

基于FARGO3D的行星与原行星盘 相互作用的模拟^{*}

冯福洋 李正祥[†]

(北京师范大学物理与天文学院 北京 100875)

摘要 自从行星科学发展以来,已经发现了5000多颗系外行星.理解原行星盘的演化对明确系外行星的分类,提高系外行星的探测效率至关重要.同时,系外行星的观测样本能够用来约束原行星盘与行星相互作用中的物理参数并检验已有模型的正确性.因此,将原行星盘的表面密度与恒星质量建立联系,结合系外行星性质的分布,利用流体动力学代码FARGO3D模拟了不同质量的行星与特定的原行星盘之间的相互作用过程.模拟结果表明:(1)沟结构的相对面密度与行星质量存在幂律关系,且幂律指数与恒星质量存在较强相关性;(2)沟结构的持续时间与行星质量存在幂律关系,且幂律指数与恒星质量存在较弱相关性;(3)沟结构的宽度与行星质量存在对数线性关系,且幂律指数与恒星质量存在较弱相关性.即行星与原行星盘的相互作用的强弱不但体现在稳定状态的沟结构的相对面密度,还体现在沟结构的持续时间以及沟结构的宽度.

关键词 原行星盘, 行星与行星盘相互作用, 行星与恒星相互作用, 系外行星, FARGO3D

中图分类号: P142; **文献标识码**: A

1 引言

行星科学自其成立以来,在行星系统的多样性、演化、观测和分类等方面取得了显著进展.该领域的一个开创性里程碑是美国宇航局NASA (National Aeronautics and Space Administration)的“开普勒(Kepler)”探测器,这是首个旨在探索银河系中类地行星的太空任务.作为NASA首个空间行星搜寻任务,开普勒任务的目标是寻找银河系中类地大小的行星.在其9 yr的运行期间,包括后续的K2扩展任务,开普勒及其后继任务揭示了银河系中可能存在数十亿个系外行星,其中许多可能具备支持地外生命的条件.这一成就不仅推动了人类对地外文明的探索,更在科学实践中迈出了历史性的一步.开普勒探测器主要采用凌

星法(Transit method)来确定系外行星的存在.例如,开普勒太空望远镜成功识别了首个类似地球的岩态行星Kepler-10b^[1].此外,Kepler-9b和Kepler-9c是开普勒任务中发现的第1个多行星系统^[2].这些发现不仅丰富了系外行星数据库,更新了恒星系统认知,还进一步完善了行星形成理论.继开普勒探测器之后,2018年发射的TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)探测器被誉为其继任者. TEES同样采用凌星法进行系外行星的搜寻,并专注于发现可能具备生命存在条件的行星.例如,2019年7月,TESS卫星发现了距离地球73光年的3颗系外行星,其尺寸介于地球和海王星之间,填补了系外行星研究的空白^[3].在中国,国内的“地球2.0”(Earth 2.0, ET)计划由中国科学院上海天文台主导,是我国在寻找地外文明领域的最新探

2024-08-19收到原稿, 2024-10-10收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(12275021、12073005、12021003)资助

[†] zxli918@bnu.edu.cn

索项目. 该计划的核心科学目标是发现绕类太阳恒星运行的“第二个地球”, 并解决系外行星领域中一些关键问题, 如类地行星、冷行星及流浪行星的分布和起源, 以及类太阳系行星系统中行星组成、分布和形成机制. 为实现这一目标, 地球2.0巡天空间卫星计划采用相对成熟的凌星法来搜寻类太阳恒星宜居带内的类地行星—地球2.0^[4]. 此外, 中国科学院紫金山天文台主导的近邻宜居行星巡天计划CHES (Closeby Habitable Exoplanet Survey)将发射一台口径为1.2 m的空间望远镜. 该计划采用高精度的空间微角秒级天体测量和定位技术, 旨在对太阳系邻近(10 pc以内)的约100颗F、G、K型恒星进行系统巡查, 以探测其宜居带内的类地行星或超级地球. CHES计划将详细调查这些宜居行星的数量、真实质量及三维轨道等关键信息^[5]. 截至2024年4月21日, 美国宇航局系外行星档案馆(NASA Exoplanet Archive)已收录了5616颗系外行星. 其中, 由TESS探测器发现的系外行星数量为440颗, 而TESS探测器所确定的系外行星候选体总数达7138个¹. 这一数据表明, TESS探测器在发现系外行星和明确其分布方面具有显著优势. 然而, 图1展示了系外行星的观测数据, 包括行星质量(M_p)和对应的恒星质量(M_*). 现有的系外行星数据揭示了系外行星的分布存在特定的集中区域.

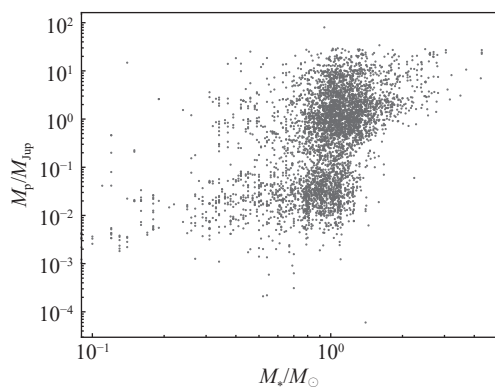


图 1 已发现的系外行星质量和其对应恒星质量数据

Fig. 1 The data on the masses of discovered exoplanets and their corresponding host stars

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

这引发了一个重要问题: 这些系外行星的分布模式是否与原行星盘的演化过程存在某种联系? 历史上, 关于行星系统形成与演化的研究已取得显著成果. 例如, Ida和Lin自2004年起开展了一系列开创性工作, 这5篇系列论文为原行星盘演化的研究奠定了重要基础. 在2004年的首篇文章中, Ida等人探讨了系外行星的质量和轨道半长轴的分布, 发现了一个显著的“沙漠”现象, 即在某些特定的质量和半长轴范围内系外行星的数量明显减少. 作者通过数值模拟解释了这一缺失区域, 模型考虑了诸如气体盘演化和行星迁移等多种物理因素, 为未来的观测和理论研究提供了重要框架和假设^[6]. 在2004年的第2篇文章中, Ida等人研究了气态巨行星的形成过程, 并分析了恒星金属丰度对气态巨行星形成的影响. 研究表明, 恒星的金属性对气态巨行星的形成及其保留具有重要作用, 高金属丰度的恒星更可能形成气态巨行星^[7]. 在2005年的第3篇文章中, Ida等人研究了短周期系外行星的质量分布特征, 分析了恒星质量如何影响原行星盘的结构, 从而影响短周期行星的质量及其形成^[8]. 在2008年的第4篇文章中, Ida等人模拟了不同情况下的I型迁移过程, 包括盘的模型、行星质量等参数, 研究了行星的I型迁移如何影响行星的轨道演化以及最终的分布结果, 对行星的迁移过程提供了重要参考^[9]. 在同年的第5篇文章中, Ida等人研究了冰线附近物质的积累情况(冰线是指原行星盘中液态水能够凝结成冰的特定位置), 并探讨了冰线位置对行星种类和质量的影响^[10]. 这5篇系列文章深入探讨了行星系统形成和演化中的关键因素, 为未来的观测和理论分析提供了重要参考. 基于前人的研究, Alibert等人提出了行星盘演化的基础模型, 他们采用了不同的方法和参数设置来构建这一模型^[11]. 在行星分布的研究方面, Reffert等人通过在超过12 yr的时间跨度内, 利用利克天文台精确测量了373颗G型和K型巨星的视向速度, 发现了强有力的证据, 表明巨行星的存在与宿主恒星的质量和金属丰度之间存在显著关联. 他们的研究表明, 当宿主恒星质量在某一特定区间内时, 巨行星出现的概率显著增加, 并在特定的

