

用于PJMIF的超快气阀性能表征

景原通, 刘延斌, Y. C. Francis Thio*, 张德雨, 袁东方, 张晓兵

上海科技大学终极能源中心, 上海

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

上海科技大学正在研发第三代用于PJMIF的同轴等离子体枪STG1以及配套超快气阀。STG1的超快气阀需要在百微秒($\sim 100 \mu\text{s}$)的开关时间内注入0~30 mg的均匀气体。超快气阀利用 $j \times B$ 电磁力驱动金属飞盘控制气路开关, 检测气阀结构中金属飞盘弹射时的运动轨迹可以直接体现气阀的稳定性和开关性能。针对两种结构的超快气阀搭建实验平台, 采用激光三角测距法对气阀的金属飞盘的位移进行检测, 获得金属飞盘在两种结构下的位移曲线, 以及新型结构的气阀在不同电压下的开关时间, 并通过有限元分析法对飞盘弹射过程中的振动现象进行验证。研究表明, 金属飞盘在弹射过程中会产生中心振动, 新型弹簧和短翼无孔飞盘组合下的新型结构相比于传统结构具有更高的重复性, 可以通过改变电压的方式可以有效地将气阀的开关时间控制在0~300 μs 。

关键词

PJMIF, 超快气阀, 三角激光测距法, 飞盘

Performance Characterization of an Ultrafast Gas Valve for PJMIF

Yuantong Jing, Yanbin Liu, Y. C. Francis Thio*, Deyu Zhang, Dongfang Yuan, Xiaobing Zhang

Center for Ultimate Energy, Shanghai Tech University, Shanghai

Received: Apr. 23rd, 2024; accepted: Jun. 23rd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

The coaxial plasma gun used for PJMIF requires the injection of 0~30 mg of uniform gas with the ultrafast gas valve at the switching time of hundreds of microseconds ($\sim 300 \mu\text{s}$). The stability and

*通讯作者。

文章引用: 景原通, 刘延斌, Y. C. Francis Thio, 张德雨, 袁东方, 张晓兵. 用于 PJMIF 的超快气阀性能表征[J]. 应用物理, 2024, 14(6): 508-521. DOI: 10.12677/app.2024.146056

switching time of the ultrafast gas valve can be directly determined by measuring the position displacement trajectory of the metal flyer plate ejection. An experimental platform was built for detecting two kinds of ultrafast gas valves, and the displacement of metal flyer plate of the valve was detected by laser triangulation method. The displacement curves of the metal flyer plate under two kinds of structures and the switching time of the gas valve of the new structure under different voltages were obtained. The oscillation phenomenon during the flyer plate ejection process was verified by finite element analysis. The results show that the metal flyer plate will produce the central oscillation during the ejection process. Compared with the traditional structure, the new structure under the combination of new spring and short wing flyer plate has higher repeatability, and can effectively control the switching time of the gas valve within 0~300 μs by changing the voltage.

Keywords

PJMIF, Ultrafast Valve, Laser Triangulation Method, Flyer Plate

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚变能源是未来最有潜力的能源之一，也是目前全球各国共同攻克的一项大科学工程。聚变装置以及实验的最终目的是应用于商业化电站，因此寻求一种高增益、低成本的聚变方案是重要的研究方向。在 Lindemuth 和 Siemon 于 2009 年发表的文章中写道，聚变路线存在一个折中的方案，其等离子体密度、温度和约束时间均在磁约束和惯性约束之间，且造价成本更低、更适合应用于商业化，该方案被称为等离子体射流驱动磁惯性约束聚变(Plasma-Jet-Driven Magneto-Inertial Fusion, PJMIF) [1]-[4]。

在该方案中，由几十把同轴等离子体枪以三维球形对称的方法同时射出均匀的等离子体团，形成紧密的等离子体衬套来压缩靶丸。在 20 世纪 80 年代，Y.C. Francis Thio 提出利用等离子体射流驱动来压磁化靶的方案，并通过模拟计算验证了可行性[5]。2008 年至今，美国能源部(DOE)聚变能源科学办公室(OFES)开展了例如 ALPHA、ALPHA-E 等重点项目[6] [7]。目前美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)正在建设几十把等离子体枪汇聚的实验装置，主要开展 36 路至 60 路等离子体射流汇聚形成内爆等离子体壳层的实验[8]。在国内，北京应用物理与计算数学研究所从 2007 年开始关注并研究磁惯性约束聚变并进行理论分析[9]，上海科技大学终极能源中心于 2019 年开展 PJMIF 项目，正在搭建聚变装置以及第三代同轴等离子体枪 STG1 (ShanghaiTech Gun 1)。

在 PJMIF 项目中，同轴等离子体枪预先通过由超快气阀在几百微秒的短时间内在等离子体枪的底部注入均匀的氩气气体，之后通过预电离的手段将气体电离为等离子体。在等离子体最均匀和高密度的状态下开启大电流、短时间的放电，通过 $j \times B$ 而产生的推力将预电离过的等离子体发射出去。目前该枪的关键点在于重复性和稳定性，较好的重复、稳定性十分依赖一个均匀性、稳定性好的气体初始状态，因此利用超快气阀(Ultrafast Gas Valve)产生一个均匀、稳定性好的初始气体是该枪在设计上的核心点之一。

超快气阀的设计原理同样是通过电磁线圈与金属飞盘之间由于 $j \times B$ 而产生的斥力来推动金属飞盘发射，快速弹射的金属飞盘可以在百微秒($\sim\mu\text{s}$)的时间内实现气路的开启和关闭。用于 PJMIF 的超快气阀已经经历了 Alpha2gun、HJ1 这两代等离子体枪的迭代[10]，国内用于第三代等离子体枪 STG1 的超快气

阀是首次研发。国内也有利用电磁驱动的气阀研究，如中国科学院物理研究所在 1990 年进行的“高重复性脉冲电磁阀 FMGV 系列”研究[11][12]，该气阀的打开时间在 0~800 μs 之间，2011 年研发的用于等离子体驱动碎片加速器中的脉冲电磁阀[13]，开关时间为 200~2000 μs 。西安交通大学于 2020 年发表的用于等离子体电磁加速器中快速电磁阀的研究[14]，开关时间为 340 μs 。

用于 STG1 的超快气阀需要独特的结构设计以及工作时序控制。超快气阀嵌入 STG1 等离子体枪的内部，可以在等离子体枪的底部迅速注入毫克数量级的均匀环状气体，因此而设计的精密机械结构无法由其他电磁驱动的快速气阀替代。超快气阀采用两级进气工作模式和新型飞盘结构，相比于前两代超快气阀具有更精准的时序控制和注入气体配比的控制。

超快气阀性能主要为重复性、开关时间等，最终表现会体现在飞盘的弹射速度变化曲线、位移曲线上，获得准确的飞盘位移曲线可以有效评估气阀的性能，利用高采样率(>100 kHz)、高分辨率(<1 μm)、高精度(误差 < 0.2%)的测速手段可以满足对飞盘位移测量的需求。三角激光测距法是一种成熟的测距技术，无论在大范围的测量场景下还是精细范围的测量场景下都有着可靠的应用，可以实现对移动过程中的物体进行测量[15][16]。

