

分类号: S23
学号: 20222009017

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于磁流体流动控制的气吸红枣运动规律研究

学位申请人	刘长国
指导教师	聂晶 教授 李阳 副教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	机械工程
研究方向	机械电子工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号: S23
学号: 20222009017

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于磁流体流动控制的气吸红枣运动规律研究

学位申请人	刘长国
指导教师	聂晶 教授 李阳 副教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	机械工程
研究方向	机械电子工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Study on the movement law of air-sucking jujube based on the
control of magnetic fluid flow**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Liu Changguo

(Mechanical engineering)

Dissertation Supervisor: Professor Nie Jing,
and Associate Professor Li Yang

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：刘长国

时间：2025年5月25日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：刘长国

时间：2025年5月25日

导师签名：聂晶

时间：2025年5月25日

摘要

红枣是一种重要的经济作物，红枣收获是红枣产业的重要环节，由于红枣落果率高，针对落地红枣，传统气吸收获方式通过增加空气流量提高捡拾效率，但会导致红枣破损率大幅增大。针对上述问题，本研究引入磁流体流动控制方法，结合理论分析、数值模拟与试验验证，分析了流场、电场、磁场参数对气吸红枣运动规律的影响，为低损伤高效收获装备研发提供理论依据。主要研究内容及结论如下：

(1) 红枣物料特性测量及运动特性分析。红枣物料特性是进行装置设计及仿真模拟的基础，通过实际测量获取红枣形状尺寸、质量、密度、悬浮速度等物料参数，测量结果为后续研究提供数据支持。基于磁流体流动控制理论及牛顿运动规律对磁流体流动控制下气吸红枣运动过程进行描述，建立了红枣运动方程，包括力学方程、速度方程、加速度方程、位移方程，为研究提供理论支撑。

(2) 气吸红枣仿真模拟与试验装置设计。针对红枣运动规律，利用 **Fluent-Rocky** 联合仿真平台，分别构建多物理场耦合模型及红枣离散元模型，以流量、电势、磁感应强度为自变量，以颗粒平均最大瞬时速度和气流平均最大曳力为因变量设计三因素三水平正交实验，得到了不同参数组合下流场、颗粒数据。对仿真实验结果进行直观分析选优及三因素方差分析，结果表明：流量、电势、磁感应强度对颗粒平均最大瞬时速度及气流平均最大曳力均呈现显著性，且颗粒平均最大瞬时速度和气流平均最大曳力均与流量、电势、磁感应强度正相关。最后，根据仿真实验结果，对装置进行优化，确定了试验装置结构。

(3) 基于磁流体流动控制的红枣运动规律试验研究。按照设计方案搭建试验装置，利用 **Design-Expert 13** 进行试验设计及分析。首先分析了试验因素对颗粒轨迹、颗粒速度 v 的影响，试验结果表明：颗粒速度 v 与流量 Q 、电势 U 、磁感应强度 B 正相关，影响显著性顺序依次为流量 Q 、磁感应强度 B 、电势 U ；相同流量条件下，电势、磁感应强度越大，颗粒在拍摄段初始位置 y 值越高，与试验段底部首次碰撞 x 位置越远。其次，分析了试验因素对捡拾效率 S 和破损率 D 的影响，试验结果表明：捡拾效率 S 与流量 Q 、电势 U 、磁感应强度 B 正相关，流量 Q 对捡拾效率 S 的影响最为显著，电势 U 和磁感应强度 B 对捡拾效率 S 的影响次之；破损率 D 与流量 Q 、磁感应强度 B 正相关，电势 U 增大，破损率先增大后减小，影响显著性顺序依次为流量 Q 、电势 U 、磁感应强度 B 。最后，确认最优参数为 $U = 85 \text{ kV}$ 、 $B = 0.2 \text{ T}$ ，进行收获性能验证，结果表明，流量分别为 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，相较不施加电场、磁场， $U = 85 \text{ kV}$ 、 $B = 0.2 \text{ T}$ 时，捡拾效率提升 38.97% 、 31.94% 、 23.42% ，破损率仅增大 0.84% 、 0.74% 、 1.03% ，且均小于 5% ，在保证破损率的同时，能有效提升捡拾效率。

