

脉冲风洞的真空获得系统

谷笏华, 李振华, 肖林奎, 刘云峰, 苑朝凯, 靳良玉

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要 本文简述以往 LHD 脉冲风洞的真空获得系统配置方案, 重点描述新建成的 JF12 激波风洞真空方案与调试结果, 详细介绍了相应的测试系统, 文末给出调试结果。

关键词 脉冲风洞, 激波风洞, 真空, 测试

引言

LHD 实验室拥有数套脉冲设备使用的真空获得系统, 基本配置为滑阀式真空泵, 由于滑阀式真空泵极限真空度不高, 大部分设备还配备了一级或两级罗兹真空泵。这其中当以 JF8A、JF10 激波风洞的配置最为成功, 该系统初建于 1970 年, 原在力学所弹试楼, 由两套真空机组组成, 分别配属 JF8 激波风洞和 JF4B 高超声速脉冲风洞。1993 年, 将两套机组合并为一套, 供两座风洞使用, 一直沿用至今。期间, 除真空阀门老化外, 各真空泵未发生故障。

该机组运行时, 先由 2 台浙江真空泵厂生产的 H300 滑阀式真空泵对真空容器进行预抽; 再由 5 台沈阳真空技术研究所研制的真空泵进行继抽, 它们是前级泵: 3 台 H150 滑阀式真空泵(2 台抽空, 1 台备用), 二级泵: 1 台 ZL1200 罗兹泵, 主泵: 1 台 ZL5000 罗兹泵, 抽气速率按 1:4 等比递增。该机组需专人操作, 抽空容积 70m^3 时, 抽空时间约 25 分钟, 极限真空度可达 4Pa, 最大功耗约 120KW。

由于该机组是国内早期研制的产品, 最大允许压差低于 133Pa (1mmHg), 不能在高压头下启动运行, 而国内后期生产的普通罗茨真空泵的最大允许压差亦仅数 KPa。据此, 若用于 JF12 激波风洞 600m^3 的真空容器时, 为满足抽空时间, 主泵抽气速率将达 10000L/s, 不仅机组非常庞大, 而且功耗亦非常大, 还要继续承受滑阀式真空泵的油烟污染。

1 真空获得系统配置方案

JF12 激波风洞真空获得系统是风洞附属系统的重要组成部分之一, 是真空设备、真空容器、真空测控系统的集合, 这里的真空设备指真空泵, 真空容器则是风洞喷管、试验段、腹腔、真空罐群等参与真空运行的管路集合。

JF12 激波风洞采用爆轰驱动方式运行, 驱动气体为氢气(或乙炔)与氧气及空气的混合气体。对真空获得系统而言, 其主要功能如下:

①风洞试验前, 承担真空容器内的空气抽空任务, 达到预定真空度, 保证喷管正常启动。

②爆轰试验后, 承担真空容器内爆轰后的产物即未燃烧完全的可燃气体残气及水蒸汽的抽空任务, 以确保设备安全。

③抽空后, 通过开启放空装置, 恢复真空容器的大气压。

④抽空过程中, 对真空容器内的真空度及机组运行参数实时、准确测量并记录。

⑤当真空容器门窗开闭及设备维修后, 具备对真空容器的密封检漏能力。JF12 真空获得系统的基本要求如下:

①风洞真空容器的容积约 600m^3 。

②风洞试验前, 由大气压即 100KPa, 抽空至 100Pa, 用时约 40~50 分钟。

③系统具备在含有一定颗粒物、水蒸汽条件下的抽空能力。

④系统具备手动/自动运行功能, 真空度等参数实时数字化显示, 并自动记录抽空数据, 绘制抽空曲线。

⑤系统总体性能先进, 运行稳定, 安全可靠, 维护方便, 价格合理。

在配备 JF12 真空获得系统时, 为获得最佳方案并确保一次成功, 工程组参观、考察了国

内部分研究单位及大型生产企业，获得了大量第一手资料，亦更新了以往的观念。如：①近年推出的新式气冷罗茨泵，可在高达几十 KPa 的压差下启动，在无前级泵的情况下，甚至可直接从 1 个大气压下启动，机组运行效率大大提高。②经典的液环泵采用水(或油)作为循环工作液，粉尘或蒸汽对泵体及其性能不构成影响，且在大气到 40KPa 之间抽速恒定，故前级泵应首选液环泵。③随着工业自动化水平的提高，PLC 技术得到广泛应用，真空机组得以彻底实现自动运行。

