

文章编号: 100026893(2005)022013204

# 直升机沙尘环境试验风洞的温度控制及仿真

李运泽, 马志宏, 袁领双, 王 浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

## Temperature Control and Simulation of Helicopter's Sand/ Dust Environmental Test Tunnel

LI Yunze, MA Zhong, YUAN Lingshuang, WANG Jun

(School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 直升机沙尘环境试验风洞内部的热负荷变化范围较大, 高低热负荷工况下需要采取不同的调温措施, 为了简便地解决其温度控制难题, 在对其温度变化进行动态特性分析与建模的基础上, 提出了一种引入风速协调因子的沙尘环境试验风洞温度控制策略, 并对其控制效果进行了仿真研究, 仿真结果表明这一控制策略能在不同的热负荷条件下有效协调加热与制冷两种作用相反的控制措施, 并将风洞内的温度控制在要求范围内。

关键词: 直升机; 沙尘; 环境试验风洞; 温度控制; 仿真

中图分类号: V211; TP273 文献标识码: A

Abstract: The change range of heat load in helicopter's sand/dust test tunnel is so wide that different heat balance devices are needed for high and low heat loads, and that the temperature control is difficult. In order to solve the temperature control problem more simply, a temperature control strategy with wind speed corresponding factor is presented based on the dynamical analysis and modeling of tunnel's temperature change. Simulation results show that this control strategy can manage the cooling and heating devices on different load conditions and temperature in tunnel is controlled at demand point successfully.

Key words: helicopter; sand and dust; environmental test tunnel; temperature control; simulation

沙尘环境试验是考验直升机及其它军事装备在沙漠和干旱地区风沙环境下作战性能和可靠性的重要手段<sup>[1]</sup>。国军标<sup>[2]</sup>中对沙尘环境试验的温度条件作出了严格的规定。由于试验风速及风洞内热负荷的变化范围也较大, 在大型回流式沙尘环境试验风洞的空调旁路中装备了表冷器和电加热器两种截然不同的温控设备, 在进行低速吹尘及高速吹砂试验时, 需要采取加热和制冷两种不同的温度控制措施, 相应的温度控制难度较大。

本文在对某回流式直升机沙尘环境试验风洞的温度变化进行动态特性分析与建模的基础上, 得出了一种引入风速协调因子的温度控制策略, 仿真研究表明: 这种温度控制策略可使直升机沙尘环境试验风洞的温度变化在高低两种热负荷下均得到有效控制。

### 1 沙尘试验风洞温度变化的动态特性分析与建模

将整个风沙两相流风洞作为一个集总参数环

节, 并将内部的工质热容与金属热容合并考虑, 得循环风道的能量守恒方程为

$$M_t c_t \frac{dH}{dt} = Q_h + Q_a - Q_s + Q_d - Q_w \quad (1)$$

式中:  $M_t$ ,  $c_t$ ,  $H$  分别为循环风道的当量金属质量(kg)、平均比热容( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{e}^{-1}$ )和摄氏温度( $\text{e}$ );  $Q_d$  为电加热器的加热功率(kW); 其它变量的物理意义与数学表达式如下:

$Q_h$  为循环风道内部的热负荷功率(kW), 根据风机调节原理<sup>[3]</sup>可知

$$Q_h = k_h n_f^3 \quad (2)$$

式中:  $n_f$  为循环风道内的风机转速( $\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $k_h$  为比例系数, 可由风机的特性曲线求得。

$Q_a$  为单位时间内通过各种辅助气流入出风洞的净热量(kW), 当风洞内压力得到有效控制时满足

$$Q_a = G_a c_a (H - H_0) \quad (3)$$

式中:  $G_a$ ,  $c_a$ ,  $H$  分别为进入循环风道辅助气流的质量流量( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )、比热( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{e}^{-1}$ )和摄氏温度( $\text{e}$ )。

$Q_s$  为单位时间内循环风道向周围环境的对

流散热量(kW),

$$Q_s = k_s F_s (H - H_e) \quad (4)$$

式中:  $k_s, F_s, H$  分别循环风道外表面的散热系数 ( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{e}^{-1}$ )、散热面积 ( $\text{m}^2$ ) 及环境温度 ( $e$ ), 可由风洞设计数据求得。

