

# 基于冷量阈值的整流罩空调控制策略研究

古宇飞, 陈少将, 张利军, 徐隼然, 李增光

(航天发射可靠性技术重点实验室, 海口 571100)

**摘要:** 针对某航天发射场整流罩空调机组经常出现前级蒸发器结霜和送风温湿度波动问题, 进行问题机理分析, 结合新风与表冷后目标露点的焓值差提出了一种基于冷量阈值的压缩机 PID 控制方法; 该方法首先根据新风和目标露点的焓值差计算出处理空气所需的实际冷量, 然后将该冷量作为基于露点 PID 控制压缩机输出的上限值; 冷量阈值的使用一方面使 PID 控制一直保持欠调节状态, 避免了压缩机投入比的上下跳变而导致送风温湿度波动的问题; 另一方面有效解决了压缩机投入冷量过多而导致的蒸发器结霜问题; 实践证明, 优化后的空调机组运行稳定可靠, 温湿度控制精度得到有效提升, 分别达到了 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 3\%$ , 满足航天器产品保障需求。

**关键词:** 整流罩空调; 压缩机; PID 控制; 焓值差; 冷量阈值

## A Study on Control Strategy for Air Conditioning of Satellite Fairing Based on Cold Energy Threshold

Gu Yufei, Chen Shaojiang, Zhang Lijun, Xu Feiran, Li Zengguang

(Key Laboratory of Space Launching Site Reliability Technology, Haikou 571100, China)

**Abstract:** In order to solve the fin evaporator frosting and temperature and humidity fluctuation of air supply problems for the air conditioning of satellite fairing in space launching site, the controlling strategy for compressor with the threshold of cold energy was proposed. This strategy calculated the cold energy that air treatment needed practical based on the enthalpy potential between outdoor air and target air firstly. And then the cold energy would be regarded as the upper limit of PID controller for compressor. The appliance of threshold of cold energy not only kept the PID controller in undershooting state, and avoided the problem of temperature and humidity fluctuation caused by the compressors input jump. In addition, it avoided the compressor inputting cold energy overabundance and solved the fin evaporator frosting problem effectively. The experiments show that the improved air conditioning running stably, and its accuracy of temperature and humidity achieved  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 3\%$  respectively, and meeting design and application requirement.

**Keywords:** air conditioning of satellite fairing; compressor; PID control; enthalpy potential; threshold of cold energy

## 0 引言

某航天发射场区属于典型的热带海洋性气候, 年平均气温  $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均湿度  $87.2\%$ , 常年高温、高湿的气候环境给场区设备的温湿度等环境保障工作提出了严峻的挑战。空调系统作为环境保障的最主要手段, 为场区中航天器、火箭等精密设备及人员提供着长期的环境保障工作。而航天器整流罩空调承担着保障卫星、航天器等有效载荷在整流罩内测试过程中环境温湿度、洁净度的重要使命, 是发射场中最为关键的设备之一。测试期间的环境参数, 不仅对测试工作的准确性和安全性有重要的影响, 而且还可能影响到航天器进入预定轨道后的工作性能。因此整流罩空调机组设备性能和送风保障参数的好坏直接关系到航天发射的成败, 尤为重要<sup>[1]</sup>。

## 1 空调机组蒸发器结霜及送风温湿度波动问题

某航天器整流罩空调为全新风直流式恒温恒湿低温转轮空气净化机组, 系统构成如图 1 所示。系统由新风初效进风段、进风机段、前级蒸发表冷段 (3 级)、转轮除湿段、冬季新风初效进风段、再冷蒸发表冷段 (2 级)、粗调电加热段、加湿段、送风机段、中效过滤段、亚高效过滤段、微调加热段、出风段、送风管、高效过滤器等连接组成通风系统。转

轮除湿段再生风经前表冷处理, 前级蒸发表冷段与再冷蒸发表冷段的每级冷源分别由 1 台风冷压缩凝机组提供。

该空调机组在使用过程中经常出现蒸发器结霜和送风温湿度波动问题, 严重影响机组的正常使用和保障效果。

### 1.1 空调表冷器结霜问题

空调系统中, 当制冷剂的蒸发温度低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时会导致机组的蒸发器及其回气管路结霜, 根本原因则是制冷剂的蒸发压力过低。而造成制冷剂蒸发压力过低的原因有很多种, 具体的有缺少制冷剂、毛细管过长或堵塞、环境温度过低、压缩机排气乏力、膨胀阀开度不足及压缩机与蒸发器的不匹配等原因<sup>[2-3]</sup>。