关键词：气吸红枣；磁流体流动控制；运动规律；捡拾效率；破损率

Abstract

Jujube is an important economic crop, and jujube harvesting is a crucial stage in the jujube industry. Due to the high fruit drop rate of jujubes, traditional pneumatic harvesting methods, when dealing with fallen jujubes, increase the air flow rate to enhance picking up efficiency, but this often leads to a significant increase in jujube damage rates. In response to this issue, this study introduces a magnetic fluid flow control method. Through theoretical analysis, numerical simulations, and experimental validation, the study analyzes the effects of flow field, electric field, and magnetic field parameters on the movement characteristics of pneumatically harvested jujubes. This research provides a theoretical basis for the development of equipment for low-damage and high-efficiency jujube harvesting. The main research content and conclusions are as follows:

(1) Measurement of jujube material characteristics and analysis of motion characteristics. The material characteristics of jujubes form the basis for device design and simulation modeling. Actual measurements are taken to obtain parameters such as jujube shape dimensions, mass, density, suspension velocity, etc. These measurements provide data support for subsequent research. Building upon the theory of magnetic fluid flow control and Newton's laws of motion, the study describes the movement process of pneumatically harvested jujubes under magnetic fluid flow control. Jujube motion equations are established, including mechanical equations, velocity equations, acceleration equations, and displacement equations, offering theoretical support for the research.

(2) Simulation and experimental device design for pneumatic jujube harvesting. Using the Fluent-Rocky combined simulation platform, a multi-physics field coupling model and a discrete element model for jujubes were separately constructed to study the motion characteristics of jujubes. The independent variables included flow rate, electric potential, and magnetic induction intensity, while the dependent variables were particle average maximum instantaneous velocity and airflow average maximum drag force. A three-factor three-level orthogonal experiment was designed to obtain flow field and particle data under different parameter combinations. The simulation experimental results were subjected to visual analysis, optimization selection, and three-factor variance analysis. The results indicated that flow rate, electric potential, and magnetic induction intensity significantly influenced both particle average maximum instantaneous velocity and airflow average maximum drag force. Moreover, there was a positive correlation between particle velocity and airflow drag force with flow rate, electric potential, and magnetic induction intensity. Finally, based on the simulation experimental results, the device was optimized, and the experimental setup structure was determined to align with the findings.

(3) Experimental study on the movement law of jujube based on magnetic fluid flow control. The test device was built according to the Design scheme, and DESIGN-Expert 13 was used for test design and analysis. Firstly, the influence of experimental factors on particle trajectory and particle velocity v is analyzed. The test results show that particle velocity v is positively correlated with flow rate Q , electric potential U and magnetic induction intensity B , and the order of significant influence is flow rate Q , magnetic induction intensity B and electric potential U . Under the same flow condition, the larger the electric potential and magnetic induction intensity, the higher the initial position y value of the particle in the shooting section, and the farther away the first collision x position with the bottom of the test section. Secondly, the effects of experimental factors on picking up efficiency S and breakage rate D are analyzed. The test results show that: picking up efficiency S is positively correlated with flow rate Q , electric potential U and magnetic induction intensity B . Flow rate Q has the most significant effect on picking up efficiency S , followed by electric potential U and magnetic induction intensity B . The damage rate D is positively correlated with the flow rate Q and the magnetic induction intensity B , the potential U increases, the damage increases first and then decreases, and the order of significance is the flow rate Q , the potential U , and the magnetic induction intensity B . Finally, the optimal parameters were confirmed as $U = 85$ kV and $B = 0.2$ T, and the harvest performance was verified. The results showed that when the flow rate was 3.5 m³/s, 4.5 m³/s, and 5 m³/s respectively, compared with no electric and magnetic fields, when $U = 85$ kV and $B = 0.2$ T, the harvest performance was improved. The picking up efficiency was increased by 38.97%, 31.94% and 23.42%, while the damage rate was only increased by 0.84%, 0.74% and 1.03%, all of which were less than 5%, which could effectively improve the picking up efficiency while ensuring the damage rate.

