

叶栅风洞控制方法分析与实现

诸卫华, 李刚, 林辰龙

(中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决叶栅风洞气罐容量小气源压力下降快给流场控制带来的难题, 采用动态变参数和积分分离 PID 控制算法实现了叶栅风洞流场快速稳定和目标压力高精度控制目的; 以调压阀后压力为控制点, 采用叶栅入口压力误差值对控制点压力进行修正的方法, 解决了常压和增压试验中控制滞后问题; 变参数 PID 控制和选用具有确定对应关系控制点并对实际误差进行修正的方法, 对小型暂冲风洞高精度压力控制和滞后问题的解决具有一定借鉴意义。

关键词: 叶栅风洞; 控制策略; 试验; PID

Analysis and Realization of Control Method for Cascade Wind Tunnel

Chu Weihua, Li Gang, Lin Chenlong

(Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: To solve the flow field control problem that the small capacity of tank and the pressure drops quickly brings in the cascade wind tunnel, the flow field control, the dynamic variable parameter and integral separation PID control algorithm was given. The algorithm can achieve a rapid flow field stability and high precision control of pressure in the cascade wind tunnel. The control delays problem in the atmospheric and pressurization test was solved by using the method which uses the inlet pressure error value of cascade to correct the pressure behind pressure regulator. The result indicates that the variable parameter PID control and the choice of control point having a defined correspondence to correct the actual error have significance for high precision pressure control and hysteresis in the small temporary red wind tunnel.

Keywords: cascade wind tunnel; control strategy; experiment; PID

0 引言

叶栅风洞是一座带引射系统的下吹风式暂冲型跨超声速风洞, 主要用途是研究叶栅气动和传热问题。风洞总体结构包括气源系统、进气管件、大开角段、试验舱、模型系统、快门和引射器, 具体构成见图 1。其中, 进气管件包括气体管路、电动截止阀、调压阀、气动快速阀、蝶阀和手动节流阀, 模型系统包括试验模型、模型前后的气流通道和相应的整流装置。

风洞试验采用调压阀自动控制、1#手动节流阀和蝶阀手动预置的联合调节方式进行叶栅入口压力、引射压力控制, 为被试叶栅提供要求的马赫数和雷诺数。具体试验过程是: 根据试验具体要求预置蝶阀和 1#节流阀开度, 预设调压阀开度。试验开始后, 控制系统打开快速阀并根据调压阀或叶栅入口目标压力自动调节调压阀开度, 实现叶栅前后目标压比和雷诺数。由于叶栅风洞气源容积有限, 试验过程中罐内压力急速下降, 这给实际控制过程带来很大难度。

1 叶栅风洞控制系统总体设计

叶栅风洞的控制系统选用 PXI 总线作为硬件平台, 工控机作为 PXI 系统外挂式的控制器, 调压阀驱动选用西门子生产的交流伺服系统和伺服电机。具体组成包括工控机、PXI 机箱和基于 PXI 总线的数字输入/输出模块、模拟输入/输出模

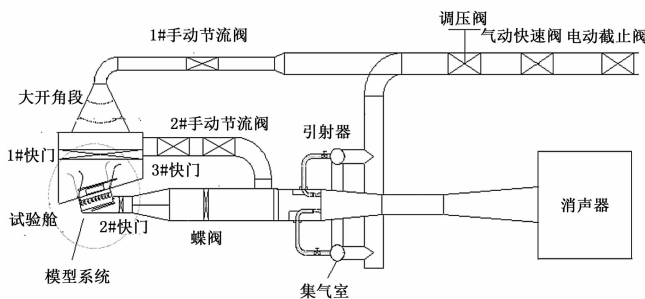


图 1 叶栅风洞主体构成图

块以及位置传感器、压力传感器、阀门驱动与转换单元。工控机一方面是执行各种控制指令、处理和显示试验数据的人机交互界面, 另一方面又是按照试验要求完成实时控制计算实现试验控制逻辑的核心。基于 PXI 总线的数字输入/输出模块实现对气控阀、电动阀门、快门的开关控制及其开关状态的监测, 模拟输入/输出模块实时读入试验过程中气源压力、调压阀后压力、集气室压力、截流阀后总压、截流阀后差压、以及截流阀、蝶阀、调压阀开度等值, 并根据工控机控制计算结果实时输出控制电压值控制调压阀开度, 完成调压阀后压力和引射器入口压力控制; 工控机和 PXI 系统之间通过总线扩展接口卡和连接电缆实现监测和控制数据的实时传输, 从而达到对风洞试验过程实时监控的目的。