$Q_w$  为单位时间内跟随冷却水离开风洞的热量,

$$Q_w = G_w c_w (H_i - H - \Delta H_o) \quad (5)$$

式中:  $G_w, c_w, H_i, \Delta H_o$  分别为冷却水的质量流量 ( $\text{kg/s}$ )、比热 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{e}^{-1}$ ) 与进口温度 ( $e$ ) 及冷却水的出口端差 ( $e$ ), 可由稳态数据反算。

综合式(1)~(5), 可得循环风道内温度变化的动态方程为

$$M_t \alpha \frac{dH}{dt} = k_h n^3 + G_a c_a (H - H_e) - k_s F_s \#$$

$$(H - H) + Q_d - G_w c_w (H + \Delta H_o - H_i) \quad (6)$$

式中符号的物理含义、量纲及求取方法与式(1)~(5)相同。

分析式(6)可知: 风机转速变化、辅助气流流量与温度变化、环境温度的变化均会引起风道内的温度扰动, 而通过调节电加热器加热功率或冷却水流量, 则能使温度扰动得到控制, 但风机转速不同时风道内热负荷差别很大, 需要采取不同的控制措施。如: 当进行 30m/s 的吹砂试验时, 风洞内的热负荷为 400kW, 需要流量为 24t 4kg/s 的冷却水带走这部分热量才能维持风洞内的能量平衡和温度稳定; 当进行风速为 8l 9m/s 的吹尘试验时风洞内的热负荷功率很低, 只有 10l 4kW 左右, 此时欲维持较高的试验温度, 需要通过电加热器对风洞内气流加热, 才能弥补其散热损失以保证风洞内的温度稳定。

## 2 砂尘环境试验风洞的温度控制策略

一个控制目标(被调量), 两个控制变量, 如何在大幅度热负荷变动范围中协调加热、制冷两个效果截然相反的控制手段, 是砂尘环境试验风洞温度控制不同于普通温度控制对象<sup>[4]</sup>的特点和难点所在。

考虑到风洞内热负荷大小主要与主风机转速有关, 而循环风道内风速与风机转速成正比, 因此可如图 1 所示通过一个取值与风速相关的协调控制因子实现根据热负荷功率选择电加热器加热功率和冷却水流量之一作为主要的温度控制变量, 另一个作为辅助的控制变量的目标, 从而实现风洞内温度变化的协调控制。

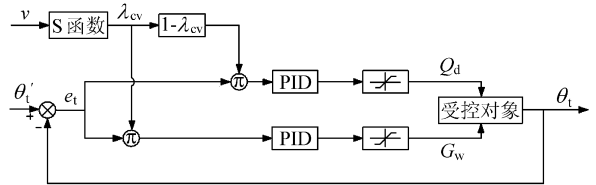


图 1 温度控制系统框图

Fig 1 Diagram of temperature control system

此时, 冷却水流量的控制方程为

$$G_w = K_p K_v \alpha + K_i \int (K_v e) dt + K_d K_v \frac{de}{dt} \quad (7)$$

式中:  $G_w, \alpha$  分别为冷却水流量 ( $\text{kg/s}$ )、试验温度给定值与实测值的偏差信号 ( $e$ );  $K_p, K_i, K_d$  为冷却水流量控制器的比例系数、积分系数和微分系数, 其整定方法参照文献[4]中相关内容。 $K_v$  为风速协调因子, 考虑到砂尘环境试验风洞的温度调节在低风速时以加热调节为主, 而高风速时以制冷调节为主, 风速协调因子  $K_v$  的表达式可取如图 2 所示输出在 [0~1] 单调递增的 S 函数 (Sigmoid Function), 其数学表达式为

$$K_v = \frac{1}{1 + e^{-a(v-c)}} \quad (8)$$

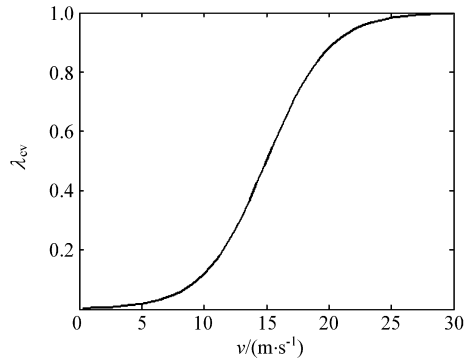


图 2 a=0.4, c=15 时的风速协调因子

Fig 2 Wind speed corresponding factor while a=0.4, c=15

式中:  $v$  为风速;  $a, c$  为大于零的可调参数, 可根据控制要求和仿真结果整定。风速协调因子也可以采用阶跃函数等其它表达形式, 但 S 函数更利于试验工况的平滑切换。

