

# 硕士学位论文

基于离散元理论的月尘颗粒接触力学特性研究

**RESEARCH ON CONTACT MECHANICAL  
PROPERTIES OF LUNAR DUST PARTICLES  
BASED ON DISCRETE ELEMENT METHOD**

潘万竞

哈尔滨工业大学

2016年6月

国内图书分类号：V476.3

国际图书分类号：621

学校代码：10213

密级：公开

## 工学硕士学位论文

# 基于离散元理论的月尘颗粒接触力学特性研究

硕士研究生：潘万竞

导 师：唐德威教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科：机械设计及理论

所 在 单 位：机电工程学院

答 辩 日 期：2016年6月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: V476.3

U.D.C: 621

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**RESEARCH ON CONTACT MECHANICAL  
PROPERTIES OF LUNAR DUST PARTICALS  
BASED ON DISCRETE ELEMENT METHOD**

<b>Candidate:</b>	Pan Wanjing
<b>Supervisor:</b>	Prof. Tang Dewei
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	Mechanical Design and Theory
<b>Affiliation:</b>	School of Mechatronics Engineering
<b>Date of Defence:</b>	June, 2016
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	Harbin Institute of Technology

## 摘要

月尘是月球表面附着的粉末状物质，由于具有较强的黏附性和静电特性，月尘容易在月球探测器各装置的表面上沉积，并有可能进入机构间隙，造成设备堵塞、机构卡死等问题。目前常用的颗粒接触力学本构模型将颗粒简化为光滑、均质的球形颗粒，不能对不规则月尘颗粒的接触特性进行合理描述，无法反应月尘颗粒进入机构间隙后的真实作用情况。基于以上问题，本文结合月尘性质对现有接触力学模型进行改进，提出基于形状描述的月尘颗粒接触力学模型，并利用该模型进行月尘颗粒对运动副运动特性的影响研究。

结合月尘性质对现有接触力学模型局限性进行分析和改进，将不规则形状引入力学模型中，对月尘颗粒进行基于分形理论的形状建模和基于傅里叶理论的形状建模，同时对两种建模方法进行比较和选用，最终得到月尘颗粒形状描述数学模型。此外，进行模拟月尘样品颗粒图像采集，对得到的颗粒二维投影轮廓图像进行后处理和分布统计，得到模拟月尘颗粒形状分布概率模型。

在月尘颗粒形状描述数学模型基础上建立基于形状描述的不规则月尘颗粒接触力学模型，并通过月尘颗粒法向力学特性测试试验对其加以验证。利用基于形状描述的不规则颗粒接触力学模型对不规则颗粒进行球颗粒等效，提出基于分段函数拟合的等效算法，并通过离散元软件二次开发平台编写力学模型插件，验证算法可靠性。

采用不规则颗粒等效模型并按照模拟月尘颗粒形状分布概率生成大量颗粒，进行月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真，通过仿真过程中转矩变化判断是否出现卡死现象，同时对比轮轴掩埋试验结果，分析仿真结果正确性。最终通过离散元仿真实现偏心距、转速以及配合表面性质等因素对转矩影响的仿真预测，结合仿真结果对未来月面探测器的设计提出理论性建议。

**关键词：**月尘颗粒；力学特性；离散元；不规则形状

## Abstract

Lunar dust is a powdery substance attached to the surface of the moon. Because of the adhesion and electrostatic properties, lunar dust stands a good chance of being deposited on the lunar probe. Also, some of the lunar dust may get into the clearances of mechanisms and cause problems such as jamming of devices and clogging of mechanisms. In the commonly used contact mechanics model, the particles are simplified as smooth homogeneous spherical particles. Therefore, the contact characteristics of irregular lunar dust particles cannot be depicted reasonably using the model. In this thesis, the existing contact model is improved based on the properties of lunar dust particles and a new shape-based contact mechanical model is proposed to research on the influence of lunar dust particles on joint kinematics.

The limitations of contact mechanics model is analyzed after considering the irregular shape of lunar dust particles, based on which the shape modeling of fractal theory and Fourier theory is conducted and a new shape-based mathematical model is established using Fourier series. In addition, the image acquisition is conducted to acquire the 2D projection profile image of lunar simulant, and the probability model of shape distribution is obtained by picture processing and statistical method.

After establishing a new shape description model, the contact mechanics model of irregular lunar dust particles based on shape descriptors is also proposed. Meanwhile, the compression test of lunar dust particles is carried out to validate the improved model. Besides, the precise equivalent algorithm based on polynomial fitting and the approximately equivalent algorithm based on piecewise function fitting are proposed in order to simplify the modeling process of irregular particles. Also, a plug-in model is written by discrete element software EDEM to verify the reliability of the algorithm.

To simulate the influence of lunar dust particles on joint kinematics, a large number of particles are generated in accordance with the shape probability distribution of lunar simulant. Also, the wheel burying test is carried out to verify the accuracy of simulation results. Moreover, an integrated simulation is conducted to predict whether factors such as eccentricity, speed and mating surface roughness have impact on joint kinematics so that reasonable proposal can be proposed to optimize the design of lunar probe in the future.

**Keywords:** lunar dust particles, mechanics model, discrete element, irregular shape

# 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 课题来源及研究的目的和意义 .....	1
1.1.1 课题来源 .....	1
1.1.2 研究目的和意义 .....	1
1.2 月尘对月面探测器影响效应研究概况 .....	2
1.3 离散元理论发展概况 .....	5
1.3.1 离散元理论概述 .....	5
1.3.2 离散元仿真软件简介 .....	7
1.4 颗粒接触力学模型发展概况 .....	8
1.4.1 Hertz 理论接触模型 .....	9
1.4.2 JKR 接触理论模型 .....	9
1.4.3 DMT 接触理论模型 .....	10
1.5 课题主要研究内容 .....	11
第 2 章 不规则月尘颗粒形状理论模型建立 .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 月尘性质 .....	13
2.2.1 月尘粒径分布 .....	13
2.2.2 月尘形态特征 .....	14
2.3 不规则月尘颗粒形状建模 .....	15
2.3.1 基于分形理论的月尘颗粒形状建模 .....	15
2.3.2 基于傅里叶理论的月尘颗粒形状建模 .....	17
2.3.3 月尘颗粒形状建模方法比较及选用 .....	19
2.3.4 月尘颗粒傅里叶形状描述数学模型 .....	22
2.4 不规则月尘颗粒形状分布概率建模 .....	25
2.4.1 模拟月尘颗粒图像采集 .....	25
2.4.2 模拟月尘颗粒图像分析算法 .....	27
2.4.3 模拟月尘颗粒形状分布模型 .....	31
2.5 本章小结 .....	32
第 3 章 基于形状描述的不规则月尘颗粒接触力学特性研究 .....	34
3.1 引言 .....	34
3.2 不规则月尘颗粒法向接触力学模型建立 .....	34

3.2.1 颗粒接触力学本构模型比较及选用 .....	34
3.2.2 基于形状描述的月尘颗粒法向力学模型建立 .....	35
3.3 模拟月尘颗粒法向力学特性测试试验验证 .....	38
3.3.1 模拟月尘颗粒法向力学特性测试试验方案 .....	38
3.3.2 模拟月尘颗粒法向接触力学特性测试试验结果与分析 .....	40
3.4 不规则颗粒等效算法 .....	42
3.4.1 不规则颗粒等效模型建立 .....	43
3.4.2 基于分段函数拟合的等效算法 .....	43
3.5 不规则颗粒等效模型仿真验证 .....	46
3.5.1 离散元软件 API 开发平台 .....	46
3.5.2 不规则颗粒等效模型验证离散元仿真 .....	48
3.6 本章小结 .....	50
<b>第 4 章 月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真 .....</b>	<b>51</b>
4.1 引言 .....	51
4.2 月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真 .....	51
4.2.1 离散元仿真模型建立 .....	51
4.2.2 月尘颗粒对运动副运动特性影响仿真结果分析 .....	54
4.3 月尘颗粒对运动副影响的试验研究 .....	56
4.3.1 轮轴掩埋试验平台及试验方案 .....	56
4.3.2 月尘颗粒对运动副影响试验结果分析 .....	58
4.4 不同因素对运动副影响的离散元仿真 .....	59
4.4.1 偏心距对转矩影响离散元仿真 .....	59
4.4.2 转速对转矩影响离散元仿真 .....	61
4.4.3 配合表面性质对转矩影响离散元仿真 .....	63
4.5 本章小结 .....	66
<b>结 论 .....</b>	<b>68</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>69</b>
<b>攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果 .....</b>	<b>73</b>
<b>哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限 .....</b>	<b>75</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>76</b>
<b>附 录 .....</b>	<b>77</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 课题来源及研究的目的和意义

### 1.1.1 课题来源

本课题来源于国家自然科学基金面上项目“基于离散元理论的月尘颗粒与空间运动副相互作用机理研究”。

### 1.1.2 研究目的和意义

人类对太空的向往由来已久，从前苏联发射人类的第一颗人造卫星起，各国便开始了对太空和月球的探索<sup>[1]</sup>。迄今为止，苏联、美国等国家已经累计发射 110 多枚月球探测器，美国的阿波罗探月计划更是先后将十余名宇航员送入太空<sup>[2]</sup>，人类探月取得了巨大成就。

我国探月工程起步于上个世纪九十年代，经过长达十几年的经济、政治、技术等方面的论证，直到 2004 年初才正式启动<sup>[3]</sup>。目前我国在探月技术上已经取得了突破性进展，成功发射多颗月球探测卫星，并圆满完成了预定的月球探测任务。2013 年发射成功的嫦娥三号搭载月球车成功实现了月面环境软着陆，更是标志着我国探月技术已经跻身世界领先地位。

然而，月球探测虽然取得了较大突破，但月球空间中各种不可预知的环境因素也给各国的探月活动带来了巨大挑战，这其中最为突出的就是月尘对于探月活动的影响。

NASA 探月报告中指出，1969 年到 1972 年间，曾经在月球上生存过的宇航员都发现月尘是一项巨大的难以预料的挑战，它表面粗糙，容易吸附在设备表面造成表面污染、辐射器失效等问题，而且细小的月尘颗粒容易进入机构内部引起密封失效、机械结构堵塞卡死、材料磨损等一系列故障，在某些情况下，为了排除月尘影响所设计的真空除尘器甚至也会被进入机构内部的月尘卡死，无法完成除尘工作<sup>[4-6]</sup>。我国的玉兔号月球车出现控制机构异常情况，专家分析认为其中一种可能的故障原因就是月尘进入月球车桅杆机构的运动副间隙，造成运动副堵塞卡死，从而发生桅杆不能收回的故障<sup>[7]</sup>。由月尘引起的问题广泛存在于传动机构、锁紧装置、成像装置甚至是真空除尘装置中，少数情况下，机械结构卡死还会导致行走中的月球车紧急终止，且某些机构一旦发生卡死，在无人干预的情况下便无法恢复，对于目前我国的无人登月计划而言，这样的故障也就意味着月球车将永久性丧失活动能力。因此，对月尘颗粒与运动副间接触力学特性的研究能够更清楚地描述月尘颗粒进入运动副间隙所产生的堵塞卡死过程，进而找到消除卡死的

方法，这对解决月尘颗粒进入运动副后所造成的卡死问题具有十分重要的意义。

## 1.2 月尘对月面探测器影响效应研究概况

月尘是广泛存在于月球表面的粉末状物质，主要由陨石体在月球形成过程中的反复碰撞所产生<sup>[8]</sup>。从本质上来说，月尘就是细化到一定程度的月壤，目前国际上大多将其定义为月壤中颗粒粒径小于 1000 微米的部分<sup>[9]</sup>；然而，由于月尘颗粒粒径较小，它也表现出一些月壤所不具备的性质，如吸附性、静电特性等，这些特性产生原因极为复杂且一旦产生就不易消除，这使得月尘颗粒不但极易吸附沉积在月球探测装置表面，而且很可能进入机构间隙中产生堵塞和卡死等一系列问题，给探月活动带来较大的难度。

美国的月球探测项目起步较早，1961 年“阿波罗计划”的启动标志着美国探月正式开始；1969 年，美国航天员乘阿波罗 11 号成功登上月球，人类的登月梦想第一次得以实现<sup>[10]</sup>。然而，月尘颗粒却给月面探测和宇航员舱外活动带来较大的挑战。月尘颗粒会附着在空间机构表面或进入机构内部，在真空环境辐射下，月尘颗粒的活性大大增强，其表面能甚至会增加数十倍<sup>[11]</sup>。此外，受人为活动影响，月球探测装置运动和宇航员月面行走都会使已经沉积的月尘重新漂浮起来，这些悬浮月尘颗粒在经过很长的漂浮周期后又会重新黏附在新的机构表面上，进而加重对月面机构的影响。月尘颗粒对月面机构的影响效应主要分为以下几类<sup>[12]</sup>：

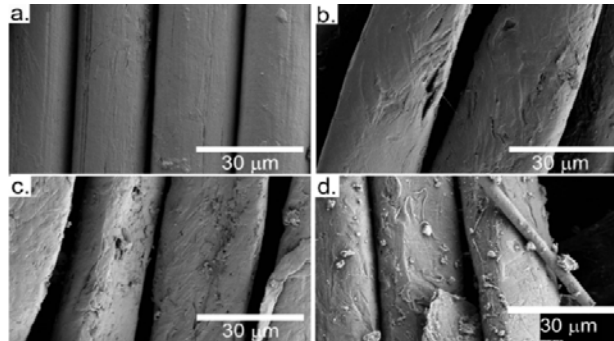
**(1) 沉积污染效应** 沉积污染效应主要是指由于自然现象或者人类活动造成扬尘沉积在登月设备表面，从而对材料表面性能产生的影响。图 1-1 所示为宇航服受月尘污染情况，月尘沉积效应会污染温控表面，造成太阳吸收率和热发射率变化，从而导致温控系统故障，或降低材料表面的性能；同时，月尘也会污染光学表面，降低透射率等光学参数，使光学仪器性能下降；此外，月尘污染还会造成太阳能电池片光电转换效率下降，使得太阳能电池阵的输出功率大幅降低。在月面超高真空环境下，月尘沉积变得十分致密，强烈的静电吸附也会加重月尘沉积的影响。



(a) 宇航服整体污染情况 (b) 宇航服局部污染程度比较

图 1-1 宇航服受到月尘污染情况

**(2) 磨损效应** 月尘颗粒粒度小、硬度高、形状尖锐，因此可以被看作是一种特殊的“研磨剂”，这使得与月尘颗粒作相对运动的任何接触面都会产生划痕，尤其是往复运动或旋转运动的表面会被严重磨损，甚至造成表面材料或涂层被剥落。图 1-2 所示为阿波罗 12 号所用的 T-164 Teflon 织物受磨损情况，宇航员在地面活动训练服变得陈旧需要 100 小时，而在进行 8 小时月面活动后，宇航服就变得陈旧，宇航服头盔视窗玻璃的可视性也会由于月尘划痕而下降。



a) 未使用的 T-164; b)未直接暴露的 T-164 (位于宇航服上的美国国旗标志里侧);  
c)直接暴露的 T-164 (位于宇航服上国旗标志旁边); d)左膝盖处

图 1-2 阿波罗 12 号所用的 T-164 Teflon 织物受磨损情况

**(3) 阻塞效应** 当月尘颗粒附着在机构表面时，机构运动过程中所受阻力也会大幅增加，当月尘积累到一定程度时，甚至会产生卡死现象。据阿波罗探月报告记载，历次探月过程中搬运机构、相机以及锁扣等设备都出现过不同程度的阻塞卡死，甚至为了清除月尘影响所设计的真空除尘器在某些环境下也会出现问题。

**(4) 渗入效应** 细小的月尘颗粒具有极强的渗入性，月尘的这种特性不但影响机械结构的正常运转，也会对宇航员的生命安全支持系统造成一定的影响。阿波罗 14 号曾经发生过试验仪器开关失灵的情况，原因就是月尘颗粒进入开关，造成其中部分机构无法运转。

**(5) 静电效应** 月表真空、干燥、强辐射的环境使得月尘颗粒容易通过接触摩擦、太阳风和宇宙辐射等方式带电，当月尘颗粒表面电荷逐渐积累达到一定程度时，就会产生静电吸附。静电吸附会造成登月设备的充放电，干扰电子器件工作，带电的月尘具有更强的吸附性，进而加重月尘污染<sup>[13,14]</sup>。此外，月尘颗粒导电特性较弱，带电后电荷不易释放，带有同种电荷的月尘颗粒由于相互排斥而克服月球引力漂浮起来，在月球中处于悬浮弥散的状态，更容易发生吸附现象。对 Apollo 和 Luna 采集的月表物质样品磁性分析显示，月尘属于强磁性样品，且磁化率随颗粒减小而呈现变大的趋势，这也是静电效应的产生原因之一<sup>[15]</sup>。

综合以上分析，月尘颗粒与空间运动副的作用过程可以归纳为：与运动副表面发生粘附，进而进入运动副间隙，在间隙内聚集成团，与运动副润滑层和金属

基底发生磨损，损伤累计到一定程度后造成运动副卡死。

我国对于月壤的研究起步较早，而对于月尘的研究则是近几年在发现月尘与月壤性质差别后才逐渐开始的，但随着嫦娥探月计划的不断推进，我国对于月尘的研究也在不断深入。中科院地球化学研究所月球与行星科学研究中心张森森、北京航空航天大学张一翔等人对于月尘的性质以及其对太空活动的危害做了系统的总结和评述<sup>[16,17]</sup>；同时，中科院地球化学研究所基于月尘的化学组成成分和物理性质完成了模拟月尘 CLDS-1 的研制<sup>[18]</sup>，制备过程如图 1-3 所示；中国空间技术研究院也完成了 TY II 系列模拟月壤的研制，这对于月尘的研究以及地面模拟月尘相关实验具有极其重要的意义。



图 1-3 模拟月尘 CLDS-1 制备

目前国内在月尘颗粒对月面机构影响方面的研究主要集中于防护和除尘两方面，如图 1-4 所示，北京理工大学孙旗霞等人对交变电场下的月表除尘方法进行了综述<sup>[19]</sup>，上海宇航系统工程研究所贾巍等人针对月尘积累对电帘除尘效率的影响进行了实验研究<sup>[20]</sup>，上海空间飞行器重点实验室曾令斌等人对月面扬尘和月尘防护等问题进行了研究<sup>[21]</sup>。



图 1-4 月面装置密封防护及电帘除尘

此外，还有一些层次更为深入的研究，例如，哈尔滨工业大学王海龙专门针对月球车车轮的扬尘进行了分析研究<sup>[22]</sup>，北京卫星环境研究所白羽等人针对月尘颗粒进入轮轴间隙后产生的材料磨损进行了试验研究<sup>[23]</sup>，图 1-5 所示为模拟月尘相关试验研究，这些都对将来在月尘颗粒对运动副运动特性影响这一领域的学术研究具有较高的参考价值。

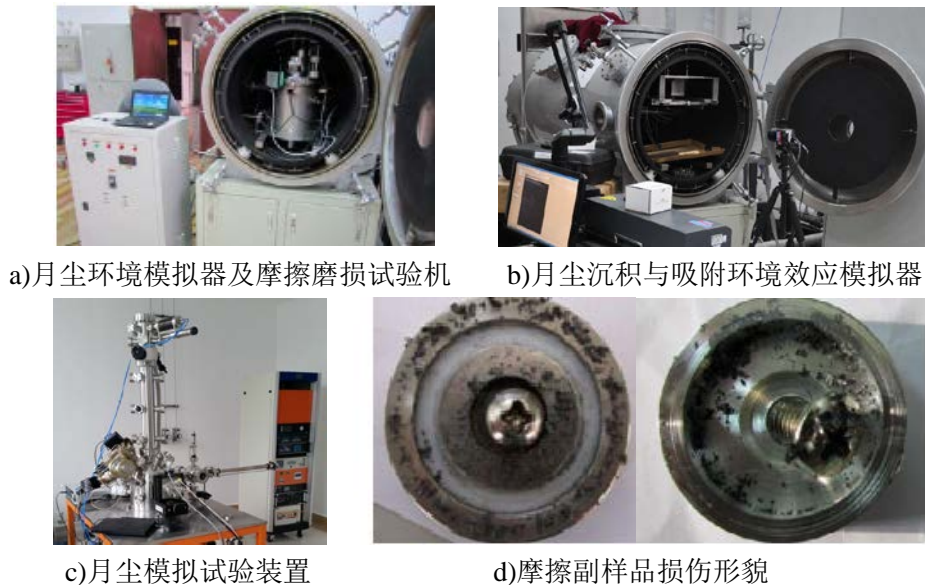


图 1-5 模拟月尘相关试验研究

综合以上分析可以看出，目前国内外对于月尘的研究比较广泛，但还没有针对月尘颗粒对运动副造成卡死效应的专门研究。因此，有必要从月尘颗粒与运动副的接触力学特性出发，就月尘颗粒对运动副运动特性影响这一问题进行深入研究。

### 1.3 离散元理论发展概况

#### 1.3.1 离散元理论概述

离散元方法(Discrete Element Method)是一种通过跟踪各颗粒运动和颗粒与环境相互影响随时间变化关系来解决多颗粒系统建模的数值模拟方法<sup>[24]</sup>，它的思想起源于传统的分子动力学(Molecular Dynamics)。离散元最早出现于 1971 年 Cundall 提出的适用于非连续介质的研究方法<sup>[25]</sup>，它的核心思想是实现非连续体到刚性元素集合的转变，使各刚性元素均能满足运动方程，在允许单元间发生相对运动的条件下进行时步迭代，得出分析结果。

为了满足大量计算的要求，利用汇编语言编写的二维离散单元法程序应运而生<sup>[26]</sup>，此后，随着计算机技术的迅猛发展，离散元程序又被翻译成 FORTRAN 语言<sup>[27]</sup>，并逐渐演化成离散单元法中所应用的基本程序。进入上世纪八十年代后，离

散元方法开始迅速发展，Cundall、Walton、Campbell 等人先后利用离散元进行了块体受力变形、散体流动以及剪切流分析，在二维离散单元法基础上生成的三维 TRUBAL 程序也得以完善和发展<sup>[28,29]</sup>。由于离散元方法不要求计算对象满足变形协调或位移连续等条件，且具有存储空间可调、计算运行速度较快等优点，因此适合对非线性的颗粒群体问题进行求解。

目前离散元理论的主要研究对象为散体，即固体颗粒的集合体，因此，离散元理论的核心内容是颗粒接触力学。目前在离散元中常用的球形颗粒接触力学模型主要包括 Hertz 模型、Mindlin 模型、JKR 模型以及 DMT 模型，在不同的颗粒形态和接触状态下应根据具体需求进行各种模型的比较和选用。此外，考虑到传统的接触力学本构模型求解过程较为繁琐，在不引起显著误差的前提下，可以对其进行适当简化，以得到应用条件更为广泛、计算更加简单的模型。目前通常采用硬球模型和软球模型对接触问题进行简化：硬球模型不考虑颗粒接触过程中的接触力、接触变形等问题，而是将整个接触过程简化为极短时间内发生的碰撞，其三维颗粒碰撞过程如图 1-6 所示，它主要用于在运动速度较大、颗粒浓度较低的情况下进行数值模拟。

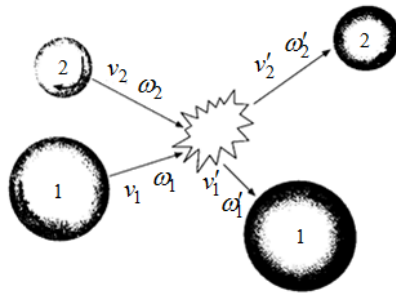


图 1-6 硬球模型三维颗粒碰撞示意图

软球模型简化处理如图 1-7 所示，在此模型中，法向力被简化为阻尼器和弹簧，切向力则被简化为阻尼器、滑动器和弹簧。

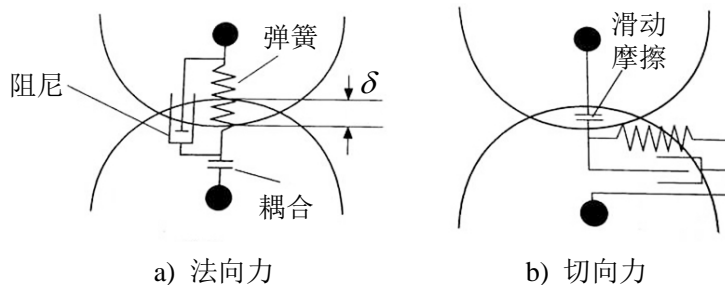


图 1-7 软球模型颗粒间接触力简化模型示意图

与硬球模型不同，软球模型主要考虑颗粒表面间由于挤压产生的弹性变形，通过切向位移和法向重叠量这两个参数来进行接触力的计算，整个过程无需考虑力的加载历史，更适用于工程问题的数值计算。

我国离散元理论的发展始于上个世纪八十年代，俞万禧于 1986 年首次介绍了离散单元法，并首次尝试用离散单元法描述不连续性岩体和块体井壁结构的破坏过程<sup>[30]</sup>；同年，王泳嘉发表文章，先后将离散单元法应用于岩石力学和矿山压力方向的研究中，离散元的应用得到了进一步发展<sup>[31,32]</sup>；进入二十一世纪后，计算机的发展给离散元带来巨大的发展空间，离散元技术得以快速提高，相关研究和文献也日渐增多，其中比较具有代表性的有武汉大学徐寅等人利用离散单元法所做的滑坡堆积及其浪涌计算<sup>[33]</sup>、中科院武汉岩土力学研究所于崇等人利用离散单元法所做的节理岩体支护分析<sup>[34]</sup>等，这些都给岩土力学领域的研究带来了较大的进步；孙其诚、王光谦所著的颗粒物质力学导论<sup>[35]</sup>也系统地对基于离散元理论的颗粒物质力学问题进行了详细的讲解和介绍，具有较高的学术参考价值。

此外，随着各学科的相互融合，近年来离散元理论的应用已经不仅仅局限于岩土力学领域，而是越来越多地渗透到各个领域。西北工业大学魏庆华等人在人工骨支架制备过程中利用离散单元法模拟 HA 微球的堆积过程，同时预测了堆积内部的微观情况<sup>[36]</sup>；甘肃农业大学石林榕等人进行了基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验，对农业中常用的排种器进行了性能参数的优化和改进<sup>[37]</sup>，这些学科交叉的产物也让离散元理论得到了更加广泛的应用。

### 1.3.2 离散元仿真软件简介

目前用于离散元仿真的计算机软件主要有 PFC 和 EDEM 两种，其操作界面如图 1-8 所示。PFC 主要用于从微观结构角度研究散粒体的力学特性，通过允许刚体颗粒在力学关系上发生重叠来计算颗粒间作用力<sup>[38]</sup>，在岩石力学中应用较为广泛；而 EDEM 则主要用来分析模拟颗粒处理和生产操作，能够实现颗粒系统的参数化模型创建、物理性质和力学性质定义以及仿真后处理等多种功能<sup>[39,40]</sup>。

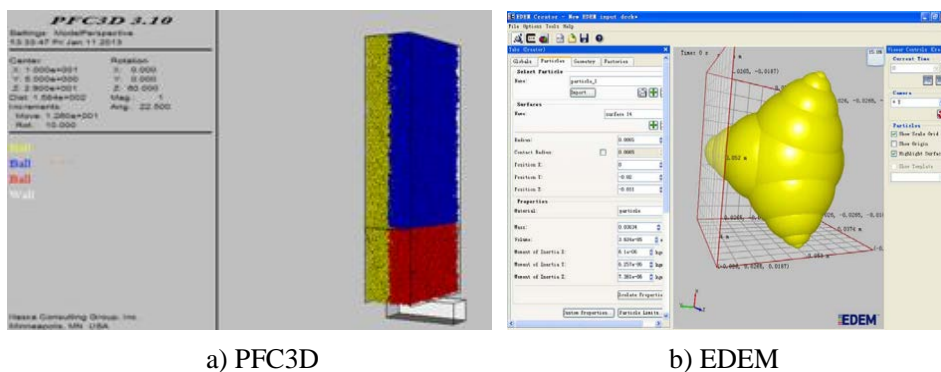


图 1-8 离散元仿真软件

表 1-1 为 PFC 与 EDEM 的仿真性能比较，可以看出，PFC 软件的建模求解需要通过 FISH 语言和命令完成，对复杂结构的处理较为困难。与 PFC 相比，EDEM