Key words: Air suction jujube; Magnetic flow control; Law of motion; Picking up efficiency; Breakage rate

目录

摘要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 气吸收获装置优化研究现状.....	3
1.2.2 颗粒运动规律研究现状.....	4
1.2.3 磁流体流动控制研究现状.....	5
1.2.4 总结分析.....	6
1.3 研究内容与技术路线.....	7
1.3.1 研究内容.....	7
1.3.2 研究方法.....	8
1.3.3 技术路线.....	8
1.4 本章小结.....	10
第 2 章 红枣物料特性测量及运动特性分析.....	11
2.1 红枣物料特性测量.....	11
2.1.1 试验材料.....	11
2.1.2 测量仪器.....	11
2.1.3 测量方法.....	11
2.1.4 测量结果.....	14
2.2 红枣运动特性分析.....	15
2.2.1 磁流体流动控制下气吸红枣运动过程描述.....	15
2.2.2 磁流体流动控制下气吸红枣运动方程建立.....	19
2.3 本章小结.....	23
第 3 章 气吸红枣仿真模拟与试验装置设计.....	24
3.1 试验装置理论设计.....	24
3.1.1 设计要求分析.....	24
3.1.2 关键部件理论设计.....	24
3.2 气吸红枣仿真模拟模型建立与参数设置.....	27

3.2.1 基于 Fluent-Rocky 的耦合仿真模型	28
3.2.2 耦合方法选择及仿真参数设置	30
3.3 仿真结果与分析	32
3.3.1 仿真实验设计	32
3.3.2 仿真结果分析	33
3.4 试验装置优化与方案确定	38
3.4.1 装置优化	38
3.4.2 设计方案确定	40
3.5 本章小结	40
第 4 章 基于磁流体流动控制的红枣运动规律试验研究	42
4.1 试验材料及设备	42
4.1.1 试验材料	42
4.1.2 试验设备	43
4.2 试验方法	45
4.2.1 试验因素的确定	45
4.2.2 响应指标的确定	46
4.2.3 试验设计	47
4.3 试验结果与分析	48
4.3.1 结果分析	48
4.3.2 试验因素对颗粒轨迹的影响	49
4.3.3 试验因素对颗粒速度的影响	50
4.3.4 试验因素对捡拾效率的影响	50
4.3.5 试验因素对破损率的影响	51
4.3.6 收获性能验证	52
4.4 本章小结	52
第 5 章 总结与展望	54
5.1 全文总结	54
5.2 研究展望	55
参考文献	56
致谢	60
作者简介	61

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

红枣作为一种重要的农产品，具有重要的经济价值、医药价值和生态价值。红枣产业完整的产业链，涵盖种植、加工、销售等环节，促进了当地经济的发展。此外，随着人们健康意识的提高，红枣作为“药食同源”的重要干果类型，因其丰富的营养成分和功效使其备受推崇，被广泛用于调理身体、增强免疫力^[1-3]。最后，红枣树具有良好的环境适应性，种植红枣树有助于改善土壤质量，保护水源，促进生态系统的多样性和稳定性，如图 1-1 所示。



图 1-1 矮化密植的红枣林

Fig.1-1 Dwarf and densely planted jujube forest

我国作为世界红枣的主要生产国，红枣产量占到全球总产量的 90% 以上。而新疆凭借其独特的地理环境及气候条件，自 2000 年引入，红枣产业蓬勃发展，产量及种植面积迅速增长，逐渐发展成为中国乃至世界红枣的主产区，种植区域覆盖新疆大部分县市，2024 年，红枣种植面积和产量分别达到了 478 万亩和 320 余万吨。红枣品种有 200 多种，以灰枣、骏枣、冬枣、哈密大枣为主，如图 1-2 所示，其中灰枣的占比最高。

