DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260205

基于离散雨滴颗粒流模拟的公路排水计算

赵　毅
(池州市公路管理服务直属分中心,安徽 池州 247000)

摘　要：面向山区公路在复杂地形与排水构造条件下的精细化排水评估需求,建立了基于离散雨滴颗粒流的数值模拟方法。采用FLUENT软件中的离散相模型(DPM)对雨滴入射、碰撞及汇集过程进行计算。构建了多种包含道路与边坡的二维算例,并依据降雨等级设置不同雨滴粒径与路径数量,对单排水口与多排水口横断面开展计算。通过排水口出流量与降雨量的对比验证了计算结果的准确性。基于复杂山地公路场景的算例表明,多排水口存在明显流量分担差异。该方法能够刻画地形与构造对汇水路径及排水能力的影响,为山区公路排水结构优化提供定量依据。

关键词：公路排水;离散相模型;降雨模拟;排水能力评估
中图分类号：U417.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-7716(2026)11-0251-04

Highway Drainage Calculation Based on Discrete Raindrop Particle Flow Simulation

ZHAO Yi
(Chizhou Highway Administration Service Direct Branch, Chizhou 247000, China)

Abstract: Addressing the demand for refined drainage assessment of mountainous highways under complex topography and drainage configurations, a numerical simulation method based on discrete raindrop particle flow is established. The discrete phase model (DPM) implemented in Fluent software is employed to compute raindrop impingement, collision and accumulation processes. Multiple two-dimensional cases incorporating roads and slopes are established. According to the rainfall level, different raindrop particle sizes and the number of paths are set, and the cross-sections of single drainage outlets and multiple drainage outlets are calculated. The accuracy of the computations is validated by comparing outlet discharge with the imposed rainfall input. The calculation cases based on complex mountain highway scenarios show that there are obvious differences in flow sharing among multiple drainage outlets. This method can depict the influence of terrain and structure on the catchment path and drainage capacity, providing a quantitative basis for the optimization of drainage structure in mountainous highways.

Keywords: highway drainage; discrete phase model; rainfall simulation; drainage capacity assessment

0　引　言

排水系统是建筑与道路工程的关键要素[1]。降雨-径流过程既涉及流域尺度的系统能力,也受局部地形与构造细节显著影响。以SWMM(Storm Water Management Model)[2]为代表的水力模型凭借计算效率高、系统尺度覆盖能力强,被广泛用于降雨-径流-管网过程的宏观模拟与评估[3]。相关研究通常基于子汇水区划分,采用等效坡度、糙率参数及经验公式对地表径流形成过程进行表征,进而对排水系统在不同降雨工况下的运行能力、溢流风险与内涝发展趋势开展整体评估[4-5]。除宏观水力模型外,排水工程在具体构造设计层面亦有成熟的规范与指南,用于指导不同场景下排水设施的选型与布置[6]。以公路排水设计为例,《公路排水设计规范》(JTG-T D33—2012)给出了具体的地表径流量评估公式。该公式通过降雨强度、汇水面积及径流系数等参数,对特定重现期条件下的设计径流量进行计算[7]。设计降雨的重现期通常根据公路等级及排水设施类型确定,以保证排水系统在规定安全标准下满足运行要求。李树平[8]系统梳理了城市道路地表漫流的流量、道路边沟流量和雨水口截流能力的简化计算方法。需要指出的是,上述方法主要面向一定范围内的汇水区域整体排水能力分析,计算过程中并未具体考虑地形起伏[9]、横断面构造[10]及排水口布置[11]

收稿日期：2026-03-02
作者简介：赵毅(1998—),男,硕士,助理工程师,从事道路养护技术与管理研究工作。

等因素对水流路径的影响。在山区公路条件下，边坡坡度变化及局部几何差异可能显著改变雨水的汇集方式和排出过程[12-14]，因此有必要在规范计算基础上，对局部降雨排水行为进行进一步分析。