具有较好的用户操作界面，支持 Solidworks、UG、Pro/E 等三维 CAD 软件，对于复杂几何体的构建更为便捷，同时它具有较好的并行计算效率和求解速度，颗粒计算量能够达到百万量级；此外，EDEM 具有强大的 API 二次开发功能，能够与流体动力学软件 CFD、多体动力学软件 MBD 以及有限元分析软件 FEA 进行耦合，应用范围更加广泛。

表 1-1 PFC 与 EDEM 仿真性能比较

对比项目	PFC	EDEM
用户操作界面	需采用 FISH 语言完成	可用于建模、求解和后处理
几何体生成	只可通过命令进行生成	支持 GUI 简单建模和 CAD 模型导入
二次开发接口	只可用于接触模型自定义	可实现多种模型自定义
并行计算效率	单机单核计算	多核多线程并行计算
求解速度	较低	较高
颗粒计算量	十几万	上千万

目前，离散元软件已经广泛应用于多个领域，如图 1-9 所示分别为其在机械、医学和农业领域的仿真应用。

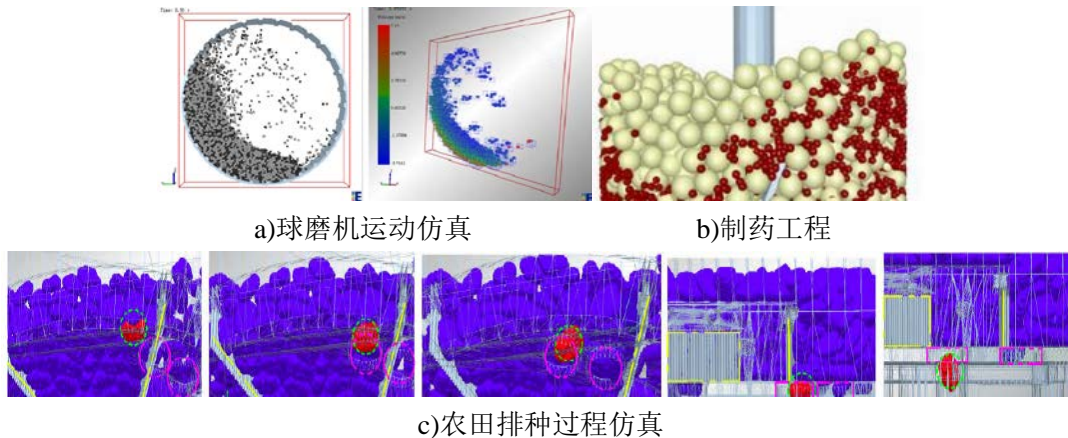


图 1-9 离散元方法在各领域的应用

综合比较分析可以看出，EDEM 软件能够更好地完成大量颗粒的仿真，同时能够利用 API 二次开发接口对力学模型、接触模型和颗粒工厂进行定义，因此，在本文中选用 EDEM 软件进行后续的离散元仿真。

#### 1.4 颗粒接触力学模型发展概况

目前常用的颗粒法向接触力学模型主要包括 Hertz 理论模型、JKR 理论模型以及 DMT 理论模型。

### 1.4.1 Hertz 理论接触模型

Hertz 理论是颗粒法向力学模型中的基础理论,它不考虑颗粒表面的黏连作用,假设相互接触的颗粒为光滑均质的球形颗粒,认为在接触面上只发生弹性变形。如图 1-10 所示为 Hertz 理论中颗粒的接触变形示意图。对于相互接触的两个球形颗粒,其法向重叠量

$$\delta = R_1 + R_2 - |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| > 0 \quad (1-1)$$

式中  $R_1$ 、 $R_2$  —— 颗粒半径 (mm);  
 $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}_2$  —— 颗粒球心位置矢量 (mm)。

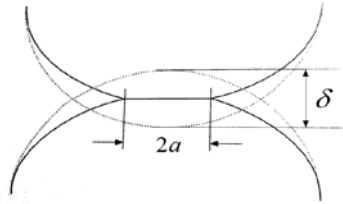


图 1-10 Hertz 理论颗粒接触变形示意图

假定颗粒间接触面为圆形,则其接触面半径

$$a = \sqrt{\delta R^*} \quad (1-2)$$

颗粒间法向力  $F$

$$F = \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \quad (1-3)$$

式中  $R^*$  —— 有效颗粒接触半径 (mm);

$E^*$  —— 有效弹性模量 (MPa)。

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1-5)$$

式中  $E_1$ 、 $E_2$  —— 颗粒弹性模量 (MPa);

$\nu_1$ 、 $\nu_2$  —— 颗粒泊松比。

### 1.4.2 JKR 接触理论模型

JKR 理论基于 Hertz 接触理论模型,如图 1-11 所示为 JKR 理论模型颗粒接触变形示意图,它考虑了颗粒接触表面内分子或原子间的黏连作用,把接触面积与材料特性联系起来,构建新的接触模型。

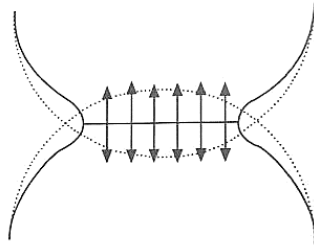


图 1-11 JKR 理论颗粒接触变形示意图

两固体颗粒相互黏连后，其 Dupre 黏连能

$$\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1-6)$$

式中  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  —— 颗粒表面自由能 ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ );

$\gamma_{12}$  —— 界面能 ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )。

与 Hertz 理论模型相比，当两颗粒间有黏连作用时，接触面半径会增加。设考虑黏连力作用时，在外载荷  $F$  作用下颗粒间接触面是半径为  $a$  的圆，由 Griffith 能量法可知，表面能

$$U_s = -\pi a^2 \Delta\gamma \quad (1-7)$$

系统总能量  $U_T$  为接触面积  $A$  的函数，当  $dU_T / dA = 0$  时，系统达到平衡状态，由此得到考虑黏连作用下的等效载荷力

$$F_1 = F + 3\pi R^* \Delta\gamma + \sqrt{(3\pi R^* \Delta\gamma)^2 + 6\pi R^* \Delta\gamma F} \quad (1-8)$$

相应的接触面半径

$$a^3 = \frac{3R^*}{4E^*} \left[ F + 3\pi R^* \Delta\gamma + \sqrt{(3\pi R^* \Delta\gamma)^2 + 6\pi R^* \Delta\gamma F} \right] \quad (1-9)$$

两颗粒法向重叠量

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \left( \frac{2\pi a \Delta\gamma}{E^*} \right)^{1/2} \quad (1-10)$$

### 1.4.3 DMT 接触理论模型

如图 1-12 所示为 DMT 理论模型颗粒接触变形示意图，DMT 接触理论考虑了接触面外范德华力所引起的颗粒变形，认为颗粒间黏连力只与 Dupre 黏连能有关，即黏连力

$$F_0 = 2\pi R^* \Delta\gamma \quad (1-11)$$

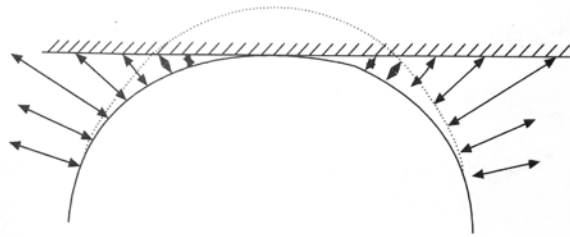


图 1-12 DMT 理论颗粒接触变形示意图

由此可见，对于相互接触的两个颗粒，它们在整个接触过程中的黏连力始终保持不变。据此对 Hertz 理论模型进行修正，得到接触力  $F$  与接触面半径  $a$  之间关系为

$$a^3 = \frac{3R^*}{4E^*} (F + 2\pi R^* \Delta\gamma) \quad (1-12)$$

以上三种模型均为颗粒接触力学的本构模型，但适用条件有所不同。其中，Hertz 模型为接触理论的基本模型，假设相互接触的颗粒表面均质光滑且颗粒接触面积远小于颗粒表面积，认为在接触面上仅发生弹性变形；JKR 模型考虑颗粒接触表面的黏连作用，把接触面积与材料特性结合起来；而 DMT 模型则在 Hertz 模型基础上进一步延伸，考虑接触面外颗粒表面的范德华力，在实际的颗粒接触力学分析中，应根据不同颗粒的本质属性和接触状态进行本构模型的选用。

## 1.5 课题主要研究内容

针对月尘颗粒接触力学特性进行研究，在现有经典力学理论模型的基础上进行改进，综合考虑月尘颗粒不规则形状对力学特性的影响，得到适合于月尘颗粒的形状描述方法，同时利用力学模型构建接触力学特性与形状参数间关系，结合相关仿真和试验分析比较得出月尘颗粒对空间运动副运动特性的影响。基于以上分析，主要研究内容包括：

**(1) 月尘颗粒形状描述理论模型研究** 对月尘颗粒的物理力学特性进行研究，分析造成月尘颗粒进入间隙机构产生卡死现象的原因。综合比较几何形状特征描述法和分形维数描述法等颗粒形状描述方法，讨论各种方法对月尘颗粒的适用性缺陷，并引入傅里叶级数对颗粒不规则轮廓进行数学描述建模。

**(2) 月尘颗粒形状分布概率模型研究** 利用颗粒图像分析仪对月尘颗粒进行图像采集，并提出利用图像分析算法对所采集的图像进行后处理和相应参数的数学统计，最终完成不规则颗粒的形状分布概率建模。

**(3) 基于形状描述的不规则颗粒接触力学模型建立** 利用不规则月尘颗粒形状描述数学模型进行法向接触力学模型建立，将形状因素引入力学模型中。同

时，利用模拟月尘和相关试验设备进行颗粒法向力学特性测试试验，对月尘颗粒与运动副间的法向接触力学特性进行试验验证。

**(4) 不规则颗粒等效模型研究** 对不规则颗粒接触力学模型进行等效和简化，提出基于分段函数拟合的等效算法，并利用离散元软件 API 开发平台对等效算法进行仿真验证。

**(5) 月尘颗粒对空间旋转副运动特性影响的离散元仿真研究** 以基于形状描述的月尘颗粒与运动副间接触力学模型为基础，进行月尘颗粒进入运动副间隙后对旋转副运动特性影响的离散元仿真分析，并将试验结果与轮轴掩埋试验结果进行对照。同时，利用仿真软件对偏心距、转速以及配合表面性质等因素对转矩的影响进行离散元仿真，得出不同因素影响下的运动特性变化规律。

## 第 2 章 不规则月尘颗粒形状理论模型建立

### 2.1 引言

在颗粒接触力学特性研究中，现有接触理论模型一般将颗粒简化为弹性、均质的光滑球体，接触模型也多为线性模型。但对于月尘等不规则颗粒而言，现有模型无法对其接触状态进行精确描述，也无法进一步进行力学分析和求解。基于以上问题，本章将对模拟月尘颗粒样品的不规则形状进行分布建模，并结合月尘颗粒性质提出适用于不规则月尘颗粒的数学描述方法，构建月尘颗粒的形状描述理论模型。

### 2.2 月尘性质

在月尘颗粒的接触过程中，独特的形状和性质使得其接触力学特性变得极其复杂，而目前的颗粒接触理论应用局限性较大，接触模型也多为线性模型，不适用于月尘颗粒的接触描述。因此，为了完善现有接触模型、提出适用于月尘颗粒的形状描述理论模型，首先要对月尘的粒径分布、形态特征以及力学特性进行研究。

#### 2.2.1 月尘粒径分布

月尘是月球表面附着的粉末状物质，主要由陨石体在月球形成过程中的反复碰撞所产生，因此广泛存在于月球空间中。月尘颗粒极其细小，由于不同地区和环境下月尘的成因和物质组成存在差异，不同月貌区域的月尘粒径大小也存在较大差异。

对于月尘粒径的测量应根据颗粒大小选择合适的方法和参数，例如，对于粒径大于  $90\mu\text{m}$  的颗粒，应通过网筛和微型方孔筛对颗粒刚好通过时的方孔尺寸  $A$  进行测量；对于粒径为  $30\mu\text{m} \sim 90\mu\text{m}$  的颗粒，应采用圆孔的显微感光板对颗粒刚好通过时的圆孔尺寸  $H$  进行测量，或选择库尔特计数器对等体积球直径  $d_v$  进行测量；而对于粒径小于  $30\mu\text{m}$  的颗粒，则可利用沉积方法或也采用库尔特计数器对等体积球直径进行测量。图 2-1 所示为采用不同方法综合测量所得的阿波罗 12 号月尘样品 12057,72 粒径分布情况<sup>[41]</sup>，从图中可以看到，月尘样品粒径基本全部小于  $1000\mu\text{m}$ ，大部分集中于  $20\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ ，中值粒径约为  $80\mu\text{m}$ 。此外，图 2-1 中利用投影面等效直径  $d_a$  所测得的曲线与各种方法综合测量结果趋势一致，证明利用二维投影面等效直径可以对颗粒的三维尺寸进行粗略估计。

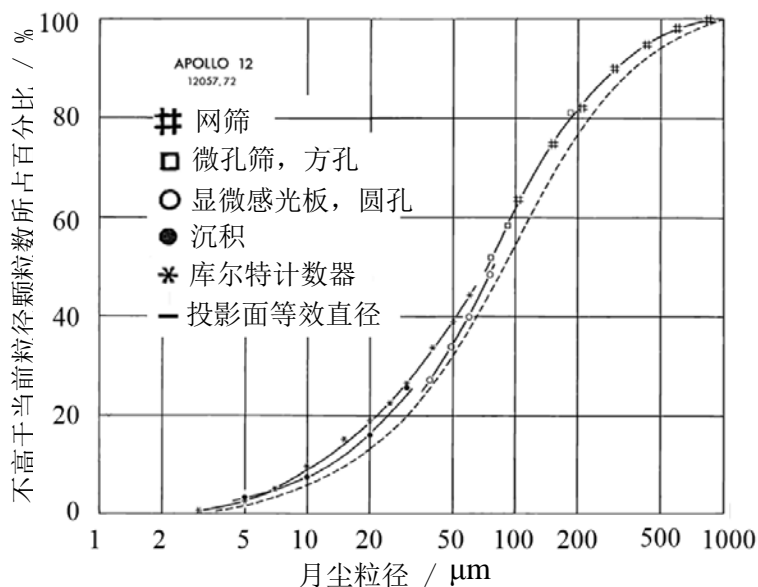


图 2-1 阿波罗 12 号月尘样品 12057,72 粒径分布图

以上测量参数随月尘颗粒形状、大小变化而变化，但通过大量测量可知，各参数之间也存在一定的普遍规律，由此给出的测量参数经验公式为<sup>[42]</sup>

$$\begin{cases} d_a / A = 1.24 \\ H / A = 1.12 \\ d_a / d_v = 1.28 \end{cases} \quad (2-1)$$

由经验公式(2-1)可以根据网筛和微型方孔筛尺寸对颗粒的投影面等效直径、等体积球直径等参数进行预估。

### 2.2.2 月尘形态特征

除了具有较小的颗粒粒径外，月尘颗粒的另一特点就是表面形态复杂不规则。如图 2-2 所示为阿波罗 17 号带回的月尘样品 70051 的扫描电镜图像，从图中可以看出，月尘表面凹凸不平，呈现出具有锐利边缘的棱角状，且大多数颗粒表面存在亚微米级别的气泡、裂纹或褶皱，它的颗粒形态可以大致分为球状(spherical)、棱角块状(angular blocks)、玻璃碎片状(glass shards)和不规则形状(irregular)四种。

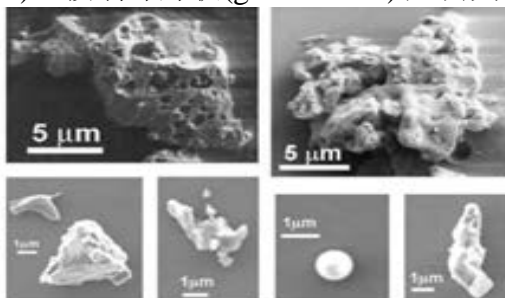


图 2-2 阿波罗 17 号探月项目月尘样品 70051 扫描电镜图像<sup>[43]</sup>

定义颗粒外接矩形长、宽、高分别为  $L$ 、 $B$ 、 $T$ ，目前对于颗粒形状最普遍的描述参数是体积系数  $\alpha_{v,a}$ ，它的数学定义为

$$\alpha_{v,a} = \frac{V_p}{d_a^3} \quad (2-2)$$

式中  $V_p$  —— 颗粒体积 ( $\text{mm}^3$ )。

考虑到月尘颗粒体积较小，难以测量，通过实验得到体积系数经验公式为<sup>[44]</sup>

$$\alpha_{v,a} = \frac{\pi^{3/2}}{8} \cdot \frac{p_r}{\alpha_a} \cdot \frac{1}{mn^{1/2}} \quad (2-3)$$

式中  $n$  —— 延展率， $n = L/B$ ；

$m$  —— 平滑度， $m = B/T$ ；

$\alpha_a$  —— 面积比， $\alpha_a = \pi d_a^2 / 4LB$ ；

$p_r$  —— 厚度比， $p_r = \bar{T}/T$ ， $\bar{T}$  为颗粒平均厚度。

利用体积系数能够描述颗粒在其外接矩形中的充满程度，即可以间接描述不规则颗粒的整体形态特征。

## 2.3 不规则月尘颗粒形状建模

从美国 Apollo 探月活动 and 前苏联 Luna 探月活动所带回的月壤和月尘样品中可以看出，月壤和月尘颗粒形状不规则，表面多有裂纹、气泡和褶皱。月尘与月壤虽然本质相同，但对月壤的研究大多集中于对其宏观性质的研究，因此在对月壤研究的过程中可以忽略不规则形状的影响，将月壤颗粒简化为光滑球形颗粒；而在月尘颗粒接触力学特性研究中，则要重点考察月尘颗粒微观接触问题，因此，需要对月尘颗粒的不规则形状进行描述。

### 2.3.1 基于分形理论的月尘颗粒形状建模

为了更好地描述月尘颗粒的接触力学特性，建立适用于月尘颗粒的接触力学模型，首先要对各种颗粒描述方法进行分析比较，并从中选取最适合不规则月尘颗粒的方法进行形状描述。

如图 2-3 所示为传统的几何形状特征描述参数，通过圆度、占有率、宽长比和离心率等参数进行描述虽然方法简单、求解方便，但采用单一的几何形状描述只能够表征颗粒整体与圆形的接近程度，却不能对颗粒的不规则程度进行描述；而通过多个几何形状描述参数进行形状描述虽然精确程度更高，但多个参数没有合理完备的耦合模型，难以进行颗粒间不规则程度的比较和衡量。因此，在岩土力学中，一般采用分形维数对不规则颗粒的形状进行描述<sup>[45]</sup>。

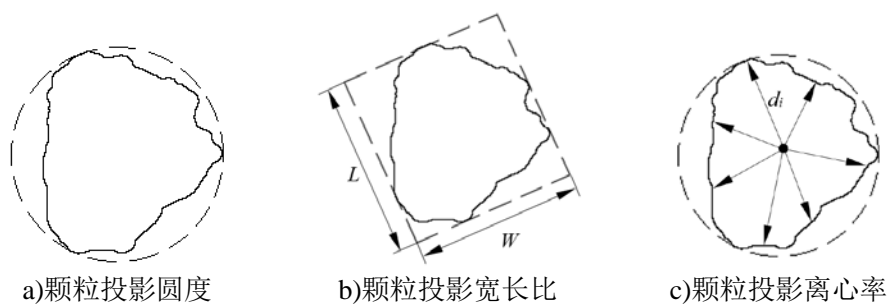


图 2-3 几何形状特征描述参数

分形是一种以数学形式对不规则形状进行划分和描述的手段，在某一特定分形集合内，部分以某种形式与整体相似，即分形集合内的部分图形无论放大还是缩小仍然与整体保持相同的不规则性。如图 2-4 所示为三次 Koch 曲线，它的生成原理是先将一条直线三等分，再将中段用夹角为  $60^\circ$  的两条等长直线组成的生成单元来替代，得到如图 2-4 b) 所示的曲线，采用相同的方法将每段直线进行等分和生成单元替代，即可得到图 2-4 中的各条曲线。可以看出，将图 2-4 c) 中区间  $[0, 1/3]$  的部分放大三倍，即可得到图 2-4 b) 的图形，因此可以得出规律：将任意图中的局部图形进行放大，都可以得到与替换前图形完全相同的图案，这种性质称为分形的自相似性。

通过分形维数对分形结果进行描述，通常情况下定义的维数为欧式空间内的整数，例如，平面上一点通过两个独立坐标即可确定，维数为 2；立体中一点则需要通过三个独立坐标进行确定，维数为 3；而在颗粒的形状描述中，则将其维度定义为介于 2 和 3 之间的非整数维。

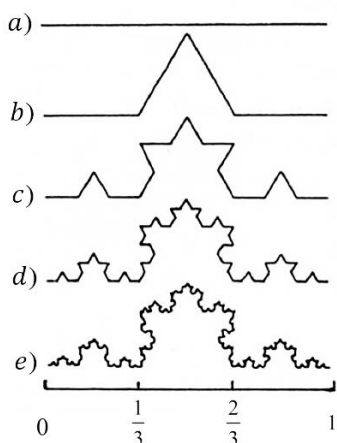


图 2-4 三次 Koch 曲线

分形维数的测定主要包括面积-周长法<sup>[46]</sup>、最大直径-周长法<sup>[47]</sup>、计盒法和固定尺码法等方法。对于形状规则的平面图形，一般认为其处于整数维空间内。例如，半径为  $R$  的圆形处于二维空间内，其周长为  $2\pi R$ ，面积为  $\pi R^2$ ，则圆形周长与面积的关系为

$$(L)\pi R^{2/1} = 2\pi^{1/2}(A)^{1/2} \quad (2-4)$$

边长为  $a$  的正方形同样处于二维空间内，其周长为  $4a$ ，面积为  $a^2$ ，则正方形周长与面积的关系为

$$(L)^{1/1} = 4(A)^{1/2} \quad (2-5)$$

由此可以看出，对于二维空间内的形状规则图形，其周长和面积存在如下关系：

$$(L)^{1/1} \propto (A)^{1/2} \quad (2-6)$$

因此，对于不规则颗粒，引入二维投影分形维数  $D_L$ ，用非整数维的尺度对颗粒不规则程度进行度量，则不规则形状颗粒的二维投影图形周长和面积的关系可以转化为<sup>[48]</sup>

$$(L)^{1/D_L} \propto (A)^{1/2} \quad (2-7)$$

即

$$(L)^{1/D_L} = k \cdot (A)^{1/2} \quad (2-8)$$

对式(2-8)两端分别取对数并进行整理，得

$$\ln L = \frac{D_L}{2} \ln A + K \quad (2-9)$$

求取颗粒二维投影分形维数  $D_L$  后，利用下式计算颗粒分形维数  $D_S$ <sup>[49,50]</sup>

$$D_S = D_L + 1 \quad (2 \leq D_S \leq 3) \quad (2-10)$$

以上即为基于分形维数理论的月尘颗粒形状建模方法，采用以上方法，即可利用二维投影轮廓周长和面积间的关系计算月尘颗粒的分形维数，对其不规则程度进行描述。

### 2.3.2 基于傅里叶理论的月尘颗粒形状建模

任意一个周期函数都能够表示成不同频率正弦信号和余弦信号相叠加的形式，傅里叶理论将这种正余弦函数的线性组合称为傅里叶级数。对于月尘而言，不规则的颗粒轮廓给接触状态和受力分析带来较大难度，因此，需要对颗粒轮廓进行转换后才能进行后续分析。

将傅里叶理论应用于颗粒轮廓描述中，如图 2-5a)所示为颗粒轮廓图，图 2-5b)所示为颗粒轮廓展开曲线，在颗粒轮廓上选定任意一点作为起始点，沿逆时针方向扫描轮廓线，计算轮廓上某点到起始点间轮廓线长度，将轮廓曲线转化为 $[0, 2c]$ 域内的周期函数，将周期函数进行傅里叶级数展开，取其变化后的复系数作为边界特征描述参数，这些复系数就称作傅里叶描述子<sup>[51]</sup>。

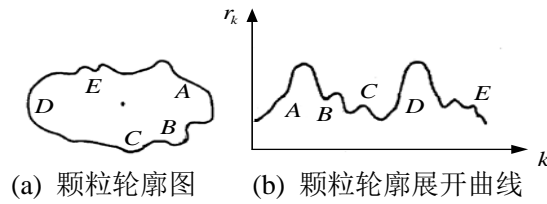


图 2-5 不规则颗粒轮廓线展开图

傅里叶理论形状描述流程如图 2-6 所示，首先，对颗粒轮廓点进行数据采样，得到目标边界点的坐标序列，再通过傅里叶变换将空间域信号转化为频域信号，进而对频域信号进行分析处理，提取频域信号的相位和幅值特征作为不规则颗粒的形状描述子。由于傅里叶描述子表示的是形状的频率特征，因此具有较高的抗噪性，对于轮廓边界细微变化不敏感，这说明利用傅里叶描述子描述不规则颗粒形状并利用傅里叶曲线进行受力分析可以达到较高的精度。

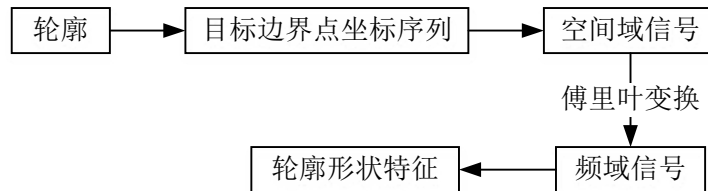


图 2-6 傅里叶理论形状描述原理图

周期函数的傅里叶展开方法如下：

在实数域内，周期为  $2l$  的周期函数  $f(x)$  可以表示为  $f(x+2l) = f(x)$ ，可取三角函数族

$$1, \cos \frac{\pi x}{l}, \cos \frac{2\pi x}{l}, \dots, \cos \frac{k\pi x}{l}, \dots$$

$$\sin \frac{\pi x}{l}, \sin \frac{2\pi x}{l}, \dots, \sin \frac{k\pi x}{l}, \dots$$
(2-11)

作为基本函数族，将  $f(x)$  展开为级数

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{k\pi x}{l} + b_k \sin \frac{k\pi x}{l} \right)$$
(2-12)

同样，在复数域内，对于周期为  $2l$  的函数，可以表示为  $z(s+2l) = z(s)$ ，对其进行傅里叶级数展开可得<sup>[52]</sup>

$$z(s) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Z_k e^{j2\pi ks/l}$$
(2-13)

式中  $Z_k$  —— 复系数，即为傅里叶轮廓形状描述子。

傅里叶形状描述的具体实现如下<sup>[53]</sup>：

假设二维颗粒轮廓图像在复平面内，提取图像轮廓点坐标，得到颗粒轮廓点序列表示为  $s(k) = [x(k), y(k)]$ ， $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。在复平面内可以将各个轮廓点的坐标看作一个复数，则颗粒轮廓离散点可以转化为复数序列： $s(k) = x(k) + jy(k)$ ，

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

得到复数序列  $s(k)$  后，即可利用离散傅里叶变换得到复系数

$$Z_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-j2\pi uk/N} \quad (2-14)$$

式中  $N$  —— 轮廓采集点个数，一般取 2 的整数幂；

$z_n$  —— 轮廓边界抽样点。

写成三角函数形式为

$$Z_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z_n \left[ \cos\left(\frac{2\pi uk}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi uk}{N}\right) \right] \quad (2-15)$$

以上即为基于傅里叶理论的月尘颗粒形状建模方法，可以看出，对于任意不规则颗粒，都可以通过轮廓曲线展开的方式得到其轮廓曲线的傅里叶级数，通过傅里叶级数中的频率和各项幅值即可表征月尘颗粒的不规则程度。