该空调机组设计前级压缩机最大负荷使用工况为新风温度  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 湿度  $90\%$  (海南高温高湿极限工况), 表冷处理后空气露点  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用工况为海南 9 月, 环境温度  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 不存在外界环境温度过低的情形。且经过长期观察和监测, 机组不存在缺氟、制冷剂管路堵塞等情况。分析认为该机组设计时压缩机制冷能力与蒸发器不匹配, 压缩机冷量过大, 而蒸发器蒸发面积相对偏小。加之进入 9 月份以后, 外界温度下降, 经常低于  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 导致空气与制冷剂的平均传热温差降低, 致使蒸发器性能下降。

由于空调机组系统复杂, 难以建立精确的数学模型, 一般采用 PID 调节技术来控制机组中压缩机、转轮、加湿器及电加热等设备的运行<sup>[4-5]</sup>。控制过程中, PID 控制算法根据室外新风露点、表冷后空气的实时露点及表冷后目标露点三者之间

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-03-25。

作者简介: 古宇飞 (1989-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事航天发射可靠性技术方向的研究。

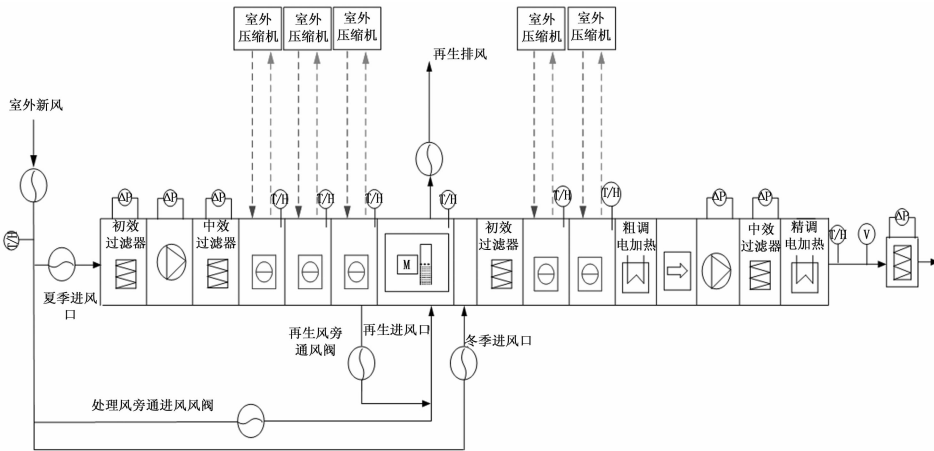


图 1 某整流罩空调机组系统构成示意图

的关系计算得出冷量投入比并控制压缩机进行制冷并投入相应的制冷量。由于蒸发器面积较小, 在新风温度较低时, 无法将 PID 控制压缩机投入的冷量全部带走, 导致冷量在蒸发器积聚。在蒸发温度低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  后, 便会出现蒸发器及制冷剂回气管路结霜现象, 本系统蒸发器结霜及表冷器挡水板结冰情况如图 2 所示。结霜问题会进一步导致制冷剂循环不畅, 蒸发压力过低, 严重影响压缩机工作, 制冷效果大幅下降且使集中监控系统失去对压缩机的控制。进而导致送风温湿度短时上升, 严重影响对整流罩罩内环境的保障效果。



图 2 蒸发器结霜及表冷挡水板结冰情况

## 1.2 空调送风温湿度波动问题

该空调机组前级表冷器共分为三级, 各级制冷量均为  $180\text{ kW}$ , 第一级和第二级均为 1 台  $180\text{ kW}$  螺杆制冷压缩机提供制冷, 第三级由 4 台小型压缩机提供制冷, 分别为 1 台  $90\text{ kW}$ 、2 台  $30\text{ kW}$  普通涡轮压缩机、1 台  $30\text{ kW}$  数码涡轮压缩机。系统在控制前级制冷压缩机总投入量从  $0\%$  至  $100\%$  调整时共有 18 种压缩机的组合搭配方式。

