

引力波探测中惯性传感器的残余气体动力学特性机理研究

徐峰 王玉青* 张俊 王旭迪*
(合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009)

Study on Physical Mechanisms of Dynamical Characteristics of Residual Gases in Inertial Sensors Applied into Gravitational Wave Detection

XU Feng, WANG Yuqing*, ZHANG Jun, WANG Xudi*
(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract As the core system for gravitational wave detection in space, the analysis of the noise interference inducing mechanism of inertial sensors during in-orbit operation is a key scientific problem that needs to be solved urgently. The residual acceleration noise of the test mass (TM) in the inertial sensor is the largest noise source limiting the sensitivity of the detector. As a direct characterization of the residual gas noise, the analysis of the escape time dynamics of gas molecules under the complex topological configuration of inertial sensors needs to be solved urgently. In this paper, we firstly consider the differences in material properties and outgassing characteristics between the test mass block and the surrounding wall in a narrow space, and establish a mathematical model of inertial sensors under the complex topology of heterogeneous space; secondly, we analyze the quantitative constraints between the residual gas noise and escape time of gas molecules, and extract the core factors affecting the escape time; subsequently, we use Monte Carlo simulation as the entry point to obtain the dynamic characteristics of gas molecules diffusing out from the plate under the constraints, and then we use Monte Carlo simulation as the entry point for the analysis. Subsequently, Monte Carlo simulation technique is used as an entry point to obtain the simulation solutions for the escape time and the number of collisions required for the gas molecules to diffuse out from the plate. This paper finds that: different gas compositions and wall properties have a large impact on the residual gas noise; considering the retention time of gas molecules on the wall will substantially increase the escape time and decrease the collision frequency.

Keywords Gravitational wave detection, Inertial sensor inter-plate heterogeneity, Residual gas noise, Escape time, Number of surface collisions

摘要 作为空间引力波探测的核心系统,惯性传感器在轨运行时的噪声干扰诱发机制解析是迫切需要解决的关键科学问题。惯性传感器中检验质量(TM)的残余加速度噪声是限制探测器灵敏度的最大噪声源。作为残余气体噪声的直接表征手段,惯性传感器复杂拓扑构型下气体分子逃逸时间动态特性解析亟待解决。文章首先考虑了狭小空间下检验质量块与周围壁面间的材料属性、放气特性等差异性,建立了异质空间复杂拓扑结构下的惯性传感器数理模型;其次解析出残余气体噪声与气体分子逃逸时间之间的定量约束关系,提取了逃逸时间核心影响因素;随后以蒙特卡洛模拟技术为切入点,得到约束条件下气体分子从板间扩散出去所需的逃逸时间及碰撞次数的模拟解。文章研究发现:不同气体成分、壁面性质对残余气体噪声有较大影响;考虑气体分子在壁面的滞留时间会大幅增加逃逸时间、降低碰撞频率。

关键词 空间引力波探测 惯性传感器板间异质性 残余气体噪声 逃逸时间 表面碰撞次数

收稿日期: 2023-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(JZ2021ZDYF0596); 国家自然科学基金项目(62271187)

* 联系人: E-mail: yuqingw@hfut.edu.cn; wxudi@hfut.edu.cn

中图分类号: TB711

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202307010

2016年, LIGO(Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)^[1]宣布利用地面大型激光干涉天文台首次实现了引力波的直接探测, 为此荣获了2017年的诺贝尔物理学奖, 掀起了引力波研究的热潮。为了突破地面尺度限制, 获得更丰富的引力波源, 科学家们提出了空间引力波探测计划, 譬如: LISA(Laser Interferometer Space Antenna)空间引力波计划^[2]、天琴计划^[3]等。

在空间引力波探测中, 惯性传感器中的检验质量是引力波信号的敏感探头, 为不影响引力波探测, 它的残余加速度噪声需要小于 $3 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$, 这是一项巨大的挑战。引起检验质量噪声的因素有很多, 其中残余气体噪声是主要影响之一。在LISA空间引力波探测中, 检验质量(TM)与周围电极笼(GRS)之间的距离远远小于TM的几何尺寸, 且不同壁面之间的异质性等因素使得气体在与TM碰撞后不会立即飞出间隙, 而是会在TM与GRS间不停地来回碰撞, 导致残余气体阻尼效应增强, 形成压膜阻尼效应^[4]。在LISA引力波惯性传感器的研制中, 相关研究工作发现^[5]: 由残余气体阻尼产生的噪声应小于 $3 \times 10^{-16} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$; 在实际飞行测试中, 频率在1 mHz到10 mHz之间时, 检验质量的加速度噪声主要就是由残余气体分子引起的。

