

多轴联动的风洞变角度机构同步协调控制

田 昊^{1†}, 张永双², 卢翔宇¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力学研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决风洞尾撑变角度机构运动过程中多轴之间的同步协调控制问题, 本文提出了一种结合并行控制和交叉耦合控制的同步控制方法. 首先, 将并行控制应用于多轴联动控制中, 根据前后侧滑轴定位时间一致以及速度变化时间一致的原则, 开展了提高多轴同步性能的研究. 然后, 采用了基于同步误差传递函数的交叉耦合控制方法, 对并行控制给定的运动参数进行修正补偿. 最后, 通过机构运动进行了实验验证, 实验结果表明该控制方法可有效减小横向同步误差, 提高同步性能, 满足风洞试验控制要求. 该方法也为类似机构的同步控制提供了参考.

关键词: 多轴联动; 同步协调控制; 并行控制; 交叉耦合控制; 同步误差

引用格式: 田昊, 张永双, 卢翔宇. 多轴联动的风洞变角度机构同步协调控制. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1063 – 1068

DOI: 10.7641/CTA.2019.80471

Synchronous coordinated control of angle adjusting mechanism with multi-axis motion in wind tunnel

TIAN Hao^{1†}, ZHANG Yong-shuang², LU Xiang-yu¹

(1. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: To resolve the problem about synchronous coordinated control of angle adjusting mechanism with multi-axis motion in wind tunnel, a synchronous control method including parallel control and cross-coupling control is proposed. Firstly, the parallel control method is applied to the multi-axis motion control. Based on the corresponding principle of the motion time and velocity alteration time between the front sideslip axis and the back sideslip axis, the improvement of the multi-axis synchronous performance is studied. Secondly, the cross-coupling control method based on synchronous error transfer function is taken, and the given motion parameters of the parallel control method can be corrected. Finally, the experiment is carried out on the angle adjusting mechanism. The results show that the proposed control method can reduce the horizontal synchronous error, the synchronous performance can be improved obviously, and the control requirement of test in wind tunnel can be fulfilled. The method has reference value to synchronous control of similar mechanism.

Key words: multi-axis motion; synchronous coordinated control; parallel control; cross-coupling control; synchronous error

Citation: TIAN Hao, ZHANG Yongshuang, LU Xiangyu. Synchronous coordinated control of angle adjusting mechanism with multi-axis motion in wind tunnel. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(5): 1063 – 1068

1 引言

风洞试验的模型姿态角控制主要包括迎角、侧滑角和滚转角^[1], 角度控制除要求角度定位精度外, 还要求角度变化过程中模型中心始终保持在风洞中心或沿风洞某一轴线运动. 对于部分支撑机构, 要满足该要求, 就存在多轴联合运动的情况, 这就要求相关

运动轴之间应实现同步协调控制.

并行控制^[2]作为典型的非交叉耦合控制, 主要依靠各轴对主令信号的一致跟随保证同步性能, 由于没有考虑轴与轴之间的关联关系, 整体同步性较差. 但根据机构运动特点, 通过建立各轴典型运动参数的对应关系, 也能一定程度提高其整体同步性能.

收稿日期: 2018-06-25; 录用日期: 2019-11-19.

[†]通信作者. E-mail: 410134678@qq.com; Tel.: +86 816-2461224.

本文责任编辑: 孙长银.

国家自然科学基金项目(11504417, 11602290)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11504417, 11602290).

交叉耦合控制^[3]通过引入轴间参数耦合,能较好地实现多轴同步协调控制.部分研究还将交叉耦合控制同参考自适应控制^[4]、迭代自学习控制^[5]、滑模变结构控制^[6]、鲁棒控制^[7]、预测控制^[8]等先进控制理论相结合,虽然能不同程度减小系统同步误差,但以上算法需要较为准确的系统模型^[9].实际吹风试验状态,该类型机构运动特性随模型姿态角及风洞运行工况的不同而变化,系统具有时变、强耦合和非线性特性^[10],相关模型参数难以准确获得.因此以上方法难以在风洞此类型机构上得到实际应用.

基于同步误差传递函数^[11]的交叉耦合控制方法通过同步误差传递函数描述交叉耦合控制与非交叉耦合控制之间的动态关系^[12],将交叉耦合补偿转换为反馈控制问题进行处理,降低了对系统模型参数的要求,能实际应用于风洞此类机构控制.