本文介绍了利用三角激光测距法对气阀的飞盘运行状态进行表征的工作，该工作是首次对 STG1 中超快气阀的性能进行系统性分析研究。通过搭建测试平台测试气阀在不同的飞盘材质模型、弹簧模型等工作环境下的运行状态，发现了飞盘表面的振动现象，获得两种气阀结构的开关时间、重复性。

2. 实验原理

2.1. 气阀工作原理

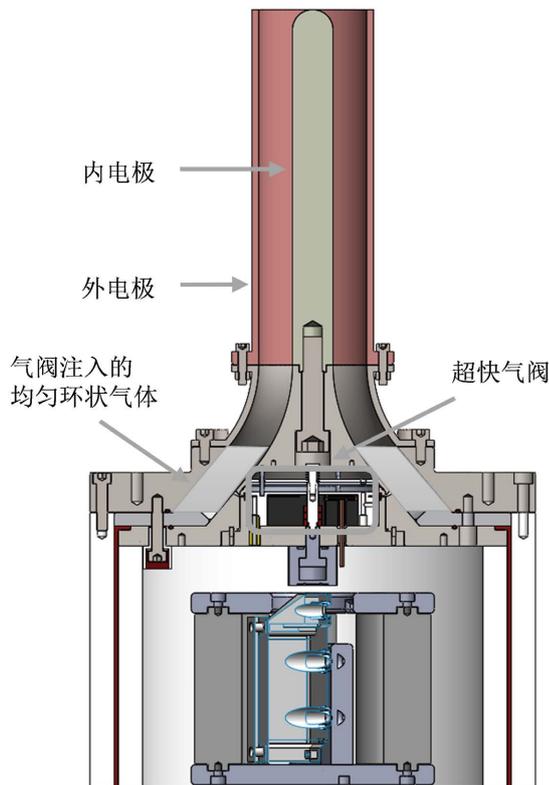


Figure 1. Section drawing of STG1

图 1. STG1 截面图

上海科技大学同轴等离子体枪 1 号 STG1 的研发用于产生射流速度 $> 70 \text{ km/s}$ 、等离子体核长度 $< 5 \text{ cm}$ 、等离子体射流长度 $< 0.25 \text{ m}$ 、发射时间误差 $< 50 \text{ ns}$ 的等离子体射流，其中采用了电磁驱动的超快气阀结构来产生等离子体团电离前的初始气体，如图 1 所示。STG1 工作时，首先使用气阀向内电极、外电极中间空隙的底部注入均匀的环状气体，随后对该初始气体进行预电离，形成均匀的环状等离子体，最后在内外电极间进行脉冲放电，利用 $j \times B$ 电磁力将环状等离子体发射出去。

该气阀可以在 10^{-4} Pa 的真空环境下工作，在 $0 \sim 300 \mu\text{s}$ 的开关时间内通过 $0.5 \sim 5 \text{ mg}$ 的气体质量，其整体结构如图 2(a) 所示。气阀采用聚醚醚酮(PEEK)材料制作内外衬，采用 2024 铝合金材料制作金属飞盘，内衬下方装载平面金属螺线圈用以驱动金属飞盘发射，飞盘上方装有弹簧限制其位移并将其复位。装载飞盘的内衬、外衬均装有 60 个等距分布的圆孔，飞盘侧翼的机械设计是决定气阀开关时间的关键点之一。

长翼有孔飞盘的侧翼同样等距分布着 60 个圆孔，在飞盘弹射并经过内、外衬之间时，圆孔会逐渐重合并打开气路，随后圆孔不再重合并关闭气路，如图 2(b) 所示，绿色线路代表气路。短翼无孔飞盘的侧翼没有与内外衬对应的气孔，取而代之的是更短的翼，只要翼的尾端高于气孔即可打开气路，如图 2(c) 所示。气孔飞盘的位移曲线代表了飞盘弹射的高度，当位移增加至设计值时，即可认为该气阀的开启和关闭。

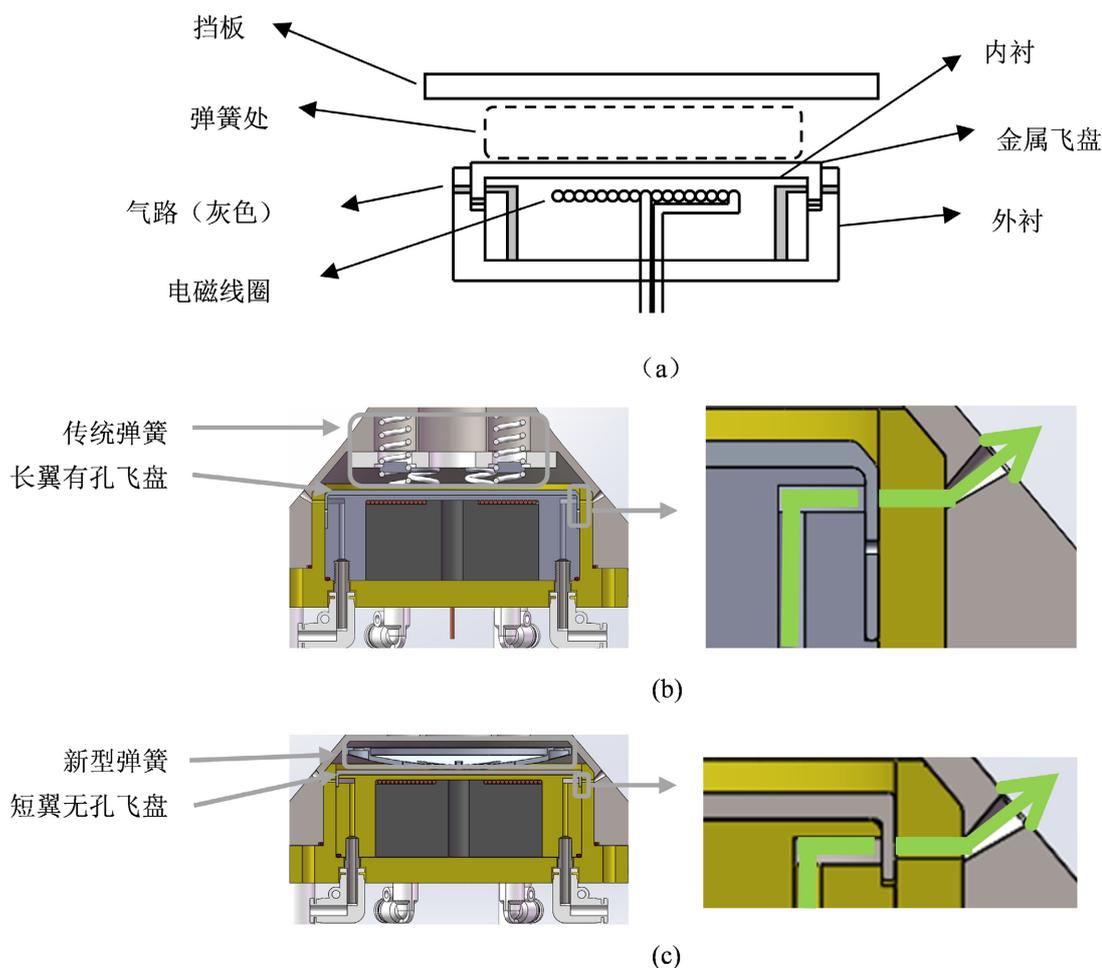


Figure 2. STG1 ultrafast gas valve: (a) Structural sketch; (b) Section drawing of traditional structure; (c) Section drawing of new structure