Bao等^[6]基于动能守恒定律和动量守恒定律建立了空气阻尼模型, 并且假设分子间的碰撞为弹性碰撞模型。然而, 鉴于非弹性碰撞是残余气体分子与表面相互作用的主导碰撞机制, Suijlen发展了上述空气阻尼模型, 提出了一种新的压膜阻尼模型, 通过平板间隔中的气体分子数密度守恒来列恒等式计算气体分子的阻尼力, 发现: 气体阻尼与气体分子在间隔中运动的时间(即: 逃逸时间)有关^[7]。随后, Dolesi^[8]依据先进LIGO实验进行了建模, 改进了逃逸时间的计算, 但将分子初始位置直接简化为圆形板的中心。Mao^[9]进一步推导了气体阻尼对逃逸时间的依赖关系, 考虑了气体分子从任意位置开始运动, 并研究了不同的约束形状。赵玉洁博士^[10]验证了压膜阻尼满足同时拥有镜面反射和漫反射模型, 通过拟合得到热适应系数与压强的关系。上述气体阻尼的研究中, 只是考虑了单一气体, 或是混合气体等效成单一气体, 且没有考虑分子碰撞后在面上停留的时间以及板间的异质性, 这些都是必

须要考虑的。

本文从理论上推导了简化LISA模型在限制空间下由气体分子布朗运动引起的残余加速度噪声表达式, 并推导了正方形板气体分子的逃逸时间, 用Monte Carlo(MC)方法模拟了多种气体在约束条件下的逃逸时间和碰撞次数, 并考虑了分子在面上的滞留时间、异性板、角度余弦的影响, 具体建模因素如表1所示。

表1 建模因素比较

Tab. 1 Comparison of modeling factors

模型	非弹性碰撞	逃逸时间	随机位置	混合气体	滞留时间
Bao ^[6]	○	○	○	○	○
Suijlen ^[7]	√	√	○	○	○
Dolesi ^[8]	√	√	○	○	○
Mao ^[9]	√	√	√	○	○
Xu	√	√	√	√	√

1 残余气体噪声模型

1.1 约束条件下气体分子噪声

在推导残余气体噪声之前, 需要对气体分子与壁面的碰撞过程做出如下假设^[11]: (1)分子与壁面完全非弹性碰撞, 碰撞后遵循余弦角分布的随机再发射; (2)气体温度视为均匀; (3)气体压力视为均匀的, 间隙压力不受来自检验质量或其他部件的局部放气的影响; (4)由于LISA要求腔体内真空度达到 10^{-5} Pa , 所以忽略气体分子间相互作用力。

由于LISA中真实GRS结构过于复杂, 本文中简化为立方体结构。如图1所示, 假设TM位于GRS中心位置, TM与GRS在 x 、 y 、 z 轴上的间隙距离分别为 d_x 、 d_y 、 d_z 。当TM沿 x 轴方向以速度 $v = \dot{x}(t)$ 运动时, x 轴的间隙会被挤压或拉伸, 假设间隙变化量为 x 。由于间隙中的气体分子数密度守恒, 分子会从被挤压面流向拉伸面, 从而增强气体分子与壁面的碰撞概率。

根据以上描述, 可以得到气体分子数密度改变率的恒等方程^[12]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta n}{n} \right) = -\frac{1}{\tau} \frac{\Delta n}{n} - \frac{d}{dt} \left(\frac{x}{d_x} \right) \quad (1)$$

