

doi: 10.7690/bgzd.2013.04.016

冗余技术在某风洞迎角机构控制中的应用

周波, 喻波, 周润

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 在超声速风洞中, 迎角机构必须回到模型零位后才能关车, 否则容易造成模型及天平损坏。为提高系统可靠性, 保证风洞试验安全, 设计了双 HNC100 控制器的迎角系统冗余控制结构, 着重介绍了硬件电路设计以及软件设计方法和要点, 对冗余系统做了可靠性分析, 并给出了迎角阶梯控制曲线和发生故障时副 HNC100 控制紧急回零的曲线。实际应用结果表明: 该系统控制准确、快速, 能大大提高风洞运行的安全性和可靠性, 达到了系统预期设计效果。

关键词: 超声速风洞; 迎角机构; 冗余控制; 可靠性

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Application of Redundancy Technology in Attack Angle Equipment of Wind Tunnel

Zhou Bo, Yu Bo, Zhou Run

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Attack angle equipment must be back to zero angle of attack of model before the test stopped in supersonic wind tunnel, otherwise, the model and the balance are easy to be damaged. The redundancy control system of attack angle based on double HNC100 controller is designed to improve the system reliability. Then, focus on hardware circuit designing, the software designing method and key points. Carry out reliability analysis for redundancy system. Finally, the controlled curves of attack angle ladder and emergency backing to home position curve of vice-HNC100 controller are given. The practical application result indicates that this system is accurate and fast. Operation safety and reliability of wind tunnel are improved and meet design requirement.

Key words: supersonic wind tunnel; attack angle equipment; redundancy control; reliability

0 引言

迎角机构是风洞的重要部件, 试验模型通常安装在迎角机构上, 随着迎角机构的运动来改变模型的俯仰角。在某超声速风洞中, 迎角机构采用弯刀机构, 它具有尺寸大、运动过程中惯性大等特点, 其运动的快速性和精确性要求高, 因此采用了伺服阀控制并联双油缸的液压驱动型式^[1]。

迎角机构在 2 个并联油缸的作用下, 滑块座沿圆弧导轨运动, 从而带动模型实现迎角变化。在超声速风洞中, 由于启动关车时冲击载荷大, 为防止试验模型及天平受损, 必须在迎角模型零位启动关车。同时, 为提高试验质量和效率, 要求迎角定位精度须小于 0.05° , 定位过程须平稳快速; 因此, 迎角机构控制系统必须能实现迎角的快速精确定位, 同时必须确保在紧急情况下能快速回到模型零位。德国博世力士乐公司生产的 HNC100 数字式电液轴控制器, 在恶劣的工业环境中, 具有抗干扰、抗机械振动与冲击能力强和气候不敏感性等特点, 特别适用于液压轴闭环控制的特殊需求。笔者根据迎角机构的特点和控制的需要, 选用 HNC100 3X 系列

的双轴控制器。

1 HNC100 功能介绍

HNC100 3X 系列最多可以有 4 个电液轴, 每个轴均可以独立控制。它具有丰富的外部接口, 包括 1 个 RS232 接口, 1 个 CANopen 或者 Profibus-DP 总线接口; 每个轴都包括 1 个 SSI 数字式绝对编码器或者增量编码器接口; 11 个数字 I/O 接口, 以及 2 个模拟量输入输出端口。除一个保留为系统使用外, 其余 I/O 接口均可以通过软件设置为输入或者输出端口。每个轴还各提供了 32 个虚拟输入输出, 供编程时使用。

WINPED 软件是 HNC100 控制器的参数设置及编程环境软件。在 WINPED 中, 不仅可以完成参数设置、编写程序等功能, 还可以查看系统错误状态, 帮助快速查找分析问题, 并且错误信号可通过分配好的端口输出, 供其他系统检测使用。

HNC100 3X 系列每个轴可以编写一个 NC 程序, 用于该轴相关的控制和输入输出, 另外还可以有一个辅助 NC 程序。NC 程序采用 HNC 语言, 它提供了很多指令, 用于相关控制。用户调用这些指

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-11-17

作者简介: 周波(1981—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事风洞测控技术研究与应用研究。

令, 可以使得控制编程变得相当简单。

2 系统硬件设计

在非试验状态, 通过控制权切换, 2 个 HNC100 控制器均能单独控制迎角机构动作; 在试验过程中, 由主 HNC100 控制迎角机构按下达指令动作, 副 HNC100 负责监视系统状态。当副 HNC100 检测到主 HNC100 故障, 则由副 HNC100 控制器接管控制权, 完成迎角机构快速回零。按照此要求设计的迎角控制系统硬件原理图如图 1 所示。