图 2. STG1 超快气阀: (a) 结构简图; (b) 传统结构模型; (c) 新型结构模型

连接线圈的电容器参数为端电压 2 kV, 总电容 72 μF 。电容器放电瞬间, 线圈内部产生峰值约为 7 kA 的瞬时电流, 上方的金属飞盘感应产生涡流。带有电流的金属飞盘在线圈产生的磁场中会受到峰值约为 35,000 N、远离线圈方向的安培力, 最终产生峰值约为 20 m/s 的弹射速度。

气阀采用二阶段进气的工作模式。在工作时, 首先打开气阀前端的进气开关, 在 10~20 ms 内向气阀内部注入 1~3 BarA 的气体, 然后关闭进气开关, 该阶段是第一阶段进气。随后打开晶闸管, 电磁线圈会在与电容器组导通的瞬间涌入脉冲电流, 金属飞盘同时向上弹射并打开和关闭气阀向外注气的气路, 这是第二阶段进气。该模式可以在保证开关时间足够短的同时减少真空密封难度, 精确的时序和气压控制有助于使气阀喷出的环状气体更加均匀。

2.2. 三角激光测距原理

三角激光测距法是利用激光在反射时对不同距离的被测物有不同的倾斜角的原理, 根据其激光对被测物的入射角度可以分为直射式、斜射式[17]-[19]。直射式应用于被测物表面散射性能较好的物体, 斜射式应用于表面更加光滑的物体。目前的金属飞盘表面不需要做精细加工, 其散射性能较好的表面让他更适用于直射式测距法。

直射式的测距原理是利用高精度的光电探测器, 通过反射角推算出当前激光与被测物之间的距离, 且可以精确计算被测物的位移距离, 其原理如图 3 所示。

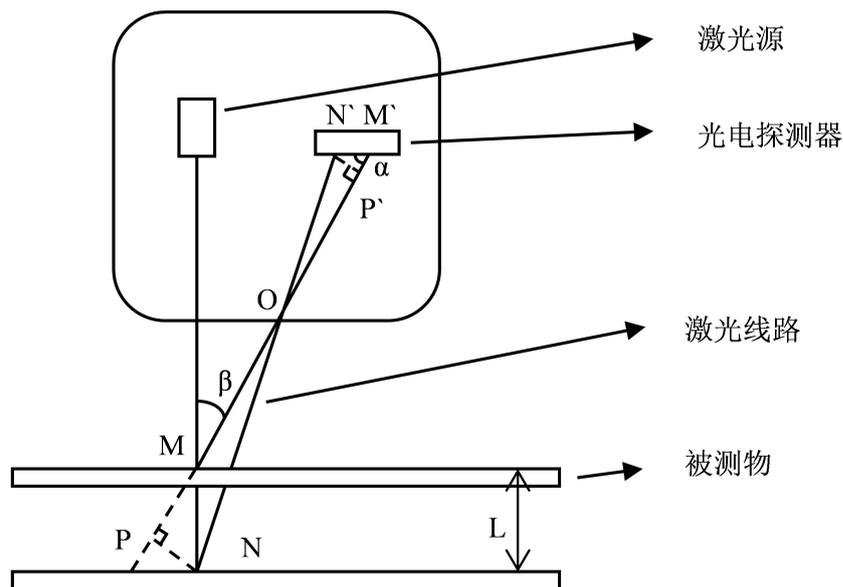


Figure 3. Principle of triangular laser ranging method
图 3. 三角激光测距法的原理

激光探头的主要功能由激光源和光电探测器实现。激光源发射激光至被测物表面, 光电探测器接受表面散射出来的通过 O 点聚焦的反射光。激光首先落在 M 点, 通过 O 点的反射光落在光电探测器的 M'。随后被测物向下移动的距离为 L, 激光落在 N 和 N'。∠α 表示反射光与光电探测器的夹角, ∠β 表示入射光与反射光的夹角, l 表示物距 OM, l' 表示像距 OM'。

根据几何光路的关系:

$$\frac{NP}{OP} = \frac{N'P'}{OP'} \quad (1)$$

据图中的边和角的关系，可进一步写为：

$$\frac{L \sin \beta}{l + L \cos \beta} = \frac{MN' \sin \alpha}{l' - MN' \cos \alpha} \quad (2)$$

利用高斯成像原理：

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

f 为接收透镜的焦距，则：

$$l' = \frac{fl}{l - f} \quad (4)$$

因此有：

$$\frac{L \sin \beta}{l + L \cos \beta} = \frac{MN' \sin \alpha}{\frac{lf}{l - f} - MN' \cos \alpha} \quad (5)$$

则 L 可以表示为：

$$L = \frac{(l - f)MN' \sin \alpha}{f \cos \beta - MN' \left(1 - \frac{f}{l}\right) \sin(\alpha + \beta)} \quad (6)$$

该方法的精度主要由光源准直性的抖动、被测物表面的反光性能、激光光斑的检测精度决定[20]。目前该技术已经相对成熟，国内外均有较为成熟的产品，但目前国内的产品相比于国外还有一定的差距。本文的重点在于对气阀性能表征，因此我们直接选用成熟的激光测距设备进行使用。

3. 实验装置的搭建

3.1. 测试装置的搭建

在三角激光测距的方案上，我们选用基恩士 Keyence LK-G5000 型号以及 H150 探头，检测范围为 150 ± 40 mm，采样率最高为 392 kHz，重复精度 $0.005 \mu\text{m}$ ，线性精度 0.02% F.S.。本次实验将设备的采样率调整至 200 kHz，检测范围会减少到 150 ± 7.6 mm。经过样品测试，该设备在硬件和使用范围上满足需求，但所得到的所有位移曲线以及统计结果的最小时间分辨率也会在限制在 $5 \mu\text{s}$ 。

气阀需要在真空度在 10^{-4} Pa 以下的环境中进行测试，而传感器无法在真空内工作。因此需要在已有的真空腔体上进行改造，通过装有真空玻璃法兰的套筒将真空腔的外部传感器和真空腔内部的气阀将进行匹配，如图 4 所示。气阀的气路由一系列供气系统控制，由实验室控制系统实现对气阀的二阶段进气模式的精确控制。位移传感器探头的控制和数据采集通过自带的控制器和软件来实现。飞盘弹射的行程在设计上为 0~7 mm，因此控制探头和气阀的距离在 145~150 mm 之间，留出飞盘在弹射的时候需要的行程。

3.2. 测试对象

STG1 气阀的设计和改进行已有多次的改良，目前已获得多种可靠的设计方案。STG1 的气阀的结构差异主要区分在弹簧和飞盘的结构，针对气阀的研究和设计也主要针对这两个不同的方面进行改进。本次实验测试的气阀整体结构分为两种，一种为传统压缩弹簧与有孔长翼飞盘结合的传统结构，另一种为新型自研弹簧与短翼无孔飞盘结合的新型结构，其结构简图如图 5 所示。短翼无孔飞盘是为了配合新型自

