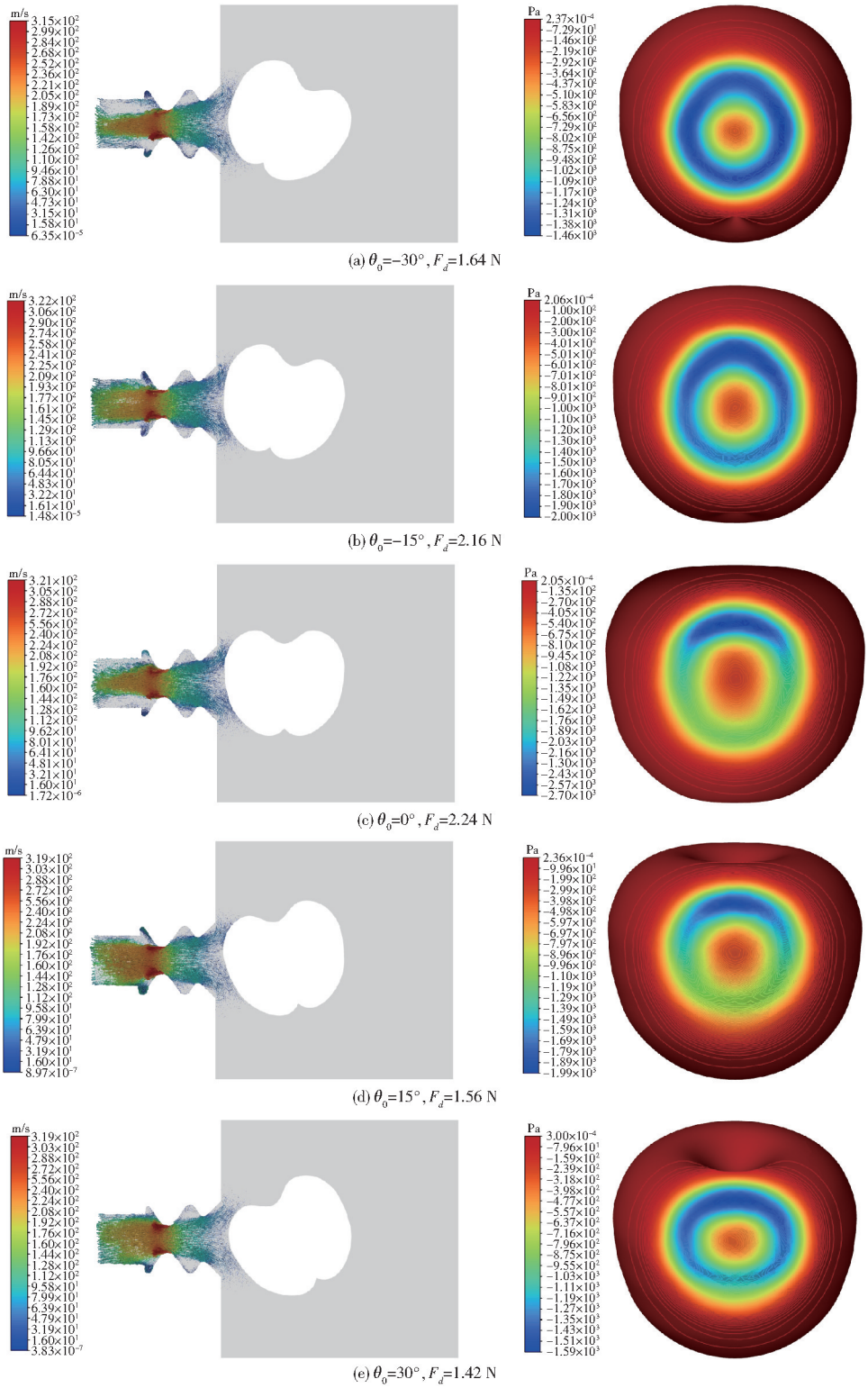


图 5　不同姿态下流场速度矢量图和苹果表面压力分布图

Fig. 5　Velocity vector fields and surface pressure distributions of apple under different postures