当前级压缩机投入比最终稳定在 18 种投入比组合的衔接处时, 外界环境稍有变化, 就会出现某台压缩机频繁启停。压缩机停止运行后, 需要在系统内高低压力平衡后才能再次开机。如在高低压力未平衡时开机因压力不平衡造成负载加重, 进而导致电动机无法启动而烧毁。因此为保护压缩机, 延长其使用寿命, 每台压缩机都设置了停机后必须等待 3~10 分钟才能再次启动的硬性条件。系统中  $90\text{ kW}$  和  $180\text{ kW}$  (2 级、3 机分开) 的压缩机均只有一台, 每次停机后必须等待 10 分钟后才能再次开机。大冷量压缩机的延迟开机导致表冷器中输送的冷量急剧减小, 使送风温湿度瞬间上升, 自动控制系统便自动开启其它压缩机进行降温除湿, 10 分钟后,  $90\text{ kW}$  压缩机 (以  $90\text{ kW}$  为例) 再次开启, 而另外开启的压缩机也还在运行, 又致使出力过猛、冷量过大, 降温除湿过多, 送风温湿度明显偏低, 而后自控系统又将  $90\text{ kW}$  压缩机停机。依此反复, 整个系统短

时难以稳定, 导致送风温湿度出现周期性波动。

该机组送风温湿度波动时的保障曲线如图 3 所示, 其中机组设定的送风目标前一阶段为  $(20\text{ }^{\circ}\text{C}, 45\%)$ , 后一阶段送风目标为  $(15\text{ }^{\circ}\text{C}, 60\%)$ 。

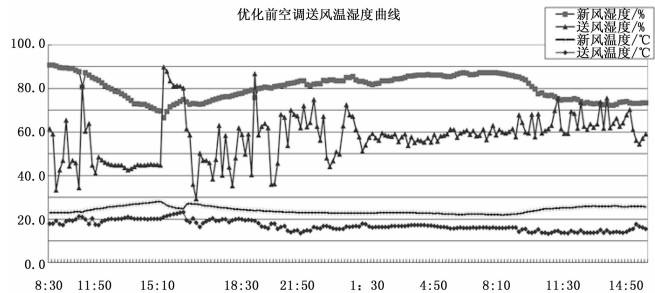


图 3 优化前整流罩空调送风温湿度曲线

本机组设计温度控制精度不超过  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 湿度控制精度不超过  $\pm 5\%$ 。从图 3 中可以看出机组运行较长时间后由于压缩机频繁启停造成的周期性波动, 稳定性较长, 温度最大偏差达到  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 送风湿度最大偏差接近  $\pm 10\%$ , 均大大超过设计控制精度, 对整流罩环境保障带来了不利影响。

无论是空调机组蒸发器结霜导致送风温湿度上升超出要求范围, 还是压缩机频繁启停造成的送风温湿度波动, 都会严重影响到对整流罩罩内航天器的温湿度保障效果, 都可能会对航天发射造成严重的损失, 亟需解决。

## 2 基于焓值差的空调控制模式及优化手段

### 2.1 基于焓值差的空调控制模式

为解决空调机组表冷器结霜和投入比波动问题, 本文在传统根据表冷器前后露点来进行冷量计算的方法基础上, 提出了一种基于焓值差的压缩机投入比控制模式。新方法首先通过新风焓值和表冷后空气目标露点焓值的差<sup>[6-7]</sup>来计算将新风处理到目标露点所需的实际冷量, 并将其作为压缩机投入冷量的上限值, 使 PID 算法在自动调节压缩机投入时, 其制冷量始终保持不能超过实际需求。即 PID 始终处于欠调节状态, 输出投入比始终保持上升趋势, 进而避免在某一台阶附近上下波动, 具体如图 4 所示。