研弹簧而设计，该方案为传统弹簧配合模式的改良方案。

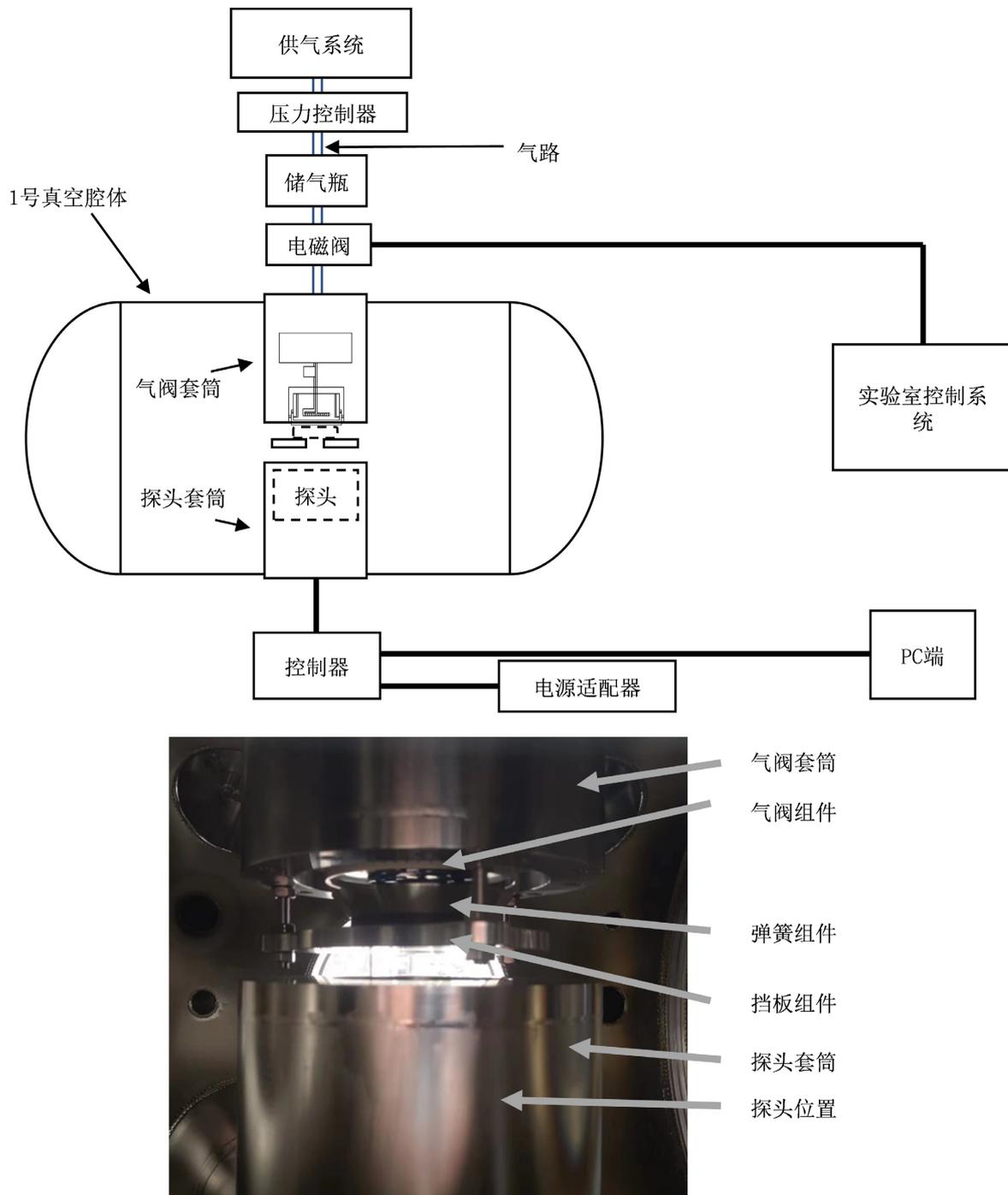


Figure 4. Displacement test platform for Ultrafast valve flyer plate: (a) Schematic diagram; (b) Physical drawing
图 4. 超快气阀飞盘位移平台: (a) 实验装置结构简图; (b) 平台搭建实图

在实验阶段初期，将激光探头对应飞盘的中心，进行单点测量。由于飞盘中心的单点测试获得的曲线难以匹配预期的结果，因此在后续的测试中，加入了中心 - 边缘的双探头测量，来详细了解飞盘的运动状态。

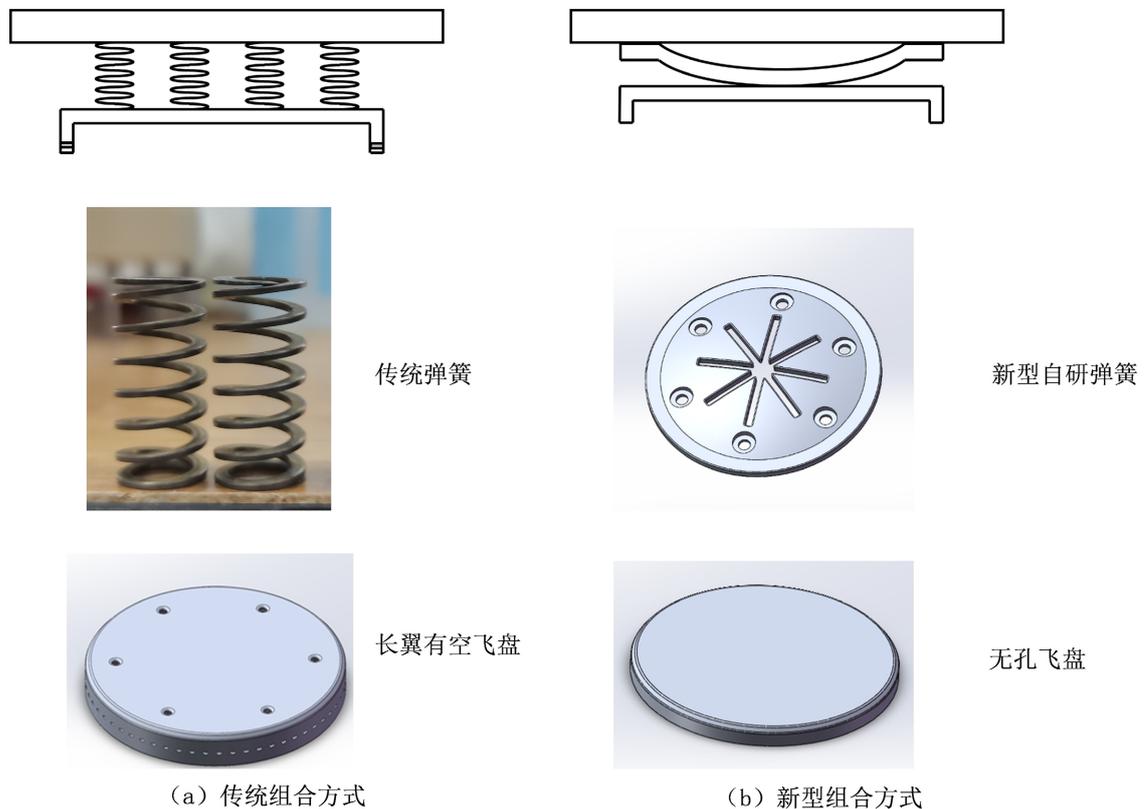


Figure 5. Schematic diagram of the two spring and flyer-plate combinations
图 5. 两套弹簧和飞盘的组合方案

