

doi: 10.7690/bgzd.2025.05.006

暂冲式高速风洞中大口径蝶阀的设计与应用

余鑫, 师建元, 郑晓东, 杨可朋

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对 2 m 量级大型暂冲式风洞中大口径蝶阀存在的问题, 提出对 DN2500 液动蝶阀进行优化设计。通过有限元软件对新设计蝶阀进行应力集中及模态分析。结果表明: 在极限工况下危险截面的应力值满足设计要求, 振动特性好; 工程应用证明, 该蝶阀密封可靠, 堵塞度小, 故障率低, 能保证长期有效运行。

关键词: 暂冲式高速风洞; 大口径; 蝶阀; 设计与应用

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A

Design and Application of Big Bore Butterfly Valve in Intermittent High Speed Wind Tunnel

Yu Xin, Shi Jianyuan, Zhen Xiaodong, Yang Kepeng

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In view of the problems of the big bore butterfly valve in the 2 m large intermittent wind tunnel, the optimization design for the DN2500 hydraulic butterfly valve is proposed, and the stress concentration and modal analysis of the newly designed butterfly valve were carried out by finite element software. The results show that the stress value of the dangerous section meets the design requirements under the limit condition, and the vibration characteristics are good; the engineering application proves that the butterfly valve has reliable sealing, small blockage, low failure rate, and can ensure long-term effective operation.

Keywords: intermittent high speed wind tunnel; big bore; butterfly valve; design and application

0 引言

暂冲式高速风洞需要在压力气源管道中设置快速切断气流的阀门, 由于蝶阀安装空间小、重量轻, 易与各种驱动装置组合且启闭效率高, 故而应用于暂冲式风洞。以 CARDIC 的 2 m 超声速风洞为例, 其试验速域广, 速压范围宽, 流场品质优异。作为国内试验段尺寸最大的超声速风洞^[1-3], 其气动冲击载荷较一般的暂冲式风洞大, 对蝶阀的要求很高。

目前使用蝶阀主要存在以下问题:

- 1) 蝶板与密封面的磨损;
- 2) 阀杆与轴套的磨损;
- 3) 驱动头与阀体连接处存在松动;
- 4) 转动轴与蝶板间的定位销存在移动;
- 5) 关闭触点接触不良。

造成以上问题的原因是在复杂气动载荷下: 频繁启闭时的冲击载荷; 剧烈的随机非线性振动; 材料刚度性能下降; 设备的疲劳损伤。

为保障风洞试验安全可靠进行, 笔者在原有 DN2500 液动蝶阀的基础上进行创新设计, 对关键部位进行优化, 以确保满足暂冲式高速风洞对大口

径蝶阀的特殊要求。

1 蝶阀特征及设计要求

1.1 蝶阀特征

风洞快速阀与常规工业阀门的不同之处是开关频繁, 承受复杂多变的气流载荷。2 m 超声速风洞主快速阀, 为 DN2500 液动蝶阀, 位于风洞上游, 如图 1 所示。

