

doi: 10.7690/bgzd.2020.08.009

某高超声速风洞攻角机构控制系统

郑国良¹, 张德炜², 武艺泳¹, 杨洪涛¹, 游广飞¹, 张磊乐¹

(1. 郑州机械研究所有限公司智能装备事业部, 郑州 450052;

2. 中国空气动力研究与发展中心高超声速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决某高超声速风洞攻角机构存在的传动结构复杂、负载大和精度要求高等问题, 设计了以 EtherCAT 为总线的控制系统方案。根据攻角机构的控制系统需求, 选用 BECKHOFF 产品构建攻角机构机电液一体化的控制系统架构, 分别采用 TwinCAT 和 C# 语言开发控制系统下位机 PLC 和上位机 HMI 软件, 采用 ADS 通信协议实现 HMI 与 PLC 程序的通信, 并用 OPC UA 通信协议实现攻角机构运行数据与风洞运行系统的数据交互。结果表明: 该系统满足攻角机构控制需求, 能够解决攻角机构的信息孤岛问题, 提高风洞系统的信息化和智能化水平。

关键词: 攻角机构; 控制系统; EtherCAT; TwinCAT; OPC UA

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

Attack Angle Mechanism Control System of Certain Type Hypersonic Wind Tunnel

Zheng Guoliang¹, Zhang Dewei², Wu Yiyong¹, Yang Hongtao¹, You Guangfei¹, Zhang Leile¹

(1. Intelligent Equipment Division, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

2. High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamic Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve these problems of complex transmission structure, large load and high accuracy requirements of certain type hypersonic wind tunnel attack angle mechanism, a control system scheme using EtherCAT as a bus was designed. According to the control system requirements of the attack angle mechanism, BECKHOFF products are used to build the electromechanical-hydraulic integrated control system architecture of the attack angle mechanism. TwinCAT and C# languages are used to develop the control system PLC and upper computer HMI software, and the ADS communication protocol is used to realize HMI and PLC program communication, and use the OPC UA communication protocol to realize the data interaction between the attack angle mechanism operation data and the wind tunnel operation system. The results show that the system meets the control requirements of the attack angle mechanism, and it can solve the problem of information islands of the attack angle mechanism, and improves the information and intelligence level of the wind tunnel system.

Keywords: attack angle mechanism; control system; EtherCAT; TwinCAT; OPC UA

0 引言

高超声速风洞是研究高超声速武器空气动力学的重要实验设施^[1]。攻角机构就是高超声速风洞中十分重要的配套设备之一^[2], 其运行指标直接关系到风洞实验的成功。攻角机构在高超声速风洞实验过程中主要承担着实验模型在流场中位置和姿态的变换任务^[3]。随着高超声速风洞实验能力的加强, 对攻角机构的运行速度、定位精度等技术指标也提出了新的要求。攻角机构控制系统作为攻角机构的控制中枢, 其性能指标、可扩展性、故障诊断能力等决定了攻角机构系统的整体表现。攻角机构控制系统的发展紧跟工业控制系统特别是运动控制系统的发展步伐, 先后经历了基于运动控制板卡的集中控

制阶段、基于传统现场总线的分布式控制阶段及目前基于高性能软 PLC 和实时工业以太网现场总线的新阶段。如何根据攻角机构自身特点和需求, 选择最优的控制系统方案, 是攻角机构控制系统设计面临的主要问题。近年来, 风洞系统信息化和智能化建设不断推进, 作为风洞重点配套装备的攻角机构也需要在此方面做出突破, 解决攻角机构控制系统长期存在的信息孤岛问题, 实现与风洞运行系统的互操作。

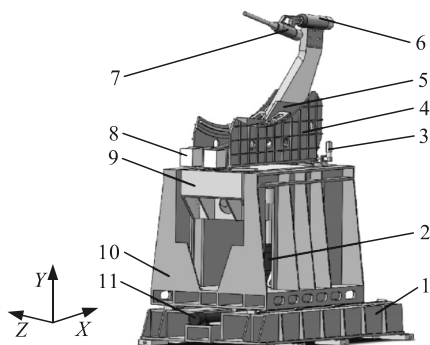
1 攻角机构整体方案

某高超声速风洞攻角机构的总体机械结构如图 1 所示。攻角机构共有 6 个自由度, 从下而上成塔式结构, 分别为 X、Y、Alpha、Beta、Gamma1 和

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-08

作者简介: 郑国良(1986—), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 从事复杂机电系统控制与自动化系统集成研究。E-mail: zhenggl163@163.com。