工程组经讨论后，就 JF12 真空系统请国内三家大型真空设备生产企业分别提出方案，他们是浙江真空设备集团有限公司、台州兴华真空设备制造有限公司、江阴天田真空设备制造有限公司。其中，江阴天田真空设备制造有限公司提供的方案思路清晰、设计合理、选用器件上乘，性价比最高，且技术力量雄厚。

他们给出的配置方案为：采用带旁通阀和旁通管路的气冷罗茨液环真空机组方案，即 JZJLY-2500.1200.600.203 型气冷罗茨液环真空泵机组，图 1，且二套并联同时使用。

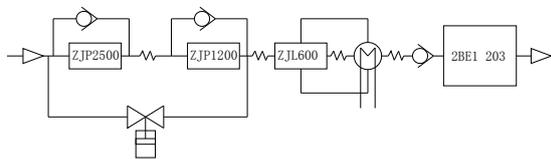


图 1. 机组工艺流程

单机组泵体配置：

前级泵：2BE1 203 液环真空泵(倍缔纳士-原西门子公司产)。配用功率 37kw，最大抽速 312 L/S，转子为 SS304，其余普材，具有油、水两种介质互换功能。

二级泵：ZJL-600 气体循环冷却罗茨真空泵。直联传动，配用功率 55kw，最大抽速 600L/S。

三级泵：ZJP-1200 带旁通阀罗茨真空泵。直联传动，配用功率 11kw，最大抽速 1200L/S。

主 泵：ZJP-2500 带旁通阀罗茨真空泵。直联传动，配用功率 18.5kw，最大抽速 2500L/S。

罗茨泵的其余性能指标为：普通材质，单个机械密封，氟橡胶密封，SKF 进口轴承，泵体、转子均采用 HT200、主从动轴采用 45 钢、机械密封采用不锈钢和耐油橡胶。

2 真空获得系统参数估算

机械式真空泵在一定真空容积、抽气速率条件下，达到一定真空度，所需的抽空时间有多种计算方法。在不考虑被抽管路损失、流态变化和漏气的理想条件下，对于粗真空(101KPa~133Pa)、中真空(133Pa~0.133Pa)范围(即被抽管路的流动气体处于粘滞流态)，抽空时间的理论计算公式如下：

$$t = 2.3 \times \frac{V}{s} \times \log\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

其中， V 为被抽容器的容积； s 为抽气速率； p_1 为被抽容器的初始真空度， p_2 为抽气终止时被抽容器的真空度， t 为抽空时间。事实上，抽气速率不是恒定值，它随真空度在一定范围内改变；此外，即使不考虑系统漏气，抽气速率还与真空系统的流导(涉及抽空管道的粗细、长短、形状及连接方式)密切相关，故实际抽空时间都会长于上述理论公式的计算结果。且随着真空度的提高，偏差越来越大。因此，实际计算时一般按以下工程计算公式进行估算：

系数 K_q 随真空度范围变化见表 1。

按照上述配置方案，由 100KPa 开始，启动前级泵 2BE1 203，假如在 80KPa、5KPa、2.5KPa 时分别启动二级泵 ZJL-600、三级泵 ZJP-1200、主泵 ZJP-2500，则工程估算的抽空时间归纳到表 2。

表 1. K_q 取值表

p (KPa)	100~10	10~1	1~0.1	0.1~0.01	0.01~0.001
K_q	1	1.25	1.5	2	4

表 2. 抽空时间估算

序号	压力范围(KPa)		真空泵				抽气速率 (m ³ /min)	抽空时间 (min)	累积时间 (min)
	P ₁	P ₂	2BE1 203	ZJL600	ZJP-1200	ZJP-2500			
1	100	80	√				18	3.7	3.7
2	80	5.0	√	√			36	24.5	28.2
3	5.0	2.5	√	√	√		72	3.6	31.8
4	2.5	0.1					150	9.2	41.0
5	0.1	0.01	√	√	√	√		9.2	50.2
6	0.01	0.001						18.4	68.6

