

环境试验设备的状态空间法仿真设计

翟唤春

尚娜

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

(中国华阴兵器试验中心, 华阴 714200)

王浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对于环境试验设备的设计,传统的工程设计方法是从指标出发,用半经验、稳态的方法设计系统,按照围护结构稳态放热量和试品冷透来计算制冷系统容量,这种稳态的计算结果通常比实际需要大的多.采用基于状态空间描述的分布参数模型用于系统动态仿真,可以允许对许多先不必要考虑的环节简化处理,对主要的负荷如围护结构、被试品等做精确的处理,可以较准确的得到总的制冷量需求,验证控制策略等,对于初期方案设计中系统制冷、加热设备容量的准确计算、不同方案的验证、控制方案的制定具有明显的意义.

关 键 词: 环境试验; 仿真; 状态空间

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2004)02-0109-05

Simulation design based on state-space for environment test equipment

Zhai Huanchun

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

Shang Na

(Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

Wang Jun

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

Abstract: To calculate the system capacity accurately in environment test equipment design, a simulation scheme was introduced. This scheme was based on distributed parameter model and the model was expressed in state-space. In the traditional design, refrigeration of loading was regarded as completeness at the end of refrigeration course. As a result, the system capacity is calculated much greater than the actual need. Compared with traditional design, the simulation design scheme is more accurate in system capacity calculation. The simulation scheme can be applied to test and compare different control scheme too. It is of distinct meaning and efficiency in the initial design stage.

Key words: environment test; simulation; state-space

1 传统设计方法的概述

环境模拟试验设备中对于温度环境的模拟具有普遍性.温度模拟可以采取多种形式,机械制冷、液氮制冷、空气制冷、电加热、蒸汽加热等方式

已广泛得到采用.对于环境模拟设备的设计,无论采取哪种制冷和加热方式,一旦指标和总的方案确定后,设计者最关心的是总加热、制冷容量取多大,如何设计系统以利于控制和节能等问题.

传统的工程设计方法是从指标出发,用半经

收稿日期: 2002-09-28

作者简介: 翟唤春(1973-),男,陕西华阴人,硕士生, zhai_huanchun@163.com.

稳态的方法设计系统^[1]. 如对于环境试验设备的制冷容量设计, 通常以初始温度、终止温度、降温时间为已知条件, 按照围护结构稳态放热量和试品冷透来计算制冷系统容量, 这种稳态的计算结果通常比更符合实际的动态计算结果大的多. 采用动态仿真用于系统的方案设计, 可以允许对许多先不必要考虑的环节简化处理, 对主要的负荷如围护结构、被试品等做精确的分布参数处理, 可以较准确的得到总的制冷量和加热量需求, 验证控制策略等.

2 状态空间法用于空气制冷环模设备的仿真研究方法

2.1 空气制冷环模设备系统构成

本文以广泛应用于环境试验设备中的空气制冷系统为例说明基于状态空间法的仿真方法. 图1为空气制冷用于环境试验设备的原理图.

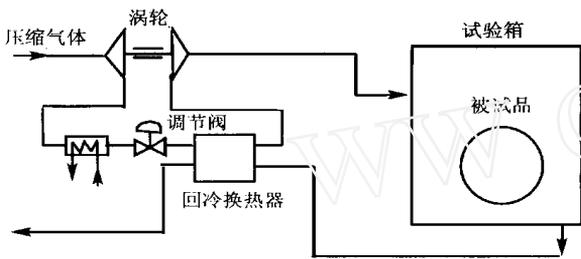


图1 空气制冷循环

压缩气体先经试验箱回气预冷后, 再经涡轮绝热膨胀, 试验箱温度得以不断降低. 通过调节阀改变系统循环空气流量, 可以达到调节温度的目的.