Gamma2。其中 X 和 Y 直线自由度由于负载较大，采用伺服驱动无法满足运动速度要求；因此，选用液压驱动方式。Alpha 和 Beta 旋转自由度分别实现俯仰和偏转，同样是负载大的原因并需兼顾定位精度要求，采用了直线驱动圆弧的伺服驱动机构。Alpha 由 2 个呈镜像分布的丝杠螺母同步驱动，Gamma1 用于实现实验模型的滚转，Gamma2 用于实现对实验模型偏航角度的扩展。



1. X 向底座；2. Y 向驱动油缸；3. 偏航驱动电机；4. 偏航移动体；5. 俯仰移动体；6. 滚转 1 机构；7. 滚转 2 机构；8. 俯仰驱动电机；9. Y 向移动体；10. X 向移动体；11. X 向驱动油缸。

图 1 攻角机构总体方案

2 EtherCAT 总线

EtherCAT 是基于修改的以太网帧技术的代表

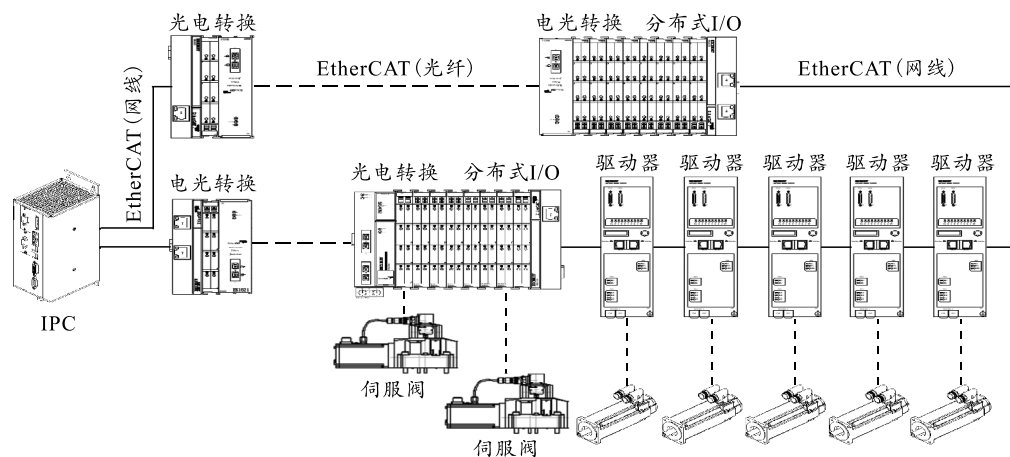


图 2 控制系统总体结构

控制系统在 IPC 内同时运行 TwinCAT 和上位机应用程序，集 PLC 和上位机功能于一身，实现了显控一体。上位机程序可本地直接与 PLC 程序通信，使控制系统整体结构更为紧凑。

在控制系统 TwinCAT 软件内直接集成伺服轴和液压轴控制功能，实现逻辑控制与运动控制的单平台控制，无需额外的运动控制硬件，避免了不同品牌产品之间的兼容性问题，同时降低了系统复杂程度。伺服驱动选用 BECKHOFF 公司 AX5000 系

性协议，因其具有卓越的实时性能和灵活的拓扑结构，应用领域不断扩大。EtherCAT 将标准以太网帧修改为 0x88A4 类型数据帧^[4]，将所有从站周期性交互数据集成到一个报文里^[5]。EtherCAT 数据帧传输采用独特的“on the fly”机制，主站发送的报文依次通过各个从站，再经过每个从站时各从站寻址到属于该节点的数据读取和插入，极大地提高了数据的传输速率。此外，EtherCAT 协议足够开放，用户使用无需额外配置，系统实施简单；因此，已经逐渐成为工业控制领域发展的主流^[6]。基于 EtherCAT 的上述优点，笔者设计了某高超声速风洞攻角机构控制系统。

3 控制系统设计与选型

基于 EtherCAT 总线的某高超声速风洞攻角机构控制系统的总体结构如图 2 所示。

控制系统以 IPC 为主站，从站包括总线耦合器、远程 I/O 和伺服驱动器等。为解决上位机到现场控制柜超远距离通信的问题，采用光纤作为 EtherCAT 总线的传输介质。图 2 中虚线部分表示 EtherCAT 总线的光纤介质。选用 EK1100、Ek1521、EK1110 和 EK1501 4 种总线耦合器实现了电—光和光—电的互相转换，并构成了闭环拓扑结构。

列伺服驱动器，驱动器之间的同步通过 EtherCAT 总线的分布时钟实现。液压控制回路外部硬件只需选用 EL4124 通用模拟量输出模块。液压缸的磁致伸缩传感器通过 EL5001 SSI 接口模块接入 PLC。

