

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.11.018

## 基于 XFC 极速控制技术的 CTS 运动控制系统

黎壮声, 杜立强, 王生利, 刘晓波

(中国空气动力研究与发展中心设计所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对传统风洞捕获轨迹试验 (captive trajectory simulation, CTS) 运动控制系统无法满足某新型风洞进行型号试验的需要, 从硬件和软件 2 个方面详细介绍了一种基于极速控制技术 (extremely fast control, XFC) 的 CTS 运动控制系统。将基于 PC 的运动控制方式、嵌入式 PC 机、带 EtherCAT 实时以太网的伺服驱动器和快速 I/O 端子应用于 CTS 控制系统中, 应用 TwinCAT 自动化软件开发运动控制程序, 实现了 CTS 的位置控制和连续速度控制功能。风洞调试结果表明: 该系统具有软硬件结构简单、动态响应性能好、天平信号受干扰小的特点。

**关键词:** 轨迹捕获; 极速控制; 运动控制

**中图分类号:** TJ765.2 **文献标志码:** A

## CTS Kinetic Control System Based on XFC Need for Speed Control Technique

Li Zhuangsheng, Du Liqiang, Wang Shengli, Liu Xiaobo

(Facility Design Institute, China Aerodynamic Research &amp; Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at tradition wind tunnel captive trajectory simulation (CTS) motion control system can't meet certain new wind tunnel needs process testing, this paper introduces a CTS motion control system based on the extremely fast control (XFC) technology from two side of hardware and software. CTS position control and continuous speed control capabilities are obtained by applying the PC-Based motion control method, a kind of embedded PC, servo controllers with real-time EtherCAT Ethernet and fast I/O module into the CTS control system and developing a set of motion control procedure using the TwinCAT automation software. The wind tunnel calibration results show that this system is characterized by simple software and hardware structure, good dynamic response performance and small balance interference signal.

**Keywords:** CTS; XFC; motion control

### 0 引言

捕获轨迹试验 (captive trajectory simulation, CTS) 设备为 6 轴联动机构, 装备于风洞中, 用来预测副油箱、炸弹、导弹等外挂物从其母机上分离的轨迹特性, 以达到评估外挂物分离对母机飞行安全性影响的目的<sup>[1]</sup>。

现有风洞的 CTS 运动控制系统一般采用 VXI 控制器 (或 PC) 加运动控制卡作为上位控制的方案, 主要由 VXI 控制器 (或 PC)、多轴运动控制卡、交流伺服系统、天平信号放大器、远程滤波器、二级放大器、I/O 板卡、手操器等组成。控制设备安装在 2 个控制柜内, 柜子之间通过可插拔电缆连接。控制器安装 VxWorks、RT-Linux 等实时操作系统, 控制程序和轴运动控制卡驱动程序都基于实时操作系统开发<sup>[2]</sup>。极速控制技术 (extremely fast control, XFC) 是德国倍福提出的一种速度极快且时间确定性极高的控制技术<sup>[3]</sup>, 它基于高效的控制和通讯架构, 包括高性能工业 PC/嵌入式 PC、带有实时特性的高速 I/O 端子模块、EtherCAT 高速工业以太网、

EtherCAT 作为驱动总线的伺服驱动器和 TwinCAT 自动化软件。

为了便于试验前后移动 CTS 控制设备、减少软件开发工作量、降低天平信号的干扰, 以满足某新型风洞进行型号试验的需要, 笔者设计了基于 XFC 的 CTS 运动控制系统。系统采用基于 PC 的运动控制方式, 伺服采用总线驱动, 天平信号本地采集和数字化传输, 碰地检测电路使机构通过低阻抗电阻接地而非完全浮地, 克服了 CTS 控制系统的不足。

### 1 XFC 技术简介

基于 XFC 技术的运动控制系统为完全基于 PC 的运动控制系统, 它仅使用 PC 中的 CPU 而不借助外部的控制器来控制伺服驱动器, 即通过 SOFT PLC 和 SOFT MOTION 来实现将伺服和 PLC 集成, PC 中的 CPU 处理所有运动控制的信号和运算<sup>[4]</sup>。

作为 XFC 的核心组件, EtherCAT 具有通信速度快、实时性强、拓扑结构灵活等优点, 可同时用于驱动应用和高速 I/O 信号。它与 100 个伺服轴的通讯只需 100  $\mu\text{s}$ , 就可向所有轴提供设置值和控制