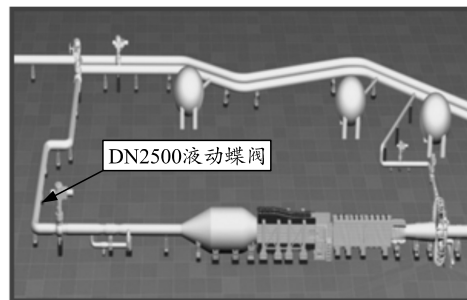


图 1 阀门位置布局

DN2500 液动蝶阀结构如图 2 所示, 主要部件为: 阀体、阀板、阀杆、阀杆两端支撑轴承、阀杆与阀体之间密封, 阀板与阀体之间密封、阀门液压驱动装置。

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-09-11

第一作者: 余鑫(1994—), 男, 四川人, 硕士。

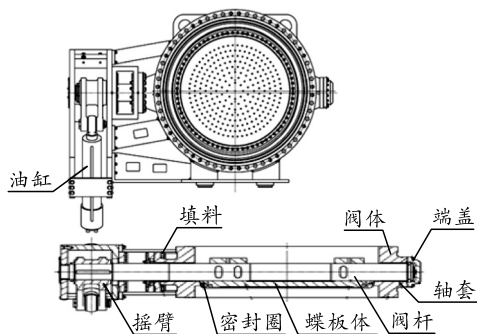


图 2 DN2500 液动蝶阀设计

选用液动蝶阀的原因：1) 蝶阀结构紧凑，性价比高；2) 采用液压油缸驱动曲柄实现阀门 90° 旋转开关，优点是提供力矩大，速度快；3) 阀门密封采用三偏心金属硬密封，密封部位磨损小。

1.2 设计要求及参数

主要设计参数及要求如下：

工作介质为干燥压缩空气；蝶阀公称通径为 2 500 mm；公称压力为 2.5 MPa；工作压力为 0~2 MPa；温度范围：-10~50℃；结构形式为三偏心金属硬密封蝶阀；阀门安装方式为卧式安装；启闭时间为 3~10 s 可调；使用频率为平均每天开关 10~30 次；堵塞度小于 22%；阀板开孔率不小于 3%；阀门密封等级为零泄漏。

2 优化设计方案

总的设计思路是在满足设计参数要求的前提下，对阀门的关键部位进行优化设计，提升刚度性能，强度加强，以确保阀门在复杂多变气动载荷下的长期可靠运行。按照上述要求对新研制阀门的关键部件设计如下。

2.1 蝶板

蝶板作为三偏心蝶阀中最重要的结构，采用小阻塞度、刚度加强及流场稳定设计，如图 3 所示。

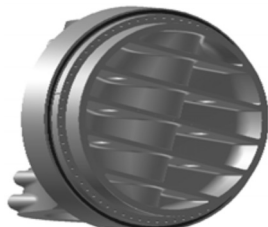


图 3 DN2500 蝶阀阀板

阀门通道为加大设计，密封面的位置流通孔径尽量大，占据面积尽量小，增大阀门的流通面积，减小阀门堵塞度，经计算堵塞度为 17.7%，满足堵塞度小于 22% 要求。

采用局部加强刚度，并充分考虑阀板结构内外压差影响，避免阀板开裂，设计 $\phi 22$ mm 均压孔 260 个，开孔率为 3.5%，开孔率大于原有阀门的 3%。

蝶板密封环材料采用 304+柔性石墨，阀门密封副由阀体内密封面和蝶板上的密封圈组成，阀体上的密封面为堆焊不锈钢，经过高精度磨削，蝶板密封面为不锈钢夹橡胶结构，密封性能可靠，且密封摩擦角为 6.56°，蝶板旋转不会干涉。

蝶板体为一面为龟背流线形，另一面为平板减压板，减少紊流，保证流场的稳定。

2.2 阀体

为提高阀体承受气动冲击载荷和液压油缸驱动时偏载的能力，增强阀体的支撑强度和刚度，阀体采用高强度、高刚度设计，结构如图 4 所示^[4]。

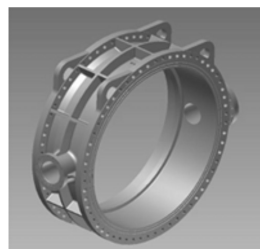


图 4 DN2500 蝶阀阀体

阀体在增加环向、纵向加强筋的基础上采用阀体与筋一体铸造。壁厚为加厚设计，按 ASME B16.34 标准，计算厚度为 47.8 mm，考虑腐蚀余量，在原有阀体壁厚为 50 mm 的基础上加厚至 60 mm。

2.3 阀杆

阀杆直径增加，材料强度提升，增加抗疲劳寿命。作为蝶阀的关键受力部件，在保证阻塞塞的前提下，适量增加阀杆直径，设计计算杆径为 $\phi 280$ mm，最终杆径选用 $\phi 320$ mm，其目的是提高工程可靠性。