质量范围内达到最高值. 此外, 研究还发现, 当宿主恒星质量超过某一临界值时, 巨行星的出现概率急剧下降, 且在这一质量范围内未发现行星的形成^[12]. 其次, 潘梦睿等人对环红矮星行星系统的观测和理论研究进行了概述, 回顾红矮星周围不同类型行星观测的同时, 也对红矮星周围行星形成理论的最新认知进行了总结^[13]. 此外, 通过对原行星盘的光学波段、红外散射及毫米波连续谱分析, 并结合高分辨率成像技术, 已经识别出原行星盘中的若干子结构. 尽管这些子结构在一定程度上存在重叠, 但仍可将其根据形态划分为4类: 内部空腔(cavity)、弧状结构(arc)、旋臂状结构(spiral)以及环和沟结构(ring and gap).

关于内部空腔结构, Calvet等人早期的研究探讨了原行星盘中尘埃和气体的分布, 特别是如何通过红外光谱解释盘内的空腔结构^[14]. Espaillat等人通过观测手段发现了盘中空腔的存在及其吸积过程^[15]. 随后, Andrews等人利用SMA (Sub-Millimeter Array)对临近恒星形成区中的过渡盘进行了高分辨率观测, 确认了这些过渡盘中存在明显的空腔结构^[16]. 这些研究表明, 空腔结构是过渡盘中的一个显著特征, 无论是通过理论分析还是观测手段均已得到验证. 此外, 弧状结构在原行星盘中较为少见, 其表现为围绕内部空腔的一部分亮度不对称区域, 通常出现在空腔外部或沟结构的外围. 该不对称性可能由盘内部的行星或相关参数引起. 例如, Rodenkirch等人利用FARGO3D对HD163296原行星盘进行了模拟, 研究表明, 盘与行星的相互作用以及相关参数对盘的不对称性有显著影响, 从而形成弧状结构^[17]. 此外, 关于原行星盘中的旋臂结构, 自Kusakabe等人对MWC480进行近红外波段成像以来, 发现了盘中的极化现象, 这暗示了可能存在类似旋臂状的结构^[18]. 随后, 许多研究对不同的行星盘进行了模拟分析. 例如, Dong等人采用无粘性盘模型研究了行星诱导的旋臂结构, 发现行星诱导的旋臂结构的亮度随着行星质量的增加而增强, 因为更大质量的行星能够驱动更强的波动. 该研究还提供了在特定观测条件下可以探测到旋臂结构的行星最小质量^[19]. 此外, Teague等人利用高分辨率数据揭示了原行星

盘中的旋臂结构, 并探讨了形成这些旋臂结构的机制^[20]. 原行星盘中的环状结构是毫米波连续谱中最常见的子结构之一. 2014年, ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)团队通过对HL Tau原行星盘的观测, 首次发现了明显的环状结构^[21]. Andrews等^[22]、Huang等^[23]以及Long等^[24]利用ALMA的观测数据验证了原行星盘中的环和沟状结构的存在. 这些结构揭示了原行星盘内部物质的分布, 暗示了原行星盘中可能存在行星形成, 为理解原行星盘的形成和演化提供了重要线索. 在数值模拟方面, Paardekooper等人探讨了不同行星质量和原行星盘参数对行星-原行星盘相互作用的影响, 特别是湍流效应, 并研究了将行星观测特征纳入模型的进展^[25]. Kanagawa等人采用了一维粘性原行星盘的新模型, 研究了行星盘沟结构的形成问题, 该模型考虑了由于表面密度梯度导致的原行星盘开普勒旋转偏差^[26]. 此外, 关于原行星盘及其与行星和恒星系统的基本参数如何影响行星盘沟结构的形成, Fung等人利用数值模拟的方式提供了盘的开沟深度和行星与恒星的质量比 q 、原行星盘的粘度 α 以及标高(h/r) (h 、 r 分别是原行星盘在特征半径处的厚度和半径)之间的定量描述, 对于木星大小的行星, 沟的深度正比于 $q^{-2.2}\alpha^{1.4}(h/r)^{6.6}$ ^[27]. 此外, Pyerin等人利用FARGO3D对HD10056的原行星盘进行了数值模拟, 得出在13 au处有一质量为8倍木星质量(M_{Jup})的行星, 在143 au处有一质量为 $3M_{\text{Jup}}$ 的行星^[28]. 除了对单恒星原行星盘的研究, 密近双星系统中的原行星盘也得到了广泛关注, Thun等^[29]和Jordan等^[30]利用FARGO3D分别对Kepler-16、34、35、38、413以及仙王座- γ 进行模拟, 旨在研究行星的存在对原行星盘偏心率以及盘进动的影响. 在研究行星盘演化过程中行星引起的沟结构方面, Chametla等人探讨了具有轨道倾角的大质量行星对局部等温三维原行星盘的开沟效应^[31]. 此外, Bergez-Casalou等人研究了气体吸积对行星盘沟深度及其形状的影响^[32]. 除了行星的轨道参数和吸积对沟结构的影响, 沟的形成对行星的影响同样重要. 例如, Bergez-Casalou等人的另一项研究发现, 双巨行星的质量比的变化与盘的结构, 特别

是沟的形成密切相关^[33]. 现有模型已阐明了原行星盘的动力学过程, 包括盘中各种子结构的形成, 并通过数值模拟解释或预测了观测到的现象. 然而, 关于原行星盘的演化与系外行星之间的联系尚未得到明确证实. 原行星盘从形成到消散以及最终行星系统的形成, 经历了数百万年的演化, 其具体机制仍不完全明确. 鉴于系外行星的分布情况, 本文通过数值模拟研究了在特定质量行星作用下的原行星盘演化过程, 以建立系外行星分布与原行星盘之间的联系. 具体体现在原行星盘沟结构的表面密度变化、沟结构的持续时间以及沟结构的宽度上. 研究旨在探讨原行星盘沟结构的属性与行星质量之间的关系, 即行星对原行星盘的影响强弱.

2 原行星盘模型

2.1 原行星盘的表面密度

原行星盘的表面密度是研究原行星盘的重要参数之一. 根据原行星盘演化的基本理论, 表面密度常用于解释其物质的分布特征, 并为描述其动力学行为和演化过程提供基础. 例如, Mundy等人提出了纯幂律分布公式 $\Sigma \propto R^{-\gamma}$ (R 为原行星盘中某点处的半径, Σ 表示原行星盘在该点处的表面密度, γ 是与原行星盘粘度有关的参数), 该公式基于金牛座T星HL Tau周围原行星盘的亚角秒图像的分析^[34].

