

# 基于共享内存的过约束多自由度振动台 解耦控制方法

李 宁<sup>1,2,3</sup>, 陈 俊<sup>1</sup>, 高树灵<sup>1</sup>, 韩庆华<sup>1,2,3</sup>, 李忠献<sup>1,2,3</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;  
3. 天津大学中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 为了提高由过约束作动器驱动的地震模拟振动台振动信号的复现性能,对振动台和控制系统进行建模和小尺寸模型振动台试验验证,分析了采用 8 个作动器耦联驱动的小型三向六自由度振动台系统特性,在理论上采用正、反运动学模型对其进行动态解耦;利用混合试验中的共享内存具有的实时存储与读取的功能,以控制器、Speed-Goat 及数据采集系统构建去中心化的控制系统硬件平台,采用 SpeedGoat 旁路控制器,对所提出的解耦控制方法进行了试验验证,证明了该控制方法的可行性和可靠性。经试验验证的机构解耦算法运算量小,可拓展多种更复杂的控制方法,在硬件平台更普适。

**关键词:** 振动台; 三向六自由度; 解耦控制算法; 共享内存; Simulink

**中图分类号:** TB534<sup>+</sup>.2; TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)02-0329-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.02.013

## 引 言

并联驱动与传统串联驱动构造的机械体系相比,具有刚度大、精度高、动力性能好以及承载能力高等优点。振动台是工业振动检测、结构抗震等研究的重要试验设备,已经被广泛地应用在航空航天、车辆交通、建筑结构和工业自动化等众多工程领域<sup>[1]</sup>。多自由度振动台由并、串联系统构成,其运动学和动力学分析可能存在不同程度的耦合,进行解耦控制方法的研究十分必要。

对于并联机构,运动学解答往往需要进行迭代求解。1992 年,Zhang 等<sup>[2]</sup>就提出了一种简单方法计算运动学正向解答,此后国内外学者在此基础上做了许多研究。Koekebakker<sup>[3]</sup>对 Stewart 平台进行详尽的运动学与动力学分析,提出了一种基于模型的控制设计方法。McInroy 等<sup>[4-5]</sup>提出了两种解耦算法。Chen 等<sup>[6]</sup>和 Yang 等<sup>[7]</sup>在此基础上,提出一种将一个高度耦合的六输入六输出的动力学系统转化成六个独立的液压驱动机械系统的新控制方法,并证明其可行性。Yang 等<sup>[8]</sup>与 Peter 等<sup>[9]</sup>将多输入多输出(MIMO)系统转换到多个单输入单输出(SISO)系统进行控制,验证了模态解耦控制的有效

性。Plummer 等<sup>[10]</sup>则基于模态空间控制思想,通过模态矩阵转换将关节空间坐标的单缸控制转换到无耦合空间,并对 6-6 Gough-Stewart 平台进行建模仿真。在实际的控制器设计中,由于六自由度运动系统硬件性能难以保证,尽管模态解耦的思想理论上能取得一定效果,但实际上可能成本过高,Chen 等<sup>[6]</sup>和 Plummer 等<sup>[10]</sup>所使用高性能六自由度运动系统硬件成本可观。因此,合理地建立机构的运动学和动力学模型、优化控制方法、挖掘系统潜力是有必要的。

滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学)自行研制的 750 mm×750 mm 电动地震模拟振动台,满负载为 300 kg,可实现三向六自由度激振。本文对该振动台的部件组成进行了介绍,对笛卡尔坐标系和作动器过约束坐标系下的自由度转换和解耦控制算法进行了推导,编制相关控制程序并实现了基于反射内存和 Simulink 的控制平台搭建,最后进行了试验验证,为后期进行更优质的控制系统研究及相关试验奠定基础。

## 1 电动振动台组成

振动台采用 8 套完全相同的电动作动器及驱动

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2020-01-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504306, 2016YFC0701108); 国家自然科学基金面上项目(51678407); 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(51427901)

器来实现加载台面的六自由度运动。4支垂直向作动器和4支水平作动器如图1所示。需要说明的是,考虑到实验室无条件构造反力地基/台架,设计了自平衡振动台构型,其水平向作动器呈45°角V形布置,4个竖向作动器竖向布置;此外,其协同工作中心在台面高于水平、竖向作动器,使得台面处水平向、竖向作动器球铰并不共点、共线。平衡时各作动器空间坐标如表1所示(假设台面中心位置为原点),作动器空间几何模型如图2所示。采用Flex-

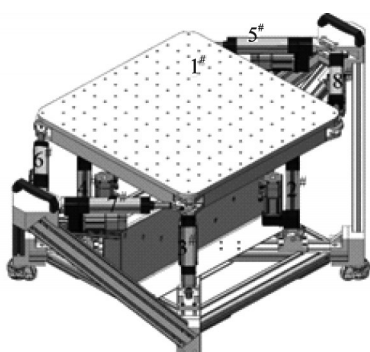


图1 电动振动台主视图

Fig. 1 Main view of electric shaking table

表1 平衡时各作动器空间坐标

Tab. 1 Test conditions

作动器号	相对0位置坐标(台面中心)					
	台面移动端			固定端		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-252.86	252.86	-20.00	-252.86	252.86	-478.50
2	-252.86	-252.86	-20.00	-252.86	-252.86	-478.50
3	252.86	252.86	-20.00	252.86	252.86	-478.50
4	252.86	-252.86	-20.00	252.86	-252.86	-478.50
5	-354.00	354.00	0.00	-678.00	30.00	0.00
6	-354.00	-354.00	0.00	-678.00	-30.00	0.00
7	354.00	354.00	0.00	678.00	30.00	0.00
8	354.00	-354.00	0.00	678.00	-30.00	0.00