式中: n 是分子密度的平均值; τ 是分子扩散出 x 轴间隙所需要的时间, 称为逃逸时间, 是关于 d_x 的

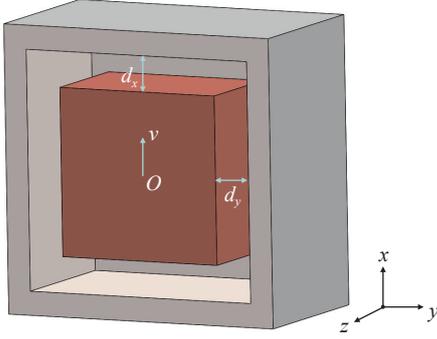


图1 GRS-TM 三维位置示意图

Fig. 1 GRS-TM three-dimensional position diagram

函数。

在频域中 TM 速度表示为 $v = i\omega x$, 代入式(2)得到^[9]:

$$\frac{\Delta n}{n} = -\frac{x}{d_x} \frac{i\omega\tau}{i\omega\tau + 1} \quad (2)$$

将式(2)与理想气体定律 $P = nk_B T$ 结合, 作用在与 x 轴正交面上的气体阻尼力可表示为^[9]:

$$F_x = -\frac{PA\tau}{d_x} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} v - \frac{PA}{d_x} \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} x \quad (3)$$

作用于与 x 轴正交的 TM 表面上的剪切阻尼力可计算为^[9]:

$$F_{y/z} = -PA \left(\frac{m_0}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} v \quad (4)$$

如果 $\omega \gg 1/\tau$, 那么 TM 运动速度太快, 分子来不及逸出间隙, F_x 变成一个弹性力。当 $\omega \ll 1/\tau$, F_x 就是一个与频率无关的阻尼力。将式(3)与涨落耗散理论相结合, 可得到力噪声^[9]:

$$S_F = 4k_B T \left(-\frac{2\partial F_x}{\partial v} \right) = 8k_B TPA \left[\frac{\tau(d_x)}{d_x} + \left(\frac{2m_0}{\pi k_B T} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

除了对 TM 上的力噪声进行分析, 还要计算 TM 上的扭矩噪声。当 TM 以速度 $v = \dot{\theta}r$ 沿 z 轴旋转时, 平行于 z 轴的表面将受到增强的阻尼力的影响, 其中 r 为表面上任何一点到 z 轴的距离。经过简单的积分运算, 可得到扭矩噪声^[9]:

$$S_N = 4k_B T \left(-\frac{2\partial N}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{2}{3} k_B TPA^2 \left[\frac{\tau(d_x)}{d_x} + \frac{\tau(d_y)}{d_y} + \left(\frac{2m_0}{\pi k_B T} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

1.2 逃逸时间计算

本文仿真采用两块面积相等的正方形板, 如图 2 所示, 假设边长为 $2a$, 在板间距离 $d \ll a$ 的情况

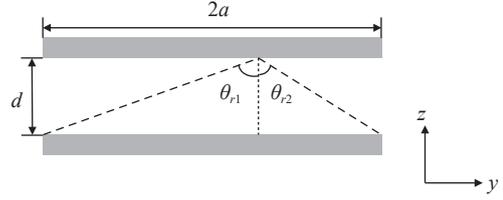


图2 分子碰撞示意图

Fig. 2 Schematic diagram of molecular collisions

下, 经过多次碰撞后, 分子会从边界扩散出板, 称总的碰撞的时间为逃逸时间。

在笛卡尔坐标系下, 出射分子的速度分布可以写成^[9]:

$$P(\vec{v}) d^3\vec{v} = \frac{v_z}{2\pi v_T^4} \exp\left(-\frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}{2v_T^2}\right) dv_x dv_y dv_z \quad (7)$$

对 v_x 从 $-\infty$ 到 ∞ 进行积分得到:

$$P(\vec{v}) d^2\vec{v} = \frac{v \cos\theta}{\sqrt{2\pi} v_T^3} \exp\left(-\frac{v^2}{2v_T^2}\right) v dv d\theta \quad (8)$$

分子逃逸出来之前与板的碰撞次数可以估算为 $\bar{R}_r^2 / (4\langle r_r^2 \rangle)$, 其中 \bar{R}_r^2 是矩形上任意点到边缘上任意点的距离在轴上投影的均方值, $\langle r_r^2 \rangle$ 是分子发生连续两次碰撞的产生的侧向位移的均方值^[9]。

$$\bar{R}_r^2 = \int_{-a}^a \frac{(a-x)^2}{2a} dx = \frac{4a^2}{3} \quad (9)$$

$$\langle r_r^2 \rangle = \int_{-a}^a \frac{dx}{2a} \int_0^\infty v dv \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \frac{v \cos\theta}{\sqrt{2\pi} v_T^3} e^{-\frac{v^2}{2v_T^2}} (d \tan\theta)^2 \quad (10)$$

$$= d^2 \left[2\zeta - 2\sqrt{1+\zeta^2} + \ln(1 + \sqrt{1+\zeta^2}) - \ln\zeta \right]$$