本文建立了一种基于离散相（Discrete Phase Model，DPM）雨滴模型的数值模拟方法[15-18]，分析了降雨入射、水流汇集及排水口出流过程。该方法能够在真实几何条件下解析重力、地形坡度及局部构造对排水性能的影响，提升汇水计算的准确性。

1　降雨排水数值模型构建

DPM方法将雨滴视为离散颗粒，在连续空气相中以拉格朗日方式进行跟踪，并求解每个颗粒的运动方程，从而计算其在重力、阻力等作用下的轨迹。DPM方法能够计算雨滴在重力及气流作用下的运动过程与分布特征，从而为后续地表汇流与排水分析提供更加合理的入射条件。在重力与气流的共同作用下，雨滴撞击地面，沿坡面汇集、流动，最终从排水口流出。

建立一个包含道路与边坡的2D算例（算例一，其计算域布置见图1），来验证数值模拟方法的准确性。FLUENT中的2D算例可以理解为平面沿法向延伸1 m厚度的薄板计算域。该算例计算域总宽度为10 m，高度约为6 m。其上方为空气相与雨滴离散相入口，初始速度均为2 m/s；计算域两侧压力出口的离散相边界条件设为“Reflect”，即雨滴与壁面接触后反弹回计算域，以确保雨水总量守恒。计算域底部路面与边坡坡面均采用反射（Reflect）边界条件，两处壁面的粗糙度参数依据对应地表材料类型，参照《公路排水设计规范》的相关规定选取。路面与边坡坡面的坡度分别设为2%与1∶1.25。雨流汇集，并从底部水流排水口流出，此处DPM边界条件为“Escape”，即雨滴从壁面逃逸、运动轨迹终止。本文模拟采用四边形网格，网格尺寸为20 mm，算例一的单元总量为125 983。采用瞬态计算方法，时间步长为0.02 s。

2　降雨工况设置

依据《降水量等级》（GB/T 28592—2012）中对大雨、暴雨及以上降水过程的分级标准，选取各等级12 h降水量的上限值作为代表性降雨工况，用以反映不利降雨条件下公路与边坡排水过程的响应特征。为便于数值模拟，将上述12 h累计降水量等效

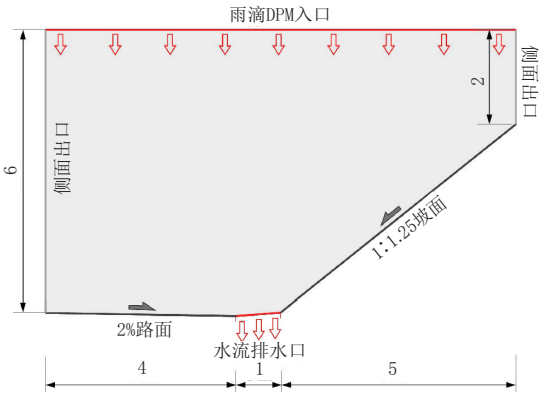


图1　算例一计算域布置（单位：m）

换算为小时降雨强度，并进一步转化为二维计算条件下10 m宽度入口的等效质量流率。在离散相模型设置中，雨滴粒径参考实际降雨过程中不同雨量等级对应的典型尺度范围进行选取。路径数量（parcels）作为DPM颗粒的随机生成参数，主要用于保证降雨空间分布的统计稳定性，其取值不直接对应真实雨滴数量，而是在给定总质量流率条件下对降雨过程进行等效离散表示。

本文设置DPM颗粒的路径数量为500，即雨滴入口处平均每米生成50个雨滴路径，符合实际降雨情形。基于上述原则，确定了各降雨等级下的雨量、等效质量流率、雨滴粒径及路径数量等参数配置，如表1所示。

表1　不同降雨等级的模拟工况设置

降雨级别	12 h降水量/mm	换算入口雨水质量/（kg·s^{-1}）	单个水滴粒径/mm
大雨	29.9	0.006 92	1.5
暴雨	69.9	0.016 18	2.5
大暴雨	139.9	0.032 38	3.0
特大暴雨	300.0	0.069 44	4.0