收稿日期: 2011-07-05; 修回日期: 2011-08-03

作者简介: 黎壮声 (1975—), 男, 广西人, 硕士, 工程师, 从事风洞自动化控制系统研究。

数据, 并报告它们实际位置和状态<sup>[5]</sup>。因此, 适合应用于对实时性和同步性要求较高的运动控制系统。

### 2 CTS 运动控制原理

CTS 运动控制系统通过对外挂物模型气动载荷

的实时测量、运动方程的求解及对外挂物运动的闭环控制, 来实现外挂物分离轨迹特性的模拟。

如图 1, CTS 运动控制原理为基于 PC 的运动控制方式, PLC 和 NC 轴为在 PC 内实现的软方式。

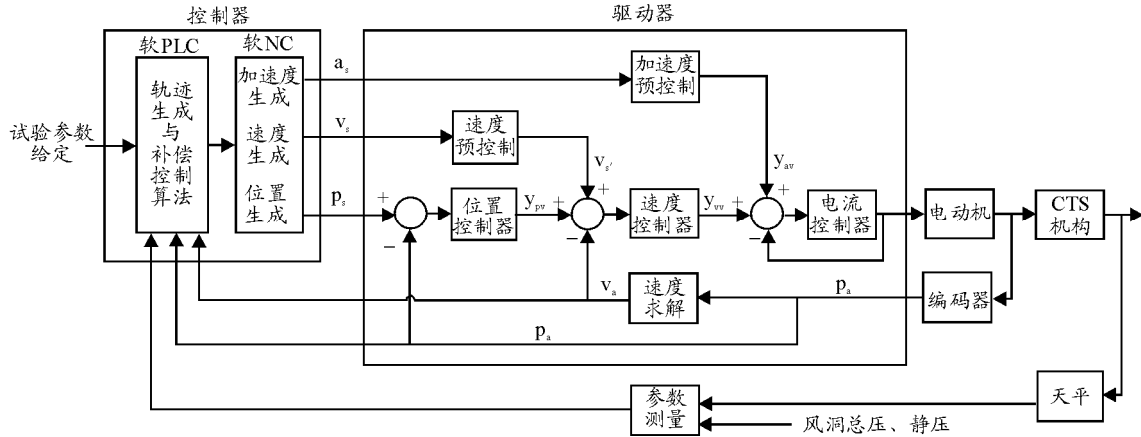


图 1 CTS 运动控制原理图

轨迹生成与补偿控制算法根据给定的轨迹常数、轨迹方程等试验参数, 和天平力、机构位置、机构运动速度等实时轨迹参数进行轨迹生成, 计算出下一个步各轴的位置和速度; NC 进行加速度、速度和位置生成; 驱动器控制各轴伺服电机运动, 进而带动六自由度机构做协调联动。若轨迹生成算法是基于位置参考的, 该控制就是逐点的位置控制;