整个叶栅风洞控制系统所要控制监测的点包括 7 个数字输出量 (DO)、13 个数字输入量 (DI)、1 个模拟输出量 (AO)

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-04-25。

作者简介: 诸卫华(1968-), 男, 山西翼城人, 博士, 研究员, 主要从事风洞控制与测量技术方向的研究。

和 11 个模拟输入量 (AI), 控制系统总体构成和监控对象见图 2。

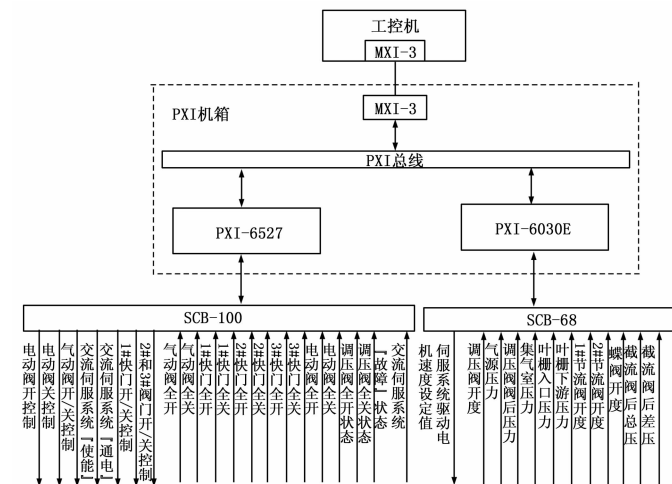


图 2 控制系统总体组成

2 叶栅风洞控制策略

叶栅风洞试验运行方式包括降压试验、常压试验和增压试验, 每种试验类型又包括不种马赫数试验要求。

降压运行方式是指利用引射器的抽气能力降低风洞排气背压的试验方式。降压运行方式可以在相同的马赫数下, 达到较常压试验低的雷诺数。降压试验时, 引射器投入工作, 1#手动节流阀和叶栅下游蝶阀开度手动预置, 由控制系统自动调节调压阀开度对调压阀后压力实施闭环控制, 由于引射器集气室压力与调压阀后压力相同, 从而实现引射器抽气能力控制。根据气动计算要求碟阀开度分别为 5°、8°、15°、20°、25°、30°、35°、40°, 1#手动节流阀开度在 40 mm 到 120 mm 范围内变化, 2#手动节流阀保持关闭。

常压运行方式是指在以环境压力作为排气背压的条件下, 依靠叶栅前总压与环境压力构成的压比建立叶栅试验所需要的流场 (或马赫数) 的试验方式。常压试验时, 引射器不工作, 叶栅下游手动蝶阀全开, 由控制系统自动调节调压阀开度对叶栅入口压力实施闭环控制。1#截流阀开度在 40 mm 到 120 mm 范围内变化, 2#手动节流阀保持关闭。

增压运行方式是指通过调整叶栅下游大口径蝶阀的开度提高风洞的排气背压, 依靠叶栅前总压与排气背压构成的压比建立叶栅试验所需要的流场 (或马赫数) 的试验方式。增压运行方式可以在相同的压比 (马赫数) 下, 达到较常压试验高的雷诺数。增压试验时引射器不工作, 叶栅下游蝶阀和 1#节流阀开度手动预置, 由控制系统自动调节调压阀开度对叶栅入口压力实施闭环控制。碟阀开度分别为 5°、8°、15°、20°、25°、30°、35°、40°, 1#截流阀开度在 40 mm 到 120 mm 范围内变化。

叶栅风洞在各运行方式下的目标压力控制是一个单输入输出控制系统, 压力控制采用 PID 控制方法。由于叶栅风洞运行方式和试验状态很多, 用一组事先整定的 PID 参数实施控制难以达到要求的控制目标。另外, 常压和增压运行方式是以叶栅入口压力为控制目标, 控制过程存在严重的滞后特性。因

此在叶栅控制过程中需要着重解决参数动态整定和滞后控制问题。

2.1 变参数和积分分离 PID 控制

传统 PID 控制器可表示为:

$$U_{(k)} = k_p e_k + k_i \sum_{j=0}^k e_j T + k_d (e_k - e_{k-1}) / T \quad (1)$$

式中, k_p 、 k_i 和 k_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数, T 为采样时间, e 为偏差^[1]。叶栅试验目标压力控制过程中只有合理地整定这 3 个参数, 才能获得比较满意的控制性能。