本文根据FL-17风洞尾撑机构运动特点,将并行控制与交叉耦合控制相结合.按照各轴定位时间和速度变化时间一致的原则采用并行控制方式,自适应设定各轴初始运动参数,提高同步性能.并结合采用交叉耦合补偿的控制策略,基于同步误差传递函数,对运动角速度进行修正.机构在满足角度定位精度的同时,运动过程中偏离风洞水平面中心轴线的偏差得到了有效降低,保证了机构的同步协调运动.

2 系统工作原理

FL-17风洞尾撑机构结构如图1所示,其中迎角头、前拐臂、后拐臂分别对应迎角机构、前侧滑机构、后侧滑机构,每组机构(包括Y向机构)分别由两根油

缸驱动,整个机构共包含4个自由度的运动.

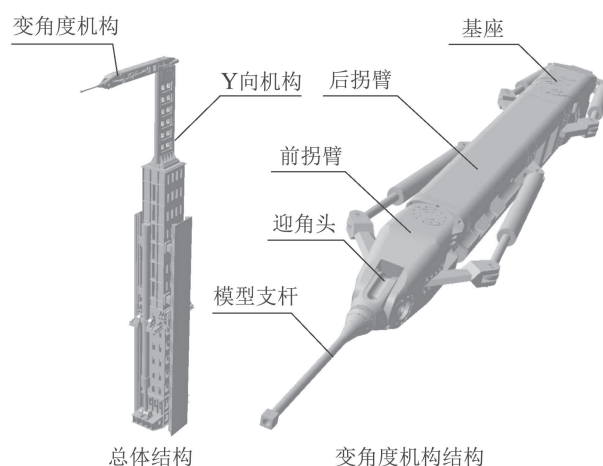


图1 尾撑机构结构图

Fig. 1 Structure of tail sting support mechanism

机构运动机理如图2所示:迎角变化时,由迎角油缸驱动迎角机构绕前拐臂前端轴旋转实现迎角定位控制,同时Y向机构与迎角机构协调运动保证模型中心在垂直平面上沿指定轴线运动;侧滑角变化时,前侧滑油缸组(左、右各一根)驱动前拐臂绕后拐臂前端轴偏转,同时后侧滑油缸组(左、右各一根)驱动后拐臂绕基座轴偏转,两者协调运动以实现侧滑角定位控制,并保证模型中心在水平面上沿风洞中心轴线运动.当迎角和侧滑角同时变化时,迎角机构、Y向机构、前侧滑机构和后侧滑机构需同时参与联动控制,以实现角度准确定位和模型中心沿指定轴线运动.