### 2.3.3 月尘颗粒形状建模方法比较及选用

为了选择更适用于月尘颗粒的形状描述方法，对基于分形理论和傅里叶理论的月尘颗粒形状建模方法进行分析，比较二者对于不规则月尘颗粒形状描述的适应性并进行合理选用。

首先，分析不规则月尘颗粒整体形状改变对分形维数的影响，在此分别对圆和椭圆进行形状建模，通过圆与椭圆的分形维数计算来进行分析。设圆形半径为  $a$ ，则由式(2-9)可知，其周长与面积的关系为

$$\ln 2\pi a = \frac{D_1}{2} \ln \pi a^2 + K \quad (2-16)$$

式中  $D_1$  —— 圆形分形维数；

整理，得

$$\ln 2\pi + \ln a = \frac{D_1}{2} \ln \pi + D_1 \ln a + K \quad (2-17)$$

由式(2-17)可以看出，圆形分形维数  $D_1 = 1$ ；

设椭圆长轴为  $a$ ，短轴为  $b$ ，则由式(2-9)得，其周长与面积的关系为

$$\ln [2\pi b + 4(a-b)] = \frac{D_2}{2} \ln (\pi ab) + K \quad (2-18)$$

式中  $D_2$  —— 椭圆分形维数；

设椭圆长轴与短轴的关系为  $b = \lambda a$ ，其中， $\lambda$  为  $(0,1)$  区间内的常数，可作为不规则颗粒某一单一方向缩小倍数的表征量，即通过  $\lambda$  变化实现对椭圆形状的改变，则

$$\ln [(2\pi\lambda - 4\lambda + 4)a] = \frac{D_2}{2} \ln (\pi\lambda a^2) + K \quad (2-19)$$

整理，得

$$\ln(2\pi\lambda - 4\lambda + 4) + \ln a = \frac{D_2}{2} \ln(\pi\lambda) + D_2 \ln a + K \quad (2-20)$$

故对于椭圆而言，分形维数  $D_2 = 1$ 。

通过以上计算可以看出，对于任意一个颗粒，保持其横向尺度不变，对其纵向尺度进行任意倍缩小，虽然颗粒整体形状发生较大改变，但轮廓不规则程度未发生改变，分形维数也保持不变。

同样地，利用傅里叶级数对圆和椭圆进行形状建模，在极坐标系下建立颗粒轮廓点到形心距离  $\rho$  关于颗粒轮廓点和形心连线与水平方向夹角  $\theta$  的函数关系，对于圆，可以得到

$$\rho = a \quad (2-21)$$

对于椭圆，可得

$$\rho = \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \quad (2-22)$$

将比例系数  $\lambda$  代入式(2-22)，得

$$\rho = a\sqrt{\cos^2 \theta + \lambda^2 \sin^2 \theta} \quad (2-23)$$

如图 2-7 所示为不同比例系数  $\lambda$  下形状建模结果比较，可以看出，改变  $\lambda$  的过程中，椭圆形状可以通过傅里叶形状建模结果进行描述。

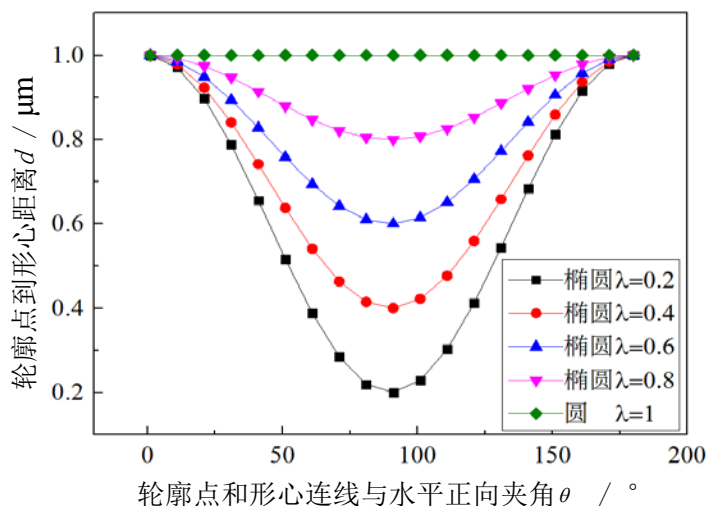


图 2-7 不同比例系数  $\lambda$  下椭圆傅里叶形状建模结果

利用傅里叶形状建模方法对月尘颗粒图像进行处理，保持其横向尺度不变，对其纵向尺度分别进行 1.1 倍、1.2 倍和 1.3 倍放大，傅里叶形状描述结果如图 2-8 所示。可以看出，不同放大倍数下颗粒振荡频率保持不变，但局部峰值不同，同样可以说明基于傅里叶理论的月尘颗粒形状建模对于月尘颗粒的整体形状和局部不规则形状均可以进行较好的描述。

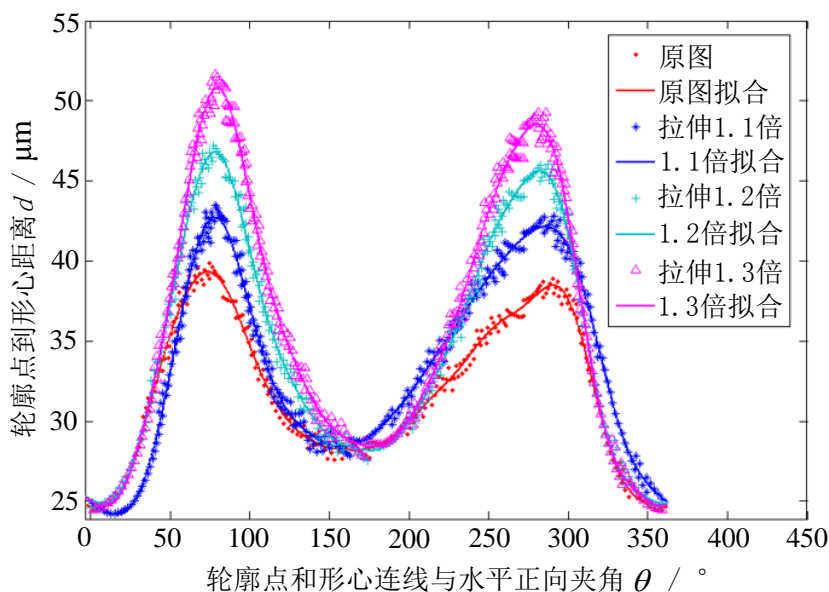


图 2-8 不同比例系数  $\lambda$  下月尘颗粒傅里叶形状建模结果

此外，考虑到后续月尘颗粒接触力学特性的研究中需要对颗粒的接触区域进行形状提取，而对于处在不同接触方位的同一颗粒而言，需要通过形状模型对各种接触方位进行区分。在分形理论中，仅通过颗粒周长与面积的函数关系进行分形维数计算，因此无法对其接触方位进行描述；而在傅里叶级数中，颗粒轮廓描述起始点会随颗粒方位的改变而发生变化，如图 2-9 所示为同一颗粒旋转  $90^\circ$  前后的傅里叶描述结果，可以看出通过傅里叶理论能够对颗粒接触方位进行精确描述。

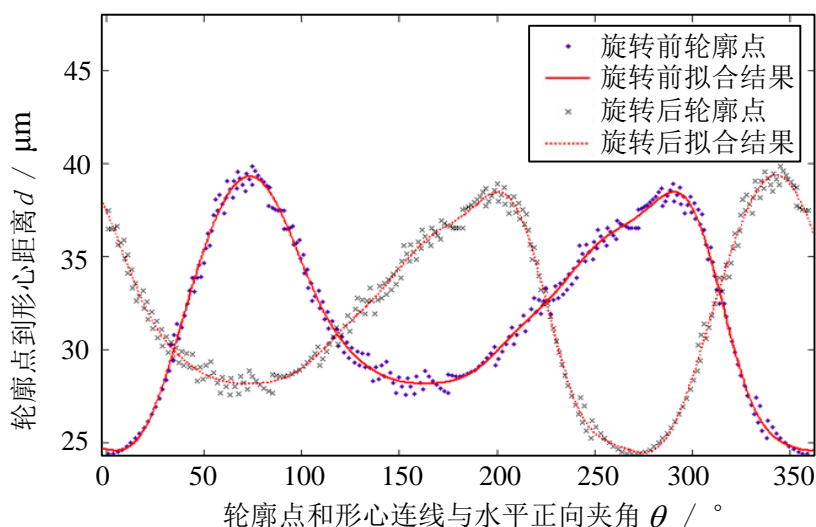


图 2-9 不同接触方位下月尘颗粒傅里叶形状建模结果

综合以上分析可以认为，对于不规则月尘颗粒而言，分形维数表征颗粒整体

的不规则情况具有一定的局限性，对于颗粒单一方向尺度变化灵敏度较低，且不能将月尘颗粒当前方位通过形状建模进行描述，而傅里叶级数对于不规则月尘颗粒的形状描述则更为全面，对于不同接触角度下的同一颗粒也具有较好的描述效果。此外，在实际应用过程中，通常希望能够对不规则颗粒的轮廓形状进行详细描述，得到与轮廓相对应的数学解析式，以便对不规则形状颗粒的接触状态和受力情况进行理论分析和数值计算。因此，选用基于傅里叶理论的月尘颗粒形状建模方法进行不规则月尘颗粒的数学模型和接触力学模型建立。

### 2.3.4 月尘颗粒傅里叶形状描述数学模型

利用傅里叶理论对二维颗粒轮廓曲线进行描述，求取步骤如图 2-10 所示。首先进行颗粒图像预处理，得到颗粒二维投影轮廓，然后对轮廓点进行采集，通过一系列分析计算得出轮廓点坐标、形心位置等参数，再由此绘制出轮廓曲线，最后利用傅里叶级数进行拟合，并求取相应的傅里叶函数子。

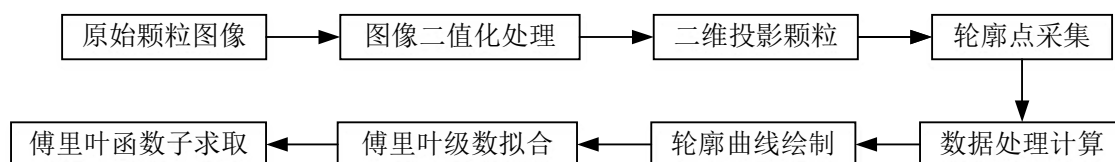


图 2-10 轮廓曲线求取步骤

颗粒图像预处理过程如图 2-11 所示，首先利用颗粒图像分析仪对特定方向颗粒进行图像采集。为了从多值的数字图像中提取出目标轮廓，将采集图像进行二值化处理。二值化处理的方法为给定一个全局阈值，通过比较各像素点与全局阈值的大小将像素点分为两类，并对灰度重新赋值 0 或 255，故通过二值化处理后，图像各像素点的灰度值转化为 0 或 255，整个图像表现为“非黑即白”<sup>[54]</sup>。最后，通过检测像素值变化剧烈的区域对二值化图像的边界进行查找，即相当于对图像像素得到的数字信号进行高通滤波以保留高频信号。



图 2-11 不规则颗粒图像预处理

通过图像预处理得到不规则颗粒的二维投影轮廓后，进行颗粒轮廓点的采集，设轮廓点坐标为  $(x_i, y_i)$ ， $i=1,2,\dots,N$ ，则形心位置为

$$\begin{cases} x_c = \sum_{i=1}^N x_i / N \\ y_c = \sum_{i=1}^N y_i / N \end{cases} \quad (2-24)$$

轮廓点到形心间距离为

$$d = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad (2-25)$$

轮廓点与形心连线与  $x$  轴正向夹角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{y - y_c}{x - x_c}\right) \quad (2-26)$$

在极坐标系下，利用 MATLAB 绘制  $d - \theta$  函数如图 2-12 所示，即为轮廓展开离散点图。

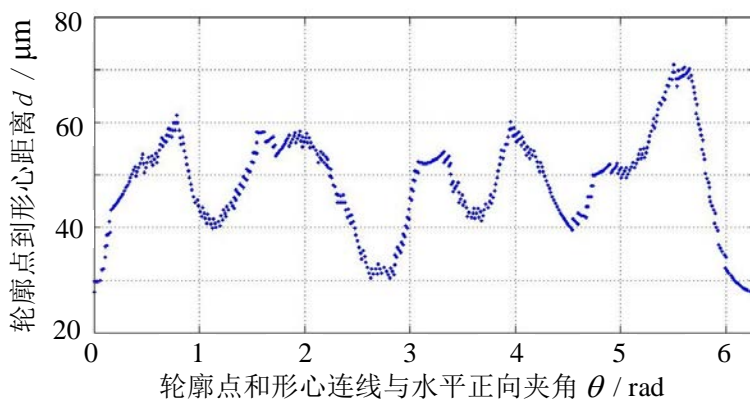


图 2-12 颗粒轮廓展开离散点图

得到轮廓曲线后，利用 MATLAB 软件对轮廓曲线进行傅里叶拟合。如图 2-13 所示为不同阶次傅里叶拟合结果比较，可以看出，傅里叶拟合阶次越高，拟合结果越接近于原始轮廓。通过查阅文献可知，通常情况下认为，当拟合阶次达到 8 阶时，傅里叶曲线基本能够完整还原不规则颗粒的轮廓形状<sup>[55]</sup>，这就给不规则颗粒的形状描述提供了较好的方向。

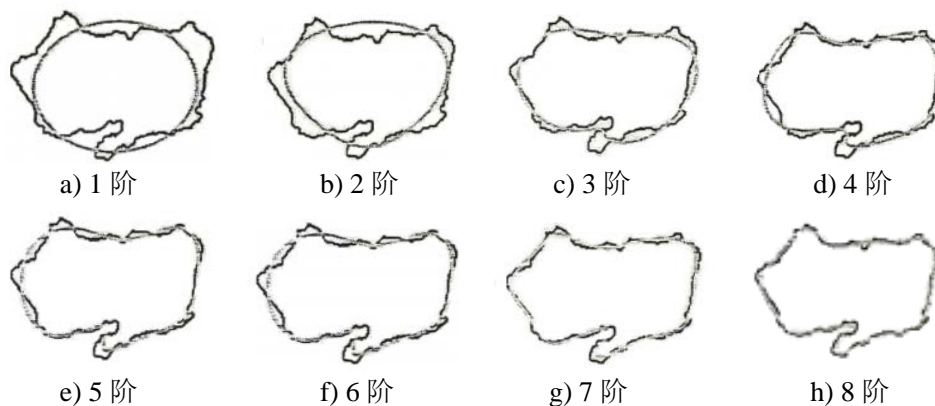


图 2-13 不同阶次傅里叶拟合结果比较<sup>[56]</sup>

综合以上分析，选用 8 阶傅里叶级数进行拟合

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^8 (a_n \cos n\omega x + b_n \sin n\omega x), \quad n=1,2,\dots,8 \quad (2-27)$$

利用 Matlab 对颗粒轮廓点进行曲线拟合，得到 8 阶傅里叶级数拟合曲线如图 2-14 所示。

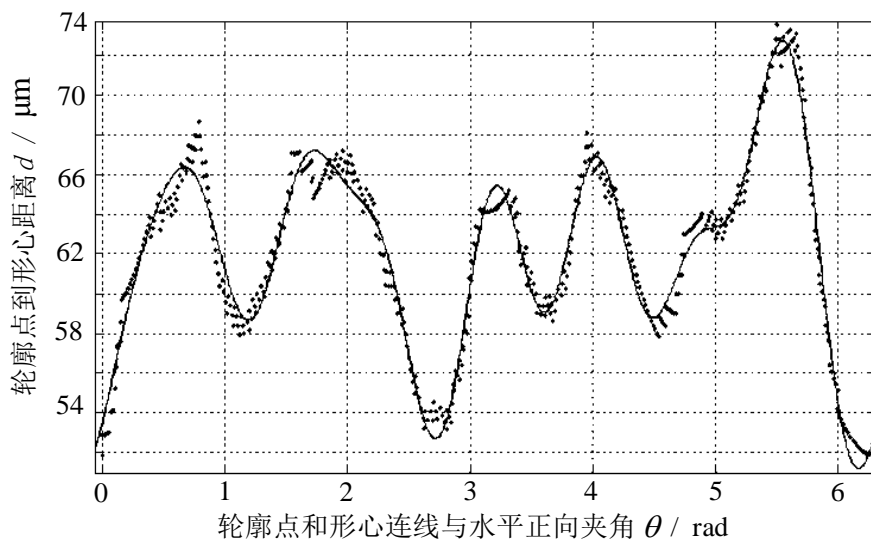


图 2-14 8 阶傅里叶级数拟合结果

从图 2-14 中可以看出，利用 8 阶傅里叶级数对颗粒轮廓离散点进行拟合能够大致还原颗粒的轮廓信息。通过 MATLAB 软件还可直接求出傅里叶级数各项正余弦分量的系数值，即傅里叶函数子拟合值。利用傅里叶函数子对形状不规则的月尘颗粒进行分类，选取若干具有代表性的月尘颗粒作为模板，绘制其傅里叶拟合曲线并计算相应的傅里叶函数子。对于任何一个颗粒，可以利用相关度将其各项傅里叶函数子进行比较，划定分类。相关度的数学定义为

$$R(k) = \frac{|\text{cov}(X, Y)|}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{|E[(X - E(X))(Y - E(Y))]|}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \quad (2-28)$$

式中  $E$  —— 数学期望；

$cov$  —— 协方差；

$D$  —— 方差；

$\sigma$  —— 标准差。

相关度越接近于 1，则进行比较的两个颗粒相关度越高、形状越接近。故对于任意颗粒，将其傅里叶函数子与各模板颗粒的傅里叶函数子进行相关度计算后，选取相关度最接近于 1 的一组，将其划入该组。

## 2.4 不规则月尘颗粒形状分布概率建模

月面环境下，月尘颗粒形状分布较为多样。为了在仿真中尽可能地模拟真实情况，需要对模拟月尘颗粒样本进行形状分布建模，通过月尘颗粒的图像采集和统计分析，得出颗粒形状分布规律，以便在仿真中将形状因素考虑在内，按照月尘颗粒形状的真实分布规律进行颗粒生成和调用。

### 2.4.1 模拟月尘颗粒图像采集

对模拟月尘颗粒样本进行分布建模，首先需要对其进行图像采集。颗粒图像采集采用如图 2-15 所示的 Rise-3002 型颗粒图像分析仪进行，它由数字 CCD 相机、光学显微镜、计算机和图像分析软件等部分组成，能够将传统测量方法与现代图像技术有机结合起来。



图 2-15 Rise-3002 型颗粒图像分析仪

表 2-1 所示为 Rise-3002 型颗粒图像分析仪的参数指标，它具有三目生物显微镜和无限远平场消色差物镜，目镜可实现 10X 和 16X 放大，物镜可实现 4X、10X、40X 和 100X 放大，测量范围为 1~3000 微米，最大分辨率可达到 0.1 微米/像素。为了保证模拟月尘颗粒图像采集的清晰度，同时使视野中呈现更多的模拟月尘颗粒样本，本文中选用 10X 目镜和 10X 物镜进行图像观测和采集，即整体放大倍数为 100X。

表 2-1 Rise-3002 型颗粒图像分析仪参数指标

技术参数	参数值
测量范围	1~3000 微米
最大光学放大倍数	1600 倍
最大分辨率	0.1 微米/像素
准确性误差	<±3%
重复性偏差	<±3%

颗粒图像分析仪的工作原理如图 2-16 所示，将随机选取的模拟月尘颗粒尽量分散地平铺在载玻片上，并调节焦距以保证视野中的大部分模拟月尘颗粒轮廓清晰，利用 CCD 相机的光学显微镜成像系统将颗粒图像拍摄下来并传输给计算机，通过颗粒图像处理分析软件对不规则模拟月尘颗粒采集图像进行处理和相关参数的计算。

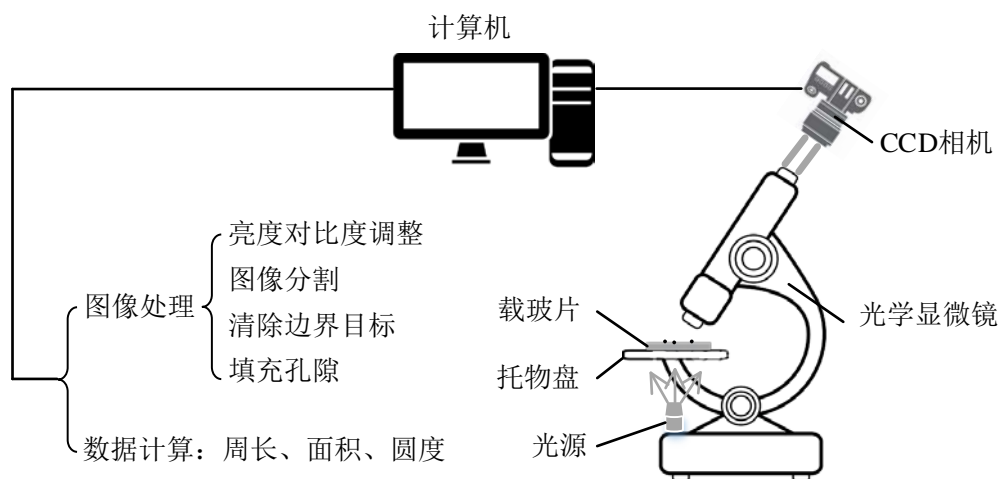


图 2-16 颗粒图像分析仪工作原理示意图

如图 2-17 所示是颗粒图像处理过程中的各阶段结果，将颗粒图像采集得到的原始图像进行亮度、对比度调整和二值化处理，从而得到颗粒二值化图像，再通过图像分割、边界目标清除和孔隙填充得到模拟月尘颗粒直径、周长、面积等参数的计算结果。

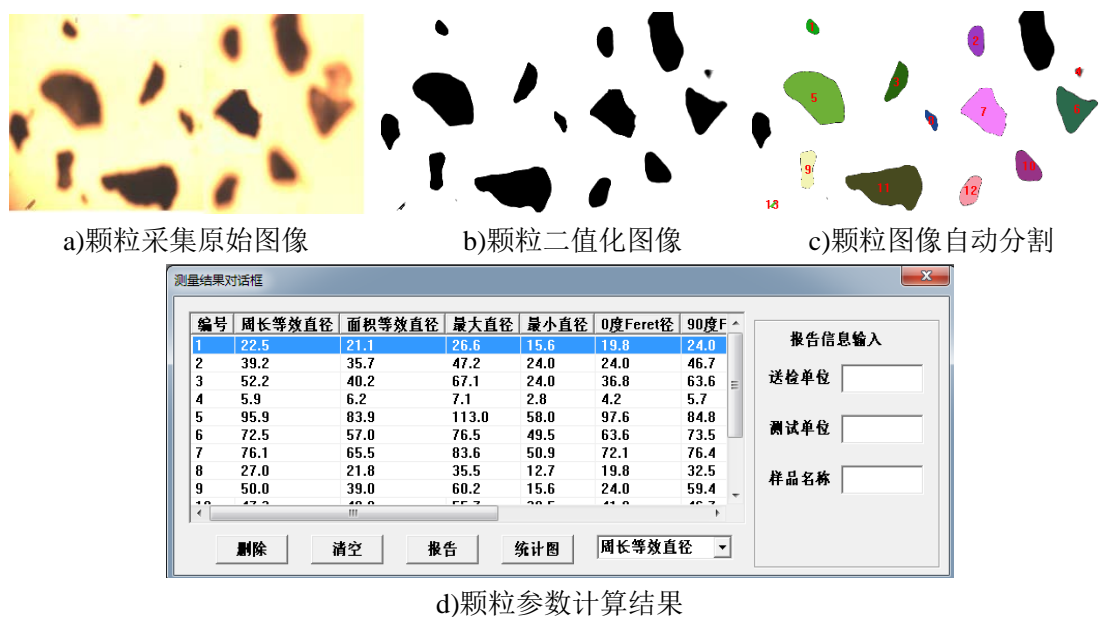


图 2-17 颗粒图像处理各阶段图像

采用以上方法对不规则颗粒形状进行分布建模，从粒径为 0.1~1mm 的模拟月尘颗粒中随机选出 100 个颗粒进行图像采集。

### 2.4.2 模拟月尘颗粒图像分析算法

通过颗粒图像采集得到不规则颗粒图像后，需要通过图像分析和后处理对分布建模所需参数进行求解。对于任意一个不规则颗粒，当其与几何体两点接触时可保持稳定，数学描述中可以看作同时通过颗粒轮廓上两点的切线即为与颗粒接触的几何体所对应的直线。如图 2-18 所示为不规则颗粒轮廓两点相切情况的示意图。从图 2-18 中可以看出，每条两点相切的切线均对应一个两切点到形心连线的夹角，这个夹角所占比例即可用来表征该颗粒与几何体接触时每种接触情况所出现的概率。

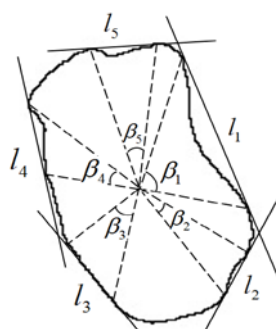


图 2-18 不规则颗粒轮廓两点相切情况示意图

经过分析可以得出，每个颗粒特定接触状态出现的概率为

$$P_i = \frac{1}{N} \cdot \frac{\beta_i}{\sum \beta_i} \quad (2-29)$$

式中  $N$  —— 建模所用颗粒总数量；

$\beta_i$  —— 特定接触状态下两切点到形心连线的夹角 ( $^\circ$ )。

因此，通过颗粒图像处理对月尘颗粒样品图像中的两点相切情况进行切线拟合，并分别计算各种情况下两切点到质心连线的夹角。考虑到接触状态与接触点局部形态有关，同时对各接触点曲率半径进行提取，最终以两切点曲率半径之比作为评价标准进行不规则颗粒形状分布建模，得出不同半径比对应接触状态的出现概率。

根据以上分析进行颗粒形状分布建模，建模方法为：以颗粒形心为原点建立随动坐标系，将颗粒旋转单位角度进行当前状态下平行于水平轴的切线搜索，当颗粒轮廓上某两点纵坐标相同且取得最小值时即表明搜索到两点相切的切线，进行相应的数据计算后输出曲率半径比和对应角度，完成一次搜索，再将颗粒旋转单位角度，进行下一次搜索，直到颗粒旋转一周完成搜索，具体的图像分析算法流程如图 2-19 所示。

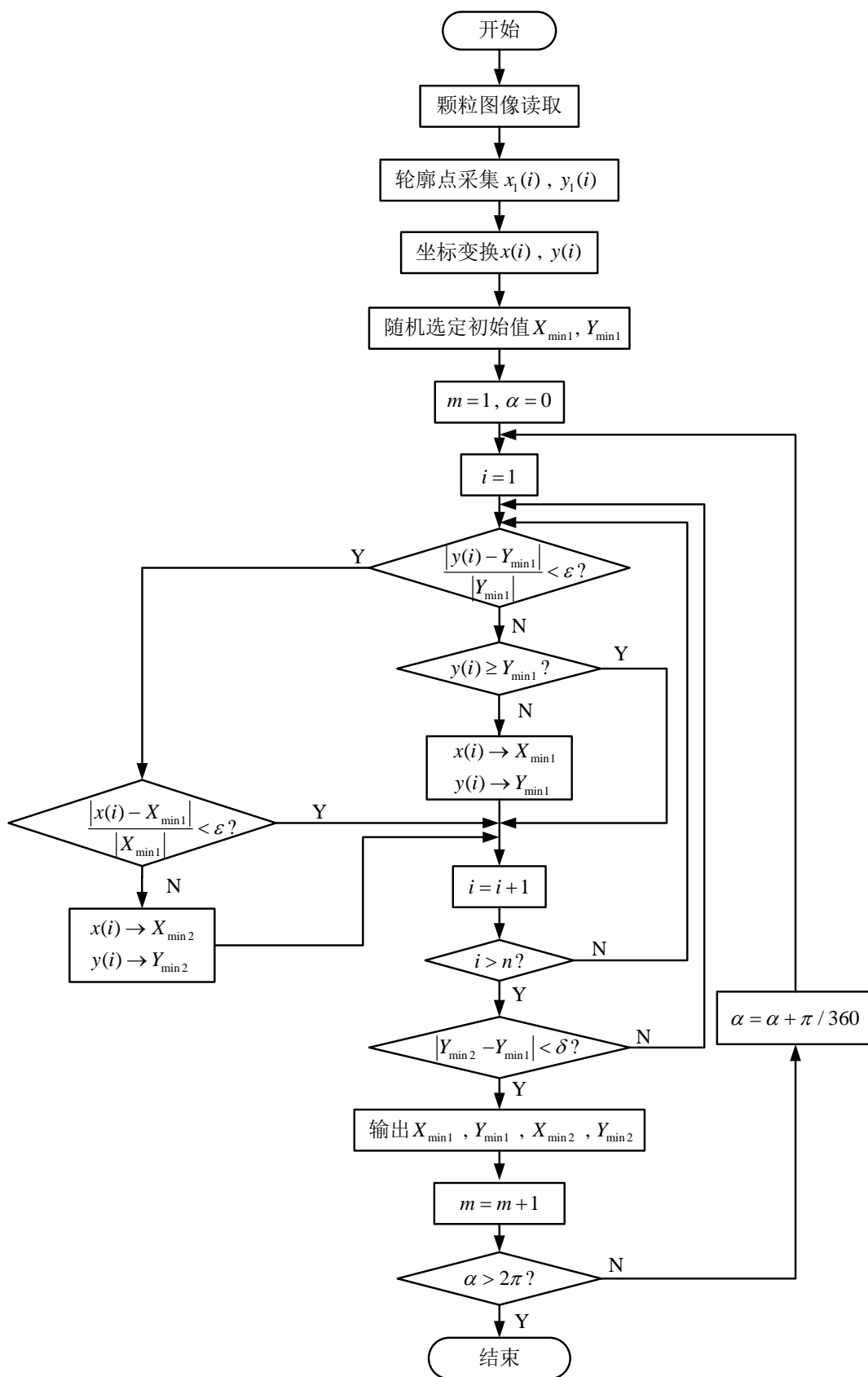


图 2-19 颗粒图像分析算法流程图

首先，对颗粒图像进行读取，并通过二值化处理进行轮廓点采集，得到一系列轮廓点坐标阵列  $\{x_1(i), y_1(i)\}$ ， $i=1,2,\dots,n$ ，同时确定颗粒形心位置，设定图像点提取水平方向和垂直方向的绝对允许误差  $\delta_x$  和  $\delta_y$ 。