其中 $\zeta = \frac{d}{2a}$ 。分子连续经历两次碰撞的概率为^[9]:

$$P_r = \int_{-a}^a \frac{dx}{2a} \int_0^\infty v dv \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{v \cos\theta}{\sqrt{2\pi} v_T^3} e^{-\frac{v^2}{2v_T^2}} d\theta \quad (11)$$

$$= \sqrt{1+\zeta^2} - \zeta$$

$$\langle t_r \rangle = \int_{-a}^a \frac{dx}{2a} \int_0^\infty v dv \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \frac{v \cos\theta}{\sqrt{2\pi} v_T^3} e^{-\frac{v^2}{2v_T^2}} \frac{d}{v \cos\theta} \quad (12)$$

$$= \frac{d}{\sqrt{2\pi} v_T} \left[2\arctan\frac{1}{\zeta} + 2\zeta \ln\zeta - \zeta \ln(1 + \zeta^2) \right]$$

则逃逸时间为^[9]:

$$\tau = \frac{a}{\sqrt{2\pi} v_T} \frac{2\arctan\left(\frac{1}{\zeta}\right) + 2\zeta \ln\zeta - \zeta \ln(1 + \zeta^2)}{\zeta \left(\sqrt{1+\zeta^2} - \zeta \right) \left[2\zeta - 2\sqrt{1+\zeta^2} + \ln(1 + \sqrt{1+\zeta^2}) - \ln\zeta \right]} \quad (13)$$

若考虑气体分子在板上的滞留时间, 逃逸时间的计算还应加上单次的滞留时间与碰撞次数的

乘积。

2 仿真方法与结果分析

2.1 MC 仿真方法

由于 LISA 引力波探测要求整体真空度小于 10^{-5} , 板间气体流态处于分子流, 几乎可以忽略气体分子之间的相互作用, 只考虑气体分子与板的碰撞^[13]。本文采用 MATLAB 软件对板间分子运动进行 MC 仿真, 通过对单个分子的运动轨迹进行研究, 记录每次碰撞所需的时间以及横向位移等数据。

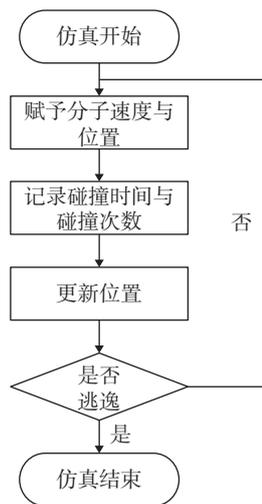


图3 MC 算法流程图

Fig. 3 MC algorithm flowchart

具体蒙特卡洛模拟流程如图3流程图所示。首先在板间给分子一个随机初始位置 (x_0, y_0, z_0) , 分子的速度按照麦克斯韦-玻尔兹曼分布。在每次碰撞之后, 记录碰撞所需的时间和碰撞次数, 更新分子位置, 记录分子在 x - y 平面发生的横向位移。然后依据分子的新坐标判定分子是否已经逃逸出平板距离, 如果已经逃逸, 就记录总时间和总碰撞次数; 如果没有逃逸, 就按照余弦定律给分子一个新的速度, 继续仿真并重复上述步骤。每次碰撞时, 考虑气体分子在板上停留的时间。一共重复模拟 10^4 个分子, 最终得到平均逃逸时间和平均碰撞次数。

余弦定律是指碰撞于固体表面的分子, 飞离表面的方向与原来的方向无关, 并按与表面法线方向所成角度 θ 的余弦而分布。其表达式为^[14-16]:

$$dN_{\theta} = \frac{n\vec{v}}{4\pi} \cos\theta \cdot d\omega \cdot ds \quad (14)$$