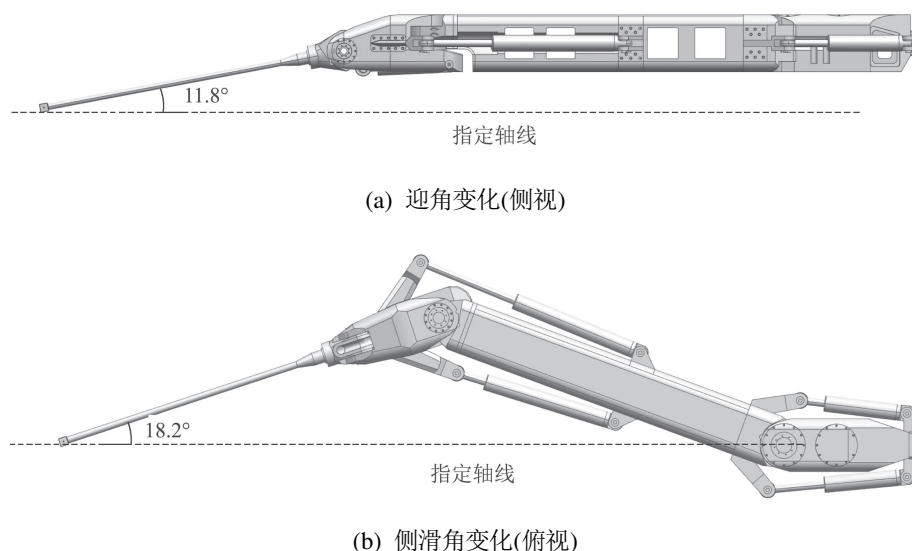


图2 机构运动机理图

Fig. 2 Diagram of mechanism motion

对于迎角控制.在模型支杆长度和形状一定的情况下,迎角机构油缸位移 L_α 和Y向补偿量 L_Y 皆由迎

角大小 α 决定,因此可利用 α 在 L_α 和 L_Y 之间实现固定相关, L_α 和 L_Y 之间同步直接利用控制器自带凸轮同

步功能实现, 此处不予论述。

对于侧滑角控制, 侧滑角大小为前侧滑角(前拐臂与后拐臂间夹角)和后侧滑角的组合, 即

$$\beta = \beta_1 + \beta_2, \quad (1)$$

式中: β 为侧滑角角度, β_1 为前侧滑角角度, β_2 为后侧滑角角度。

由于后侧滑角用于补偿侧滑运动带来的横向误差(模型中心偏离指定轴线的水平距离), 因此后侧滑大小为

$$\beta_2 = -\arcsin \frac{(L_1 + L \times \cos \theta) \times \sin \beta}{L_2}, \quad (2)$$

式中: L_1 为前拐臂长度; L_2 为后拐臂长度; L 为迎角转角中心与模型中心连线的长度; θ 为该连线与水平的夹角, 与迎角大小 α 相关。

由于前侧滑油缸单侧位移 $L_{\beta 1}$ 和后侧滑油缸单侧位移 $L_{\beta 2}$ 分别由前侧滑角大小 β_1 和后侧滑角大小 β_2 决定, 因此需要在 $L_{\beta 1}$ 和 β_1 之间及 $L_{\beta 2}$ 和 β_2 之间分别建立凸轮对应关系, 即

$$\begin{cases} f(L_{\beta 1}, \beta_1) = 0, \\ f(L_{\beta 2}, \beta_2) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

在模型支杆长度和形状一定的情况下, 利用式(1)可在 $L_{\beta 1}$ 和 $L_{\beta 2}$ 之间实现某个迎角下的固定相关, 但实际风洞试验过程中, 伴随迎角变化, 在 $L_{\beta 1}$ 和 $L_{\beta 2}$ 之间相关关系会发生改变, 因此, 无法利用控制器凸轮同步功能实现 $L_{\beta 1}$ 和 $L_{\beta 2}$ 之间同步。

3 基于时间一致方法的同步协调控制

侧滑角运动包括前侧滑和后侧滑组合运动。要求侧滑角以恒定角速度 V_β 完成侧滑角变化量为 $\Delta\beta$ 的运动过程, 则侧滑运动的时间 t_β 为

$$t_\beta = \frac{\Delta\beta}{V_\beta}. \quad (4)$$

该时间应为前后侧滑机构同步完成该次侧滑变化的时间。该过程前后侧滑角速度变化情况如图3所示。

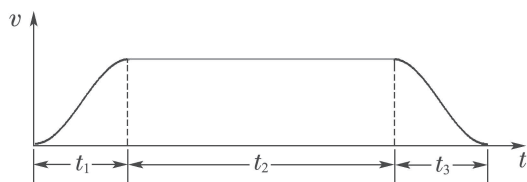


图3 前后侧滑角速度变化示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of front yawing and back yawing angle velocity

为简化分析, 可将加速和减速阶段看作匀加速和匀减速过程, 且加减速度一致, 以前侧滑角为例, 该过程满足以下条件:

$$\begin{cases} \Delta\beta_1 = 0.5A_{\beta 1}t_1^2 + V_{\beta 1}t_2 + 0.5A_{\beta 1}t_3^2, \\ V_{\beta 1} = A_{\beta 1}t_1, \\ t_\beta = t_1 + t_2 + t_3, \\ t_1 = t_3, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A_{\beta 1}$ 为前侧滑加减速度, t_1 为前侧滑加速时间, t_2 为前侧滑匀速时间, t_3 为前侧滑减速时间, $V_{\beta 1}$ 为前侧滑匀速运动角速度, $\Delta\beta_1$ 为前侧滑角度变化量。

为实现侧滑角同步控制目标, 应首先保证前后侧滑运动到达目标角度的时间与侧滑要求运动时间一致, 即定位时间一致。则相关运动参数设定可按照以下步骤进行:

步骤1 根据侧滑角变化量 $\Delta\beta$ 、迎角变化量 $\Delta\alpha$, 以及式(1)–(2), 分别求得前侧滑角变化量 $\Delta\beta_1$ 和后侧滑角度变化量 $\Delta\beta_2$;

