

# 环境模拟风洞高压动力系统设计研究

杜洪亮<sup>1,2</sup>, 王志刚<sup>1,2</sup>, 徐 辉<sup>1,2</sup>, 赵 鑫<sup>1,2</sup>, 李 强<sup>1,2</sup>, 许红达<sup>1,2</sup>

(1. 中国航空工业空气动力研究院, 哈尔滨 150001

2. 低速高雷诺数航空科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为实现环境模拟风洞风速性能指标, 对动力系统进行了设计; 介绍了环境模拟风洞的气动轮廓构型, 阐述了动力系统的工作原理, 包括主驱动回路、散热辅助系统和控制系统, 给出了 10 kV 4 MW 动力电机的计算选型过程并分析了电机特性曲线; 采用高压变频器实现了动力系统的调速驱动, 通过 48 脉冲整流完美无谐波矢量变频实现高品质的电能利用; 通过基于 Modbus TCP 现场总线协议, 实现了主控计算机、本地控制系统的实时通讯和数据交互, 给出了控制系统软件工作流程; 通过不同构型风洞喷口试验, 分析研究了最大风速和极端温度负荷工况条件下, 轴功率随试验温度的变化关系、电机温升特性以及稀油站供油压力与轴升的关系; 实验测试结果表明, 本系统对于环境模拟风洞有良好的风速、温度匹配性能, 对于开展相关实验具有优良环境适应性。

**关键词:** 环境模拟; 风洞; 动力系统; 高压; 变频

## Design and Research of High Voltage Power System in Environmental Simulation Wind Tunnel

Du Hongliang<sup>1,2</sup>, Wang Zhigang<sup>1,2</sup>, Xu Hui<sup>1,2</sup>, Zhao Xin<sup>1,2</sup>, Li Qiang<sup>1,2</sup>, Xu Hongda<sup>1,2</sup>

(1. Aerodynamics Institute of China Aviation Industry Corporation, Harbin 150001, China;

2. Low Speed High Reynolds Number Aeronautical Key Laboratory, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to realize the performance index of wind speed in environmental simulation wind tunnel, the dynamic system is designed. This paper introduces the aerodynamic profile configuration of the environmental simulation wind tunnel, expounds the working principle of the power system, including the main drive loop, heat dissipation auxiliary system and control system, gives the calculation and selection process of the 10 kV 4 MW power motor and analyzes the motor characteristic curve. The high voltage inverter is adopted to realize the speed regulation drive of the power system, and the high quality power utilization is realized through 48 pulse rectifier perfect non-harmonic vector frequency conversion. Through the Modbus TCP fieldbus protocol, the real-time communication and data interaction between the master computer and the local control system are realized, and the software workflow of the control system is presented. Through the wind tunnel nozzle tests with different configurations, the relationship between the axial power and the test temperature, the motor temperature rise characteristics, and the relationship between the oil supply pressure and the shaft rise under the conditions of maximum wind speed and extreme temperature load are analyzed and studied. The experimental results show that the system has good matching performance of wind speed and temperature for environmental simulation wind tunnel, and has excellent environmental adaptability for carrying out relevant experiments.

**Keywords:** environmental simulation; wind tunnel; power system; high voltage; frequency conversion

## 0 引言

环境模拟风洞主要用于开展不同风速、温度、压力条件下, 被试件的云雾、雨雪、日光和积冰冻雨试验。国内环境模拟风洞起步较晚, 在 2009 年同济大学才建成真正意义上的用于汽车试验的环境模拟风洞, 此前一直以空气动力学风洞为基础局部改造进行类模拟试验。目前国内建设的环境模拟风洞, 多以研究车辆、自然灾害、公共安全等目标对象为主, 而动力系统作为能量来源, 其具备优良的环境适应性, 显得十分重要。以往的空气动力学风洞中, 多关注转速控制、调速范围和自然常规工况的温升特性<sup>[1]</sup>,

而在不同风速、压力、温度、湿度等综合环境参数影响工况下的研究不多, 涉及到动力系统的转速功率特性、散热性、轴承特性等多方面设计。

本课题通过对不同风速、温度条件下多喷口构型的组合式环境风洞动力系统设计, 对转速、功率、散热、通风、喷口构型等多个特性进行研究, 解决了高压动力系统复杂参数状态下的环境适应性问题。

## 1 系统结构及工作原理

### 1.1 系统结构

多气候参数耦合作用实验平台是一种模拟风速、温度、

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-30。

作者简介: 杜洪亮(1984-), 男, 黑龙江鸡东人, 高级工程师, 主要从事风洞测试与控制技术方向的研究。

引用格式: 杜洪亮, 王志刚, 徐 辉, 等. 环境模拟风洞高压动力系统设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 86-95.