通常阀杆材料选用 20Cr13，考虑工程实际，阀门频繁开关，材料选用 30CrMnSiA 高强度调质，提高材料强度，以提升阀门使用寿命。

阀杆材料对比如表 1 所示， $R_p0.2$ 为规定非比例延伸强度， R_m 为抗拉强度，HBW 为邵氏硬度。

表 1 阀杆材料对比

材料	$R_p0.2/\text{MPa}$	R_m/MPa	HBW
20Cr13	440	640	192
30CrMnSiA	835	1 080	229

此外，阀杆处轴承为高力黄铜镶嵌石墨的 JDB 轴承，其承载能力强，摩擦系数小，磨损量很小，能保证阀门长期有效运行。

2.4 其他部件

液动蝶阀阀门采用液压执行机构，包括驱动油缸、液压油管及接头等。驱动压力 21 MPa，油缸介质为 LHM32 抗磨液压油。所选油缸与风洞现用油缸结构性能一致，设计阀门关闭时的缓冲装置。

开、关限位信号是独立常开触点，且分别提供 2 组开、关到位限位开关，另外设置机械限位装置。

阀门采用卧式安装，驱动机构在阀门顺气流方向右侧，安装液压驱动头的支架强度刚度要足够，设计辅助支撑装置，要能够承受阀门快速启闭产生的冲击。

3 数值分析

3.1 应力集中分析

应力集中是阀门设计分析中最常见的现象。怎样精确地获取阀门应力集中处的应力，不仅对阀门结构设计分析非常关键，而且对于评定阀门的疲劳使用寿命具有重大的意义^[5]。现在阀门设计及流程通常是先对阀门的外形尺寸进行设计，使其满足实际使用需求，然后通过仿真软件初步判断其结构强度^[6]。笔者将设计蝶阀的 3 维图形导入有限元软件 ANSYS，由于该蝶阀为非对称结构，所以在构建液动三偏心蝶阀几何模型时除了脚架、支架、驱动器等非受压单元，其余主体结构均保留。液动三偏心蝶阀的最终模型如图 5 所示^[7]。



图 5 DN2500 蝶阀有限元模型

液动三偏心蝶阀在实际工作中，阀门两端与管线连接。在做有限元分析时，可以依据实际的工作状态，将液动三偏心蝶阀两端施加固定约束。蝶阀位移边界条件施加如图 6 所示。



图 6 边界条件施加

额定工作压力条件下，介质流入端的蝶板面以及内腔承受 2.5 MPa 压力，阀颈对阀体作用力为 63 030 N；静水压力条件下，两侧蝶板面以及内腔面承受 3.75 MPa 压力，阀颈对阀体作用力为 94 545 N。

额定工作压力和静水压力下的应力分布如图 7—8 所示，根据计算结果，在几何模型中最危险或者出现应力集中的界面构建应力分类线 A-A、B-B、C-C，如图 9 所示。