可见, 双机组运行时, 抽至 100Pa, 用时约 41 分; 抽至 10Pa, 用时约 50 分; 抽至 1Pa, 用时约 69 分; 故上述配置满足设计要求。按同样方法计算, 若用现有的 JF8A、JF10 风洞真空机组, 对 JF12 风洞真空容器抽空, 抽至 10Pa, 用时将达 3 小时 44 分。

3 真空获得系统阀门与气源

为保证抽空完成后, 关闭真空容积与真空机组的连接管路, 配备了 1 台口径 DN600 高真空气动挡板阀, 型号 GDQ-S600, 该挡板阀由上海真空阀门厂生产。为保证被抽容器抽空后正常放空, 并实时监测各真空罐真空度, 工程组配备了口径 DN100 高真空气动蝶阀, 型号 GIQ-100, 数量 10 个, 其中 6 个用于放空, 4 个用于真空度测量, 该阀由上海真空阀门二厂生产。

由于上述阀门工作时, 需要 0.4~0.6MPa 的空气气源, 该气源由位于真空罐旁的减压气源站提供。

4 真空获得系统操作台与监控仪表

每套真空机组配备了一台真空控制柜, 控制柜内含有控制真空泵电机启动的接触器, 控制阀门开启的继电器, 以及给接触器、继电器发出动作指令的 PLC(可编程逻辑控制器)。JF12 真空控制柜使用的小型 PLC 为德国西门子公司生产的 Siemens S7-200, 其 CPU 为 216。S7-200 以其高可靠性、指令丰富、通讯能力强、性价比高等特点, 在工业控制领域中被广泛应用。

真空控制柜面板上含有各真空泵运行及气动阀门开闭的操作按钮, 真空机组手动/自动运行的切换按钮以及急停按钮。此外, 面板上配

有 1 台数字电阻真空计, 型号 ZDZ-3, 由上海云捷真空仪器有限公司生产, 其规管安装在真空机组 DN300 蝶阀后的管路入口处, 通过仪表面板设定 3 个不同真空度, 以对应 3 个继电器吸合状态, 再通过 PLC 控制 3 个电机启动接触器, 最终控制 ZJL600 气冷罗兹泵、ZJP-1200 及 ZJP-2500 罗兹泵的启动或停止。

由于 JF12 激波风洞真空罐由 4 个真空容器连接而成, 为准确测量抽空时各真空罐真空度, 工程组为每个真空罐配备了 1 台数字电阻真空计, 型号为 DZA1。

实际使用时发现, 电阻真空计呈现出很强的非线性, 在低真空时, 测量值比实际值高, 且各真空计数值各异, 甚至有量级差别。而在高真空时, 各真空计数值趋于一致。事实上, 此类真空计仅适于 3KPa 以下的真空度测量。

上述因素对真空机组造成的影响是, 单机组运行时, 各真空泵启动时间延缓; 双机组运行时, 真空泵不同步。为确保真空机组同步运行, 工程组提出了用 1 套绝压压力变送器及数字显示仪表替代原 2 台电阻真空计的方案。绝压变送器型号 NS-F, 量程 100KPa, 精度 0.05%; 数字显示仪表型号 NS-YB05C, 5 位单通道数显表, 含有 4 路继电器, 除满足各真空泵启动要求外, 还可进行大气压力测量, 该仪表由上海天沐自动化仪表股份有限公司生产。

除此之外, 工程组对测试系统进行了完善, 包括以下几个方面:

① 为保证爆轰试验后, 再次抽空时 DN600 挡板阀正常开启, 在挡板阀后的真空管路上, 增设了 1 套量程 100KPa、精度 0.03% 的 NS-F 型绝压压力变送器, 以及 NS-YB04C 型 4 位单通道数显表, 与 NS-YB05C 一起, 以监视挡板