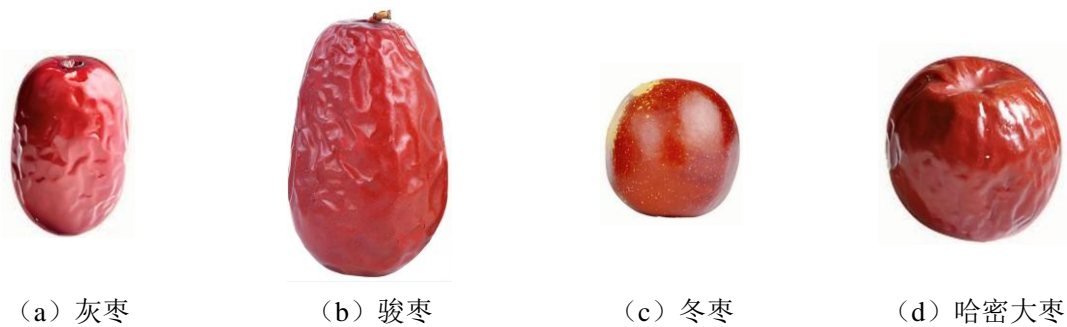


图 1-2 新疆主要枣类种植品种

Fig.1-2 Main varieties of jujube planted in Xinjiang

红枣收获作业是红枣产业中的重要环节，直接影响红枣的产量及收获品质。处于成熟期的红枣因其果柄生物特性及自然风力会发生自然脱落，落果率可达到 70%^[4]。针对落地红枣，以气吸收获为主要收获方式，传统气吸收获方式基于气力输送原理，通过入口流量调节控制吸管中气体流速，从而改变装置内红枣的运动状态。然而，仅通过增加空气流量虽然能在一定程度上提高捡拾效率，但同时，由于空气流速提高，颗粒碰撞加剧，导致红枣破损率大幅增大，在严重制约红枣产业发展的同时，也影响了枣农的种植积极性^[5,6]。

1.1.2 研究意义

对于气吸红枣收获方式，仅通过增加气流流量难以满足红枣收获要求，在提高捡拾效率的同时，红枣破损率大幅增大。而磁流体流动控制作为一种新型控制方法，相较于传统调节方式，具有灵活性高、可调性强、响应速度快、可靠性高、无污染等特点，能够实现对空气流场的有效控制。本研究将磁流体流动控制技术应用于气吸红枣收获过程，通过电场、磁场调控流场分布，研究磁流体流动控制对气吸红枣运动规律的影响，旨在保证较低破损率的同时提高红枣捡拾效率，为气吸红枣收获装置的设计优化提供技术参考。

1.2 国内外研究现状

由于本研究以气吸红枣收获为应用背景，主要研究磁流体流动控制对气吸红枣运动规律的影响，本质上是通过对磁流体流动控制方法控制气体中电离的等离子体加速及偏移，利用等离子体气动激励改变气流流动轨迹，再利用气力输送原理控制吸管中红枣的运动状态。因此，此处将从气吸收获装置优化、颗粒运动规律、磁流体流动控制三个方面分别进行国内外文献综述，先阐明气吸收获装置优化过程中存在的问题，之后介绍了颗粒运动规律主要研究方法及其磁流体流动控制的主要应用场景。

1.2.1 气吸收获装置优化研究现状

气吸式收获方式在果品收获中扮演着重要的角色，不仅可以提高生产效率和品质，还能降低人力成本，对于现代化果品种植业的发展具有重要意义，针对于气吸收获装置优化，国内外学者开展了大量研究^[7-10]。

国内外研究学者们主要着眼于气吸收获装置的设计及优化，在 2020 至 2023 年间，就巴旦木^[8]、亚麻蒴果^[9]、榛子^[10]、花椒^[11]、小麦^[12]、枸杞^[13]等农产品展开研究，针对具体农产品气吸收获装置进行装置设计及参数优化，在一定程度上解决了农产品捡拾效率低、收获成本高的问题。