若轨迹生成算法是基于速度参考的, 该控制就是连续的速度控制。

### 3 控制系统组成

CTS 控制系统由基于 XFC 技术的嵌入式 PC 机、监控 PC 机、伺服系统、I/O 端子、信号放大器、阈值电路、手操器等组成, 如图 2。

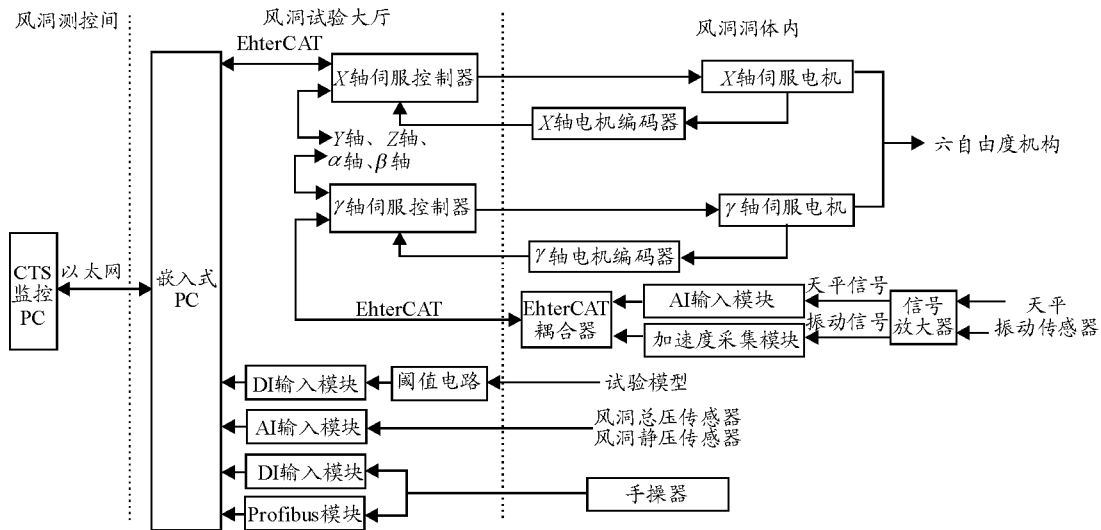


图 2 CTS 控制系统组成图

系统采用基于 PC 的多轴运动控制方式, EtherCAT 同时用于驱动应用和 I/O 信号传输。CTS 监控 PC 机安放在风洞测控间, 通过以太网与 CTS 核心控制器—嵌入式 PC 相连; 嵌入式 PC、本地 I/O 模块、伺服驱动器、阈值电路安装在一个控制柜内, 控制柜安放在测控大厅, 风洞洞体外; 伺服电机、信号放大器、远程 I/O 模块和 EtherCAT 耦合器安

装在 CTS 机构上; 手操器用于风洞洞体内调试系统。

#### 3.1 核心控制器

CTS 控制系统采用嵌入式 PC 作为核心控制机, 通过 EtherCAT 连接 6 个伺服驱动器和 1 个远程 I/O 子站, 接线方式为菊花链拓扑, 主要负责运动方程

的运算求解, NC 轴加速度、速度和位置生成, 向伺服驱动器发布控制命令和参数, 实现 I/O 数据采集等; 同时, 响应 CTS 监控 PC 机下发的命令, 并且把现场状态和数据传送到 CTS 监控 PC 机。

嵌入式 PC 控制器选用倍福 CX1030, 时钟频率为 1.8 GHz, 安装嵌入式 Windows XP 操作系统和 TwinCAT NC Run-time 系统。

CX1030 为模块化安装于 DIN 导轨上的工业型 PC, 可以和 I/O 模块一起安装, 结合了工业 PC 运行速度快、接口方便和硬件 PLC 可靠性高、稳定性好的优点, 柜内接线方便。

CX1030 自带的 2 个以太网接口, 一个用于与 CTS 监控 PC 机通信, 运行 TCP/IP 协议; 另一个用于与伺服驱动器和远程 I/O 通信, 运行 EtherCAT 协议。

### 3.2 交流伺服系统

交流伺服系统由伺服驱动器、交流伺服电机、编码器等组成, 用来驱动 CTS 机构的 6 个轴: 纵向位移  $X$  轴、横向位移  $Y$  轴、垂向位移  $Z$  轴、俯仰角  $\alpha$  轴、偏航角  $\beta$  轴和滚转角  $\gamma$  轴。

选用倍福 AX5000 系列单通道交流伺服驱动器。AX5000 伺服驱动器采用 EtherCAT 作为驱动总线, 支持高速及高动态性任务, 电流控制环、速度控制环、位置控制环最快可分别达  $31.25 \mu\text{s}$ 、 $62.5 \mu\text{s}$  和  $125 \mu\text{s}$ 。

$X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  轴选用倍福 AM3000 系列永磁同步伺服电动机, 带 2 048 线/4 096 圈、EnDAT 接口的绝对值多圈编码器。

$\gamma$  轴选用力士乐 IndraDyn T 系列套装型大扭矩中空直驱电机, 型号 MST130-E-0020, 额定扭矩  $42 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 最大转速  $90 \text{ r/min}$ 。选配亨士乐 AC-110 空心轴 15 位绝对值单圈编码器, BiSS 接口。电机中空轴和编码器空心轴用于天平信号的电缆穿过。

### 3.3 天平力和机构振动检测

模型受力情况由天平检测, 机构振动由加速度传感器检测, 经换算得出。振动检测用来判断 CTS 机构的振动情况, 如果试验时机构振动过大, 控制系统立即停车, 防止天平受损。

由于天平输出信号和加速度传感器输出信号较小, 容易受到干扰, 所以采用信号放大器本地放大和采集, 并数字化传输的方式。信号放大器安装在 CTS 机构内部  $X$  轴的前端, 靠近天平。天平信号和