3　雨流汇聚结果分析与验证

图2为算例一在典型工况下雨滴DPM颗粒的质量密度云图。由图2可见，雨滴在重力作用下自上而下分布于整个气相区域内，颗粒分布较为均匀，无明显异常堆积现象，表明降雨注入过程稳定。雨滴在坡面及底部区域汇集，并从排水口流出。

图3为算例一在不同降雨等级工况下的排水口出流量时程曲线。由图3可见，各工况在计算初期经历短暂的增长阶段后迅速趋于稳定，随后围绕相对稳定的平均值进行小幅波动。这一阶段性特征反映了降雨进入计算域后，雨滴在地形影响下重新分布并逐渐达到动态平衡状态的过程。从定量结果来看，排水口的平均出流量随降雨级别的提高而明显

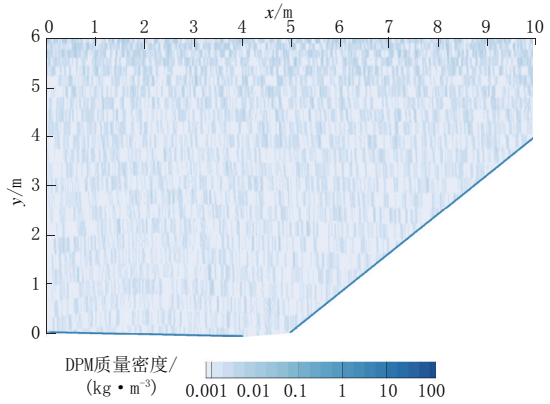


图2　雨滴 DPM 颗粒质量密度云图(算例一)

增加,其变化趋势与入口设定的雨水质量流量一一吻合,这说明系统能够有效响应降雨强度变化。同时可以观察到,随着降雨等级提升,出流曲线的瞬时波动幅度相对增大。这主要与高强度降雨条件下单位时间内雨滴数量增加有关,离散雨滴在排水口区域的捕集过程中表现出更明显的随机性特征。

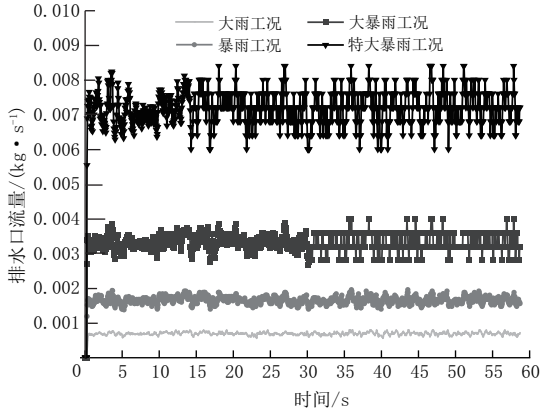


图3　不同雨量下的排水口流量曲线(算例一)

综上所述,本模型能够合理反映不同降雨强度条件下排水口出流能力的变化规律,为后续开展多排水口布置优化及排水构造对比分析提供了基础。

4　某山地公路横断面汇水案例分析

为验证所建降雨排水模拟方法对复杂横断面的适用性,构建典型山区双幅道路横断面模型作为算例二,其边界条件设置与雨滴颗粒质量密度分布云图见图4。

由图4可见,算例二的计算域最大宽度为50 m,最大高度为25 m,为沟壑地势,计算区域地形呈不对称分布,包含双幅路面及两侧边坡结构。双幅路面宽度均为7 m,其两侧共布置了3个排水通道,分别为排水口A、B、C。道路两侧的边坡宽度、坡度与数量均有所差异,用于描绘山区公路横断面几何差异对降雨运动路径的影响,从而验证数值模拟方法对