式中 $d\omega$ 是角度 θ 与 $\theta + d\theta$ 的两锥面间所包括的立

体角。为了解释此定律, 克努曾提出了“吸附层”假说^[13], 认为凡是与表面碰撞的分子都会在表面被暂时吸附, 停留一段时间后再重新逸出, 这段时间就叫做滞留时间, 重新逸出后速度自然与原方向无关。

滞留时间的存在使得分子在碰撞之后会在固体表面吸附一段时间, 单位时间内单个分子与固体表面的碰撞频率就会降低, 从而对气体噪声产生影响。克努曾曾经提出一种可靠的间接测量滞留时间的方法^[17], 是基于气体分子在低压下不会互相碰撞时, 通过狭窄毛细管的速度测定。分子流通过毛细管时, 分子碰撞管壁停留一段时间, 然后按余弦定律向各个方向重新蒸发。克努曾计算出分子通过长度为 l 直径为 d 的毛细管所需的平均时间, 其值为:

$$\bar{t} = \frac{l^2}{2d\bar{u}} + \frac{l^2\tau_R}{2d^2} \quad (15)$$

其中 \bar{u} 为分子的平均速度。式(14)中的第一项是由于再蒸发的余弦定律产生的, 第二项则是由滞留时间 τ_R 导致的。测得 \bar{t} 后, 反推出:

$$\tau_R = \frac{2d^2}{l^2} \bar{t} - \frac{d}{\bar{u}} \quad (16)$$

克努曾实验^[17]用的气体分子为氩气, 在 90 K 时, τ_R 为 3.1×10^{-5} s, 在 78 K 时, τ_R 为 75×10^{-5} s。用氮气进行实验, 得出氮气在玻璃上的滞留时间也有相同的数量级。因此, 在本文仿真中, 滞留时间采用 1×10^{-5} s, 即每次分子与固体壁面碰撞都会在表面停留 1×10^{-5} s。

在先进 LIGO 的设计中, 采用了半径 17 cm 的圆形检验质量, 距离检验质量端面 5 mm 的位置有同样面积大小的反应质量, 两个端面间的距离远远小于端面的半径, 符合压膜阻尼的产生条件^[4]。在 MAO 等^[9]的研究中, 已经证明了在满足 $d \ll R$ 时, 端面的几何形状的差异可以忽略不计, 所以本文选择与 LIGO 检验质量端面面积相同的正方形板进行仿真。由于引力波测量装置真空度要求都在高真空, 腔室内的气体分子主要是水和氢气, 水与氢气的量约为 5:3, 温度为 294 K, 板间距离从 10^{-4} ~ 10^{-1} m 之间对数均匀取 13 个值。

2.2 结果分析

2.2.1 混合气体

如图4所示, 在不考虑滞留时间的情况下, 气体分子的平均逃逸时间随板间距离 d 的增大而减小,

逐渐趋于一个稳定值。这是由于当板间距离变大时, 气体分子与板的碰撞次数减少, 更容易逃逸出间隙, 最终趋于稳定值是因为压膜阻尼产生的条件 $d \ll R$ 不再满足, 从有限空间下的碰撞变成无限空间下的气体分子碰撞^[18], 即气体分子与板碰撞一次就逃逸不再碰撞。

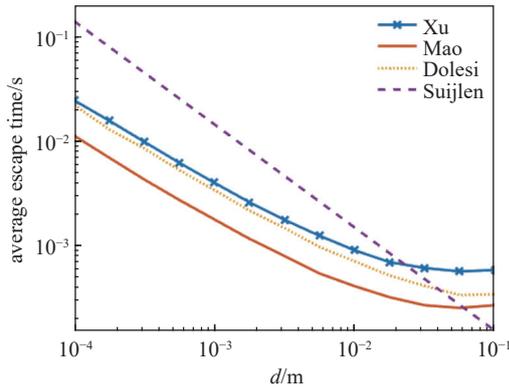


图4 混合气体逃逸时间仿真结果

Fig. 4 Simulation results of gas mixture escape time

本文仿真采用的是混合气体分子, 水分子与氢气分子比例为 5:3, 而 Mao 等^[9]的研究中认为高真空下氢气是主要残余气体, 所以只研究了单一气体。但是根据 LISA Pathfinder 的研究, 如表 2 所示, 引力波探测装置内并不只有氢气, 甚至氢气不是主要残余气体, 残余气体中最主要的成分仍然是水分子, 其次是氢气分子, 除此之外还有氮气、氧气、二氧化碳等等。由于本文采用了混合气体作为仿真对象, 平均气体分子的质量变大, 速度减小, 逃逸出间隙时间更长, 更符合实际。

