

专题:创刊40周年纪念专刊

分子真空泵研究进展

王晓冬* 张鹏飞 李 博 匡永麟 黄海龙 巴德纯
(东北大学 机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

Research Progress of Molecular Vacuum Pump

WANG Xiaodong*, ZHANG Pengfei, LI Bo, KUANG Yonglin, HUANG Hailong, BA Dechun
(School of Mechanical Engineering and Automation, Shenyang 110819, China)

Abstract Molecular vacuum pump is a kind of vacuum devices for producing and maintaining clean high/ultra-high vacuum conditions, and widely used in industrial and scientific applications duo to its high operating reliability and pumping performances. Recent years, the development of numerical control machining, active magnetic bearings and simulation methods, make it possible to improve the pumping performances of molecular vacuum pump even further. This paper summarizes the research progress based on the basic issues of molecular vacuum pump design and prospects for future developments of the prediction accuracy of pumping performances at high blade speeds.

Keywords Molecular vacuum pump, Pumping performance, Algorithm improvement, Structure optimum, Research review

摘要 分子真空泵作为重要的清洁高真空、超高真空获得设备,因其工作稳定可靠,在分子流态下具有很好的抽气效率,在科学仪器、工业生产设备中得到广泛应用。近年来,随着数控加工手段、磁悬浮轴承技术、模拟计算方法的广泛采用,为分子真空泵性能的进一步提升创造了条件。本文针对分子真空泵设计计算中涉及的基础性问题,以结构改进和抽气性能计算为主要内容,对分子真空泵的研究进展和未来发展进行了总结与展望,供研究者和生产者参考。

关键词 分子真空泵 抽气性能 算法改进 结构优化 研究综述

中图分类号:TB752.27

文献标识码:A

doi:10.13922/j.cnki.cjvst.202108003

分子真空泵(以下简称分子泵)因其工作稳定可靠,在分子流态下具有很好的抽气效率,已经成为清洁高真空、超高真空应用领域的主流获得设备,在科学仪器、工业生产设备中得到广泛应用^[1-3]。近年来,在国家重大科学仪器设备开发专项等的支持下,分子泵在设计理论与方法^[4-6]、磁悬浮轴承与控制技术^[7-10]、转子系统加工制造与装配技术^[11-14]、性能检测与故障诊断技术^[15-17]、转子系统的动力学分析^[18-21]等方面得到快速发展,为分子泵的技术进步和更广泛应用起到了重要的推动作用。

本文从分子泵设计的基础问题出发,针对分子泵高转速的特点,介绍了分子泵抽气性能计算方法和结构设计方面的研究进展,对分子泵研究的未来

发展进行了展望。

1 分子泵的基本设计问题

分子泵按结构和工作原理可分为涡轮分子泵、牵引分子泵和复合分子泵三种。其中,涡轮分子泵由多级动静相间排列的涡轮叶列组成(图1(a)),在分子流态下对气体具有较大的抽速;牵引分子泵抽速小、压缩比高,独立设计和使用的较少,常作为牵引级,设置在复合分子泵的出口侧;复合分子泵由涡轮级和牵引级组合而成,可分为涡轮-筒式和涡轮盘式复合分子泵两大类(图1(b)),以发挥涡轮级抽速大、牵引级压缩比高的优点,在工程中得到广泛应用。

收稿日期:2021-08-04

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ130429)

* 联系人:E-mail: xdwang@mail.neu.edu.cn

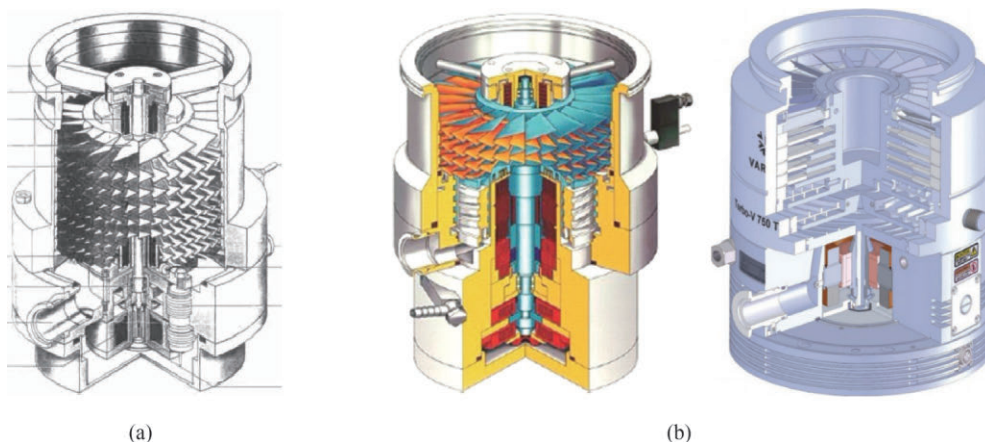


图1 分子泵结构组成。(a)涡轮分子泵。(b)复合分子泵

Fig.1 Construction of molecular pump.(a)Turbo-molecular pump.(b)Hybrid-molecular pump

分子泵转子系统可由滚珠轴承、永磁轴承-滚珠轴承和电磁悬浮轴承等方式支撑。由于现代分子泵越来越多地采用了磁悬浮轴承,轴承无需润滑,分子泵的安装方向也不再受到限制,轴承摩擦阻力很小,因此,分子泵的转子转速和抽气效率得到大幅提高。