在给定半径 R_0 处的表面密度值后, 描述原行星盘表面密度的方程可以表示为:

$$\Sigma(R) = \Sigma_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma}. \quad (1)$$

在上式中, Σ_0 表示在半径 R_0 处的表面密度. 对原行星盘的内外半径 R_{in} 和 R_{out} 之间进行积分处理, 并规定原行星盘的方位角对称性, 我们可以得到原行星盘质量 M_d 与表面密度之间的关系, 由下式给出, 其中 dS 表示以恒星为圆心的原行星盘的面元:

$$\iint_{\text{disk}} \Sigma(R) dS = 2\pi \Sigma_0 \int_{R_{\text{in}}}^{R_{\text{out}}} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma} R dR \sim M_d. \quad (2)$$

然而, 由于原行星盘的外围部分温度很低, 所

以辐射很弱, 以至于对于原行星盘的尺寸很难进行精确测量. 故为了确定原行星盘的尺寸特征, Hartmann等人利用粘性盘的物理特征指出了原行星盘的表面密度呈指数分布^[35]. 即在Mundy等^[34]的纯幂律分布的基础上外加指数衰减分布, 用于描述原行星盘外部的锥状特征. 在Hartmann等^[35]提出的原行星盘表面密度的分布中, 利用特征半径 R_c 确定原行星盘的尺寸特征. R_c 描述了原行星盘的表面密度分布从陡峭变为平缓的位置. R_c 的位置大约在原行星盘质量 $2/3$ 处.

2.2 参数 Σ_0 的确定

在2.1节中所引入的表面密度公式(1)是一个发散函数. 为了避免此问题, 需要在计算中设定一个边界作为原行星盘的边缘. 根据Hughes等^[36]提出的建议, 原行星盘的外边界大概为特征半径 R_c 的2倍. Hughes等人确定特征半径在 $30 \sim 200$ au之间^[36]. 同时, Andrews等人发现, 特征半径的范围要比原有值大^[37-38]. 但由于原行星盘外部的冷却性质和微弱的辐射, 想要精确测量原行星盘的大小存在一定的困难^[36]. 基于以上原因, 原行星盘的边界比较模糊, Hughes等^[36]提出的建议存在一定的误差. 所以我们决定将边界值定在 $R_{\text{out}} = 400$ au的位置来对公式(2)进行积分. 由此, 我们可以得出 $R_0 = 1$ au处的表面密度:

$$\Sigma_0 = \frac{(2 - \gamma) M_d}{400^{2-\gamma} \cdot 2\pi R_0^2}. \quad (3)$$

2.3 原行星盘和主星质量之间的比值 x

从原始星云的形成到其演化为行星系统, 再到恒星的最终结局, 恒星质量始终是影响恒星演化、行星盘形成和行星演化的重要参数. 已有研究表明, 行星盘的质量与恒星质量之间存在一定的依赖关系. Williams等人在其年度综述中, 提出了两者之间的正比例关系 $\frac{M_d}{M_*} = x \sim 0.01$, 尽管这一关系表现出显著的弥散性^[39].

然而, 这种比例关系仅适用于低质量恒星的原行星盘, 通常不适用于大质量恒星的盘. 在大质量恒星 $M_* > 10M_\odot$ 的情况下, Mann等人对猎户座原行星盘的调查给出了一个非常精确的极限^[40]:

$$\frac{M_d}{M_*} = x \leq 10^{-4}. \quad (4)$$

在本文的模型中, 所选取的恒星质量为 $0.5M_\odot$ 、 $1.0M_\odot$, 故根据公式(3)的计算方式, 表1展示了不同质量的宿主恒星对应的无量纲 Σ_0 取值, 此值即第3节中流体动力学模拟的输入参数.

表 1 不同宿主恒星质量的参数取值
Table 1 Parameter values for the masses of different host stars

Mass of star	Σ_0
$0.5M_\odot$	1.4921×10^{-7}
$1.0M_\odot$	2.9812×10^{-7}

3 流体动力学模拟

3.1 FARGO3D

FARGO3D是一个基于流体动力学模型的集成程序, 旨在模拟原行星盘的演化过程². 该程序所需的输入参数包括 Σ_0 、表面密度梯度 γ 、尘埃和气体的质量比值 ε 、原行星盘标高(h/r) (因程序中设定 $r = 1$, 故标高 $h/r = h$)以及粘度系数 ν (或 α 粘度)等. 此外, FARGO3D还提供了调整宿主恒星质量的功能, 并允许在特定轨道半径上添加一定质量的行星, 以探究其对原行星盘的影响. 例如, 在本研究中, 我们利用了FARGO3D内置的多流体模拟(fargo-multifluid). 在内置的setups文件中, 气体与尘埃质量比例参数设置为0.01, 且3类尘埃的斯托克斯数倒数(Inverse of the Stokes number for dust)分别为10.0、1.0和0.1. 同时, 为了模拟行星对原行星盘演化的影响, 我们在木星轨道(5.2 au)处设置了一颗行星.

3.2 模拟流程

我们在极坐标系中将原行星盘划分为 512×384 个网格, 其中沿半径方向为512格, 角向为384格. 模拟半径为 $0.5 \sim 20$ au. 因此, 每个径向网格对应 $\Delta r = 0.038$ au, 每个角向网格对应 $\Delta \theta =$

$\pi/192$ rad. 此外, 模拟的步长被设置为 0.1π , 并指定每 2000π 输出一次, 即100个周期(2π 为一个周期, 即一个地球年). 此外, 由于我们在FARGO3D中应用了多流体模拟并按照不同的斯托克斯数设置了3类不同的尘埃, 为了直观展现出演化过程中原行星盘的整体图像, 我们将3类尘埃综合考虑对其密度求和并画出其二维密度分布图. 图2展示了 M_* 和 M_p 分别为 $0.5M_\odot$ 、 $0.5M_{\text{Jup}}$ 以及 $1.0M_\odot$ 、 $1.0M_{\text{Jup}}$ 的原行星盘在不同时间的盘面二维密度分布图.

图3呈现了沟结构的相对面密度(沟的表面密度与其初始值表面密度的比值)随时间的演化图, 沟结构的相对面密度随时间变化.

以此为例, 从图3可以看出, 随着模拟的不断进行, 在经历约1000–2000周期后, 沟结构的相对面密度达到极值. 此后, 由于原行星盘的粘性演化, 沟结构逐渐被原行星盘吸收, 沟结构的相对面密度逐渐升高. 最终, 稳定的极值出现在约3000–5000周期之间. 据此, 我们决定将8000个周期作为程序模拟时间的上限, 程序将在运行8000个周期后结束. 另外, 本文中的数值模拟使用的服务器显卡型号为A100-PCIE-40GB, 计算时间平均约16 h.

3.3 参数的输入

通过第2节定义的参数模型, 我们将原行星盘的表面密度转换成宿主恒星质量的函数. 图4展示了数值模拟的数据点, 其中灰色背景点为系外行星的观测数据, 星点和方块点为本文的数值模拟点. 竖直虚线和点划线对应了2类恒星质量 $M_* = 0.5M_\odot$ 、 $1.0M_\odot$. 水平的5条虚线对应了不同的行星质量 $M_p = 0.01M_{\text{Jup}}$ 、 $0.03M_{\text{Jup}}$ 、 $0.1M_{\text{Jup}}$ 、 $0.3M_{\text{Jup}}$ ($1.0M_{\text{Sat}}$, Saturn为土星)、 $1.0M_{\text{Jup}}$. 需要指出, 流体动力学模拟非常耗时. 因此, 本论文在有限的计算资源下, 只对主星质量和行星质量两个参量做了采样, 且未考虑吸积和迁移的影响. 在采样中, 中心主星质量和行星质量的取值尽可能地覆盖了系外行星的观测结果, 即参考图4. 另外, 文章中未涉及的参数均采用内置设置.