盘处达到仿真工况，因此在系统需求工作点基础上，负压增加 30% ~40% 裕度至 15 ~16 kPa，流量增加 20% ~30% 裕度至 240 m^3/h 左右，以此作为风机选型的目标工作点。查阅风机的性能曲线，选用适配该工作区间的风机可确保在最大作用距离下持续生成有效吸附力，满足果实吸附的可靠性要求。

4　试验

为验证末端执行器的吸附捕获效果及采摘性能，于 2025 年 10 月 28 日在陕西省延安市黄陵果园对吸附距离、吸附角度、吸附时间以及不同果实形态进行吸附试验，并统计不同工况下的吸附成功率。试验对象选取矮化密植果园中的苹果，平均直径约

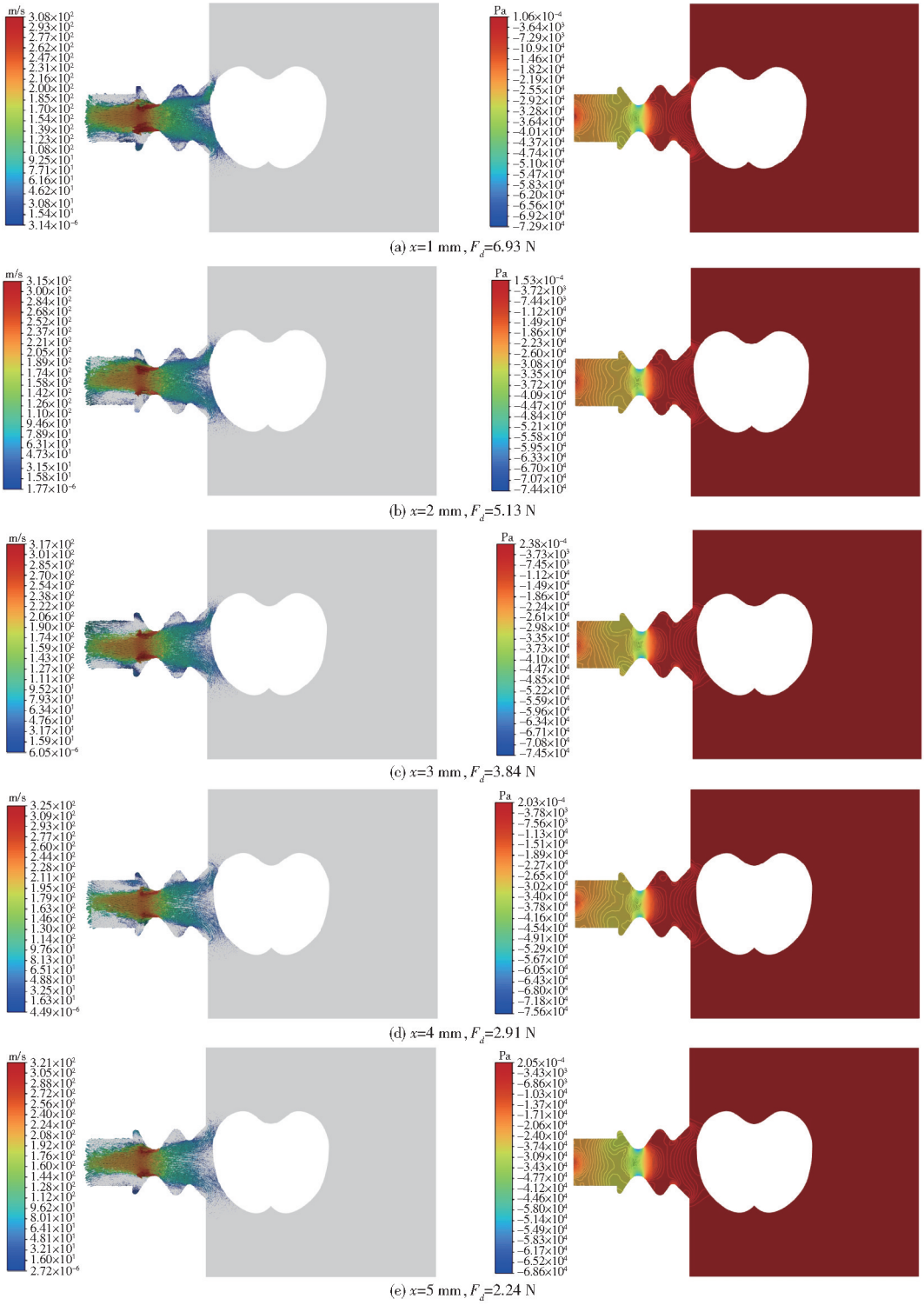


图 6 不同吸附距离下速度矢量图和压力分布图

Fig. 6 Velocity vector fields and pressure distributions at different adsorption distances

为 80.0 mm,共选取 340 个苹果作为样本。根据前述仿真结果并结合风机特性曲线,选用 RB-61D-2 型高压漩涡风机作为负压动力源,其最大流量为 315 m^3/h,额定负压为 -25 kPa。图 8 为采摘试验场景,末端执行器安装于七自由度机械臂末端,吸盘通过 3D 打印工艺成型。试验过程中,当确认目标果实后,机械臂运动至合适位置,气缸驱动吸盘接近果实表面,在负压作用下实现稳定吸附;随后由电机驱动吸盘施加周向扭转载荷,气缸带动末端执行器完成拉拽动作,直至果实与果柄分离,实现采摘,如图 9 所示。

4.1 吸附捕获距离

为研究吸附距离对末端执行器吸附性能的影响,分别设置 1、2、3、4、5、6 mm 6 种吸附距离,在水平吸附角度(0°)条件下进行吸附试验。每种工况下重复试验 20 次,记录吸附成功次数,试验结果如