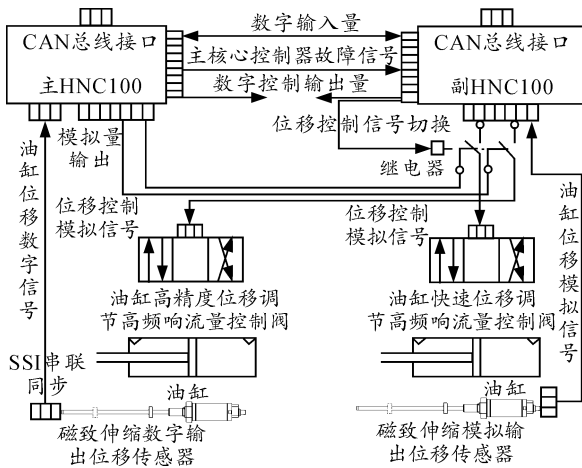


图 1 迎角机构控制系统原理

迎角机构采用双油缸并联推动, 每个油缸各有一个位移传感器。油缸流量通过 2 个并联的高频响阀——油缸高精度位移调节高频响流量控制阀和油缸快速位移调节高频响流量控制阀控制。当迎角机构进行精确定位时, 采用高精度位移高频响流量阀控制, 此时油缸快速位移调节高频响阀输出为零; 当迎角机构快速回零时, 双阀并联输出, 以提供更大的流量使迎角快速回到零位。

执行主副 HNC100 控制权切换时, 是通过一个继电器来接通高频响阀控制端到相应的 HNC100 模拟输出端口完成的, 同时, 数字量输入信号分别进入主副 HNC100。主 HNC100 的故障信号输出接入副 HNC100 的数字量输入端口, 用于监测主 HNC100 控制器状态。将紧急回零按钮信号分别接入主副 HNC100 的数字量输入, 以保证在紧急情况下可以由操作者通过硬件发送紧急回零指令。

主副 HNC100 都是通过 CAN 总线接口与上位机通讯, 接收来自上位机的命令, 并向上位机上传控制器状态、油缸位移值等信息。

3 系统软件设计

根据 HNC100 双轴控制器的特点, 可以对轴 1、

轴 2 以及辅助轴分别编写程序, 完成不同的功能。

主 HNC100 轴 1 负责迎角机构的高精度定位控制, 轴 2 负责在紧急回零时启动双阀并联控制, 辅助轴负责 HNC 控制器状态输出、锁控阀的操作等。

副 HNC100 在试验过程中负责监视系统工作状态, 同时, 在非试验时可以完成与主 HNC100 相同的功能。

副 HNC100 的轴 2 和辅助轴的 NC 程序功能与主 HNC100 轴 2 和辅助轴的功能相同。冗余控制功能的实现主要是轴 1 的软件不同。

副 HNC100 轴 1 的软件流程如图 2 所示。

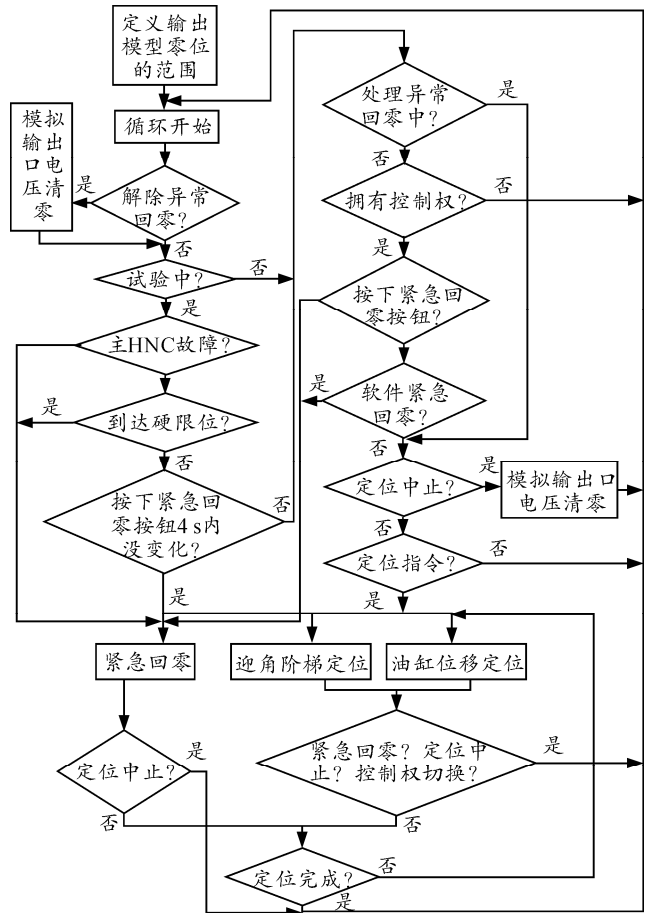


图 2 副 HNC 轴 1 软件流程

与主 HNC100 轴 1 的 NC 程序不同的是, 在试验过程中副 HNC100 虽然没有控制权, 但是它实时地监测主 HNC100 的故障信号, 如果这个信号有效, 则副 HNC100 自动接管控制权, 并执行紧急回零操作; 如果按下紧急回零按钮, 4 s 内油缸位移值没有变化, 则也认为主 HNC100 故障, 由副 HNC100 接管控制权并执行紧急回零。