针对于红枣收获过程，2020 年，新疆农业大学 X. Zhang 等人^[14]设计了一种气吸红枣捡拾装置，针对风道堵塞问题，通过改变风扇转速、管道直径及出口直径，分析优化了装置内部流场分布，在一定程度上解决了红枣堵塞吸管的问题，装置优化后，红枣捡拾效率达到 238.68 kg/h，较原有装置性能有所提升。2021 年，新疆农业大学庄子豪等人^[15]设计的一种小型自走气吸式红枣收获机，在实现红枣捡拾的同时，还能对红枣进行初步除杂，研究借助试验手段测量了红枣及枣叶等杂物的悬浮特性参数，为气吸红枣收获机的设计提供参考。2021 年，新疆农业大学袁盼盼等人^[16]设计了一种清扫——气吸式红枣捡拾机，通过对收获机液压系统进行设计优化，集成了集果、卸料、自走等功能，提升了捡拾速度，达到 0.29 hm²/h。2022 年，石河子大学史高昆等人^[17]基于红枣以及枣叶等杂物的惯性差异设计制造了一种惯性气流式红枣清选系统，同时，利用计算流体力学软件 Fluent 对装置内部流场分布进行仿真模拟，得到了该装置最佳工作参数，极大降低了红枣收获过程的含杂率和损失率。2024 年，朱启航等人^[18]针对南疆若羌红枣设计了一种气吸式背负采收机，在初步完成对枣叶等杂物的田间除杂时，极大提高了捡拾效率。2024 年，Shenghe Bai 等人^[19]设计了振动曲面筛结构，在一定程度上提高了气吸红枣收获装置的筛分性能和清理效果，同时以弧形层筛垂直间距、弧形网孔曲率、弧形网孔间距为实验因素，以筛分效率 α 和红枣杂质含量 β 为响应值进行了试验研究，为后续装置优化提供了参考。2024 年，HUIZHE DING 等人^[20]基于计算流体力学方法，对双风道气吸红枣装置腔内流场状态进行了探究，建立了数值模拟模型，测试结果表明，双气道吸力的速度不均匀系数分别为 6.22%、6.60%和 6.45%，为落地红枣气吸收获装备的设计优化提供了参考。

综上所述，国内外学者就农产品气吸收获方法开展了大量研究，针对巴旦木、亚麻蒴果、榛子、红枣、花椒、荞麦、黄花菜等农产品设计制造了一系列气吸收获装置，并进行了装置优化，部分装置还具有除杂、分选等功能，在一定程度上提升了捡拾效率。对于气吸红枣收获过程，研究工作者们设计研发了一系列气吸式红枣收获机械，通过装置设计优化在一定程度上解决了红枣收获过程中机械化水平低的问题，但仅仅通过流量

控制无法兼顾捡拾效率和破损率。而本文提出的,通过研究磁流体流动控制对气吸红枣运动规律的影响来提升收获性能的方式,还未见报道。

1.2.2 颗粒运动规律研究现状

研究颗粒运动规律旨在深入理解物质的运动行为,探索物质的集体行为、相变过程等基础科学问题,对于揭示物质微观层面运动机制有重要意义,有助于为工程设计和优化提供参考,从而帮助产品进行设计和改进,国内外学者针对颗粒运动规律开展了大量研究^[21]。