喷雾、雨雪、日光等气象参数的环境模拟风洞。该风洞采用卧式回流布局, 试验段具有 6×5 m、4×3 m 两种构型喷口, 主要部件包括动力段、扩散段、拐角段、换热段、稳定段、收缩段、试验段等<sup>[2]</sup>。其中, 动力段使空气在风扇的作用下产生压增, 扩散段使具有湍流和旋涡的较差流态气流均匀扩散、改善流场, 拐角段使气流以较小的阻力被引导至下一部段, 换热段能够对气流进行温度调节, 稳定段内包括蜂窝器和阻尼网对气流流态进行整流, 收缩段使气流加速流入试验段喷口。风洞的气动轮廓构型如图 1 和图 2。

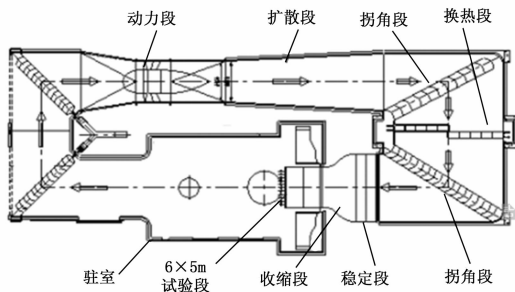


图 1 6×5 m 试验段风洞气动轮廓图

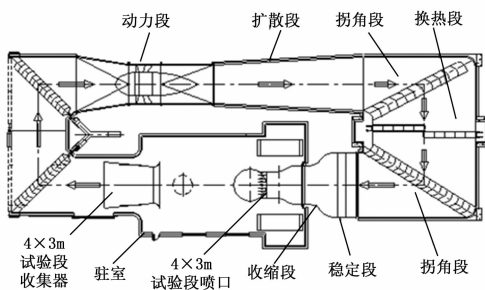


图 2 4×3 m 试验段风洞气动轮廓图

可知, 该风洞通过更换不同尺寸的喷口实现对应的试验段风速范围, 按照设计, 6×5 m 试验段最大风速为 35 m/s, 4×3 m 试验段最大风速为 80 m/s, 均通过动力段 10 kV 4 MW 电机驱动、变频调速实现。此外, 温度模拟是基本参数指标, 可实现温度范围 -40~70 ℃。配套的环境子系统在上述指标下, 可分别进行喷雾、雨雪、日光等环境参数试验。当进行喷雾和雨雪试验时, 洞内的湿度可达 95% RH 以上。

上述参数条件对动力系统的密闭性、散热性、功率转速与风速匹配均形成约束条件。

### 1.2 动力系统工作原理

动力系统围绕高压变频电机进行设计, 主要包括 10 kV 完美无谐波变频器、10 kV 三相交流异步电机、散热风机系统、稀油站系统以及温度传感器、旋转编码器、振动传感器等。系统的工作原理如图 3 所示。

该系统工作包括 3 大部分。

#### 1) 主驱动回路:

10 kV 电力经由高压开关柜输送至变频器, 变频器对电力进行整流逆变后, 输出指定电压、电流, 对变频电机进

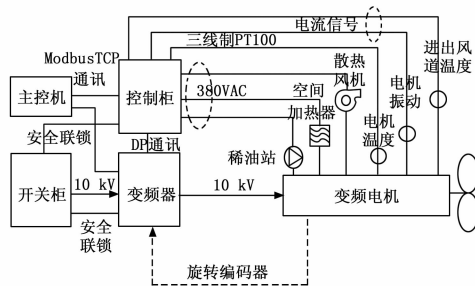


图 3 动力系统工作原理图

行矢量调速, 从而改变风扇转速。

主驱动回路是动力系统的核心, 为使得变频电机具备良好的密闭性, 将其放置在专用整流罩内, 将轴头伸出罩外, 采用轴头端面法兰压紧和轴瓦润滑油密封方式解决较大湿度工况对电机的绝缘性侵蚀。