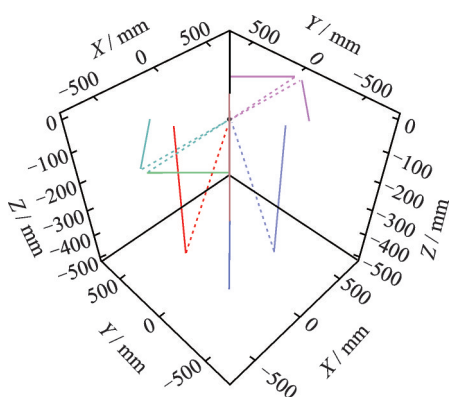


图2 作动器几何模型示意

Fig. 2 Geometry model of the actuators of shaking table

Test 60实时控制器(配备MTS 793软件平台),配置控制器硬件接口文件,将列出的系统资源池中定义资源匹配给各物理通道,即可创建多功能的站台配置文件。使用台站生成器窗口控件以分配硬件资源,如阀驱动、反馈通道、模拟I/O、数字I/O等资源。

### 1.1 机械部分组成

机械部分包括运动台面、反力框架、电机与球铰4个部分。其中运动台面及反力框架采用铝合金材料制作。电动作动器和电机(如图3所示)分别采用美国Parker公司生产的ETH系列作动器和PM系列电机。电机最高转速5000 r/min、最高电流7.8 A,额定扭矩及额定输出功率分别为1.27 N·m及400 W。电机与丝杠采用并联式安装,内置抱闸系统,可通过抱闸控制确保振动台运作的安全性。该电动作动器的特点是具有一个大尺寸的汽缸杆,而螺杆螺母轴承采用优质塑料滑动轴套形式,以吸收侧向力。因为振动台需要具有较长行程,电动缸会有较高的侧向力,为了增加容许的侧向力,选择了比实际应用要求更长的行程。

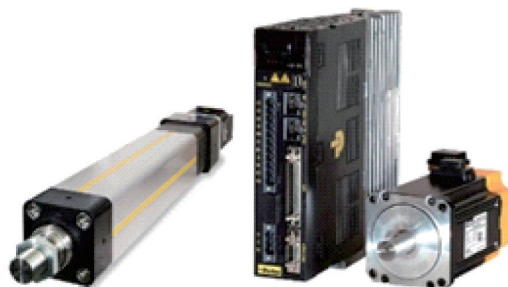


图3 作动器、驱动器和电机

Fig. 3 Actuator, driver and motor

### 1.2 电气部分组成

自行设计了电气控制柜,包括驱动器(如图4所

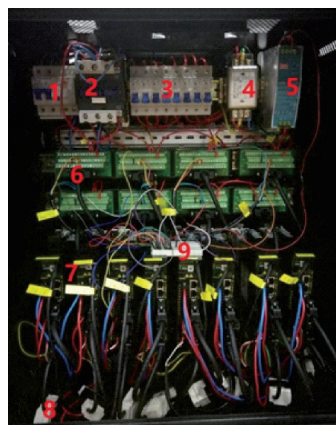


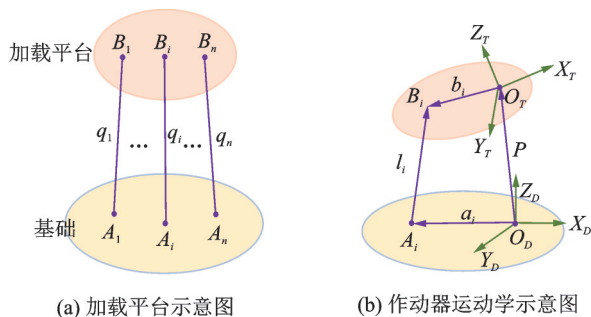
图4 控制柜内部

Fig. 4 Control box for shaking table

示)、传感器、接线组和线缆四个部分。伺服驱动器模拟输入具有两通道,可分别控制转速和扭矩,电压限制为 $\pm 10\text{ V}$ 、模拟输出二通道( $\pm 10\text{ V}$ ),可自定义输出任何内部参数。传感器由24套限位开关(每缸3支)及8套编码器组成。增量型编码器可输出24 V逻辑差分ABZ信号。控制柜总体组成如图4所示。图4中1-9分别为总电源空气开关、急停断路器、各驱动器供电开关、电源滤波器、24 V电源、驱动器IO接线端、驱动器、电池盒以及临时接线板。

## 2 耦联多自由度系统控制原理

采用8支作动器控制振动台台面运动具备六自由度,作动器只能按照指令沿其轴线方向移动,通过8个作动器的轴线运动实现六自由度的加载运动,需要作动器和笛卡尔空间坐标之间的运动转换。因为各自由度之间存在运动机构的耦合关系,所以需要对其进行运动学分析。图5描述了并联笛卡尔坐标系统,并联机构(如图5(a)所示)由 $n$ 个移动关节(即作动器或位移传感器)组成。第“ $i$ ”关节一端与A点的固定物体连接,另一端与B点的运动物体连接, $n$ 个关节与两个物体平行连接。可在每个主体上定义两个坐标框架系统:一个附着在基座上的“固定”框架,另一个附着在加载平台上的“运动”框架,如图5(b)所示。