4. 讨论部分

4.1. 飞盘振动现象

在对传统气阀结构进行测试期间，发现了飞盘的中心振动现象。激光探头的测试点位在飞盘的正中心，得到图 6 中(a)曲线的结果。通过曲线可以看到飞盘在弹射过程中有往返运动的行为，而 $j \times B$ 的电磁力并不会出现小于 0 的情况，因此飞盘速度并不会在上升过程中变为负值，不会出现在弹射过程中返程的现象。猜测该曲线的出现是由于飞盘表面受力集中于金属线圈的截面大小的范围内，导致飞盘在弹射时中心会产生振动，如同皮鼓表面被击打时一样。

将测试装置改进，加入第二只探头同时检测飞盘边缘的位移，得到图 6 中(b)曲线的结果，表明飞盘边缘的位移是较为平滑的上升，符合飞盘随震荡电流产生的变化电磁力而上升的预期结果，其开关时间为 300 μs 左右。而中心和边缘的曲线对比表明，中心确实产生了振动，曲线(c)为(a)和(b)的差值，代表着飞盘中心的振动幅度，其最大值约为 2 mm。

气阀气路的打开程度是由飞盘边缘的开孔和内外衬气孔的重叠程度来决定，因此仅有金属飞盘边缘的运动轨迹对反映气阀开关性能有指导意义。在后续结果统计中，均使用边缘的位移曲线作为飞盘气孔的位移曲线。

4.2. 对振动现象进行模拟分析

两只探头的检测结果可以给出飞盘中心和边缘曲线的差别是由于振动造成的，但是需要更有力的分析来佐证这一观点。通过有限元分析可以直观地模拟出飞盘在弹射过程中的运动状态。

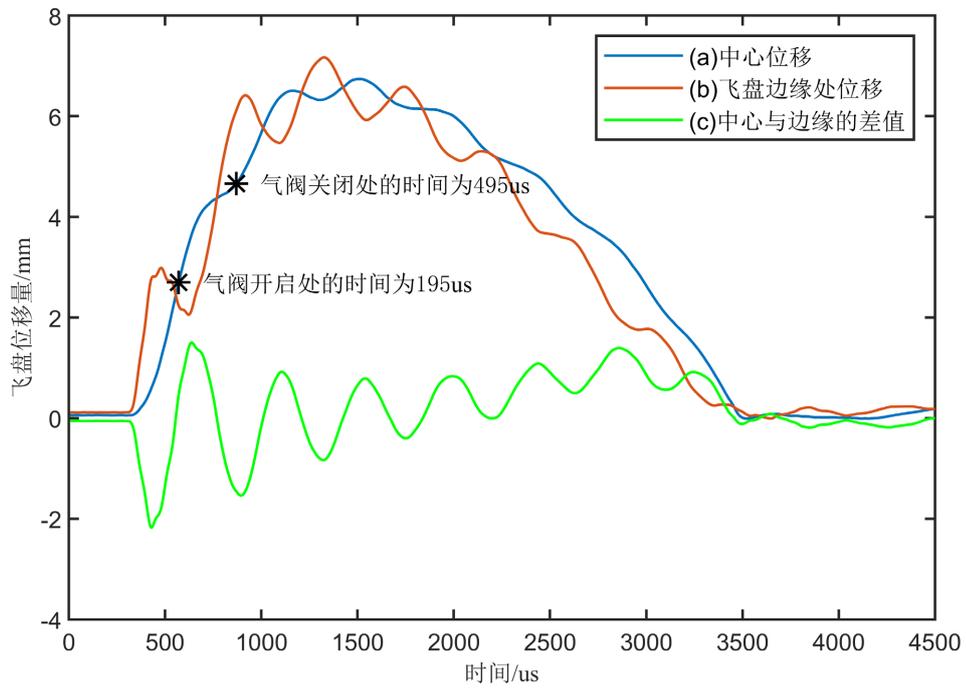
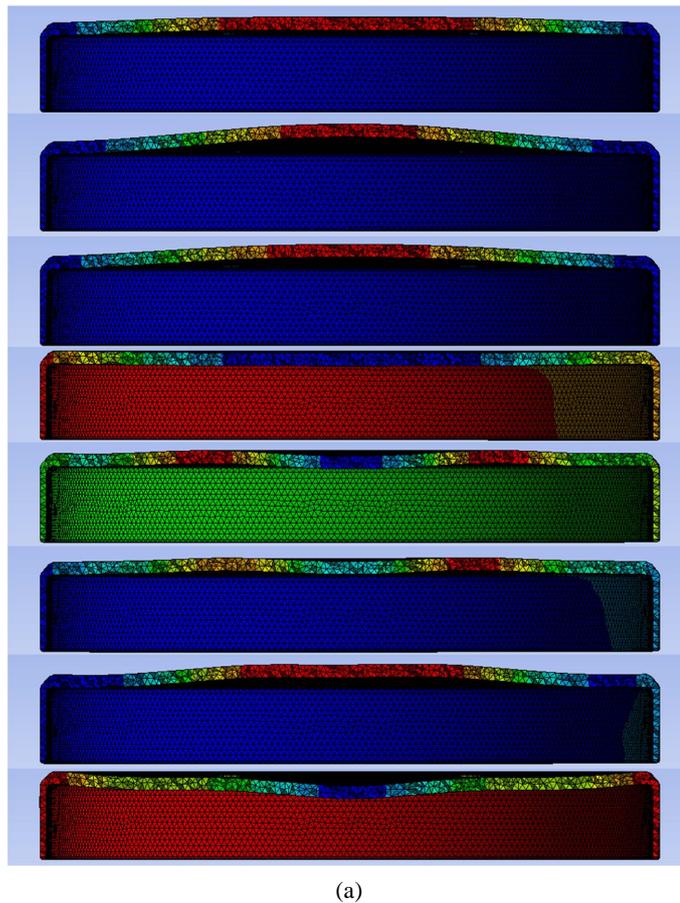
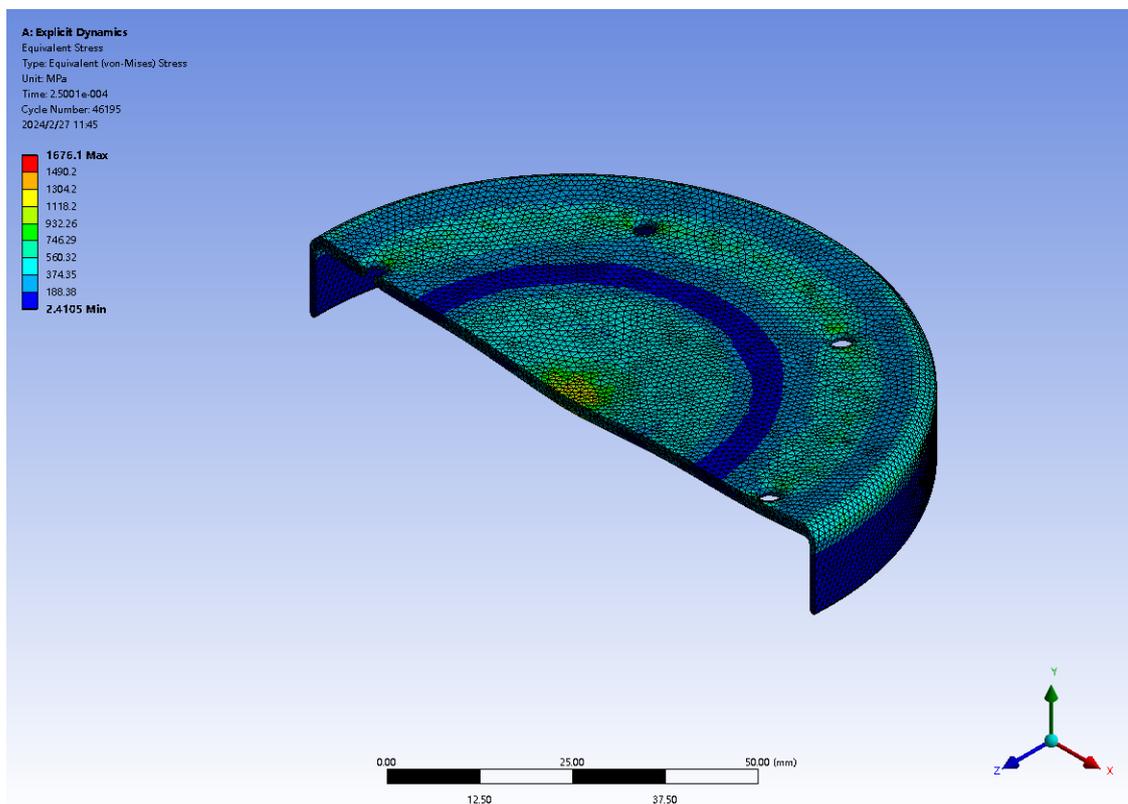