以下以广泛应用的复合分子泵为例,说明分子泵的基本设计方法。

1.1 涡轮级设计计算方法

涡轮叶列之所以具有抽气能力,是因为其高速旋转下对气体分子的动量传递,使得分子通过涡轮叶列正向传输几率(M_{12})与反向传输几率(M_{21})存在差异,特别是在分子流态下,高速运动的涡轮叶列对气体分子的动量传递充分,抽气效率很高。涡轮叶列的最大抽速 $S_{\max}$ 和最大压缩比 $K_{\max}$ 由下式计算

$$S_{\max} = \frac{1}{4} \bar{v} (M_{12} - M_{21}) A \quad (1)$$

$$K_{\max} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\max} = \frac{M_{12}}{M_{21}} \quad (2)$$

式中, $\bar{v}$ 为气体分子热运动平均速率, A 为吸气面积, p_1 、 p_2 分别为涡轮叶列入口、出口侧的气体压力, M_{12} 、 M_{21} 分别为气体通过涡轮叶列的正向和反向传输几率。

从式(1)、(2)中可知,涡轮叶列的抽气能力主要由气体分子正、反向传输几率决定,因此,涡轮叶列的传输几率成为涡轮级抽气性能设计计算中的基础性问题。

传输几率与涡轮叶列的几何参数(节弦比 a/b 、叶片倾角 α ,如图2所示)、涡轮叶片线速度以及气

体的种类有关。一般地,增大涡轮叶片的节弦比和倾角,抽速会相应增加、压缩比会相应减小,增大涡轮叶列转速,涡轮叶列的抽气能力会得到提高。采用磁悬浮轴承的分子泵,转速高、抽气性能好,成为分子泵重要的发展方向,已经得到普遍关注和广泛应用。

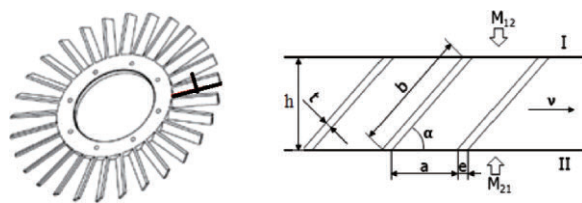


图2 单级涡轮叶列结构及其展开图

Fig.2 Single-stage turbine blade and its expanded view

计算涡轮叶列传输几率时,通常基于麦克斯韦速度分布入射条件、壁面漫反射出射条件,一般采用气体分子运动跟踪和传输统计的方法进行计算^[22-24]。研究者一般通过自编程序计算不同涡轮叶列倾角 α 、节弦比 S_0 、速度比 C_0 (涡轮叶列线速度与气体分子热运动速度之比)条件下的正、反向传输几率^[25-28]。近年来,有些商业软件也具有分子跟踪、统计计算模块,对于涡轮叶列抽气特性计算的工程化推广具有积极推动作用。

为满足涡轮级抽气特性的需求,在涡轮级设计时,涡轮叶列按照动静相间的排列方式,形成涡轮叶列组。其中,泵入口测的几级涡轮叶列设计成大倾角、大节弦比、大抽气面积的涡轮叶列作为抽气级,保证泵的抽速;泵出口测的多级涡轮叶列设计成小倾角、小节弦比涡轮叶列作为压缩级,以提高

涡轮级的压缩比;在抽气级、压缩级中间段设置过渡级,设计适当的叶片倾角、节弦比,以匹配抽气级、压缩级的抽气特性。设计合理的涡轮组合叶列,在分子流态下具有很好的抽气性能,其性能可采用式(1)、(2)进行计算,此时, M_{12} 、 M_{21} 分别对应气体分子通过组合叶列的正、反向传输几率 P_n 、 Q_n 。组合叶列传输几率的简化计算公式为

$$P_n = \frac{P_{n-1} \cdot P_1}{1 - (1 - P_1)(1 - Q_{n-1})} \quad (3)$$

$$Q_n = \frac{Q_{n-1} \cdot Q_1}{1 - (1 - P_1)(1 - Q_{n-1})} \quad (4)$$

式中, P_n 、 Q_n 分别表示涡轮组合叶列正、反向传输几率, P_1 、 Q_1 分别表示单级涡轮叶列正、反向传输几率。

1.2 牵引级设计计算方法

多槽筒式牵引级展开如图3所示。考虑气体压强作用下牵引通道间的气体分子泄漏、沿牵引转子、定子间隙的气体分子返流,分子流态下牵引级的抽气性能由下式计算

$$S_m = (2\pi r - \gamma l)h \frac{s}{1 + s^2} \left(\pi r n - \frac{h\gamma}{4\pi r\theta} \cdot \frac{k_m - 1}{k_m} \right) \quad (5)$$

$$K_m = k_m \frac{H}{(2\pi r/\gamma)^s} \quad (6)$$

式中, h 为牵引槽深度, γ 为牵引槽数量, r 为牵引转子半径, H 为牵引转子高度, n 为牵引转子转数, l 为

相邻牵引槽间的宽度, k_m 为相邻牵引槽间的压缩比,与牵引转子-定子间隙、牵引槽螺旋升角等有关, s 为牵引槽螺旋升角的正切, θ 为与气体种类相关的系数。

从式(5)、(6)中可见,牵引级的抽气性能与牵引槽几何参数(槽深、槽宽、螺旋升角)、牵引转子尺寸、转速以及转子-定子间隙相关。

为了提高牵引通道的抽气效率,牵引通道应设计成入口面积较大、出口面积较小的结构形式。结合牵引槽加工工艺,一般地,牵引级多采用等槽宽、变槽深、多抽气通道的设计方法,保证入口侧具有一定的抽速、出口侧具有较大的压缩比,并有效地抑制抽气通道间的气体分子返流。气体分子沿牵引转子-定子间隙由出口侧向入口侧的泄漏量是影响牵引槽抽气性能的重要因素,间隙设计时要考虑转子加工、装配误差以及转子工作状态下的变形量等,兼顾转子系统工作安全可靠和抽气性能。在牵引级设计时,可以通过改变牵引槽螺旋升角来方便地调节其压缩比。合理设计的牵引通道可以获得较优的抽气性能。