2.2 数学模型的建立

2.2.1 涡轮制冷量模型

对于系统的总制冷量, 可按工程计算惯用的代数方程表示, 详见文献[1]有关章节. 当涡轮选定后, 单位制冷量 q_e 仅是试验箱温度 T_d 的函数.

$$q_e = c_p \left[T_{ei} \left(1 - \frac{1}{e^{0.286}} \right) e - (T_{hi} - T_d)(1 - \eta) \right] \quad (1)$$

式中, $T_{ei} = T_{hi} - (T_{hi} - T_d)\eta$; q_e 为单位制冷量, J/kg; T_{ei} , e , η 为涡轮进口温度, K, 膨胀比和热效率; T_{hi} , η 为回冷换热器进口温度, K, 传热效率; T_d 为试验箱温度, K.

2.2.2 试验箱温度模型

对于试验箱, 通常各个方向的围护结构完全相同, 且箱内空气温度场均匀, 因此围护结构可按

一维导热处理, 箱内空气按集总参数处理.

将围护结构均分为 n 层, 取如图2所示的 $n+1$ 点温度为状态变量^[2], 包括箱内空气温度, 可建立 $n+2$ 维状态方程. 图中各点温度相对于环境温度 T_0 用过剩温度表示, 阴影部分表示控制体. 由能量守恒知控制体内能的变化等于进出控制体热流量的代数和, 由此可以推出一组常微分方程, 即状态方程^[3].

建立状态方程的过程物理概念清晰, 实质是将各控制体温度在空间上作二阶精度的差分, 而在时间上并不进行离散化.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} c_1 \frac{dx_1}{dt} &= \alpha_0 (T_0 - x_1) - \frac{x_1 - x_2}{R_1} \\ \frac{1}{2} (c_1 + c_2) \frac{dx_2}{dt} &= \frac{x_1 - x_2}{R_1} - \frac{x_2 - x_3}{R_2} \\ &\dots \\ \frac{1}{2} (c_{i-1} + c_i) \frac{dx_i}{dt} &= \frac{x_{i-1} - x_i}{R_{i-1}} - \frac{x_i - x_{i+1}}{R_i} \\ \frac{1}{2} c_n \frac{dx_{n+1}}{dt} &= \frac{x_n - x_{n+1}}{R_n} - \alpha_1 (x_{n+1} - T_d) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $c_i = l_i / \delta_i c_{pi}$ 为单位比热容; c_{pi} 为定压比热容; $R_i = l_i / \lambda_i$ 为热阻; l_i 为厚度; λ_i 为热导率; α_0 为自然环境与试验箱外壁的对流换热系数; α_1 为试验箱内壁与箱内空气的对流换热系数. 均可由指标要求的风速导出.

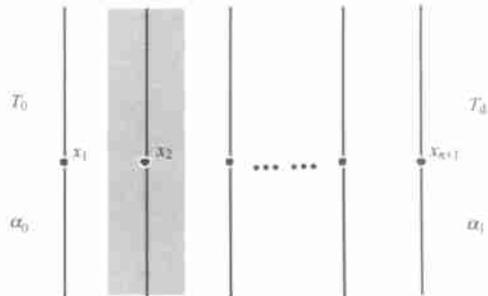


图2 围护结构分层示意

对于第 $n+2$ 个方程, 即包含 $d T_d / dt$ 的方程, 可以将试验箱内的空气作集总参数表示, 同样认为空气总内能的变化等于导入导出热流之差, 即

$$M_k c_{pk} \frac{dT_d}{dt} = A_{x-1} (x_{n+1} - T_d) - q_1 \quad (3)$$

式中, M_k , c_{pk} 为空气的质量和定压比热容; A_{x-1} 为试验箱内表面积; q_1 为促使空气温度下降的那部分冷量, 它等于涡轮总制冷量减去试品和箱内其它附件所消耗的冷量.

由式(2)和式(3)就构成了试验箱完整的 $n+2$ 维状态空间, 整理后可表示为状态方程

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \dots \\ \frac{dT_d}{dt} \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ T_d \end{bmatrix} + B_1 q_1 \quad (4)$$

式中, A_1 为 $(n+2) \times (n+2)$ 维系统矩阵; B_1 为 $(n+2) \times 1$ 维输入矩阵。

对于输出方程, 可以将关心的输出参数, 如温度、热流密度先表示为各状态变量的函数, 再根据函数表达式建立输出方程

$$Y = C_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ T_d \end{bmatrix} + D_1 q_1 \quad (5)$$