步骤2 根据 $\Delta\beta_1$ 和 t_β , 以及式(5), 根据试验条件和负载情况在设定 $A_{\beta 1}$ 后可求得 $V_{\beta 1}$;

步骤3 根据 $\Delta\beta_2$ 和 t_β , 参照式(5), 根据试验条件和负载情况在设定后侧滑加速度 $A_{\beta 2}$ 后可求得后侧滑角速度 $V_{\beta 2}$ 。

按照以上步骤得到的 $A_{\beta 1}$, $A_{\beta 2}$, $V_{\beta 1}$, $V_{\beta 2}$ 满足定位时间一致的条件。

为实现角度变化过程中模型中心始终在水平面上沿风洞中心轴线运动的协调控制目标, 则后侧滑加速时间, 匀速时间和减速时间应分别与前侧滑在对应阶段的时间一致, 即速度变化时间一致, 则该过程同时满足

$$\begin{cases} \Delta\beta_2 = 0.5A_{\beta 2}t_1^2 + V_{\beta 2}t_2 + 0.5A_{\beta 2}t_3^2, \\ V_{\beta 2} = A_{\beta 2}t_1. \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)–(6), 得到

$$\frac{\Delta\beta_1}{\Delta\beta_2} = \frac{A_{\beta 1}}{A_{\beta 2}}. \quad (7)$$

按照式(7)得到的前后侧滑加速度对应关系同时满足角度变化过程中模型中心始终在水平面上沿风洞中心轴线运动的协调控制目标。则相关运动参数设定步骤调整为:

步骤1 同定位时间一致方法步骤1;

步骤2 同定位时间一致方法步骤2或步骤3;

步骤3 根据设定的某一侧滑轴的角加速度和式(7)确定另一侧滑轴的角加速度, 再求得该轴的角速度。

按照以上步骤得到的 $A_{\beta 1}$, $A_{\beta 2}$, $V_{\beta 1}$, $V_{\beta 2}$ 同时满足速度变化时间一致的条件。

如果对迎角使用该方法, 则迎角同样需要将 t_β 作为输入条件, 按照 $V_{\beta 1}$ 或 $V_{\beta 2}$ 的求解方式求出迎角角速度 V_α 以满足侧滑角同步协调控制的要求。实际试验中, 往往存在 $\Delta\beta$ 与 $\Delta\alpha$ 差别较大的情况, 如果都按照

时间一致原则计算运动参数,对应的 V_β 与 V_α 必然存在较大差异,很可能会出现 V_β 或 V_α 超出角速度范围的情况.因此,时间一致原则适用于前后侧滑轴运动参数的设定,不适用于迎角运动参数的设定.

该控制方式属于并行同步控制,前后侧滑轴和迎角轴都以侧滑运动时间为输入条件,即主令信号,再分别根据有关设定量自适应调整各自的运动参数,能初步减小机构运行过程中的横向同步误差.但没考虑轴与轴之间的耦合关系,系统的同步性能提升有限,尤其是当迎角同时变化时,前后侧滑轴不能针对迎角变化过程中产生的横向误差进行同步补偿.

按照时间一致的同步协调控制策略只是得到各轴运动中的速度和加速度设定,并不改变单轴定位控制过程,只要原单轴定位过程是稳定的且改变的速度和加速度参数在合理范围之内,该控制过程依然保持稳定.

4 基于交叉耦合补偿的同步协调控制

交叉耦合控制主要是将两轴的速度或位置信号进行比较,按照同步误差计算模型计算出同步误差,并将其作为附加的反馈信号按照一定关系分别补偿给各自的控制回路,从而达到减小同步误差,提高同步精度的目的.

4.1 同步误差及传递函数

从前面分析可以看出,侧滑轴和后侧滑轴之间是典型的交叉耦合控制关系.侧滑运动横向误差即为侧滑轴与后侧滑轴之间的同步误差 ε ,根据图2几何关系及式(2),表示为

$$\begin{cases} L_q = L_1 + L \cos \theta, \\ \varepsilon = -L_q \Delta \sin \beta + L_2 \Delta \sin \beta_2, \end{cases} \quad (8)$$

式中 L_q 为模型中心在水平面上投影点与前拐臂旋转中心之间的长度.

交叉耦合控制结构如图4所示.