表 2 LISA 探路者气体成分要求^[19]

Tab. 2 Gas load requirements for LISAPathfinder

Item	Hydrogen	Water	Nitrogen	Oxygen	Carbon Oxides	Total
Enclosure	11	18	4	1	1	35
Caging	14	22	2	1	1	40
Housing	2	5	1	1	1	10
Test Mass	1	1	1	1	1	5
Balance	1	1	1	1	1	5
Margin	1	3	1	-	-	5
Total	30	50	10	5	5	100

从图 5 可以看出, 板间距离越近, 气体分子离开间隙碰撞的次数越多。混合气体只改变仿真气体分子的质量、速度和逃逸时间, 并不会改变气体

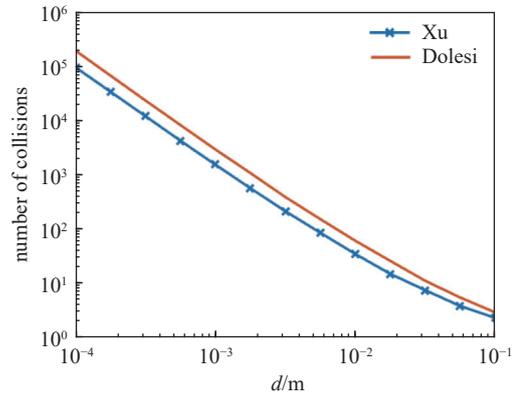


图5 混合气体碰撞次数仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the number of gas mixture collisions

分子与板的碰撞次数。在碰撞次数相同的情况下, 气体分子的逃逸时间越长, 气体分子与板碰撞的频率就越低, 因此混合气体因素会对残余气体噪声产生一定影响。

根据式(4), 在 LISA Pathfinder 引力波探测其中, 对于 2 kg 的检验质量在 293 K、水分子与氢气分子比例为 5:3 情况下, m_0 约为 12 amu, 估计残余气体阻尼产生的加速度噪声为:

$$S_a^{\frac{1}{2}} = 1.11 \times 10^{-15} \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{p}{10^{-6} \text{ Pa}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{12 \text{ amu}}{30 \text{ amu}} \right)^{\frac{1}{4}} < 3 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2} \quad (17)$$

则惯性传感器中的压强 p 应低于 $1.15 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 才能满足由残余气体阻尼产生的噪声小于 $3 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2 / \text{Hz}^{1/2}$ 的预算。

2.2.2 滞留时间

在混合气体条件下, 仿真中加上滞留时间效应, 结果如图 6 所示。由于只是增加了滞留时间效应, 对分子在板间的运动并未产生影响, 所以碰撞次数没有改变。逃逸时间总体趋势仍是随板间距离增加而减小, 但考虑滞留时间的情况下的逃逸时间数值比不考虑要大得多, 且降低的趋势更陡。这是因为考虑滞留时间之后, 由于滞留时间为定值, 气体分子在板上总的滞留时间依赖于碰撞次数, 而逃逸时间是气体分子在板间运动的时间与总的滞留时间的和, 所以考虑了滞留时间之后, 逃逸时间很大程度上依赖于碰撞次数。

2.2.3 异性板碰撞

由于引力波探测装置中, GRS 和 TM 的材料不

同,表面处理也不一样,而且在太空极端环境下,两个板间存在一定温差,这些不同点会给与板碰撞的气体分子不同的反射速度^[20]。本仿真将其中一块板的碰撞速度分布保持不变,将另一块板碰撞后的气体分子速度分布除以 $\sqrt{2}$,旨在研究不同板对残余气体分子噪声的影响。结果如图7所示,由于只是改变了其中一个板的速度分布,气体分子在板间的运动时间更长,但是并不会改变气体分子的运动轨迹,因此逃逸时间比相同板更长,而碰撞次数没有改变。随着间距增大到 10^{-2} m以上,逐渐不符合 $d \ll R$ 的假设,仿真结果失去规律。