在农业领域,2020至2024年间,国内外学者先后针对茶叶^[22]、大豆^[23]、红枣^[24]、沙棘^[25]、大米^[26]等农产品开展了大量研究,利用离散单元法对于不同农产品进行仿真建模,模拟不同参数条件下颗粒在装置内的运动状态,对于装置设计优化提供了重要参考。2021年,张浩强等人^[27]研究了球形、长方形、正方形、三角形四种等质量非球形颗粒在匀转速条件下的运动特性,试验证明颗粒形状对于颗粒受力及运动有较大影响。2020年张珩等人^[28]针对旋风分离器中的固体颗粒,利用离散相模型(Discrete Phase Model, DPM)模拟了颗粒在不同入口角度和速度条件下的受力状况及运动轨迹,试验结果表明在入口角度为 -30° 时分离效果最好。2021年, Lucia J. Baker 等人^[29]采用粒子图像测速技术获取了光滑渠道流体中球形颗粒的粒子轨迹,解释了湍流边界层中惯性球形粒子的粒子-流体-壁相互作用机理。2021年, Mahmoud A. El-Emam 等人^[30]系统介绍了计算流体力学-离散单元耦合方法(Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method, CFD-DEM)在生物颗粒空气动力学系统中的最新策略和应用,主要包括空气动力学系统的定义及原理、粒子运动建模、CFD-DEM耦合方法及阻力模型、空气动力学系统在农业领域的应用四个方面,该文献表明,CFD-DEM是研究流体中生物颗粒行为的有效方法,有助于开发和优化设备。2022年,东北大学黄思等人^[31]采用离散元仿真与粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)试验研究相结合的方式,研究了喷砂机内部颗粒的运移规律,建立了喷砂机内部颗粒撞击壁面的运动模型。2023年, A Schröder 等人^[32]指出在传统3D拉格朗日粒子跟踪技术基础上引入纳维-斯托克斯约束条件可用来追踪流体中粒子速度、加速度、轨迹,为描述非稳态流场提供了可能。2023年, Yuan Y U 等人^[33]针对粗细颗粒分级过程开展研究,分别建立了颗粒-涡相互作用模型和离散元软球模型,探究了流场中粗细颗粒的分布规律,为颗粒分级装置设计优化提供了技术参考。2024年, Jesse Capecelatro 等人^[34]建立了高速分散多相流系统的粒子运动方程,分别从理论分析、数值模拟及试验的角度对粒子运动现象进行了解释,对于多相流研究提供了参考。

综上所述,针对于颗粒运动规律的研究方法主要包括理论分析、离散单元法和试验手段观测。其中,理论分析通过数学建模和理论分析,推导颗粒系统的运动规律,利用

牛顿定律、气力输送机理、连续介质力学、统计力学等理论进行分析，针对颗粒系统建立方程以描述颗粒运动行为。离散单元法通过模拟颗粒在流体中的运动状态，研究颗粒与流体之间的相互作用，以及颗粒在复杂流场中的运动行为，提供颗粒系统的详细运动信息，但计算量较大。试验手段观测通过 PIV 等技术手段对实际颗粒物料运动过程进行记录，直接观察和记录颗粒系统的运动行为，可以获取真实世界的的数据，但同时受限于实验设备和现实条件，难以对部分现象进行细致观测或测量。综合考虑现实条件及研究需求，由于多物理场配置过程会遮挡试验箱体，无法通过 PIV 等试验手段获取完整了颗粒运动图像。因此，本研究结合理论分析方法，主要采用 Fluent-Rocky DEM 耦合仿真研究红枣颗粒的运动规律。

1.2.3 磁流体流动控制研究现状

磁流体（Magnetohydrodynamics, MHD）流动控制技术是一种基于电磁控制的新型控制技术，其原理是通过外部电场提供足够的能量，帮助流体克服分子间作用力产生等离子体，对磁流体流动通道内的等离子体施加磁场，通过改变外加磁场的大小和配置方式改变流体流动速度和方向，磁流体流动控制效果的强弱由流场、电场、磁场耦合作用决定，如图 1-3 所示^[35]。