²<https://fargo3d.bitbucket.io/>

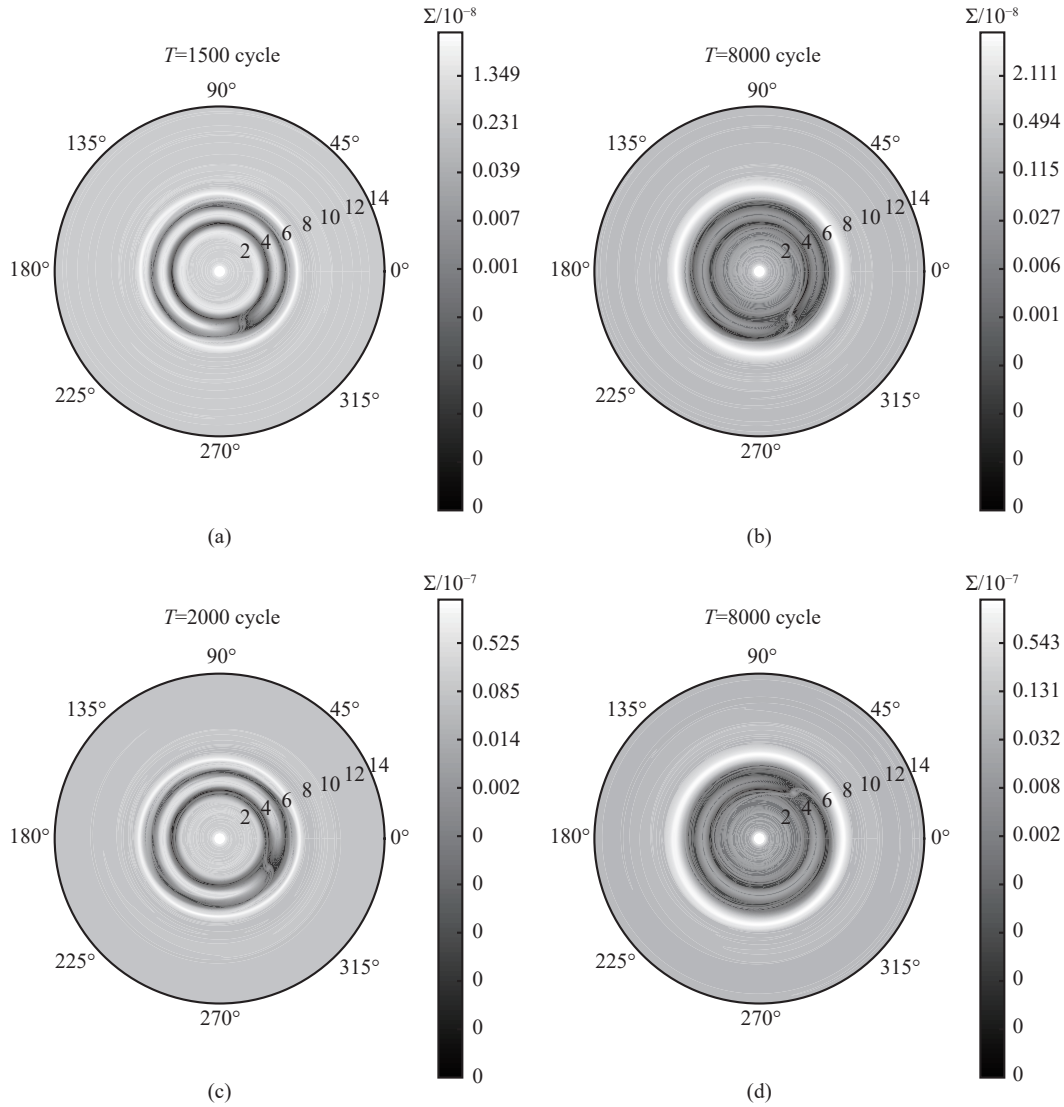


图 2 不同时间原行星盘的二维密度分布图. 图(a)、(b)分别是模拟时间为1500和8000周期时的行星盘二维尘埃密度分布图, 其中 $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{\text{Jup}}$. 图(c)、(d)分别是模拟时间为2000和8000周期时的行星盘二维尘埃密度分布图, 其中 $M_* = 1.0M_\odot$, $M_p = 1.0M_{\text{Jup}}$.

Fig. 2 Two-dimensional density distribution maps of protoplanetary disks at different evolving stages. Panels (a), (b) two-dimensional dust density distribution maps of protoplanetary disks with $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{\text{Jup}}$ at evolving stages of 1500 and 8000 cycle. Panels (c), (d) two-dimensional dust density distribution maps of protoplanetary disks with $M_* = 1.0M_\odot$, $M_p = 1.0M_{\text{Jup}}$ at evolving stages of 2000 and 8000 cycle.

数值模型由表2给出. 另外, 模拟程序的其他参数输入值由表3给出, 模拟范围为0.5–20 au, 原行星盘的标高(aspect ratio)为0.05, 尘埃与气体密度比值为0.01, 粘度系数为 10^{-5} ($\alpha = 4 \times 10^{-3}$), $\gamma = 0.5$.

4 模拟结果

4.1 原行星盘中的沟结构

行星与原行星盘之间的相互作用体现在行星的吸积和轨道清理过程. 行星对盘内和盘外部分施加相反的力矩, 促使内部物质向原行星盘内部移

动,同时外部物质向外移动.这一过程导致行星附近的表面密度发生变化,体现为行星的II型迁移,并最终造成原行星盘的“开沟”现象.在我们的模拟结果中,原行星盘呈现出明显的“沟”状结构,表明行星对盘的影响.如图3所示方法,我们计算沟的相对表面密度. Fung等人的文章中利用了此计算方法,我们在此处使用同样的方式研究沟结构的表面密度变化情况^[27].如图5所示,图中给出了图4中本文的两类模型— $M_* = 0.5M_\odot$ 、 $1.0M_\odot$ 在不同参数下沟结构的相对表面密度随模拟时间变化.

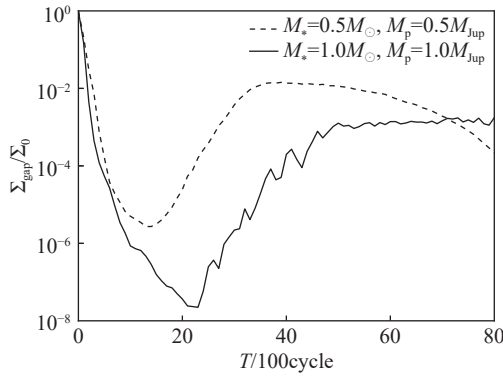


图 3 行星盘的沟相对面密度随时间演化图. 虚线: $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{Jup}$ 沟结构相对面密度的演化线. 实线: $M_* = 1.0M_\odot$, $M_p = 1.0M_{Jup}$ 沟结构相对面密度的演化线.

Fig. 3 Evolution of the surface density of the protoplanetary disk's gap over time. Dashed line: evolutionary curve of the surface density of gap structures in a protoplanetary disk with $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{Jup}$. Solid line: evolutionary curve of the surface density of gap structures in a protoplanetary disk with $M_* = 1.0M_\odot$, $M_p = 1.0M_{Jup}$.