4 控制系统软件

控制系统软件分为下位机和上位机软件。下位机软件采用 TwinCAT 软件编写，上位机程序基于微软 .NET 平台采用 C# 语言开发。控制系统软件结构

如图 3 所示。

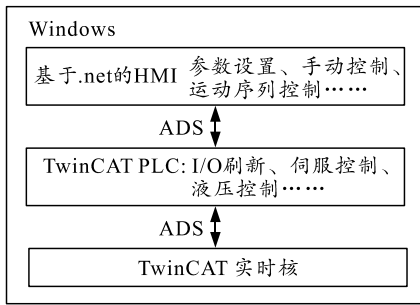


图 3 控制系统软件结构

4.1 下位机软件

下位机软件用于实现对控制系统 I/O 和伺服驱动器的实时控制，主要功能划分为安全保护、伺服与液压控制、运动序列控制等。

4.1.1 安全保护

安全检测程序实时检测系统内的限位保护开关、液压油压力和温度、机构各自由度运动速度和当前位置等，经安全逻辑运算后在危险逻辑中直接控制各轴的停止、电源的关闭、液压阀门的闭合。其中限位保护功能关系到攻角机构运动中的安全，其执行逻辑如图 4 所示。程序检测到限位信号同时触发紧急停车和危险计时功能，若在规定时间内未完成停车，则直接将相应轴的使能去掉，起最根本的保护作用。

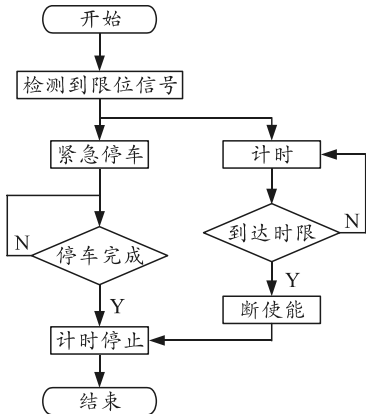


图 4 限位安全保护逻辑

4.1.2 伺服与液压控制

伺服与液压运动控制程序调用 TcMC2 伺服运动库和 TcPlcLibHydraulics 液压库，上述 2 个功能库均遵循 IEC61131-3 标准；因此，在 TwinCAT 内液压轴与伺服轴的控制方法相同。伺服与液压控制程序包括图 5 所示的运动功能块，主要功能包括使能控制、绝对定位、轴停止、电子齿轮耦合、电子齿轮解耦、轴点动和轴复位等。

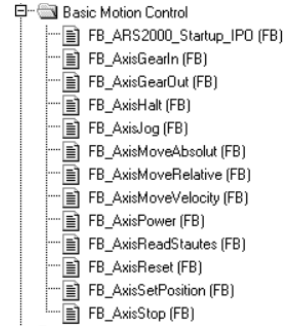


图 5 伺服轴 PLC 控制模块

4.1.3 运动序列控制

运动序列控制程序是实现各自由度按照既定的序列完成定位运动，具体的程序流程如图 6 所示。

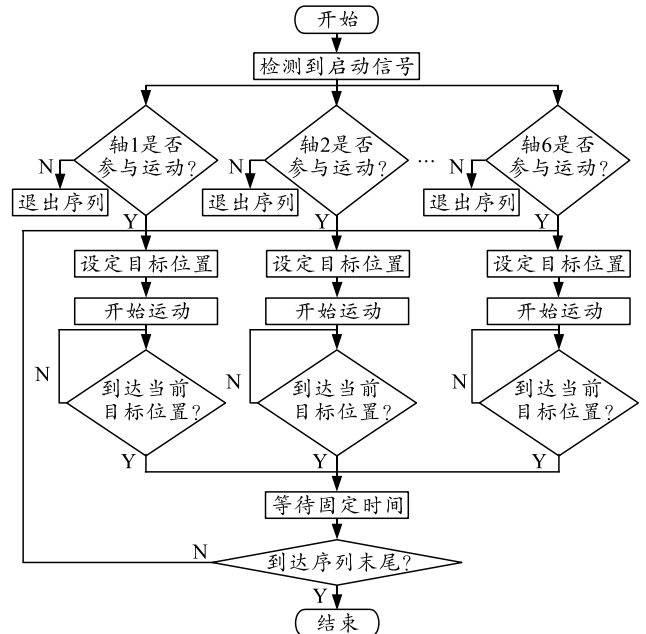


图 6 运动序列流程

检测到启动信号后，根据给定的运动序列判断各轴是否参与此次序列运动，对参与运动的轴设定其目标位置。开始运动后，不断检测各个轴是否到达当前目标位置，直至各轴均到达指定位置后进入等待环节。待达到等待时限后，判断运动序列是否结束，若没有结束则再次设定各参与运动轴的目标位置进入新一轮的运动环节，若序列结束则直接退出。