(a) Diagram of loading platform (b) Kinematic diagram of actuators  
图5 并联系统运动学

Fig. 5 Parallel manipulator kinematics

关节坐标(自作动器或位移传感器位置)和笛卡尔坐标之间定义了两个运动学转换<sup>[11-12]</sup>。其中一个变换是从笛卡尔坐标系到关节坐标系的变换,称为逆运动学变换(Inverse Kinetic Transformation, IKT),用三维笛卡尔空间的数学关系可表示为

$$l_i = P + Rb_i - a_i \quad (1)$$

式中  $l_i$  为笛卡尔坐标中的向量,表示第 $i$ 个作动器的位置, $P$ 与 $R$ 表示局部坐标系相对于全局坐标系位置的平移向量和旋转矩阵; $a_i$ 为第 $i$ 个关节相对于固定坐标系的固定端坐标; $b_i$ 为第 $i$ 个关节相对于运

动坐标系的自由端坐标。对于过约束并联机器人,通常作动器的数量大于或等于加载平台上的运动部件的数量。在这种情况下,用于三维运动控制的作动器的数量应该是 $n \geq 6$ 。

笛卡尔坐标指令为  $u^{\text{cmd}} = \{u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\}^T$ ,可导出平移向量和旋转矩阵。平移向量由  $P = \{u_x, u_y, u_z\}^T$  给出,其中  $(u_x, u_y, u_z)$  为笛卡尔平移坐标;同时,旋转矩阵由  $R = (\theta_x, \theta_y, \theta_z)^T$  给出,其中  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$  为刚体运动的转角。同时, $R$ 可由三个元素旋转矩阵的乘积来分解,即  $R_x(\theta_x)$ ,  $R_y(\theta_y)$  和  $R_z(\theta_z)$ ,这些都可以通过姿态角规则得到<sup>[13]</sup>

$$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = R_z(\theta_z)R_y(\theta_y)R_x(\theta_x) \quad (2)$$

因此,由IKT得到关节行程的公式为

$$q_i = q_i(u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z) = \|l_i\| = \|P(u_x, u_y, u_z) + R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)b_i - a_i\| \quad (3)$$

式中  $q_i$  为第 $i$ 个关节的长度, $\|\cdot\|$ 为欧几里德范数。特别地,作动器长度命令  $q^{\text{cmd}} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}^T$  是通过求解所有作动器关节( $i=1, 2, \dots, n$ )方程得到的。从这个表达式可以看出,逆运动学变换(IKT)得到了一个笛卡尔坐标的非线性函数<sup>[14]</sup>,可以显式求解,便于实时执行。

另一变换是关节到笛卡尔坐标的变换,称为正向运动变换(Forward Kinetic Transformation, FKT),它对应于前面描述的运动学变换的逆映射。问题表述为:给定第“ $i$ ”个关节的行程  $q_i^{\text{meas}}$ ,计算加载平台的笛卡尔坐标  $u^{\text{meas}} = \{\hat{u}_x, \hat{u}_y, \hat{u}_z, \hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y, \hat{\theta}_z\}^T$ 。

为了从作动器行程获得笛卡尔坐标,需要将式(3)重写成如下形式<sup>[15]</sup>

$$g_i(q_i^{\text{meas}}, u^{\text{meas}}) = q_i^{\text{meas}} - q_i(u^{\text{meas}}) = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

式(4)是一个关于笛卡尔坐标  $u^{\text{meas}}$  的隐函数,该问题只有当方程个数 $n$ 等于三维空间中刚体笛卡尔坐标的总数( $n=6$ )时,才有确定解;在 $n \geq 6$ 的情况下,问题是超定的,即所谓过约束控制,可采用最小二乘或其他近似法求出,由控制精度、成本和实时控制器性能制约;此外,若 $n < 6$ 为不确定问题,没有唯一解。

本文尝试采用一种快速的逆、正运动变换方法来解决此问题。显然,解决这个问题的唯一方法是通过数值逼近,在每个迭代步中都需要更新候选解,直到达到收敛条件。因此,可以将FKT问题重写为误差测量最小化的优化问题<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} \text{最小化}_{P,R} f_0 &= \frac{1}{2} \sum_i^n e_i^T e_i \\ e_i &= (P + Rb_i - a_i) - l_i, \\ R^T R &= I_{3 \times 3}, \end{aligned}$$



$$\det(\mathbf{R})=+1 \quad (5)$$

式中 最后两个约束条件是强制使所得到的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  确实属于特殊的正交群  $\text{SO}(3)$ , 这是刚体运动的必要条件。很明显, 从关节坐标到笛卡尔坐标的转换需要一定的步骤才能达到预定公差的收敛, 这对实时执行的时间长度施加了限制。

另一种方法是得到下式 IKT 方程, 在第  $k$  步时做笛卡尔坐标系下的泰勒展开式

$$\delta \mathbf{q} \approx \mathbf{J} \delta \mathbf{u} \quad (6)$$

式中  $\delta \mathbf{q} = \mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k$  为关节坐标增量,  $\delta \mathbf{u} = \mathbf{u}_{k+1} - \mathbf{u}_k$  为笛卡尔坐标增量, 而  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{n \times 6}$  是一个用符号表示的雅可比矩阵, 由下式得出

$$J_{rs} = \frac{\partial q_r}{\partial u_s}(\mathbf{u}_k), r=1, \dots, n; s=1, \dots, 6 \quad (7)$$