行星与原行星盘的相互作用导致沟结构的形成.从图5中可以看出,随着数值模拟中行星质量发生变化,沟结构的特征也随之变化.主要体现在沟结构的持续时间,即从模拟开始到沟结构的形成,最后沟结构的相对面密度达到稳定点的时间.例如 $1.0M_\odot$ 、 $1.0M_{Jup}$,即图5右图中的星点线,沟结构约在1700周期达到最低点,大约在4000周期左右趋于稳定.此外,相互作用还体现在沟结构稳定时对应的相对面密度.表4总结了不同模型的模拟结果,包括沟结构的相对面密度、持续时间以及宽度.

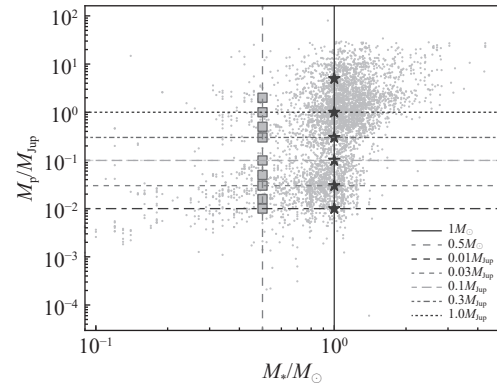


图 4 数值模拟的模型. 图中灰色背景粒子为系外行星的观测数据. 方块和星点为数值模拟的参数点. 竖直虚线表示不同的恒星质量. 水平虚线表示不同的行星质量.

Fig. 4 The model of numerical simulation. The gray background particles in the figure are the detection data of exoplanets. The cubes and stars are the parameter points for the numerical simulation. The vertical dashed lines indicate different star masses. Horizontal dashed lines indicate different planetary masses.

表 2 数值模拟模型
Table 2 Numerical simulation model

No.	$M_*/M_\odot$	M_p/M_{Jup}	$q = M_p/M_*$	No.	$M_*/M_\odot$	M_p/M_{Jup}	$q = M_p/M_*$
A-1	0.5	0.01	5.00×10^{-2}	A-8	0.5	2.0	2.50×10^{-4}
A-2	0.5	0.016	3.13×10^{-2}	B-1	1.0	0.01	1.00×10^{-1}
A-3	0.5	0.03	1.67×10^{-2}	B-2	1.0	0.03	3.33×10^{-2}
A-4	0.5	0.05	1.00×10^{-2}	B-3	1.0	0.1	1.00×10^{-2}
A-5	0.5	0.3	1.67×10^{-3}	B-4	1.0	0.3	3.33×10^{-3}
A-6	0.5	0.5	1.00×10^{-3}	B-5	1.0	1.0	1.00×10^{-3}
A-7	0.5	1.0	5.00×10^{-4}	B-6	1.0	5.0	2.00×10^{-4}

表 3 数值模拟模型的其他参数输入值

Table 3 Input values for other parameters of the numerical simulation model			
Parameter	Value	Parameter	Value
Inner edge	0.5 au	Outer edge	20 au
γ	0.5	ε	0.01
h	0.05	$\nu(\alpha)$	$10^{-5}(a = 4 \times 10^{-3})$

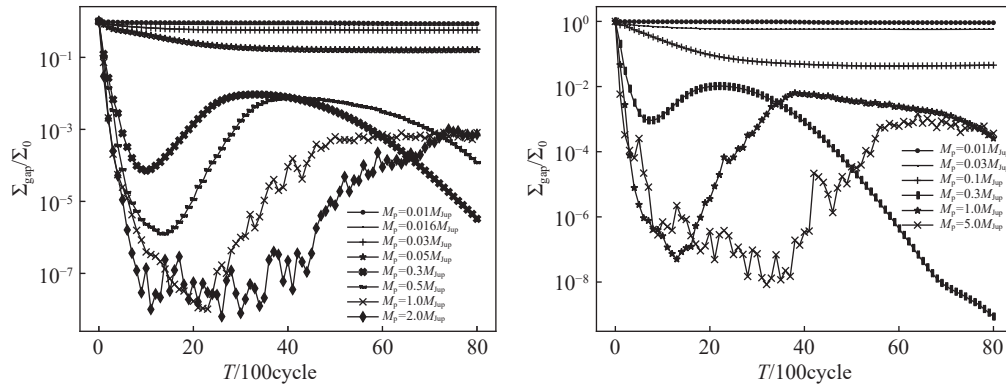
图 5 数值模拟的沟结构随时间演化图. 左图: $M_* = 0.5M_\odot$ 的不同质量行星模拟结果. 右图: $M_* = 1.0M_\odot$ 的不同质量行星模拟结果.Fig. 5 Numerical simulation of gap structure evolution over time. Left: simulation results of different planets' mass with $M_* = 0.5M_\odot$. Right: simulation results of planets' mass with $M_* = 1.0M_\odot$.

表 4 不同模型的模拟结果

Table 4 Simulation results of different models

No.	$\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0$	T/cycle	Gapwidth/au	No.	$\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0$	T/cycle	Gapwidth/au
A-1	9.22×10^{-1}	1600	0.20	A-8	4.40×10^{-4}	7000	2.50
A-2	8.26×10^{-1}	2000	0.30	B-1	9.75×10^{-1}	1000	0.10
A-3	8.25×10^{-1}	2100	0.35	B-2	6.29×10^{-1}	1400	0.20
A-4	2.30×10^{-1}	2300	0.60	B-3	1.11×10^{-1}	1800	0.60
A-5	9.34×10^{-3}	3300	1.53	B-4	1.04×10^{-2}	2200	1.30
A-6	7.49×10^{-3}	4200	1.68	B-5	6.34×10^{-3}	3800	1.70
A-7	6.24×10^{-4}	5000	2.15	B-6	6.05×10^{-4}	6000	2.70

4.2 沟结构的相对面密度

图6给出了模拟结果中沟结构稳定时对应的相对面密度与行星质量之间的关系, 可以看出, 沟结构的相对面密度与行星质量之间存在幂律关系, 幂律指数与恒星质量存在关系. 当行星质量大于 $0.1M_{\text{Jup}}$ 时, 即相同质量的行星与不同的盘相互作用,

恒星质量越小的行星盘沟结构的相对面密度越小. 此结果是由于相同质量的行星与不同质量的恒星对应的行星盘的相互作用, 恒星质量越小, 沟结构的相对面密度越小. 在密度图上的体现, 即沟结构越“深”. 根据本文的模型, 恒星质量小, 其对应的原行星盘的表面密度越小, 行星盘越稀薄,

对于相同质量的行星, 越容易清理其轨道附近的物质, 沟结构越明显, 即沟的相对表面密度越小, 这与图6的模拟结果一致.

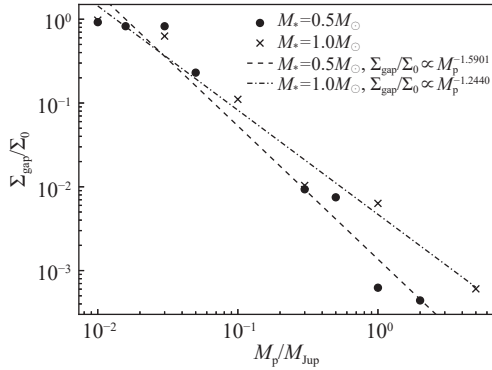


图 6 沟结构的相对面密度与行星质量的关系图. 图中的点表示模拟结果, 虚线表示拟合结果.

Fig. 6 Figure of the relative surface density of the gap structure in relation to the mass of the planet. The dots in the figure represent the simulation results and the dashed lines represent the fitting results.