机构加速度信号经放大器放大后, 分别输入到 AI 采集模块和加速度采集模块, 再经 EtherCAT 总线耦合器上传到嵌入式 PC。

信号放大器为自研产品, 共有 8 通道, 其中 2 通道具备 Q/V 转换功能, 用于加速度传感器输入, 其余 6 通道用于 6 分量天平放大。放大器放大倍数 1、100、200、500 可选, 线性度为满度的 0.03%。放大器尺寸为: 长  $150 \text{ mm}$ ×宽  $72 \text{ mm}$ ×高  $45 \text{ mm}$ 。

选用倍福的 AI 输入模块 EL3602, 双通道, 24 位分辨率, 输入信号  $\pm 1.25 \sim \pm 10 \text{ V}$ , 精度 0.01%, 转换时间  $1 \sim 400 \text{ ms}$  可配置; 加速度采集模块为 EL3632, 双通道, 16 位分辨率, 最高采样频率  $40 \text{ kS/s}$ , 测量精度 0.5%, 内置可选  $5 \text{ kHz}$  滤波器。

### 3.4 碰撞检测和保护

为了避免 CTS 机构和外挂物模型与风洞洞壁或试验母机发生碰撞而受损, 控制系统除了通过软件限定机构和外挂物模型在风洞中的安全运动范围外, 配置了碰撞检测和保护装置。当系统发生意外情况, CTS 机构或外挂物模型与风洞洞壁或试验母机发生碰撞, CTS 机构立即停止运动, 并通知风洞运行管理系统停止吹风<sup>[6]</sup>。

CTS 碰撞检测电路为一阈值电路, 其原理见图 3。

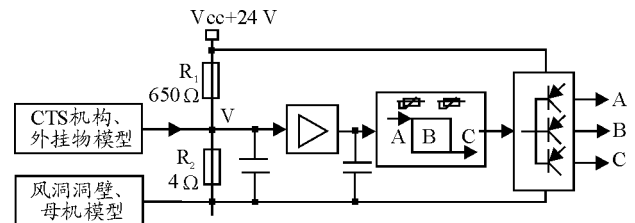


图 3 CTS 碰撞检测原理图

CTS 机构和外挂物模型通过电阻  $R_2$  接地, 风洞洞壁和试验母机与地相连,  $24 \text{ V}$  直流电压通过  $R_1$ 、 $R_2$  分压, 使 CTS 机构和外挂物模型带电压  $V$ 。 $V$  经放大和滤波, 再通过比较器判断控制输出: 当  $V$  小于低电位设定值时, A 输出有效; 当  $V$  大于高电位设定值时, C 输出有效; 当  $V$  介于两个电位设定值之间时, B 输出有效。所以, 控制系统通过 DI 模块检测 A、B、C 的状态即可判断 CTS 机构和外挂物模型的对地状态。正常工作时,  $V$  约为  $150 \text{ mV}$ , B 有输出; CTS 机构或外挂物模型碰地时,  $V$  约为  $80 \text{ mV}$  (碰地存在电阻和干扰原因造成不为零), A 有输出; CTS 机构或外挂物模型搭接上其它电源, 或内部电缆破损与机构相连, 会造成  $V$  较高, C 有

输出。

### 3.5 现场手动操作

现场手动操作通过手操器来实现。在 CTS 试验准备前, 试验人员在风洞内通过手操器对机构的初始位置和姿态进行调整。

选用西门子 Mobile Panel 177 作为 CTS 的现场手操器, 带手轮、启用开关和 STOP 按钮。手操器通过 Profibus 总线与嵌入式 PC 的 Profibus 模块连接, 用于轴选通、启动、运动速度和位置给定、轴状态显示等参数传递; 启用和紧停信号则通过直连电缆输入到嵌入式 PC 本地 DI 端子上。

通过现场手操器, 可以进行 CTS 机构的大范围运动操作, 也可以进行缓慢的精细调节操作。

## 4 CTS 软件设计

CTS 软件由 3 个部分组成: 嵌入式 PC 核心运行软件、监控 PC 机上位软件、手操器 HMI 软件。核心运行软件功能包含轨迹生成与补偿算法, 加速度、速度和位置生成, 数据采集处理等; 监控 PC 软件功能包含控制命令生成、数据显示和记录、试验结果计算、文件保存和打印等; 手操器 HMI 软件功能包含单轴步进操作、连续运动操作、各轴和机构状态显示等。CTS 软件模块组成见图 4。