分子泵上述结构设计准则和抽气性能计算方法是开展其结构设计和性能计算的基础。

2 分子泵研究进展

近年来,随着计算机技术的发展,数值模拟方法在分子泵抽气特性的分析中发挥了越来越重要的作用,成为分子泵设计的重要工具,带动了分子泵抽气性能计算能力、计算精度的持续改进,为分子泵的结构改进和性能优化提供了更大空间。

2.1 分子泵抽气性能算法改进

2.1.1 分子泵入口气体分子入射条件的修正

在计算分子泵抽气特性时,气体分子假设为麦克斯韦速度分布,且入射分子数密度在涡轮叶列抽气面上均匀分布。当来自大空间的气体分子传输至分子泵入口时,上述假设条件会得到满足。研究表明,分子流态下气体分子经过管道时,会出现气体分子向管路中心聚集的束流效应现象和角度发散现象^[29-31]。图4所示为气体分子经过长度为 L 、直径为 D 的分子泵入口管道,形成的分子数相对密度沿齿长方向上的分布,以及入射角度在水平和垂直方向上的分布^[31]。从图4中可见,当分子泵入口连接管道时,第一级涡轮叶列气体分子的入射条件不

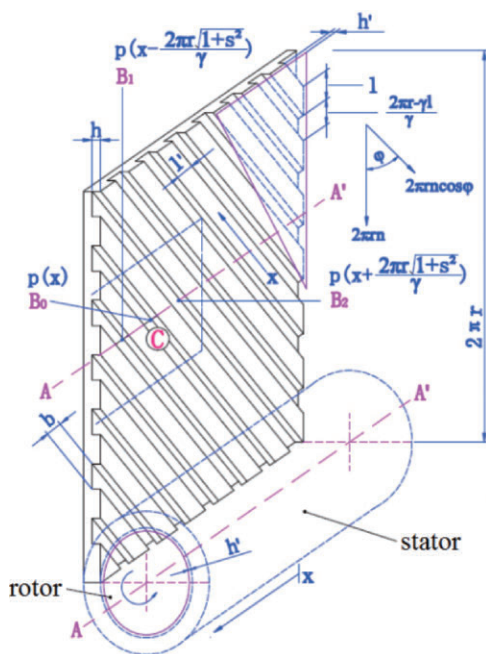


图3 多槽牵引级结构及其展开图

Fig.3 Mut-channel drag-stage and its expanded view

再与计算模型相一致,气体分子向涡轮叶列中心的聚集不利于气体分子的抽出。为此,研究者通过分

子泵入口条件修正和结构改进,提出了解决这一问题的结构设计思路^[32]。

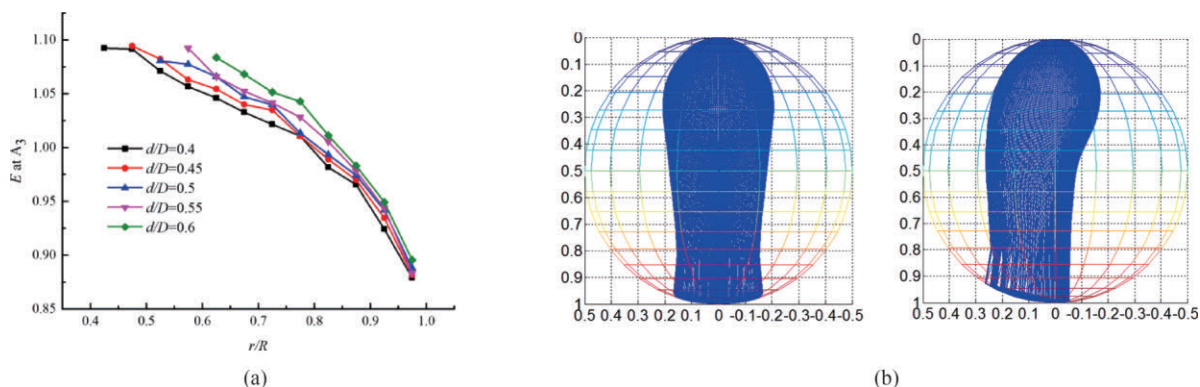


图4 分子泵入口管道对气体分子入射条件的影响^[31]。(a)分子数相对密度沿涡轮齿长方向上的分布。(b)气体分子入射角度在水平方向和垂直方向上的分布

Fig.4 The density and angle distributions of inlet molecule^[31]. (a)relative density distribution along the radial direction. (b)angle distribution at different directions

2.1.2 涡轮叶列抽气性能的积分中值算法

在涡轮叶列抽气特性计算时,由于涡轮叶列的几何参数和线速度沿齿长方向是变化的,为简化计算,常常采用如图2(a)所示的二维简化计算模型,叶列的抽气性能按涡轮齿长几何中心处的倾角、节弦比、速度比进行计算,可称为几何中值算法。几何中值算法获得的计算结果会有一定误差。一种改进的积分中值算法^[33],即将涡轮叶列沿齿长方向分成若干段,先分别计算每段叶齿的抽气性能,然后再积分得到整体叶列的抽气性能的方法,这样