图像提取所得结果为全局坐标系下坐标，为了便于进行切线求取，对其进行坐标变换。如图 2-20 所示为不规则颗粒平面坐标系，设全局坐标系为  $(Oxy)$ ，建立固定于颗粒上的随动坐标系  $(O_1x_1y_1)$ ，随动坐标系  $(O_1x_1y_1)$  随颗粒的运动而运动。

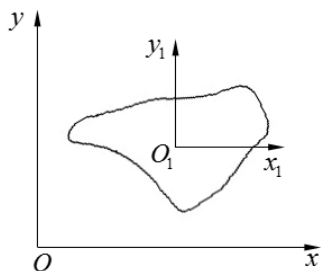


图 2-20 不规则颗粒平面坐标系示意图

如图 2-21 所示为不规则颗粒坐标变换示意图，设不规则颗粒质心在全局坐标系  $(Oxy)$  下的坐标为  $(x_c, y_c)$ ，将全局坐标系  $(Oxy)$  下的坐标变换到随动坐标系  $(O_1x_1y_1)$  下，采用平移变换即可得到其坐标变换矩阵为

$$A_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_c \\ 0 & 1 & -y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

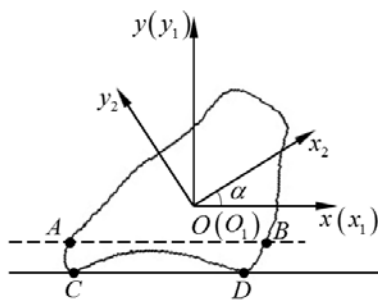


图 2-21 不规则颗粒坐标变换示意图

平移后的随动坐标系  $(O_1x_1y_1)$  坐标原点与全局坐标系  $(Oxy)$  坐标原点重合，再将坐标系  $(O_1x_1y_1)$  逆时针旋转  $\alpha$  角，得到坐标系  $(Ox_2y_2)$ ，其坐标变换矩阵为

$$A_{21} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

由式(2-30)和式(2-31)可得，将原坐标系进行平移和旋转变换后得到的坐标变换矩阵为

$$A_{20} = A_{21}A_{10} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_c \\ 0 & 1 & -y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & -x_c \cos \alpha - y_c \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & x_c \sin \alpha - y_c \cos \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

利用坐标变换后的结果进行切线搜索，首先，选取颗粒轮廓坐标序列中的第一点坐标  $\{x(1), y(1)\}$  作为最小值点，将其坐标存入  $(X_{\min 1}, Y_{\min 1})$ ，分别取轮廓上的各点与最小值点进行比较，初始判定条件为

$$\frac{|y(i) - Y_{\min 1}|}{|Y_{\min 1}|} < \varepsilon \quad (2-33)$$

$$\frac{|x(i) - X_{\min 1}|}{|X_{\min 1}|} < \varepsilon \quad (2-34)$$

例如，如图 2-21 所示，将 A 点作为初始最小值点，首先，利用初始判定条件将轮廓点纵坐标与最小值点纵坐标进行比较，如果满足式(2-33)，则进行横坐标比较，若横坐标也满足式(2-34)，则说明该轮廓点在初始最小值点附近，对其进行舍弃，选取下一点重新判断；若纵坐标满足式(2-33)而横坐标不满足式(2-34)，则说明该轮廓点与最小值点可以连成一条水平直线，即对应于图 2-21 中的 B 点，将该轮廓点存入第二个最小值点  $(X_{\min 2}, Y_{\min 2})$ ，继续开始其他轮廓点的搜索和判断；若轮廓点纵坐标与最小值点纵坐标不满足式(2-33)，则引入最小值判断条件

$$y(i) \geq Y_{\min 1} \quad (2-35)$$

若轮廓点纵坐标不小于最小值点纵坐标，则舍弃该点，进行下一轮廓点的判断；若轮廓点纵坐标小于最小值点纵坐标，则用该轮廓点坐标取代目前的最小值点，然后重新开始判断。当完成全部轮廓点的搜索后，确定两个最小值点是否具有近似相同的纵坐标，即是否满足

$$|Y_{\min 2} - Y_{\min 1}| < \delta \quad (2-36)$$

如果满足式(2-36)，则说明该两点坐标即为所搜索切线的两个切点坐标，将其进行相关参数计算求解并输出。

对满足要求的两点相切情况进行记录、提取和运算。首先，对产生此切线条件下的切点坐标值以及此时颗粒固连坐标系转动角度进行记录；然后，根据所记录的切点坐标对切点附近区域内数据点进行提取，为了保证在切点邻域内求取曲率所用轮廓点阵列横纵坐标为一一对应的单值函数，将提取数据点转化到新坐标系内进行运算；接下来，调用曲率函数进行输出数据点的存储，通过该函数可以实现利用切点及其邻域内各点坐标计算切点处曲率半径，为了避免产生振荡，采用 2 阶多项式进行切点邻域内轮廓曲线拟合，并利用 diff 命令求取各阶导，最终通

过曲率公式求出切点曲率。在完成切线搜索和切点曲率计算后，输出.xls 格式计算结果并进行相应的图像绘制，通过广义数组可以将不同类型的数据储存于同一矩阵下。

至此，通过不规则颗粒图像分析算法和 MATLAB 编程对颗粒轮廓点提取并进行后处理，具体程序如附录所示，通过仿真计算可以得到各曲率半径比在整体中所占比例，对图像处理结果进行统计，以完成对不规则颗粒形状分布建模。

### 2.4.3 模拟月尘颗粒形状分布模型

利用 MATLAB 程序进行形状分布建模，分别对所采集的颗粒图像进行两点切线搜索，如图 2-22 所示为不规则颗粒切线搜索结果，修改绝对允许误差可以对切线搜索精度进行调整。

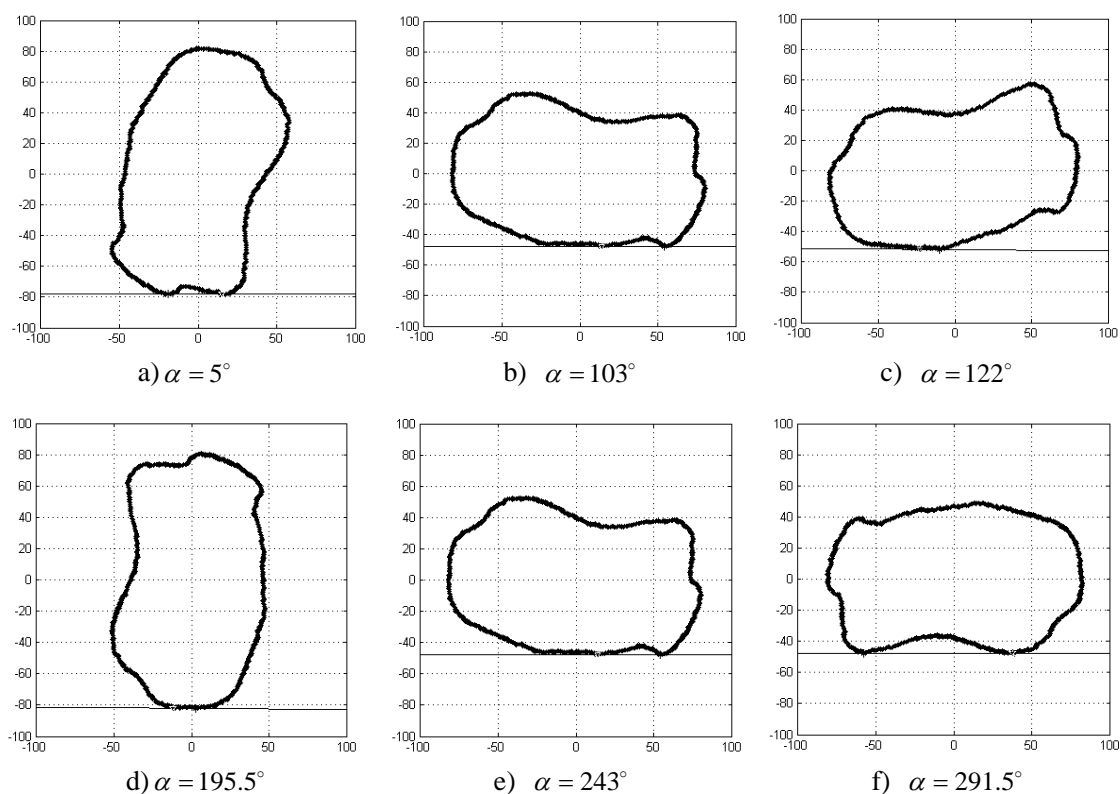


图 2-22 不规则颗粒切线搜索结果

从图 2-22 中可以看出，利用不规则颗粒图像分析算法基本能够实现特定允许误差下不规则颗粒与几何体接触过程中两点相切情况的完整搜索，同时，可以提取切点及其邻域内轮廓点阵列并进行切点曲率 and 对应夹角的计算。通过计算，得出不规则颗粒各曲率半径比出现的概率，利用高斯函数进行分布概率拟合，结果如图 2-23 所示。

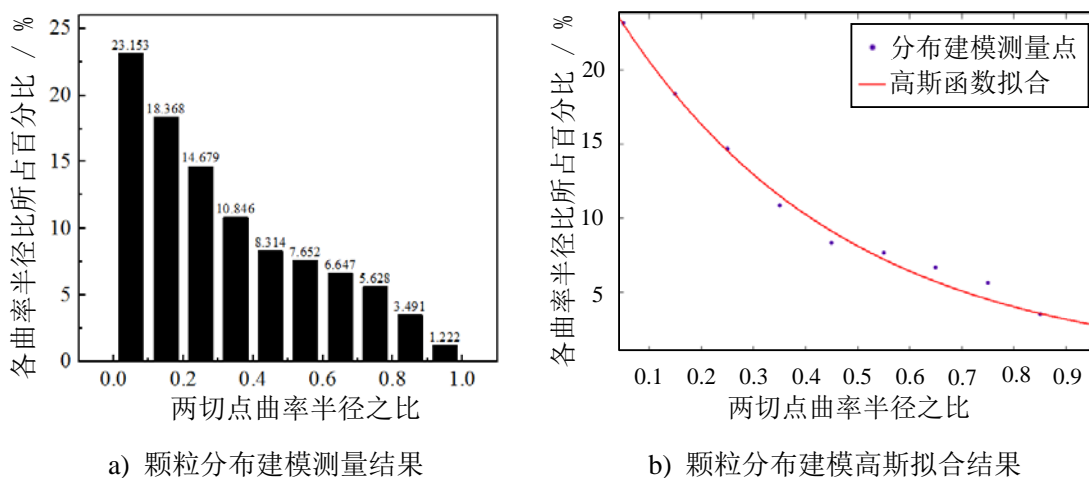


图 2-23 模拟月尘颗粒形状分布概率建模

其中，高斯函数形式为

$$f(x) = a_1 \cdot e^{-(x-b_1)^2/c_1^2} \quad (2-37)$$

高斯函数的拟合参数及拟合效果评价指标如表 2-2 所示。

表 2-2 高斯函数拟合参数及评价指标

参数	高斯函数
$a_1$	$3.75 \times 10^{13}$
$b_1$	-24.31
$c_1$	4.595
和方差	5.971
标准差	0.9859
确定调整系数	0.9819
调整系数	0.9236

从图 2-23 中可以看出，两切点曲率半径之比从 0 变化到 1 的过程中，各曲率半径比出现的概率呈现下降趋势，且下降速率逐渐降低。拟合结果说明，以两切点曲率半径比为评价标准对不规则颗粒形状进行分布建模，各种曲率半径比出现概率呈现高斯分布。在后续的仿真中，也将按照形状分布建模结果对颗粒形状进行分配并进行相应的颗粒生成和调用。

## 2.5 本章小结

本章首先对月尘颗粒性质进行分析，并结合月尘颗粒的不规则形状进行颗粒形状描述和分布建模。通过对现有颗粒形状描述方法的比较分析，找出现有描述

方法的局限性，并由此加以改进，引入傅里叶级数描述月尘颗粒不规则轮廓特征，建立傅里叶形状描述数学模型，为后续的不规则颗粒接触力学模型建立提供基础。同时，对不规则颗粒进行形状分布建模，通过颗粒图像采集提取模拟月尘颗粒样品轮廓图像，并提出不规则颗粒图像分析算法，通过对颗粒与几何体接触平面搜索的方法确定微观接触状态，并通过对切点及其邻域内轮廓点提取的方式得到不同接触点曲率半径比的概率分布情况，在后续的仿真中，按照不规则颗粒形状分布模型进行颗粒的生成和调用，以保证仿真结果的可靠性。

## 第3章 基于形状描述的不规则月尘颗粒接触力学特性研究

### 3.1 引言

对于微米量级的细小月尘颗粒而言,颗粒在接触过程中会出现表面挤压、变形、黏连等现象,这些现象会导致月尘颗粒在接触过程中出现区别于宏观尺度下颗粒的接触特性。在宏观尺度的量级下,物体间的接触分析常常忽略表面作用力、弹性力以及黏附力等对接触过程影响较小的力;而在微观尺度的量级下,这些力对于整个接触过程的影响则不可忽视。因此,本章将针对接触面半径、法向重叠量等参数对法向力影响这一问题进行重点研究,分析颗粒接触力学本构模型局限性并以此为基础建立适合不规则月尘颗粒的力学模型,同时进行月尘颗粒法向力学特性测试试验,对不规则月尘颗粒接触力学模型进行验证。在不规则月尘颗粒接触力学模型基础上建立等效球颗粒接触力学模型,提出基于分段函数拟合的等效算法,最终在离散元仿真中实现球颗粒对不规则颗粒的等效替代。

### 3.2 不规则月尘颗粒法向接触力学模型建立

为了建立适用于月尘颗粒的法向接触力学模型,首先需要通过对力学本构模型的比较和月尘适应性分析选择适合不规则月尘颗粒的力学本构模型,同时,对接触力学本构模型的局限性进行分析,并结合不规则月尘颗粒形状数学建模结果建立新的力学模型。

#### 3.2.1 颗粒接触力学本构模型比较及选用

目前常用的颗粒接触力学模型包括 Hertz 模型、JKR 模型和 DMT 模型。这三种模型均从微观角度对颗粒接触状态进行分析,将接触颗粒简化为均质、光滑球体,得出法向接触力与接触面半径、法向重叠量等参数之间的函数关系;但是,这三种模型的适用条件有所不同: Hertz 理论是颗粒接触力学的基础理论,它认为颗粒接触过程中仅发生弹性变形,为纯弹性理论;而 JKR 理论和 DMT 理论则在 Hertz 理论的基础上加以改进,将分子间作用力引起的黏性考虑在内。

如图 3-1 所示为各本构模型的力-位移关系曲线图,设加载压力用正值表示,加载拉力用负值表示,从图中可以看出,在 Hertz 理论模型中,法向重叠量随加载力增加而增大,加载力为零时法向重叠量也为零,不存在加载力以外的其他力;而在 DMT 和 JKR 理论模型中,加载力为零时法向重叠量不为零,说明在施

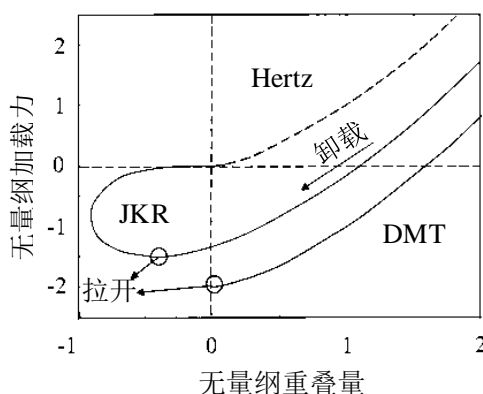


图 3-1 各本构模型中的力-位移关系

加外载荷前颗粒间存在黏附力。

表 3-1 列出了三种模型的适用条件,其中,在 JKR 模型和 DMT 模型的选用中,引入无量纲数——Tabor 数  $\mu$  作为参考,它可以视作由黏连引起的弹性变形力与表面力的有效作用范围之比,其数学定义为

$$\mu = \left( \frac{R^* \Delta \gamma^2}{E^{*2} \varepsilon^3} \right)^{1/3} \quad (3-1)$$

式中  $\varepsilon$ ——原子或分子的平衡间距 (mm)。

表 3-1 三种本构模型分析比较

理论模型	假设条件	适用范围
Hertz 理论	纯弹性接触	—
JKR 理论	黏弹性接触, 接触面内有黏性	$\mu > 5$
DMT 理论	黏弹性接触, 接触面外有黏性	$\mu < 0.1$

由式(3-1)可以看出,当 Tabor 数  $\mu > 5$  时,说明相互接触的颗粒为粒径较大、黏附能较低的低弹性模量材料,此时应选用 JKR 理论模型;而当 Tabor 数  $\mu < 0.1$  时,说明相互接触的颗粒为粒径较小、黏附能较高的高弹性模量材料,此时则应选用 DMT 理论模型。

对于微米量级的月尘颗粒而言,弹性模量量纲为  $10^{10}$  Pa,分子间平衡间距约为  $10^{-8}$  m,表面能约为  $10$  mN/m。根据式(3-1)进行量纲计算,可以看出月尘颗粒接触 Tabor 数接近 0.1,故选用 DMT 模型进行后续的力学模型建立。

### 3.2.2 基于形状描述的月尘颗粒法向力学模型建立

目前对于颗粒接触力学特性的研究大多将不规则颗粒简化为球形颗粒进行计算,这样虽然能够较好地简化接触模型、方便计算仿真,但却会产生较大误差。实际情况下,不规则月尘颗粒的形状会对接触力学特性产生较大影响,因此,有

必要对不规则月尘颗粒接触力学特性与形状参数间关系进行讨论。

如图 3-2 为单凸体和多凸体的接触状态示意图，其中，图 a)为 Hertz 模型下的颗粒接触状态，该模型将接触颗粒简化为两个球形颗粒，因此为单凸体接触；图 b)为 M-B 分形接触模型下的接触状态，M-B 分形接触理论认为，在粗糙表面与光滑平面的接触问题中，实际接触只发生在微凸体上，可以简化为多凸体与平面接触问题，即可以通过多个单凸体接触叠加的方式进行计算<sup>[57]</sup>。

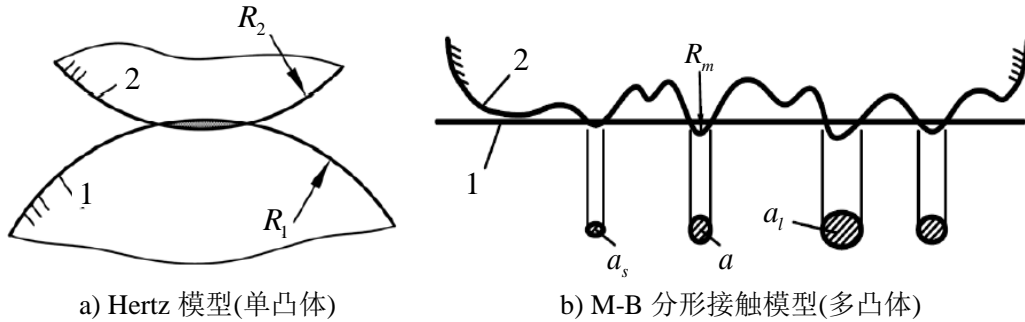


图 3-2 单凸体与多凸体接触状态示意图

综合以上分析，以 DMT 接触模型为基础，结合基于傅里叶理论的不规则月尘颗粒形状理论模型，构建不规则月尘颗粒接触过程中法向接触力与形状参数间的关系。

从不规则月尘颗粒形状的数学描述中可以看出，傅里叶描述曲线中的纵坐标为颗粒轮廓点到颗粒形心的距离，而横坐标为颗粒轮廓点和形心连线与水平方向夹角，以逆时针方向为正，即傅里叶描述曲线建立在如图 3-3 所示的极坐标系下。

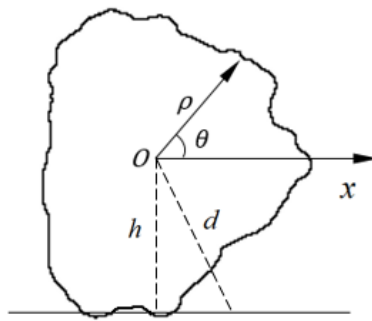


图 3-3 傅里叶描述曲线坐标系建立

为了确定不规则颗粒与平板接触时的接触点情况，将平面直角坐标系下代表平板所在位置的直线转化到相同的极坐标系下，其极坐标方程为

$$d = h / \sin(2\pi - \theta), \theta \neq 0, \pi, 2\pi \quad (3-2)$$

当颗粒与轮廓点接触发生形变时产生法向重叠量，对接触点进行求解，联立式(2-27)与式(3-2)，得

$$\begin{cases} \rho = a_0 + \sum_{n=1}^8 (a_n \cos n\omega\theta + b_n \sin n\omega\theta) \\ \rho = (h - \delta) / \sin(2\pi - \theta) \end{cases} \quad (3-3)$$

式中  $h$  —— 颗粒形心到颗粒轮廓水平方向切线距离 (mm);  
 $\delta$  —— 法向重叠量 (mm)。

对式(3-3)进行求解, 解得

$$\theta = \theta_1 \cdots \theta_i, \quad i = 1, 2, \cdots, t \quad (3-4)$$

以上  $t$  个解分别对应各接触区域的起始值和终点值, 故不规则颗粒与平板接触区域个数为  $t/2$  个。再将各接触点从极坐标系下转化回直角坐标系下, 得

$$x_i = h / \tan(2\pi - \theta_i), \quad i = 1, 2, \cdots, t \quad (3-5)$$

根据 DMT 理论, 各接触区域可以视作圆形, 则各接触区域半径

$$a_j = \frac{x_{2n} - x_{2n-1}}{2}, \quad n = 1, 2, \cdots, t/2 \quad (3-6)$$

由式(1-2)得

$$R_j^* = \frac{a_j^2}{\delta} \quad (3-7)$$

由式(1-12)得

$$F_j = \frac{4E^* a_j^3}{3R_j^*} - 2\pi R_j^* \Delta\gamma \quad (3-8)$$

在不规则颗粒与平板的接触问题中, 可以认为平板的曲率半径为无穷大, 故接触过程的等效半径即为颗粒在接触点处的曲率半径。然而, 由于不规则颗粒各点的曲率半径计算过程较为繁琐, 故可通过曲率半径与法向重叠量和接触面半径的函数关系对其进行替换。

基于以上分析, 将式(3-7)代入式(3-8), 得

$$F_j = \frac{4}{3} E^* \delta a_j - 2\pi \frac{\Delta\gamma}{\delta} a_j^2 \quad (3-9)$$

将单凸体受力叠加得到多凸体受力总和, 即法向接触力

$$F = \frac{4}{3} E^* \delta \sum_{j=1}^{t/2} a_j - 2\pi \frac{\Delta\gamma}{\delta} \sum_{j=1}^{t/2} a_j^2 \quad (3-10)$$

至此, 建立了基于形状描述的不规则月尘颗粒法向接触力学模型, 在后续的研究中, 利用颗粒法向力学特性测试试验对该模型进行验证, 并以此为基础提出不规则颗粒等效算法。

### 3.3 模拟月尘颗粒法向力学特性测试试验验证

为了确定不规则形状对月尘颗粒接触力学特性的影响，并对基于形状描述的月尘颗粒接触力学模型进行验证，对模拟月尘颗粒进行法向力学特性测试试验，并结合数值计算结果分析不规则月尘颗粒接触力学模型正确性。

#### 3.3.1 模拟月尘颗粒法向力学特性测试试验方案

模拟月尘颗粒法向力学特性测试试验在苏州大学机器人与微系统研究中心进行，试验采用图 3-4 所示的高精密微操作试验台进行，该试验台主要由工控机、光学微动平台、CCD 相机、调光器、压缩微动平台、连接架、三爪操作器以及电子天平等部件组成。

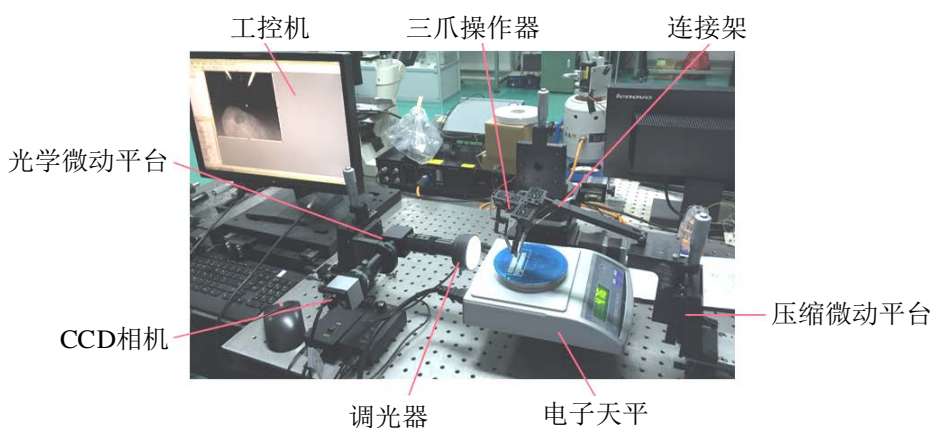


图 3-4 高精度微操作试验台

表 3-2 所示为高精度微操作试验台参数指标，其中，光学微动平台能够实现三轴进给，进给精度为 0.001mm，它能够用于调节固定于其上的 CCD 相机和调光器的位置，CCD 相机放大倍数为 120 倍，它通过光学反射获取图像信息，并将图像传给工控机进行图像采集和处理；调光器用于调节采光区光强，以便得到较为清晰的图像轮廓曲线；压缩微动平台通过连接架带动三爪操作器实现横纵方向进给和垂直方向压缩；试验所用钢针分别固定于三爪操作器末端的三个轴向均布且向内倾斜的固定杆上，针尖位置基本重合以保证压缩时加载点单一且加载方向垂直向下；电子天平测量精度为 0.01N，它可以用于承载待测模拟月尘颗粒，同时测量加载钢针在某一特定位置时模拟月尘颗粒的受力情况。

表 3-2 高精度微操作试验台参数指标

技术参数	参数值
光学微动平台进给精度	1 μm
电子天平测量精度	0.01N
CCD 相机放大倍数	120 倍

模拟月尘颗粒法向接触力学特性测试试验的试验步骤为：

- 1) 将模拟月尘颗粒通过载玻片放于电子天平上，记录电子天平初始数值，通过光学微动平台调节调光器位置和光圈大小，并利用 CCD 相机进行图像采集；
- 2) 通过压缩微动平台调节三爪操作器至模拟月尘颗粒上方，再进行竖直方向加载，控制每次加载步长，并对电子天平测得数值进行记录；
- 3) 根据钢针加载位移和电子天平示数绘制出模拟月尘颗粒法向力与法向重叠量之间的关系曲线。

