

基于压差法的风洞群高压空气资源 自动计量系统设计

罗昌俊¹, 马永一¹, 何福¹, 司洞洞², 王天泽¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000

2. 中国航天天汇科技有限公司 四川分公司, 成都 610100)

摘要: 风洞试验需要高压空气等多种动力资源; 风洞群高压空气作为一种共享竞争的资源, 具有风洞用户多、系统结构复杂、拓扑动态变化、资源消耗快速等特点; 为满足风洞运行管理和试验成本核算的需求, 设计并研制了风洞群高压空气系统集中监测与动态计量系统; 该系统基于流体力学静压差理论分析, 采用集中监测、OPC通信、图形数据库等技术, 建立高压空气资源配气网络的动态拓扑模型, 实现高压空气系统压缩机组、阀门、储罐、管线与保障风洞之间的动态逻辑关联, 自动获取当前试验风洞消耗的压力差和保障容积, 从而获得当前风洞试验的高压空气资源动力消耗; 该系统解决了高压配气系统拓扑准确描述、风洞试验单次消耗计量等问题, 取得良好的效果。

关键词: 风洞群; 高压气源系统; 压差法; 图形数据库; 动态拓扑结构模型; 消耗计量

Design of Automatic Metering System Based on Differential Pressure Method for High-Pressure Air Delivery of Wind Tunnel Group

LUO Changjun¹, MA Yongyi¹, HE Fu¹, SI Dongdong², WANG Tianze¹

(1. Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Sichuan Branch of Aerors Inc., Chengdu 610100, China)

Abstract: Wind tunnel test requires the guarantees of high pressure air and other power resource. As a shared competitive power resource, the high-pressure air delivery system of wind tunnel group has the characteristics of multiple wind tunnel users, complex system structure, dynamic topology change and fast resource consumption. In order to meet the needs of wind tunnel operation management and test cost accounting, a centralized monitoring and dynamic metering system for high-pressure air delivery is designed and developed. The system is based on hydrodynamics static pressure difference analysis, the technologies of centralized monitoring, OPC communication and graph database are used to establish the dynamic topology model in high pressure distribution network, realize the dynamic logic association among compressors, valves, tank group, pipeline and supporting wind tunnels in high pressure air system, and obtain the pressure difference and safeguard the volume consumed by the wind tunnel currently testing. Thus, the power consumption of high-pressure air resource in current wind tunnel test can be automatically obtained. The system has solved the problems of accurate topology description in high-pressure distribution system and consumption metering in single wind tunnel test, and achieves good results. It has certain reference significance.

Keywords: wind tunnel group; high-pressure air delivery system; differential pressure method; graph database; dynamic topology model; consumption metering

0 引言

大型风洞设备设施是国家重大的战略资源, 单次风洞试验的运行需要纯水、电力、高压/中压压缩空气、高/低真空等不同类型、不同压力等级的动力资源^[1-2], 不同类型、等级的动力资源在风洞群试验中需要共享竞争。各类动力资源使用及消耗计量分析对当次试验结果十分重要, 可根据压力等多种类动力资源的使用量对当次风洞试验进行效益评估, 同时, 对接下来开展同类型风洞试验所需的动力资源使用量及消耗数也具有一定的借鉴意义。

这种风洞群试验运行环境一方面存在着不同风洞试验争抢真空资源的可能, 另一方面对单次试验真空资源的消耗计量也带来挑战。在满足风洞试验需求的前提下, 如何避免不同风洞争抢动力资源使用时间, 以及实现单次试验真空消耗计量, 是实现试验工作科学管理的一项重要的技术基础, 也是实现多种动力资源统筹分配与试验任务关联分析的前提。因此, 针对真空动力资源, 开展有效的试验调度和资源消耗计量的研究非常迫切。

其中, 美国阿诺德工程发展综合体 (AEDC) 首席技术

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-10-18。

作者简介: 罗昌俊(1968-), 男, 四川广汉人, 硕士, 研究员, 主要从事总体技术、风洞测控和信息化建设等方向的研究。

引用格式: 罗昌俊, 马永一, 何福, 等. 基于压差法的风洞群高压空气资源自动计量系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5): 1-6, 13.