可以提高涡轮叶列抽气特性的计算精度。图5所示为积分中值计算方法得到何氏系数、压缩比沿齿长方向的分布^[34]。从图5中可见,涡轮叶列抽气性能沿齿长方向的非线性分布会导致几何中值算法的计算误差。计算结果与实验数据对比表明,几何中值算法比积分中值算法略高估涡轮级的抽气能力^[33]。

以“积分中值算法”为核心编制的涡轮分子泵抽气性能计算软件获得了国家版权局授予的软件著作权^[35]。

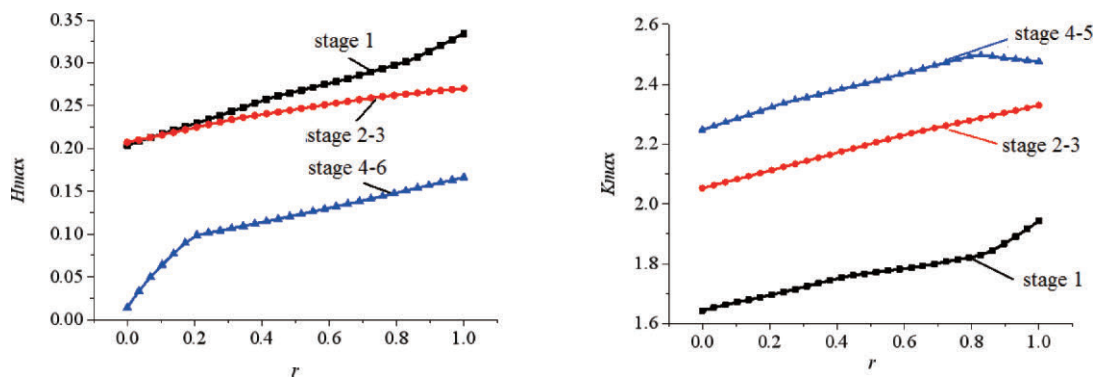


图5 涡轮叶列抽气性能沿齿长方向的分布^[33]

Fig.5 The distributions of H_{max} and K_{max} along radial direction^[33]

2.1.3 牵引级抽气性能的分段流态判别算法

现代复合分子泵的工作压力范围不断拓宽,牵引级常常工作在过渡流态、甚至工作在粘滞流态下。粘滞流态下,牵引槽的抽气性能由下式计算

$$S_m = (2\pi r - \gamma l)h \frac{s}{1 + s^2} \left(\pi r n - \frac{h\gamma}{4\pi r \theta} \cdot \frac{k_m - 1}{k_m} \right) \quad (7)$$

$$K = \frac{H}{P_s \cdot \sin \varphi} m' + 1 \quad (8)$$

式中, m' 为与牵引转子结构和转数有关的比例系数。

当牵引级抽气通道内气体分子处于不同流态时,采用单一流态计算式(5),(6)或(7),(8)得到的牵引级抽气特性计算结果会存在较大误差。此时,对复合分子泵牵引级抽气性能的计算,可以采用“牵引级分段流态判别算法”^[34],即将牵引级沿抽气通道方向分成若干段,先分段计算得到气体压力,再做流态判别,选择相应的计算式进行计算,进而获得牵引级抽气特性。通过编制分段/分流态算法计算程序,可以提高牵引级抽气性能的计算效率,其计算框图如图6所示。计算结果与实验数据对比表明,分段流态算法比单一模型算法具有更好的计算精度^[34]。

以“积分中值算法”和“分段流态判别算法”为核心编制的复合分子泵抽气性能计算软件获得了国家版权局授予的软件著作权^[36]。

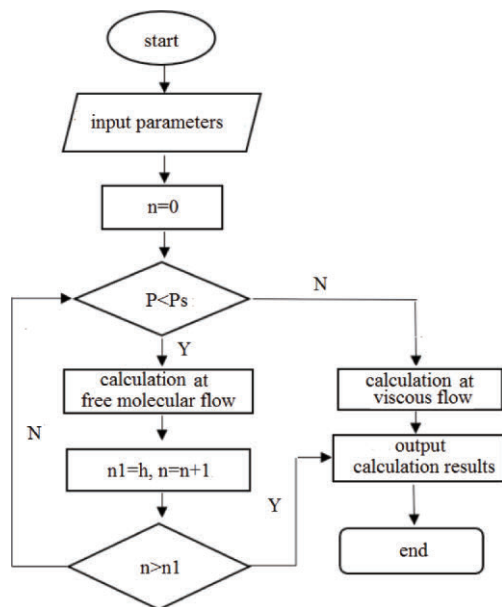


图6 牵引级抽气性能计算框图^[34]

Fig.6 Frame diagram of the performance calculation program of the traction stage^[34]

2.1.4 涡轮抽气通道的三维算法

积分中值算法使涡轮叶列抽气性能计算精度得到改善,并且基于二维涡轮叶列计算模型,即将涡轮叶列三维结构简化为无限长平板叶列,具有较好的计算效率,但与实际三维结构存在明确差别为了进一步提高对涡轮叶列抽气性能的计算精度,研究者开展了基于粒子模拟蒙特卡洛的三维涡轮叶

列抽气特性计算^[37-42]。图7为特定结构单级涡轮叶列二维、三维模型传输几率的计算结果。从图7(a)中可见,当速度比 C_0 较大时,二维模型(图中虚线)正、反向传输几率(对应 C_0 为正、负值时的 M_{12})与三维模型之间存在一定差异^[37],这会导致单级涡轮叶列抽气特性被低估。其原因在于,两种计算模型条件下,气体分子的入射分布存在差别。如图7(a)可见,直接穿过涡轮叶列的概率 m_{12} 存在差别^[37],图7(b)中可见,入射气体分子数密度沿齿长方向的分布在第二级后不再均布^[42],对下级涡轮叶列抽气性能的影响不可忽略。因此,基于二维简化计算模型会存在一定计算误差,推广三维计算模型十分必要。

