

大型沙尘风洞中沙尘浓度测量与控制方法的研究

高飞¹, 沈为群¹, 刘旺开², 邓丁奇²

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 沙尘浓度指标严重影响沙尘风洞试验效果; 在大型沙尘风洞中准确的测量及有效的控制沙尘浓度是沙尘风洞设备研制中的两个关键问题; 针对动态试验工况环境中浓度传感器标定的问题, 分析了浓度测量时标定参数与风速和浓度的关系, 使用模型树算法建立了三者之间的关系模型, 以此模型来预测各种动态情况下的标定参数; 针对复杂环境下浓度动态控制问题, 采用专家PID算法, 提出了多回路控制系统结构和专家规则; 工程实践表明该测量和控制方法满足了动态试验环境的需求, 取得了良好效果; 模型树算法和专家PID系统能有效的解决动态工况下沙尘浓度的测量与控制问题。

关键词: 模型树; 专家PID; 浓度; 沙尘风洞

Studies on Concentration Measurement and Control Methods of Large Wind Tunnel with Sand/Dust

Gao Fei¹, Shen Weiqun¹, Liu Wangkai², Deng Dingqi²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

Beijing 100191, China; 2. School of Aeronautics Science and Engineering, Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Sand/dust concentration can severely affect the test effect of sand/dust wind tunnel. Accuracy measure and effective control sand/dust concentration in large wind tunnel with sand/dust are pivotal matters in equipment development for wind tunnel with sand/dust. Aimed at the calibration problem of concentration sensor in dynamic operating condition, analysis the relations between calibration parameter, wind speed and concentration, model the relations with model tree, then use the model to forecast the calibration parameter under various dynamic conditions. A multiloop control system and expert regulation have been built with expert PID for solving concentration dynamic control problem in complex environment. Engineering practice show that the way of calculate calibration parameter and control method meet the requirement of dynamic test environment and perform well. Mode tree and expert PID can effectively solve the problem of concentration measurement and control in dynamic operating condition.

Keywords: model tree; expert PID; concentration; sand/dust wind tunnel

0 引言

沙尘环境是引起许多工程和武器设备失效的重要环境因素^[1]。沙尘环境试验是评价各类装备和仪器在沙漠等风沙环境下的可靠性、稳定性以及工作性能的重要手段。大型沙尘风洞是模拟沙尘试验环境的大型装置, 其主体为一个闭口风洞, 通过外围设备和测控系统可以在其中模拟出沙尘环境中的浓度、温度、压力、湿度、风速等环境指标。

沙尘浓度是整个试验系统中的核心参数。国军标对沙尘试验中的沙尘浓度条件有严格的规定^[2]。大型沙尘试验风洞(图1^[3])结构庞大, 系统复杂, 风道内的气-固两相流高速流动(达30 m/s以上), 温度、压力等其他环境参数动态变化, 加之加砂装置和回收装置的运行, 使得风道内浓度参数的非线性因素, 扰动因素很大, 这都增加了沙尘浓度测量和控制的难度。

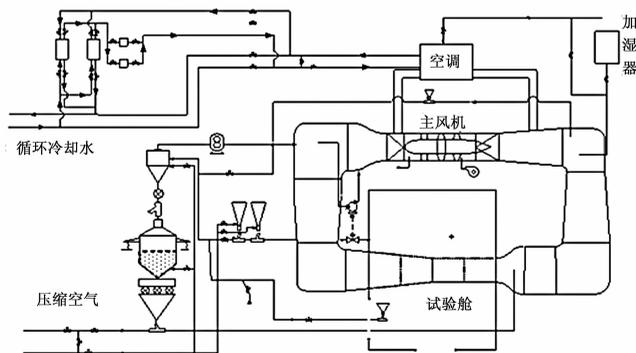


图1 沙尘试验风洞简图

本文针对沙尘试验环境中沙尘浓度动态测量与控制中的难点, 对其进行了分析建模, 提出了基于模型树智能算法的浓度测量方法, 和使用传统PID算法和专家系统相结合的浓度控制策略, 能达到动态测控的良好效果。

1 动态环境中沙尘浓度的测量

颗粒物浓度有二种测量方法: 测量颗粒物摩擦传感器接触杆产生的静电; 测量颗粒物对激光的反射强度。不过这两种传感器都是在烟尘的环境中标定的, 要在沙尘环境中使用需要对传感器进行重新标定。经过试验发现, 当风速或浓度变化时,