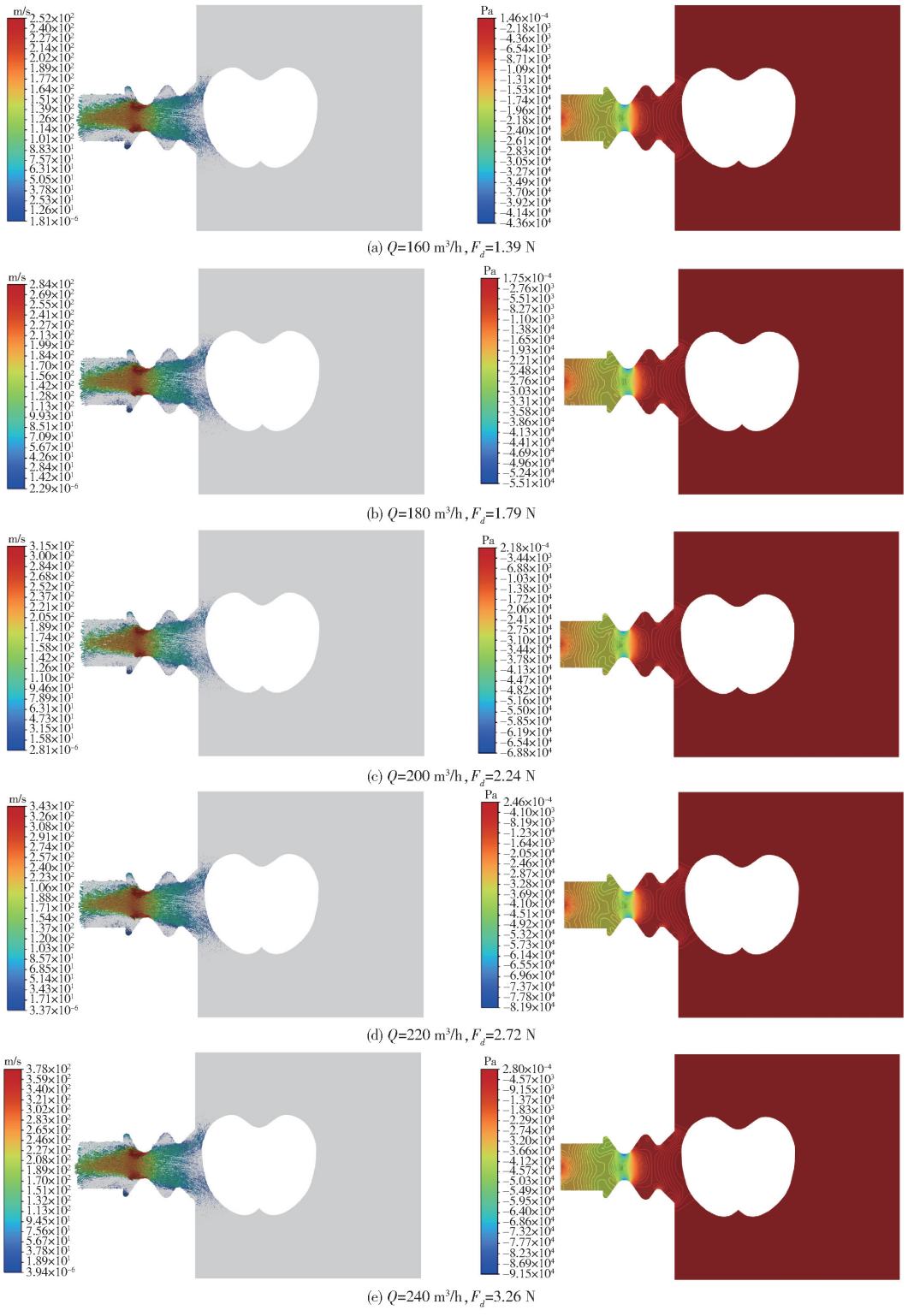


图 7　不同流量下速度矢量图和压力分布图

Fig. 7　Velocity vector fields and pressure distributions at different flow rates

图 10 所示。

结果表明，成功率随吸附距离增大呈明显下降趋势。基于试验数据，采用二次多项式进行曲线拟合，得到函数关系为

$$f(x) = -2.037x^3 + 15.317x^2 - 35.503x + 123.33 \tag{12}$$

拟合决定系数 R^2 =0.983 1，在显著性水平 α = 0.05 下拟合结果显著，能够较好地描述成功率随距离变化的规律。根据拟合曲线，以吸附成功率不低于 90% 作为可靠吸附的判据，可得到最大可靠吸附距离为 4.41 mm。当距离超过该阈值后，成功率迅速下降，表明末端执行器在当前结构与参数条件下的有效吸附范围约为 4.41 mm。该距离范围能够满足果实采摘作业对吸附精度的要求。



图 8 采摘试验场景

