

doi: 10.7690/bgzdh.2018.01.004

# 基于统计数据的高速风洞阀门系统可靠性研究

方亮, 刘林, 陶洋

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提高阀门系统的可靠性和故障处理时间, 对其进行可靠性研究。通过对不同信息平台得到的高速风洞阀门系统故障数据进行整理统计, 以故障发生频率和平均处置时间的乘积构建代价函数, 将各类阀门故障按照代价函数值进行排序, 根据分析结果, 有针对性地采取冗余设计、备件采购、技术改进和制定预案等措施。结果表明: 该研究能增加阀门系统的平均无故障工作时间, 缩短平均故障处理时间, 使可靠性得到有效提升。

**关键词:** 统计数据; 阀门; 可靠性; 维修; 风洞

**中图分类号:** TJ430.7 **文献标志码:** A

## Reliability Study of Valve System in High Speed Wind Tunnel Based on Statistics Data

Fang Liang, Liu Lin, Tao Yang

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

**Abstract:** For improving valve system reliability and failure disposal time, carry out its reliability research. By sorting out the fault data of valve system in high speed wind tunnel from different information platform, a cost function is established with the product of failure frequency and average disposal time. Different kinds of valve faults are sorted according to the cost function. Measures such as redundancy design, procurement of spare parts, technical improvement and arrangement design can be made based on the analysis results. The results show that the research could be qualified to increase the MTBF of the valve system, shortened the average time for handling the system failure, and effectively enhance the reliability.

**Keywords:** statistics data; valve; reliability; maintenance; wind tunnel

### 0 引言

随着风洞试验管理信息化程度的不断深入, 设备使用的过程数据不断丰富和完善<sup>[1]</sup>, 需要对这些数据进行深层次分析和处理, 对不同来源数据进行分析与应用。对于生产型高速风洞, 阀门系统的可靠性直接影响到风洞试验的顺利开展, 故障处置时间又是制约试验效率和质量的重要因素; 因此, 笔者以高速风洞阀门系统的可靠性为研究对象, 通过对多源数据的整理、分析, 挖掘潜在规律, 以阀门系统故障发生概率和影响时间构建表征故障综合影

响因子的代价函数<sup>[2-3]</sup>, 以代价函数为指导, 有针对性地采取措施, 提高阀门系统的整体可靠性。

### 1 高速风洞阀门分类

阀门在高速风洞中的地位极其重要, 作为风洞洞体的组成部分, 起着主气流和引射气流关断、调节等重要作用, 属于风洞中的经常性运动部件, 既是风洞安全的屏障, 又是影响风洞流场品质的关键设备。高速风洞阀门系统一般由总阀、快速阀、调压阀和旁路均压阀等辅助系统组成, 如图 1 所示。

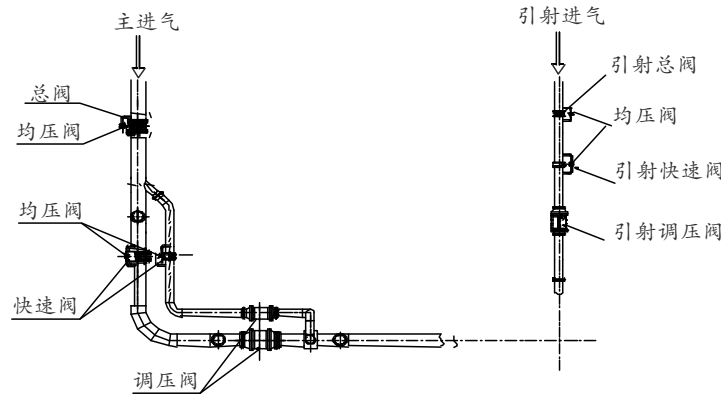


图 1 高速风洞阀门

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(11372337)