如图 3-5 所示，颗粒加载方式分为单针斜向加载和三针联合加载两种。单针斜向加载结构简单，上方可以添加辅助 CCD 相机，能够得到侧视和俯视两个方向的颗粒图像，但是，斜向加载过程中，颗粒位置难以固定，且钢针易发生挠性变形。因此，对加载方式进行改进，采用三针联合加载的方法，虽然不能获取颗粒俯视图像，但竖直方向加载能够阻止颗粒在载玻片上的滑动，同时，加载力分散在三个方向上，能够较好地减小加载过程中钢针的变形。

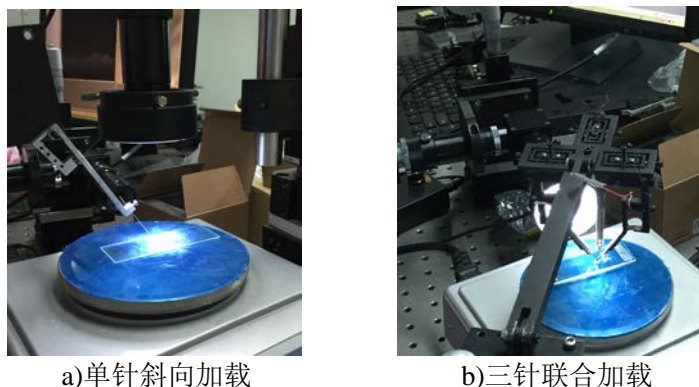


图 3-5 颗粒加载方式比较

综合以上分析，选用粒径为  $100\sim 500\ \mu\text{m}$  的模拟月尘颗粒，随机选取 10 个颗粒进行图像采集和处理，并采用三针联合加载的方式进行颗粒法向力学特性试验，记录试验数据并进行整理，图像及试验点采集示例如图 3-6 所示。

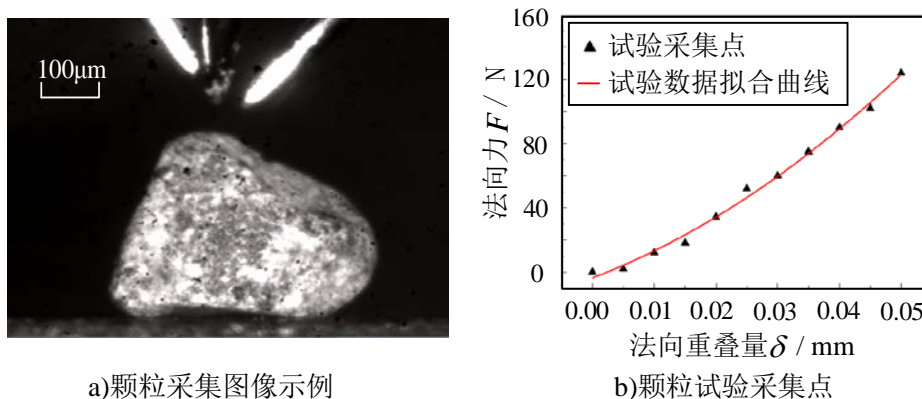


图 3-6 模拟月尘颗粒图像及试验点采集示例

### 3.3.2 模拟月尘颗粒法向接触力学特性测试试验结果与分析

利用 CCD 相机对所选试验颗粒样品分别进行图像采集，所采集到的扫描图像如图 3-7 所示，同时进行月尘颗粒法向接触力学特性测试试验，得到各组颗粒法向力随法向重叠量变化的一系列数据采集点。

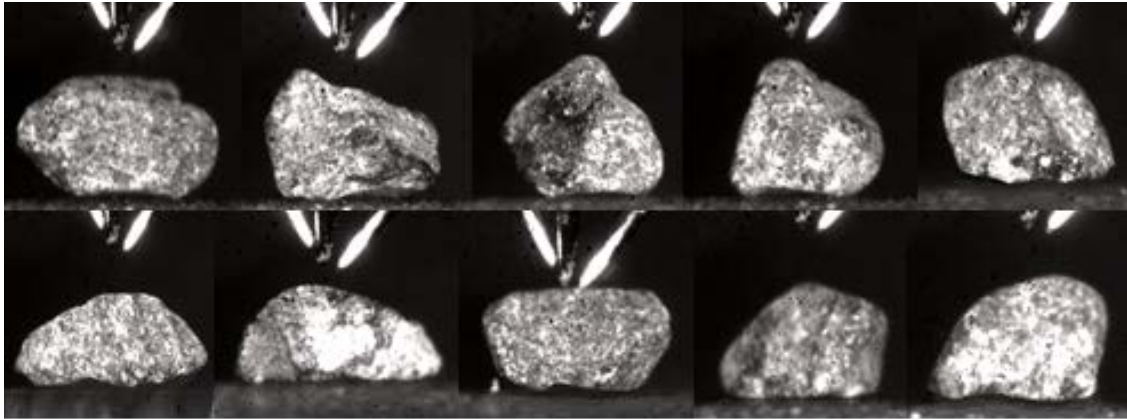


图 3-7 模拟月尘颗粒 CCD 相机扫描图像

在得到试验采集点后，结合试验结果对基于形状描述的不规则颗粒法向力学模型加以验证，步骤如下：

- 1) 将模拟月尘颗粒扫描图像进行二值化处理，并利用 MATLAB 进行轮廓点采集；
- 2) 将与颗粒相切的直线向上平移，并将直线与不规则颗粒轮廓分别展开在极坐标系下，求取颗粒轮廓傅里叶拟合曲线与直线交点；
- 3) 将交点求取结果转化回直角坐标系下，利用式(3-6)求取相应各接触区域的接触圆半径，并利用式(3-10)进行计算，得出颗粒与运动副接触法向力随法向重叠量变化的一系列离散点。

如图 3-8 所示为算例求解过程中的部分曲线，其中，图 a)为直角坐标系下颗粒轮廓曲线及直线图像，利用 `ginput` 命令可在图中取点并求得交点坐标；图 b)为极坐标系下颗粒轮廓傅里叶拟合曲线和直线图像，利用 `fzero` 命令可对函数交点进行精确求解。

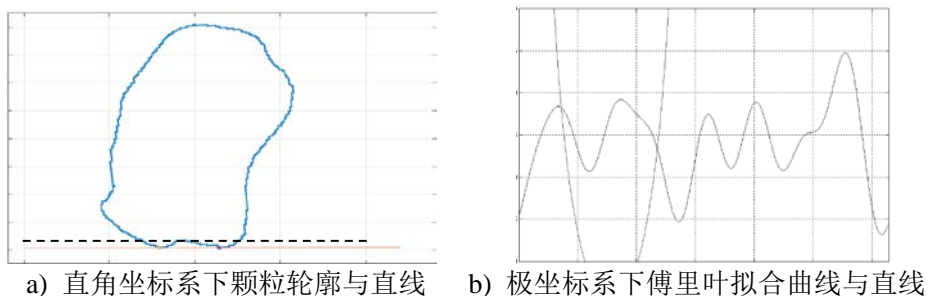
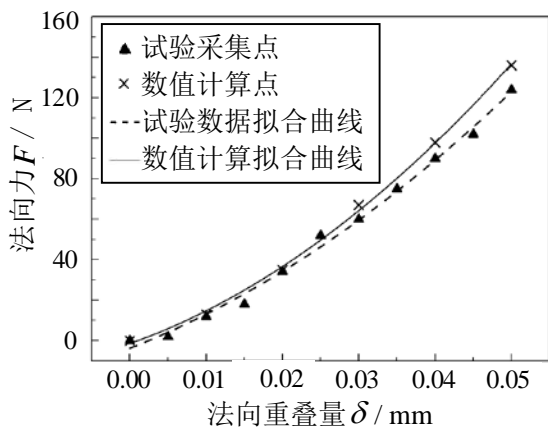
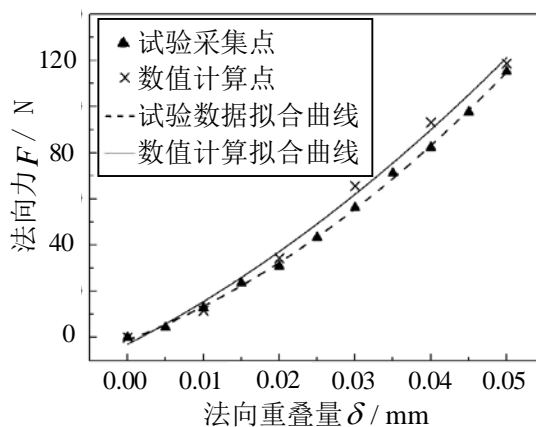


图 3-8 MATLAB 算例求解曲线

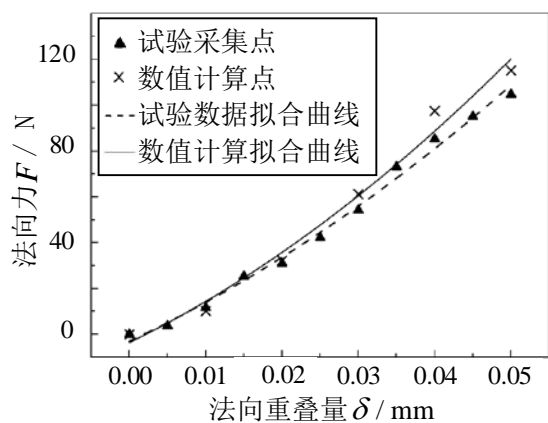
将数值计算数据与试验结果进行对照，绘制试验数据拟合曲线与数值计算拟合曲线如图 3-9 所示。



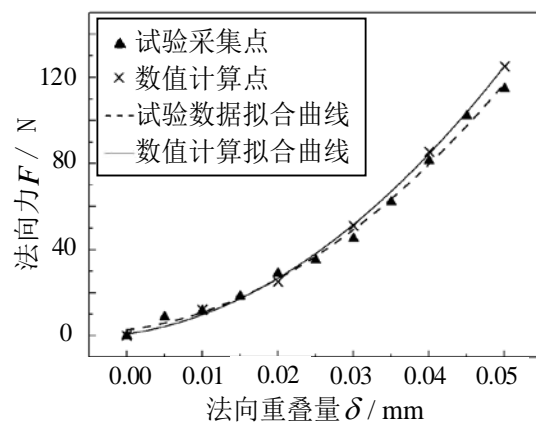
a) 颗粒 1 试验结果



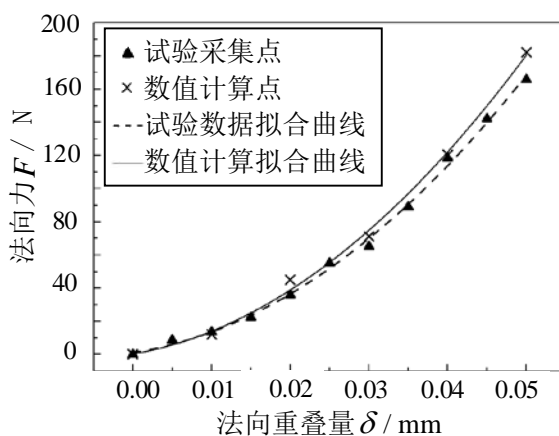
b) 颗粒 2 试验结果



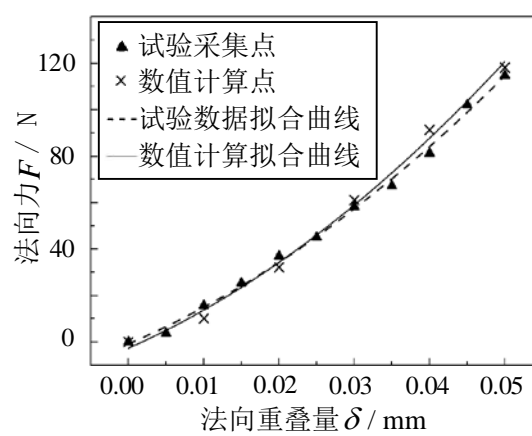
c) 颗粒 3 试验结果



d) 颗粒 4 试验结果



e) 颗粒 5 试验结果



f) 颗粒 6 试验结果

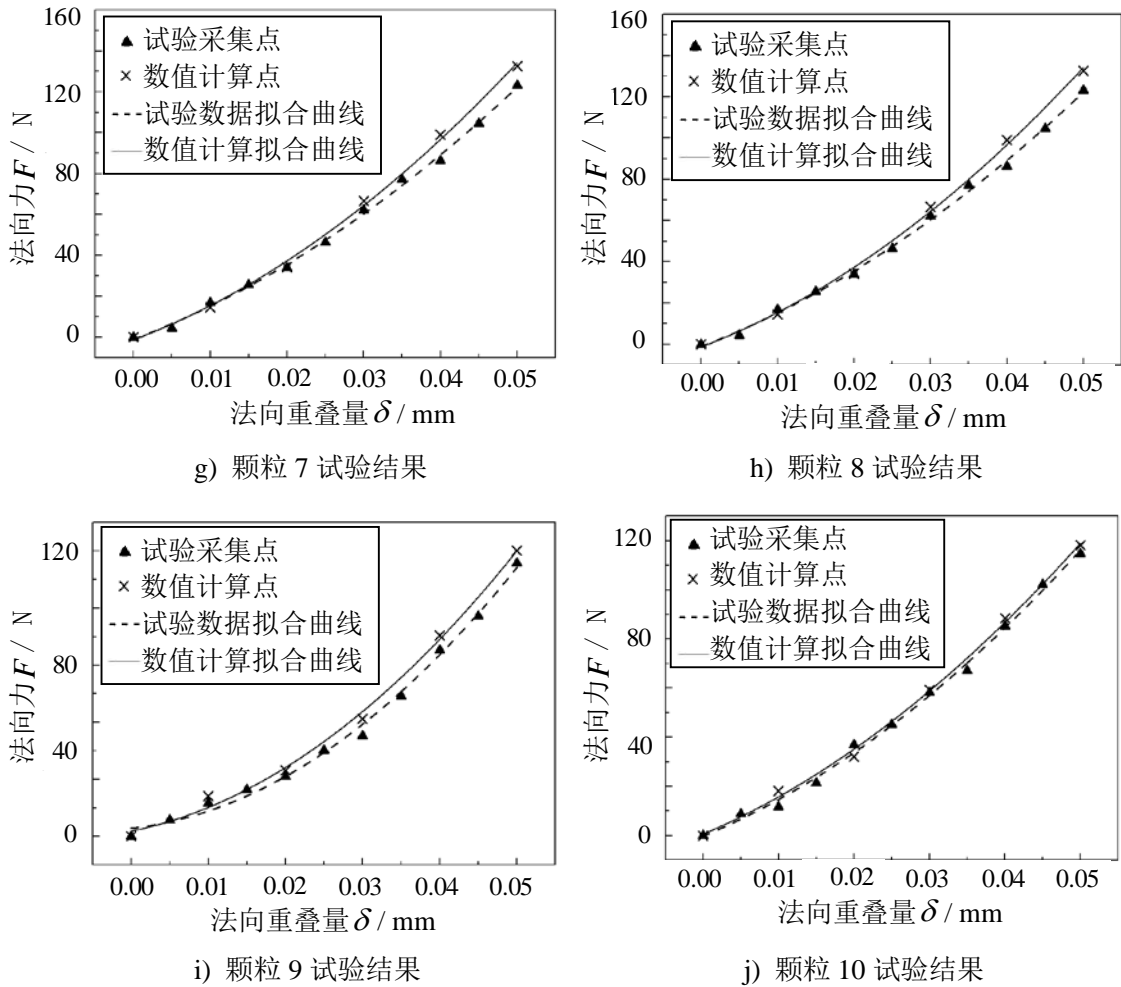


图 3-9 月尘颗粒法向力学特性测试试验数据分析

从试验数据分析结果中可以看出，颗粒法向力学特性测试试验数据拟合结果与理论计算结果能够保持一致的非线性，对各组试验结果最大误差进行统计，统计结果如表 3-3 所示。

表 3-3 月尘颗粒法向力学特性测试试验最大误差

颗粒编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最大误差/%	9.68	5.86	9.17	7.85	6.59	3.25	6.18	5.24	2.98	1.27

从表 3-3 中可以看出，试验结果与理论计算的最大误差能够控制在 10% 以内，说明在误差允许范围内能够通过基于形状描述的月尘颗粒法向接触力学模型对真实情况进行描述。

### 3.4 不规则颗粒等效算法

基于形状描述的颗粒接触力学模型解决了传统的接触力学本构模型对于不规则

则月尘颗粒适应性较低的问题，能够将不规则月尘颗粒与运动副接触区域附近的形状因素考虑在内，对颗粒接触特性进行更为精细的描述。然而，在离散元仿真中，不规则颗粒的建模需要通过改变多个球体质心位置进行堆积的方式完成，建模过程繁琐且无法涵盖全部不规则形状，复杂的形状也会大幅度增加计算量，不利于仿真效率的提高。因此，需要对不规则颗粒进行简化和等效，以实现基于形状描述的颗粒接触力学模型在离散元仿真中的进一步应用。

### 3.4.1 不规则颗粒等效模型建立

根据等效前后颗粒所受法向力相等的原则将不规则颗粒等效为球形颗粒，建立如图 3-10 所示的等效模型。在模型中，假设不规则颗粒与等效球颗粒具有相同的法向重叠量，根据等效前后颗粒所受法向力相同的原则进行模型建立。等效过程中，不规则颗粒的各参数为已知量，等效球颗粒的各参数为待求量。对于不规则颗粒的二维接触状态，当有两个接触点时即达到稳定，故在此只考虑两个接触点的情况。

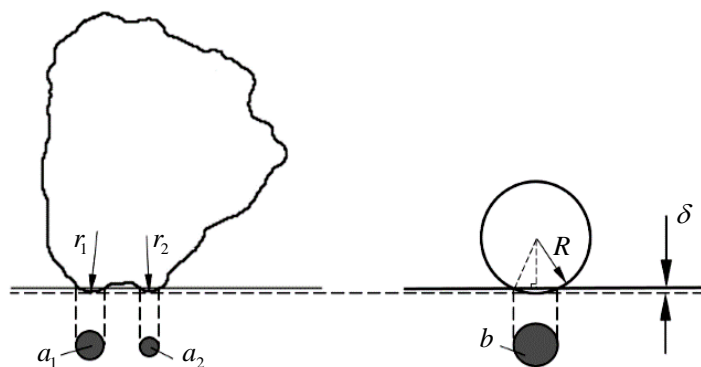


图 3-10 傅里叶描述曲线坐标系建立

针对以上模型提出基于分段函数拟合的等效算法，对不规则颗粒与几何体的接触问题进行等效简化。

### 3.4.2 基于分段函数拟合的等效算法

对于两点接触的不规则颗粒，由式(3-10)得，法向接触力

$$F = \frac{4}{3} E^* \delta (a_1 + a_2) - 2\pi \frac{\Delta\gamma}{\delta} (a_1^2 + a_2^2) \quad (3-11)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$  —— 不规则颗粒与运动副接触面半径 (mm)。

对于等效球颗粒，法向接触力

$$F' = \frac{4}{3} E^* \delta b - 2\pi \frac{\Delta\gamma'}{\delta} b^2 \quad (3-12)$$

式中  $E^{*'}$  —— 等效球颗粒与运动副接触等效弹性模量 (MPa);

$\Delta\gamma'$  —— 等效球颗粒与运动副接触粘附能 ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ );

$b$  —— 等效球颗粒与运动副接触面半径 (mm)。

令  $A' = 4E^{*'} / 3$ ,  $B' = 2\pi\Delta\gamma'$ , 则式(3-12)简化为

$$F' = A'\delta b - \frac{1}{\delta} B'b^2 \quad (3-13)$$

根据等效前后受力相等的原则, 即  $F = F'$ , 可得

$$A\delta(a_1 + a_2) - \frac{1}{\delta} B(a_1^2 + a_2^2) = A'\delta b - \frac{1}{\delta} B'b^2 \quad (3-14)$$

由图 3-10 可以看出, 不规则颗粒和等效球颗粒接触点处的几何关系分别为

$$a_i = [r_i^2 - (r_i - \delta)^2]^{1/2}, i = 1, 2 \quad (3-15)$$

$$b = [R^2 - (R - \delta)^2]^{1/2} \quad (3-16)$$

将式(3-15)和式(3-16)代入式(3-14), 整理得

$$A \left[ (2r_1\delta^3 - \delta^4)^{1/2} + (2r_2\delta^3 - \delta^4)^{1/2} \right] = A'(2R\delta^3 - \delta^4)^{1/2} + 2B(r_1 + r_2 - \delta) - B'(2R - \delta) \quad (3-17)$$

考虑到  $r_1 \gg \delta$ , 故认为  $r_1 > 10r_2$  时

$$(2r_1\delta^3 - \delta^4)^{1/2} + (2r_2\delta^3 - \delta^4)^{1/2} \approx [(2r_1\delta^3 - \delta^4) + (2r_2\delta^3 - \delta^4)]^{1/2} \quad (3-18)$$

则对式(3-17)进行简化, 得

$$A \left[ (2r_1\delta^3 - \delta^4) + (2r_2\delta^3 - \delta^4) \right]^{1/2} - A'(2R\delta^3 - \delta^4)^{1/2} = 2B(r_1 + r_2 - \delta) - B'(2R - \delta) \quad (3-19)$$

左右两边同时平方, 整理得

$$\begin{aligned} & 2AA'(2R\delta^3 - \delta^4)^{1/2} [2(r_1 + r_2)\delta^3 - 2\delta^4]^{1/2} \\ & = A^2 [2(r_1 + r_2)\delta^3 - 2\delta^4] + A'^2 (2R\delta^3 - \delta^4) - [2B(r_1 + r_2 - \delta) - B'(2R - \delta)]^2 \end{aligned} \quad (3-20)$$

左右两边再次平方, 整理得

$$\begin{aligned} & 4A^2 A'^2 (2R\delta^3 - \delta^4) [2(r_1 + r_2)\delta^3 - 2\delta^4] \\ & = \left\{ A^2 [2(r_1 + r_2)\delta^3 - 2\delta^4] + A'^2 (2R\delta^3 - \delta^4) - [2B(r_1 + r_2 - \delta) - B'(2R - \delta)]^2 \right\}^2 \end{aligned} \quad (3-21)$$

对等式两边分别整理, 得

$$\left\{ \begin{aligned}
 &16[(r_1+r_2)B-RB']^4=0 \\
 &32(2B-B')[(r_1+r_2)B-RB']^3=0 \\
 &24(2B-B')^2[(r_1+r_2)B-RB']^2=0 \\
 &8(B'-2B)^3[(r_1+r_2)B-RB']-32[(r_1+r_2)A^2+RA'^2]^2[(r_1+r_2)B-RB']^2=0 \\
 &(2B-B')^4+8(2A^2+A'^2)[(r_1+r_2)B-RB']^2 \\
 &\quad +16(2B-B')[(r_1+r_2)B-RB'][(r_1+r_2)A^2+RA'^2]^2=0 \\
 &8(2A^2+A'^2)(B'-2B)[(r_1+r_2)B+RB']-4(2B-B')^2[(r_1+r_2)A^2+RA'^2]=0 \\
 &4[(r_1+r_2)A^2+RA'^2]^2+2(2A^2+A'^2)(2B-B')^2=16A^2A'^2R(r_1+r_2) \\
 &-4(2A^2+A'^2)[(r_1+r_2)A^2+RA'^2]=8A^2A'^2(r_1+r_2+2R) \\
 &(2A^2+A'^2)^2=8A^2A'^2
 \end{aligned} \right. \tag{3-22}$$

利用  $\delta^8$  项和  $\delta^6$  项系数分别相等，解得

$$\begin{cases} A' = \sqrt{2}A \\ B' = 2B \\ R = (r_1+r_2)/2 \end{cases} \tag{3-23}$$

将式(3-23)分别代入式(3-22)其他项检验，各项系数全部相同，故  $r_1 > 10r_2$  时等式成立。

当  $r_1 = r_2$  时，由式(3-14)得

$$2A\delta a_1 - \frac{2}{\delta}Ba_1^2 = A'\delta b - \frac{1}{\delta}B'b^2 \tag{3-24}$$

显然，存在一组解保证上式恒成立，即

$$\begin{cases} A' = 2A \\ B' = 2B \\ R = r_1 = r_2 = (r_1+r_2)/2 \end{cases} \tag{3-25}$$

当  $r_2 < r_1 < 10r_2$  时，定义比例系数  $\lambda = r_2 / r_1$ ，此时各参数关系为

$$\begin{cases} A' = \sqrt{2}(1-\lambda)A + 2\lambda A \\ B' = 2B \\ R = (r_1 + r_2) / 2 \end{cases} \quad (3-26)$$

当  $r_1 = r_2$  时,  $\lambda = 1$ ,  $A' = 2A$ ; 当  $r_2 < r_1 < 10r_2$  时,  $\lambda \rightarrow 0$ ,  $A' \rightarrow \sqrt{2}A$ ; 分段函数基本保持连续。

综合以上分析可知, 利用分段函数将不规则颗粒等效为球颗粒, 不规则颗粒各参数与等效球颗粒各参数的关系为

$$\begin{cases} E' = \sqrt{2}(1-\lambda)E + 2\lambda E \\ \Delta\gamma' = 2\Delta\gamma \\ R = (r_1 + r_2) / 2 \end{cases} \quad (3-27)$$

故在仿真中可以将不规则颗粒简化为半径等于其两接触点处曲率半径平均值的球形颗粒, 并根据两曲率半径比值对等效球颗粒的弹性模量和粘附能进行设定, 即可利用等效球颗粒完成仿真。

### 3.5 不规则颗粒等效模型仿真验证

为了对不规则颗粒等效模型加以验证, 通过离散元软件 EDEM 对等效前后颗粒法向力学特性进行仿真模拟。利用 API 二次开发平台对法向力学接触模型进行修正, 最终得出法向力与法向重叠量之间的关系, 从而实现对不规则颗粒等效模型的验证。

#### 3.5.1 离散元软件 API 开发平台

离散元软件 EDEM 在生成颗粒、计算接触和计算颗粒受力三个环节提供了 API 二次开发接口, 利用 Visual Studio 编写源程序并以动态链接库的形式在 EDEM 对应界面下加载, 以实现相应的颗粒工厂、接触模型和力学模型嵌入功能, 具体的仿真流程如图 3-11 所示。

从图 3-11 中可以看出, 离散元仿真开始后, 首先进行几何体的移动, 然后利用颗粒工厂进行颗粒的生成和调用, 接下来通过接触的检测对颗粒受力进行计算, 并在单次计算完成后更新颗粒位置、粘结等参数, 最终完成一个循环。在仿真过程中, 可以通过 API 二次开发实时进行颗粒工厂、接触模型和力学模型的嵌入, 以满足不同的仿真需求。

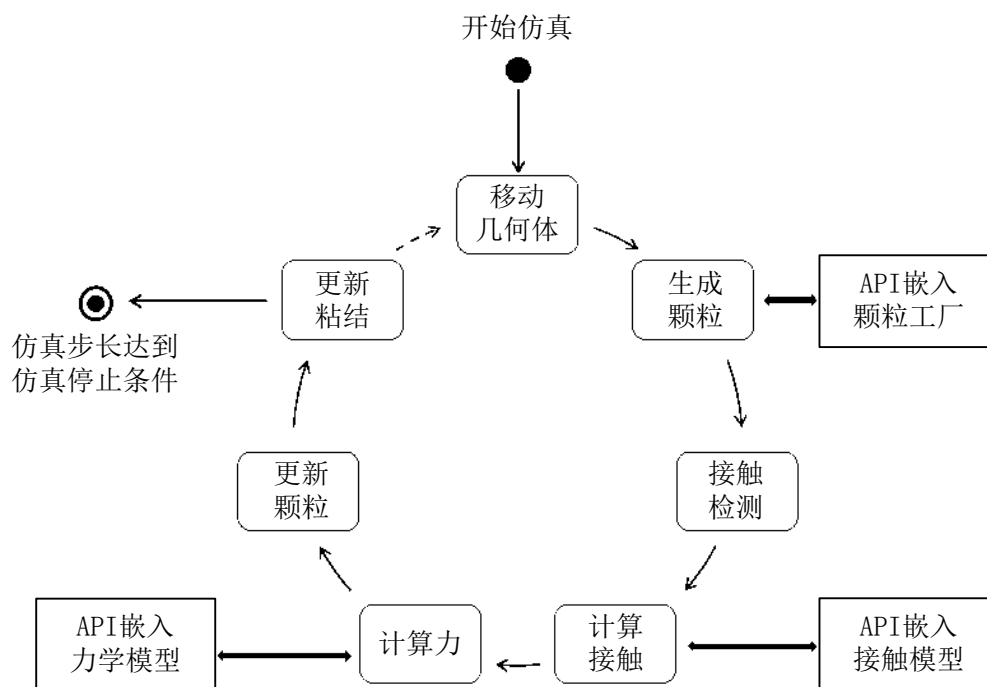


图 3-11 离散元仿真流程图

为了实现力学模型修正，需要利用 Visual Studio 进行目标文件的生成和链接。生成改进后力学模型 API 文件的具体操作步骤如下：

1) 创建用户文件夹，将源代码文件拷贝至该文件夹下，辅助文件可在 EDEM 安装路径下的 src 文件夹中获取；在仿真过程中所用到的辅助源代码文件包括：

- C3dValue.h
- CDiscreteElement.h
- IcfdcouplingV1\_0\_0.h
- IEDEMCouplingV1\_0\_0.h
- IEDEMCouplingV2\_0\_0.h
- IEDEMCouplingV2\_1\_0.h
- IEDEMCouplingV2\_2\_0.h
- vectorMaths.h