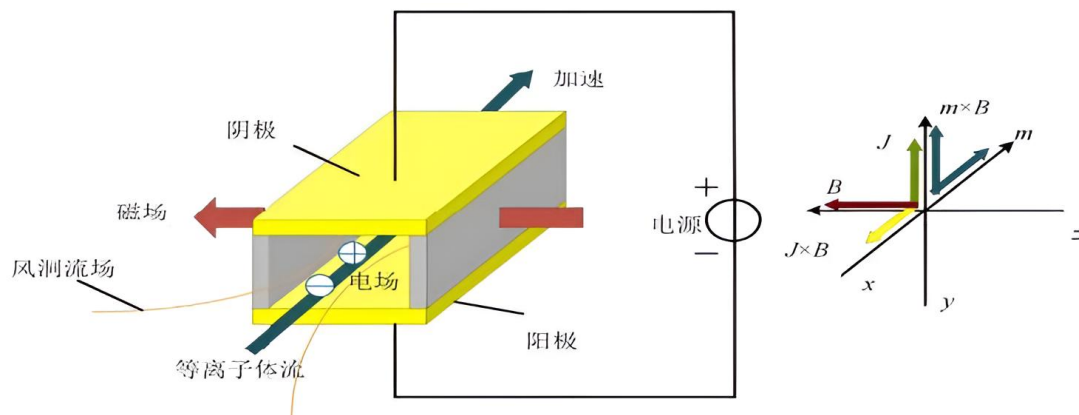


图 1-3 磁流体流动控制原理
Fig.1-3 Principle of MHD flow control

磁流体流动控制技术能够实现对流体的精确控制，被广泛应用于天体物理、流体传输、液体密封和液面控制等领域，具有广泛的应用前景和研究价值，国内外学者就磁流体流动控制理论及应用开展了大量研究。2017 至 2019 年，李益文等人^[36,37]针对航空航天发动机进气道内等离子体，利用磁流体流动控制方法对等离子体进行矢量控制，从而达到增强发动机推力矢量和降低能源消耗的目的。2019 年，K Ida 等人^[38]解释了 MHD 和湍流之间的相互作用机制，为等离子体中 MHD 和湍流之间相互作用提供了试验证据。

2019年, M. Sheikholeslami 等人^[39]利用数值模拟方法模拟了多孔围炉结构中的磁流体流动过程。2020年, Moslem Sadeghi-Goughari 等人^[40]通过在纳米管道中施加横向磁场产生轴向力来引导流体流动。2020年, LIL.等人^[41]将氩气等离子体作为流动介质, 采用数值模拟方法研究其在不同磁场配置条件下的速度变化, 试验结果表明, 磁场配置条件不仅会对等离子体电离过程造成影响, 还会改变等离子体的流动特性, 验证了利用磁流体流动控制方法改变流体流动状态的有效性。2022年, 中国空气动力研究与发展中心罗仕超等人^[42]通过隐式处理方法建立了气体流场、磁场耦合仿真模型, 研究表明, 湍流边界层流动控制效果与磁场施加的洛伦兹力正相关。2022年, Kazunori Takahashi 等^[43]通过改变磁喷嘴的二维转向对射频等离子体推力器中的等离子体羽流进行矢量控制, 研究表明, 等离子体羽流水平、垂直偏转可以通过改变磁场大小和方向实现。2023年, 大连理工大学朱霄龙等人^[44]针对在托克马克实验中出现的非共振内扭曲模和撕裂模不稳定性协同作用, 对粒子输运过程进行了模拟研究, 对于理解低频磁流体不稳定性协同作用下粒子输运特性提供参考。2024年, 北京航空航天大学滕子昂等人^[45]针对于飞行器飞行过程中磁流体热防护及能量提取过程进行了系统建模, 研究了飞行器来流马赫数、飞行高度等影响因素对于热防护及能量提取效果的影响规律。2024年, 湖南湘电动力有限公司的吴迅等人^[46]为提升船舶推进器性能, 针对磁流体推进器进行参数建模, 分析了结构参数及磁场激励对推进器性能的影响规律, 研究对于磁流体推进器性能优化提供参考。