#### 2) 散热辅助系统:

散热辅助系统包括稀油站系统、散热风机系统和空间加热器装置。系统在电机运行前对变频电机进行除湿烘干, 确保绝缘有效。在电机运行时, 稀油站系统向前后轴瓦循环注入润滑油, 实现轴承顶起抬升 30~50 μm, 之后持续按照一定压力、流量循环注油, 维持轴瓦抬升, 同时循环的润滑油对旋转轴承进行散热。散热风机系统通过引风机, 将动力段外部自然空气吸入, 将动力段整流罩内热空气抽出, 实现对电机的风冷。系统调节电机的温升特性, 使系统即便在高温状态下工作时维持合理温度。

#### 3) 控制与监视系统:

控制与监视系统主要实现中控室内主控计算机、变频间内控制柜、变频器控制单元、现场各位置开关和传感器的综合联动与状态监测。系统装机功率较大, 对于电机的监测除了包括绕组与轴承的温度, 也包括轴振动、轴旋转编码器实时获得的振幅和转速, 以便监测轴升安全范围和实现高达 ±0.1% 转速精度的变频闭环矢量调速。控制系统间的通讯主要采用 ModbusTCP 现场总线协议, 本地控制系统则采用 ProfibusDP 总线协议, 使设备间能够高速实时交互。

此外, 配置了专门的安全连锁系统, 采用具有 SIL3 等级的控制器与各开关节点进行硬线连锁, 当出现不同安全级别的故障状态时系统及时进行处理, 确保可靠运行。

## 2 动力电机的计算选取

动力电机选取时主要根据风洞的试验区风速指标和风洞各部段能量损失系数计算得到, 其中的关键参数包括总损失系数  $\sum K_0$ , 风洞能量比  $ER_f$ 、风扇效率  $\eta_f$ 。

对于低速风洞, 设某部段损失系数  $K_0$ 、入口流速  $v_1$ , 则通过该部段出口总压  $P_2$  与入口总压  $P_1$  的总压差  $\Delta P_0$  与该部段入口的动压  $\Delta P_1$  的比值计算得出  $K_0$ , 按下列式 (1)~式 (3)。

$$\Delta P_0 = P_2 - P_1 \quad (1)$$

$$\Delta P_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{\Delta P_0}{\Delta P_1} \quad (3)$$

试验段空气密度  $\rho$ 、截面积  $A$ 、风速  $v$ ，风洞能量比  $ER_i$ 、风扇效率  $\eta_f$  (取值 0.85)，电机轴功率  $P$ ，均为国际标准单位，存在以下关系式 (4) ~ (5)。

$$ER_i = \frac{1}{1.1 \sum K_0} \quad (4)$$

$$P = \frac{0.5 \rho A v^3}{ER_i \eta_f} \quad (5)$$

经过计算，得到风洞在表 1 和表 2 两种状态下的各部件损失系数  $K_0$ 。

表 1 6×5 m 试验段 35 m/s 时风洞各部件能量损失系数

部段	计算值
稳定段 $K_0$	0.143 9
收缩段 $K_0$	0.010 1
试验段 $K_0$	0.276 6
拐角段 $K_0$	0.186 2
扩散段 $K_0$	0.035 8
动力段 $K_0$	0.168 1
换热段 $K_0$	1.533
$\sum K_0$	2.353 7
$ER_i$	0.386 3
$P(W)$	2 542 446.0

表 2 4×3 m 试验段 80 m/s 时风洞各部件能量损失系数

部段	计算值
稳定段 $K_0$	0.023 2
收缩段 $K_0$	0.002 6
试验段 $K_0$	0.284 4
拐角段 $K_0$	0.03
扩散段 $K_0$	0.031 4
动力段 $K_0$	0.027 2
换热段 $K_0$	0.248 7
$\sum K_0$	0.647 5
$ER_i$	1.404 0
$P(W)$	3 153 958.8