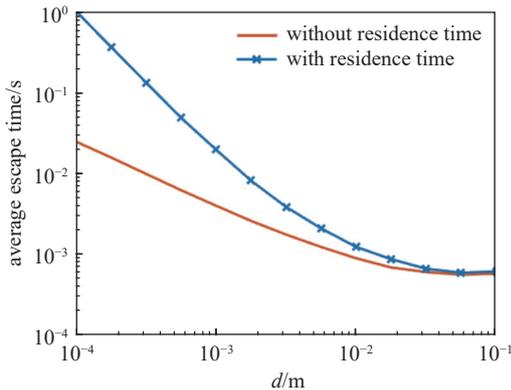


图6 滞留时间仿真结果

Fig. 6 Residence time simulation results

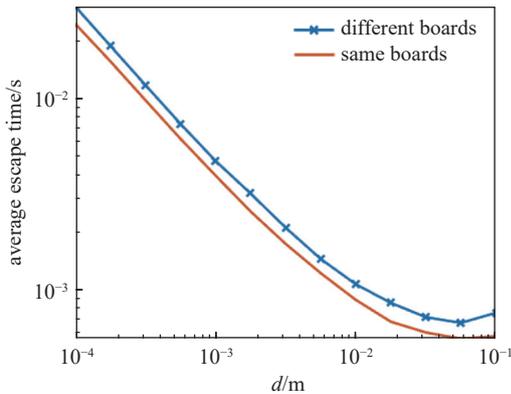


图7 异性板仿真结果

Fig. 7 Different boards simulation results

2.2.4 角度余弦

在仿真中考虑角度余弦之后,即每次气体分子与壁面碰撞后,气体分子的速度不再按麦克斯韦分布随机赋值,而是按照余弦定律赋予随机方向。仿真结果如图8、图9所示。在考虑角度余弦的情况下,气体分子逃逸出间隙所需的碰撞次数是不考虑的7-8倍,所需的时间也随着碰撞次数增加而增加,

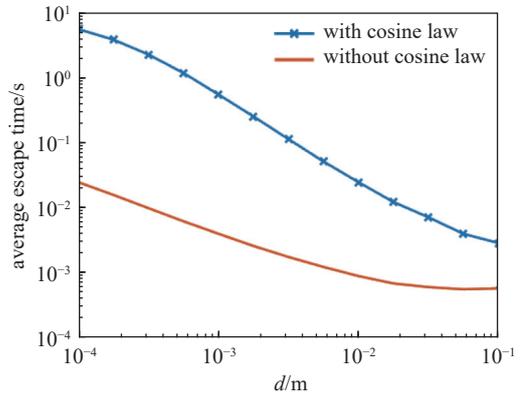


图8 角度余弦逃逸时间仿真结果

Fig. 8 Cosine law escape time simulation results

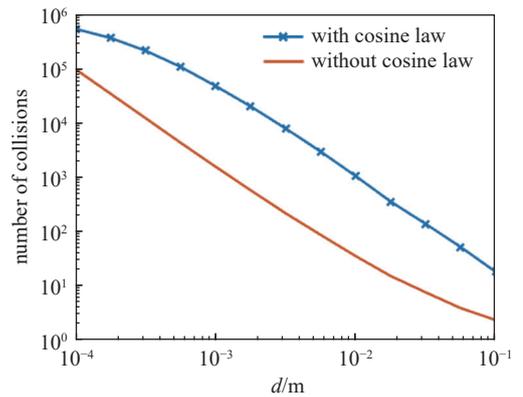


图9 角度余弦碰撞次数仿真结果

Fig. 9 Simulation results of the number of collisions by the cosine law

整体趋势仍随着间距减小而增大,但是与不考虑相比,不同点在于间距较大时,线型较为陡峭,而随着间距小于 10^{-3} m,逃逸时间不再按直线增加。

3 结论

本文通过理论推导完善了残余气体噪声模型,得出了残余气体噪声与气体分子逃逸时间之间的关系,推导了逃逸时间的计算公式,通过MC仿真方法探究了残余气体分子在正方形板间的逃逸时间与板间距离的关系,主要考虑了混合气体、气体分子在碰撞时的滞留时间、异性板和角度余弦等因素,发现逃逸时间与气体分子的成分有关,残余气体噪声随平均分子质量线型增加,当气体组分为水分子与氢气分子比例为5:3情况下,惯性传感器中压强 p 应低于 1.15×10^{-5} Pa,才能满足LISA中由残余气体阻尼产生的噪声小于 3×10^{-15} m/s²/Hz^{1/2}的预算;考虑滞留时间会在小间隙时大幅增加气体分子