作者简介: 方亮(1984-), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事装备建设与管理研究。

总阀作为风洞与气源系统的直接连接设备，主要用于导通或隔断风洞气源，在试验时长期保持导通状态，开启次数少，但是一旦发生故障，不仅会影响到单个风洞的正常运行，还会涉及到整个气源管网的安全，潜在的损失极大；快速阀作为试验时气源的快速开关，单次运行周期短、速度快、开关次数多和故障影响较大；调压阀通过行程设计调节流量和压力，是控制风洞气流管路压力与流量的关键部件<sup>[4]</sup>。调压阀在试验过程中需要不断进行精细运行，精度要求高，运行周期较长，使用频率高，是风洞阀门系统中最关键的部件之一。

## 2 阀门故障统计

### 2.1 多源数据统计

目前，高速风洞阀门故障信息来源主要有：试验管理信息化平台、风洞设备故障统计数据库、装备管理保障信息化平台、风洞自主式维修系统和管道振动监测系统等<sup>[5-6]</sup>，这些信息平台和系统的设计与应用场合不同，功能定位不同，导致数据记录格式、详细程度、记录重点都存在不同程度的差异。为了统计分析，首先将各类数据全部导出，根据系统功能、关键词或条件搜索进行初步筛选，形成高速风洞故障汇总；将其中涉及到阀门故障的数据逐条进行分析整理，形成一个完整的统计数据。这些数据基本涵盖了风洞阀门系统的各类故障<sup>[7]</sup>。

表 1 阀门系统故障统计

| 子系统  | 类别      | 次数  | 百分比   | 平均处置时间/h |
|------|---------|-----|-------|----------|
| 调压阀  | 控制系统    | 15  | 7.81  | 10.0     |
| 调压阀  | 液压系统    | 12  | 6.25  | 12.0     |
| 调压阀  | 密封漏气    | 22  | 11.46 | 8.0      |
| 调压阀  | 阀体磨损或裂纹 | 4   | 2.08  | 28.0     |
| 调压阀  | 连接螺栓松动  | 5   | 2.60  | 4.0      |
| 调压阀  | 传感器故障   | 21  | 10.94 | 9.0      |
| 调压阀  | 显示与接触   | 5   | 2.60  | 4.0      |
| 调压阀  | 调节精度    | 17  | 8.85  | 8.0      |
| 调压阀  | 阀芯断裂    | 1   | 0.52  | 140.0    |
| 调压阀  | 其他故障    | 5   | 2.60  | 25.0     |
| 总阀   | 密封漏气    | 5   | 2.60  | 8.0      |
| 总阀   | 开关卡阻    | 2   | 1.04  | 4.5      |
| 总阀   | 控制故障    | 4   | 2.08  | 8.5      |
| 总阀   | 阀体      | 1   | 0.52  | 32.0     |
| 快速阀  | 漏气      | 18  | 9.38  | 8.0      |
| 快速阀  | 阀面或阀体裂纹 | 5   | 2.60  | 20.0     |
| 快速阀  | 液压系统    | 13  | 6.77  | 6.0      |
| 快速阀  | 控制系统    | 3   | 1.56  | 5.0      |
| 辅助系统 | 旁路限位故障  | 8   | 4.17  | 9.0      |
| 辅助系统 | 阀体卡死    | 7   | 3.65  | 10.0     |
| 辅助系统 | 控制故障    | 12  | 6.25  | 4.0      |
| 辅助系统 | 其他故障    | 7   | 3.65  | 6.0      |
| 合计   |         | 192 | 100   |          |

经过数据的收集和整理，得到阀门系统数据如下：在 6 座生产型高速风洞共计 93 900 h 的运行数据中，发生各类故障共计 1 175 条，其中阀门系统故障 192 条，阀门系统故障各类别和处置时间统计数据见表 1。

从表 1 中可见：在故障次数的统计上，调压阀的故障影响次数累计占阀门系统的 63.91%，是最重要的子系统；快速阀的故障影响次数累计占阀门系统的 17.78%，为次要子系统；旁路引射等辅助阀门和总阀分别占 12.25% 和 6.06%，重要程度又次之。