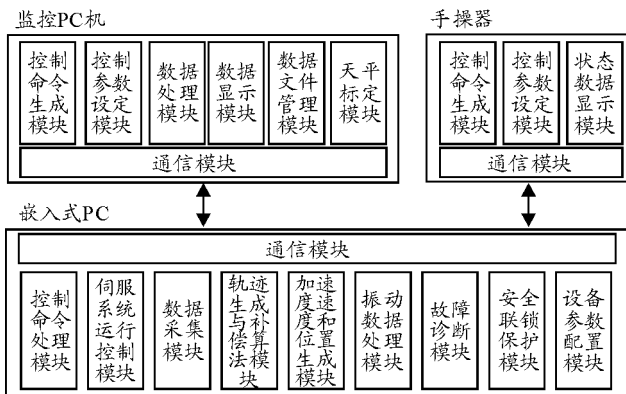


图 4 CTS 软件模块组成框图

### 4.1 嵌入式 PC 核心运行程序开发

CTS 核心运行程序采用 TwinCAT 软件平台开发, 开发语言使用 IEC61131-3 梯形图和结构化文本。

使用 TwinCAT 开发核心运行程序的优点在于, TwinCAT 是基于 Windows 的实时控制软件, 有精确的时基, 实时任务的循环时间可短至 50  $\mu$ s; 另外, TwinCAT 实时核对 CPU 具有优先支配权, 即使 Windows 死机, TwinCAT 实时系统仍可持续运行。

CTS 核心运行程序分 2 个部分: PLC 任务和

NC 任务。PLC 任务有 2 个: 周期 500  $\mu$ s 的过程和控制任务, 周期 100  $\mu$ s 的数据采集任务。过程和控制任务用于位置和速度闭环控制、安全检测与联锁、伺服系统加/断电、振动数据处理、与 NC 任务间数据交换、与监控 PC 机间数据交换等; 数据采集任务用于天平力、振动加速度、风洞总压和静压的采集。PLC 任务和 NC 轴控制任务由 CPU 分时多线程实现。

CTS 位置和速度控制流程见图 5。其中, 机构绝对位置通过伺服电机自带编码器的反馈值换算得出。

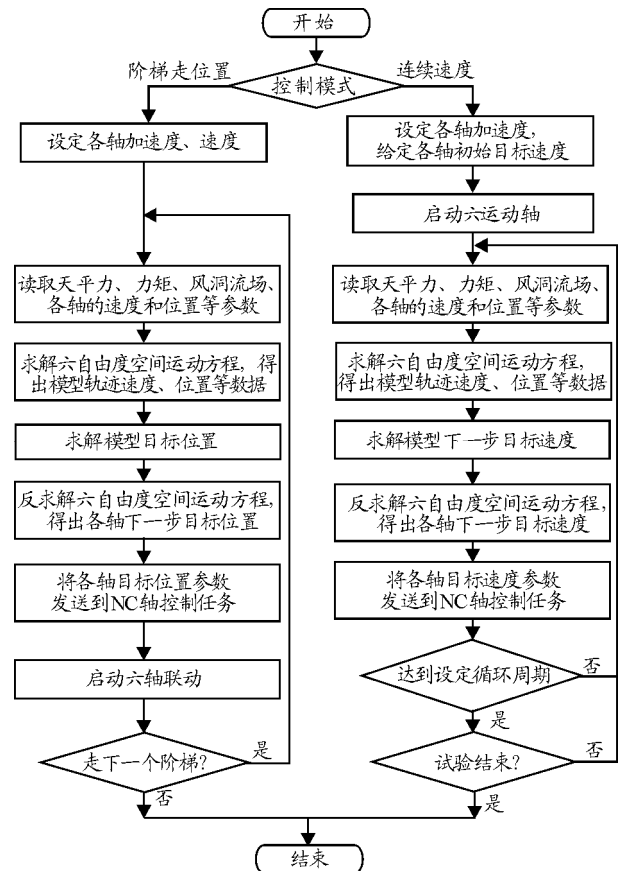


图 5 CTS 位置和速度控制流程图

### 4.2 监控 PC 和手操器 HMI 程序开发

监控 PC 程序采用 NI Labview 8.6 图形化软件开发, 与嵌入式 PC 间的数据交换通过 OPC Server 实现。手操器 HMI 程序采用西门子 WinCC Flexile 2007 开发, 通过读写嵌入式 PC 的寄存器(变量)来实现数据交互。

## 5 结束语

基于 XFC 技术的 CTS 运动控制系统实现了 CTS 机构的位置控制和连续速度控制。