专家 Kraft 博士预测：对现有主要的风洞试验设备，能源成本约为试验总成本 50%，预计未来能源成本将在风洞设备运行成本中占据更大比例^[9]。因此，建立风洞试验动力资源消耗计量系统，实现对水、气等各类试验动力资源运行监测和消耗精确计量，对提升风洞试验运行整体效能和加强风洞试验运行及成本管理都具有重要现实意义。

真空系统是开展高超声速风洞试验所必需的动力系统之一，用于为风洞试验提供所需的真空环境。

试验真空环境的维持需要消耗大量电能，特别是在试验准备和运行阶段，往往需要几个小时不间断保持真空状态，真空系统已同压缩气源一样，成为风洞试验主要的能耗系统之一。所以，为提高集约效益，风洞群动力资源一般集中管理、集中保障。

针对目前运行的高压空气系统，实现其各类配套软硬件运行配合过程中实时动力资源消耗计量统计分析升级优化，能做到复杂水电气条件下真空动力环境智能化监控，进一步提升国内大型风洞群的试验效能。

如图 1 所示，现有高压空气系统的主体设备包括往复高压压缩机组、高压储罐以及配气网络系统等。其中，配气网络系统由高压空气从压缩机组生产、存储到高压罐群、输送到风洞所涉及的若干阀门、管线及附属设备等组成。风洞群配气系统通常包括多条输气总管，每条总管分为多条支管线，每条支管通常又保障多座风洞；而输气总管之间一般还设置有联通阀。

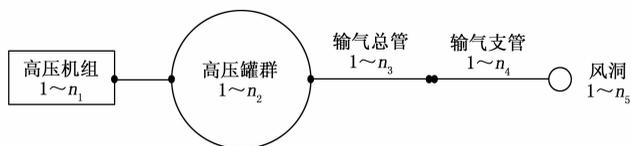


图 1 高压空气系统组成

为实现风洞试验高压空气资源消耗计量，目前常见的方式主要包括高压机组总产气量计算^[4-5]、管线加装流量计^[6-7]、风洞加装流量计^[8-10]等，但都存在一些明显的局限，不适合风洞群的消耗计量应用。比如，采用高压机组总产气量计算，只需要单套机组单位时间生产能力和总的生产时间这两个参数就可以计算，方法简单，但是无法区分风洞用户和罐群，只能统计到某一类用户群的消耗总量，不能具体到每个风洞每车次的消耗；利用每条管线加装流量计的方式，一方面试验实际成本高，设备安装复杂，另一方面无法区分共用同一管线的不同风洞的消耗；每座风洞加装流量计的方式，除了代价更高以外，部分风洞由于洞体结构、风洞流场的限制，不能安装流量计，且由于不同风洞试验的交错启动，不同真空泵组的轮换启停，这种方式不能区分不同风洞、不同试验的真空消耗，无法实现对单次风洞试验的真空消耗进行计量。

总体来讲，目前常用的风洞真空动力资源消耗计量方式存在局限，未见面向风洞群真空资源，根据不同试验任

务消耗和设备生产能力，实施试验调度和单次试验消耗计量的公开报道。

因此，需要针对当前风洞群复杂的应用环境，借助于先进技术，结合实际应用经验，研究建立一种高效、实时、自动的消耗计量方法和系统。

1 系统设计

现有群高压空气配气系统用户多、结构复杂、拓扑动态变化、资源消耗快速等诸多特点。针对以上特点，结合实际应用情况，从软件设计、软硬件接口设计、硬件设计 3 个方面综合考虑，开展风洞群高压空气资源自动计量系统设计。系统总体架构如图 2 所示^[11]。