收稿日期: 2014-05-21; 修回日期: 2014-06-25。

作者简介: 高飞(1990-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事计算机软件及自动控制方向的研究。

沈为群(1952-), 女, 江苏启东人, 副研究员, 主要从事计算机软件与应用方向的研究。

刘旺开(1953-)男, 湖南茶陵人, 教授, 主要从事计算机测量与控制方向的研究。

传感器的输出电流与实际的沙尘浓度并不成线性关系。所以，要取得准确的测量数值和精度，必须在不同的风速和沙尘浓度条件下使用对应的标定参数。使用的浓度传感器支持在试验过程中实时通过 MODBUS/TCP 协议向其发送标定参数。经过试验，我们得到如表 1 所示的标定参数表。

表 1 不同风速-浓度条件下的标定参数表

序号	风速/(m/s)	标定装置实测浓度/g	标定参数
0	18	0.18	1.66
1	20	0.18	1.44
2	23	0.18	1.11
3	25	0.18	0.89
4	29	0.18	0.44
5	18	1.1	2.29
6	20	1.1	1.99
7	23	1.1	1.56
8	25	1.1	1.26
9	29	1.1	0.68
10	18	2.2	4.18
11	20	2.2	3.74
12	23	2.2	3.09
13	25	2.2	2.82
14	29	2.2	0.9
.....			
<i>n</i>	8.9	10.6	45
.....			

试验过程中根据试验工况，动态的向浓度传感器发送对应的标定参数。传统的查表方法计算量大，时滞明显，且基于表格描述的方法不可能包含所有的动态组合，显然无法获取浓度传感器的准确标定参数。因此迫切需要研究一种新的动态浓度测量方法。

2 基于模型树算法的动态浓度测量方法

模型树算法是树回归算法的一种，这种方法是将数据集切分成很多份易建模的数据，再利用线性回归技术来建模。该算法对于特征之间关系复杂的非线性问题具有良好的拟合效果。使用 CART（分类回归树）在二元切分法的基础上构建模型回归树，可以直接处理连续型特征并解决数据分割过快的问题，提高模型的适应能力^[4]。在回归树模型中数据之间的复杂关系可以用树的结构来概括，当数据不再能被切分时，便得到了叶节点的模型。为了避免数据块较小时数据矩阵奇异的问题，算法中使用岭回归模型与真实值的误差作为数据切分的依据。模型树中的叶节点是由岭回归模型解算出的回归系数，由此计算标定参数的预测值。此外，为了避免出现“过拟合”现象，对构造的模型树进行了减枝操作。

以第三方标定装置实测的沙尘浓度，风速和标定参数作为训练集构建了模型树。在这里给出了对于风速在 18~25 m/s，浓度在 0.18~2.2 g/m³ 之间有效的模型树结构，如图 2 所示。

原始数据按 [风速 *v*，浓度 *c*，标定参数 *p*] 的列表结构排列，其在图中对应的索引为 [0, 1, 2]。树中非叶子节点为决策节点，其第一个数为对应的参数索引，第二个数为数据分割节点。路径上的“gt”表示“大于”分割数值时的路径，“lt”表示“小于”时的路径。每个叶子节点中是一个预测模型。在做试验时，根据设定的试验风速和浓度，在树中经过简单的决

策路径，就能找到相应的浓度标定参数的预测模型，如对图 2 最左边的叶子节点，有 $p = 0.000\ 514\ 91 + 0.014\ 932\ 27v + 0.206\ 679\ 49c$ ，并将计算值动态实时的发送给传感器。图 3 表明了预测的标定参数和表 1 中实际数值之间的拟合效果，图中纵轴为标定参数 *p*（量纲 mA·m³/g），横轴为数据间隔，量纲 1。