可知，按空洞 6×5 m 喷口和 4×3 m 喷口最大试验风速 35 m/s 和 80 m/s 分别计算得到的轴头功率值为 2 542 446.0 W 和 3 153 958.8 W，则动力系统按照后者数值作为基准配置电机功率。此时，电机转速为 440 rpm，轴功率 3.2 MW (转速 440 rpm 时轴功率不小于 3.154 MW)，承受 52 130 N 轴向力和 71 358 N·m 的扭矩。

综合考虑被试件对试验段造成的阻塞度 (5%~10%之间)，预留 1.25 倍冗余系数，则实际选用的电机功率为 4 MW。

### 3 电机实际参数选择与特性分析

由于所选电机容量较大，用 10 kV 电压等级较为适宜，对于缩小线径有利，适于远距离电力传输，对于电网的谐

波无污染相对低压变频更小。

表 3 是电机的基本参数表，根据风洞动力系统的设计，满足额定值 440 rpm 的轴头功率 3.2 MW 要求，选择电机的额定工作点在 48.3 Hz、4 000 kW。

表 3 电机基本参数

条目	数值
额定功率/kW	4 000
额定频率/Hz	48.3
额定转速/rpm	480
定子电压/V	10 000
定子电流/A	287
定子接法	Y
功率因数	0.81
效率	96%
最大转矩倍数	1.5
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	1 520
额定转速可承受轴向力/kN	≤53

图 4 给出了电机电流、转矩和转速特性曲线，可以看出，电机启动时，有高达 6 倍的额定电流产生，随着转速提高，电流逐步下降，在额定转速 480 rpm 时电流降至额定。电机的转矩特性不同，在启动后至 270 rpm 时，转矩不断提高接近 2.5 倍值，之后开始快速下降，转速至 400 rpm 时，转矩降至 1 倍以下。

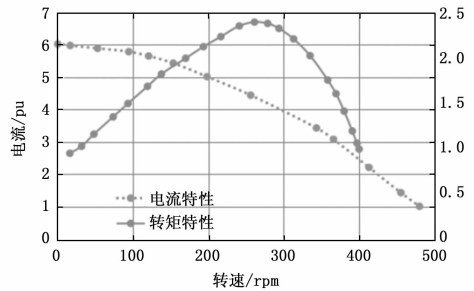


图 4 电流、转矩与转速特性曲线

图 5 可以看出，随着电机功率增大，功率因数和效率不断提高。在电机启动后 0.4~1.05 额定功率时，功率因数从 0.57 提高到 0.81，0.55~0.97 额定功率时效率从 93.5% 提高到 96%。0.6 倍额定功率以后，电机的功率因数和效率有明显提升。

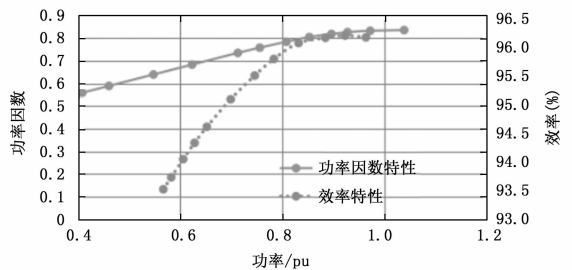


图 5 功率因数、效率与功率特性曲线

以上特性表明, 电机自然启动对电网冲击电流较大, 低功率运行时效率和功率因数较低, 须考虑软启或变频方式驱动以发挥电机最大效能。

#### 4 完美无谐波变频驱动方式

图 6 给出了 48 脉波整流的工作原理。完美无谐波变频, 输入采用多重化移相变压器和输出采用多电平移相式 PWM 的单元串联多电平技术方案, 满足 IEEE 519 电流谐波失真要求, 兼容供电系统。采用了移相变压器技术, 即多副边绕组移相的隔离变压器, 变压器的原边绕组采用星形接法, 而副边有多个绕组, 采用延边三角形接法, 输出电压为 750 V, 根据已安装的 24 个功率单元, 形成优于 48 脉冲的电源质量。变频器能够消除电源谐波失真, 在没有滤波器或谐波抑制设备时, 也能满足电能质量标准。