4.2 上位机软件

上位机 HMI 程序用于人机交互以实现系统的非实时控制，主要功能有系统参数设置、各自由度手动控制、运动序列编辑与控制等。

4.2.1 系统参数设置

系统参数设置程序用于对攻角机构系统的重要

参数进行查看和设置，参数主要包括各自由度的回程间隙、位置极限、速度上限、默认运动速度和零点偏移量等。系统参数设置程序为系统的运行和调试提供了极大的便利。程序界面如图 7 所示。

	X	Y	α	β	$\gamma 1$	$\gamma 2$
回程间隙	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
位置上限	0	100	30	8	360	360
位置下限	1400	-1400	-15	-8	-360	-360
速度上限	100	400	8	4	60	60
默认速度	80	200	4	2	30	30
默认加速度	500	500	6	3	50	50
默认减速度	500	500	6	3	50	50
默认加速度...	1000	1000	9	5	70	70
零点偏移量	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
定位误差	0.1	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01

图 7 参数设置界面

4.2.2 手动控制

手动控制程序用于调试和配合风洞实验前实验模型的安装与调整，主要功能为各轴的运动状态和液压站状态参数的显示、各轴手动定位和液压站系统的控制。程序界面如图 8 所示。

轴	反馈位置	当前位置	当前速度	限位	限位	限位
X	100.5	0.00	0	1400		
Y	-200.5	0.00	-1400	100		
α	-5	0.00	-15	30		
β	2	0.00	-8	8		
$\gamma 1$	65	0.00	-360	360		
$\gamma 2$	-120	0.00	-360	360		

图 8 手动控制界面

4.2.3 运动序列编辑与控制

运动序列编辑程序用于生成运动序列，可根据具体情况选择本次序列需要参加的自由度。程序可实现运动序列的添加、删除插入、参数编辑、保存和读取等功能。

采用 OpenFileDialog 获取程序文件路径，通过 File 类的 ReadAllLines 方法读取所有数据。写入文件采用 StreamWriter 类的 Write 方法。运动序列编辑程序界面如图 9 所示。程序内姿态参数均设计为模型坐标系下的参数，设置完毕后需转换到机构坐标系内，得到对应的攻角机构各自由度运动参数。

序号	FX	FY	FA	FB	FG	停留时间 (秒)
1	0.00	0.00	5	2	30	3.0
2	0.00	0.00	10	4	60	3.0
3	0.00	0.00	15	6	90	3.0
4	0.00	0.00	20	8	120	3.0
5	0.00	0.00	25	6	150	3.0
6	0.00	0.00	20	4	180	3.0
7	0.00	0.00	15	2	150	3.0
8	0.00	0.00	10	0	120	3.0
9	0.00	0.00	5	-2	90	3.0
10	0.00	0.00	0	-4	60	3.0
11	0.00	0.00	-5	-6	30	3.0
12	0.00	0.00	-10	-8	0	3.0
13	0.00	0.00	-15	-6	-30	3.0

图 9 序列编辑界面

运动序列控制程序是在运动序列编辑完成或加载后控制攻角机构完成序列运动的程序。如图 10 所示，其界面内容丰富，基本包括攻角机构各个环节的状态信息，同时能够鲜明指示序列的执行进度。另一个功能是记录序列的完成情况，以及各步骤完成后各轴的位置和等待时间，做到攻角机构运动数据可溯源。

轴	反馈位置	当前位置	当前速度	限位	限位	限位
X	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
α	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
β	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\gamma 1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\gamma 2$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

图 10 运动序列控制程序界面

4.3 上位机和下位机 ADS 通信

ADS 协议以 TCP/IP 为基础，既可实现 TwinCAT 内部与接入系统的设备通信，又可实现 TwinCAT 外部与其他应用程序的通信^[7]。

Net 平台内实现 ADS 通信，首先引用 TwinCAT.Ads.dll 文件，然后通过实例化 TcAdsClient 类实现对通信的管理。详细通信流程如图 11 所示：调用 Connect 方法实现通信连接，调用 CreateVariableHandle 方法创建变量句柄，调用 ReadAny 方法读取变量或者 WriteAny 方法写入变量，调用 Close 方法关闭通信连接。