的逃逸时间, 增加的逃逸时间与碰撞次数成正比, 但对碰撞次数本身没有影响, 所以单个气体分子的碰撞频度会大幅降低; 异性板也会对逃逸时间造成影响, 但是只考虑不同板碰撞后速度不同的影响是线性的、可计算的, 残余气体噪声随之线性变化; 角度余弦的加入会对逃逸时间和碰撞次数都产生较大影响。由于现在取的滞留时间值为定值, 且未考虑碰撞损失, 后续将对滞留时间、碰撞损失等进行进一步仿真设计。

参 考 文 献

- [1] Martynov D V, Hall E D, Abbott B P, et al. Sensitivity of the advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy[J]. *Physical Review D*, 2016, 93(11): 112004
- [2] Dolesi R, Bortoluzzi D, Bosetti P, et al. Gravitational sensor for LISA and its technology demonstration mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, 20(10): S99
- [3] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010
- [4] Bao M, Yang H. Squeeze film air damping in MEMS[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2007, 136(1): 3–27
- [5] Schumaker B L. Disturbance reduction requirements for LISA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, 20(10): S239
- [6] Bao M, Yang H, Yin H, et al. Energy transfer model for squeeze-film air damping in low vacuum[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, 12(3): 341
- [7] Suijlen M A G, Koning J J, van Gils M A J, et al. Squeeze film damping in the free molecular flow regime with full thermal accommodation[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2009, 156(1): 171–179
- [8] Dolesi R, Hueller M, Nicolodi D, et al. Brownian force noise from molecular collisions and the sensitivity of advanced gravitational wave observatories[J]. *Physical Review D*, 2011, 84(6): 063007
- [9] Mao J J, Tan Y J, Liu J P, et al. Residual gas damping noise in constrained volume in space-borne gravitational wave detection[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2023, 40(7): 075015
- [10] Zhao Y J. Experimental study on the gas damping effect in the space inertial sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2023(赵玉洁. 空间惯性传感器中气体阻尼效应实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023(in chinese))
- [11] Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, et al. Increased Brownian force noise from molecular impacts in a constrained volume[J]. *Physical review letters*, 2009, 103(14): 140601
- [12] Li X. Studying the influence of squeeze-film damping testing the Newtonian inverse-square-law at close range in using a torsion pendulum[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015(李霞. 扭秤检验近距离牛顿反平方定律实验中的压膜阻尼影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015(in chinese))
- [13] Da D A. Vacuum Design Handbook (3rd Edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004(达道安. 真空设计手册(第3版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004(in chinese))
- [14] Feres R, Yablonsky G (2004). Knudsen's cosine law and random billiards. *Chemical Engineering Science*, 59(7), 1541–1556
- [15] Greenwood J. The correct and incorrect generation of a cosine distribution of scattered particles for Monte-Carlo modelling of vacuum systems[J]. *Vacuum*, 2002, 67(2): 217–222
- [16] Celestini F, Mortessagne F. Cosine law at the atomic scale: toward realistic simulations of Knudsen diffusion[J]. *Physical Review E*, 2008, 77(2): 021202
- [17] Liu Z H, Wang G T, Yang K Z. The dynamical character of adsorption[M]. Beijing: Science Press, 1964(柳正辉, 王果庭, 杨孔章. 吸附的动力学特性 [M]. 北京: 科学出版社, 1964(in chinese))
- [18] Okutomi K, Akutsu T, Ando M, et al. Residual Gas Noise in the Test-mass Module for DECIGO Pathfinder[C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2015, 610(1): 012040
- [19] Nappo F, Desiderio D, Franzoso A, et al. Experience and design drivers for the Inertial Sensor on the LISA Pathfinder Mission[C]// *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2006, 873(1): 539-547
- [20] Ke J, Luo J, Tan Y J, et al. Influence of the residual gas damping noise in the test of the gravitational inverse-square law[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(20): 205008