Fig. 8 Field harvesting experiment



图 9 末端执行器采摘流程

Fig. 9 Picking process of end-effector

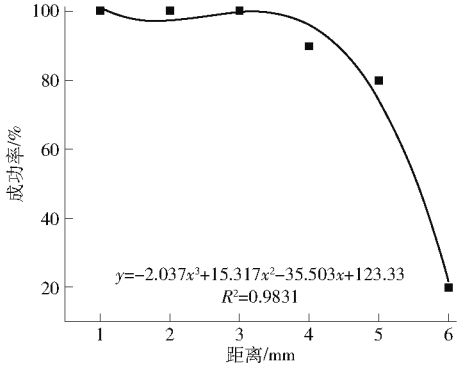


图 10 成功率变化曲线

Fig. 10 Success rate variation curve

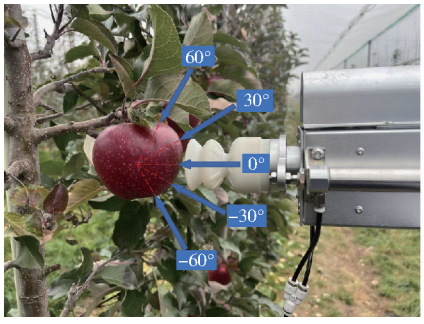


图 11 不同吸附角度采摘试验

Fig. 11 Harvesting experiments at different adsorption angles

表 2 不同吸附角度下吸附成功率

Tab. 2 Adsorption success rate at different adsorption angles

吸附角度/(°)	数量/个	吸附数/个	吸附成功率/%
60	20	10	50
30	20	16	80
0	20	20	100
−30	20	12	60
−60	20	5	25