• 此外, 根据Fung等人的研究内容, 其研究结果表明^[27]:

– 低 q 的情况 ($q \in (10^{-4}, 5 \times 10^{-3})$), $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-2.12}$;

– 高 q 的情况 ($q \in (5 \times 10^{-3}, 10^{-2})$), $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-1}$.

• 根据本文的模拟结果, 模拟范围对应 $q \in (10^{-5}, 5 \times 10^{-3})$:

– 在 q 较小的情况, $M_* = 0.5 M_\odot$, $M_p/M_{\text{Jup}} \in (0.03, 0.05, 0.3)$ 的情形, $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-1.905}$, 相关性 (决定系数) $D^2 = 98.81\%$;

– 在 q 较大的情况, $M_* = 1.0 M_\odot$, $M_p/M_{\text{Jup}} \in (0.3, 1.0, 5.0)$ 的情形, $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-1.034}$.

这两种情况与Fung等^[27]的研究内容较为一致, 主要差异在于粘度系数. Fung文章^[27]中的 α 粘度为 10^{-3} , 而本文的粘度为其4倍. 此外, 在参数选择和行星质量范围的取值上, Fung的研究^[27]利用恒星与行星质量比 (q) 作为参数, 可以调整恒星质量, 而本文则基于系外行星数据, 固定恒星质量以探讨行星质量的影响. 尽管在固定恒星质量的情况下, 本文也可以将行星质量转换为质量比 q 进行研

究, 但两者之间仍存在一定差异, 沟结构的特征及其与恒星、行星质量的关系可能有所不同. 此外, 在低 q 的情况下, 本文的研究范围比Fung的研究^[27]更加广泛. 根据图6中 $M_* = 0.5 M_\odot$ 的低 q 的范围, 模拟结果显示, 随着行星质量降低, 沟结构的相对面密度趋于平缓, 此结果是Fung等^[27]研究范围中所没有涉及的. 此外, 当 M_p 在中间范围情况下 $M_p/M_{\text{Jup}} \in (0.03, 1.0)$, $M_* = 0.5 M_\odot$, $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-1.888}$, $D^2 = 98.89\%$; $M_* = 1.0 M_\odot$, $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-1.387}$, $D^2 = 99.94\%$. 以上两种情形的线性相关性较好. 根据Kanagawa等人的研究内容 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 = 1/(1 + 0.04K)$, $K = q^2 h^{-5} \alpha^{-1}$, 适用范围 $K \sim 10^4$. 经近似 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 = 1/(1 + 0.04K) \sim 25K^{-1} \sim q^{-2}$ ^[26]. 在本文的研究结果中, $M_* = 0.5 M_\odot$, $M_p/M_{\text{Jup}} \in (0.03, 0.05, 0.3)$ 的情形, $K \in (4.8 \times 10^4, 4.8 \times 10^5)$, 相对面密度 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto q^{-1.905}$, 故本文的研究结果与Kanagawa等^[26]的研究结果是吻合的, 不同点在于Kanagawa的文章中考虑了高表面密度梯度导致的盘开普勒旋转的偏差效应.

4.3 沟结构的持续时间

行星与原行星盘的相互作用除了体现在沟结构的深度, 即相对面密度的变化, 还体现在沟结构的持续时间. 根据图5所示, 沟结构的相对面密度随时间先减小后增大之后趋于稳定, 此过程描述了行星与原行星盘的相互作用, 此时间尺度同样反映了行星与原行星盘相互作用的强弱. 图7展示了沟结构的持续时间与行星质量的关系, “.”表示 $M_* = 0.5 M_\odot$ 的结果, “×”表示 $M_* = 1.0 M_\odot$ 的结果, 虚线表示拟合结果. 模拟结果表明沟结构的持续时间与行星质量存在幂律关系, 且随着行星质量增大, 沟结构的持续时间越长, 在不同恒星的行星盘中都展现出相同的规律.

• 当 $M_* = 0.5 M_\odot$, 沟结构的持续时间 $T \in M_p^{0.288}$, $D^2 = 96.69\%$;

• 当 $M_* = 1.0 M_\odot$, 沟结构的持续时间 $T \in M_p^{0.307}$, $D^2 = 99.08\%$;

其次, 在给定相同质量的行星的情况下, 恒星质量越小, 沟结构的持续时间越长. 这与4.2节中所

提到的相同质量行星与不同质量恒星对应的盘相互作用的结果相同, 即相同质量的行星与原行星盘相互作用时, 越稀薄的原行星盘其对应的沟结构越深, 持续时间越长. 另外, 幂律指数与恒星质量存在较弱的相关性, 即图中拟合线的斜率随恒星质量的变化不明显.

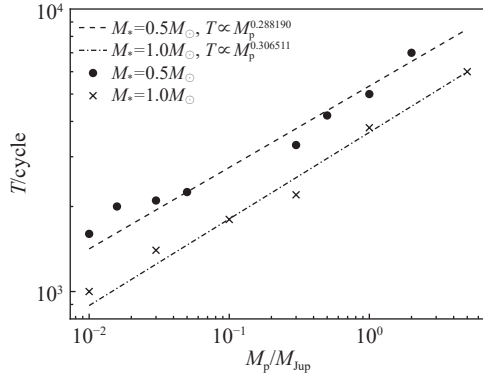


图 7 沟结构的持续时间与行星质量的关系图. 图中的点表示模拟结果, 虚线表示拟合结果.

Fig. 7 Figure of the duration of the gap structure in relation to the mass of the planet. The dots in the figure represent the simulation results and the dashed lines represent the fitting results.

4.4 沟结构的宽度

我们以 $M_* = 0.5M_\odot$ 、 $M_p = 0.5M_{Jup}$ 为例来研究不同演化过程中沟的宽度. 图8展示了其在不同时间的密度分布图, 并且展现出原行星盘的沟结构随时间演化而变化. 从初始的状态开始出现沟, 经过原行星盘的粘性演化, 沟结构被原行星盘所吸收, 能够看出沟结构存在宽度. 例如在4200周期时, 沟结构趋于稳定. 同样, 以 $M_* = 0.5M_\odot$ 、 $M_p = 0.5M_{Jup}$ 为例, 图9给出了其在 $T = 4200$ cycle 的密度分布图. 我们选取密度分布图的两个密度极值点之间的距离作为沟结构的宽度.

行星与原行星盘的相互作用, 除了体现在盘的沟结构的相对面密度的变化以及沟结构的持续时间之外, 沟结构的宽度同样是衡量二者相互作用的重要研究内容. 图10给出了沟结构的宽度与行星质量的关系. 可以看出, 沟结构的宽度与行星质量存在对数线性关系, 且随着行星质量的增加,

沟结构的宽度随之增加, 原因是不同质量的行星与相同的原行星盘相互作用, 质量较大的行星的开沟能力更强.