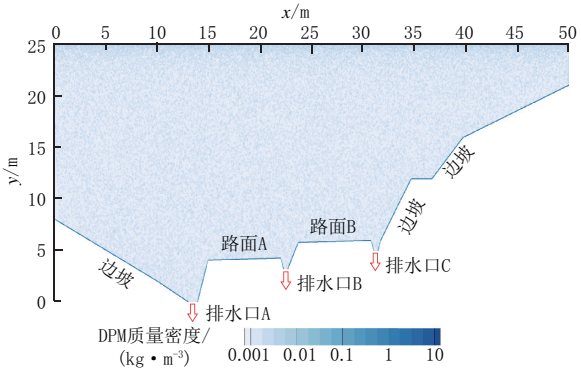


图4　边界设置与雨滴颗粒质量密度云图(算例二)

多水渠降雨汇集与排出行为的分析效果。

此算例的边界条件设置、计算域网格划分均与算例一保持一致,选取表1中的"特大暴雨"工况进行计算,换算得到总降雨量为0.347 2 kg/s。以第20 s为例,此时雨滴DPM颗粒在空中均匀分布,坠落在路面与边坡后,汇聚成水流,并在重力作用下分别流向3个排水口。

对各排水通道处的离散相逸出质量通量进行统计,从而确定各排水口的排水能力及其相互分担关系。图5给出了3个排水通道在相同降雨工况下的出流量时程曲线。从流量水平对比来看,3个排水口的出流能力存在明显差异。由于汇水范围较大,排水口A与C的流量水平较高,体现了横断面几何形态对雨滴汇集与排出路径的控制作用。曲线在稳定阶段仍存在一定幅度的随机波动,主要来源于离散雨滴运动过程的瞬时不均匀性。3条曲线在趋势和幅值上的差异反映了多排水口条件下的分担关系,验证了该方法在分析横断面排水结构布置及排水能力对比方面的适用性,为排水通道优化配置提供了定量依据。

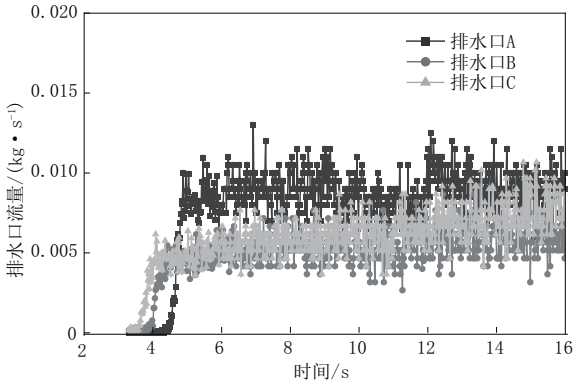


图5　各排水口流量曲线(算例二)

由各排水口累积排水量(见图6)可见,排水口A累积排水量的非线性增长趋势最显著;排水口B累积排水量的变化趋势近似表现为线性增长。这表明

随着汇水范围的增大，暴雨初期的排水压力也增大。

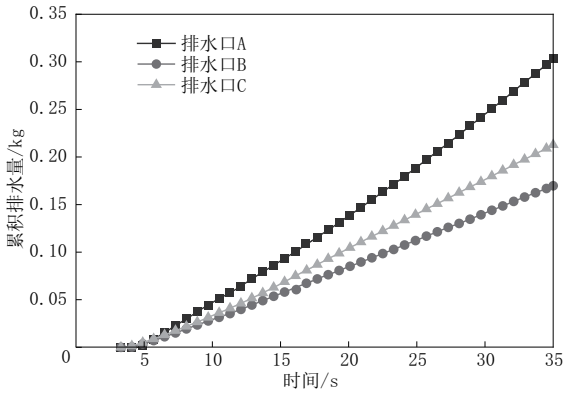


图6　各排水口累积排水量(算例二)