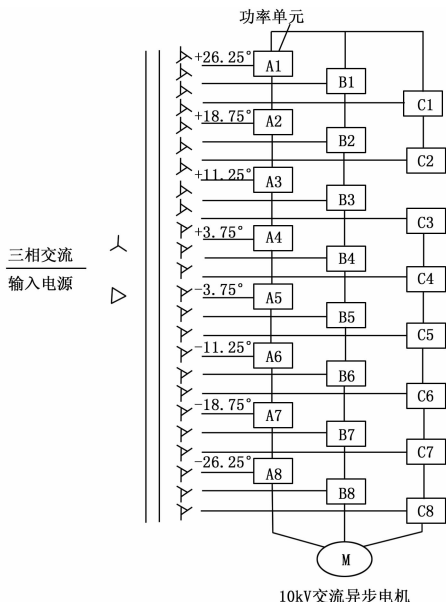


图 6 48 脉波整流逆变原理

图 7 给出了 48 脉波完美无谐波变频器的电能质量情况曲线。对于输入电能, 电压总失真 THD<sub>v</sub> 小于 2%, 电流总失真 THD<sub>i</sub> 小于 5%。动力系统功率因数在 92%~97% 之间, 效率在 95%~97% 之间, 很大程度上提高了电机自然启动时对电网的质量影响。

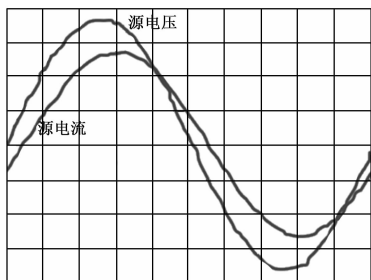


图 7 48 脉波整流多电平串联逆变的谐波情况

在对电机从零速度加速调整的过程中, 逐渐增加输出功率, 保持额定输出转矩, 从而降低电机输入涌流和机械

应力, 使得电机平稳启动运行。

#### 5 控制系统实现

##### 5.1 ModbusTCP 通讯

MODBUS/TCP 是简单的、中立厂商的用于管理和控制自动化设备的通讯协议, 它覆盖了使用 TCP/IP 协议的 Internet 环境中 MODBUS 报文的用途。Modbus 主要的优点为公开无版权要求, 无须支付额外费用、硬件要求简单容易部署、使用广泛便于系统集成。Modbus 采用半双工的通讯方式, 由 1 个子站和多个从站组成, 允许多个设备连接在同一个网络上进行通讯。

本系统中, 主控计算机通讯程序采用 LabVIEW 编写, 通过程序库中 ModbusTCP 协议与本地控制系统 PLC、变频器进行实时通讯。

图 8 为 ModbusTCP 通讯的主程序, 使用了 NI Modbus-llb 文件, 通过指定 IP 地址和端口号, 打开 Modbus TCP/IP 连接与指定设备建立通讯, WRITE VR 向保持寄存器地址 (例如 40001) 写入整型或浮点型数据, READ VR 向该地址读取数据值, 最后关闭 Modbus TCP/IP 连接完成通讯。

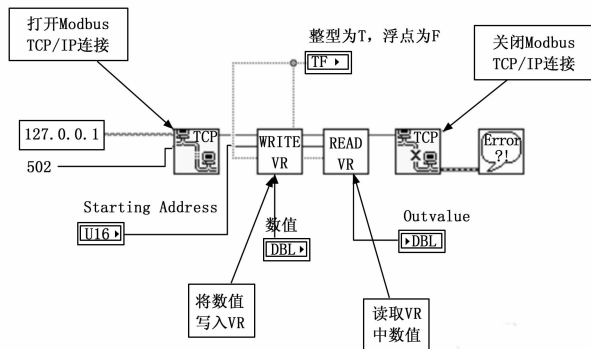


图 8 LabVIEW ModbusTCP 通讯程序

相比 ModbusRTU 协议需要对数据进行 CRC 校验, ModbusTCP 由于 TCP/IP 协议的封装无须额外校验, 系统可以较高的可靠性完成对目标设备的控制和状态监视。