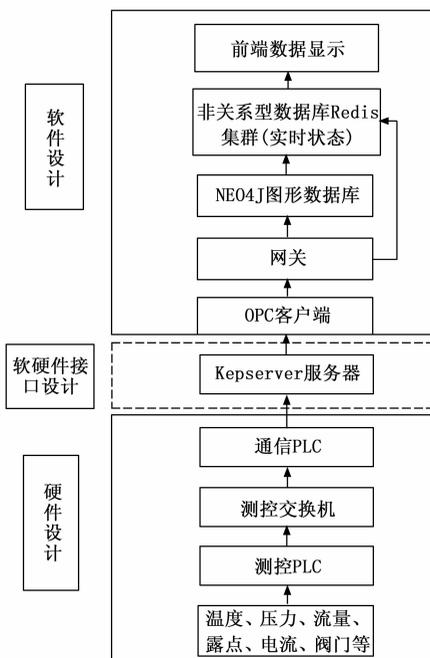


图 2 系统总体架构

软件设计部分主要采用 NEO4J 图形数据库技术，以面向复杂用户，复杂高压拓扑动态变化构建高压配气网络系统，并建立动态高压空气资源配气网络拓扑模型，实现实时压力资源消耗计量的统计分析，并通过非关系型数据库 Redis 集群实时统计，最终在前端页面展示，实现实时监测、感知和测量计算目的。

硬件设计部分主要实现对真空系统现场状态的监控，将温度、压力、流量、电流、阀门等各类数据进行集中采集，通过动力现场控制 PLC 循环扫描真空系统的泵组启停、阀门开闭、罐群真空度等关键参数；通过通信 PLC 以单边通信方式将现场控制系统的信号传出；通过绑定的 OPC 服务，根据 OPCserver 中建立的地址，将得到的 PLC 数据写入到 OPCserver 中，并通过接口将动力系统信息上传中心服务器，用于信息集中处理和控制的；

软硬件接口设计主要通过 Kepserver 服务器实现，以提供各类动力资源统一数据服务，实现数据的跨层级统一访

问和风洞群运行状态的集中监控。

本系统建设主要思路如下:

1) 建立风洞试验运行监测系统, 采集风洞及高压系统现场运行数据, 实现对风洞试验及高压系统运行状态的集中监测。

2) 实时获取正在试验风洞的“高压空气资源使用开始”、“高压空气资源使用结束”信号及其对应的高压罐群压力, 其中:

“高压空气资源使用开始”: 表示该风洞开始使用高压空气动力资源, 作为该次风洞试验高压空气资源消耗的起点。

“高压空气资源使用结束”: 表示该风洞结束使用高压空气动力资源, 作为该次风洞试验高压空气资源消耗的终点。

3) 通过实时物理拓扑结构遍历, 建立高压空气资源配气网络拓扑模型并保持模型的动态时效性, 获取当前保障试验的罐群容积。

4) 运用空气动力学方程式, 引入流体力学导出的静压差法进行理论分析和数学建模, 计算从“资源使用开始”到“资源使用结束”时段内消耗, 从而获得当前风洞试验的高压空气资源动力消耗, 并最终以可视化报表呈现。

2 系统数据流设计

依托风洞试验现场、高压空气生产现场已有的压力传感器、阀门电气控制设备、运行监控和测量等软硬件系统, 通过新增通信 PLC 等硬件, 采用 PLC 单边通信^[12]等方式, 在不影响现场试验设备正常运行的前提下, 采集阀门状态、罐群压力和风洞运行状态等信号(如资源使用请求、资源使用开始、资源使用结束等), 实现对风洞试验和高压空气资源生产运行状态的集中监测。风洞群高压空气资源动态计量系统状态数据上行传输路径如图 3 所示。