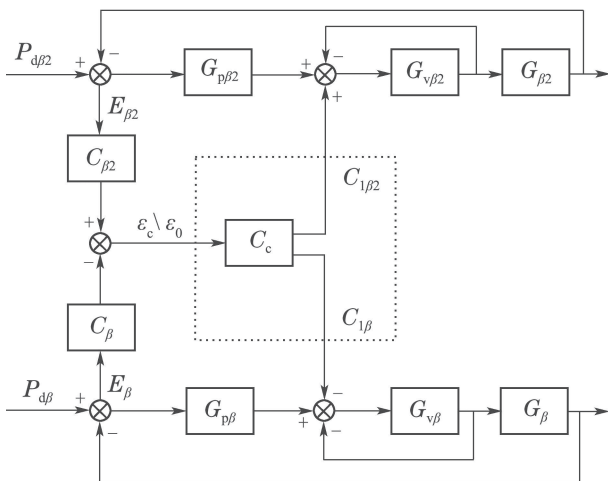


图4 交叉耦合控制结构图

Fig. 4 Structure of cross-coupling control

图中与后侧滑轴相关的变量及过程定义为: $P_{d\beta2}$ 为后侧滑轴位置给定量, $E_{\beta2}$ 为后侧滑轴的位置误差,根据式(8), $E_{\beta2}$ 对应 $\Delta \sin \beta_2$, $C_{\beta2}$ 为求取交叉耦合误差时后侧滑轴的几何转换, $C_{1\beta2}$ 为后侧滑轴的速度修正, $G_{p\beta2}$ 和 $G_{v\beta2}$ 分别是后侧滑轴的位置环和速度环控制, $G_{\beta2}$ 为后侧滑机构的实际运动传递,得到后侧滑轴位置反馈.与侧滑轴相关的变量及过程定义与后侧滑轴对应,下标由 $\beta2$ 调为 β . ε_c 为交叉耦合控制时的同步误差, C_c 为交叉耦合补偿.如果将图4中的虚线框去掉,则为非交叉耦合同步控制结构,同步误差即为 ε_0 .

根据图4,可得 ε_0 为

$$\varepsilon_0 = \frac{C_{\beta2}(1 + G_{v\beta2}G_{\beta2})P_{d\beta2}}{1 + G_{v\beta2}G_{\beta2}(1 + G_{p\beta2})} - \frac{C_\beta(1 + G_{v\beta}G_\beta)P_{d\beta}}{1 + G_{v\beta}G_\beta(1 + G_{p\beta})}, \quad (9)$$

则 ε_c 为

$$\begin{cases} \varepsilon_c = \frac{1}{1 + C_c(T_{\beta2} + T_\beta)}\varepsilon_0, \\ T_{\beta2} = \frac{G_{v\beta2}G_{\beta2}C_{\beta2}}{1 + G_{v\beta2}G_{\beta2}(1 + G_{p\beta2})}, \\ T_\beta = \frac{G_{v\beta}G_\beta C_\beta}{1 + G_{v\beta}G_\beta(1 + G_{p\beta})}, \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\frac{1}{1 + C_c(T_{\beta2} + T_\beta)}$ 为 ε_c 与 ε_0 之间的同步误差传递函数,将其定义为 G_c ,则 G_c 即为同步误差补偿分配控制器,通过分配同步误差补偿量给控制回路的速度环,可达到各轴同步协调控制的目的.

4.2 交叉耦合补偿器的设计

由于同步误差补偿分配控制器 G_c 同时作为交叉耦合同步误差与非交叉耦合同步误差之间的传递函数,则交叉耦合补偿器应在上节基于时间一致的同步协调控制方法基础上,对运动角速度进行修正补偿,满足侧滑角同步协调控制的要求.根据式(10), G_c 可进一步简化为

$$G_c = \frac{1}{1 + C_c G'}, \quad (11)$$

G 中除 C_β 与 $C_{\beta2}$ 外,其余为单轴自身已确定的位置、速度调节的传递过程.根据图4, ε_c 为

$$\varepsilon_c = -C_\beta E_\beta + C_{\beta2} E_{\beta2}. \quad (12)$$

结合式(8),可得 C_β 为 L_q , $C_{\beta2}$ 为 L_2 ,因此只需设计合适的交叉耦合补偿器 C_c .基于式(11)的形式及同步误差传递函数的概念,可以将交叉耦合的补偿简单地作为反馈控制问题进行处理.考虑补偿的增益特性和动态特性, C_c 中引入积分环节I和比例环节P进行控制^[13],由于计算结果是补偿量,即应是在现有控制量基础上求增量,即

$$\begin{cases} I = \frac{1}{T_i} \int_0^t (\varepsilon_c(k) - \varepsilon_c(k-1)) dt, \\ P = K_p (\varepsilon_c(k) - \varepsilon_c(k-1)), \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\varepsilon_c(k)$ 和 $\varepsilon_c(k-1)$ 分别代表第 k 次和第 $k-1$ 次补偿时的同步误差。