在非试验时, 主副 HNC100 均能完成迎角定位及快速回零功能, 但它们的程序设计并不完全相同,

需考虑到二者的冗余控制功能。

在主 HNC100 的程序中，设置了软限位，它和限位开关组成双重保护功能，防止迎角机构失控造成危险。当迎角超过软限位，迎角机构停止运动，同时主 HNC100 通过设置好的 I/O 端口输出控制器故障信号。当迎角碰上限位开关，也是迎角停止运动。而副 HNC100 不能设置软限位，在非试验时不对限位开关信号做处理。这是因为一旦迎角超限位，主 HNC100 不能控制迎角机构运动，此时必须将控制权切换到副 HNC100，控制迎角机构回到正常运动范围内。

试验时，副 HNC100 的主要功能是监视主 HNC100 的状态，当主 HNC100 发生故障，自动接管控制权并执行迎角回零操作，而不是继续按照上位机指令完成试验过程。这是考虑到必须保证迎角机构回零，风洞才能关车。如果继续试验，一旦副 HNC100 故障，将造成不能回零关车的严重后果。

4 可靠性分析

如上所述，为保证风洞在迎角控制器发生故障时，迎角机构也能回到模型零位后关车，设计了处理器硬件冗余的控制方式。根据可靠性理论，对主 HNC 进行可靠性分析。

考虑到电子产品的寿命大致服从指数分布^[2]，设 x 为主控制器能正常工作的期限， x 服从参数为 λ 的指数分布，其分布密度函数为

$$f_m(t) = \lambda e^{-\lambda t} (t > 0) \tag{1}$$

则分布函数

$$F_m(t) = \int_0^{\infty} f_m(t) dt = 1 - e^{-\lambda t} (t > 0) \tag{2}$$

可靠度函数为

$$R_m(t) = 1 - F_m(t) \tag{3}$$

设 λ_m 为主 HNC 的失效率，根据定义

$$\lambda_m = \frac{f_m(t)}{R_m(t)} = \lambda \tag{4}$$

则主 HNC 的平均无故障时间：

$$MTBF_m = \int_0^{\infty} t f_m(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda_m} \tag{5}$$

副 HNC 的平均无故障时间为：

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda_s} \tag{6}$$

由于主副 HNC 是并联结构，可以看作相互独立的事件，则冗余系统的可靠度

$$R(t) = 1 - (1 - R_m(t))(1 - R_s(t)) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \tag{7}$$

冗余系统的平均无故障时间：

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{3}{2\lambda_m} \tag{8}$$

即采用处理器冗余控制结构后，系统平均无故障时间是单控制器时的 1.5 倍。

5 系统运行结果

图 3 是实际的迎角阶梯控制曲线。迎角从 $-15^\circ \sim 27^\circ$ ，每 3° 一个阶梯，所有阶梯完成后迎角机构快速回到模型零位。

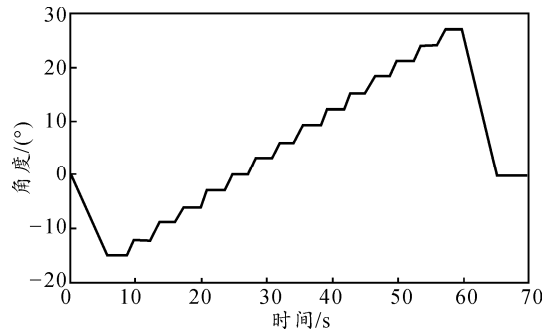


图 3 迎角角度曲线

从图 3 可以看出，迎角系统运行平稳、可靠，定位准确、快速、无超调，控制精度达 0.01° 。

采用模拟开车的方式，检验试验过程中的冗余控制功能，结果如表 1 所示。

表 1 冗余控制功能验证结果

故障	结果
迎角超软限位	主 HNC100 报故障，自动切换到副 HNC100 回零后关车
迎角撞上限位开关	自动切换到副 HNC100 回零后关车
CAN 通讯故障	主 HNC100 报故障，自动切换到副 HNC100 回零后关车

结果表明：试验过程中如果出现紧急情况或者主 HNC100 发出故障，迎角控制系统都能控制迎角机构回到零位再关车，确保了试验安全，冗余控制功能得到验证。

图 4 是试验条件相同，在试验过程中主 HNC100 发生故障后的迎角阶梯控制曲线。

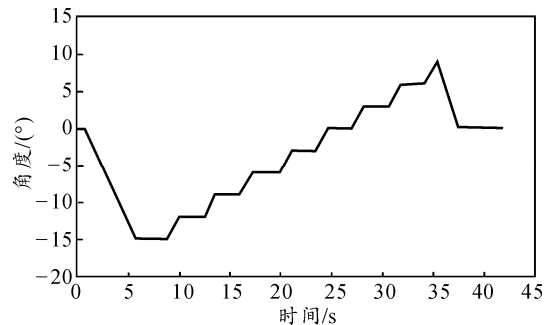


图 4 迎角紧急回零角度曲线