式中, C_1 为 $r \times (n+2)$ 维输出矩阵; D_1 为 $r \times 1$ 维前馈矩阵; r 对应所需状态空间输出个数。当输出 Y 取试验箱温度 T_d 时, 则 $C_1 = [0, \dots, 0, 1]$, 为 $n+2$ 维行向量, $D_1 = 0$ 。当然, 可以通过改变 C_1 得到多点温度值和由各点温度导出的其他参数, 如热流密度等。

2.2.3 被试品模型

如图 3 所示。

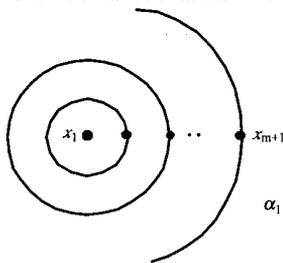


图 3 被试品分层示意

被试品是除围护结构外另一个需精确处理的环节。对于被试品, 输入条件是试验箱的温度 T_d , 关心的输出是它所消耗的那部分冷量和各控制体温度。将被试品简化为和实际试品具有相同材质、质量、外表面积的实心圆柱体, 从而便于按一维导热处理问题。对于工程设计, 这样的简化是可行的。对于圆柱形物体的一维导热有^[4]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right] \quad (6)$$

上式右边按二阶精度离散化后为^[5]

$$C \frac{dx_i}{dt} = \frac{x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}}{R} - \frac{x_{i-1} - x_{i+1}}{2(i-1)R} \quad (7)$$

式中, C 为试品的单位比热容 $C = r c_p$; $R = r/l$ 为热阻。

对于核心点, 该点控制的控制体内能的变化等于由它向第 2 个控制体导出的热量, 有

$$c_p \left(\frac{r}{2} \right)^2 L \frac{dx_1}{dt} = \frac{(x_1 - x_2)}{r} \cdot 2 \cdot \frac{r}{2} \cdot L$$

其中, L 为试品长度。上式可化简为

$$\frac{dx_1}{dt} = - \frac{4x_1}{RC} + \frac{4x_2}{RC} \quad (8)$$

对于第 $m+1$ 点, 该点控制的控制体内能的变化, 等于第 m 个控制体导入的热量减去由于对流换热导出的热量, 即

$$c_p \left\{ (m-r)^2 L - \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) r \right]^2 L \right\} \frac{dx_{m+1}}{dt} = \frac{(x_m - x_{m+1})}{r} 2 \left(m - \frac{1}{2} \right) r L - \frac{1}{2} (x_{m+1} - T_d) 2 n r L$$

上式可化简为

$$\frac{dx_{m+1}}{dt} = \frac{2(m-1/2)}{RC(m-1/4)} x_m - \frac{2(m-1/2) + 2mR}{RC(m-1/4)} x_{m+1} + \frac{2m}{C(m-1/4)} T_d \quad (9)$$

由式(7)、(8)、(9)组成被试品的状态方程

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \dots \\ \frac{dx_{m+1}}{dt} \end{bmatrix} = A_2 \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_{m+1} \end{bmatrix} + B_2 T_d \quad (10)$$

式中, A_2 为 $(m+1) \times (m+1)$ 维系统矩阵; B_2 为 $(m+1) \times 1$ 维输入矩阵。对于输出方程, 同样可以根据需要, 将输出参数如热流密度、温度表示为各状态变量(试品各控制体温度)和输入变量(试验箱温度 T_d)的函数, 再根据函数表达式建立输出方程

$$Y = C_2 \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_{m+1} \end{bmatrix} + D_2 T_d \quad (11)$$

式中, C_2 为 $r \times (m+1)$ 维输出矩阵; D_2 为 $r \times 1$ 维前馈矩阵; r 为所需要的状态空间输出个数。当输入取试验箱温度, 输出 Y 取试品消耗的冷量, W , 有

$$q_2 = \frac{1}{2} (x_{m+1} - T_d) \cdot A_s \quad (12)$$

所以这里 $C_2 = [0, \dots, 0, A_s, 1]$, $D_2 = [-A_s, 1]$ 。 A_s 为被试品表面积。

2.2.4 附件模型

试验箱内其它附件如隔板、孔板等多为薄金属板, 内部温度认为是均匀的, 可按集总参数法处理, 即 1 层模型。对于附件, 关心的输出是它所消耗的那部分冷量和它的温度, 输入条件是试验箱