### 2.2 阀门系统的可靠性计算

根据对各类信息的整理和统计，风洞总体运行时间统计为  $T=93\ 900\text{ h}$ ，阀门系统故障次数  $g=192$  次，故障频率记为  $p$ ，故障处置时间记为  $s$  小时，运用可靠性数学知识<sup>[8-10]</sup>可以计算：

阀门系统的平均无故障工作时间 (h) 为

$$MTBF_1 = \frac{T}{g} = 489.06。 \quad (1)$$

阀门系统的平均故障处置时间 (h) 为

$$MTTF_1 = \sum_{i=1}^n p_i \times s_i = 9.88。 \quad (2)$$

阀门系统的可靠度为

$$\lambda_1 = \frac{MTBF_1}{MTBF_1 + MTTF_1} = 0.9802。 \quad (3)$$

### 2.3 阀门系统的代价函数

通过计算可知：阀门系统的可靠度为 0.9802，一定程度上制约了风洞试验的质量效率。高速风洞阀门系统的故障频率和平均处置时间对试验效益的影响极大，为了利用可靠性知识指导具体工作实践，构建一个代价函数

$$D_i = p_i \times s_i。 \quad (4)$$

根据代价函数的定义可以看出，其包含 2 个因素：1) 每类故障发生的概率；2) 故障的平均修复时间，代价函数的大小表示了该故障在整体可靠性中的影响程度。根据代价函数的定义计算各类故障的代价函数值，笔者按照从大到小的顺序进行排序，见表 2。

从表 2 数据可以得出：影响阀门系统整体可靠性的 22 类故障中，前 7 类故障的影响超过一半，占 56.92%，是最重要的影响因素，必须采取处置措施；后 7 个因素总影响比例不到 1/10，仅为 8.96%，在经费、人员和时间等紧张的情况下，可以暂缓或不

考虑解决措施；中间 8 个因素的总影响为 34.12%，应根据试验和保障条件综合考虑，选择解决措施。

表 2 代价函数排序

| 子系统  | 类别      | 代价值 $D$ | 代价比重 | 排序 |
|------|---------|---------|------|----|
| 调压阀  | 传感器故障   | 98.46   | 9.97 | 1  |
| 调压阀  | 密封漏气    | 91.68   | 9.29 | 2  |
| 调压阀  | 控制系统    | 78.10   | 7.91 | 3  |
| 快速阀  | 漏气      | 75.04   | 7.60 | 4  |
| 调压阀  | 液压系统    | 75.00   | 7.60 | 5  |
| 调压阀  | 阀芯断裂    | 72.80   | 7.38 | 6  |
| 调压阀  | 调节精度    | 70.80   | 7.17 | 7  |
| 调压阀  | 其他故障    | 65.00   | 6.59 | 8  |
| 调压阀  | 阀体磨损或裂纹 | 58.24   | 5.90 | 9  |
| 快速阀  | 阀面或阀体裂纹 | 52.00   | 5.27 | 10 |
| 快速阀  | 液压系统    | 40.62   | 4.12 | 11 |
| 辅助系统 | 旁路限位故障  | 37.53   | 3.80 | 12 |
| 辅助系统 | 阀体卡死    | 36.50   | 3.70 | 13 |
| 辅助系统 | 控制故障    | 25.00   | 2.53 | 14 |
| 辅助系统 | 其他故障    | 21.90   | 2.22 | 15 |
| 总阀   | 密封漏气    | 20.80   | 2.11 | 16 |
| 总阀   | 控制故障    | 17.68   | 1.79 | 17 |
| 总阀   | 阀体      | 16.64   | 1.69 | 18 |
| 调压阀  | 连接螺栓松动  | 10.40   | 1.05 | 19 |
| 调压阀  | 显示与接触   | 10.40   | 1.05 | 20 |
| 快速阀  | 控制系统    | 7.80    | 0.79 | 21 |
| 总阀   | 开关卡阻    | 4.68    | 0.47 | 22 |