数值结果表明，山区公路横断面几何与排水构造对雨滴汇集路径及排水口出流能力具有显著控制作用。在复杂地形条件下，降雨入射后系统往往经历短暂的调整并迅速进入相对稳定的出流阶段，但出流仍表现出由离散雨滴捕集带来的随机波动特征。因此，排水设施的配置不宜仅依赖规范法给出的宏观径流量估算，而应结合横断面不对称性、边坡坡度差异与排水口布置位置，对潜在汇水通道进行针对性校核与优化。对于多排水口方案，不同排水口的分担能力存在明显差异，可通过调整排水通道位置、汇水引导构造或局部几何细化来提升关键排水口的承担比例与整体排水冗余度，从而增强强降雨工况下的安全性与可靠性。

5　结　语

(1)建立了一种基于离散相模型(DPM)的降雨排水数值模拟方法，可在考虑真实几何条件的前提下，对雨滴入射、坡面汇集与排水口出流过程进行统一刻画，为山区公路排水能力评估与排水构造对比提供了更具解析性的定量手段。

(2)通过典型二维算例验证，模型能够稳定反映降雨强度变化对排水出流的响应规律，计算结果在总体趋势与量级上与设定降雨输入相吻合，验证了该方法的可靠性。

(3)在复杂山地公路横断面条件下，模型可识别不同排水构造之间的出流差异与分担关系，展示了其在排水方案比选与能力对比分析过程中的适用性。

(4)该方法能够更直接地揭示地形与构造对汇水路径和排水能力的影响，为山区公路排水设施布置优化与参数设计提供定量依据。

参考文献：

[1] 蒋秀荣.城市道路路面排水设计研究[J].城市道桥与防洪，2020(8)：168-170；191.
[2] 杨利伟，刘家华，周煜欣，等.基于GIS和SWMM的西安市北郊片区排涝模拟与排水系统优化[J].给水排水，2024，60(3)：134-141.
[3] 赵凯，卢梦，黄晶.基于SWMM模型的上海某城市道路排水能力分析[J].城市道桥与防洪，2020(10)：146-149；20.
[4] 王梅芳.城市排水管网水力模型构建及动态仿真优化[J].水利科技与经济，2025，31(12)：60-64；104.
[5] 孙卓，邵知宇，詹子逸，等.超标降雨下城市复杂微地形精细化水力模型的构建[J].中国给水排水，2025，41(23)：156-162.
[6] 张健.公路排水疏干及边坡绿化防护措施研究[J].交通世界，2024(15)：108-110.
[7] 卓雄，格日乐，上官海东，等.基于暴雨强度公式的设计雨型[J].城市道桥与防洪，2022(11)：118-121；144.
[8] 李树平.城市路面排水设计计算[J].城市道桥与防洪，2009(1)：31-34.
[9] 潘丹，张金，程晶，等.山区高速公路路堑边沟排水设施设计方法研究[J].公路工程，2023，48(4)：105-112.
[10] 李海，陈嘉祺，谭明，等.高速公路超高渐变段汇水路径及积水分布特性[J].公路交通科技，2025，42(8)：90-102.
[11] 孙佳政.重庆山区陡坡地段排水系统及消能设施设计与仿真分析[D].重庆：重庆交通大学，2023.
[12] 夏齐勇，胡良年.山区高速公路中分离式路基的设计方法[].中外公路，2026，26(1):20-23.
[13] 林智鹏，任亮.暴雨情景下的山区公路排水系统韧性仿真分析[J].交通科技，2024，327:17-22.
[14] 白晓菲.山区公路高边坡综合排水研究[].交通科技与管理，2024，5(2)：63-65.
[15] 管朝鹏.基于DPM及EWF模型的积水分布研究[D].重庆：重庆交通大学，2015.
[16] 冯旭.基于CFD方法的低矮建筑风雨作用效应数值模拟研究[D].沈阳：辽宁工程技术大学，2016.
[17] Xu JL, Lv WZ, Gao C, et al. Prediction of pavement water film depth and estimation of critical rainfall conditions for refined road safety management: A simulation study[J]. PLOS ONE, 2025, 20 (2) : e0318228.
[18] 王恒.风驱雨数值模拟中雨滴谱的实现方法与必要性分析[J].给水排水，2025，51(12)：99-105.