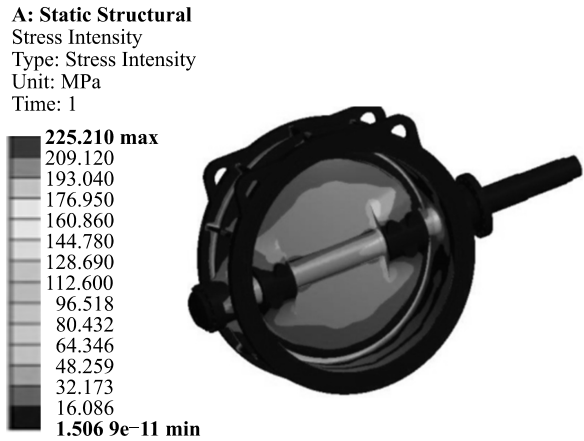


图 7 额定工作压力下的应力分布云图

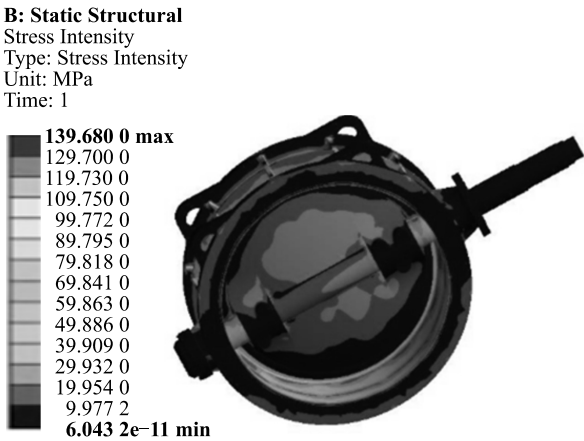


图 8 静水压力下的应力分布云图

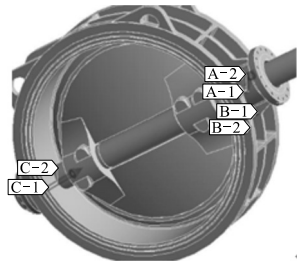


图 9 阀体危险截面应力分类线

根据强度失效理论，阀门主要存在薄膜应力和弯曲应力。根据线性化理论对危险截面进行应力分类，应力分解后均匀分布的平均应力属于薄膜应力 P_m ，线性分布的应力属于弯曲应力 P_b ，还有非线性部分^[3]，如图 10 所示。

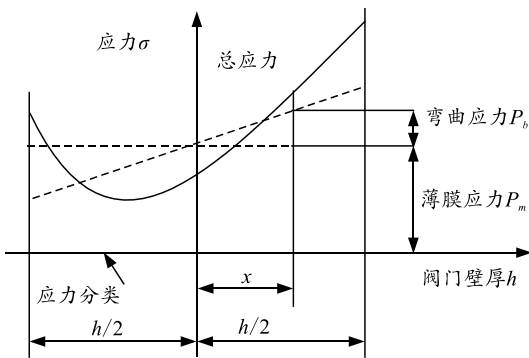


图 10 阀门应力分类

应力判定标准如下：额定压力状态下，总体一次薄膜当量压力 $P_m \leq S_m$ ，一次弯曲当量应力 $(P_m + P_b) \leq 1.5S_m$ ；静水试验压力状态下， $P_m \leq 0.95 S_y$ ， $(P_m + P_b) \leq 1.43S_y$ 。其中， S_y 为屈服强度， S_m 为许用应力。额定压力及静水压力下的应力评定如表 2 和 3 所示。

表 2 额定压力下的应力评定 MPa

截面	P_m	$P_m + P_b$
A-A	28.46	60.08
B-B	54.71	74.89
C-C	67.01	128.74

表 3 静水压力下的应力评定 MPa

截面	P_m	$P_m + P_b$
A-A	14.46	21.61
B-B	25.53	30.03
C-C	33.08	69.71

额定压力下， S_m 为 138 MPa， $1.5S_m$ 为 207 MPa，静水压力下 $0.95S_y$ 为 261 MPa， $1.43S_y$ 为 393.25 MPa。由表 2 和 3 可知，额定压力和静水压力下，3 个危险截面的应力值均符合设计要求。

3.2 模态分析

求解模态时对网格质量要求较高，而自适应网格的缺点是分析精度不高，所以在划分网格的时候在软件自带的网格自适应功能的基础上，根据计算机的计算能力和实际工程问题的需要，对数值模态网格进行适当的优化处理，如图 11 所示。DN2500 液动蝶阀 1 阶~6 阶模态如图 12—17 所示。