阀前后压差，同时，作为 NS-YB05C 的备用仪表。

② 为实时监视真空机组运行状态，即冷却水入口水压、入口水温、出口水温，以及气冷泵温度，配备了 2 套数字仪表。每套仪表由 1 个量程 1MPa、精度 0.3% 的 NS-I 型压力变送器，3 个量程 0~100℃ 的铠装 Pt100 温度传感器，以及 NS-YB04D 四通道 4 位显示控制仪表组成。

③ 为监测设备运行环境参数，即试验段温度、真空阀门气动执行机构的气源压力、冷却水池的水位以及 220V 供电电压，特配备了 1 个量程 0~100℃ 的铠装 Pt100 温度传感器，量程 1MPa、精度 0.3% 的 NS-F 压力变送器，量程 3m 的 NS-E 液位计，以及 NS-YB04D 四通道 4 位数字显示控制仪表。

④ 为便于运行人员操作气动阀并监控抽空状态，特配备了真空操作台。该操作台由两部分组成，左侧部分集成了数字显示仪表及各类测量、放空控制按钮，右侧部分集成了 1 台 Dell M380 台式机，该机含有 1 个 RS-232 串口 (Com1)、8 个 USB 口、2 个 DVI 口，支持 2 台 1280×1024 分辨率的 19" 显示器，另通过外置

USB 显示卡支持 1 台 1920×1080 显示器(47" 液晶电视)，以显示、记录抽空数据和曲线，及真空机组运行情况。

5 真空获得系统监控软件

真空机组运行、控制软件由江阴天田公司编写，Siemens S7-200 PLC 的编程环境为 MicroWIN v4.0 SP4，在笔记本电脑上调试成功后，通过专用数据线写入 PLC。

为记录抽空过程中真空机组的运行参数，以及真空容器的真空度，工程组在 Windows XP 环境下用 Visual Basic 6.0 开发了真空系统测量软件，该软件由三个窗口组成，第一个窗口为真空测量窗口，功能是实时记录真空机组运行时各显示仪表的数据，并在计算机上填写实验记录；第二个窗口为真空曲线窗口，功能是实时显示真空机组运行时各显示仪表的数据曲线；第三个窗口为运行流程窗口，在三维真空容器、真空机组的背景下，实时显示各显示仪表的数据，以及动态显示各真空泵运转情况，软件界面见图 2。