或者矩阵形式

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial u_1}(\mathbf{u}_k) & \dots & \frac{\partial q_1}{\partial u_6}(\mathbf{u}_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial q_n}{\partial u_1}(\mathbf{u}_k) & \dots & \frac{\partial q_n}{\partial u_6}(\mathbf{u}_k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

如果雅可比矩阵  $\mathbf{J}$  是可逆的(即, 矩阵为方阵且非奇异), 则可提出一种线性化正运动学变换<sup>[16]</sup>(Linear FKT, LFKT)来计算下一步  $k+1$  时的笛卡尔坐标

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k) \quad (9)$$

通过分析得到雅可比矩阵的每一项, 从而使其数值计算更加直观。在过驱动、多执行机构系统的特殊情况下, 雅可比矩阵是非平方的, 因此不存在逆矩阵。但可以使用 Moore-Penrose 伪逆逼近雅可比矩阵的逆, 该过程基本上是一个最小二乘近似

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k + \mathbf{J}^+(\mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k) \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^* \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^* \quad (11)$$

此外, LFKT 还有两种选择: 初始位置的线性化(雅可比常数)和当前位置的线性化(雅可比增量)。在第一种方法中, 整个测试的雅可比矩阵保持不变; 第二种方法考虑了雅可比矩阵在每一步的更新。后一种方法的计算成本更大, 因此在实现这种方法时应该考虑实时系统的时间限制。一般情况下, 由于 FKT 关系的隐式性质, LFKT 算法并不能保证能够精确求解加载平台运动中心的笛卡尔坐标位置。但 Mercan 等<sup>[17]</sup>研究发现, 在增量时间步长足够小的情况下, 求解 FKT 问题的增量方案与真实 FKT 结果有很好的 consistency。通常, 1/1000 s 的采样时间步长已经足够小, 能获得良好的测量笛卡尔坐标的结果。此外, FKT 允许对笛卡尔空间中任意点进行运动控

制, 该方法对实现过约束多自由度解耦控制是可行的。本文建立的多自由度振动台的解耦运算流程如图 6 所示。

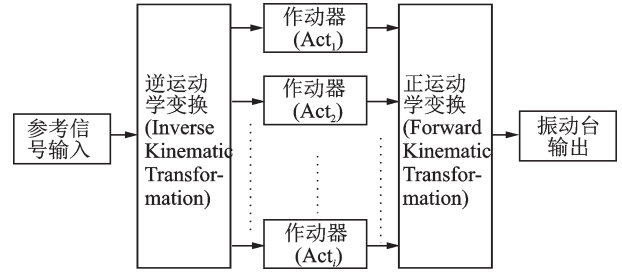


图 6 多自由度解耦运算流程

Fig. 6 Flow chart of multi-degree of freedom decoupling operation

### 3 振动台控制系统设计

在振动台系统中, 为实现闭环控制, 需要基于反馈概念以减少不确定性。PID 控制器是在工业实际中应用最广泛的一种控制器。

#### 3.1 PID 控制器

PID 控制是由比例部分 (Proportional)、积分部分 (Integral) 和微分部分 (Derivative) 组成的一种线性调节器。PID 控制器把实际输出信号  $y(t)$  与输入信号  $r(t)$  的值进行比较, 然后将误差  $e(t)$  用于计算得出新的输出信号  $u(t)$ , 使系统的输出能够有效追踪参考信号, 如图 7 所示。

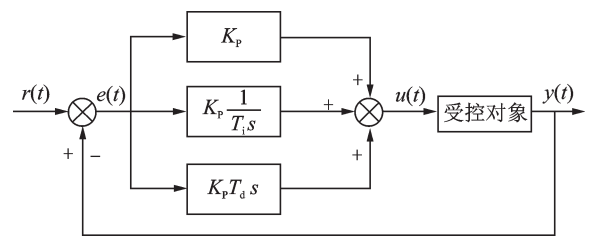


图 7 PID 控制流程图

Fig. 7 PID control flow chart

在时域的 PID 控制规律可以写成

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

式中  $e(t) = r(t) - y(t)$  为 PID 控制器的输入,  $K_p$  为比例系数、 $T_i$  为积分时间常数、 $T_d$  为微分时间常数。将式(12)经过拉式变换, 得到

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (13)$$

其中, 通过调节  $K_p$  能迅速减小偏差, 但不能消除稳态误差,  $K_p$  过大还会引起系统不稳定; 为了消除稳

态误差,引入“积分项”,积分控制器能在系统中加入一个位于原点的极点,以消除输入及外部干扰,使系统进入稳态后能消除稳态误差。但引入极点会使系统变得较不稳定,因此引入微分控制器,在系统中增加一个零点以维持稳定<sup>[18-19]</sup>。本文中,对搭建的软硬件平台能否实现较为精准的控制效果,探讨其可靠性与可行性。建议P,I和D值分别调制为8.5,2和0。

### 3.2 硬件及软件组成

#### 3.2.1 控制器硬件平台

FlexTest 60 实时控制器通常用于液压伺服试验系统。可提供实时闭环控制、传感器标定和函数生成等,以驱动各种类型的作动器。本文使用 Flex-Test 60 具有 8 个 AO 控制通道和 8 个编码器反馈通道,可对振动台的 8 个作动器进行控制。此外也可配置冗余的传感器输入通道记录位移、加速度、力等的需求。控制器配备了电动作动器控制包,在 Windows 操作系统下,可以进行多任务处理<sup>[20-21]</sup>。试验时,可根据试验事件调整控制参数。系统软件包中包含有辅助应用程序,它们可用于执行特定的开机、保持、停机等试验过程的序列伺服控制动作。