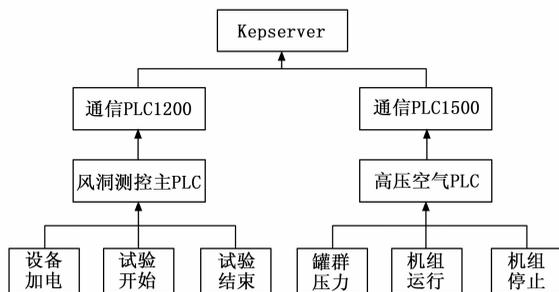


图 3 状态数据上行数据流设计

现场状态数据由风洞或高压系统已有的相应传感器及 PLC 进行采集并经通信 PLC 发送至 Kepservers 服务器, 然后 Kepservers 服务器对外提供 OPC 协议数据, 经 OPC 客户端进行读取转发^[13], 供调度中心开展试验调度和试验消耗计量。

2.1 风洞上传计量信号定义

为避免使用共享高压空气资源的多座风洞同时启动所

带来的安全风险, 通过试验调度中心的统一调度, 确保每一个时刻只有一座风洞使用高压空气资源。所以, 为了提高试验高压空气消耗计量的精度, 需要准确地定义每一次风洞试验的“资源使用开始”、“资源使用结束”等信号。

如表 1 所示, 设备操作人员或运行人员可根据风洞现场的具体情况, 将现场关键设备的状态与“设备(风洞)加电”、“资源使用开始”、“资源使用结束”等信号关联, 并可设置、查看所监测设备各测点状态, 这样可在正常的试验操作过程中, 同步完成资源消耗计量信号的自动上传。

表 1 风洞上传计量信号定义(示例)

序号	现场风洞设备名称	测点名称	测点号	测点数据	信号含义
1	控制台继电器	线圈电流	1I	30/60	设备加电
		线圈电压	1T	10/30	
2	控制台继电器	线圈电流	1I	0	设备断电
		线圈电压	1T	10/30	
3	快速阀	电流	1I	2/5	正在试验
		开度	1T	85/95	
4	快速阀	电流	1I	0	试验结束
		开度	1T	0	
5	调压阀	电流	1I	5/8	资源使用开始
		开度	1T	50/85	
6	调压阀	电流	1I	0	资源使用结束
		开度	1T	0	

2.2 工艺量数据采集

在风洞现场或高压空气系统的本地监控系统中配置西门子 S7-1500 系列 PLC, 并配置 2 个 ProfiNET 网络接口, 其中一个 ProfiNET 网络接口与现场监控系统中的 PLC 进行 S7 单边通信^[12], 并获取数据; 另一个 ProfiNET 网络接口将各现场 IP 地址整合到同一网段, 通过该网络上传数据至统一调度中心。

2.3 调度系统

主要实现对风洞试验及真空系统运行的调度、真空资源消耗统计和信息可视化。

风洞试验的真空动力资源需求以接口形式上传至调度系统。调度系统负责解析和监控每座风洞的真空需求, 包括所需真空度、真空容积和试验时段等信息。

风洞试验过程中动态信息以信号的形式上传到调度系统。调度系统负责解析和监控每座风洞的风洞试验动态。风洞上传的信号包括资源使用请求、资源使用开始、资源使用结束, 系统下发试验允许信号。

真空系统运行过程中动态信息以信号的形式上传到调度系统。调度系统负责解析和监控真空系统的运行状态。真空系统上传的信号包括泵组启停、阀门开闭、真空罐群真空度等信号。

调度系统根据调度策略确定风洞试验的优先级, 并形成真空泵组的启动计划, 当真空度满足试验需求时下发“动力就绪”信号。试验结束时调度系统负责完成试验的消

耗计量和数据统计显示。

3 系统软件设计

针对高压空气资源消耗计量的有效实时统计, 主要从软件体系架构、系统功能架构、拓扑存储架构 3 个层面考虑系统软件的设计。

3.1 软件体系架构

系统采用基于 SOA 面向服务 (Service Oriented Architecture) 的软件体系架构^[14]。系统中所有的程序功能都被封装在一些合适的、独立部署的功能模块中, 包括数据分类、存储、信息处理、可视化等重要功能模块, 而这些模块就是 SOA 架构中的不同的服务, 这些服务可以组装构建完成一个或多个任务、业务功能所需要的应用和流程。