使用上述措施一方面避免压缩机投入冷量过大, 另一方面使压缩机避开投入比台阶处, 防止大螺杆压缩机频繁启停所造成的送风温湿度波动。

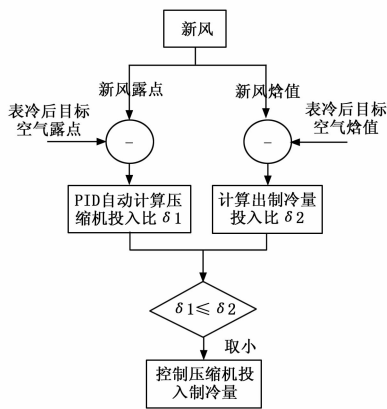


图 4 基于焓值差冷量阈值的 PID 控制策略

程中，系统有足够的时间提前开机使机组送风达到稳定再对接风管进行保障，因此多出的约 0.5 h 不会对实际的任务保障造成影响。

### 2.2 提高表冷器后空气实时露点测量精度

本整流罩空调系统前第三级表冷由 4 台压缩机构成，其表冷器是由 4 套制冷压缩机的蒸发器毛细管上下交叉组合而成。在开启不同压缩机进行制冷时，表冷器上下不同位置的温度会有一定的差异。压缩机开启的蒸发器位置温度会相对较低，而压缩机未开启的位置温度相对偏高，如图 5 所示，前第三级表冷器中 90 kW 压缩机的蒸发器毛细管覆盖面积大，其开机与不对传感器的测量影响较大。经过实际测量，发现上下温差最高可达 3 ℃。因此，在大型的空调机组中温湿度传感器的安装位置对表冷后空气露点的测定有着较大影响。

在该空调系统表冷器后的上、中、下 3 处位置各安装 1 只维萨拉温湿度传感器，取 3 只传感器的测量平均值，以尽可能的得到表冷处理后空气的露点值，并用其参与到 PID 控制中。

基于焓值差冷量阈值的压缩机控制方法具体计算过程如下：已知新风温度  $T_1$ 、湿度  $R$ ；表冷后设定目标空气露点温度  $T_2$ ，湿度 100%；处理风量  $L$ ；大气压力  $P$ ；设新风焓值  $H_1$ ，表冷后空气目标焓值  $H_2$ ，空气密度  $\rho$ 。

第一步：依据气体温度  $T$ ，求饱和和水蒸汽的分压力 (hPa)；

$$P_b = \frac{INT(1\ 000 \times (133.322 \times 10^{\frac{156+8.12T}{236+T}} + 0.5))}{1\ 000} \quad (1)$$

第二步：根据湿度  $R$  和饱和水蒸汽的分压力求水蒸汽的分压力 (hPa)；

$$P_s = INT(\frac{1\ 000R_H}{100} \times P_b + 0.5) \quad (2)$$

第三步：求含湿量 (g/kg 干空气)；

$$d = 622 \times \frac{P_s}{P - P_s} \quad (3)$$

第四步：求空气的焓 (kJ/kg 干空气)

$$H = 1.005T + 0.001d(2\ 500 + 1.8T) \quad (4)$$

然后根据空气焓值计算公式分别计算出新风和表冷后设定露点空气的焓值  $H_1$  和  $H_2$ ，进而得到将新风处理到设定露点温度所需的冷量：

$$Q = \frac{\Delta H \times \rho \times (L + L_{再生})}{3\ 600} = \frac{(H_1 - H_2) \times \rho \times (L + L_{再生})}{3\ 600} \quad (5)$$

其中： $L_{再生}$  为转轮除湿机再生风风量。

根据前级压缩机的总制冷量 540 kW 计算得到此时的压缩机投入比  $\delta$  为：

$$\delta = \frac{Q}{Q_{总}} = \frac{Q}{540} \quad (6)$$

在传统 PID 自动调节压缩机投入的基础上，将  $\delta$  作为压缩机投入比的上限值。该方法一方面防止机组产生的冷量过剩，在不改变蒸发器面积大小的情况可以最大限度的避免蒸发器结霜问题；另一方面在计算焓值差时在表冷后目标露点温度的基础上人为增大 0.1 ℃，以使 PID 控制一直处于欠调节状态，前级压缩机冷量的投入比保持上升趋势，防止其在某一台阶处上下波动，从而避免了送风温湿度的波动。其中增加 0.1 ℃ 的前提是机组的转轮除湿机和后级的除湿降温能力要有一定的富裕。

该方法与传统基于露点 PID 控制方法相比，压缩机投入的冷量相对偏少，空调机组从开机状态至调节送风温湿度达到稳定状态需要的时间相对更长。经过试验，传统方法机组从开机至稳定需要约 1 h，新方法稳定需要约 1.0~1.5 h。保障过