综上, 磁流体流动控制主要通过改变流体内部粒子排列及相互作用, 从而达到优化流场分布、改变流体流动状态的目的, 因其具有高效、精确、无接触、可调节等优点, 使其在不同领域的应用越来越受到重视。国内外学者针对其控制理论及应用开展了大量研究, 通过数值模拟及试验验证证实了采用 MHD 进行气流控制的可行性。总的来说, 国内外对磁流体流动控制技术的研究趋势是逐渐增加的, 尤其在航空航天、微流体控制等方面有着广泛的应用前景。随着技术的不断进步和应用范围的扩大, 磁流体流动控制技术将继续受到学术界的关注。本研究利用磁流体流动控制方法改变气吸红枣收获装置内部流场, 从而改变红枣气力输送特性, 通过研究磁流体流动控制对气吸红枣运动规律的影响, 在保证红枣破损率的同时提高气吸红枣捡拾效率, 对气吸红枣收获装置的设计优化提供技术参考。

1.2.4 总结分析

国内外研究学者针对于农产品气吸收获装置优化、颗粒运动规律、磁流体流动控制展开了大量研究。研究针对不同农产品气吸收获效果进行分析, 从而进行装置优化, 在一定程度上提升了捡拾效率, 降低了劳动强度, 对于提高枣农种植积极性有重要意义, 但仅仅通过流量控制无法兼顾捡拾效率与破损率, 有必要采用新的控制策略对气吸红枣收获装置进行优化。磁流体流动控制方法因其自身具有高效、精确、无接触、可调节等

优点被广泛应用于各种场景，现有研究成果对于其控制机理进行了大量研究，论证了磁流体流动控制方法的有效性。本研究采用磁流体流动控制方法对气吸红枣装置内部流场进行控制，通过气力输送作用改变装置内红枣的运动状态。研究气吸红枣运动规律是评价气吸红枣收获效果的重要手段，国内外学者针对颗粒运动规律研究方法展开了大量研究，阐述了各种研究方法的原理和适用场景。为了解磁流体流动控制参数对于红枣运动规律的影响，本研究结合理论分析方法，对红枣运动过程进行仿真模拟，提供流场及颗粒数据可视化结果，最后利用试验手段验证其有效性。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文将磁流体流动控制引入气吸红枣收获过程，利用外部电离技术在试验箱流场中产生等离子体，对等离子体施加磁场，通过研究磁流体流动控制对于气吸红枣运动规律的影响，提出了一种性能优化思路，在保证红枣破损率的同时提高捡拾效率，本文主要研究内容如下：

(1) 红枣物料特性测量及运动特性分析

红枣物料参数及运动特性是后续进行装置设计及仿真模拟的基础。首先，选择试验样品，确定测量参数，拟定测量方案，选择测量工具，获取红枣物料特性数据，为后续进行离散元仿真参数设置和装置设计做好工作积累。之后，针对磁流体流动控制下气吸红枣运动特性进行分析，介绍磁流体流动控制下气吸红枣过程描述方法，建立磁流体流动控制下气吸红枣运动方程，为后续研究提供理论支撑。

(2) 气吸红枣仿真模拟与试验装置设计

为探究磁流体流动控制方法对于气吸红枣运动规律的影响，同时为后续进行试验验证建立装置设计基础，开展气吸红枣仿真模拟与试验装置设计。首先，分析设计要求，基于磁流体流动控制理论及红枣物料参数，对关键部件进行初步设计。之后，基于设计结构及参数，分别创建多物理场耦合模型及红枣离散元模型。设计仿真实验，对磁流体流动控制下红枣运动过程进行仿真模拟，提供流场以及颗粒数据的可视化结果，基于仿真实验结果，分析磁流体流动控制参数对气吸红枣运动规律的影响，验证试验装置设计的可行性，在此基础上对试验装置进行优化，确定试验装置结构。

(3) 基于磁流体流动控制的红枣运动规律试验研究

首先，结合前期确定的基于磁流体流动控制的红枣运动规律控制策略确定试验因素及响应指标，设计总体试验方案，并搭建试验台。其次，测试试验方案，同时验证基于磁流体流动控制的红枣运动规律控制策略的可实施性。然后，开展基于磁流体流动控制