2) 启动软件并新建 win32 控制台应用程序项目，应用程序类型为.dll 文件；

3) 将离散元仿真所需头文件 IEDEMCouplingV2\_0\_0.h、vectorMaths.h 和源文件 EDEM\_MBD.cpp 添加至项目文件；

4) 在快捷工具栏中确定需要生成的 API 模型版本，并生成解决方案。

至此，生成可以嵌入力学模型的 API 文件，以便在离散元仿真中进行力学模型的添加和调用。为了将 API 编程所实现的新的力学模型嵌入离散元仿真中，需要

进行离散元软件 EDEM 与 Microsoft 集成开发平台 Visual Studio 的实时耦合。具体操作步骤如下：

- 1) 设置文件属性, 在解决方案资源管理器中将附加包含目录修改为 EDEM 安装时 Coupling 文件夹所在位置;
- 2) 将链接器中的附加包含目录修改为 EDEM 安装时 lib 文件夹所在位置;
- 3) 修改链接器附加依赖项, 输入 libEDEMCouplingClientV2\_0\_0.lib;%;
- 4) 在 in 文件中输入几何体名称, 并在程序段中将 in 文件所在位置进行相应修改;
- 5) 在 Visual Studio 中单击本地 Windows 调试器进行调试, 弹出图 3-12 所示的 EDEM 与 Visual Studio 耦合成功提示界面, 连接结束后对话框自动关闭, Visual Studio 输出菜单中显示“程序已退出, 返回值为 1”;
- 6) 在 EDEM 的耦合服务器中单击“Start”, 然后在 Visual Studio 中单击“本地 Windows 调试器”开始耦合仿真。

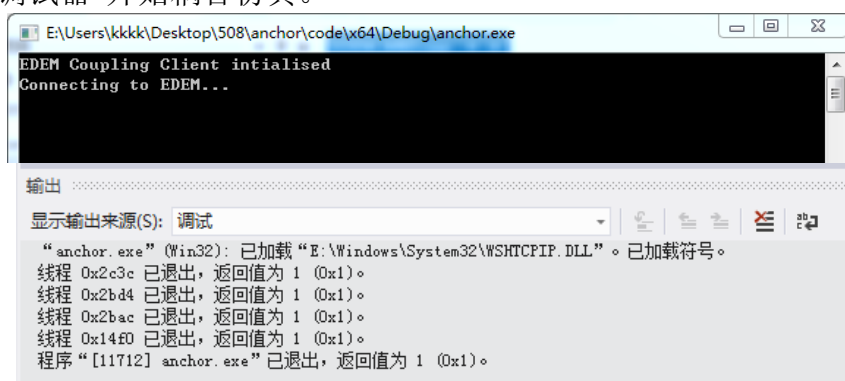


图 3-12 EDEM 与 Visual Studio 耦合成功提示界面

通过以上步骤实现了离散元软件 EDEM 与 Microsoft 集成开发平台 Visual Studio 的耦合, 利用 API 嵌入力学模型以实现等效模型的验证, 在耦合中需保证仿真开始时间与 EDEM 中 .dem 文件结束时刻一致; 耦合仿真开始后, 仿真的步长、开始时间、结束时间等参数均由 API 文件进行控制, 与 EDEM 软件中设置参数无关; 如需中断仿真, 在 EDEM 耦合服务器中单击“Stop”或在 Visual Studio 中停止程序运行。

### 3.5.2 不规则颗粒等效模型验证离散元仿真

为了验证不规则颗粒基于分段函数拟合的等效模型, 建立仿真模型如图 3-13 所示, 按照等效模型设置等效球颗粒的粒径和物理参数, 分别对  $r_1 = r_2$  和  $r_1 = 10r_2$  两种情况下不规则颗粒和等效球颗粒的法向力学特性进行仿真。

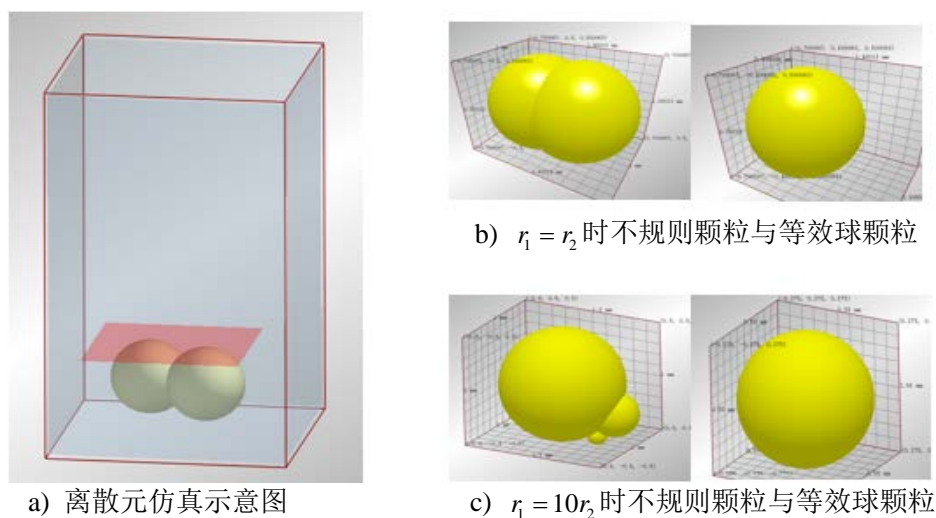


图 3-13 不规则颗粒等效模型验证

为了使仿真结果更贴近真实情况，通过查阅资料确定仿真所需月尘物理力学参数如表 3-4 所示。

表 3-4 月尘物理力学参数设置

参数名称	参数值	单位
密度 $\rho$	1627	$\text{g/cm}^3$
剪切模量 $G$	$1.4 \times 10^{10}$	Pa
泊松比 $\mu$	0.25	—
地球表面重力加速度 $g_e$	9.8	$\text{m/s}^2$
月球表面重力加速度 $g_l$	1.6	$\text{m/s}^2$

仿真中，将颗粒生成于计算域内，并使其自由下落；建立压缩板并给定恒定速度，使其向下压缩颗粒，分别采集颗粒法向力和法向重叠量随时间变化曲线，绘制法向力随法向位移变化如图 3-14 所示。

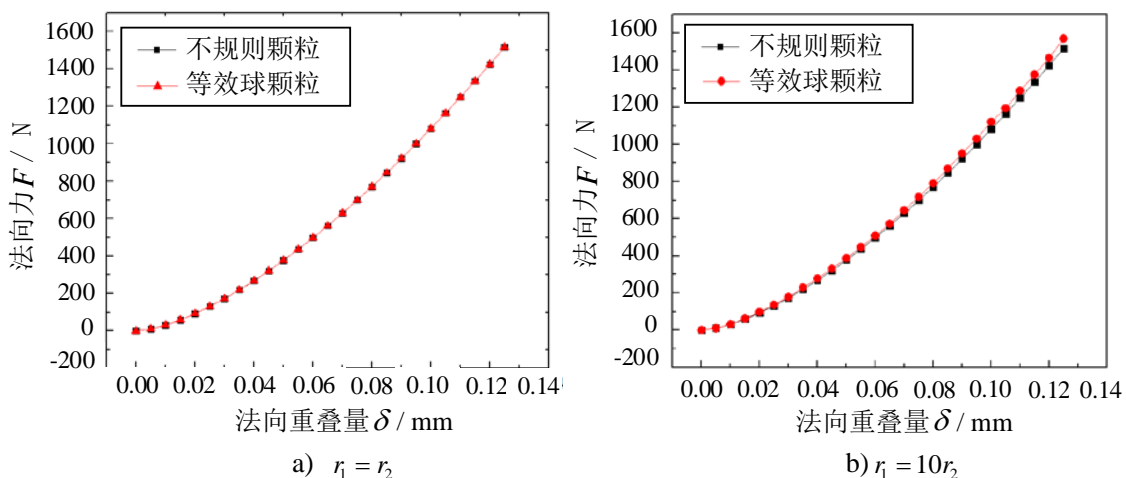


图 3-14 不规则颗粒与等效球颗粒法向力-法向重叠量关系曲线

从图 3-14 中可以看出,  $r_1 = r_2$  时, 等效球颗粒能够完整还原不规则颗粒力学特性; 而  $r_1 = 10r_2$  时, 等效球颗粒也能够近似还原不规则颗粒力学特性, 产生少量误差的原因是颗粒两接触点曲率半径相差 10 倍时近似效果有限。

### 3.6 本章小结

本章利用不规则月尘颗粒形状描述理论模型对不规则颗粒法向接触力学模型进行改进, 将不规则颗粒与平面几何体接触问题转化为多个单凸体受力叠加的方式进行计算, 建立基于形状描述的颗粒法向接触力学模型, 并通过颗粒法向力学特性测试试验加以验证。同时, 建立不规则颗粒的等效模型, 提出基于分段函数拟合的等效算法, 并通过离散元软件 API 二次开发平台对等效算法加以验证, 证明了采用球颗粒替代和参数修正相结合的方式能够基本模拟出不规则颗粒的法向力学特性, 为后续大量不规则颗粒的离散元仿真提供了简化依据。

## 第4章 月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真

### 4.1 引言

通过前述不规则月尘颗粒数学建模和分布建模实现了对颗粒不规则形状的数学描述,并将颗粒轮廓描述结果与力学特性分析结合起来,构建出基于形状描述的不规则月尘颗粒接触力学模型。本章将结合月尘颗粒的具体性质,利用离散元仿真软件 EDEM 针对月尘颗粒对运动副运动特性的影响进行仿真,并结合轮轴掩埋试验对前文所提出的接触模型进行验证,同时针对偏心距、转速以及运动副表面性质等因素进行月尘颗粒进入运动副后对其运动特性影响的仿真预测,为未来月面探测器的结构设计提供理论支撑。

### 4.2 月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真

在月面探测过程中,月尘颗粒会逐渐进入探测器运动副间隙,在运动副元素发生相对运动的过程中逐渐积累并不断移动,最终可能造成局部载荷过大甚至出现运动副卡死现象。本节以回转副为例,针对月尘颗粒对运动副影响这一问题进行离散元仿真,通过仿真过程中颗粒的流动规律和各项参数的变化情况对月尘颗粒的影响规律进行探究。

#### 4.2.1 离散元仿真模型建立

为了进行月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真,分别对月尘颗粒和几何体进行离散元仿真建模,根据不规则颗粒等效模型进行颗粒等效和参数设置,同时对颗粒与几何体的力学作用参数进行设置。

##### 4.2.1.1 月尘颗粒离散元模型建立

考虑到月尘颗粒形状不规则的特性,在仿真中需要引入不规则形状对仿真结果的影响。为了简化仿真过程、提高仿真效率,利用前述不规则颗粒等效模型对不规则形状颗粒进行代替,即将不规则颗粒与几何体的接触问题简化为球颗粒与平板的两点接触,利用多个单凸体受力叠加的方式进行计算。

在颗粒的生成过程中,为了更好地接近实际情况,同时将形状参数引入仿真中,按照不规则颗粒分布建模所得到的分布规律进行颗粒工厂生成和颗粒参数设置。如表 4-1 给出了月尘颗粒离散元建模过程中所用的颗粒类型及对应参数,按照式(2-37)的形状分布模型生成离散元仿真颗粒,并利用式(3-27)进行相应的颗粒参数设置。

表 4-1 月尘物理力学参数设置

颗粒类型	比例系数 $\lambda$	弹性模量( $\times 10^8$ Pa)	颗粒所占百分比(%)
Particle 1	0.1	2.06	23.07
Particle 2	0.2	2.14	18.30
Particle 3	0.3	2.23	14.51
Particle 4	0.4	2.31	11.46
Particle 5	0.5	2.39	9.09
Particle 6	0.6	2.47	7.20
Particle 7	0.7	2.55	5.69
Particle 8	0.8	2.64	4.48
Particle 9	0.9	2.72	3.53
Particle 10	1.0	2.80	2.67

颗粒生成过程中，为了保证颗粒堆积足够密实，采用图 4-1 所示的方式生成颗粒，通过随机填充、自由下落两个过程循环进行的方式多次填充，直至颗粒静置后无法再次生成颗粒为止。

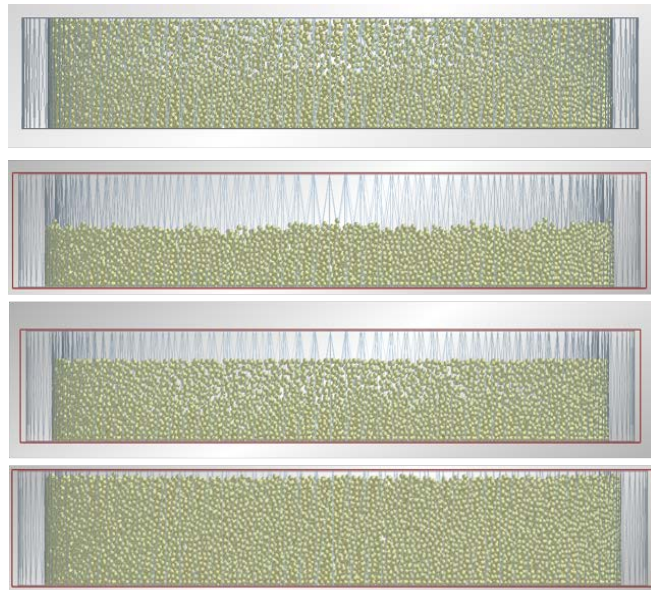


图 4-1 初始状态颗粒生成过程图

#### 4.2.1.2 几何体离散元模型建立

离散元软件 EDEM 支持 Solidworks、Pro/E、UG、CATIA 等主流三维 CAD 软件，对于复杂几何体的建模可以直接导入 CAD 模型进行网格划分和仿真计算。为了对进入月尘颗粒后回转副的运动特性变化进行仿真，采用三维建模软件 Solidworks 建立仿真模型如图 4-2 所示，其尺寸定义为孔内径  $\phi 11\text{mm}$ ，轴外径  $\phi 10.6\text{mm}$ ，轴孔间同轴间隙为  $0.2\text{mm}$ 。

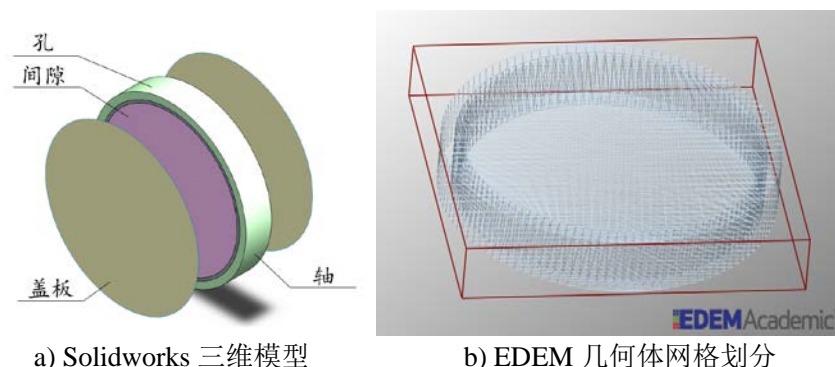


图 4-2 离散元仿真回转副三维模型

为了更好地利用仿真模拟月尘颗粒进入轮轴间隙造成卡死的现象，采用轮轴间隙内颗粒完全填充的方式进行离散元仿真。创建如图 4-3 所示的颗粒工厂几何体，将颗粒生成区域限制在轮轴间隙内。颗粒工厂几何体设置为虚拟形式，因此，它只对颗粒生成区域产生影响，而不会在仿真过程中对颗粒起到位置约束或力约束。

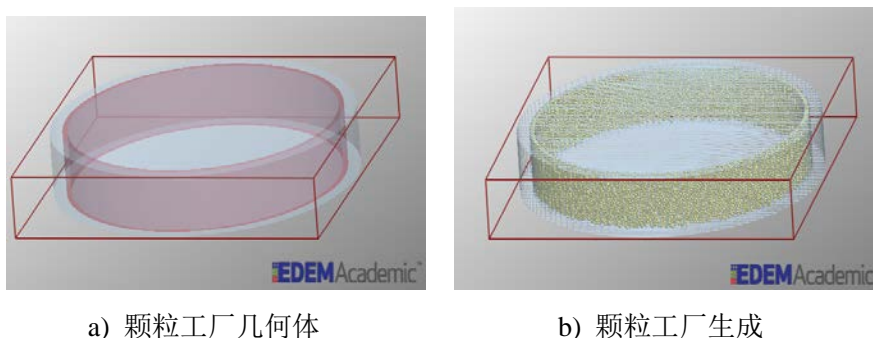


图 4-3 离散元仿真颗粒工厂

此外，确定离散元仿真几何体的材料属性如表 4-2 所示。

表 4-2 几何体材料属性定义

材料属性	泊松比	剪切模量(Pa)	密度(kg/m <sup>3</sup> )
几何体	0.3	$2 \times 10^{10}$	7850

#### 4.2.1.3 颗粒与几何体相互作用参数

确定颗粒和几何体离散元模型后，对颗粒与几何体的作用参数进行确定，查阅国内外相关文献，并参考实验室相关课题的前期研究，确定离散元仿真颗粒与几何体作用参数如表 4-3 所示。

表 4-3 颗粒与几何体相互作用参数定义

接触属性	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
颗粒-颗粒	0.1	0.574	0.1
颗粒-几何体	0.2	0.3	0.1

几何体和颗粒生成后，对转轴施加恒定转速度，使得回转副元素发生相对运动，观察颗粒在此过程中的变化情况，并对运动特性相关参数的变化曲线进行输出。通过仿真可以得出月尘颗粒在回转副中的聚集方式以及回转副元素发生相对运动过程中月尘颗粒的运动情况如图 4-4 所示。

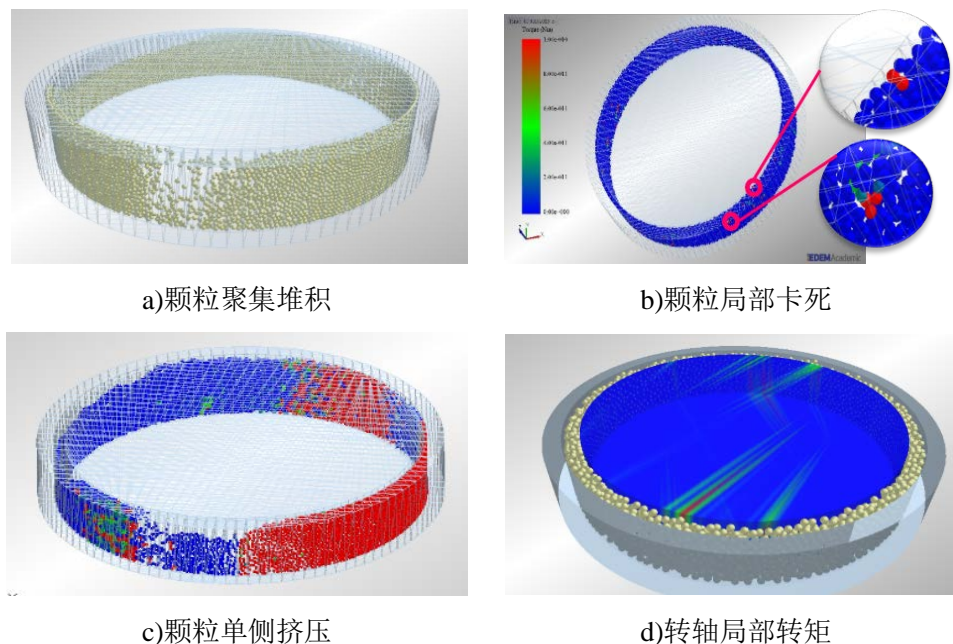


图 4-4 月尘颗粒进入回转副仿真现象

从图 4-4 中可以看出仿真过程中月尘颗粒以及运动副的运动状态及受力情况，颗粒在回转副中出现聚集和堆积的现象，局部甚至产生颗粒受力剧增的情况。此外，在回转副元素发生相对运动的过程中，颗粒会出现一侧受力较小、另一侧受力较大的单侧挤压情况。

#### 4.2.2 月尘颗粒对运动副运动特性影响仿真结果分析

在离散元仿真软件 EDEM 中，通过颗粒与颗粒、颗粒与几何体的接触检测进行受力分析和计算，只有足够充足的空间和足够稳定的状态才能保证颗粒存在于该位置，同时，在仿真中给定转轴恒定的转动速度，因此，无法通过离散元仿真模拟真实的卡死现象。但是，在仿真中可以通过转矩大小的变化来表征是否发生卡死现象，当转矩急剧增大，超出电机输出额定范围后，即可认为旋转机构已经出现卡死现象。

综合以上分析，对转轴转动过程中所受转矩随时间的变化进行分析，如图 4-5 所示为回转副元素相对运动过程中转轴所受转矩随时间变化曲线，由于转轴所受转矩为大量颗粒综合作用的结果，而颗粒位置、速度、受力等状态会发生瞬时变化，故转矩随时间变化曲线局部有轻微波动，但可以呈现转矩整体变化趋势。对

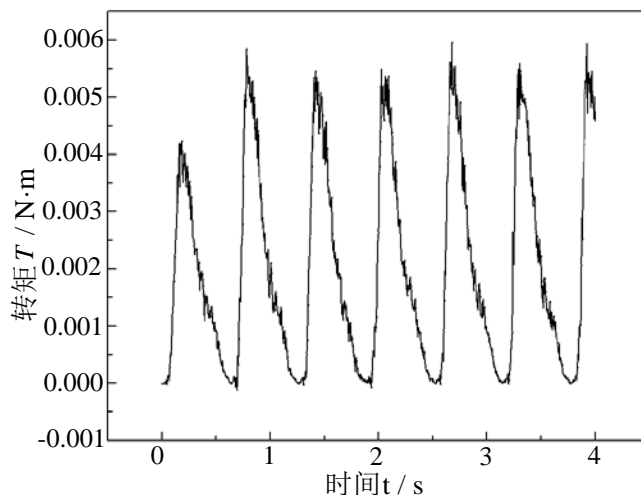


图 4-5 回转副元素相对运动过程中转轴所受转矩随时间变化曲线

整个转动过程进行综合分析，可以看出转轴所受转矩基本呈现周期变化，且转矩峰值基本保持不变；在一个周期内，即转轴转动一周的过程中，转矩呈现先增大后减小的趋势。

对起动初期转矩变化进行局部分析如图 4-6 所示，可以看出转轴开始运动时所受转矩基本保持在零附近，在转轴继续转动过程中，转矩逐渐上升并在达到峰值后缓慢下降。

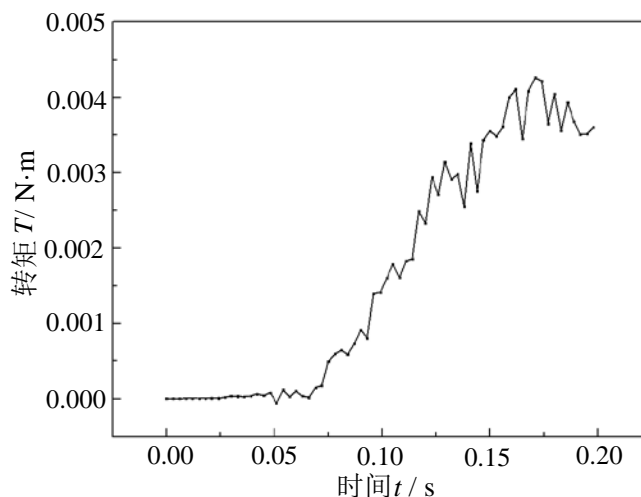


图 4-6 起动初期转轴所受转矩随时间变化曲线

初始状态下，月尘颗粒均匀分布在轴孔间隙内，受力保持平衡，基本不会对转轴产生作用力矩；随着转轴的不断转动，月尘颗粒也在摩擦力和离心力的作用下开始运动，颗粒分布不均衡造成转轴转矩增加并最终达到峰值，如果此时电机输出转矩足以克服阻力转矩，则转轴能够继续运动，所造成转矩急剧增大的月尘

颗粒也会相应移动，转轴转矩开始逐渐下降；如果此时电机输出转矩不足以克服转矩峰值，则转轴无法继续运动，发生卡死现象。此外，仿真结果还表明，在一个周期内，会出现转矩急剧增大的情况，且重复运动到该位置时会再次出现相同的情况，说明卡死一旦产生，就不易消除。因此，可以认为，月尘颗粒对运动副运动特性影响的离散元仿真基本能够对机构卡死现象进行模拟，并预测特定输出转矩下机构是否会发生卡死现象。

### 4.3 月尘颗粒对运动副影响的试验研究

为了对前述仿真结果进行可靠性分析，需要进行月尘颗粒对回转副运动特性影响的试验验证。在此利用合作单位航天五院 511 所进行的轮轴掩埋试验进行对照。

#### 4.3.1 轮轴掩埋试验平台及试验方案

月尘颗粒对运动副运动特性影响试验研究利用轮轴掩埋试验平台进行，其结构如图 4-7 所示。该试验平台主要由月尘环境效应模拟器、轮轴悬挂系统、土槽、仿真轮轴驱动系统、扭矩测试采集系统组成。

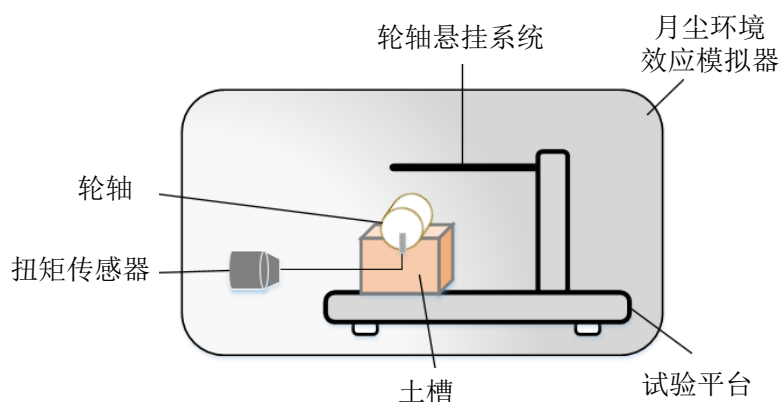


图 4-7 轮轴掩埋试验系统结构图

轮轴掩埋试验平台主要组成构件如图 4-8 所示。其中，月尘环境效应模拟器为卧式真空容器，真空系统可使容器内部真空度达到  $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ，容器内安装有导轨、吊点以及直径为 2000mm 的热沉部件；车轮轮轴系统包括电机、减速器、密封组件、轴承、轴套以及壳体，轮轴整体悬挂在旋转试验台的悬臂系统上，悬臂系统上安装有载荷系统和电机驱动系统；土槽尺寸为 600mm x 500mm x 300mm，土槽内装满模拟月尘颗粒。