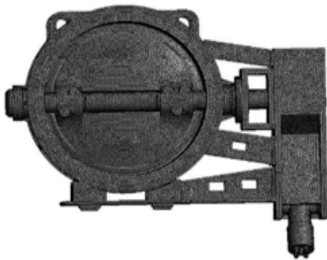


图 11 优化后的网格

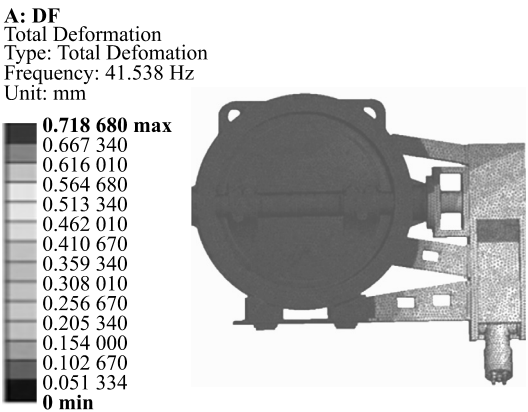


图 12 DN2500 液动蝶阀 1 阶模态

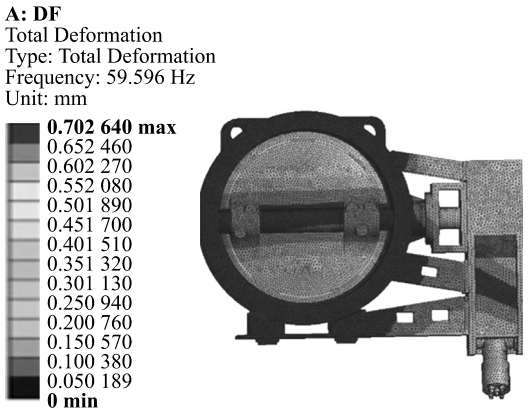


图 13 DN2500 液动蝶阀 2 阶模态

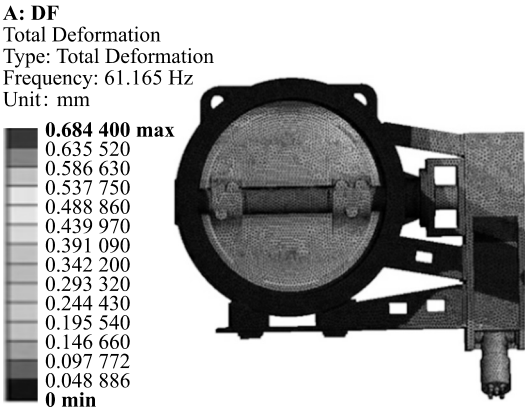


图 14 DN2500 液动蝶阀 3 阶模态

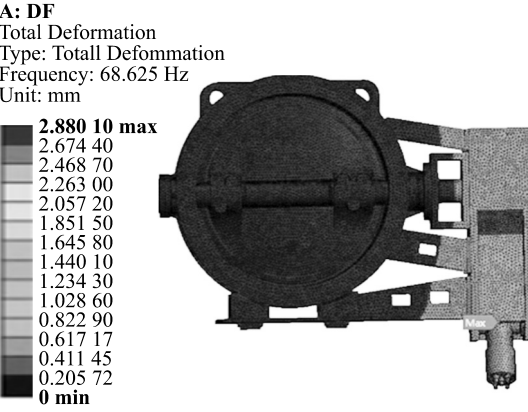


图 15 DN2500 液动蝶阀 4 阶模态

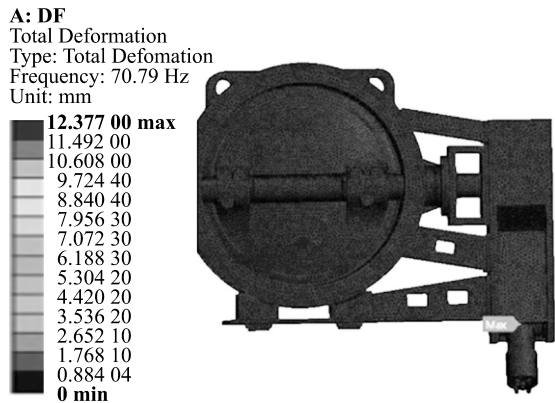


图 16 DN2500 液动蝶阀 5 阶模态

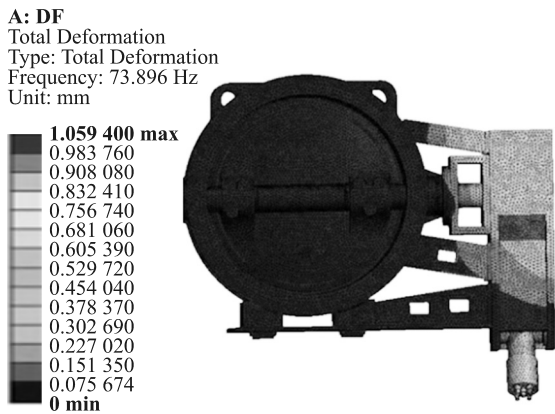


图 17 DN2500 液动蝶阀 6 阶模态

根据计算结果，取前 6 阶的模态分析结果，其各阶模态频率及最大振幅如表 4 所示。

表 4 各阶模态频率及振幅

模态阶数	频率/Hz	最大振幅/mm	模态阶数	频率/Hz	最大振幅/mm
1	41.538	0.719	4	68.625	2.880
2	59.596	0.702	5	70.790	12.377
3	61.165	0.684	6	73.896	1.059

由计算结果可知：阀门在各阶频率下的振幅较小，在各阶频率下短时间工作不会造成阀门结构破坏。在阀门的实际工作中，可通过适当延长阀门启闭的时间，避免在上表所示频率下工作。

4 测试及工程实践

4.1 水压及密封试验

按标准 GB/T13927—2008《工业阀门压力试验》对阀体进行水压试验，水压试验压力为设计压力(2.5 MPa)的 1.5 倍，即 3.75 MPa，保压时间为