但需注意,之前为方便传递函数中变量的对应,采用的是侧滑轴和后侧滑轴之间的同步控制结构进行分析,实际控制过程产生的补偿量应作用在前侧滑轴和后侧滑轴,根据式(1)可得

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d\beta_1}{dt} + \frac{d\beta_2}{dt}, \quad (14)$$

即应在 C_c 计算的角速度补偿量 $C_{1\beta_2}$ 和 $C_{1\beta_1}$ 的基础上,按照式(14)重新确定前侧滑角速度补偿量 $C_{1\beta_1}$ 。

从图4可以看出,引入交叉耦合补偿控制策略,相当于是原控制回路的速度环输入端加入前馈控制通路,按照系统稳定性与前馈控制无关这一特性^[14],该控制策略不会影响各轴定位控制过程本身稳定性。

5 实验与分析

为验证控制方法的有效性,选取仅侧滑角单独变化、迎角侧滑角同时变化两种不同风洞试验状态下单独使用定位时间一致方法、结合使用速度时间一致方法以及同时使用交叉耦合补偿方法3种情况下的横向同步误差实验数据进行对比分析。

5.1 实验平台与条件

实验平台采用西门子S7-317T运动控制型CPU作为控制系统的主控制器,通过油缸内置直线位移传感器对各轴位移和速度进行测量或换算。上位机软件采用LabVIEW开发平台,PLC控制软件采用SIMATIC Step7 开发平台,使用LAD(梯形图)和STL(语句表)编写。

实验条件为风洞风速 $v = 70 \text{ m/s}$,模型质量 $m = 300 \text{ kg}$ 。为便于分析,除特别注明外,所有实验数据皆基于相同的迎角加速度 A_α 、前侧滑角加速度 A_{β_1} 、迎角速度 V_α 和侧滑角速度 V_β ,其中: $A_\alpha = 1 (^\circ)/\text{s}^2$, $A_{\beta_1} = 0.2 (^\circ)/\text{s}^2$, $V_\alpha = 0.5 (^\circ)/\text{s}$, $V_\beta = 0.8 (^\circ)/\text{s}$ 。当采用交叉耦合补偿方法时,调整控制参数 $K_p = 1$, $T_i = 64$,效果较好。

5.2 实验结果与分析

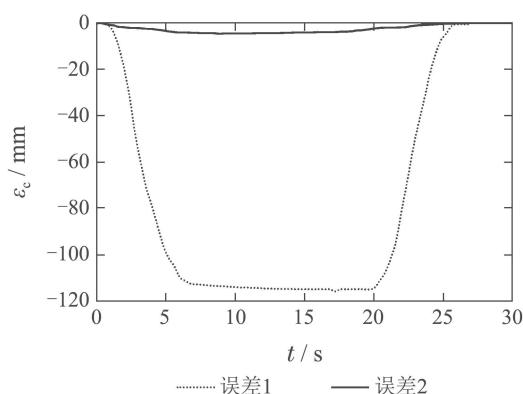
迎角 $\alpha = 0^\circ$,侧滑角 β 从 $-16^\circ \sim 0^\circ$ 变化过程中采用不同方法横向同步误差的对比如图5所示;迎角 α 从 $4^\circ \sim 8^\circ$,侧滑角 β 从 $-16^\circ \sim 12^\circ$ 变化过程中采用不同方法横向同步误差的对比如图6所示。图中误差1为单独使用定位时间一致方法时的横向同步误差,误差2为定位时间一致方法和速度时间一致方法结合使用时的横向同步误差,误差3为在时间一致方法基础上同时使用交叉耦合补偿方法时的横向同步误差,误

差4为前侧滑加速度 A_{β_1} 由 $0.2 (^\circ)/\text{s}^2$ 增大为 $1 (^\circ)/\text{s}^2$ 后使用交叉耦合补偿方法时的横向同步误差。