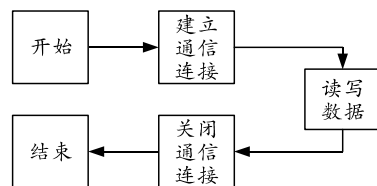


图 11 ADS 通信流程

5 基于 OPC UA 的互操作

OPC UA 由 OPC 技术发展而来,是一套安全可靠且独立于制造商的通用数据交互规范^[8],为应用程序和硬件设备提供了互操作、可扩展、高性能的通信模式^[9]。目前主流的自动化厂商、通信公司、协会组织、全球主要的现场总线基金会均支持与 OPC UA 的融合与开发工作^[10]。

如图 12 所示,基于 OPC UA 实现了某高超声速风洞攻角机构与风洞运行系统的通信,其中攻角机构作为 OPC UA 服务器,风洞运行系统作为客户端。通信数据包括各轴的状态信息、液压站状态信息和运动序列控制数据等。在 TwinCAT 内实现 OPC UA 服务器变量发布只需在变量定义时加入“(*~(OPC:1:some description) *)”标记即可。

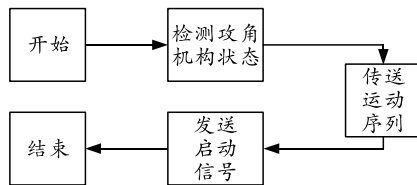


图 12 风洞运行系统控制攻角机构流程

风洞运行系统在实验准备阶段,检查攻角机构状态,若状态正常,则将实验的运动序列参数传输给攻角机构。风洞运行系统向攻角机构发送启动信号,攻角机构按设定的序列进行定位。实验中风洞系统可向攻角机构发送停止命令,攻角机构按照预定程序将模型退出流场,起到保护实验模型的作用。若攻角机构发生异常,风洞运行系统可检测到错误信息,从而停止实验。风洞运行系统通过 OPC UA 在实验中直接控制攻角机构,避免了人为操作失误。基于 OPC UA 通信真正实现了攻角机构与风洞运行系统的互操作。

6 结论

针对某高超声速风洞攻角机构机电液一体化的控制需求,基于 EtherCAT 设计了攻角机构控制系统,选用 BECKHOFF 公司的产品作为控制系统硬

件和软件,单平台解决了控制系统的各种需求,降低了系统的复杂程度。采用 TwinCAT 编写了下位机 PLC 软件,基于 .net 平台和 C# 语言实现了上位机程序的开发。设计并开发了基于 OPC UA 的与风洞运行系统的通信协议和应用程序,实现了与风洞运行系统的互操作,提高了风洞运行的信息化和智能化水平,同时也为风洞系统内其他设备的控制系统设计或升级改造提供了借鉴。该高超声速风洞攻角机构控制系统已在风洞实验中正常运行,并参与了多种型号的风洞实验。实验结果表明,该控制系统完全满足风洞试验对攻角机构控制系统高精度、高可靠性的要求。

参考文献:

- [1] 唐志共,许晓斌,杨彦广,等.高超声速风洞气动力试验技术进展[J].航空学报,2015,36(1):86-97.
- [2] 顾炳永,李博,刘荣丰.国外高超声速飞行器目标特性研究进展[J].飞航导弹,2014(5):72-77.
- [3] 战培国.大型跨声速风洞配套试验技术研究[J].飞航导弹,2019(11):48-51.
- [4] 李晓松,朱新勃,蔡艳芳.基于 EtherCAT 的导弹发射车控制系统设计与实现[J].火箭与制导学报,2019,39(4):155-159.
- [5] 邱爱华,张涛,顾逸东.航天器可应用实时以太网分析[J].空间科学学报,2015,35(3):368-380.
- [6] 刘剑锋,贾春叶,赵春海,等.基于 DSP 的导弹发射车 EtherCAT 从站接口单元设计[J].兵器装备工程学报,2019,40(9):125-129.
- [7] 朱顾飞,吴太龙,张晓强,等.基于激光雷达的机器人定位及抓取系统设计[J].四川兵工学报,2014,35(9):123-126.
- [8] 蒋捷峰,胡瑞飞,殷鸣,等.智能制造数字化车间信息模型[J].兵工自动化,2019,38(6):70-74.
- [9] 邱枫,刘治红,王胜,等.智能制造单元级智能监控技术研究及应用[J].兵工自动化,2019,38(12):31-37.
- [10] 李锋,张坤,原丽娜.基于 OPC UA 的纺织智能染整车间信息模型研究与实现[J].纺织学报,2020,41(2):149-154.