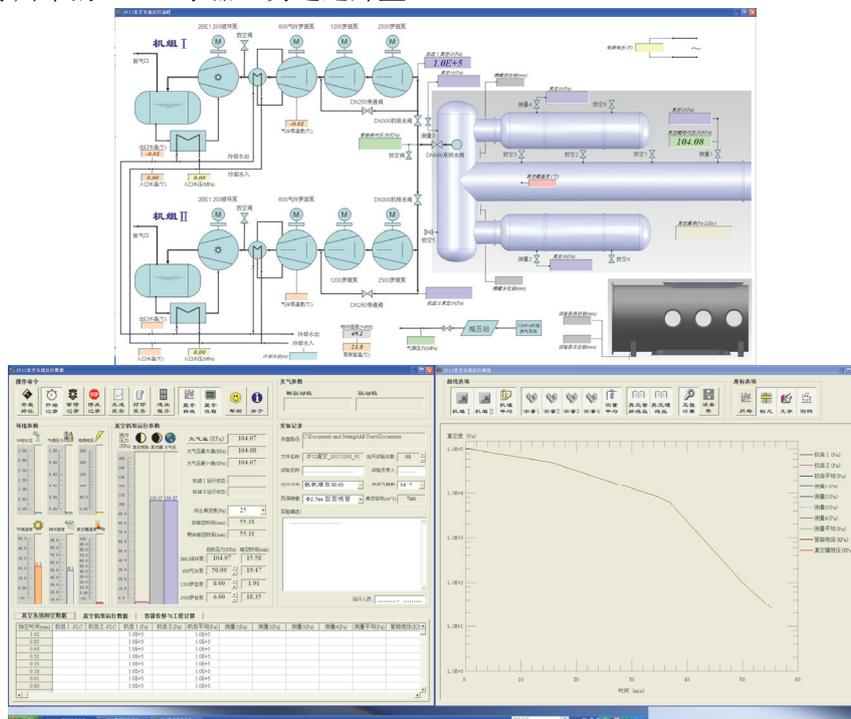


图 2. JF12 真空监控软件界面

数据通讯编程方法采用 VB 下 Microsoft 提供的 ActiveX 串行通讯控件 MSComm，它为应

用程序提供了通过串口收发数据的简便方法。主机(台式计算机)一方与从机(PLC 及数显仪表)

通讯的信号传输端口为 Com1，波特率：9600，奇偶校验：无，数据位：8，停止位：1。

显示仪表及 PLC 的数据通过该设备上的 RS-485 接口输出，由于计算机仅有 RS-232 接口，RS-485 接口在与计算机连接时需通过专用转换器，各仪表之间及与转换器的连接则仅需将对应的 A、B、GND 或 TX+、TX-及 GND 并接在一起，形成局域网。

在 RS-485 局域网中，需给每个从机分配一个不同的设备号，主机则通过查询方式，根据各自仪表的通讯协议，依次给从机发送专用指令，从机收到指令后，将数据反馈给主机，经主机处理后，通过文字或曲线的方式实时显示记录。

此外，绝压传感器显示仪表具备计算机在线调整仪表设定参数功能，故各真空泵启动压力可由计算机随时更改，简化了运行人员的操作步骤。

6 真空获得系统调试结果

经重新计算，JF12 激波风洞实际真空容积为 766m^3 ，较设计值增大 27.7%。机组分步试抽情况如下：

极限真空度：2011 年 5 月，分别用 I#、II#真空机组对真空管路进行单机组试抽，真空机组入口处电阻真空计测量到的真空度分别为 0.01Pa、0.08Pa，满足极限真空度指标 0.2Pa 的要求。

单机组手动运行：单机组试抽时，工程组尚未对真空系统进行数字化完善，采用手动运行方式，各真空泵的启动信号由机柜 I 或 II 上各自的电阻真空计确定。从 1 个大气压(101KPa)开始，先启动液环泵；至 8.5KPa 时，启动 600 气冷罗兹泵；至 5KPa 时，启动 1200 罗兹泵；至 2.5KPa 时，启动 2500 罗兹泵，全部数据每 2 分钟记录一次。

2011 年 7 月，用 I#机组试抽，机组真空计显示真空度 100Pa 时，用时 138 分钟。用 II#机组试抽。为缩短预抽时间，先用 I#、II#两台机组的液环泵抽空，抽至 8.5KPa 时，关闭 I#机组液环泵，仅开启 II#机组后续泵，机组真空计显示真空度 100Pa，用时 126 分，较单台液环

泵预抽缩短 12 分钟。为考查极限真空，继续抽至 24Pa，共用时 172 分。

图 3 给出单机组两次试抽曲线，同时给出工程计算曲线。可见，两台液环泵同时开启的运行时间较单台短；真空度 100Pa 以下，抽空时间明显延长，且真空度越高，时间越长，说明真空容器含有一定泄漏；在上述压力组合下，实际抽空时间比工程计算值短。

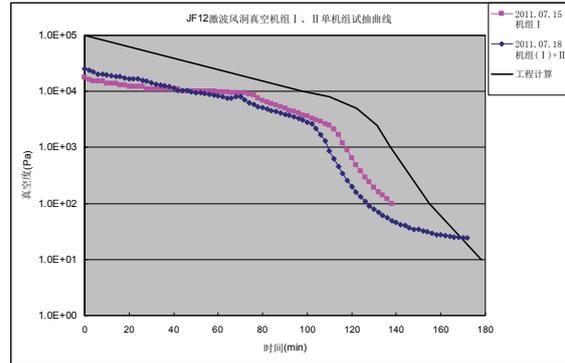


图 3. 真空机组 I、II 单机组手动运行试抽曲线

双机组手动运行：2011 年 8 月，用 I#和 II#机组对真空容器进行双机组试抽，手动运行方式，各真空泵启动压力与单机组试抽相同。图 4 分别给出两台机组电阻真空计平均值、4 台测量真空计平均值、绝压传感器测量值，以及工程计算值的曲线。测量平均值显示，抽至 100Pa 时，用时约 78 分钟，与工程计算值比较一致；抽至 55Pa 时，用时约 94 分钟。图中还可见，真空计与绝压传感器相比严重滞后。