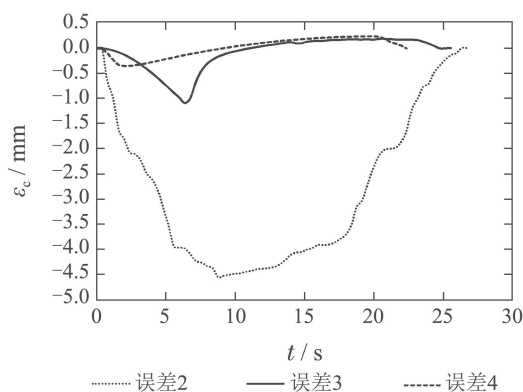
从图5和图6的数据曲线可以看出,无论采用哪种方法,横向同步误差必然收敛于0。由于按照式(1)与(2)求得的 β_1 和 β_2 在满足要求的 β 的同时,也保证横向同步误差为0。即只要各轴运动至设定的目标角位移,即单轴位移误差为0,则横向同步误差必然为0。

从图5(a)和图6(a)可以看出,单独使用定位时间一致方法,两种角度变化过程都会产生较大的横向同步误差,最大误差分别达到 -115.8 mm 和 99.8 mm 。在结合使用速度时间一致的方法后,因前后侧滑轴加速度与角位移变化量对应,实现了速度改变的时间节点一致。因此全程横向同步误差都得到降低,最大误差分别降至 -4.55 mm 和 16.07 mm 。

从图5(b)和图6(b)误差2和误差3可以看出,在时间一致方法基础上同时使用交叉耦合补偿方法后,因前后侧滑速度能在速度改变时间节点一致的基础上根据当前误差量进行同步调整,因此能进一步减小横向同步误差,两种角度变化过程整体误差都能降至 10^{-1} mm 量级,最大误差分别降至 -1.09 mm 和 8.36 mm 。



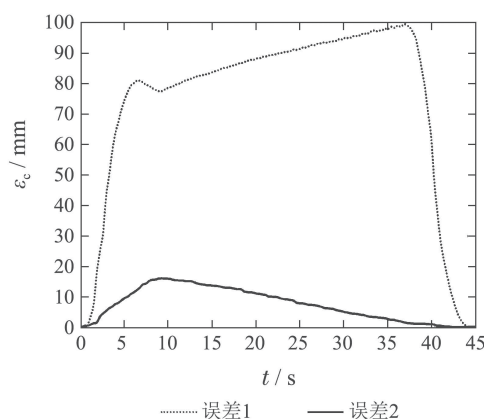
(a) 时间一致方法对比



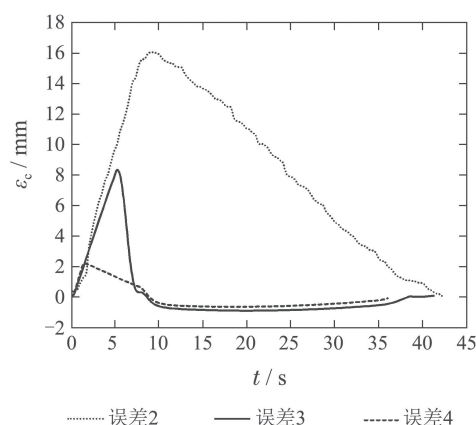
(b) 时间一致与交叉耦合方法对比

图5 横向同步误差对比图($\alpha = 0^\circ$, $\beta: -16^\circ \sim 0^\circ$)

Fig. 5 Comparison of horizontal synchronous error ($\alpha = 0^\circ$, $\beta: -16^\circ \sim 0^\circ$)



(a) 时间一致方法对比



(b) 时间一致与交叉耦合方法对比

图6 横向同步误差对比图($\alpha: 4^\circ \sim 8^\circ$, $\beta: -16^\circ \sim 12^\circ$)
Fig. 6 Comparison of horizontal synchronous error
($\alpha: 4^\circ \sim 8^\circ$, $\beta: -16^\circ \sim 12^\circ$)

针对最大误差依然较大的问题,分析由于交叉耦合控制生成的速度补偿量是对基于时间一致计算的设定速度进行修正,启动加速过程中,当前后侧滑轴速度远低于初始设定速度时,修正速度无法有效作用于运动过程,如果侧滑加速度较低,加速时间较长,加速阶段仍然会有较大的横向同步误差。