2.2 复合分子泵的结构改进

2.2.1 涡轮级-牵引级间过渡结构

现代复合分子泵发挥了涡轮级大抽速、牵引级高压比的优势。由于牵引级的抽速较小,在设计时应注意与涡轮级出口测的抽速匹配,否则会引起整泵抽气性能的下降。为解决这一问题,研究者提出了如图8所示的三种结构改进方式^[34]:第一种为涡轮短齿过渡结构,第二种为盘式牵引过渡结构,第三种为大螺旋槽式牵引过渡结构。可以通过设置过渡结构,完善涡轮级与牵引级的级间过渡,保障复合分子泵的抽气性能^[43]。

2.2.2 牵引级间隙泄漏抑制结构

牵引级间隙泄漏量与牵引转子-定子间隙密切相关,合理的间隙设计能够提高对气体的压缩性能。考虑加工、装配精度以及转子离心变形等因素,适当的间隙是保证分子泵工作可靠性的必要条件。为有效抑制气体沿间隙的泄漏,一种设置有凸台/凹槽结构的复合分子泵如图9所示^[34],可以抑制牵引级间隙的气体泄漏,实现复合分子泵抽气性能的提升^[44]。

2.2.3 多段牵引结构

当牵引级转子、定子采用整体式结构设计时,为方便加工,除槽深外其它结构尺寸(螺旋升角、槽宽)设计成定值,难于满足牵引级性能优化的要求。一种采用分段式结构牵引级的复合分子泵,如图10所示^[34],可以很好地解决上述问题。分段式结构的筒式牵引级,不同段牵引槽的几何参数不同,实现各段结构的性能优化,环向凸台上开设的螺旋槽具有抽气能力,还可阻挡牵引级转子与定子之间的气体泄漏,能有效提升对不同流态气体的压缩能力,

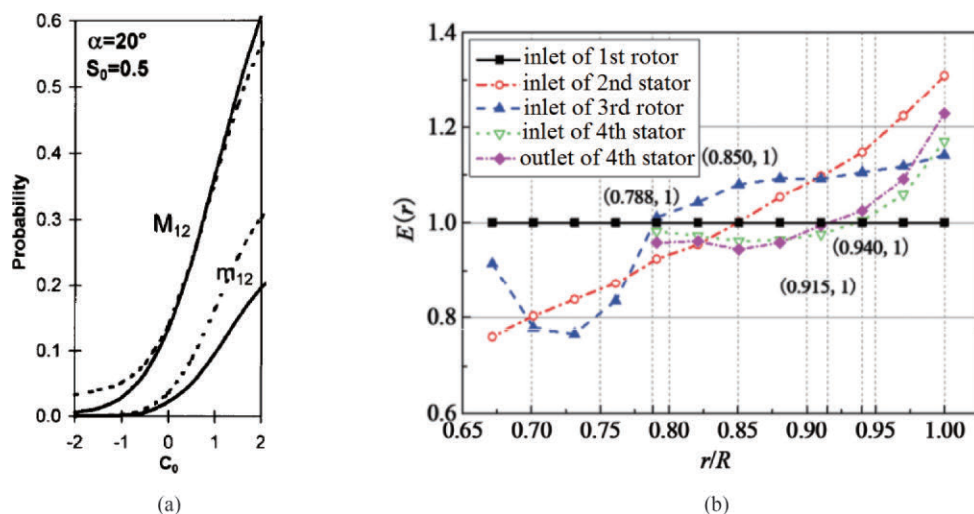


图7 单级涡轮叶列三维与二维模型计算结果对比。(a)传输几率与速度比的关系曲线^[37]。(b)分子数密度沿齿长方向的分布^[42]
Fig.7 Comparison of simulation results obtained from 2D and 3D models. (a)transmission probability vs blade speed ratio^[37]. (b)molecular density distribution along blade length^[42]

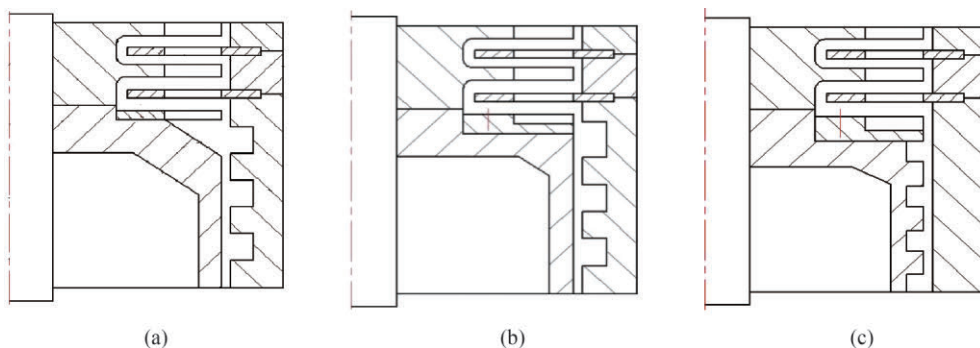


图8 复合分子泵涡轮级-牵引级间过渡结构^[43]。(a)涡轮短齿过渡结构。(b)盘式牵引过渡结构。(c)大螺旋槽式牵引过渡结构
Fig.8 Compound molecular pump with transition structure^[43]. (a)transition structure of short turbo blade. (b)transition structure of drag disk.(c)transition structure of helical drag channel