##### 5.2 控制系统软件流程

控制系统系统软件流程如图 9 所示, 主要分为 3 个阶段, 即准备阶段、运行阶段和结束阶段。

在准备阶段, 系统各电气设备上电进行自检, 包括本地 PLC 控制柜、变频器、稀油站控制柜、主控计算机, 确保设备处于正常工作状态。

在运行阶段, 各设备通过自检并进入准备就绪状态后, 首先对高压电气设备启动空间加热器进行加热除湿, 同时打开散热风机系统对设备内进行通风, 始终监测高压设备内的温湿度状态、进出风道温度是否正常; 另外, 稀油站系统开始工作, 通过高低压油循环管路, 向主电机前后轴承瓦注油顶起、实现轴升, 同时稀油站的冷却水系统运行, 实时对油路进行换热。当检测到温度湿度、轴升等各参数

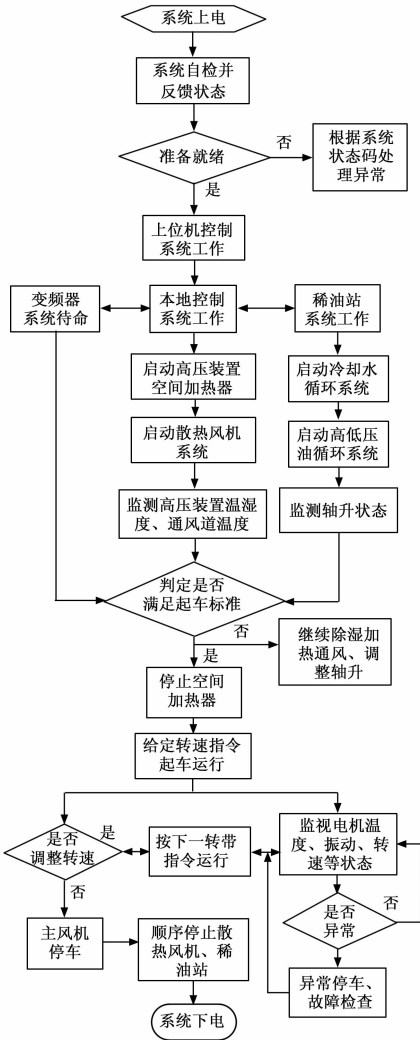


图 9 系统系统工作流程图

指标正常后，系统进入到允许气动状态。操作员可通过主控机向本地控制系统发送转速指令，变频器按照预定转速开始运行直至达到转速状态，到达转速后根据新的指令要求调整至下一转速。系统运行期间，实时监视电机温升、轴振动、转速等状态，当发现异常时，根据故障代码对异常位置进行检查排查。

在结束阶段，主风机停车，变频器进入待机状态，之后散热风机系统、稀油站系统依次停止，最后进行系统下电。

## 6 实验结果与分析

动力系统在  $6 \times 5$  试验段和  $4 \times 3$  试验段两种构型条件下，进行试验温度  $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$  和最大风速工况，验证输出功率、电机温升、稀油站供油压力参数变化。

### 6.1 不同试验段喷口下最大风速时的电机功率对比

图 10 给出了  $6 \times 5$  喷口最大风速  $35 \text{ m/s}$  和  $4 \times 3$  喷口最大风速  $80 \text{ m/s}$  时，电机轴功率随着试验段温度变化的特性。可以看出， $4 \times 3$  喷口在极限温度  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时电机轴功率  $3.8 \text{ MW}$ ，接近满功率，而  $6 \times 5$  喷口在极限低温试验时达到