4.2 吸附角度

定义吸盘中心轴线与苹果吸附点处表面法线方向一致的姿态为 0°吸附角，当吸盘中心轴线相对于该法线方向发生偏转时，对应姿态定义为不同的吸附角度，如图 11 所示。在该试验中，吸附角度分别设置为 −60°、−30°、0°、30°、60°共 5 种吸附角度，吸附距离固定为 4.41 mm，每种角度试验 20 次，记录成功次数，试验结果如表 2 所示。

试验结果表明，在相同初始吸附距离条件下，吸附苹果的成功率随吸附角度偏离水平方向而显著降低。当吸附角度为 0°时，吸附气流场分布较为对称稳定，捕获过程稳定，吸附成功率最高。随着吸附角度向上偏移、逐渐靠近果实肩部，吸附力在果柄处引入较大的转动效应，同时枝条与叶片对吸附气流产生干扰，苹果在吸附过程中更容易出现明显摆动，难以持续向吸附端靠近，导致吸附成功率下降；而当吸附角度向下偏移、逐渐靠近果实底部时，吸附作用需要通过果柄牵引枝条发生较大响应，苹果向吸附端的运动受限，难以形成稳定、连续的靠近过程，从而进一步降低了吸附成功率。

4.3 吸附时间

为评价末端执行器吸附建立过程的效率，在相同吸附距离与吸附角度条件下开展吸附时间试验，吸附距离固定为 4.41 mm，吸附角度为 0°，重复试验 20 次，记录果实实现稳定吸附所需的时间，吸附时间定义为吸盘到达目标位置并建立负压后，至果实稳定吸附且无相对滑移为止的时间，如图 12 所示。统计分析可知，末端执行器吸附可靠的平均时间为 1.97 s。

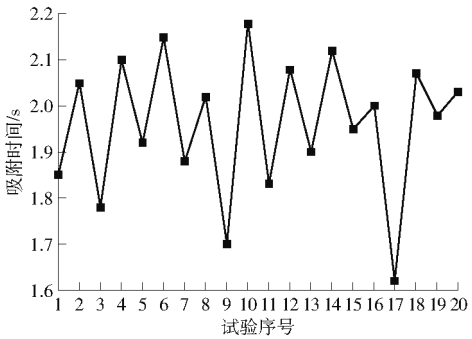


图 12 吸附时间变化曲线

Fig. 12 Variation curve of adsorption time

4.4　不同果实形态吸附效果

结合以上分析，为探讨不同大小果实对吸附的影响，选取大、中、小果实共 100 个，在最大吸附距离以及水平吸附姿态进行吸附采摘试验，试验结果如表 3 所示。

表 3　不同果实形态采摘成功率

Tab. 3　Picking success rate for different fruit morphologies

果实类型	数量/个	吸附数/个	采摘数/个	采摘成功率/%
大果（>90 mm）	33	29	29	87.9
中果（70～90 mm）	36	34	34	94.4
小果（<70 mm）	31	28	28	90.3

统计结果显示，吸附成功数量为 91 个，吸附成功率为 91%，采摘成功数量为 91，采摘成功率为 91%，对于目标果实只要吸附过来就能够将苹果果实采摘下来。中果的采摘成功率最高，达到 94.4%；小果和大果的成功率分别为 90.3% 和 87.9%。造成这一差异的原因在于：当果实直径小于 70 mm 时，由于果实直径较小，其表面曲率半径小，直径 50 mm 的吸盘在吸附时裙边难以完全展平或产生过度变形，容易在接触边缘形成微小褶皱或间隙，从而引起漏气，导致吸附失效；而当果实直径超过 90 mm 时，果实质量过大，吸盘所提供的吸附力不足，其次在旋拧和拉拽的运动中，大果较大的质量产生了更大的惯性力矩，加剧了吸盘边缘的受力不均，极易破坏密封状态，导致果实从吸盘上滑脱。综上所述，本文所设计的末端执行器在果实直径为 70～90 mm 的中等尺寸苹果上表现最佳。