10 min；进行 2.0 MPa(最高工作压力)的密封试验，介质为空气，保压时间 10 min，泄漏指标为 0.01 kg/s；水压和密封试验均达到要求。

4.2 工程实践

DN2500 液动蝶阀自投入运行以来，已完成启闭约 500 余次，满足暂冲式高速风洞运行对蝶阀的密封与开关时间等要求，现场过程测试达到设计指标，有效保障了多个项目的风洞试验，工程测试记录如表 5 所示。

表 5 工程测试记录

测试项目	测试结果
泄漏量	基本零泄漏
启闭时间/s	3~10
启闭压差/MPa	≤2
运行次数	500(带负荷运行)
运行时间/月	8

5 结束语

笔者结合蝶阀特点及暂冲式高速风洞对蝶阀的特殊要求，从材料和结构上对其进行优化设计。

数值分析及测试实践表明：该蝶阀满足设计预期指标，密封可靠、堵塞度小、能长期保障风洞试验安全、可靠运行，可为暂冲式高速风洞大口径液动蝶阀设计与应用提供参考。

参考文献：

[1] 周波,高川,杨洋. 2 m 超声速风洞流场变速压控制方法研究[J]. 实验流体力学, 2019, 33(6): 72-77.

[2] 曹宇晴,蒋 鸿,贾佳,等. 2 m 量级高速风洞测量系统的规范化改进[J]. 兵工自动化, 2024, 43(5): 1-3.

[3] 杨可朋,师建元,叶伟. 2.4 m 跨声速风洞蝶阀工作原理及故障处理[J]. 兵工自动化, 2024, 43(7): 44-47.

[4] 翟霄,俞树荣. 阀体应力分类与强度评定的讨论[J]. 流体机械, 2011(1): 32-35.

[5] 张应迁,唐克伦. 基于阀门设计的应力集中分析[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(7): 901-902.

[6] 王旭. 双偏心蝶阀三维模型构建方法的研究[J]. 机电技术, 2012, 35(3): 68-70.

[7] 王海民,孔祥帅,刘欢. 三偏心蝶阀振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(5): 202-206.