由于叶栅风洞气源容积有限, 试验过程中罐内会压力急速下降, 控制条件在不断发生变化, 必须采用变系数 PID 控制算法才能保证整个试验过程的控制精度。基本控制方式是: 将 k_p 、 k_i 、 k_d 取为目标值与实际值偏差 e 的函数, 根据偏差 e 的大小, 实时改变这 3 个系数, 以提高控制性能。比例系数 k_p 在偏差 e 的绝对值较小 (稳态值附近) 时取较大值, 相反时取较小值, 这样有利于加快在小误差范围内阀门调节速度, 适应容积压力迅速下降时调节阀对目标压力的调节速度和精度, 同时保证有很好的稳定性; 积分系数 k_i 在偏差 e 的绝对值较小 (稳态值附近) 时取较大值, 在偏差 e 的绝对值较大时取较小值 (或者 0), 这样既有利于保证稳态无静差, 又不会引起积分饱和而使超调增大、调节时间延长。微分系数 k_d 在偏差 e 的绝对值较小 (稳态值附近) 时取较大值, 在偏差 e 的绝对值较大时取较小值, 这样有利于加快对小偏差的反应速度, 提高控制器对干扰的灵敏度, 出现干扰时及时调节。叶栅风洞控制过程中各参数的计算方法如下^[2]:

$$\begin{aligned} k_p &= k_{p0} (1 - k'_p (1 - \exp(-\alpha e^2))) \\ k_i &= k_{i0} (1 - k'_i \exp(-\alpha \int e dt)^2) \\ k_d &= k_{d0} (1 - k'_d (1 - \exp(-\alpha e'^2))) \end{aligned} \quad (2)$$

在不同的试验状态中 k_p 、 k_i 、 k_d 随 e 的变化范围有不同的限制, 当大于这个范围时 k_p 、 k_i 、 k_d 保持不变, α 依据不同的试验工况选取不同的值。变参数 PID 控制原理图见图 3。

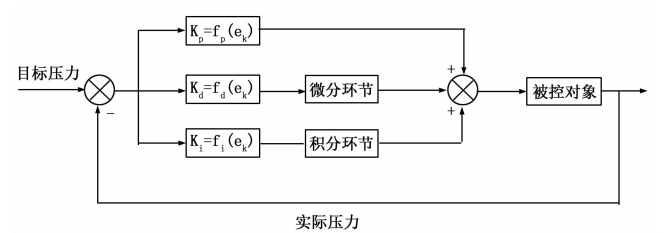


图 3 叶栅风洞变参数 PID 压力控制原理图

由于在风洞吹风试验开始和中间较大幅度调节过程中, 短时间内控制过程会出现很大的偏差, 造成 PID 运算积分的积累, 致使控制量超过执行机构可能允许的最大动作范围对应的极限控制量, 引起系统较大的超调, 甚至引起风洞压力大范围的震荡, 这是吹风试验过程绝对不允许的。因此, 在风洞控制过程进一步采用了积分分离的控制办法: 当实际压力与目标压力偏差较大时取消积分作用, 以免由于积分作用使控制过程稳定性降低; 当实际压力接近目标压力时, 引入积分控制, 从而消除静差, 提高控制精度。

在气源容积小气源压力下降快的情况下, 调压阀对目标压

力正负向误差调节能力存在差别,当实际目标压力高于目标总压时,由于气源压力在风洞运行过程中本身存在下降的趋势,目标压力下降对调压阀动作很敏感;当实际总压低于目标总压时,气源压力在风洞运行过程中本身存在下降的趋势,目标压力向上调节能力较差,因此,在目标压力控制过程中,需要根据误差范围和误差正负系数来自动适应这种调节能力的差异。具体智能调节原理主要是设置负误差调节系数:当误差为负值时,如果误差在精度范围之内控制系数取零,当误差超出精度范围后,调节系数从 0 到 1 逐步增大,但当超出某上限值调节系数直接取 1,使调节能力达到最大。

2.2 增压与常压试验中滞后控制方法

在增压和常压试验中,控制目标压力是距离调压阀较远的叶栅入口压力,从调压阀到叶栅入口需经过 1# 截流阀、扩散段、稳定段及其连接管路,因此调压阀调节和目标压力响应之间存在着明显的滞后现象,导致控制过程中管路压力振荡。

为了克服滞后现象,首先找出在不同工况下调压阀后压力和叶栅入口压力之间的对应关系,如 1# 截流阀开度为 40° 时的调压阀后压力与叶栅入口压力之间对应关系见图 4,在试验控制过程中仍然以调压阀后压力为调节目标,在调压阀后压力控制稳定以后,再根据叶栅入口压力实际值和目标值差对调压阀目标压力进行修正,直至叶栅入口压力达到控制精度。采用调压阀后压力粗调和叶栅入口压力精调结合的方法,克服滞后现象的控制原理见图 5。