#### 3.2.2 共享内存平台

实时子结构实验中需要求解运动方程,并作为

目标位移采用作动器实现。目前通常试验采用控制器来代替计算机进行目标位移的计算,控制器再通过 AD/DA 转换来与传感器及伺服系统相连,以构成一个完整的实时子结构实验系统<sup>[22-23]</sup>。本文配置了共享内存设备用于上位机与控制器的实时通信。此外,为了实现上述解耦控制的 LFKT 算法,编制了 Simulink 控制程序(包括 PID,IKT 和 LFKT),利用 SpeedGoat 与 FlexTest 60 控制器数据实时交互。此时,Flex Test 60 控制器的编码器反馈位移和 AO 的驱动命令构成闭环,与 SpeedGoat 中运行的 Simulink 对接进行控制。

#### 3.2.3 调试平台

Simulink 便于对动态系统建模、仿真和分析,能对系统的所有部件协同工作进行仿真。Speed-Goat 半实物仿真与测试平台是由瑞士 SpeedGoat 公司开发的一套基于 Simulink 的硬件在环(HIL)仿真与测试平台。本文采用 Matlab/Simulink 结合进行实时测试,利用 SpeedGoat 完成基于模型的模拟设计、仿真及验证工作等。SpeedGoat 与 Simulink 协同工作,便于提高 HIL 系统开发的效率,该平台可适应线性、非线性系统,连续、离散及混合系统开发,SISO 及 MIMO 系统的仿真等,具备很强的拓展能力。

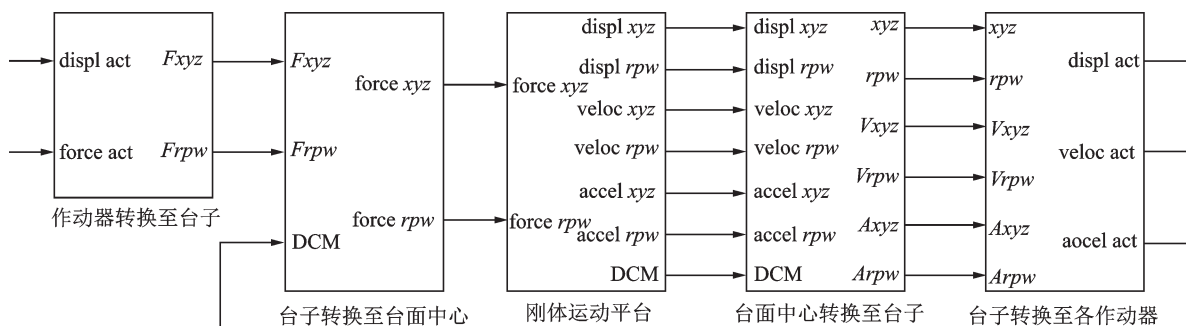


图 8 正运动学变换 Simulink 图

Fig. 8 Simulink block of FKT

### 3.3 多自由度解耦控制平台搭建

基于第 2 节阐述的理论,利用 Simulink 对研发的电动振动台进行数学建模,通过 SpeedGoat 运行解耦控制结果,用反射内存与 FlexTest 控制器实时数据交互, FlexTest 对振动台每个作动器发出预设指令,采集反馈位移。图 8-9 为 FKT 与 IKT 的 Simulink 框架图,是基于式(1)-(9)所述运动学变换理论所构建的。进行相应的多自由度解耦计算,其中 LFKT 内嵌于正运动学变换中。通过解耦运算,可减小各作动器之间的耦合,使控制更为精准。

在此控制平台中,SpeedGoat 执行多自由度解耦计算模型,共享内存模块通过实时连接,将计算指

令下载至共享内存中并与控制器进行数据交换,控制器将共享内存中的指令数据下载并发给 Flex-Test60 控制器,驱动作动器。FlexTest 的输出范围可根据驱动机构要求设置为 ±10 V。在滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学),进行了实时仿真运行。该平台用数字信号连接了多个试验系统架构中的位移命令发送模块及数据采集系统模块,最大程度地减少了噪声的引入,控制平台总体架构如图 10 所示。