Figure 6. Comparison of center-edge displacement curves in traditional structure
图 6. 传统模型下飞盘中心、边缘位移曲线的对比





(b)

Figure 7. Results of Ansys simulation: (a) Deformation of flyer plate lurching; (b) The moment of the maximum deformation occurs

图 7. Ansys 模拟结果: (a) 飞盘在发射过程中的变形量; (b) 最大应力出现的时刻

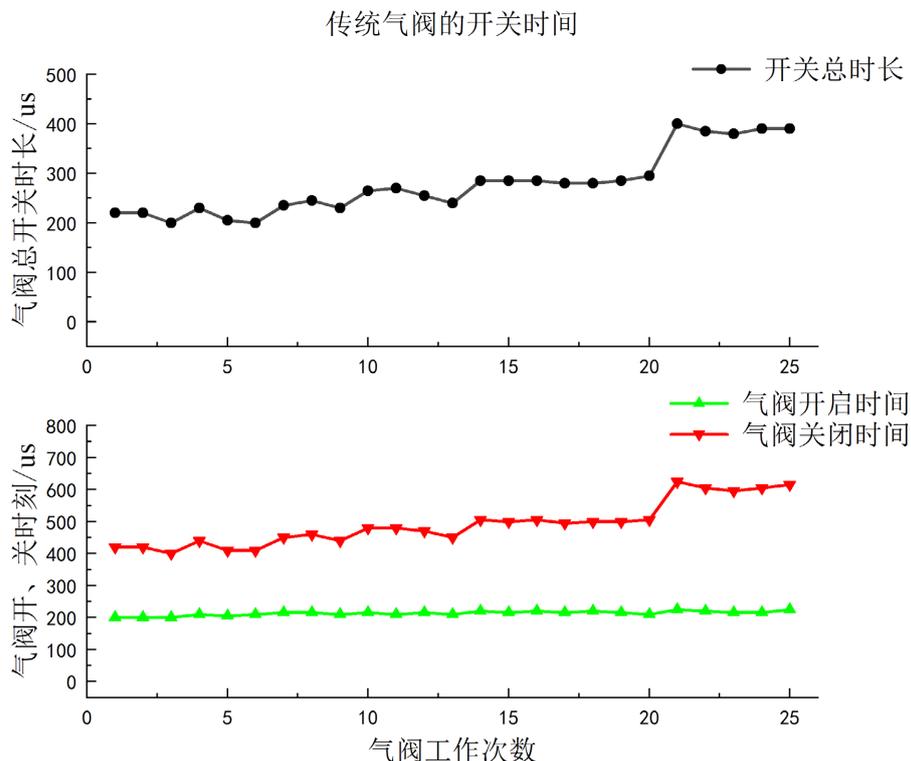
将气阀的内衬、外衬、飞盘以及挡板的模型导入到 Ansys 显式动力学分析模块。为减小模拟的复杂程度,暂不将弹簧部分加入到模拟分析中,飞盘的受力的初始状态仅由线圈的电磁力提供。每 $50 \mu\text{s}$ 截取一次飞盘发射后的正视截面图,获得飞盘在弹射过程中表面的变形情况,如图 7(a)所示。在飞盘弹射过程中,其表面可产生的最大等效应力约为 1676 MPa ,如图 7(b)所示。

铝合金材质的飞盘在没有弹簧的情况下即展现出了中心反复振动的情况,上下幅度最大约为 2 mm ,这与我们实际的测量结果吻合。如图 7(a)中飞盘变形所示,飞盘表面中心最开始受到电磁力而产生较强的材料应力,应力从中心到边缘不断降低,随后中心会在应力作用下回弹,由此导致飞盘表面的振动。

短翼无孔飞盘和新型自研弹簧的设计可以减缓振动现象的出现。飞盘在弹射前期受到的弹簧压力较小,随着弹射距离的增加其弹簧压力大小会逐渐增大,直至达到某个临界点后突然增大。由小到大变化的弹簧压力既不影响飞盘弹射前期的速度从而保证了气路开启时间,又在后期有效的减少飞盘动量从而保证飞盘在撞击挡板的时候不会受到过多的冲击。而该弹簧和飞盘的接触点,是从飞盘的中心随着飞盘挤压弹簧的距离而向外呈圆形扩大,因此飞盘中心的振动现象也可以有效抑制,仅依赖飞盘的边缘的位移来打开气阀开关。

4.3. 传统结构气阀的开关性能

传统压缩弹簧的刚度系数为恒定值,在不超过材料屈服强度的前提下,其弹力与压缩量成正比。该传统压缩弹簧的材质为 65 Mn ,长度 55 mm ,屈服强度 430 MPa [21]。



注：气阀工作次数对应的电压均为 2 kV

Figure 8. The change of ultrafast valve switching time with the number of tests in traditional structure
图 8. 传统结构下的气阀开关时间随试验次数的变化