### 3 可靠性提升措施

通过信息化手段得到的统计数据，最后量化成一个统一的衡量指标，利用代价函数表征的物理意义，笔者按照影响程度从大到小排序，为有针对性地制定措施提供了理论依据。

#### 3.1 通过冗余设计降低故障影响

对关键和重要部件进行冗余设计，保障试验过程的无缝衔接，是降低故障概率的有效方式之一。在 FL-26 风洞新调压阀的研制过程中，针对位移传感器在代价函数中排序第一，容易出现损坏的实际情况，加大了对位移传感器的保护力度，通过选用更加可靠的传感器、设置保护套和调整安装位置，减少了故障发生率。同时，设计 3 只传感器并联运行的方式，其中一只传感器出现故障，不会影响风洞试验的顺利进行，将传感器的平均故障处置时间由 8 h 缩短为 0.5 h，极大地提高了风洞试验效率。

#### 3.2 按照代价函数进行备件采购排序

科学地对试验设备进行备份，减少故障损失时间，是提升风洞试验可靠度的有效途径。通过在数据统计分析基础上建立代价函数，按从大到小的原则建立备件采购需求。调压阀位移传感器、调压阀密封先后出现 21 次、22 次故障，频率高、处置时间长，对风洞试验效率影响大。FL-26 风洞快速阀、

FL-31 风洞调压阀阀芯断裂故障发生频率低，但处置周期极长，重要程度不亚于常见故障。优先购置补充位移传感器、密封围带和阀芯等代价影响较大的备品备件，使有限的维修经费投入更加精准，可提升保障经费的有效性。

#### 3.3 对重点问题进行系统改造

笔者以专项经费和课题为支撑，拓展新技术新方法，从源头上杜绝故障的频繁出现。FL-24 风洞调压阀在气源压力偏高、马赫数较低的情况下，会出现马赫数震荡，流场难建立的问题。经分析，在调压阀油源油温过高时，液压系统控制特性发生变化，不易调节。针对此问题，以专项课题经费的形式对油源温度降低采取措施。通过液压油外循环冷却方式，加装专门的冷却系统，调压阀油源温度在高频率使用时保持在合理范围之内，确保调节效果。

#### 3.4 针对性地建立故障处置预案

针对难于及时解决的故障，笔者利用生产厂家的专业技术优势，切实提升保障工作的质量和水平，通过与阀门厂家、液压配套厂家和安装运输厂家等专业单位签订维修保障协议，形成重点故障处置预案，形成成熟的从阀门拆、运、修、装全链条的快速故障处置流程。在某引射快速阀返厂维修中，通过成熟的处置流程，把处置时间由以往的 20 d 缩短到 7 d，提升了故障处置能力。