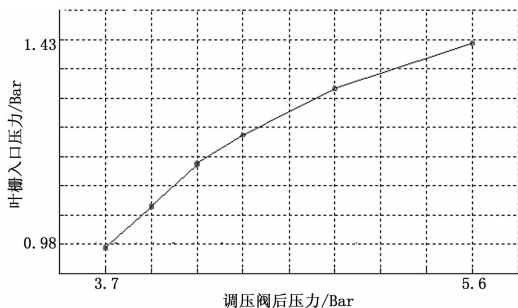


图 4 调压阀后压力与叶栅入口压力关系图

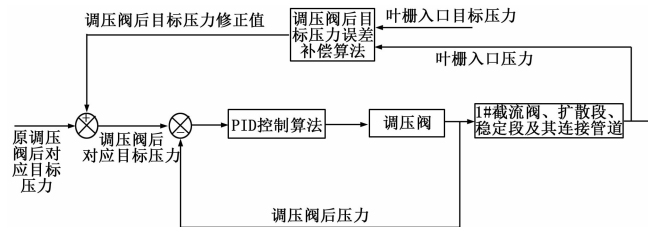


图 5 增压和常压试验中滞后控制原理图

2.3 试验结果与分析

在吹风控制调试和流场校测过程中,不断完善了控制策略和控制参数。经过分析大量的试验数据得到了不同气源压力下调压阀开度与目标压力的函数关系,在降压试验、常压试验和增压试验方式中,风洞能快速启动,并迅速建立流场。在压力控制过程中,由于控制参数不断根据风洞流场实际误差动态变化,同时根据误差正负设置调节系数,平衡了在气源压力快速

下降的过程中调压阀正负向调节能力,大大减少了目标压力波动,尽管气源压力快速下降,目标压力控制精度优于目标精度 0.5%。图 6 是在高下常压试验的控制结果,很好地反映了风洞启动过程和风洞流场控制结果。

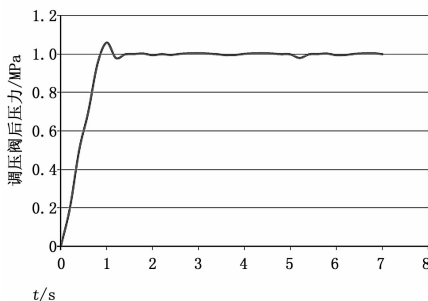


图 6 常压试验典型压力控制图

3 结论

叶栅风洞试验最终经试验调试出的数据点如图 7 所示,调试结果表明:

采用变系数和积分分离 PID 控制方法能够克服气源压力有限并且压力下降很快的问题,实现高精度压力控制;

采用以调压阀后压力为控制点,结合叶栅入口压力偏差对目标值修正的方法能够克服增压和常压试验中控制滞后问题,实现试验过程稳定性和目标控制精度要求。

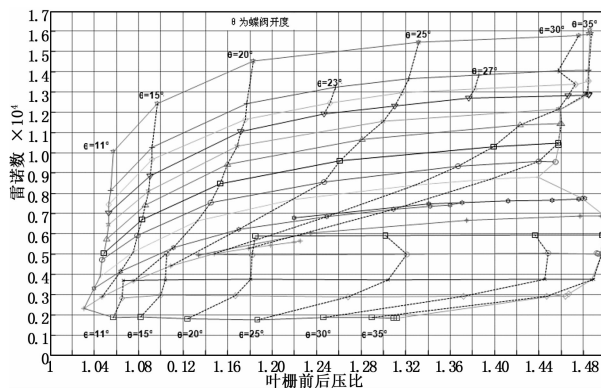


图 7 叶栅风洞调试结果图

参考文献:

- [1] 夏 极, 巫 影, 吴 峰. 柴油机变参数 PID 控制及半实物仿真研究 [J]. 船舶工程, 2006, 35 (6): 65-67.
- [2] 钟庆昌, 谢剑英, 李 辉. 变参数 PID 控制器 [J]. 信息与控制, 1999, 28 (4): 273-275.
- [3] 刘金锟. 先进 PID 控制机器 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 周海涛, 周建华, 杭小宇. 基于自适应模糊 PID 控制方法的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2014, 28 (3): 139-141.
- [5] 张 奎, 雷 勇. 无刷直流电机智能 PID 控制系统建模与仿真 [J]. 测控技术, 2015, 34 (4): 81-84.
- [6] 张玉均, 张双全, 段洪涛. 机器人全局 PID 模糊滑模跟踪控制与仿真研究 [J]. 测控技术, 2015, 34 (9): 65-68.