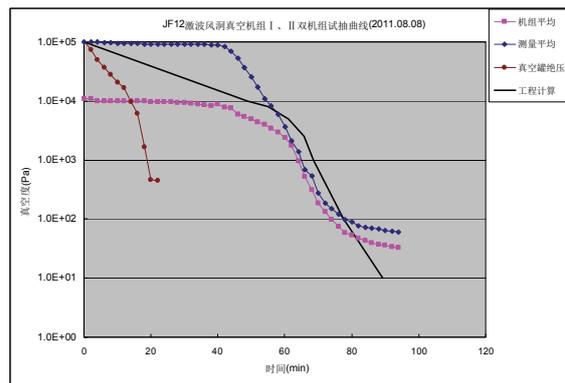


图 4. 真空机组 I 和 II 双机组手动运行试抽曲线

双机组自动运行：2011 年 9 月，用 I#和 II#机组对真空容器进行双机组试抽，全自动运行。各真空泵启动压力由绝压传感器及显示仪表控制，为进一步缩短抽空时间，将真空泵启

动压力调整为 80、8、6KPa。图 5 分别给出 4 台测量真空计平均值、绝压传感器测量值，以及工程计算值的曲线。抽至 100Pa 时，用时约 55 分钟，较上述“手动”缩短 23 分钟，与工程计算结果亦符合较好；继续抽至 50Pa 时，用时约 65 分钟；25Pa，用时约 115 分钟。

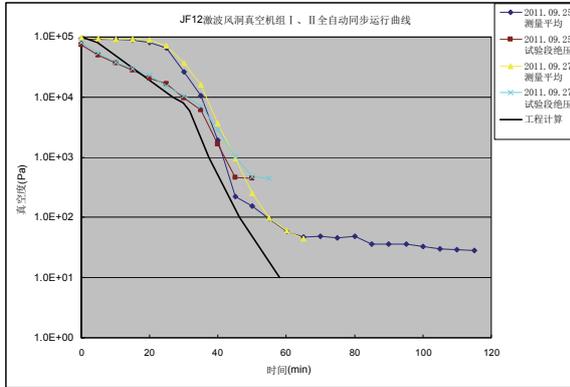


图 5. 真空机组 I 和 II 双机组自动运行试抽曲线

存在的问题：系统不足之处是噪声偏大，这主要是由于气冷罗兹泵引起的，特别是高入

口压力运行时更加明显。启动压力越高，噪声则越大，功耗也相应增加，而抽空时间则可适当缩短。合理平衡各参数之间的配比，是工程组下一步工作。

7 结论

JF12 真空获得系统整体配置合理、性能先进、运行可靠，达到预定设计指标，满足风洞运行要求。真空操作台整体布局合理，显示仪表、测量装置配置完善，机组运行参数记录完整，软件界面友好，可以承担风洞试验任务。

参考文献

1. 《真空系统设计与计算》，冶金出版社
2. 《JF8A 脉冲风洞改造》，中科院力学所
3. 罗茨气冷液环真空机组购销合同及技术协议，中科院力学所-江阴天田公司，2009 年 7 月

VACUUM SYSTEM OF THE IMPULSE WIND TUNNEL

GU Jiahua, LI Zhenhua, XIAO Linkui, LIU Yunfeng, YUAN Chaokai, QIN Liangyu

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract The configuration of the vacuum system used in the impulse wind tunnels of LHD was described briefly in this paper. The main focuses of this paper were the vacuum system configuration and debugging result of the newly built JF12 shock tunnel. Details of the test system and debugging result were given in the end.

Key words Impulse wind tunnel, shock tunnel, vacuum, survey