采用 SOA 面向服务的架构, 可以使得系统的任意单项服务独立存在, 并且各个服务可直接进行网络调用, 大大提升系统的易维护性和高可用性。

3.2 系统功能架构

为实现对风洞群中众多类型各异、开展随机的风洞试验的动力消耗进行精准计量, 并且保证各类数据访问无冲突限制, 因此本系统设计需按照平台一体化的设计思想处理, 对风洞试验各类相关信息系统进行整体综合设计, 使得各业务系统的数据和信息实现互联互通, 从底层数据上做到标准规范统一, 以便于统计各类风洞试验全流程的消耗计量数据。

风洞群动力资源自动计量系统的一体化功能架构如图 4 所示。

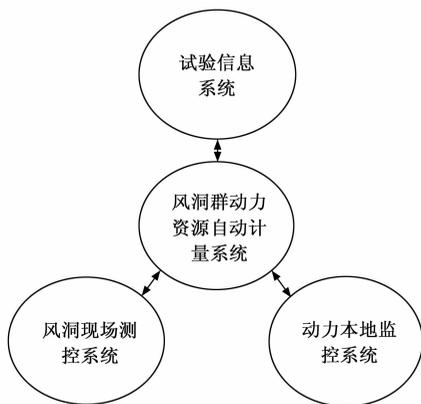


图 4 风洞群动力资源自动计量一体化设计

系统主要包含试验信息系统、风洞群动力资源自动计量系统、风洞现场测控系统、配套动力本地监控系统四部分。其中:

试验信息管理系统用于日常各种类型风洞试验的基本信息、使用动力资源信息、试验计划等信息的管理, 主要为平台提供试验日计划、试验周计划、试验运行信息 (含承担风洞、试验名称、试验类型、使用资源、班组成员等) 等数据;

风洞现场测控系统用于风洞试验现场的各项指标测控,

可为平台提供设备加电、正在试验、试验结束、资源使用开始、资源使用结束等数据;

动力本地监控系统用于风洞试验现场的基本动力监控, 可为平台提供高压空气罐群压力、阀门状态、机组运行信息等数据。

风洞群动力资源自动计量系统在整合试验信息管理系统、风洞现场测控系统、动力本地监控系统提供的数据库基础上, 通过相关服务获得试验的高压空气资源压降和保障容积, 从而可实现对每个风洞、每个试验车次对应的高压动力资源消耗准确计量, 并在前端以报表形式可视化呈现, 以此得到动力资源的实际消耗量, 系统计算完毕后, 将此类数据汇总至平台统一存储。

3.3 拓扑存储架构

由于风洞群实时共享高压空气资源, 需要通过不同罐群、阀门、管线的切换与组合, 来保障不同的风洞试验需求。所以, 压缩机组、阀门、储罐、输气总管、支路管线和具体保障的风洞之间构成了一组非常复杂、动态变化的拓扑结构关系, 实时掌握保障风洞的罐群及管线比较困难。

针对这一情况, 最重要的是如何将复杂动态变化的拓扑结构以数学模型抽象建模, 并实际解决节点、线的定义。本方法利用图彤拓扑融合数据^[15], 将设备基本信息通过节点、边、标签存储于网络, 并持久化在磁盘上^[16-21], 形成相应的数据库系统。

Neo4j 图彤数据库^[19]善于处理大量复杂、动态、互连接和低结构化的数据, 可将数据作为图彤处理, 能够存储数据的自然图彤结构, 并大大提升数据检索效率及解决复杂拓扑结构遍历关系问题, 因此采用 Neo4j 图彤数据库进行拓扑结构存储是有效解决复杂动态变化的风洞群动力资源提供的方法之一。