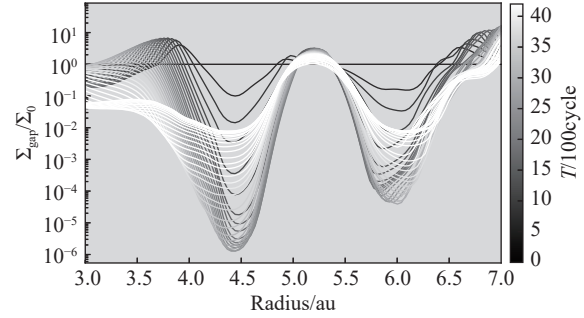


图 8 $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{Jup}$ 的原行星盘不同时间的密度演化图

Fig. 8 Relative surface density evolution of a planetary disk of $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{Jup}$ at different times

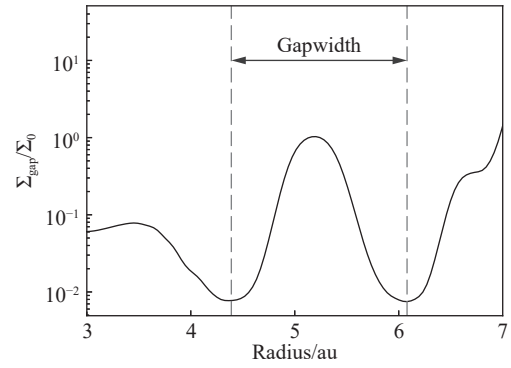


图 9 $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{Jup}$ 的原行星盘4200周期的密度分布图

Fig. 9 Relative surface density distribution of a planetary disk of $M_* = 0.5M_\odot$, $M_p = 0.5M_{Jup}$ for 4200 cycle

- 当 $M_* = 0.5M_\odot$, 沟结构的宽度 $\text{Gapwidth} \propto \ln M_p^{2.087}$, $D^2 = 98.11\%$;
- 当 $M_* = 1.0M_\odot$, 沟结构的宽度 $\text{Gapwidth} \propto \ln M_p^{1.817}$, $D^2 = 96.36\%$.

5 结论与讨论

本文通过系外行星观测数据对恒星质量进行限制, 并对原行星盘进行了简要建模, 从而建立了原行星盘密度参数与恒星质量之间的关系, 即恒

星质量决定了原行星盘的密度特性. 其次, 本文利用FARGO3D进行流体动力学模拟, 研究了不同质量行星与原行星盘之间的相互作用. 结果表明: 行星与原行星盘相互作用的强弱体现在3个方面—沟结构的表面密度、持续时间以及宽度. 首先, 本文研究了沟结构的表面密度与行星质量的关系. 模拟结果表明二者存在幂律关系, 且幂律指数与恒星质量存在较强相关性, 模拟结果与前人的研究存在一致性. 其次, 根据系外行星的探测数据, 本文的模拟结果较前人研究从 $q = 10^{-4}$ 拓宽至 10^{-5} . 根据模拟结果我们发现, 随着行星质量的减小, 幂律指数逐渐变大, 结果趋于稳定趋势, 即沟结构的相对面密度变化趋于平稳. 另外, 在行星质量处在模拟范围中间值的情形下线性拟合较好, 模拟结果如4.2节所述.

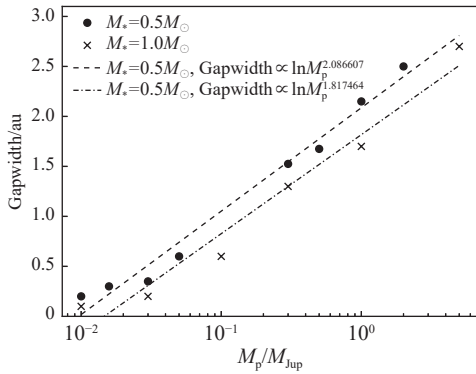


图 10 沟结构的宽度与行星质量的关系图. 图中的点表示模拟结果, 虚线表示拟合结果.

Fig. 10 Figure of the width of the gap structure in relation to the mass of the planet. The dots in the figure represent the simulation results and the dashed lines represent the fitting results.

- 当 $M_* = 0.5M_\odot$, 沟结构的相对面密度 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto M_p^{-1.590}$;
- 当 $M_* = 1.0M_\odot$, 沟结构的相对面密度 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto M_p^{-1.244}$.

本文还首次研究了沟结构的持续时间与行星质量的关系. 模拟结果表明二者存在幂律关系, 幂律指数与恒星质量在所研究的行星质量范围内存在较弱相关性, 模拟结果如4.3节所述.

- 当 $M_* = 0.5M_\odot$, 沟结构的持续时间 $T \propto$

$$M_p^{0.288};$$

- 当 $M_* = 1.0M_\odot$, 沟结构的持续时间 $T \propto M_p^{0.307}$.

此外, 本文首次研究了沟结构的宽度与行星质量的关系. 模拟结果表明二者存在对数线性关系, 对数斜率与恒星质量在所研究的行星质量范围内存在较弱相关性. 另外, 当恒星质量较小的情形下($M_p < 0.1M_{\text{Jup}}$), 模拟结果表现出趋于平缓的趋势, 即随着行星质量的减小, 沟结构的宽度变化趋于平稳, 模拟结果如4.4节所述.

- 当 $M_* = 0.5M_\odot$, 沟结构的宽度 $\text{Gapwidth} \propto \ln M_p^{2.087}$;

- 当 $M_* = 1.0M_\odot$, 沟结构的宽度 $\text{Gapwidth} \propto \ln M_p^{1.817}$.

根据行星质量大小、行星与原行星盘的相互作用分为I型迁移和II型迁移. 前者是由于行星轨道内外的引力不均匀导致行星的迁移. 对于大质量的行星, 后者应该是非常重要的, 在II型迁移过程中伴随着沟结构的形成, 即行星盘被行星“开沟”^[41-42]. 然而, 沟结构的特性由行星以及原行星盘的基本性质决定, 例如原行星盘的标高、粘度等. 故亦可通过改变描述原行星盘的参数进而研究相同质量的行星与不同参数的原行星盘之间的相互作用, 进而研究其关系. 例如, Fung等人研究了沟结构的相对面密度的变化^[27], 并给出了沟结构的相对面密度与行星与恒星的质量比 q 、原行星盘的标高 h 以及粘度系数之间的关系. 结果表明沟结构的相对面密度与三者均存在幂律关系, 并且在不同的质量比下, 其他两个参数的幂律指数表现出一定的变化. 其文章中的两类低 q 的数值模拟情形中, 对 h/r 都有较好的拟合, 形式具体为 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto (h/r)^{6.45}$; 在高 q 的情形下, 对粘度系数 α 有较好的拟合, 形式具体为 $\Sigma_{\text{gap}}/\Sigma_0 \propto \alpha^{1.42}$. 另外, Kanagawa等人之后的研究中给出沟结构的相对面密度同样与以上3个量存在一定关系, 并将关系细化为4.2节中所提到的关系, 即 $K = q^2 h^{-5} \alpha^{-1}$ ^[26]. 在本文中, 将粘度系数固定进而探究沟结构的性质与行星质量的关系. 粘度系数是描述原行星盘的重要参数. 若考虑无粘性的盘, 则沟结构的深度

和宽度也会有相应的变化,这是因为行星与盘相互作用时,无粘性的盘更容易被行星影响.此外,标高也是描述原行星盘的重要参数,它衡量了盘的形状和物质分布.不同形状和物质分布的盘在演化过程中以及与行星相互作用的过程中都会展现出不同的演化特征^[43].