$3 \text{ MW}$  轴功率，动力系统的电机选型满足试验要求。从变化趋势上，两个喷口的轴功率随着试验温度的变化基本相同，只有温度参量发生变化。

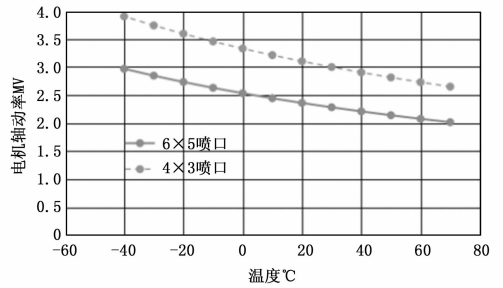


图 10 最大风速时不同喷口和试验温度的电机轴功率

### 6.2 不同试验段喷口最大风速下的温升特性

由于电机通过密封和保温结构严格放置与整流罩内，与风洞内气流的热交换可以忽略，主要发热和温升仍来自于本身的热损耗，通过试验比较常压时不同喷口最大风速时连续运行 30 分钟的温升特性。散热风机此时的工作状态为进风温度  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 、通风量  $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，持续通风，电机的温升特性如图 11 所示。

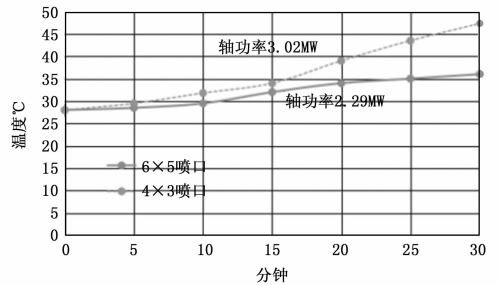


图 11 不同喷口最大风速时电机温升特性

可知，电机在不同喷口试验时输出的轴功率存在差异， $4 \times 3$  喷口试验时消耗更大的轴功率，随着时间的变化，温升增加较快，通过控制系统监测获得的热损耗量  $143.39 \text{ kW}$ ；更换为  $6 \times 5$  喷口后，温升相对平缓，此时轴功率也降低为  $2.29 \text{ MW}$ ，监测热损耗量为  $109.1 \text{ kW}$ 。总体上，热损耗在最大功率负荷的  $4\% \sim 5\%$ ，对于较大轴功率状态时，电机温升随快，仍在安全范围内，距离报警温度  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  和切断温度  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ，仍有较大的使用裕度。

### 6.3 不同试验段喷口最大风速下的供油压力对比

试验段温度  $-40 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$  变化，测试动力系统在最大风速状态时稀油站供油压力对比情况，实验结果如图 12 所示。

可以看出，在维持相同的轴升高度  $30 \text{ }\mu\text{m}$ ，动力系统在两种喷口最大风速时开展试验段温度由低向高试验时，轴升供油压力不断下降，随着电机轴功率的降低而降低。在变化范围上， $4 \times 3 \text{ m}$  喷口由  $10.58 \text{ MPa}$  下降到  $9.4 \text{ MPa}$ ， $6 \times 5 \text{ m}$  喷口由  $9.7 \text{ MPa}$  下降到  $9 \text{ MPa}$ 。上述特性表明，应根据试验温度调整合适的供油压力，确保轴升高度与动力系统的风洞轴线重合。

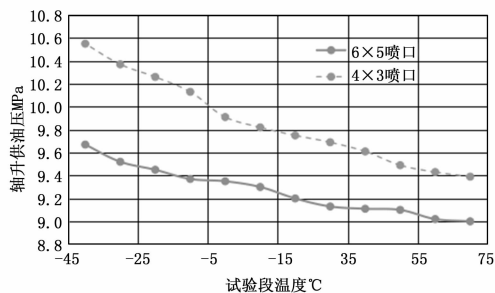


图 12 最大风速时不同喷口和试验温度轴升供油压力

## 7 结束语

本文通过对环境模拟风洞的动力系统的设计,完成以下研究内容:

1) 根据风洞的气动轮廓,对动力系统的电机功率进行了计算选取。分别按照 6×5 m 试验段和 4×3 m 试验段两种喷口的损失系数和能量比,得出对应喷口最大风速时所需的电机功率。

2) 根据计算结果,对电机进行了选型和特性分析,给出了 48 脉波变频调速后的电能质量改善情况。对于 10 kV 4 MW 的电机,自然启动和通过完美无谐波变频器驱动两种方式比较,对于电能质量的影响较大,给出了应用后者方式后最佳的电能情况。

3) 设计了控制系统的通讯程序和软件工作流程。主控系统网络与本地控制系统通过国际通用的第三方 Modbus-TCP 协议实现,以太网的封装属性和物理层实现确保了通讯网络的可靠性。同时,给出了稀油站、散热风机、主风机的控制逻辑关系流程,以安全合理运行系统,发挥动力系统效能。