保持控制方法和其他条件不变,将前侧滑加速度 $A_{\beta 1}$ 由 $0.2 (^{\circ})/s^2$ 增大为 $1 (^{\circ})/s^2$,实验结果如图5(b)和图6(b)误差4曲线所示。两种角度变化过程最大误差可分别降至 -0.35 mm 和 2.19 mm ,验证了以上推断。但实际试验中 $A_{\beta 1}$ 的设定应结合负载和运行安全等因素综合考虑,不能随意增大。

6 结论

本文将并行控制与交叉耦合控制相结合,通过在定位时间一致基础上,结合使用速度时间一致的并行控制方法大幅降低了横向同步误差,再同时使用交叉耦合补偿方法,最终将横向同步误差由 100 mm 以上降至峰值不超过 10 mm ,并稳定在 1 mm 以内的水平,较好地解决了尾撑变角度机构在运动过程中因多轴联动产生的横向同步误差较大的问题,满足了风洞试验控制要求。

参考文献:

- [1] WANG Xunnian. *Test in Low Speed Wind Tunnel*. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
(王勋年. 低速风洞试验. 北京: 国防工业出版社, 2002.)
- [2] CAO Yang, LI Qiaomei, WU Guoqing, et al. The research progress of hydraulic synchronization system. *Modern Manufacturing Engineering*, 2014, 37(11): 136 – 140.
(曹阳, 李巧梅, 吴国庆, 等. 液压同步系统的研究进展. 现代制造工程, 2014, 37(11): 136 – 140.)
- [3] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1980, 102(4): 265 – 272.
- [4] CHEN W, WANG D D, GENG Q, et al. Robust adaptive crosscoupling position control of biaxial motion system. *Science China Technological Science*, 2016, 59(4): 680 – 688.
- [5] YAN Qiuzhen, SUN Mingxuan. Error trajectory tracking by robust learning control for nonlinear system. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 23 – 30.
(严求真, 孙明轩. 一类非线性系统的误差轨迹跟踪鲁棒学习控制算法. 控制理论与应用, 2013, 30(1): 23 – 30.)
- [6] XUE Jianfeng, WANG Jingqin, YANG Zhao. Synchronous control of adjacent cross coupling fast terminal sliding-mode control for multi induction motor. *Packaging Engineering*, 2017, 38(7): 173 – 177.
(薛建峰, 王景芹, 杨昭. 多感应电机相邻交叉耦合快速终端滑模同步控制. 包装工程, 2017, 38(7): 173 – 177.)
- [7] CHIN S C, LI Y C. Robust cross-coupling synchronous control by shaping position commands in multi-axes system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 4761 – 4773.
- [8] LIE T, LANDERS R G. Predictive contour control with adaptive feed rate. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(4): 669 – 679.
- [9] LIU Zhijie, OUYANG Yuncheng, SONG Yuhua, et al. Parallel control of distributed parameter system: from model based control to data driven intelligent control. *Journal of Command and Control*, 2017, 3(3): 177 – 185.
(刘志杰, 欧阳云呈, 宋宇骅, 等. 分布参数系统的平行控制: 从基于模型的控制到数据驱动的智能控制. 指挥与控制学报, 2017, 3(3): 177 – 185.)
- [10] LI S H, GU H. Fuzzy adaptive internal model control schemes for PMSM speed regulation system. *IEEE Transactions on Industry Informatics*, 2012, 8(4): 767 – 779.
- [11] CORAPSIZ M F, KOKSAL E. Trajectory tracking control and contouring performance of three-dimensional CNC. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2212 – 2220.
- [12] LIANG Yong, ZHANG Tao. Dual-motor synchronous control of helical movement. *Computer Simulation*, 2014, 31(1): 264 – 267.
(梁永, 张涛. 双电机螺旋线运动同步控制. 计算机仿真, 2014, 31(1): 264 – 267.)
- [13] SHIH Y T, CHENG C S, LEE A C. A novel cross-coupling control design for bi-axis motion. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2002, 42(14): 1539 – 1548.
- [14] HU Shousong. *Automatic Control Principle*. Beijing: Science Press, 2013.
(胡寿松. 自动控制原理. 北京: 科学出版社, 2013.)

作者简介:

田 昊 工程师, 目前研究方向为低速风洞测控技术, E-mail: 410134678@qq.com;

张永双 高级工程师, 目前研究方向为风洞测控技术, E-mail: zhangyongshuang@126.com;

卢翔宇 高级工程师, 目前研究方向为低速风洞测控技术, E-mail: luxiangyu919@163.com.