电加热器加热功率的控制方程为

$$Q_d = K_p (1 - K_v) \alpha + K_i \int (1 - K_v) \alpha dt + K_{td} (1 - K_v) \frac{d\alpha}{dt} \quad (9)$$

式中:  $Q_d$  为电加热器加热功率;  $K_p, K_i, K_{td}$  为电加热器控制器的比例系数、积分系数和微分系数, 其整定方法参照文献[4]中的相关内容。

除了引入协调因子外还需要对控制变量作必要的限幅处理:

$$f(u) = \begin{cases} u^2 & u \setminus u^2 \\ u & u_1 \leq u < u_2 \\ u_1 & u < u_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $u$  为由式 (7), (9) 确定的控制变量值  $G_w$  或  $Q_d$ ;  $0 \leq u_1 < u_2$  为限幅器的阈值;  $f(u)$  为经过限幅处理后的控制变量。

### 3 控制效果的仿真分析

仿真研究表明这种带风速协调因子的温度控制策略能够有效地改善砂尘环境试验风洞的温度控制效果, 这里仅以风速为 30 m/s 的高温吹砂工况下主风机转速发生 -5% 阶跃扰动及风速为 81.9 m/s 的高温吹尘工况下主风机转速发生的 +10% 阶跃扰动为例进行分析说明。

仿真对象为一外部保温良好的不锈钢风洞, 当量金属质量为 50 000 kg, 主风机额定转速为 131.3 r/s, 额定吹砂工况的风洞热负荷为 400 kW, 此时冷却水流量和试验风速分别为 241.4 kg/s、30 m/s, 电加热器额定功率为 240 kW。仿真过程中 S 函数的参数  $a=0.14$ ,  $c=15$ , 两个 PID 控制器的参数按文献[4]中方法整定。仿真结果如图 3~ 图 6 所示。