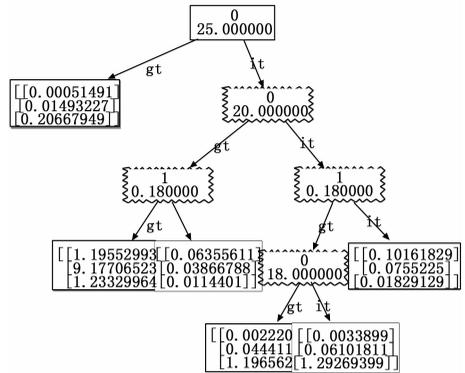


图 2 模型树结构

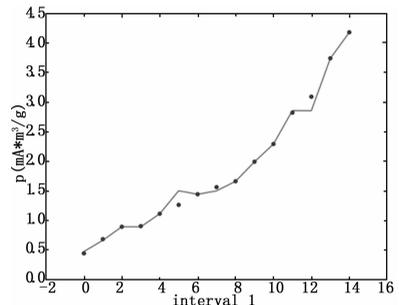


图 3 模型树算法拟合结果

设置合理的建模误差上限 (0.01)，岭回归系数 (0.2) 和原始数据分块下限 (1)，该拟合模型的计算值与实际值之间的相关系数可达到 0.99 以上，预测 15 个数值的误差平方和为 0.12。若使用标准的最小二乘法进行预测，相关系数为仅为 0.93，同样 15 组数据的误差平方和高达 2.12。可见，该方法具有很高的准确度和精度，能满足现场测量和试验的要求。按照文献 [4] 所述，如果有更多和更大范围的原始数据，模型将有更好的准确度和精度。

3 沙尘风洞中浓度的控制

以风洞试验段沙尘浓度作为反映风道内浓度变化的的状态变量^[5]。根据质量守恒定律，得到沙尘浓度变化为：

$$V_t \frac{dC_t}{dt} = G_{in} - G_{ts} - G_{to} \quad (1)$$

式中各变量的物理意义如下：

- V_t 为考虑风道内各部分浓度差别后的折算容积；
- G_{in} 为单位时间内由气力输送装置送入风道的沙尘质量；
- G_{ts} 为单位时间内分离装置分离回收的沙尘质量；
- G_{to} 为单位时间内由辅助收料气流装置离开风道的沙尘质量。

由式 (1) 可知，风道内的沙尘浓度受到多种因素的影响。具体来说，风速、调压气流以及气力输送装置的供气压力等的变化，都会引起浓度的大幅波动。传统方法通过调节给料器开度和气力输送调节阀可以使浓度得到一定控制，可这会引超输送管道内固气比的扰动，且相关参数很难测量，难以达到良好

的控制效果。所以, 砂尘浓度控制的关键问题在于能准确控制浓度的同时, 还能协调给料器的转动, 使整个系统能有效, 稳定的得到控制。

4 基于专家 PID 的沙尘浓度多回路控制方法

砂尘浓度的控制涉及到多种因素, 如由于加砂时设备震荡引起的瞬时砂尘变化剧烈; 气力输送管道中喷入风道的砂尘料不能快速均匀扩散进而产生较大的浓度峰值; 及系统运行中的其它参数动态扰动等。现场的环境使得砂尘浓度的控制问题成为该环控设备研制的的关键问题。虽然这里采用以高压空气带动气力输送系统中的砂尘, 并向与风道中相反的方向喷吹的方法, 显著改善试验段浓度的均匀性。但采用传统的 PID 控制方法, 会出现超调大, 稳定时间长甚至失稳的现象。因此我们采取传统 PID 与专家系统结合的方式来构建控制系统。有效地解决了砂尘风洞中砂尘浓度控制问题。

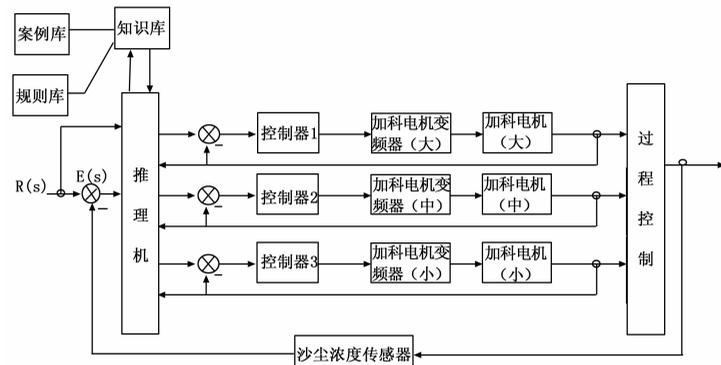


图 4 基于专家 PID 的沙尘浓度控制系统结构图

构建的控制系统结构如图 4 所示。该专家系统基于受控对象和控制规律的各种知识, 无须知道被控对象的精确模型, 依靠专家经验进行决策和控制。规则库是根据专业领域内砂尘浓度控制的一些共性特征抽取出的规则集合, 案例库是对其的有效补充, 规则库和案例库构成了知识库, 这是专家系统推理决策的理论基础。推理机基于知识库, 用户预设和系统输入, 结合一定的推理方法, 得出有效的控制策略与相应参数。