完成试验后,搭载 Simulink 的上位 PC 机可以通过模块记录控制指令与反馈指令,之后便可在 Matlab 命令框中调用数据,方便进行数据的处理。

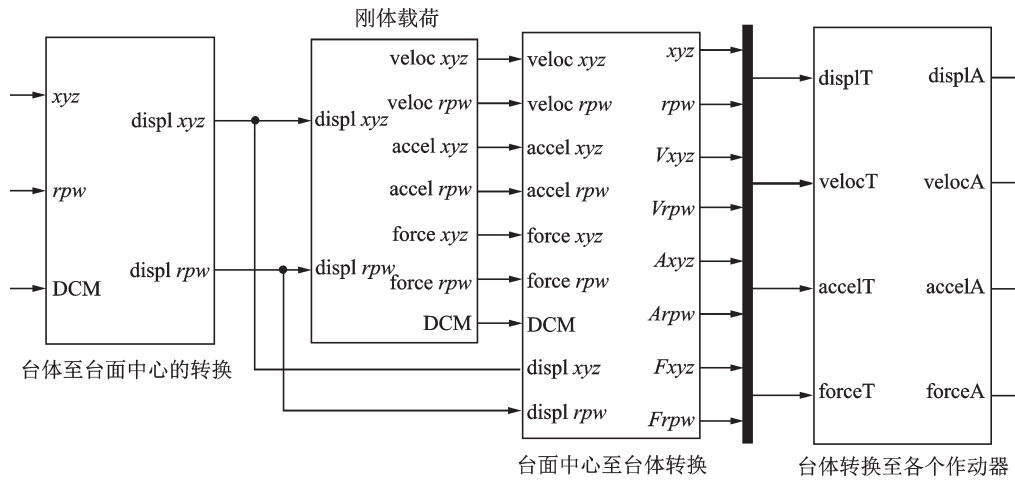


图9 逆运动学变换 Simulink 图

Fig. 9 Simulink block of IKT

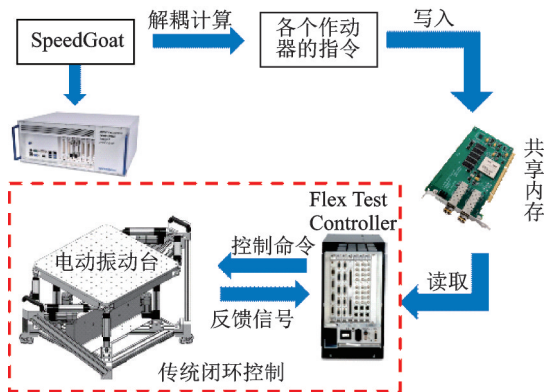


图10 控制平台总体架构

Fig. 10 Overall control system architecture



(a) FlexTest 60和SpeedGoat

(b) 驱动器和振动台

(a) FlexTest 60 controller and SpeedGoat RT machine

(b) Actuator and shaking table

图12 试验硬件

Fig. 12 Facility on site

### 4 控制系统效果测试

为实时对比观察控制效果,首先可借助 Parker 公司的软件 Drive Support Tool 对电机工作参数进行观测调整(如图 11 所示)。通过软件观测各作动器的实际位移值并将其输入 FlexTest 控制器中,使控制器中记录的每个作动器的位移值与实际值一致,检查好线路后即可开始进行测试。图 12 为试验现场照片。

为验证控制系统可靠性,对系统进行相应的测试。测试包括周期、地震动和白噪声测试。周期正

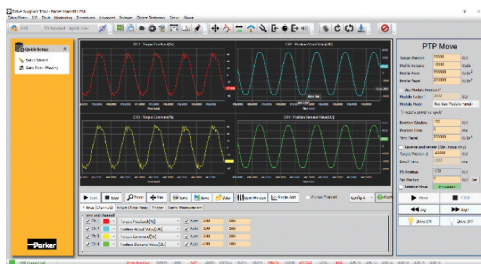


图11 Drive Support Tool 软件界面

Fig. 11 Software interface of Drive Support Tool

弦波测试工况如表 2-3 所示。需说明的是,所有测试至少重复两次以进行可靠性比对。控制信号及反馈信号对比如图 13-14 所示。

由图 13-14 可以看出,各种工况下实际输出位

表 2 试验工况 (a)  
Tab. 2 Test conditions (a)

工况	自由度方向	幅值/mm	频率/Hz
正弦	X	40	0.5
	Y	40	0.5
	Z	20	1
扫频	X	3	0.1-5
	Y	3	0.1-5
	Z	3	0.1-5

表 3 试验工况 (b)  
Tab. 3 Test conditions (b)

输入波	加速度幅值/g		
	X	Y	Z
白噪声	0.5	0.5	0.5
El Centro 波	0.2	/	0.2
人工波	0.5	0.2	0.2



移值与控制命令相比虽有些许差别,但差别很小。满足振动台使用要求。需要注意的是,与指令方向相反的作动器的响应,其输出值与同向作动器输出值幅值相同,符号相反,几乎重合,说明开发平台的控制效果可靠。控制器和 SpeedGoat 通过实时运算,根据第 2 节的理论基础,对输入命令进行解耦运算,求解出每个作动器理论运动位移,并较为精准地控制相应作动器的运动。从图中也可以看出,各自由度经过解耦运算后,实际的控制系统是比较稳定的。值得注意的是,由于水平向每侧两个作动器是 45°角呈 V 字型布置,因此实际作动器位移应为控制信号的  $1/\sqrt{2}$  大小。数据采集系统也对振动台各自由度的位移值进行较为精准的实时采集,因而控制系统是可行的,可对此多自由度电动振动台进行较为良好的解耦控制。

需要说明的是,本文采用了 SpeedGoat 实现多轴冗余振动台的控制,仅考虑了作动器的 PID 控制以证明此方法的可行性,后期可以考虑研究采用高级控制算法,进一步提升振动台控制性能和精度。