4 关键技术和方法

4.1 基于图彤数据库的配气网络拓扑构建

4.1.1 配气网络动态拓扑模型的定义

如图 5 所示, 出于建设成本和风洞试验不同动态变化的高压空气资源需求的考虑, 高压气源可分为不同罐群 (分区), 不同罐群由多个罐体通过阀门和管道连通而成; 从罐群输送到不同风洞包括多条输气总管, 每条总管又分为多条支管线, 每条支管通常可保障多座风洞; 而输气总管之间一般还设置有联通阀, 实现不同风洞、不同试验的高压空气资源的组合供给。这种由高压压缩机组、阀门、罐群、输气总管、支路管线和正在实施保障的风洞组成的反映供配气关系的物理结构称为高压空气资源配气网络动态拓扑模型, 拓扑中每个节点设备工作状态的变化都意味着动力资源供给配置 (压力等级、标方容量等) 的改变。

而设计图彤数据库模型关键在于结合数据本身的特点和用户查询的特点定义每条边和每个节点的意义。

4.1.2 构造配气网络拓扑模型

建立风洞高压空气资源供气关系的物理连接关系, 形

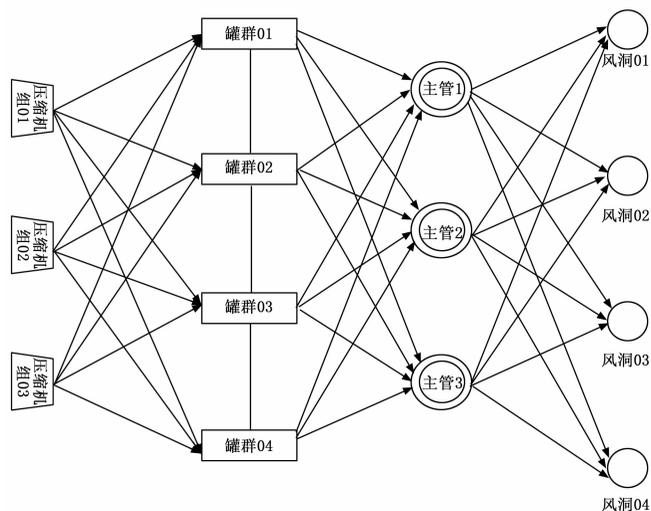


图 5 高压配气网络系统拓扑架构

成动力现场结构化数据, 构造管线拓扑结构基础模型。

首先, 将物理拓扑结构中罐群、管线、阀门、压缩机及关联关系等以知识的形式进行抽取, 形成动力现场结构化数据, 用三元组 (实体、关系、属性) 进行表示和管理。

这是构建配气网络拓扑模型关键一步。在本问题中, 供气管道中气体的流向变化对高压空气资源配气网络拓扑结构没有影响, 根据图论的概念, 可将高压空气资源配气网络视为一个无向图 $G = \langle V, E \rangle$: 将配气网络中的机组、管线气流汇流点、罐群以及保障风洞等作为图的节点或顶点; 将配气网络中的阀门设备作为图的边。这是因为管线决定配气网络的连接关系, 而阀门设备控制罐群、机组和管线的投切, 阀门的开关会引起物理连接模型的变化, 并引起阀门节点邻接关系的变化, 通过建立试验运行监测系统, 实时采样各阀门的状态, 可以得到相应的现场结构化数据。

其次, 如图 6 所示, 借助 Neo4j 图形数据库技术, 通过节点、边等概念, 构建知识的载体—图形数据库模型, 实现物理拓扑结构的模型化。这样即实现了终端数据的图形化处理, 又可保存数据的自然图形结构。