的温度 T_d 。

由附件内能的变化等于它与箱内空气的换热量可知

$$c_p M_f (T_f - T_d) A_f = -c_p M_f \frac{dT_f}{dt} \quad (13)$$

式中, T_f 为附件温度; A_f 为附件总面积; c_p 为附件的比热容。整理后得状态方程

$$\frac{dT_f}{dt} = A_3 T_f + B_3 T_d \quad (14)$$

式中, A_3 为 1×1 维系统矩阵; B_3 为 1×1 维输入矩阵。

当输入取试验箱温度, 输出 Y 取附件消耗的冷量时, 有

$$q_3 = -c_p M_f (T_f - T_d) A_f \quad (15)$$

则输出方程

$$Y = C_3 T_f + D_3 T_d \quad (16)$$

这里 $C_3 = [-c_p M_f A_f]$; $D_3 = [1]$ 。

2.3 仿真模型的建立

根据图 1 所示的系统原理图可以建立如图 4 所示的系统仿真模型原理图。

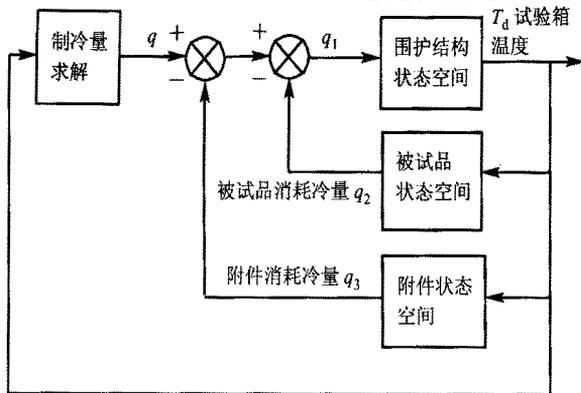


图 4 系统仿真模型原理

图 4 中 q 为涡轮总的制冷量; q_1 为用于围护结构和试验箱空气降温的那部分冷量; q_2 为被试品消耗的那部分冷量; q_3 为附件消耗的冷量。据前述数学模型, 用 Matlab 分别计算各状态空间系数矩阵^[6], 并赋予 Simulink 仿真软件中状态空间模块 state-space^[7], 连同其它模块, 就可以进行仿真了, 即基于分布参数模型的仿真。

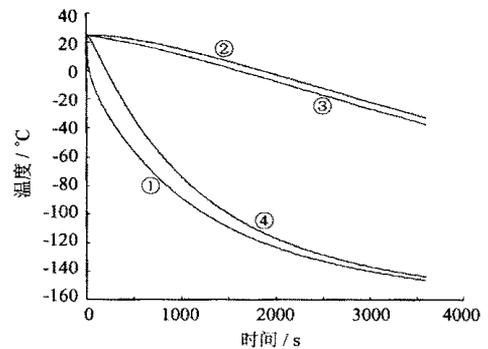
3 应用讨论

笔者在如图 1 所示的试验箱方案设计中使用了以上仿真方法, 在初步确定系统方案后采取工程惯用的设计方法进行初步设计, 然后进行仿真验证, 根据极限温度和降温速率指标, 对制冷方案、

围护结构形式及厚度等进行了修正, 对系统优化、减小投入, 起到了较理想的效果。

某部待研低温试验设备容积 16 m^3 , 指标要求热负载 1000 kg 钢, 最低温度 -82 , 降温速率由常温至最低温度全程平均 5 /min。总体方案考虑采用正升压涡轮空气制冷, 涡轮膨胀比 5.9 , 涡轮效率 0.8 , 回冷换热器效率 0.88 , 回冷换热器进口空气温度 35 , 箱体围护结构为外层 18 mm 厚锰钢, 中间保温层为 250 mm 厚玻璃棉毡, 内胆为 2 mm 厚玻璃钢, 试验箱内附件为 2 mm 厚总面积 38 m^2 的紫铜板。按照基于“冷透”考虑的工程计算方法, 所需压缩气体流量为 3209 kg/h , 可供选择的涡轮中与之最接近的为 3000 kg/h 质量流量的涡轮, 因此, 制冷量不足的部分考虑用液氮制冷弥补。