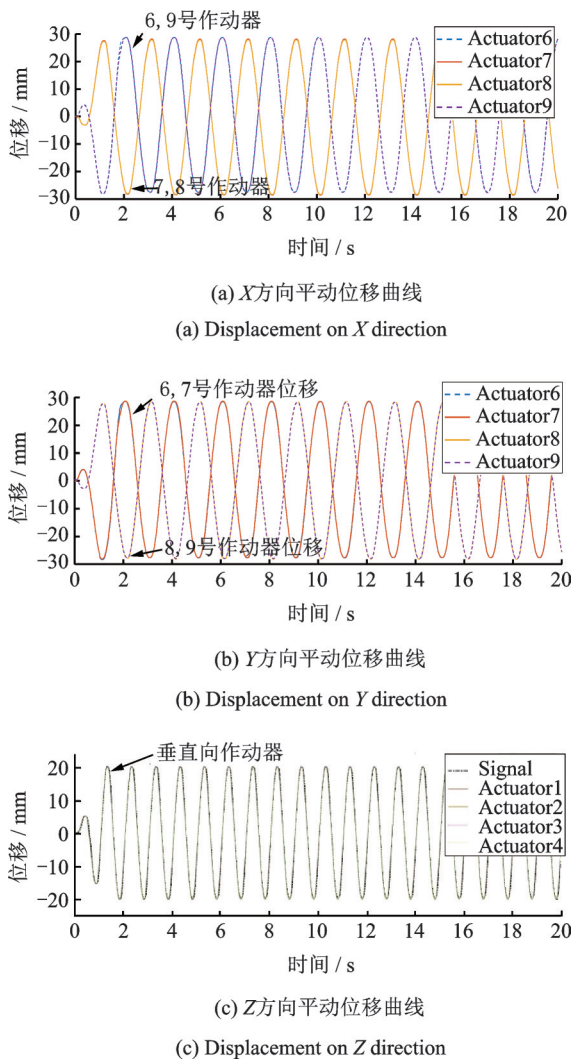


图 13 正弦信号重现  
Fig. 13 Sinusoidal signal reproduce

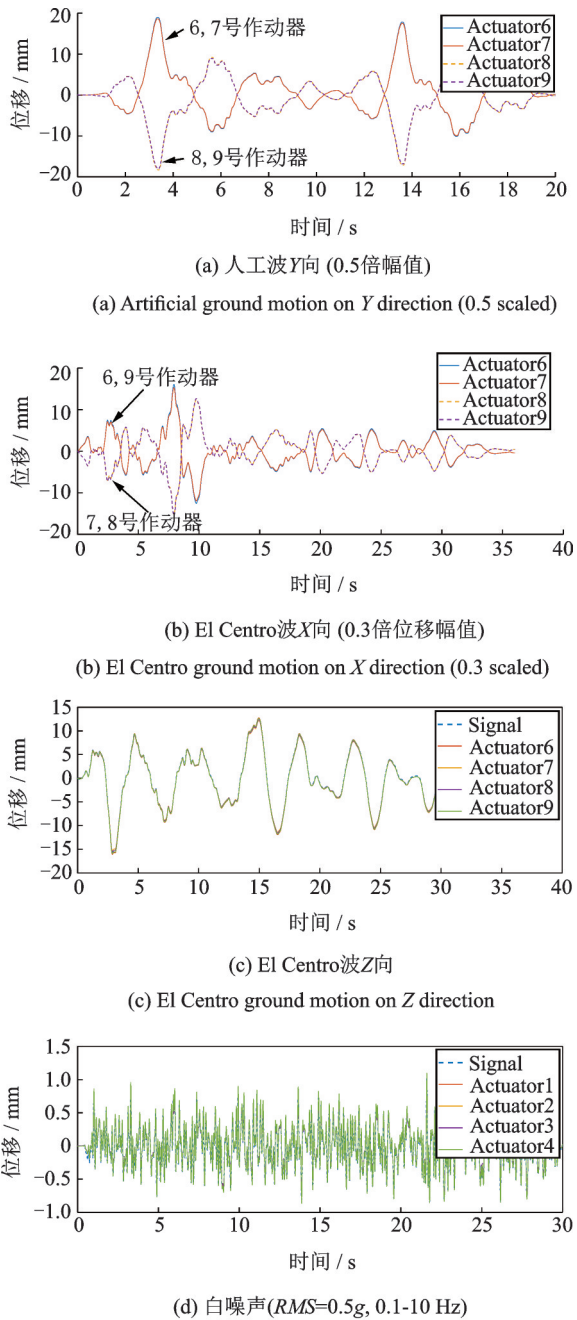


图 14 目标信号复现的对比验证  
Fig. 14 Target signal reproduce verifications

此外,由于振动台组件安装并非完全理想的平衡位置,而解耦计算是基于理想状态建模,这表明实际控制精度还有待进一步调整。

## 5 结 论

本文介绍了自主研发电动振动台的构成及各关键组件,提出了基于共享内存与控制器同步的振动台多自由度过约束解耦控制方法。设计的控制系统以正、反运动学变换为核心,解耦运算程序通过共享内存与控制器进行数据交互,最后通过控制器进行控制命令的输出与作动器的位移反馈,构成三向六