在 25 次测试中,随着试验次数的增加,气阀的开启时间会缓慢增加,而气阀的关闭时间会迅速增加,如图 8 所示。在拆除气阀装置后,飞盘表面中心产生了向上的变形,且弹簧的长度缩短了 3 mm。气阀开启和关闭时间延后的主要原因为:(1) 飞盘表面中心的拱起变形使得飞盘与金属线圈之间的间隙随着弹射次数加大,而金属飞盘受到的 $j \times B$ 斥力与间隙距离为反比关系,因此飞盘的弹射速度会逐步降低,延后开启和关闭的时间;(2) 飞盘弹射时的速度高达 20 m/s,在过高的冲击力下,弹簧的性质已经发生了的变化,且长度也缩短了 3 mm,弹簧的力学特性会随着试验次数不断衰减。

气阀在传统结构下的开关时间由 225 μs 增加到了 400 μs ,难以实现稳定的可重复性,且飞盘长期在此结构下容易损坏。通过改变弹簧的刚度系数、长度、直径,是一种改良开关性能的方案,但开发新的气阀结构也许更有利于气阀系统性地解决以上问题。

4.4. 新型结构气阀的开关性能

新型弹簧的材质为 51CrV4 金属,其刚度系数的变化率随着压缩量由小增大,中心最大压缩量约为 1.5 mm,在最大压缩量以内不会出现塑性变形。在拆除气阀后,没有出现弹簧的塑性变形以及飞盘损坏的情况,飞盘中心仅有 0.4 mm 凹陷,之后非常稳定。这是由于弹簧与飞盘初始接触时着力于飞盘的中心部位,因此飞盘中心的受力比边缘处更多。新型自研弹簧的飞盘主要为短翼无孔飞盘,该飞盘的边缘在弹射 1.65 mm 以上时即可将气阀开启,其典型位移曲线如图 9 所示。由于此结构下的飞盘中心会有一些的凹陷,飞盘在初始状态下的边缘会有些许翘起,假设该状态下的初始值为 0,则飞盘在回弹的时候,边缘会变形量以内的负值,并在随后回到翘起的初始状态。

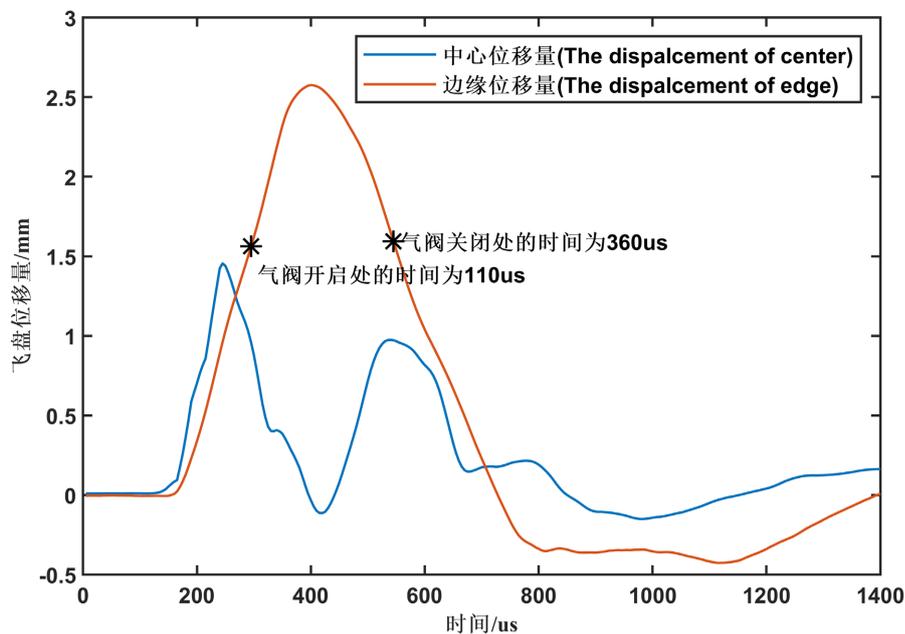
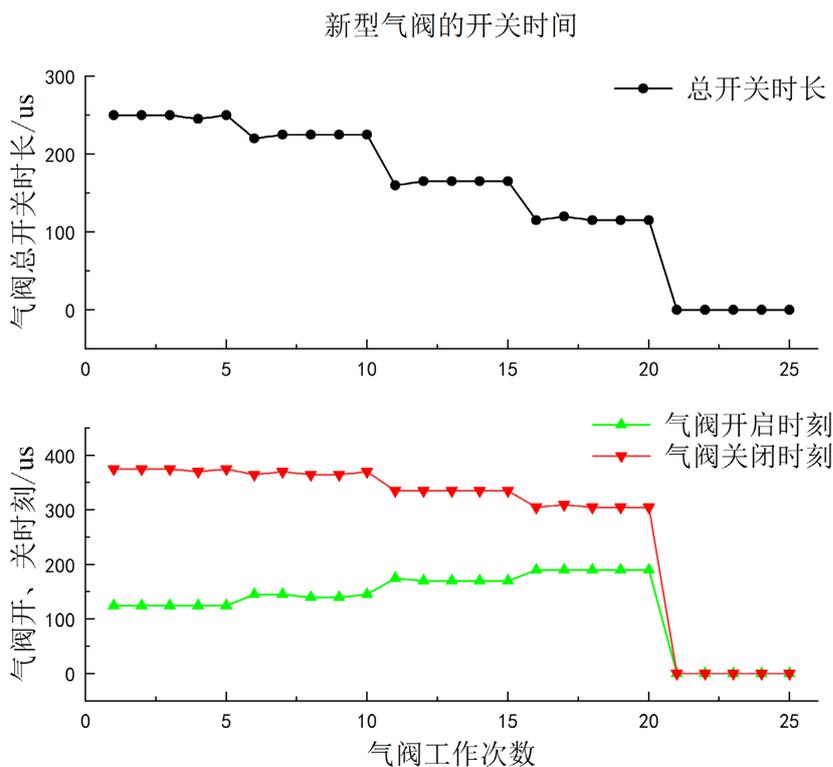


Figure 9. Comparison of center-edge displacement curves in new structure.
 图 9. 新型结构下飞盘中心、边缘位移曲线的对比



注：气阀工作次数对应的电压
 1-5为 2 kV, 6-10为 1.8 kV, 11-15为 1.6 kV, 16-20为 1.5 kV, 21-25为 1.4 kV

Figure 10. The change of ultrafast valve switching time with the number of tests in new structure
 图 10. 新型结构下的气阀开关时间随实验次数的变化

改变电磁线圈以及电容器电压、电容、阻抗等参数,可以使电容瞬时放电的电流大小、放电周期改变,进而影响气阀的开关性能。阻抗、电容是设备的固有属性,相比于此,更改放电电压是改变气阀工作状态更简单和有效的方法。在测试中改变电磁线圈的驱动电压,分别为 2.0 kV、1.8 kV、1.6 kV、1.5 kV、1.4 kV,可以得到该气阀在不同电压下的开关时间,如图 10 所示。