系统中分别设计了大、中、小三条回路对浓度进行控制。每条回路均由控制器, 变频器和加料电机构成。当浓度被设定为某一指标时, 专家系统根据知识库中的规则或案例进行推理, 得出使用的回路信息以及相应的 PID 参数等结果, 并将 PID 参数发送给控制器。控制器通过变频器驱动给料器上的大、中、小 3 个对应的阀门电机转动。砂尘浓度 PID 控制器主要是根据浓度误差信号, 对给料器的转速进行闭环控制。单个给料器的旋转转速 n_i 的控制方程为^[6]:

$$n_f = K_{np} (C_t - C_i) + K_{mi} \int (C_t - C_i) dt + K_{nd} \frac{d}{dt} (C_t - C_i) \quad (2)$$

式中, K_{np} , K_{mi} , K_{nd} , 分别是给料器旋转电机控制的比例系数, 积分系数和微分系数; C_t , C_i 分别是砂尘浓度的测量值和预设值。

专家系统中的规则使用“IF-THEN”语言描述如下:

设 C_1 , C_2 , C_3 是 3 个误差临界值, $e(k)$ 为当前误差, $e(k-1)$ 为上一个采样点的误差。

规则 1: IF $|e(k)| \geq C_1$, THEN 大、中、小 3 个加砂电机全开或者全关。

规则 2: IF $|e(k)| \leq C_3$, THEN 系统误差在许可范围之内, 控制器应保持输出不变。

规则 3: IF $\geq |e(k)| \geq C_3$ AND $|e(k) - e(k-1)| \geq C_2$, THEN 使用较强的 PID 控制参数。

规则 4: IF $\geq |e(k)| \geq C_3$ AND $|e(k) - e(k-1)| < C_2$, THEN 使用较弱的 PI 控制参数。

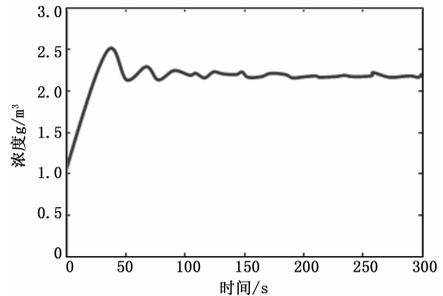


图 5 砂尘浓度控制曲线图

根据专家经验设定好 PID 整定参数, 实际的控制效果如图 5 所示。此时为高砂试验, 浓度设定值为 2.2 g/m^3 , 风速为 20 m/s , 对应的传感器标定参数为 $3.74 \text{ mA} \cdot \text{m}^3/\text{g}$ 。开始时砂尘浓度为 1.1 g/m^3 , 和设定值差距较大, 此时专家系统使用规则 1, 打开 3 个电机, 使用较大的比例系数 (P)。当浓度, 达到设定值时, 波动较大, 超调明显, 此时使用规则 3, 采用较强的 PID 控制, 减少调节时间, 快速稳定。波动减小到阈值以后, 采用规则 4, 使用较弱的 PI 控制, 满足控制精度和稳定性的要求。最后使用规则 2, 保持 PID 参数不变, 浓度被控制在 2.2 g/m^3 , 且能保持长时间稳定。

5 结论

针对砂尘风洞中砂尘浓度动态测控的问题, 使用模型树算法可以很好的对风速, 浓度和标定参数三者的关系进行建模拟合。基于有效的原始数据, 能准确预测有效范围内风速和浓度的任意组合下对应的标定参数, 实现了标定参数动态地计算发送。这保证了试验中浓度测量的有效性与准确性的要求。基于专家 PID 的浓度控制方法综合了传统的 PID 控制和专家的优点, 能有效的提高砂尘风洞内浓度的控制效果。该方法能有效应对大型砂尘风洞内部环境复杂, 机构众多, 变化因素多等条件, 控制波动小, 稳定性高。

参考文献:

- [1] 闫文奇, 刘旺开, 何理. 砂尘风洞测控系统 [J]. 兵工自动化, 2012 (4): 78-81.
- [2] GJB 150. 军用设备环境试验方法 [S]. 国防科学技术工业委员会. 1986-12-19. 12-86.
- [3] 梁山清, 沈为群, 张继华等. 砂尘环境模拟测控平台的设计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013 (12): 3250-3252.
- [4] Peter Harrington. 机器学习实践 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [5] 李运泽, 袁领双, 王浚. 直升机砂尘环境试验风洞的浓度控制策略及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2005 (5): 1241-1243.
- [6] 何克忠. 计算机控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [7] 敖志刚. 人工智能及专家系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.