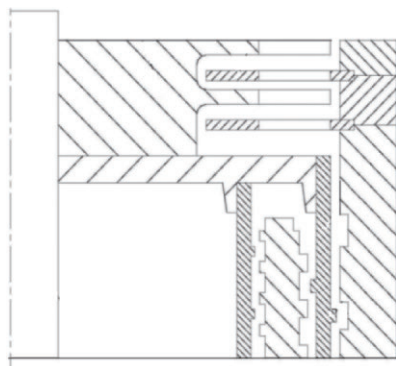


图9 复合分子泵间隙泄漏抑制结构^[44]
Fig.9 Boss/groove structure in compound molecular pump^[44]

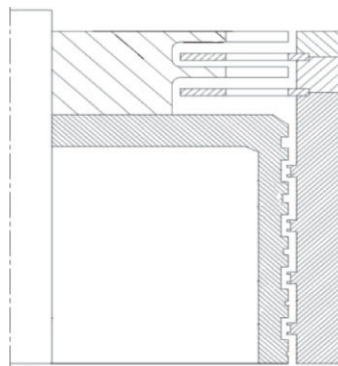


图10 复合分子泵的分段结构^[45]
Fig.10 Segmented structure in compound molecular pump^[45]

从而进一步提高复合分子泵的抽气性能^[45]。

3 总结与展望

分子泵经历了百年发展,在抽气性能计算、结

构优化设计方法、材料加工技术、转子系统支承技术等方面得到了不断改进和持续发展。分子泵长期连续稳定可靠运行的特点,已经成为高真空应用领域获得清洁真空环境的主流泵种,并将在未来的

科研、生产细分领域满足特定需求中发挥越来越重要的作用。

未来分子泵在结构设计和抽气性能算法的发展或集中在以下几个方面:

(1) 过渡流态及全流域抽气性能分析

随着分子泵工作压力范围不断扩大,复合分子泵涡轮级、牵引级有可能工作在过渡流态甚至在粘滞流态下,因此,需要将分子泵的设计与性能分析方法拓展到更宽压力范围。常常采用直接模拟蒙特卡洛(DSMC, Directly Simulation Monte Carlo)方法^[46],对涡轮级、牵引级抽气通道内气体分子间的碰撞、气体分子与固体壁面的碰撞进行模拟,得到过渡流态下的抽气特性^[47-51]。可以采用计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)方法^[52],对粘滞流态下的流动特性进行分析。

由于过渡流态下气体分子碰撞过程的复杂性,DSMC方法对于工程设计而言计算效率不高。解析算法计算效率高,但普适性和计算精度有待改进和提高。研究者基于对描述连续流体运动问题的连续流态方程法^[53]和描述分子流态问题的特征系数法^[54]的分析评价,提出的混合分段算法,在一定程度上提高了涡轮分子泵对过渡流态压缩比的计算精度^[55]。进一步,符合工程设计精度要求的全流域算法,对于分子泵的结构设计和性能预测具有应用前景。

(2) 空间扭曲、非平行三维叶片的设计与性能计算

为进一步提升分子泵的抽气能力,近年来,研究者关注了三维空间扭曲、非平行涡轮叶片的抽气性能^[56-57]。区别于平行涡轮叶片结构,涡轮叶片通过空间扭曲,实现涡轮叶片倾角、节弦比等几何参数沿齿长方向的大幅度变化,为涡轮叶片的结构改进和性能优化提供了更多的设计空间。

空间扭曲、非平行涡轮叶片结构,对型线设计及其性能计算提出了全新要求。由于三维空间扭曲涡轮叶片结构的复杂性,如何制定单级涡轮叶片扭曲角度的空间变化规则,并通过合理匹配使得组合叶列抽气性能达到最优,是分子泵结构设计和性能计算研究的新课题。

(3) 组合叶列抽气性能的分析

对于涡轮组合叶列,抽气性能可采用式(1)、(2)进行计算,其正、反向传输几率一般采用组合叶

列简化公式(3)、(4)进行计算。由于总是存在部分入射气体分子直接穿过涡轮叶列的情况,此时下一级涡轮叶列的入射气体不再满足计算模型的假设条件(见图7(b)),会导致单级涡轮叶列传输几率计算与实际的偏差,对组合叶列的性能计算结果产生影响^[58-60]。

采用粒子跟踪和统计分析的方法,直接对多级涡轮叶列正、反向传输几率进行统计计算是一种可选方法。相较于单级涡轮叶列,气体分子在多级叶列间的传输过程相当复杂,当涡轮级数较多时,计算效率不高,对于反向气体传输的计算尤甚。如何协调计算效率和计算精度是多级涡轮组合叶列直接跟踪求解正、反向传输几率时要考虑的重要问题之一。

(4) 分子泵设计软件开发

目前,分子泵设计方法主要是基于涡轮级、牵引设计的基本准则,先根据设计指标要求提出几种结构设计初选方案,然后对抽气性能进行计算,来确认结构设计方案能否达到设计性能指标要求,并比较各设计方案抽气性能的优劣,择优完成主要结构的设计工作。为提高设计效率,应用参数化设计方法开发设计软件是一种发展趋势^[61-62]。

分子泵结构参数多,可以以涡轮级组合叶列何氏系数为优化目标,进行针对抽速的优化设计,可以以牵引级压缩比为优化设计目标,进行针对压缩比的优化设计。要获得优化设计结果,特别是对多级组合涡轮叶列的结构优化,寻优过程十分复杂,计算成本高、设计效率低,难以用于工程设计实际。如何确定单级、多级涡轮叶列、牵引通道设计规范,引入多学科协同优化设计方法,考虑转子系统动力学、变形,工作间隙对抽气性能影响等,开发适于工程应用的优化设计计算软件是分子泵未来研究工作的重要内容,对于分子泵研发具有重大推进作用。