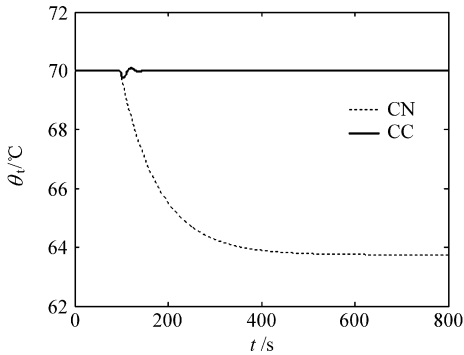


图 3 高温吹砂时的温度控制效果

Fig 3 Temperature control effect in high temperature blow sand condition

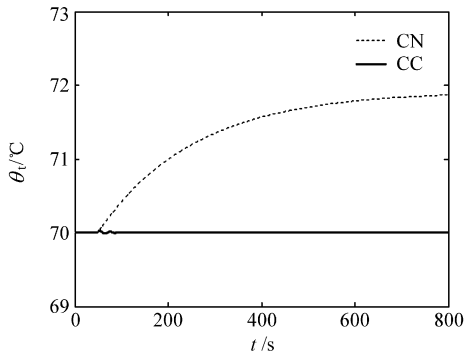


图 4 高温吹尘时的温度控制效果

Fig 4 Temperature control effect in high temperature blow dust condition

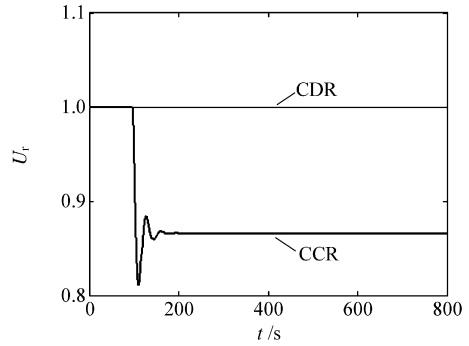


图 5 高温吹砂时控制变量相对变化

Fig 5 Control variable change in high temperature blow sand condition

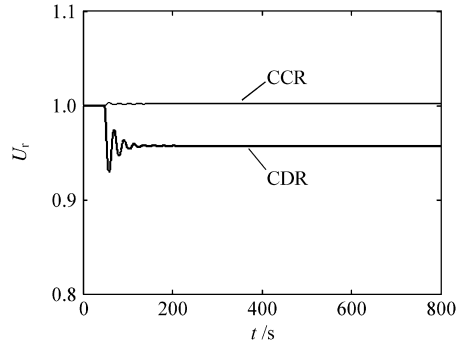


图 6 高温吹尘时控制变量相对变化

Fig 6 Control variable change in high temperature blow dust condition

研究图 3 及图 4 中的温度控制效果(曲线 CC)发现本文介绍的温度控制策略能在高低两种不同的风速及热负荷条件下有效控制风洞内的温度变化, 稳态控制误差小于试验温度给定值的 1%, 取得了良好的控制效果。两图中曲线 CN 为同样的扰动条件下, 去除温度控制器后风洞温度的自然响应曲线, 由于风机功率近似与转速的立方成正比, 且高风速下主要依靠冷却系统平衡系统热负荷, 而低风速下主要依靠外部环境的自然冷却来平衡热负荷, 所以高风速工况下曲线 CN 的温度变化幅度大, 但过渡时间短(图 3), 而低风速工况下曲线 CN 的温度变化幅度小, 但过渡时间长(图 4)。

图 5、图 6 反映了控制过程中各控制变量与其初始值之比  $U_r$  的变化, 其中曲线 CDR 反映了电加热器加热功率的变化情况, 曲线 CCR 反映了冷却水流量的变化情况, 从图中可以看出温控系统在引入风速协调因子后, 能在热负荷较高的高温吹砂工况自动选择冷却水流量作为主控变量(图 5), 而在需要加热的高温吹尘工况选择电加热器功率作为主控变量(图 6)。

### 4 结论

直升机砂尘环境试验风洞的温度控制难度较

大,本文针对回流式直升机沙尘环境试验风洞的系统特点,在对其温度变化进行动态特性分析与建模的基础上,提出了一种引入风速协调因子的沙尘环境试验风洞温度控制策略,仿真研究表明:这种带风速协调因子的温度控制系统能够在不同风速及热负荷条件下对风洞内的温度进行有效控制。

### 参 考 文 献

- [1] 王浚. 环境模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 6- 10.  
Wang J. Environment simulation technology[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1996. 6- 10. (in Chinese)
- [2] GJB 150. 1286. 军用设备环境试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会, 1986.  
GJB 150. 1286. Environmental test methods for military e-

quipments[S]. The Science and Technology Committee of National Defense, 1986. (in Chinese)

- [3] Jewel B. Low speed wind tunnel testing[M]. New York: Wiley, 1999. 105- 113.
- [4] 杨献勇. 热工过程自动控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 52- 65.  
Yang X Y. Thermal process control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 52- 65. (in Chinese)

作者简介:



李运泽(1972- ) 男,河北邢台人,博士,北京航空航天大学人机与环境工程专业讲师,2002年博士毕业于清华大学工程热物理专业,目前主要从事飞行器环境模拟、环境控制及热控制技术研究。E-mail: liyunze@tsinghua.org.cn

(责任编辑: 刘振国)

### 本刊刊登的孙茂教授的论文荣获第二届中国科协优秀论文奖

为激励广大科技人员不断创新,发表高水平学术论文,进一步提高办刊质量,加速我国科技期刊国际化,促进我国科学技术水平的不断提高,从2003年起,中国科协每年举办一届中国科协优秀论文评选活动。第二届中国科协优秀论文评选活动于2004年3月开始至12月结束。本届参加评选的优秀论文由中国科协所属全国性学会、协会、研究会主办的学术期刊编辑部推荐,先由3名同行专家个人推荐,再由刊物的主办学会组织专家初审后推荐,经中国科协期刊优秀学术论文专家评审委员会评选,报中国科协学术交流工作委员会审定,共评出99篇优秀学术论文,并在网上进行公示,公示期内无异议。

在本次活动中,由《航空学报》推荐的孙茂教授的文章《微型飞行器的仿生流体力学》(昆虫前飞时的气动力和损耗)(孙茂,吴江浩. 航空学报, 2002, 23(5): 3852393)荣获第二届中国科协优秀学术论文奖励,特此致贺。

中国航空学会航空学报编辑部