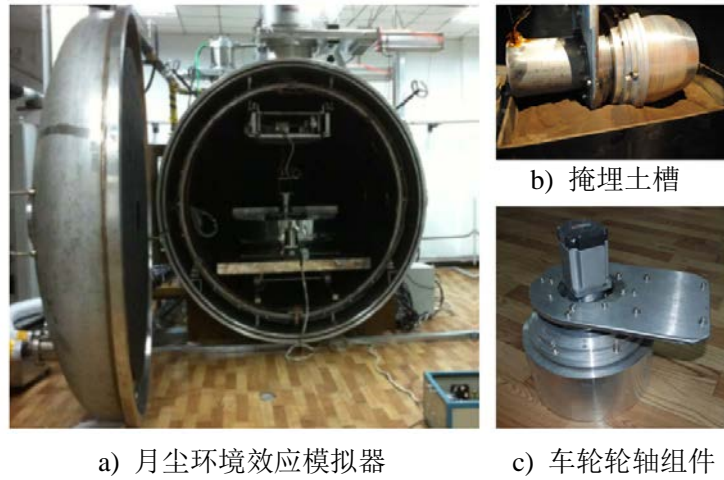


图 4-8 轮轴掩埋试验平台主要组成构件

图 4-9 所示为试验所采用的模拟月尘颗粒扫描电镜图，其颗粒相对密度为  $2.2\text{g}/\text{cm}^3$  左右，颗粒形态分布接近真实月尘。

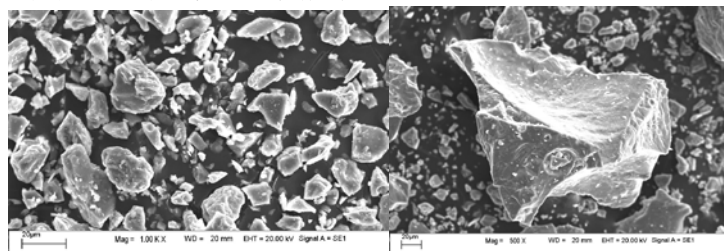


图 4-9 模拟月尘颗粒扫描电镜图像

试验过程数据采集通过扭矩测试采集系统完成，它由扭矩传感器、数据采集及处理系统组成。为了保证采集数据的准确性，通过示波器采集信号并与工控机采集数据进行比对。扭矩测试采集系统的采样频率为每秒 2048 个数据点，如图 4-10 所示为原始采集数据，从图中可以看出，在车轮轮轴无月尘颗粒进入且零负载的情况下，轮轴旋转过程中扭矩会产生周期性波动，这种波动由电机轴与轮轴轴线不重合等系统误差产生。

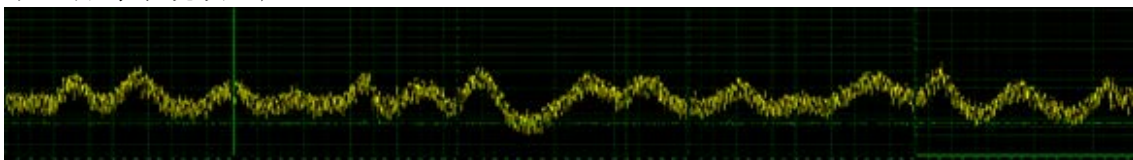


图 4-10 扭矩采集的空载数据样本

月尘颗粒对运动副运动特性影响试验在月尘环境效应模拟器内进行，通过轮悬挂系统悬挂并驱动车轮轮轴转动。试验过程中轮轴系统将部分埋入土槽容器内，以模拟轮轴陷入月壤和月尘颗粒中的工况，具体的试验条件参数值如表 4-4 所示。

表 4-4 轮轴掩埋试验条件

参数名称	参数值	单位
真空度 $P$	$5 \times 10^{-3}$	Pa
环境温度 $T$	0 ~ 40	°C
轮轴载荷 $m$	4	kg
模拟月尘厚度 $d$	>100	mm

试验在车轮与地面接触点线速度为 120m/min 的条件下进行，试验过程中通过扭矩传感器测量轮轴输出扭矩，根据扭矩的变化可判定轮轴转动过程中是否发生卡死现象。

### 4.3.2 月尘颗粒对运动副影响试验结果分析

车轮与地面接触点线速度为 120m/min 下的轮轴掩埋试验共进行 68 分钟，试验所得的转矩随时间变化曲线如图 4-11 所示。从图中可以看出，初始状态下转矩值约为 0.8 N·m，经过一段时间的磨合后，转矩值稳定在 0.5 N·m 左右。大约 60 分钟后，转矩急剧增大，为防止扭矩传感器过载损坏，人为停止车轮轮轴转动。

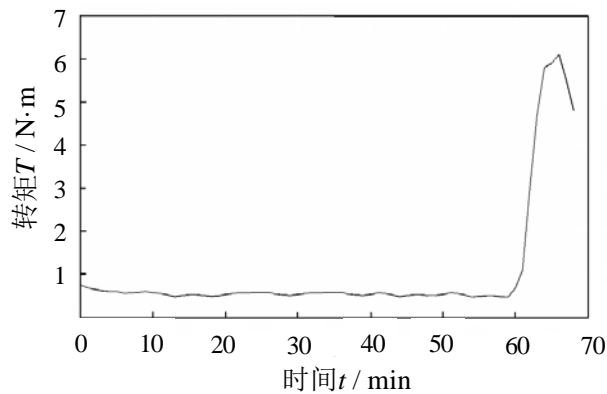


图 4-11 线速度 120m/min 条件下轮轴转矩变化曲线

拆卸轮轴系统进行观察，试验所用车轮轮轴和密封圈磨损特征如图 4-12 所示，可以看出，轮轴轴套和密封圈内均有大量月尘颗粒，轴承部位虽然也有少量月尘颗粒，但不足以使轴承停止转动。



a) 车轮轮轴 b) 轮轴套上剥离的聚四氟乙烯碎片 c) 密封圈内月尘颗粒

图 4-12 线速度 120m/min 下工作 68min 轮轴系统磨损特征

因此,在线速度 120m/min 条件下,车轮轮轴在转动一段时间后会 出现转矩急剧增大的情况,说明此时已经发生卡死,从拆卸后所看到的轮轴系统进入月尘颗粒情况可以推断出,产生轮轴卡死主要是由密封圈与轴套部位进入大量月尘颗粒并逐渐堆积所致。从试验结果中可以看出,试验开始阶段,只有较少的月尘颗粒能够进入车轮轮轴系统内,月尘颗粒不会对运动副的运动特性产生较大影响;随着车轮的不断转动,月尘颗粒逐渐进入车轮轮轴系统内并在轮轴间隙内聚集堆积,最终出现车轮轮轴卡死现象,整个过程中转矩随时间变化规律与仿真结果基本保持一致,因此可以验证月尘颗粒对运动副运动特性影响离散元仿真的正确性。

#### 4.4 不同因素对运动副影响的离散元仿真

月尘颗粒进入运动副轴孔间隙后逐渐聚积,会造成轮轴磨损、转轴转矩瞬时增大,甚至产生轮轴卡死现象。但月尘颗粒对运动副的作用不仅取决于颗粒属性和接触力学模型,也会受到运动副系统误差、装配误差和运动参数等因素的影响。因此,本节将针对转轴回转过程中偏心距、转速以及配合表面性质等因素对转矩的影响这一问题进行离散元仿真。

##### 4.4.1 偏心距对转矩影响离散元仿真

考虑到运动副存在加工误差和装配误差,且在使用一段时间后会 出现磨损,使得相互配合的轴孔中心产生偏心距,故针对偏心距对于转轴转矩的影响这一问题进行仿真。考虑到偏心距过小时两侧轴孔间隙内颗粒受力均匀,达到轮轴卡死所需时间较长,因此,为了提高仿真效率,在仿真中选用偏心距从 0.02mm 依次增大到 0.06mm 的 5 组离散元仿真模型进行仿真,得出不同偏心距下转矩随时间的变化如图 4-13 所示。

从图 4-13 中可以看出,轴刚开始转动的一段时间内,转轴转矩较小,轮轴转动状态正常,且偏心距越小,轮轴正常转动所能维持时间越长;随着转轴的不断转动,转矩开始呈现增大趋势,且偏心距越大,转矩变化速率越快,所能达到的转矩峰值也越大。

转矩变化呈现以上趋势的原因是,当轴孔同心且两侧颗粒数量基本保持一致时,沿圆周分布的颗粒对中心转轴的作用基本保持平衡,因此,转轴转动初期转矩稳定在较小范围内;在转轴继续转动的过程中,部分颗粒随转轴一同运动,并在偏心距的共同作用下导致圆周各个区域内颗粒数量分布不均、受力不同,局部颗粒由于聚集出现卡死现象,从而导致转矩急速增大,偏心距越大,颗粒分布不均的情况越早出现且卡死现象越严重,因此出现不同偏心距下转矩变化率不同的现象。

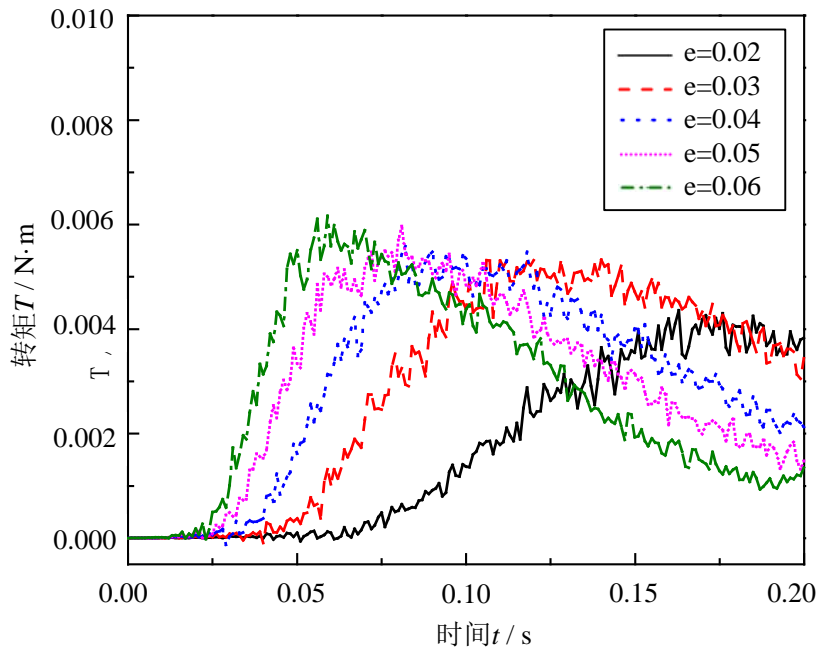


图 4-13 不同偏心距下转矩随时间的变化曲线

分别提取不同偏心距下转矩峰值和转矩变化率大小，绘制曲线如图 4-14 所示。利用不同偏心距下转矩变化曲线可以实现对不同工况下转矩峰值和转矩变化率的预测，可以看出，转矩峰值和转矩变化率整体上都呈现随偏心距增大而增大的趋势，但转矩变化率呈现线性增大趋势，而转矩峰值变化则表现为非线性，偏心距越大，转矩峰值变化越缓慢。

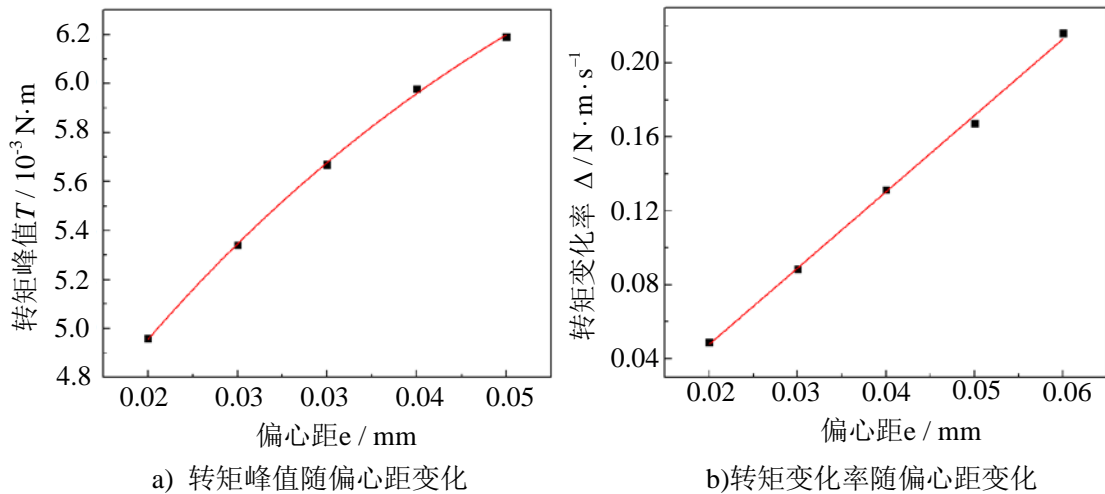


图 4-14 不同偏心距下转矩峰值及变化率变化曲线

因此，偏心距对于空间机构的运动特性影响较大，在月面探测器的设计和加工过程中，应该保证足够的加工精度和装配精度，并尽量选用耐磨的材料，以避免回转副的轴孔偏心距因磨损而进一步扩大。

#### 4.4.2 转速对转矩影响离散元仿真

从轮轴掩埋试验可以看出，转轴转速会影响月尘颗粒进入轮轴间隙的数量以及月尘颗粒在轮轴间隙内的流动情况，因此，参照试验条件和轮轴布置方式进行转速对转矩影响的离散元仿真。

实际工况下，月尘颗粒大多受到月面探测器车轮地面活动的影响被扬起，进而进入机构轴孔间隙，在回转副运动过程中随之在轴孔间隙内移动并逐渐聚积。因此，为了在仿真中最大程度地模拟实际工况，并与轮轴掩埋试验条件保持一致，创建如图 4-15 所示的颗粒工厂几何体，将颗粒生成区域限制在轮轴底端的弧形区域内。颗粒生成方式选用动态生成，设置生成速度为每秒 10000 个颗粒，以保证颗粒工厂几何体内颗粒随转轴移动到颗粒生成区域外后颗粒工厂几何体内颗粒可以随时得到补充。

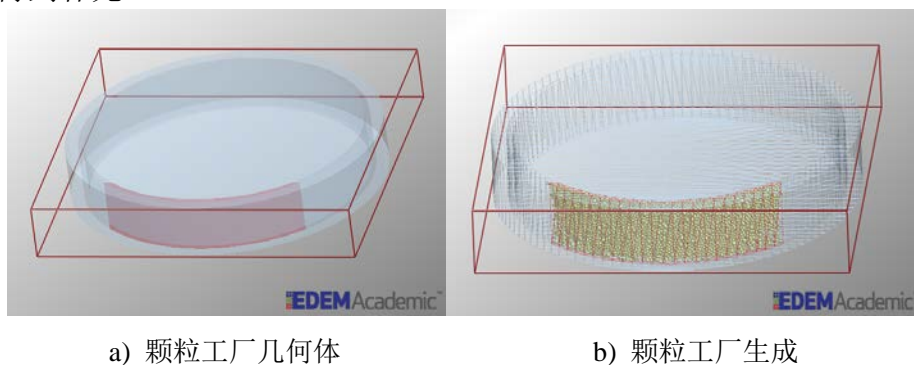


图 4-15 转速对转矩影响离散元仿真颗粒工厂

将转轴转速分别设置为 5r/min、10r/min、15r/min、20r/min、25r/min 进行 5 组仿真，结合仿真过程中颗粒运动状态和转矩变化情况对仿真结果进行分析。如图 4-16 所示为月尘颗粒对运动副运动特性影响的仿真动画截图，仿真开始时刻颗粒集中在颗粒工厂几何体限定区域内，转轴转动时带动颗粒随之同向移动，启动瞬间外侧颗粒速度较大，在转轴转动过程中，颗粒在轴孔间隙内不断移动，最终充满轴孔间隙。

对仿真结果进行分析，得出不同转速下转矩随时间的变化曲线如图 4-17 所示。从图 4-17 中可以看出，转轴开始转动后的一段时间内转矩稳定在较低水平，且转速越低，稳定时间越长；转轴继续转动，转矩随之逐渐增大，且转速越快，转矩增长速率越快，最终达到的转矩峰值也越高。

对转矩变化原因进行分析可以看出，低速转动时，月尘颗粒基本能够保证在轴孔间隙圆周各方向上均匀分布，从而使得受力平衡，转轴转矩较小；当转速提高时，月尘颗粒随转轴移动，分散到轴孔间隙各个位置上，不同的积聚状态造成圆周各处颗粒受力不均衡，从而产生转矩增大的现象，转速越大，月尘颗粒受到

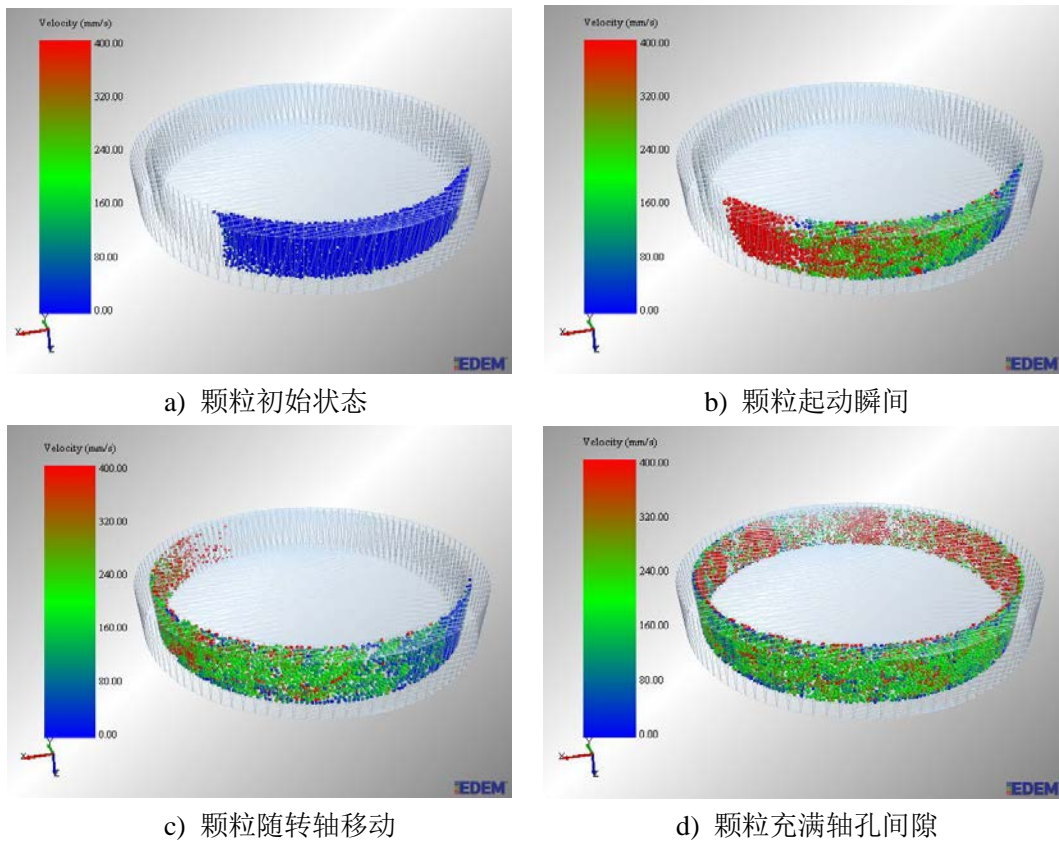


图 4-16 月尘颗粒对运动副运动特性影响仿真动画截图

的扰动越大，发生碰撞的颗粒越多，受力越不均衡，转矩的增长速率越快，所能达到的转矩峰值也就越高。

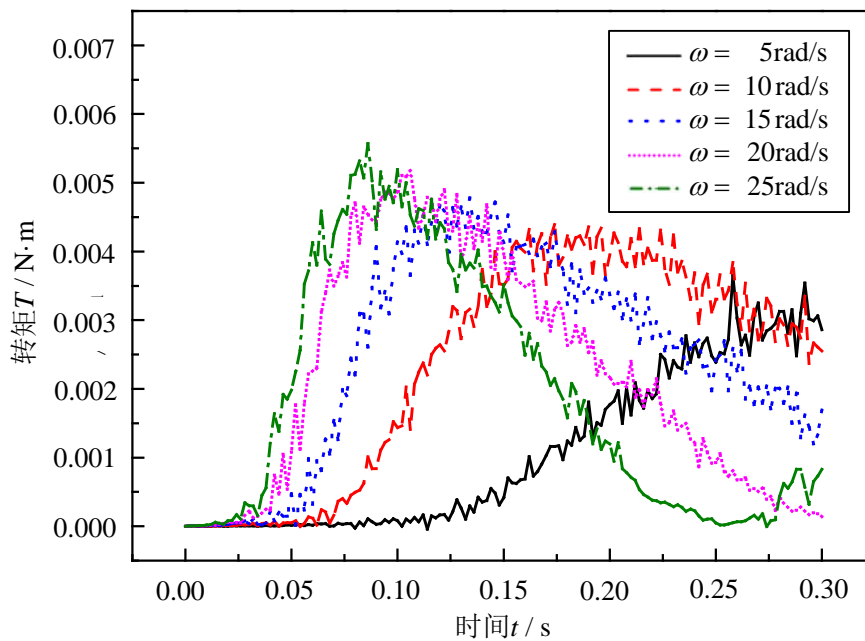


图 4-17 不同转速下转矩随时间的变化曲线

分别提取不同转速下转矩峰值和转矩变化率大小，绘制曲线如图 4-18 所示。利用不同转速下转矩变化曲线可以实现对不同工况下转矩峰值和转矩变化率的预测，可以看出，转矩峰值和转矩变化率整体上都呈现随速度增大而增大的趋势，但转矩变化率呈现线性增大趋势，而转矩峰值变化则呈现非线性，转速越大，转矩峰值变化越缓慢。

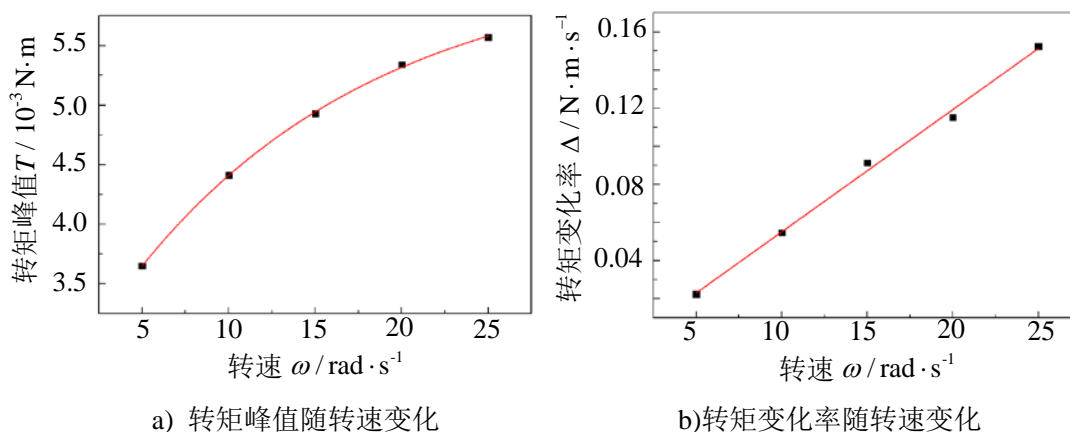


图 4-18 不同转速下转矩峰值及变化率变化曲线

综合以上分析可以看出，月尘颗粒对回转副运动特性的影响与其转速大小有关，在月面探测器的运动参数设计中，采取适当降低运动速度的方式，一方面可以减少进入机构间隙内的月尘颗粒数量，另一方面也可以降低已经进入机构间隙的月尘颗粒所受二次扰动，从而避免转矩急速增大和卡死现象的发生。

#### 4.4.3 配合表面性质对转矩影响离散元仿真

运动副运动过程中，相互配合表面的性质会对运动特性产生较大影响，当配合表面较为粗糙时，摩擦磨损严重，颗粒更容易在运动副间隙内积聚，最终造成转矩急速增大，甚至出现卡死现象。

基于以上分析，采用静摩擦系数和滚动摩擦系数作为配合表面性质的描述参数，对不同配合表面性质下转矩的变化情况进行离散元仿真分析。通常情况下，颗粒静摩擦系数略大于滚动摩擦系数，但对于月尘颗粒而言，可能由于形状不规则导致容易滑动但不易发生滚动的情况，因此，仿真中设置静摩擦系数和滚动摩擦系数分别从 0.1 依次变化到 0.9，进行 25 组仿真，得到不同静摩擦系数和不同滚动摩擦系数下转矩随时间变化曲线分别如图 4-19 和图 4-20 所示。

从图 4-19 中可以看出，当静摩擦系数较小时，无论滚动摩擦系数多大，转轴转矩均保持在接近于零的范围内；随着静摩擦系数的不断增大，转轴转矩也随之增大，且静摩擦系数相同时，滚动摩擦系数越小，转矩越大；同时，还可以看出，滚动摩擦系数越小，转矩波动现象越明显。

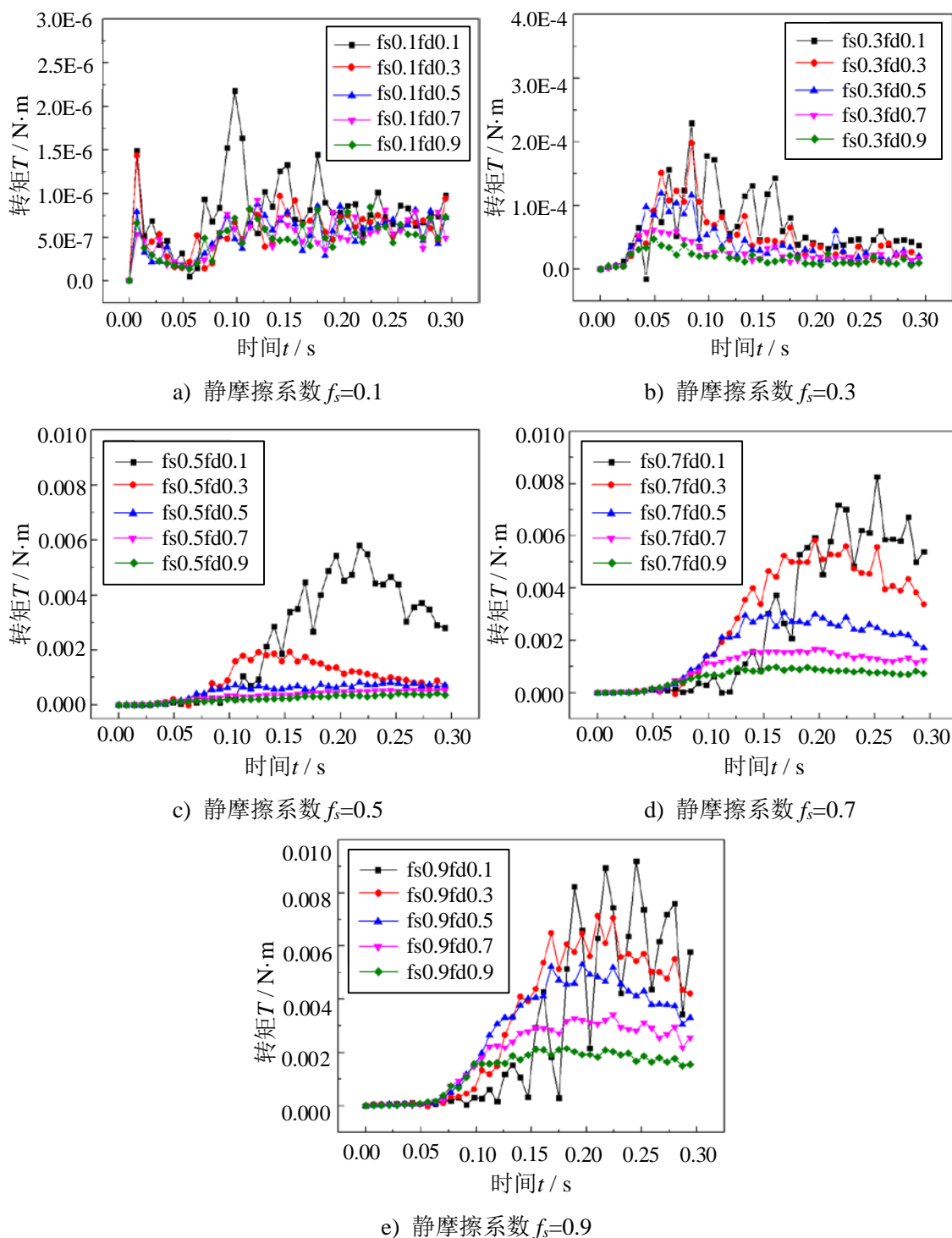


图 4-19 不同静摩擦系数下转矩随时间变化曲线

当静摩擦系数较小时，月尘颗粒更容易发生滑动，因此不易在轴孔间隙内某一位置积聚，不会产生卡死现象，转轴转矩基本恒为零；当静摩擦系数逐渐增大时，月尘颗粒不易发生滑动，部分颗粒会在轴孔间隙内聚积产生卡死，转轴转矩