参 考 文 献

- [1] Henning J. Thirty Years of Turbomolecular Pumps: a Review and Recent Developments[J]. J Vac Sci Technol, A6, 1988, 39(10):1196-1201
- [2] 杨乃恒,巴德纯,王晓冬,等. 分子泵的世纪回顾与展望[J]. 真空, 2001, 38(2):1-14
- [3] 巴德纯,王晓冬,刘 坤,等. 现代涡轮分子泵的进展[J]. 真空, 2010, 47(4):1-6
- [4] 王晓冬,张 磊,巴德纯,等. 复合分子泵牵引级螺旋

- 槽深对压缩比的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(10):1437-1440
- [5] 陶继忠, 吴祉群, 何朝辉, 等. 涡轮分子泵转子多学科设计优化技术[J]. 真空, 2016, 53(6):1-4
- [6] 李 博, 侯德峰, 王晓冬, 等. 精检口位置对氦质谱检漏仪性能的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (11): 79-86
- [7] Xiaodong Wang, Peng Qi. Geometric Modeling for Unitary Rotor of TMP by UG NX CAD. Applied Mechanics and Materials[J]. 2009, 16-19:298-301
- [8] 张 凯, 戴兴建, 张小章, 等. 磁悬浮分子泵的振动抑制[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(6):556-562
- [9] Xu Zhang, Bangcheng Han, Xu Liua, et al. Prediction and Experiment of DC-bias Iron Loss in Radial Magnetic Bearing for a Small Scale Turbomolecular Pump[J]. Vacuum, 2019, 163:224-235
- [10] Han Bangcheng, He Zan, Zhang Xu, et al. Loss estimation, Thermal Analysis, and Measurement of a Large-Scale Turbomolecular Pump with Active Magnetic Bearings[J]. IET Electr Power Appl, 2020, 14 (7):1283-1290
- [11] 陶继忠, 郑越青. 小型涡轮分子泵静叶片设计与成型技术[J]. 真空, 2012, 49(6):1-3
- [12] 马绍兴, 何朝晖, 张日升, 等. 分子泵整机装配工艺过程的综合评价[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 9:145-148
- [13] Ziyuan Huang, Bangcheng Han, Kun Mao, et al. Mechanical Stress and Thermal Aspects of the Rotor Assembly for Turbomolecular Pumps[J]. Vacuum, 2016, 129:55-62
- [14] Bangcheng Han, Ziyuan Huang, Yun Le. Design Aspects of a Large Scale Turbomolecular Pump with Active Magnetic Bearings[J]. Vacuum, 2017, 142:96-105
- [15] 王晓冬, 孙 妍, 方立武, 等. 基于有限元方法的涡轮分子泵转子系统模态分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 141-144
- [16] 叶 超, 吉 方, 张日升, 等. 基于LabVIEW分子泵运行状况实时监测系统[J]. 机床与液压, 2017, 45 (10):131-134
- [17] 林鹏飞, 陶继忠. 基于多样性特征和多源信息的分子泵故障诊断[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(1): 33-39
- [18] 周 亚. 高速小型复合分子泵转子系统动力学分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2015
- [19] Ziyuan Huang, Bangcheng Han, et al. Modeling Method of the Modal Analysis for Turbomolecular Pump Rotor Blades[J]. Vacuum, 2017, 144:145-151
- [20] 罗 阳, 吴绍祥, 靳 毅, 等. 高速小型复合分子泵的模糊故障树分析[J]. 设计与研究, 2018, 45(5):1-4
- [21] 宁远涛, 黄 涛, 陈 琦, 等. 基于有限元的分子泵高速轴系优化设计[J]. 真空, 2019, 56(1):11-14
- [22] Tuer T W, Springer G S. A test particle Monte Carlo method[J]. Computers and Fluids, 1973(1):399-417
- [23] Sheng Wang, Hisashi Ninokata, Elia Merzari, et al. Numerical Study of a Single Blade Row in Turbomolecular Pump[J]. Vacuum, 2009, 83:1106-1117
- [24] Fan Chun Hsieh, Ping Hung Lin, Da Ren Liu, et al. Pumping Performance Analysis on Turbomolecular Pump [J]. Vacuum, 2012, 86:830-832
- [25] 屠基元, 杨乃恒. 现代涡轮分子泵理论的研究[J]. 真空科学与技术学报, 1986, 6(1):11-20
- [26] Yang N H, Yu L G, Pang S J, et al. Study of the Structure and Performance of a New Type of Molecular pump[J]. J Vac Sci Technol, 1987, A(4), 2594-2598
- [27] Katsimichas S, Goddard A J H, Lewington R, et al. General Geometry Calculations of One-Stage Molecular Flow Transmission Probabilities for Turbomolecular Pumps[J]. J Vac Sci Technol A, 1995, 13:2954-2961
- [28] Hablanian M H. Engineering Aspects of Turbomolecular Pump Design[J]. Vacuum, 2008, 82:61-65
- [29] Zhang S W, Ji G Z, Han J. The Positional and Angular Distribution of Molecules Flowing Through Cylindrical Tube in Free Molecular Flow[J]. Phys Proc, 2012, 32: 513-524
- [30] 牟如意, 张世伟, 张志军, 等. 涡轮分子泵入口接管束流效应的蒙特卡洛计算[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(8):753-759
- [31] Kun Sun, Shiwei Zhang, Yajie Li, et al. Monte Carlo Simulation of Gas Free Molecular Flow in Turbo Molecular Pump' S Inlet Tube[J]. Molecular Simulation, 2018, 44 (15):1261-1269
- [32] Sun K, Zhang S W, Zhao F, et al. A Novel Conical Reflector and arc Transition Tube of Turbomolecular Pump [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(6):T06007
- [33] 王晓冬, 张 磊, 巴德纯, 等. 涡轮分子泵抽气性能计算的误差分析[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(4), 432-435
- [34] 张鹏飞, 王晓冬, 张 磊, 等. 复合分子泵抽气特性算法改进与结构优化[J]. 真空, 2018, 55(3):1-5
- [35] 王晓冬, 蒋婷婷, 巴德纯, 等. 涡轮分子泵抽气性能计算 V1.0[CP]. 登记号:2015SR048297
- [36] 王晓冬, 张 磊, 巴德纯, 等. 复合分子泵抽气性能计算软件 V1.0[CP]. 登记号:2016SR133206
- [37] Schneider T N, Katsimichas S, de Oliveira C R E, et al. Analysis of three Dimensional Single Stage and Two Dimensional Multistage Models of Flows in Turbo Molecu-