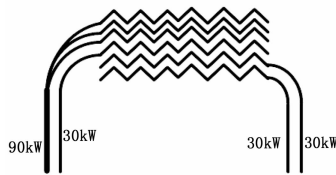


图 5 第三级表冷器压缩机毛细管分布示意图

### 2.3 试验结果

本空调系统采用全集成自动化技术，利用西门子 PLC 作为下位机控制空调系统中各压缩机、阀门、转轮除湿机等设备的运行，使用工业组态软件作为上位机对空调系统的运行状态和送风参数进行集中监控。

试验中，将基于焓值差上门限限量值的前表冷器压缩机 PID 控制程序下载到空调机组的 PLC 中，并以 3 只温湿度传感器所测的温湿度平均值作为控制目标。试验过程中，室外温度在 27~31 ℃，相对湿度在 74%~85%。第一阶段机组设定送风温度 10 ℃，湿度 75%，风量 4 000 m<sup>3</sup>/h，在机组运行平稳后，持续观察约 20 h。该阶段机组送风温湿度参数如图 6 前半段曲线中 17:50 至次日 12:00 所示。

第二阶段机组设定送风温度 15 ℃，湿度 54%，风量 3 000 m<sup>3</sup>/h，在机组运行平稳后，持续观察约 20 h。该阶段机组送风参数如图 6 后半段曲线中 14:30 至次日 9:30 所示。

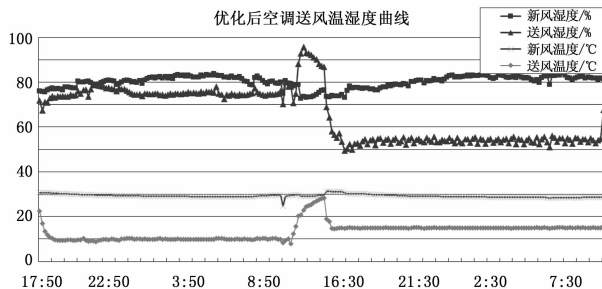


图 6 优化后整流罩空调送风温湿度曲线

由图 6 可以看出，采用优化后的控制策略的空调机组在第一阶段中除 21 点左右机组出现轻微波动送风温度降至 8.9 ℃、相对湿度为 78% 外，其余时刻运行平稳，送风温湿度参数相对稳定，温度最低 9.3 ℃、最高 10.4 ℃，波动范围在 ±0.7

℃;相对湿度最低 74.0%,最高 78.7%,波动范围在 ±4.0%。控制精度均优于机组的设计和使用要求。

第一阶段结束后,机组关机后进行了设备检查,未发现蒸发器、制冷剂回气管路或者挡水板结霜结冰现象。

第二阶段中,机组从 14:30 开机,到 15:20 机组送风参数达到稳定。整个过程中均未出现送风湿度波动和蒸发器结霜现象。温度最低 14.7℃、最高 15.1℃,波动范围在 ±0.3℃;相对湿度最低 52.6%,最高 56.0%,波动范围在 ±2.5%。控制精度均优于机组的设计和使用要求。

通过两种送风工况的测试,优化后的空调机组出现压缩机投入比上下波动和压缩机结霜的问题概率大大降低。本试验中,机组稳定运行过程中,送风温度波动幅度在 ±0.7℃ 范围内,湿度波动幅度在 ±4.0% 范围内。文中未对所有的试验情形均做描述,在后续的调试和保障任务中,该空调系统对其它的送风参数也进行了试验和验证,送风湿度控制精度均在要求范围内。综上,采用本文将基于焓值差冷量阈值和传统 PID 露点控制相结合的压缩机控制策略后,整流罩空调机组送风湿度及控制精度均满足设计和实际使用需求。

### 3 结论

结合新风与表冷后目标露点的焓值差提出了一种带冷量阈值的压缩机 PID 控制方法,并根据该机组蒸发器的实际情况

在表冷后增加了 2 个温湿度测量点参与 PID 控制。将新控制策略与传统基于露点的压缩机 PID 控制方法相结合,有效的解决了长期困扰某航天发射场整流罩空调机组的前级蒸发器结霜和送风湿度波动问题。优化后的整流罩空调机组运行稳定性和可靠性得到了明显提升,温湿度控制精度分别达到了 ±0.7℃ 和 ±4.0%,提升了系统保障能力。