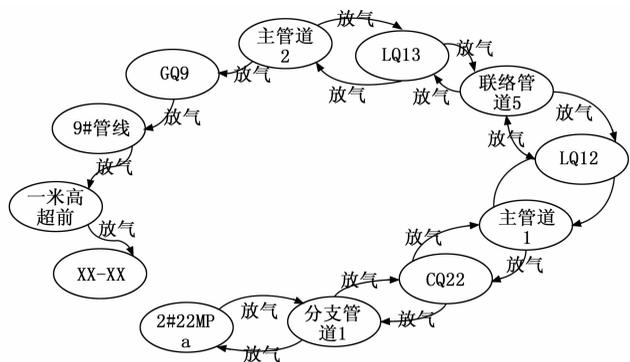


图 6 高压配气网络系统拓扑模型

4.1.3 保持基础模型动态时效性

在已经建立的动力保障现场的 Neo4j 图形数据库模型基

础上, 根据试验启停时刻采集的现场实时状态, 进行拓扑结构模型的更新。

模型的更新划分为两个层次: 模式层和数据层。模式层的更新方法是, 针对结构上发生变化的部分, 重新以知识的形式进行抽取, 更新采用结构化本地库方式管理拓扑结构的模式层; 数据层更新的方法是, 通过动力运行监测系统, 获取风洞开始试验时刻 (资源使用开始) 和风洞结束试验时刻 (资源使用结束) 的罐群、阀门、管线等实体的实时信息, 以此使维持网络模型中的节点、边等与终端设备状态一致性及动态变化的时效性。

4.1.4 获得正在试验风洞的保障容积

通过拓扑偏离, 在与风洞试验时动力保障现场保持一致的动态图形数据库模型基础上, 基于 Cypher 语言, 结合广度优化及深度优化遍历算法, 实现拓扑结构遍历, 解决保障路径查询问题, 构建从压缩机组、到阀门、储罐、输气总管、支路管线, 再到具体保障风洞的动态拓扑结构模型, 获得正在保障风洞试验的罐群、总管、支管的集合, 从而可以得到保障该次风洞试验高压系统的总体积 V 。

```

面向对象的 Neo4j 图形数据库查询 Cypher 语句如下:
match p= (a) - [*] - (b)
where all (n in nodes (p) where n.switch=1)
return p

```

4.2 基于压差法的单次试验消耗计算

压缩气体风洞试验可以简化为一个定积气罐的放气过程, 即从已经存储好的气罐中将压缩空气通过管道释放入风洞中, 在此过程中建立空气消耗的模型。

空气动力学中常把实际气体简化为完全气体来处理。在室温和通常压力范围内, 实际气体中分子的体积和分子间的作用力可以忽略不计, 则气体的压力 p 、体积 V 和热力学温度 T 满足气体状态方程。同时在外界气压稳定的情况下, 气罐的放气过程的流量质量与供气压力、气罐的初始温度和节流口截面有关。若容器的放气试验 (即风洞试验时间) 很短, 容器内的气体来不及与外界进行热交换, 这样的放气过程可以视为绝热放气过程, 在绝热放气过程中, 没有与外界进行交换, 可以看作等熵过程。风洞试验排气后产生的消耗可以近似为定积气罐 (含管线) 的气体质量损耗, 将其转化为标况 (20°C , 1 atm) 下体积, 即可以得到当次风洞试验的消耗 (标方)。

气体状态方程:

$$p_v = mRT \tag{1}$$

代入 p_1 、 p_2 , 计算定积气罐 (含管线) 气体质量损耗的公式:

$$\Delta m = \frac{V}{RT} \Delta p \tag{2}$$

计算标况下 (20°C , 1 atm) 当次风洞试验空气消耗的公式:

$$V_N = \frac{\Delta p}{P_N} V \tag{3}$$

表 2 风洞试验单次消耗

输入/输出参数	参数名称	描述	单位
输入参数	p_1	气罐和管线的起始压力	Pa
	p_2	气罐和管线的终止压力	Pa
	m_1	气罐和管线气体的起始质量	kg
	m_2	气罐和管线气体的终止质量	kg
	T	气体温度	K
	R	气体常数 287	$m^2/s^2 \cdot K$
	Δp	气罐和管线的压力差	Pa
	Δm	定积气罐(含管线)气体质量损耗	kg
	V	气罐和管线的总容积	
	p_N	标况下(20℃, 1 atm)气体压力 1.01325×10^5	Pa
	t_s	当次试验高压资源使用开始时间	s
t_e	当次试验高压资源使用结束时间	s	
输出参数	V_N	标况下(20℃, 1 atm)空气消耗	Nm^3 (标方)