本文进一步研究了环境模拟风洞动力系统几方面关键参数特性:

1) 通过实验测试,分析了不同喷口最大风速状态时电机轴功率运行情况,通过与设计点比较,表明设计过程正确,冗余系数选取合理。

2) 另外通过实验,测试了电机温升特性和轴升供油压力特性。电机温升对 10 kV 高压电机绝缘性影响较大,测试结果表明,现有的强制风冷和密封隔热措施对电机起到良好

(上接第 85 页)

- [6] Karami E, Prasad S, Shehata M. Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB; performance comparison for distorted images [J]. arXiv preprint arXiv: 1710.02726, 2017.
- [7] Wang R, Shi Y, Cao W. GA-SURF: A new speeded-up robust feature extraction algorithm for multispectral images based on geometric algebra [J]. Pattern Recognition Letters, 2019, 127: 11-17.
- [8] Gupta S, Kumar M, Garg A. Improved object recognition results using SIFT and ORB feature detector [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78 (23): 34157-34171.
- [9] Jiang L, Su J, Li X. Hot spots detection of operating PV arrays through IR thermal image using method based on curve fit-

的散热效果,温升曲线增加缓慢。控制系统应根据试验温度适当调节供油压力,以确保轴承中心线与风洞中心线吻合。

本次研究仍有以下遗留问题需要进一步完善验证:

1) 增加雨雪、喷雾、日光模拟试验后,电机轴功率相比未增加前的变化对比情况;

2) 通过对现有动力系统的持续运行数据积累,控制系统进一步增加故障诊断和健康管理功能可行性并验证效果。

本设计研究具有以下应用前景:

1) 对于环境模拟风洞动力系统的设计过程提供了思路方法。可根据所提的方法开展类似的环境风洞动力系统设计;

2) 对于动力系统的关键特性给出了分析思路和测试结果。可参考进行变频驱动的功率、转速、功率因数、效率监测控制,优化电能利用、提高系统转速性能;

3) 对环境模拟风洞动力系统的关键参数特性给出了分析思路和测试结果。可参考获得不同的喷口构型、温度变化后的动力系统特性,作为基础数据,开展更为复杂的环境模拟试验。

## 参考文献:

- [1] 王帆,施洪昌,盖文. 风洞测控技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2019.
- [2] 刘政崇. 高低速风洞气动与结构设计 [M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [3] 王志新,陈伟华,熊立新. 高效电机与电机系统节能技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2017.
- [4] 战培国. 国外风洞试验 [M]. 北京:国防工业出版社, 2018.
- [5] 褚卫华,林辰龙,谢明伟. 0.6 m 暂冲式跨超声速风洞控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 69-73.
- [6] 孙涛,郭辉,宋安. 汽车环境风洞实验室的性能评价与分析 [J]. 汽车科技, 2019 (3): 73-78.
- [7] 张艺伦,牟连嵩,赵丰. 汽车环境风洞设计概述 [J]. 装备环境工程, 2020 (8): 17-22.
- [8] 罗昌俊,马永一,王安勇,等. 风洞试验高压气源监测计量系统研究与实现 [J]. 测控技术, 2017 (8): 47-50.
- [9] 唐博,杨斌,任莹辉. 大气边界层风洞的风机动力系统优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2017 (6): 110-114.
- [10] 徐让书,葛宁,王治敏. 低速风洞非定常风特性模型及验证 [J]. 机械设计与制造, 2018 (9): 29-32.
- [11] Wang H, Guo L, Dou Z, et al. A new method of cognitive signal recognition based on hybrid information entropy and DS evidence theory [J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23 (4): 677-685.
- [12] Wang Y, Zhu X, Wu B. Automatic detection of individual oil palm trees from UAV images using HOG features and an SVM classifier [J]. Remote Sensing, 2019, 40 (19): 7356-7370.
- [13] Gour N, Khanna P. Automated glaucoma detection using GIST and pyramid histogram of oriented gradients (PHOG) descriptors [J]. Pattern Recognition Letters, 2020, 137: 3-11.