其次,描述行星的关键参数包括行星质量及由恒星质量决定的行星与恒星质量比.本文通过改变行星质量来研究行星与原行星盘之间的相互作用.针对沟结构的特性与恒星质量之间的关系,依据系外行星观测数据,本文仅研究了与特定恒星质量对应的行星盘.然而,亦可通过调整恒星质量参数,探究相同质量的行星与不同质量恒星所对应的原行星盘之间的相互作用,进而研究沟结构的特性与恒星质量之间的关系.尽管先前的研究将行星与恒星质量比视为一个固定参数来探讨原行星盘的特性与质量比之间的关系,但是原行星盘的演化以及行星与原行星盘的相互作用本身是一个非常复杂的物理过程.行星与恒星对于原行星盘的影响并不一定是相同的,可能表现出不同的作用规律.因此,恒星质量和行星质量应分别视为两个独立的参数进行研究.

除上述内容之外,还有许多地方值得进一步研究完善.例如,在本文的模型中,行星被放置在木星轨道处(5.2 au),并固定了行星轨道.然而,在系外行星数据中,行星轨道存在多种情况.另外,行星还存在轨道迁移现象,这些因素在研究原行星盘与行星的相互作用以及行星形成时都是需要考虑的.同时,行星的形成过程是一个长期且复杂的动态过程,涉及星子不断吸积,逐渐增大到足以探测或影响行星盘演化的规模.这一过程中包含很多演化机制.本文的模拟内容发现了演化过程中的一些规律,明确了行星与行星盘的相互作用的强度不仅可以通过相对面密度来描述,还可以利用持续时间以及沟的深度进行表征.然而,相较于盘的整体演化过程(通常在百万年级别),本文的模拟时间仅为原行星盘演化过程中的一小部分,且在原行星盘形成初期到行星形成的整个过程中也只占很小比例.因此,探索原行星盘演化和行星形成之间复杂的关系,明确行星系统形成的整体

过程仍然是一项艰巨的任务.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议,使得文章的质量有了显著的提高.感谢北京师范大学李正祥老师在此过程中的悉心指导和帮助.感谢北京交通大学肖凡同学在研究过程中给予的鼓励和图片处理上的帮助.

参考文献

- [1] Batalha N M, Borucki W J, Bryson S T, et al. *ApJ*, 2011, 729: 27
- [2] Torres G, Fressin F, Batalha N M, et al. *ApJ*, 2011, 727: 24
- [3] Günther M N, Pozuelos F J, Dittmann J A, et al. *NatAs*, 2019, 3: 1099
- [4] Ge J, Zhang H, Zang W C, et al. *arXiv*, 2022, 2206.06693
- [5] Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. *RAA*, 2022, 22: 7
- [6] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2004, 604: 388
- [7] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2004, 616: 567
- [8] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2005, 626: 1045
- [9] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2008, 673: 487
- [10] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2008, 685: 584
- [11] Alibert Y, Carron F, Fortier A, et al. *A&A*, 2013, 558: A109
- [12] Reffert S, Bergmann C, Quirrenbach A, et al. *A&A*, 2015, 574: A116
- [13] 潘梦睿, 刘倍贝. *天文学报*, 2023, 64: 60
- [14] Calvet N, D'Alessio P, Hartmann L, et al. *ApJ*, 2002, 568: 1008
- [15] Espaillat C, Calvet N, D'Alessio P, et al. *ApJ*, 2007, 670: L135
- [16] Andrews S M, Wilner D J, Espaillat C, et al. *ApJ*, 2011, 732: 42
- [17] Rodenkirch P J, Rometsch T, Dullemond C P, et al. *A&A*, 2021, 647: A174
- [18] Kusakabe N, Grady C A, Sitko M L, et al. *ApJ*, 2012, 753: 153
- [19] Dong R, Fung J. *ApJ*, 2017, 835: 38
- [20] Teague R, Bae J, Huang J, et al. *ApJ*, 2019, 884: L56
- [21] ALMA Partnership, Brogan C L, Pérez L M, et al. *ApJ*, 2015, 808: L3
- [22] Andrews S M, Wilner D J, Zhu Z, et al. *ApJ*, 2016, 820: L40
- [23] Huang J, Andrews S M, Dullemond C P, et al. *ApJ*, 2018, 869: L42
- [24] Long F, Pinilla P, Herczeg G J, et al. *ApJ*, 2018, 869:

- 17
- [25] Paardekooper S J, Dong R, Duffell P, et al. *ASPC*, 2023, 534: 685
- [26] Kanagawa K D, Tanaka H, Muto T, et al. *MNRAS*, 2015, 448: 994
- [27] Fung J, Shi J M, Chiang E. *ApJ*, 2014, 782: 88
- [28] Pyerin M A, Delage T N, Kurtovic N T, et al. *A&A*, 2021, 656: A150
- [29] Thun D, Kley W. *A&A*, 2018, 616: A47
- [30] Jordan L M, Kley W, Picogna G, et al. *A&A*, 2021, 654: A54
- [31] Chametla R O, Sánchez-Salcedo F J, Masset F S, et al. *MNRAS*, 2017, 468: 4610
- [32] Bergez-Casalou C, Bitsch B, Pierens A, et al. *A&A*, 2020, 643: A133
- [33] Bergez-Casalou C, Bitsch B, Raymond S N. *A&A*, 2022, 669: A129
- [34] Mundy L G, Looney L W, Erickson W, et al. *ApJ*, 1996, 464: L169
- [35] Hartmann L, Calvet N, Gullbring E, et al. *ApJ*, 1998, 495: 385
- [36] Hughes A M, Wilner D J, Qi C, et al. *ApJ*, 2008, 678: 1119
- [37] Andrews S M, Wilner D J, Hughes A M, et al. *ApJ*, 2009, 700: 1502
- [38] Andrews S M, Wilner D J, Hughes A M, et al. *ApJ*, 2010, 723: 1241
- [39] Williams J P, Cieza L A. *ARA&A*, 2011, 49: 67
- [40] Mann R K, Williams J P. *ApJ*, 2009, 699: L55
- [41] Lin D N C, Papaloizou J C B. *ApJ*, 1986, 309: 846
- [42] Masset F S, Papaloizou J C B. *ApJ*, 2003, 588: 494
- [43] Duffell P C. *ApJ*, 2020, 889: 16

Simulation of the Interaction between Planet and Protoplanetary Disk Based on FARGO3D

FENG Fu-yang LI Zheng-xiang

(School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

ABSTRACT Since the development of planetary science, more than 5000 exoplanets have been discovered. Understanding the evolution of protoplanetary disks is essential to clarify the classification of exoplanets and improve the efficiency of exoplanet detection. At the same time, exoplanet observations can be used to constrain and examine the physical parameters of the interaction between the protoplanetary disk and the planet. Therefore, in this paper, the surface density of the protoplanetary disk is linked to the star mass, combined with the distribution of exoplanet properties, and the interaction process between planets with different masses and specific protoplanetary disks is simulated by using the fluid dynamics code FARGO3D. Simulation results show that: (1) there is a power-law relationship between the relative surface density of the gap structure and the mass of the planet, and the power-law exponent has a strong correlation with the mass of the star; (2) there is a power-law relationship between the duration of the gap structure and the mass of the planet, and the power-law exponent has a weak correlation with the mass of the star; (3) there is a log-linear relationship between the width of the gap structure and the mass of the planet, and the power-law exponent has a weak correlation with the mass of the star. That is, the strength of the interaction between the planet and the protoplanetary disk is not only reflected in the relative surface density of the gap structure in the stable state, but also in the duration and width of the gap structure.

Key words protoplanetary disks, planet-disk interactions, planet-star interactions, exoplanets, FARGO3D