### 4 效果分析

在维修成本总体保持不变的情况下，笔者通过有针对性地采取相应措施，对这些方法实施后近 23 470 h 的风洞运行数据进行统计，详细故障和统计如表 3。

利用相同的计算方法得到采取对应措施后相关参数计算结果：

阀门系统的平均无故障工作时间 (h) 为

$$MTBF_2 = \frac{T}{g} = 586.75。 \quad (5)$$

阀门系统的平均故障处置时间 (h) 为

$$MTTF_2 = \sum_{i=1}^n p_i \times s_i = 5.9。 \quad (6)$$

阀门系统的可靠度为

$$\lambda_2 = \frac{MTBF_2}{MTBF_2 + MTTF_2} = 0.9901。 \quad (7)$$

通过对比可以发现：阀门系统的整体可靠度由 0.980 2 提高到 0.990 1，提高大约 1%；故障处置时

间由 9.88 h 缩短到平均 5.9 h, 缩短 40%; 阀门系统的平均无故障工作时间增加 97.69 h, 增加 20%。保障效果显著。

表 3 可靠度提升后阀门系统故障统计

| 子系统  | 类别      | 次数 | 百分比  | 平均处置时间/h |
|------|---------|----|------|----------|
| 调压阀  | 控制系统    | 3  | 7.5  | 4.0      |
| 调压阀  | 液压系统    | 1  | 2.5  | 8.0      |
| 调压阀  | 密封漏气    | 2  | 5.0  | 0.5      |
| 调压阀  | 阀体磨损或裂纹 | 1  | 2.5  | 28.0     |
| 调压阀  | 连接螺栓松动  | 1  | 2.5  | 3.0      |
| 调压阀  | 传感器故障   | 2  | 5.0  | 1.0      |
| 调压阀  | 显示与接触   | 2  | 5.0  | 2.0      |
| 调压阀  | 调节精度    | 4  | 10.0 | 9.0      |
| 调压阀  | 阀芯断裂    | 0  | 0    | 0        |
| 调压阀  | 其他故障    | 3  | 7.5  | 10.0     |
| 总阀   | 密封漏气    | 2  | 5.0  | 2.0      |
| 总阀   | 开关卡阻    | 1  | 2.5  | 2.0      |
| 总阀   | 控制故障    | 0  | 0    | 4.0      |
| 总阀   | 阀体      | 2  | 5.0  | 15.5     |
| 快速阀  | 漏气      | 4  | 10.0 | 0.5      |
| 快速阀  | 阀面或阀体裂纹 | 0  | 0    | 0        |
| 快速阀  | 液压系统    | 3  | 7.5  | 3.0      |
| 快速阀  | 控制系统    | 1  | 2.5  | 2.0      |
| 辅助系统 | 旁路限位故障  | 2  | 5.0  | 5.0      |
| 辅助系统 | 阀体卡死    | 1  | 2.5  | 20.0     |
| 辅助系统 | 控制故障    | 4  | 10.0 | 6.0      |
| 辅助系统 | 其他故障    | 1  | 2.5  | 8.0      |
| 合计   |         | 40 | 100  |          |

### 5 结束语

通过对统计数据的量化分析, 实现了阀门故障处置从定性到定量的转化, 措施的针对性更强, 可靠性也得到加强。但是在阀门故障统计数据

的分析中, 目前仅考虑到最重要的时间影响, 在下一步工作中, 还可以将质量、费用作为量化因素考虑进来, 按照价值工程的理论, 以最低的费用周期成本达到风洞阀门系统运行的可靠度指标。

### 参考文献:

- [1] 李振举, 王树礼, 倪明仿, 等. 基于信息系统的装备保障体系研究[J]. 兵工自动化, 2011, 30(11): 53-56.
- [2] WANG Yong, XU Feiyun, JIA Minping. On Maintenance Management of NC Machine Tool Based on RCM[J]. Machine Building & Automation, 2007, 36(1): 91-94.
- [3] 宋太亮. GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005: 15-17.
- [4] 陈学孔, 易凡, 王瑞波, 等. 风洞调压阀数字模拟和结构设计[J]. 阀门, 2014(4): 32-35.
- [5] 李春彦, 芮伟, 何福, 等. 高速风洞自动化试验调度系统研制[J]. 测控技术, 2013, 32(10): 133-135.
- [6] 郁文山, 易凡, 蔺元臣, 等. 基于 RBR 和 PCA 的 2.4 米风洞故障诊断系统应用研究[J]. 测试与故障诊断, 2016, 24(7): 31-34.
- [7] 黄燕, 周密, 黄卫星, 等. 阀门故障分析及其分类[J]. 阀门, 2007(6): 41-44.
- [8] 王勇, 许飞云, 贾民平. 基于 RCM 的数控机床维修管理研究[J]. 信息技术, 2007, 36(1): 91-94.
- [9] 李冲, 张安, 毕文豪. 基于 PHM 的作战飞机可用度和任务可靠度计算[J]. 兵工自动化, 2013, 32(9): 37-41.
- [10] 杨为民. 可靠性·维修性·保障性总论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 35-42.