采用文中所述方法针对以上方案进行仿真验证, 当压缩空气质量流量为 3000 kg/h , 试品被简化为半径 100 mm 和外表面积 3 m^2 , 围护结构和试品网格按 1 mm 均分时, 降温过程仿真结果如图 5 所示。仿真结果表明, 单纯采用质量流量为 3000 kg/h 的涡轮就可以满足降温速率的要求。



试验箱内空气温度; 试品表面温度;
试品核心温度; 附件温度

图 5 低温试验系统降温过程仿真

由于文中提到的仿真方法主要针对初期方案设计, 所以并不必要建立整个系统的仿真模型, 而只是对影响设计的主要环节建立分布参数模型(围护结构和试品状态空间维数超过 100), 并将分布参数模型直接用于仿真。实际仿真过程表明, 采用 P4 1.4G 处理器的微机模拟 100 h 的实际过程仿真耗时不超过 30 s。这种分布参数模型直接用于仿真的方法, 避免了提取对象简化了的但要求准确的代数模型这一难度大且极具创造性的过程, 相比之下, 分布参数模型仿真结果更精确, 包含信息量更大, 在实际设计应用中取得了良好的效果。

4 结束语

采用以上仿真方法,不仅可以对系统容量进行精确设计,而且,当在仿真模型中添加调节阀环节时,可以在仿真模型上进行系统飞升特性的测试^[8],可以在任意温度平衡点,针对不同试验室、不同试品、不同供气流量进行正向和反向建模,作为控制器设计参考用。如果连同控制器环节,即可进行控制算法的设计与验证。在实际试验中采用该仿真方法,建立带控制环节的仿真模型,将被试品作合理的外形简化,即可用于观测试验室和被试品表面、核心点的温度变化过程,预测温度稳定时间。根据仿真结果,适当取一定裕量用于指导实际试验。

参考文献 (References)

- [1] 王 浚,黄本诚,万才大. 环境模拟技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996. 225 ~ 266
Wang Jun, Huang Bencheng, Wan Caida. Environment simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 225 ~ 266 (in Chinese)
- [2] 陈芝久,阙雄才,丁国良. 制冷系统热动力学[M]. 北京:机械工业出版社,1998. 169 ~ 170
Chen Zhijiu, Que Xiongcai, Ding Guoliang. Thermodynamics of refrigeration system[M]. Beijing: China Machine Press, 1998. 169 ~ 170 (in Chinese)
- [3] 尤昌德. 线性系统理论基础[M]. 北京:电子工业出版社,1984. 7 ~ 13
You Changde. Elementary theory of linear system[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1984. 7 ~ 13 (in Chinese)
- [4] 杨世铭. 传热学[M]. 第二版. 北京:高等教育出版社,1987. 26 ~ 29
Yang Shiming. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987. 26 ~ 29 (in Chinese)
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988. 18
Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. 18 (in Chinese)
- [6] 楼顺天,陈生潭,雷虎民. MATLAB 5. X 程序设计语言[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2000. 123 ~ 155
Lou Shuntian, Chen Shengtan, Lei Humin. Program design for MATLAB 5. X [M]. Xi'an: Xi'an Electronics Science and Technology University Press, 2000. 123 ~ 155 (in Chinese)
- [7] 施 阳,严卫生,李 俊. MATLAB 语言精要及动态仿真工具 SIMULINK[M]. 西安:西北工业大学出版社,1997. 43 ~ 65
Shi Yang, Yan Weisheng, Li Jun. Gist of MATLAB and dynamic simulation tool-SIMULINK[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 1997. 43 ~ 65 (in Chinese)
- [8] 施 仁,刘文江. 自动化仪表与过程控制[M]. 北京:电子工业出版社,1990. 184 ~ 191
Shi Ren, Liu Wenjiang. Automatic apparatus and process control [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1990. 184 ~ 191 (in Chinese)