电压的降低会使飞盘受到更少的 $j \times B$ 电磁力,导致弹射速度更慢、弹射行程更近。弹射速度慢的飞盘使得气阀开启时间延后,而飞盘更快的返程使得气阀更早的关闭,二者使气阀的总开关时长持续降低,在降低至 1.2 kV 时不再打开,即飞盘的弹射距离已经不再达到内外衬的气孔的高度。

在不同电压的实验组中,气阀的开启时刻、关闭时刻、总开关时间十分稳定,各电压下的总开关时间如表 1 所示。该结构下的气阀可以在保证开关时间在 0~300 μs 的同时,拥有较高的稳定性和重复性。因此,对新型结构相比于传统结构更适合 PJMIF 的应用场景。

Table 1. The relationship between voltage and total switching time in new structure

表 1. 新型结构下电压与总开关时间的关系

电压/kV	2	1.8	1.6	1.5	1.4
	250	220	160	115	0
	250	225	165	120	0
总开关时间/ μs	250	225	165	115	0
	245	225	165	115	0
	250	225	165	115	0

5. 结论

我们利用三角激光测距器为超快气阀独特的结构设计了一套实验装置,满足多种结构的超快气阀在 10^{-4} Pa 的真空环境下测量其飞盘位移曲线,获得气阀的开关时间、重复性以及电压对开关时间的影响。

通过激光三角测距法可以得到超快气阀中金属飞盘的运动轨迹,获得气阀开启和关闭的时间。中心-边缘双探头测量发现了金属飞盘的振动现象,该振动会影响飞盘在弹射过程中侧翼的位移曲线。经过有限元分析模拟,我们获得金属飞盘运动过程的直观表现。

传统结构下的弹簧重复性不足,气阀无法获得稳定的开关时间。自主研发设计的由新型弹簧以及配套金属飞盘组成的新型结构,可以有效抑制振动的产生,以获得气阀预期的重复性和开关时间。通过改变电压的方式,新型结构下的气阀开关时间可以控制在 0~300 μs 之间。

由于飞盘的运动行程短、气阀的开关时间短,需要三角激光测距仪足够高的精度度和时间分辨率。目前所使用的探头有 5 μs 的时间分辨率,为了使等离子体枪整体获得足够高的重复性、更精准地获得和控制超快气阀的开关时间,一个时间分辨率更低的激光测距仪需要我们来探索。

基金项目

国家发改委重大科技基础设施项目(批准号: 2208-000000-04-01-249628)资助的课题。

参考文献

- [1] Witherspoon, F.D., Case, A., Messer, S.J., Bomgardner, R., Phillips, M.W., Brockington, S., *et al.* (2009) A Contoured Gap Coaxial Plasma Gun with Injected Plasma Armature. *Review of Scientific Instruments*, **80**, Article ID: 083506. <https://doi.org/10.1063/1.3202136>
- [2] Thio, Y.C.F., Hsu, S.C., Witherspoon, F.D., Cruz, E., Case, A., Langendorf, S., *et al.* (2019) Plasma-Jet-Driven Mag-

- neto-Inertial Fusion. *Fusion Science and Technology*, **75**, 581-598. <https://doi.org/10.1080/15361055.2019.1598736>
- [3] Siemon, R.E., Turchi, P.J., Barnes, D.C., Degnan, J.H., Parks, P., Ryutov, D. and Thio, Y.C. (2002) Magnetized Target Fusion: Prospects for Low-Cost Fusion Energy. *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES*, **5**, 63-58.
- [4] Thio, Y.C.F. (2008) Status of the US Program in Magneto-Inertial Fusion. *Journal of Physics: Conference Series*, **112**, Article ID: 042084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/112/4/042084>
- [5] Thio, Y.C. (1986) Feasibility Study of a Railgun as a Driver for Impact Fusion: Final Report. <https://www.osti.gov/biblio/6956782>
- [6] Handley, M.C., Slesinski, D. and Hsu, S.C. (2021) Potential Early Markets for Fusion Energy. *Journal of Fusion Energy*, **40**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1007/s10894-021-00306-4>
- [7] Nehl, C.L., Umstattd, R.J., Regan, W.R., Hsu, S.C. and McGrath, P.B. (2019), Retrospective of the ARPA-E ALPHA Fusion Program. *Journal of Fusion Energy*, **38**, 506-521
- [8] Hsu, S.C., Langendorf, S.J., Yates, K.C., Dunn, J.P., Brockington, S., Case, A., *et al.* (2018) Experiment to Form and Characterize a Section of a Spherically Imploding Plasma Liner. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **46**, 1951-1961. <https://doi.org/10.1109/tps.2017.2779421>
- [9] 杨显俊, 李璐璐. 磁惯性约束聚变: 通向聚变能源的新途径[J]. 中国科学, 2016, 46(11): 23-40.
- [10] Thio, Y., Witherspoon, F., Cruz, E., Brockington, S., Case, A., Williams, A. and Luna, M (2018) Coaxial Plasma Gun Development for Plasma-Jet-Driven Magneto-Inertial Fusion (PJMIF). *Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of American Physical Society*, Portland, 5-9 November 2018.
- [11] 吴成, 沈志刚, 李大万, 江德仪, 杨思泽. FMGV-1 型快速电磁阀[J]. 真空科学与技术, 1989, 9(2): 103-106.
- [12] 吴成, 江德仪, 杨思泽, 沈志刚. 高重复性脉冲电磁气阀(FMGV-2) [J]. 仪器仪表学报, 1990, 11(2): 115-121.
- [13] 冯春华, 房同珍, 王龙, 杨宣宗, 黄建国, 陈朝峰, 韩建伟, 孙远程. 等离子体驱动碎片加速器中脉冲充气电磁阀[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(2): 181-185.
- [14] 郭海山, 杨兰均, 刘帅. 等离子体电磁加速器中快速电磁阀气体注入特性研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2020,40(1): 85-89.
- [15] 邸志刚, 沈萌萌, 贾春荣, 陈佳旗, 冯若楠. 激光测距技术研究现状及发展趋势[J]. 激光杂志, 2023, 40(8): 1-8.
- [16] Lombardo, V., Marzulli, T., Pappalettere, C. and Sforza, P. (2003) A Time-of-Scan Laser Triangulation Technique for Distance Measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, **39**, 247-254. [https://doi.org/10.1016/s0143-8166\(01\)00121-x](https://doi.org/10.1016/s0143-8166(01)00121-x)
- [17] 徐瑞超, 胡艳凯, 线晨. 激光三角法微位移测量的算法比较[J]. 上海电气技术, 2021, 14(4): 75-78.
- [18] 王冬, 崔建军, 张福民, 闵帅博, 陈恺. 用于微位移测量的迈克尔逊激光干涉仪综述[J]. 计量学报, 2021, 42(1): 1-8.
- [19] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004(1): 33-36.
- [20] 孙有春, 庞亚军, 白振旭, 王雨雷, 吕志伟. 激光三角测量法应用技术[J]. 激光杂志, 2021 42(4): 1-8.
- [21] 郑青春. 超塑预处理对高强铝合金 7A04 和 2024 的性能影响研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006.