5　结论

（1）针对苹果采摘过程中果实易损伤、定位精度要求高以及簇生果实适应性不足等问题，设计了一种气吸捕获式苹果采摘末端执行器。

（2）基于负压吸附原理，建立了风机流量与果实吸附力之间的定量关系模型，理论计算表明在最大吸附距离 5 mm 条件下实现稳定吸附所需的临界吸附力为 1.63 N，为末端执行器设计与风机选型提供了理论依据。

（3）通过 CFD 数值仿真系统分析了苹果姿态角、吸附距离和气体流量对吸附性能的影响规律。结果表明：垂直生长姿态下的苹果所受吸附力最大，压力分布最均匀；吸附距离从 1 mm 增加到 5 mm 时，压力梯度和吸附力显著降低；气体流量从 180 m^3/h 提升至 240 m^3/h 时，吸附力由 1.39 N 增至 3.26 N。基于仿真结果确定了风机工作参数为：负压 15～16 kPa、流量 240 m^3/h，为设备选型提供了量化指标。

（4）试验验证表明，所设计的末端执行器最大可靠吸附距离为 4.41 mm，最佳吸附角度为 0°，单果平均可靠吸附时间为 1.97 s，吸附成功率为 91%，采摘成功率为 91%，其中直径 70～90 mm 的中等果实采摘成功率最高，达 94.4%。

参　考　文　献

[1] 马瑞峻，陈瑜，张小花，等. 苹果机械化采收发展历程、模式及其技术现状[J]. 中国农机化学报，2024，45(1)：301－306，329.
MA Ruijun，CHEN Yu，ZHANG Xiaohua，et al. Development process，mode and technology status of apple mechanized harvesting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(1)：301－306，329.（in Chinese）

[2] 邹宝玲，刘佛良，张震邦，等. 山地果园机械化：发展瓶颈与国外经验借鉴[J]. 农机化研究，2019，41(9)：254－260.
ZOU Baoling，LIU Foliang，ZHANG Zhenbang，et al. Mechanization of mountain orchards：development bottleneck and foreign experiences[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(9)：254－260.（in Chinese）

[3] 张毅，郝骞. 苹果采收机器人结构设计与仿真分析[J]. 机械设计与制造，2022(2)：291－294，299.
ZHANG Yi，HAO Qian. The structure design and simulation analysis of apple picking robot[J]. Machinery Design & Manufacture，2022(2)：291－294，299.（in Chinese）

[4] 闫全涛，李丽霞，邱权，等. 小型移动式农业机器人研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报，2019，40(5)：178－186.
YAN Quantao，LI Lixia，QIU Quan，et al. Research status and development trends of small-mobile agricultural robots[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(5)：178－186.（in Chinese）

[5] 李会宾，史云. 果园采摘机器人研究综述[J]. 中国农业信息，2019，31(6)：1－9.
LI Huibin，SHI Yun. Review on orchard harvesting robots[J]. China Agricultural Informatics，2019，31(6)：1－9.（in Chinese）

[6] 李秦川，胡挺，武传宇，等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报，2008，39(3)：175－179，186.
LI Qinchuan，HU Ting，WU Chuanyu，et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2008，39(3)：175－179，186.（in Chinese）

[7] 卢伟，王鹏，王玲，等. 褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：28－36.

LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 28 - 36. (in Chinese)
[8] 魏博,何金银,石阳,等. 欠驱动式柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):120 - 128.
WEI Bo, HE Jinyin, SHI Yang, et al. Design and experiment of underactuated end-effector for citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 120 - 128. (in Chinese)
[9] 史帅旗,杨福增,刘志杰,等. 复合气动式苹果采摘手设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(10):93 - 105.
SHI Shuaiqi, YANG Fuzeng, LIU Zhijie, et al. Design and experiment of composite pneumatic apple picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 93 - 105. (in Chinese)
[10] 赵云伟,赵文伟,刘政,等. 单驱动无缆式气动苹果采摘手设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):264 - 274.
ZHAO Yunwei, ZHAO Wenwei, LIU Zheng, et al. Design and testing of cableless pneumatic apple picker with single actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 264 - 274. (in Chinese)
[11] 雷志龙,刘畅,王权. 设施番茄采摘机器人识别定位与采摘方法研究[J]. 农业机械学报,2025,56(7):219 - 226.
LEI Zhilong, LIU Chang, WANG Quan. Recognition-localization and picking methods of facility tomato picking robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 219 - 226. (in Chinese)
[12] 冯青春,赵春江,李涛,等. 苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(13):25 - 33.
FENG Qingchun, ZHAO Chunjiang, LI Tao, et al. Design and test of a four-arm apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(13): 25 - 33. (in Chinese)
[13] WANG M, YAN B, ZHANG S, et al. Development of a novel biomimetic mechanical hand based on physical characteristics of apples[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1871.
[14] LU R, DICKINSON N, LAMMERS K, et al. Design and evaluation of end effectors for a vacuum-based robotic apple harvester [J]. Journal of the ASABE, 2022, 65(5): 963 - 974.
[15] JO Y, PARK Y, SON H I. A suction cup-based soft robotic gripper for cucumber harvesting: design and validation[J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 143 - 156.
[16] SALISBURY C, SUCHOSKI J, MAHONEY R. End effector for robotic harvesting: US202217665689[P]. 2022 - 06 - 23.
[17] LEHNERT C, MCCOOL C, SA I, et al. Performance improvements of a sweet pepper harvesting robot in protected cropping environments[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(7): 1197 - 1223.
[18] CAO M, ZHANG J, SUN Y, et al. A novel air-suction classifier for fresh sphere fruits in pneumatic bulk grading[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(4): 3390 - 3402.
[19] CHEN Y, ZHAO J, HU G, et al. Design and testing of a pneumatic oscillating Chinese wolfberry harvester[J]. Horticulturae, 2021, 7(8): 214.
[20] MA J, TAN H, SHEN C, et al. Optimization of pneumatic adsorption port for grape harvesting using discrete adjoint method and deflection analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110723.
[21] BU L, HU G, CHEN C, et al. Experimental and simulation analysis of optimum picking patterns for robotic apple harvesting [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261: 108937.
[22] LI J, LAI Q, SU W, et al. Research on the influence of the suction force on spherical particles in suction flow[J]. Powder Technology, 2021, 393: 824 - 836.
[23] 周雨青,叶兆宁,吴宗汉. 球类运动中空气阻力的计算和分析[J]. 物理与工程,2002(1):55 - 59.
[24] 龙天渝,蔡增基. 流体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:239 - 240.
[25] 李娜,王杉,徐鹏云,等. 皂荚籽气吸清选装置设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(7):176 - 185.
LI Na, WANG Shan, XU Pengyun, et al. Design and experiment of air-suction separator for gleditsia sinensis seed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(7): 176 - 185. (in Chinese)
[26] 杨明金,邱兵,杨玲,等. 振动气吸式精密穴播机的排种性能[J]. 农业工程学报,2010,26(9):139 - 143.
YANG Mingjin, QIU Bing, YANG Ling, et al. Metering performance of the vibrational vacuum precision tray seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 139 - 143. (in Chinese)
[27] 冯青春,袁挺,纪超,等. 黄瓜采摘机器人远近景组合闭环定位方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2):154 - 157.
FENG Qingchun, YUAN Ting, JI Chao, et al. Feedback locating control based on close scene for cucumber harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 154 - 157. (in Chinese)
[28] 姬丽雯,刘永华,高菊玲,等. 温室草莓采摘机器人设计与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(1):192 - 198.
JI Liwen, LIU Yonghua, GAO Juling, et al. Design and experiment of strawberry picking robot in greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 192 - 198. (in Chinese)
[29] BELDEK C, DUNN A, CUNNINGHAM J, et al. Multi-vision-based picking point localisation of target fruit for harvesting robots[C]//2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). IEEE, 2025: 1 - 6.
[30] PACHPUTE S, PREMACHANDRAN B. Turbulent multi-jet impingement cooling of a heated circular cylinder [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 148: 106167.