自由度振动台反馈控制。

试验结果表明,所研发控制方法具有较好的跟踪性能,通过模拟模型可事先进行预期的振动台运动效果分析、用于系统的离线调试等,避免在线调试中的困难。相关控制算法达到了预期的控制效果,验证了研发的控制平台的可行性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 高春华,纪金豹,闫维明,等.地震模拟振动台技术在中国的发展[J].土木工程学报,2014,47(8):9-19.  
Gao Chunhua, Ji Jinbao, Yan Weiming, et al. Developments of shaking table technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 9-19.
- [2] Zhang Chang-de, Song Shin-Min. Forward position analysis of nearly general Stewart platforms[C].ASME 22nd Biennial Conference on Robotics, Spatial Mechanisms, and Mechanical Systems, Scottsdale, USA, 1992: 81-84.
- [3] Koekebakker S H. Modal based control of a flight simulator motion system [D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [4] McNroy J E. Dynamic modeling and decoupling force control of a precision hexapod [J]. IFAC Proceedings Volumes, 1998,31(27): 231-236.
- [5] McNroy J E, Hamann J C. Design and control of flexure jointed hexapods[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000 ,16(4): 372-381.
- [6] Chen Yixin, McNroy J E. Decoupled control of flexure-jointed hexapods using estimated joint-space mass-inertia matrix [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2004, 12(3): 413-421.
- [7] Yang Chifu, Huang Qitao, Han Junwei. Decoupling control for spatial six-degree-of-freedom electro-hydraulic parallel robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(1): 14-23.
- [8] Yang Chifu, Han Junwei. Dynamic coupling analysis of a spatial 6-DOF electro-hydraulic parallel manipulator using a modal decoupling method[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(2): DOI: 10.5772/55028.
- [9] Peter O Ogbobe, Ye Zhenmao, Jiang Hongzhou, et al. Modal space decoupled controller for hydraulically driven six degree of freedom parallel robot[C]. 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, Kyoto, Japan, 2010: VI-280-VI-284.
- [10] Plummer A R, Guinzio P S. Modal control of an electro hydrostatic flight simulator motion system [C]. ASME Dynamic Systems and Control Conference, Hollywood, USA, 2009.
- [11] 魏 巍.冗余多轴振动台耦合特性分析及其控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
Wei Wei. Coupling analysis and its control strategy of redundant multi-axis shaking table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] 齐珂珂.六自由度运动系统的模态空间解耦控制器的适用性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
Qi Yuke. Study on applicability of modal space decoupled controller for a hydraulically driven stewart platform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [13] 陈宥全.多自由度振动台之主动即时控制系统开发与应用[D].新竹:国立清华大学,2012.  
Chen Y C. Development and application of active real-time system for the control of multi-degree-of freedom shaking table [D]. Hsinchu: National Tsing Hua University, 2012.
- [14] 樊 强.多轴冗余振动台的模态与自由度复合控制 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
Fan Qiang. Combination of modal and degree control strategy study of redundant multi-axis shaking table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [15] Zhou Huimeng, Li Mengning, Wang Tao. Force-displacement decoupled control of engineering structures with multi degree-of-freedom testing [C]. 14th International Symposium on Structural Engineering, Beijing, China, 2016: 855-862.
- [16] Fernandois G A, Spencer B F. Model-based framework for multi-axial real-time hybrid simulation testing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 16(4): 671-691.
- [17] Mercan O, Ricles J M, Sause R, et al. Kinematic transformations for planar multi-directional pseudodynamic testing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38(9): 1093-1119.
- [18] 胡世强.基于先进PID算法的振动台控制仿真和模型共振研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
Hu Shiqiang. Research on control system of shaking table based on two advanced PID and analysis on coupled model and table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [19] 舒怀林. PID神经网络多变量控制系统分析 [J]. 自动化学报,1999,25(1): 105-111.  
Shu Huailin. Analysis of PID neural network multivariable control systems [J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(1): 105-111.
- [20] MTS Systems Corporation MTS. Series 793 Controller Overview [M]. Eden Prairie, MN 55344, USA, 2011.
- [21] MTS System Corporation MTS. Series 793 Hybrid Simulation: User Information and Software Reference [M]. Eden Praire, MN 55344, USA, 2013.
- [22] 陈永盛,吴 斌,王 贞,等.基于 Simulink 的混合试



- 验系统及其验证[J]. 振动与冲击, 2014, 33(7): 18-23.  
Chen Yongsheng, Wu Bin, Wang Zhen, et al. Simulation and validation of a hybrid testing system with Simulink [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(7): 18-23.
- [23] 许国山, 吴 斌. 采用比例-积分控制的实时子结构试验等效力控制方法 [J]. 工程力学, 2009, 26(9): 251-256.  
Xu Guoshan, Wu Bin. Equivalent force control method with proportional-integral controller for real-time substructure testing [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 251-256.

## Reflective memory based over-constraint MDOF decouple control algorithm for the shaking table control

LI Ning<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, GAO Shu-ling<sup>1</sup>, HAN Qing-hua<sup>1,2,3</sup>, LI Zhong-xian<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety, Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Seismic Engineering Simulation and Urban-Rural Seismic Toughness, China Seismological Bureau, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** To improve the reproducing performance of the earthquake records using the shaking table facility with over constraints of multiple actuators, the kinetic model and the control system of the shaking table are established. Based on the small scaled shaking table test, the verification and validation of a three dimensional six degrees of freedom shaking table system driven by eight actuators are performed, where positive and inverse kinematics transformation algorithms is adopted for dynamic decoupling in theory. Based on the nearly real-time storage and reading capacity of the reflex shared memory card, the hardware platform composed with the decentralized control system is constructed using the real-time controller, SpeedGoat and data acquisition system. Then, the decoupling control method is tested with the SpeedGoat bypassing the controller, which proved the feasibility and reliability of the proposed control method. It is validated that the decoupling algorithm of this mechanism is fast with small computational cost, and it can be further developed for more complex control method with versatile functions. The hardware platform is more universal and lays the foundation for subsequent shaking table test and control algorithm development.

**Key words:** shaking table; three dimensional six degrees of freedom; decouple control algorithm; shared memory; Simulink

**作者简介:** 李 宁(1981-),男,教授,博士生导师。电话:15022396067;E-mail:neallee@tju.edu.cn