根据公式 (1) ~ (3), 在前述步骤的基础上, 获得正在试验风洞该次试验消耗的罐群压力差、保障该次风洞试验高压系统的总体积 V (含罐群和管线), 可以获取风洞当次试验所对应的高压空气资源消耗 (Nm^3 标方)。

5 实验验证

5.1 实验步骤和方法

为验证基于压差法的风洞群高压空气资源自动计量系统的稳定性和计算结果的准确性, 主要通过系统采集的高压消耗与实际流量计统计结构消耗量相比较的方式进行验证, 如果两者消耗量结论一致, 说明系统计量结果准确无误, 系统可行。

5.2 实验过程

本方法在运行过程中, 不需要人工干预, 系统将自动记录风洞实验高压动力资源消耗量。具体实施方式如下:

1) 风洞试验现场提出真空度、真空罐组合方式等需求, 并发出“资源使用请求”信号。其中:

“资源使用请求”表示风洞已完成试验前各项准备, 无特殊紧急情况即将产生真空动力资源消耗, 请求确认是否存在资源冲突并申请短期独占真空资源。

2) 风洞试验现场要与统一调度中心建立信号联络机制, 需将试验风洞的“资源使用开始”、“资源使用结束”信号及时、准确地上传到统一调度中心。

3) 统一调度中心根据调度规则, 发出“动力就绪”信号, 表示允许该风洞开始试验, 获得该信号的风洞才能够开展试验, 保证一条管线同时只能有一座风洞使用相应的动力资源。其中:

“动力就绪”信号指的是: 统一调度中心接收到“资源请求”信号后, 判断有无资源冲突风洞已提出请求或正在使用真空动力资源, 并将判定结论反馈给相应的风洞。反馈结论分“核准”与“不核准”两种, “不核准”原因包含已有风洞提出请求并获“核准”、已有风洞正在使用真空动

力资源。风洞获得“动力就绪”信号的时间段为系统允许风洞独占使用相应动力资源的时间段。

4) 统一调度中心将风洞上传信号作为触发信号, 记录对应时刻的罐群压力、阀门和管线状态, 从而获得风洞试验前后的压降和罐群管线容积。

5) 系统通过压差法计算风洞群一次风洞试验的消耗。

6) 逐次计量风洞试验消耗。

7) 查看消耗统计, 与试验高压流量计计量结构进行对比分析。

8) 完成实验。

5.3 实验结果分析

如框处所示, 为风洞群高压空气资源消耗计量结构。

图 7 实验结果

通过对比系统自动计量结果与风洞流量计统计结果 (试验时间 22 s 平均耗气 $850 Nm^3$), 两者诊断结果基本一致, 说明系统计量结果准确可靠, 系统可行。

6 结束语

本文针对现有风洞群用户多、沟通效率低、无法实时掌握保障各类风洞的罐群及管线容积、消耗统计困难等诸多问题, 提出了一种基于压差法的试验高压空气消耗计量方法及系统设计。经实际试验应用验证, 本系统利用 OPC Server 协议转换的灵活、开放、可靠、安全的优势, 可提供统一的数据服务, 实现风洞动力资源数据的跨层级统一访问, 并且系统利用压差法计算模型, 可以满足风洞试验运行管理、动力设备维修维护以及试验成本核算对动力资源消耗准确、及时计量的需求。本系统的推广应用一方面保障了复杂条件下风洞试验正常有序开展, 另一方面可以有效准确记录各车次风洞试验的动力资源消耗计量数据, 对国内大型风洞群、复杂水电气真空动力环境的智能化监控与消耗计量具有一定借鉴参考意义。

参考文献:

[1] 郑娟, 罗昌俊, 马永一, 等. 风洞动力资源系统集成化保障研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 163-167.

(下转第 13 页)