因此也随之增大；而在相同的静摩擦系数下，滚动摩擦系数越小，颗粒越容易发生滚动，从而造成颗粒在轴孔间隙内随机流动，在此过程中发生挤压和碰撞，导致转轴各处受力不均，容易造成卡死，因而转矩会增大，而颗粒碰撞导致状态变化剧烈，由此造成滚动摩擦系数较小时转轴转矩出现明显的波动。

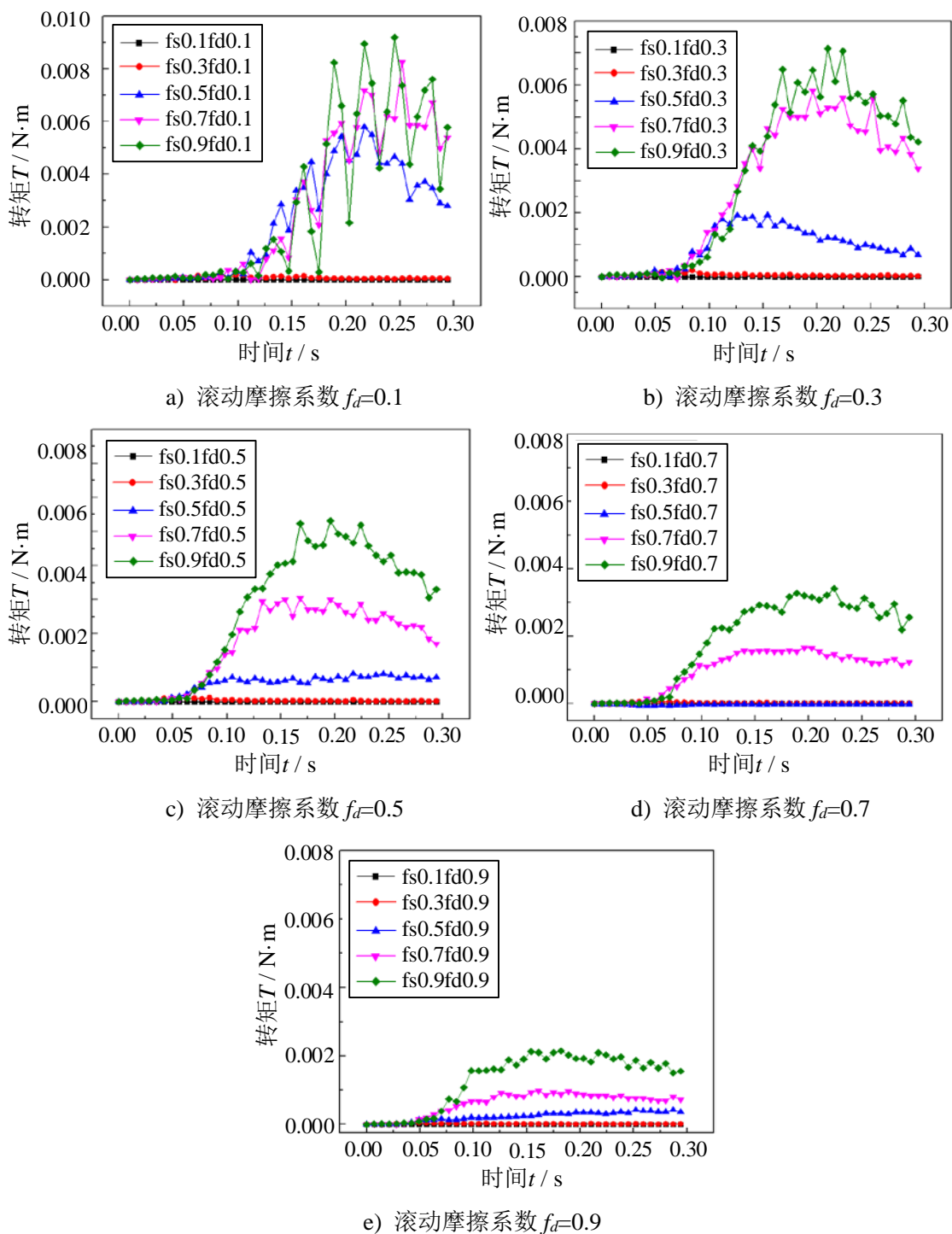


图 4-20 不同滚动摩擦系数下转矩随时间变化曲线

从图 4-20 中可以看出, 滚动摩擦系数较大时, 转轴转矩较小; 随着滚动摩擦系数的不断减小, 转轴转矩也逐渐增大; 当静摩擦系数较大而滚动摩擦系数较小时, 转矩波动现象更为明显。滚动摩擦系数较大时, 颗粒不易发生滚动, 因此不会产生颗粒状态的剧烈变化, 转矩变化较小; 当滚动摩擦系数逐渐减小时, 颗粒在轻微扰动作用下就会发生滚动, 并在轴孔间隙内不断挤压碰撞, 造成转轴转矩增大, 且滚动摩擦系数越小, 状态变化越剧烈, 转矩波动也越明显。

为了分析静摩擦系数和滚动摩擦系数对转轴转矩变化的综合影响, 分别提取各种仿真条件下转矩峰值, 并绘制转矩峰值随静摩擦系数和滚动摩擦系数变化的三维图如图 4-21 所示。从图中可以看出, 静摩擦系数越大, 滚动摩擦系数越小, 转矩峰值越大; 当静摩擦系数较小时, 较大的滚动摩擦系数也不会造成转矩的大幅提高, 这说明静摩擦系数对转轴转矩的影响比滚动摩擦系数更大。

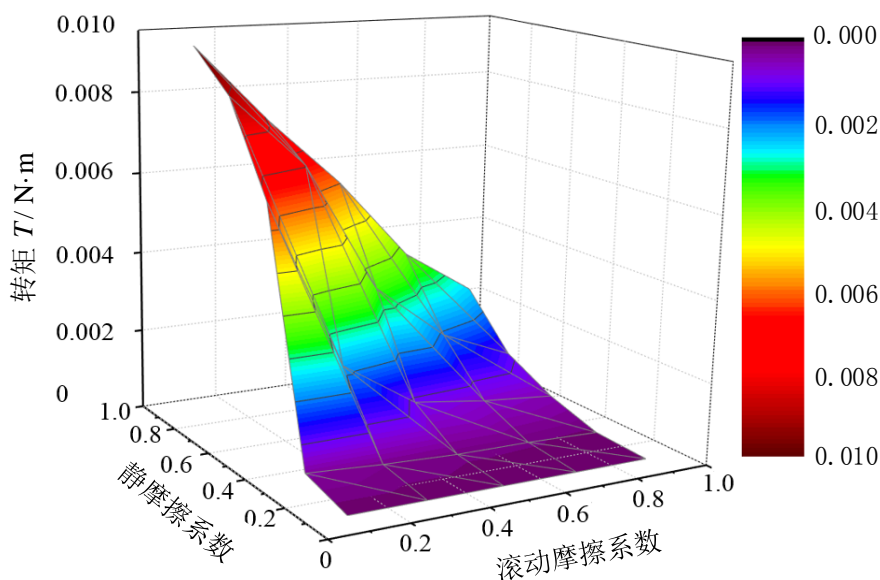


图 4-21 转矩峰值随静摩擦系数和滚动摩擦系数变化的三维图

综合以上分析可以看出, 月尘颗粒对运动副运动特性的影响受偏心距、转速和配合表面性质等多种因素的影响。为了在月面探测中尽量降低月尘颗粒对机构运动副的影响, 应在月面探测器的结构设计中尽量保证较好的设计精度和装配精度, 尽量降低材料的静摩擦系数, 同时, 保证月面行走速度在合理范围内, 以减少由于月尘颗粒进入机构间隙所造成的卡死现象。

## 4.5 本章小结

本章利用离散元软件 EDEM 对前述理论模型和等效算法进行综合验证, 首先建立离散元仿真模型进行月尘颗粒对运动副运动特性影响仿真分析, 并通过轮轴掩埋试验对仿真结果加以验证。通过仿真可以看出, 月尘颗粒进入轮轴间隙初期

不会对其运动产生影响，但随着转轴的不断转动，月尘颗粒在轮轴间隙内不断移动，最终产生堆积和局部卡死等现象，与试验结果相符，从而验证了不规则颗粒接触力学模型和等效算法的正确性。此外，针对偏心距、转矩以及配合表面性质等因素对月尘颗粒进入运动副后影响其运动特性情况进行仿真预测，从而为未来月面探测机构的设计优化提供理论支撑。

## 结 论

本文以月尘颗粒为研究对象，开展了基于离散元理论的月尘颗粒接触力学特性研究。结合月尘颗粒性质提出了月尘颗粒形状描述数学模型和月尘颗粒形状分布概率模型。结合傅里叶形状模型建立了基于形状描述的月尘颗粒接触力学模型，并提出了不规则颗粒的等效算法。利用离散元仿真软件进行了月尘进入机构间隙后对其运动特性影响的仿真分析，并通过轮轴掩埋试验对仿真结果正确性进行了验证。同时，分析了几何参数和运动参数对运动副运动特性的影响，可为未来月面探测器的设计提供参考依据。

本论文所取得的主要创新性研究成果如下：

(1) 建立了基于傅里叶形状描述法的月尘颗粒形状模型，利用该模型实现了月尘颗粒形状的数学描述；提出了模拟月尘颗粒图像分析算法，通过对颗粒图像的处理和统计获得了月尘颗粒的形状分布规律。

(2) 建立了基于不规则形状月尘颗粒的接触力学特性模型，利用该模型求解了月尘颗粒与运动副间的法向接触力，同时进行了模拟月尘颗粒法向力学特性测试试验，通过试验验证了该模型的正确性。

(3) 提出了基于分段函数拟合的不规则月尘颗粒等效算法，通过离散元软件二次开发平台编写了力学模型插件并进行了仿真，利用仿真结果对等效算法进行了验证，利用该算法可简化仿真计算，提高了颗粒接触力计算的离散元仿真效率。

(4) 建立了基于离散元理论的月尘颗粒仿真模型，利用该模型进行了月尘颗粒对运动副运动特性影响的仿真分析，将仿真结果与轮轴掩埋试验结果进行对照，得到了运动副因月尘因素发生卡死时轮轴转矩的变化规律，进行了偏心距、转速、配合表面性质等因素对运动副运动特性影响的离散元仿真分析，为未来的月面探测机构设计提供了理论依据。

受时间所限，本文仍存在有待完善的部分，例如，本文所用仿真参数通过查阅文献和实验室前期研究所得，可能与实际情况存在一定的偏差。在后续的相关研究中，可以结合月面试验结果进行相关参数匹配，使仿真条件更接近真实情况。

## 参考文献

- [1] 杭科. 中国开展月球探测工程的重大意义[J]. 中国航天, 2008 (11): 63-64.
- [2] 刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 等. 中国月球探测进展 (2001—2010 年)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013 (5): 544-551.
- [3] 郑永春, 欧阳自远. 嫦娥 1 号绕月探测——中国航天迈向深空[J]. 科技导报, 2007, 25(5): 47-52.
- [4] Center M S. Apollo 11: Mission Report[J]. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1971:132-135.
- [5] Park J, Liu Y, Kihm K D, et al. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 21(4): 266-271.
- [6] Gaier J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions[J]. NASA/TM, 2005:5.
- [7] 吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014(4): 001.
- [8] Bell T E. Lunar Dust Buster. NASA. Retrieved January 19, 2008.
- [9] Park J, Liu Y, Kihm K D, et al. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 21(4): 266-271.
- [10] 马祖荡, 田小方, 张玉友. 世界各国探月计划揭秘[J]. 太空探索, 2006 (3): 34-37.
- [11] Walton O R. Adhesion of lunar dust[J]. National Aeronautics and Space Administration, NASA/CR-214685, 2007.
- [12] 童靖宇, 李蔓, 白羽, 等. 月尘环境效应及地面模拟技术[J]. 中国空间科学技术, 2013.
- [13] Abbas M M, Tankosic D, Craven P D, et al. Lunar dust charging by photoelectric emissions[J]. Planetary and Space Science, 2007, 55(7):953-965.
- [14] Calle C I, et al. Electro-dynamic dust shield for surface exploration activities on the moon and Mars[C]. Proceedings of the International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 2006.
- [15] Liu Y, Schnare D, Park J S, et al. Shape analyses of lunar dust particles for astronaut toxicological studies[C]. Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. 2007(38): 1383.
- [16] 张森森, 王世杰, 李雄耀, 等. 月尘的性质及危害评述[J]. 地球科学: 中国地质

大学学报, 2013(2): 339-350.

- [17]张一翔, 沈志刚. 月球尘埃特性及其对登月物的影响[C]. 颗粒学前沿问题研讨会——暨第九届全国颗粒制备与处理研讨会论文集, 2009.
- [18]李雄耀, 刘建忠, 王世杰, 等. 月尘的基本特征与CLDS-1模拟月尘研制[C]. 中国空间科学学会空间生命起源与进化专业委员会与月球科学与比较行星学专业委员会 2013 年度学术研讨会论文集, 2013.
- [19]孙旗霞, 杨宁宁, 蔡小兵, 等. 基于交变电场的月表除尘方法研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(6): 785-803.
- [20]贾巍, 黄三玻, 倪家伟, 等. 月尘累积对太阳能电池阵电帘除尘效率影响的实验研究[J]. 航天器环境工程 ISTIC, 2014 (2).
- [21]曾令斌, 邱宝贵, 肖杰, 等. 月面扬尘特性与月尘防护技术研究[J]. 上海航天, 2015, 32(1): 58-62.
- [22]王海龙. 月球车轮扬尘仿真分析与实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [23]白羽, 郝宁, 王志浩, 等. 模拟月尘对巡视器车轮轮轴材料的磨损试验研究[J]. 航天器环境工程, 2013, 5: 011.
- [24]Kruggel-Emden H, Wirtz S, Scherer V. Applicable contact force models for the discrete element method: the single particle perspective[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(2): 024001.
- [25]Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]. Proc. Symp. Rock Fracture (ISRM), Nancy. 2013, 1.
- [26]Cundall P A. Rational Design of Tunnel Supports: A Computer Model for Rock Mass Behavior Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data[C]. Minnesota Univ Minneapolis Dept Of Civil and Mining Engineering, 1974.
- [27]Cundall P, Marti J, Beresford P, et al. Computer Modeling of Jointed Rock Masses[C]. Dames and Moore Los Angeles CA, 1978.
- [28]Lemos J V, Hart R D, Cundall P A. A generalized distinct element program for modelling jointed rock mass[M]. Centek Publishers, Lulea, 1985.
- [29]3DEC—3-D Distinct Element Code, ITASCA Consulting Group, 1987.
- [30]俞万禧. 离散单元法的基本原理及其在岩体工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1986, 5(2): 165-172.
- [31]王泳嘉. 离散元法及其在岩石力学中的应用[J]. 金属矿山, 1986(8): 13-17.
- [32]王泳嘉, 邢纪波. 离散元法及其在矿山压力研究中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1986(4): 1-12.
- [33]徐寅, 陈胜宏. 基于离散单元法的滑坡堆积及其涌浪计算[J]. 岩土力学, 2012,

33(9):2850-2856.

- [34]于崇, 李国文, 夏祥, 等. 基于离散单元法的节理岩体支护分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(2):3245-3257.
- [35]孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 科学出版社, 2009:15.
- [36]魏庆华, 汪焰恩, 杨明明, 等. 基于离散单元法多孔陶瓷微球骨支架的微观结构分析[J]. 工具技术, 2013, 47(12): 8-12.
- [37]石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48.
- [38]CUNDALL P A. PFC user manual[J]. Itasca Consulting Group Inc., Mineapolis, 2004.
- [39]Solutions DEM. EDEM 2.6 User Guide[J]. Edinburgh, Scotland, UK, 2014.
- [40]张辉, 张永震. 颗粒力学仿真软件 EDEM 简要介绍[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2008 (12): 48-49.
- [41]Heywood H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057, 72[C]. Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1971(2):1989.
- [42] Rickman D, Street K W. Some Expected Mechanical Characteristics of Lunar Dust: A Geological View[J]. NASA NTRS Document ID: 20080006059, 2008.
- [43] Park, Liu Y, Kihm K.D., Taylor L. A. Micro-morphology and Toxicological Effects of Lunar Dust[J]. Lunar and Planetary Science, 2006:2193.
- [44]Taylor,L.A.,Liu,Y,Zhang,A.Ch.,2009. Shape and Size Relationship of Several Lunar Dusts:Preliminary Results[C]. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference.Lunar and Planetary Institute, Houston, 2006.
- [45]李后强, 黄立基. 分形漫谈[J]. 科学, 1990, 2: 92-99.
- [46]穆在勤, 龙期威. 由面积-周长关系测量的分形维数与材料韧性的关系[J]. 材料科学进展, 1989, 3(2): 110-114.
- [47]穆在勤. 测量断口分维的周长—最大直径方法[J]. 材料科学进展, 1992, 6(3): 227-231.
- [48]崔燕. 微米级固体颗粒的分形及其与界面间粘附力的关系研究[D]. 中南大学, 2011:47.
- [49]Avnir D, Farin D, Pfeifer P. Molecular fractal surfaces[J]. Nature, 1984, 308(5956): 261-263.
- [50]张佑林, 毛晓红. 粉体颗粒的形状与分维[J]. 武汉工业大学学报, 1996, 18(4): 53-56.
- [51]王福杰. 运动水果的形状描述方法与在线检测技术[D]. 浙江大学, 2013.
- [52]孙知信, 王汝传, 王绍棣. 基于形状的颗粒识别系统的研究和实现[J]. 南京邮

- 电学院学报: 自然科学版, 2004, 24(4): 35-38.
- [53]鲁晋, 沙莎. 一种基于傅里叶变换的形状描述方法[J]. 科技广场, 2010 (3): 80-82.
- [54]张嘉桐. 基于傅里叶描述的形状分析算法研究[D]. 吉林大学, 2013.
- [55]Laghari M S, Soomro T R, Khuwaja G A. The use of Fourier Descriptors to recognize particle profile[C]//Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011 4th International Conference on. IEEE, 2011: 1-6.
- [56]Bowman E T, Soga K, Drummond T W. Particle shape characterisation using Fourier analysis[M]. University of Cambridge, Department of Engineering, 2000.
- [57]陈奇. 基于分形理论的汽车变速箱齿轮接触强度研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

## 攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

### (一) 毕业设计发表学术论文

- [1] Wanjing P, Xuyan H, Dewei T, et al. The study of normal force model for the flow of lunar dust particles[C]. Fluid Power and Mechatronics (FPM), 2015 International Conference on. IEEE, 2015: 104-108.(EI 收录号: 20161302149055)
- [2] W Pan, X Hou, T Ding, D Tang. Tangential Force Model Study of Lunar Dust Particles Based on Hertz-Mindlin Theory and Sensor Technology[J]. Sensor Letters, 2015, 13(2): 176-179. (EI 收录号: 20151000607155)
- [3] Dewei Tang, Wanjing Pan, Xuyan Hou, Zongquan Deng. Research on the relationship between contact-mechanical properties of lunar dust particles and shape parameters based on discrete element theory[J]. Particuology. (SCI 已录用, IF 2.280)

### (二) 参与研究发表学术论文

- [1] J CUI, X HOU, Z DENG, W PAN, Q QUAN. Prediction of the temperature of a drill in drilling lunar rock simulant in a vacuum[J]. Thermal Science, 2015: 104-108. (SCI 收录, IF 1.222, DOI: 10.2298/TSCI141023051C)
- [2] Zhang K, Hou X, Pan W, et al. The study of the drilling core features of a multi-pipe deep lunar soil sampling driller for manned lunar exploration based on the discrete element technology[C].2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2015: 2341-2346. (EI 收录号: 20161802327530)
- [3] J Cui, X Hou, S Jiang, W Pan, T Ding. Research on temperature rise of cutting edge in drilling lunar soil simulant with sensors[J]. Sensor Letters 13, no. 2 , 2015: 156-160. (EI 收录号: 20151000607151)
- [4] X Hou, J Jiang, T Ding, W Pan, L Wang. Experimental study of particle removal with PLZT induced voltages[C]. Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), 2014 Symposium on. IEEE, 2014: 80-85. (EI 收录号: 20150500464898)
- [5] 崔金生, 侯绪研, 邓宗全, 潘万竞, 姜生元. 真空颗粒系统有效导热系数测量试验台研制及试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(2): 457-464. (EI 收录, 网络优先出版, DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201602019)
- [6] D Tianxiang, H Xuyan, P Wanjing. Research on the shape model of particles in lunar regolith fluid based on the fractal theory[C]. Fluid Power and Mechatronics

(FPM), 2015 International Conference on. IEEE, 2015: 109-115. (EI 收录号: 20161302149080)

(三) 参与的科研项目及获奖情况

- [1] 基于离散元理论的月尘颗粒与空间运动副相互作用机理研究,国家自然科学基金项目.课题编号: 51575123.
- [2] 小行星锚定附着性能仿真研究. 中国航天集团五院 508 所合作项目.

## 哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

### 学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《基于离散元理论的月尘颗粒接触力学特性研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。



作者签名：  日期：2016年07月07日

### 学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。  
本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：  日期：2016年07月07日  
导师签名：  日期：2016年07月07日

## 致 谢

回顾即将结束的研究生生活，成功与挫折并存，对于那些一路上指导我、帮助我的人，我心中充满了感激。首先要感谢唐德威教授，唐老师对待科研严谨求实，对待学生谦逊朴实，对待工作一丝不苟，为我树立了学习的楷模。在课题研究阶段，唐老师提出了很多宝贵的指导建议和意见，在学习与生活上也给予了我极大的关怀和鼓励。在此论文完成之际，谨向唐老师致以最崇高的敬意和最真挚的感谢！

感谢侯绪研老师，从课题的选题、方案论证、仿真实验到学术论文撰写，侯老师都给予了悉心指导和无私帮助。侯老师以他敏锐的洞察力、丰富的科研经验、踏实认真的工作作风给予我极大的支持和帮助，在侯老师的影响下，我不仅学会了如何解决科研问题，同时掌握了分析问题、解决问题的基本方式，这些让我在将来的工作和生活中都受益匪浅！

特别感谢邓宗全、姜生元、丁亮老师在论文开展过程中给予的帮助和指导；感谢崔金生、赵德明师兄在理论分析及仿真建模方面给予的支持和帮助；感谢丁天祥、张凯亮、李传扬、孔繁睿、陈泽龙、刘杰等实验室同窗在研究生学习期间给予的无私帮助和关心；感谢寝室室友历敏、郝婷、杨梓同学在生活中对我无微不至的照顾与关怀，研究生生活因为有你们而更加多姿多彩！

感谢父母多年养育之恩，在我受挫时给我鼓励和支持，在我迷茫时给我方向和目标，你们是我能够在科研道路上不断前行的保障！

感谢国家自然科学基金对本项目提供支持！

最后，向所有关心我、爱护我和帮助我的老师、同学和朋友们致以诚挚的谢意！

## 附 录

```

function particle(p,q)           %p 为图像存储地址， q 为数据输出地址
A=imread(p);                   %读取颗粒存储路径图像信息
A=rgb2gray(A);                 %图像二值化处理
[y1,x1]=find(A==1);           %轮廓点提取， x1、 y1 为列向量
n=length(x1);                  %采集点数量记录
yc=sum(y1)/n;                  %形心坐标求取
xc=sum(x1)/n;
delta_y=0.2;                   %设定 x 和 y 方向绝对允许误差
delta_x=10;
m=1;                            %定义所有非重复两点相切情况标记量
for alpha=0*pi/180:pi/360:2*pi
    T=[cos(alpha) -sin(alpha); sin(alpha) cos(alpha)]*[1 0 -xc; 0 1 -yc];
    %图形变换矩阵

E(1,1:n)=1;
A=T*[x1';y1'];E];
x=A(1,:);                      %变换后的坐标
y=A(2,:);
X=zeros(1,2);Y=zeros(1,2);     %定义两个 1x2 矩阵用于存储最小值点
X(1)=x(1);Y(1)=y(1);          %假定坐标阵列中的第一点为最小值点
j=1;                            %j 代表当前最小点个数
N=[1 0];                        %定义该组最小值点在坐标阵列中序号
for i=2:n                        %当前旋转角度 alpha 下切点搜索
    if abs(y(i)-Y(1))<delta_y
        if abs(x(i)-X(1))<delta_x
            X(1)=x(i);
            N(1)=i;
        else
            X(2)=x(i);
            Y(2)=y(i);
            N(2)=i;
            j=2;
        end
    end
end

```

```

        end
    else
        if y(i)<Y(1)
            X=zeros(1,2);           %存储向量清零
            Y=zeros(1,2);
            X(1)=x(i);             %将当前最小值点重新放入存储向量
            Y(1)=y(i);
            j=1;
            N(1)=i;
        end
    end
end
end
if j==2 && (m==1||abs(y(N(1))-Y1(m-1))>2)
    X1(m)=x(N(1));
    X2(m)=x(N(2));
    Y1(m)=y(N(1));
    Y2(m)=y(N(2));
    alpha_1(m)=alpha;
for l=1:2
    k=1;
    if N(l)<=20                   %限定数据点提取范围
        M=1;
    else
        M=N(l)-20;
    end
    for i=M:N(l)+20
        if abs(y1(i)-y1(N(l)))<5
            x2(l,k)=x1(i);
            y2(l,k)=y1(i);
            k=k+1;
        end
    end
end
E2(1,1:k-1)=1;                 %轮廓点坐标转化到新坐标系内
A2=T*[x2(1,:);y2(1,:);E2];

```

```

        x2(1,:)=A2(1,:);
        y2(1,:)=A2(2,:);
        R(1)=curvature(x2(1,:),y2(1,:),x(N(1)));
    end
function R0=curvature( x,y,x0 )
y1=polyfit(x,y,2);           %采用 2 阶多项式进行拟合
syms x f(x) k R
f(x)=poly2sym(y1);          %拟合系数矩阵通过符号函数重新表达
k=abs(diff(f(x),2))/(1+diff(f(x))^2)^1.5;
                               %曲率求解公式

R=1/k;
R0=double(subs(R,x0));      %实数结果最简化
end
进行各接触状态下切点曲率半径比和切点与形心连线夹角：
if R(1)<R(2)
    Ratio(m)=R(1)/R(2);
else
    Ratio(m)=R(2)/R(1);      %将曲率半径之比限定在(0,1)区间内
    d1=sqrt(X(1)^2+Y(1)^2);
    d2=sqrt(X(2)^2+Y(2)^2);
    d12=sqrt((X(1)-X(2))^2+(Y(1)-Y(2))^2);
    beta(m)=acos((d2^2+d1^2-d12^2)/(2*d1*d2));
                               %求取两切点与形心连线夹角，单位 rad

    m=m+1;
end
Title={'转角','夹角','半径比'};
Data=[alpha_1*180/pi,beta',Ratio']; %广义数组定义
[row_T,column]=size(Title);
[row_D,column]=size(Data);
Output=cell(row_T+row_D,column);
Output(1:row_T,:)=Title;
Data2=num2cell(Data);
Output(row_T+1:row_T+row_D,:)=Data2;
xlswrite(q,Output);         %计算结果输出

```

```

a=-100:120;
alpha_1*180/pi
for c=1:m-1;
b=(Y1(c)-Y2(c))/(X1(c)-X2(c))*(a-X1(c))+Y1(c);
                                %切线方程求取
T_1=[cos(alpha_1(c)) -sin(alpha_1(c));
sin(alpha_1(c)) cos(alpha_1(c))]*[1 0 -xc; 0 1 -yc];
A_1=T_1*[x1';y1';E];
a1=A_1(1,:);
b1=A_1(2,:);
subplot(2,ceil((m-1)/2),c)      %图像绘制
plot(a1,b1,'.',a,b,X1(c),Y1(c),'*',X2(c),Y2(c),'p')
grid on
set(gca,'DataAspectRatio', [1 1 1])
end

```