- lar Pumps[J]. Vacuum, 1997, 48(5):449-453
- [38] Yu Wen Chang, Rong Yuan Jou. Direct Simulation of Pumping Characteristics in a Fully 3D Model of a Single-Stage Turbomolecular Pump[J]. Applied Surface Science, 2001, 169-170:772-776
- [39] Hosseinalipour S M, Amoli A, Ebrahimi R. Direct Simulation Of Free Molecular Flow In Fully Three-Dimensional Axial Rotor[J]. Journal of Thermalphysics and Heat Transfer, 2004, 18(1):148-151
- [40] Yanwu Li, Xuekang Chen, Yanhui Jia, et al. Numerical Investigation of Three Turbomolecular Pump Models in the Free Molecular Flow Range[J]. Vacuum, 2014, 101: 337-344
- [41] 张鹏飞. 基于 Monte-Carlo 方法的气体分子涡轮叶列间传输特性的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2016
- [42] 孙 坤, 张世伟, 韩 峰, 等. 涡轮分子泵多级组合叶列模拟算法的比较研究[J]. 真空与低温, 2020, 26(1): 82-86
- [43] 王晓冬, 巴德纯, 张 磊, 等. 一种带有过渡结构的复合分子泵[P]. 中国专利:201510185860.1
- [44] 王晓冬, 巴德纯, 张 磊, 等. 一种能够减少间隙返流的复合分子泵[P]. 中国专利:2015101895340. X
- [45] 王晓冬, 巴德纯, 张 磊, 等. 一种采用分段式牵引级的复合分子泵[P]. 中国专利:201610482808.7
- [46] Bird G A. Molecular Gas Dynamics [M]. Oxford:Clarendon Press, 1976
- [47] 巴德纯, 刘 波, 王晓冬, 等. 盘型分子泵 3D 过渡流特性[J]. 真空科学与技术学报, 2004, 24(1):11-15
- [48] Wang S, Ninokata H. The Pumping Performances of the Turbo Molecular Pump Simulated by Direct Simulation Monte Carlo Method[J]. Prog Nucl Energy, 2005, 47(1): 664-671
- [49] 王晓冬, 金 磊, 钟 亮, 等. 螺旋槽式牵引泵过渡流态抽气特性的直接蒙特卡洛模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(5):517-521
- [50] Yanwu Li, Xuekang Chen, Wenjin Guo, et al. Accurate Simulation of Turbomolecular Pumps with Modified Algorithm by 3D Direct Simulation Monte Carlo method[J]. Vacuum, 2014, 109:354-359
- [51] 李 博, 马兆俊, 王晓冬, 等. 基于 DSMC 方法的涡轮分子泵跨流态抽气性能研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41 (11):1623-1627
- [52] 王晓冬, 吴虹阅, 张光利, 等. 计算流体力学在真空技术中的应用[J]. 真空, 2018, 55(6):45-48
- [53] Amoli A, Hosseinalipour S M. A Continuum Model for Pumping Performance of Turbomolecular Pumps in All Flow Regimes[J]. Vacuum, 2004, 75(4):361-366
- [54] 渠洪波. 涡轮分子泵过渡流抽气特性的研究[D]. 沈阳:东北大学, 1989
- [55] 孙 浩, 孙浩林, 李 博, 等. 混合分段算法计算涡轮分子泵的压缩比[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(8): 663-666
- [56] Mehrzad Shams, Hasan Sheykhzadeh, Mohammad Taghavi. Mathematical Simulation of Free Molecular Flow in a Three-Dimensional Turbomolecular Pump with Nonparallel Blades. Journal of Dispersion Science and Technology, 2010, 31:299-306
- [57] Nevsan Sengil. Performance Increase in Turbomolecular Pumps with Curved Type Blades[J]. Vacuum, 2012, 86: 1764-1769
- [58] Sengil N, Firat O. Edis. Fast Cell Determination of the DSMC Molecules in Multi-Stage Turbo Molecular Pump Design[J]. Computers & Fluids, 2011, 45:202-206
- [59] Ziyuan Huang, Bangcheng Han, Yun Le. Multidisciplinary Design Strategies for Turbomolecular Pumps With Ultrahigh Vacuum Performance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12):9549-9558
- [60] Sun K, Zhang S W, Han F, et al. A New Modeling Method to Reveal Pumping Mechanism of Turbomolecular Pump [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2021, 14(1): 165-173
- [61] 钟 亮, 王晓冬, 巴德纯. 涡轮分子泵参数化设计软件[J]. 真空, 2004, 41(2):14-17
- [62] 蒋婷婷. 高速小型复合分子泵参数化设计研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015