### 参考文献:

- [1] 王建,方广军,芦玉川.特殊条件下整流罩内温湿度变化规律的分析[J].导弹试验技术,2009.
- [2] 何昌伟.船舶空调装置蒸发器结霜原因分析及故障排除[J].中国修船,2006,19(1).
- [3] 孟庆龙,闫秀英.空调系统表冷器供冷量优化控制仿真研究[J].系统仿真学报,2016,27(6).
- [4] 从华,谢金良,江鹏程,等.基于 PLC 的组合式空调机组控制系统设计[J].计算机测量与控制,2013,21(1).
- [5] 孙见君,杜存臣,滕文锐.制冷与空调装置自动控制技术[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [6] 陈进,刘仕杰,李桥,等.基于力控的焓差室内空调器性能测试监控系统[J].计算机测量与控制,2014,22(4).
- [7] Afram Abdul, Janabi-sharifi Farrokh. Review of Modeling Methods for HVAC Systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1): 507-519.

（上接第 57 页）

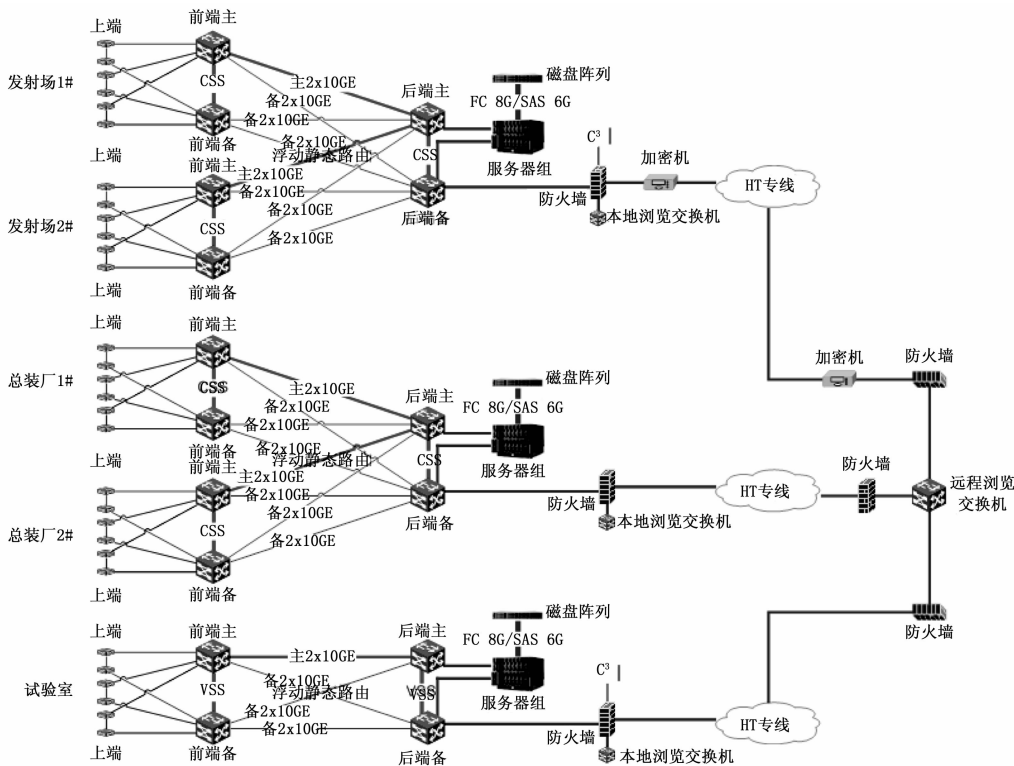


图 8 四级架构网络基础平台拓扑

### 参考文献:

- [1] Doyle J, Routing TCP/IP Volume I [Z]. 1998.
- [2] Doyle J, Carol J D, Routing TCP/IP Volume II [Z]. 2001.

- [3] Oppenheimer P. Top-Down Network design Second Edition [Z]. 2004.
- [4] GB/T 21617-2008. 基于以太网技术的局域网系统验收评测规范[S]. 2008.