一类飞行器动态变化加速度模拟试验原理探索

张东锋. 欧峰

(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:目的 探索一类飞行器动态变化加速度模拟试验原理。方法 建立三轴动态变化加速度模 拟系统的数学模型,研究试件上某一特定位置的目标加速度与离心机及动量矩框架的输入角速 度、角加速度以及旋转角度之间的关系,利用已知的目标加速度反解方程得到输入角速度、角加速 度以及旋转角度。结果 使用 Matlab 进行方程求解和仿真模拟, 仿真结果与目标加速度一致。结 论 仿真结果表明,通过反解方程进行动态加速度模拟试验是可行的。 关键词:动态变化加速度模拟系统;目标加速度;角速度;旋转角度;反解方程 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.009 文献标识码: A 中图分类号: TI05; V416

文章编号: 1672-9242(2015)05-0056-05

Simulation Test Principle for a Type of Aircrafts with Variable Accelerations

ZHANG Dong-feng, OU Feng (Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Objective To study simulation test principle of a type of aircrafts with variable accelerations. Methods In this paper, a mathematical model of simulation system with three-axial variable accelerations was presented. The equations between objective acceleration on a point of test product and input angular velocity, angular acceleration of centrifugal and rotation angle of momentum frames were derived. Based on the known objective acceleration on a point of test product, input angular velocity, angular acceleration of centrifugal and rotation angle of momentum frame were obtained via inversing equations. Results Solutions and simulation were completed by MATLAB, the results were consistent with objective acceleration. Conclusion The result indicated that inversing equation was feasible.

KEY WORDS: variable acceleration simulation system; objective acceleration; angular velocity; rotation angle; inverse equation

导弹、飞机等飞行器从发射起飞至下降着陆等过 程中都会承受持续加速度载荷,该持续加速度载荷的

Fund: Supported by the China Academy of Engineering Physics Technology Fund(2013B0203030)

作者简介:张东锋(1973—),男,硕士,高级工程师,现主要从事离心试验、静力试验方案研究及数值模拟研究。

Biography: ZHANG Dong-feng(1973-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: acceleration test and state test.

收稿日期: 2015-07-28; 修订日期: 2015-08-13

Received: 2015-07-28; Revised: 2015-08-13

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013B0203030)

一类典型地面模拟方法是通过离心机实现的。若该 持续载荷从某种典型特征面截取,则称之为稳态加 速度模拟试验,模拟过程中飞行器与离心机的相对 位置保持不变。如果需要模拟飞行器的连续动态变 化,通常需要在离心机上安装常平架进行动态控制, 称之为离心机连续动态模拟系统^[1]。若加速度变化率 大,则称为高动态模拟系统^[1]。若加速度变化率 大,则称为高动态模拟系统。从设备研发角度而言, 模拟时输入角速度或角加速度可以实现某特定点的 目标加速度,力学理论上称之为运动学正问题^[2–5],而 加速度模拟试验原理研究却属于运动学逆问题范 畴。运动学逆问题存在多值性和对初值的依赖性, 比正问题复杂得多,目前主要集中在机器人领域,关 于多轴运动研究较少。

文中首先针对研发的特殊高动态模拟系统建立 三轴高动态加速度模拟系统的数学模型,从运动学正 问题出发,探讨试件加速度与模拟系统各主要结构部 件的角加速度、角速度及旋转角度之间的关系。通过 反解方程,得到所需的角速度、角加速度及旋转角度, 最后运用Matlab对双轴运动简例进行仿真分析。

1 数学模型

不同需求的加速度动态模拟系统中,常平架的安 装方式也不同。如土工离心机中使用吊斗,在不同加 速度载荷下离心机半径会动态改变,但不能人为控制 吊斗,属于一种双轴模拟系统。飞行员和飞行器模拟 系统通常使用内、中、外框等动量矩框架以及离心机 转轴共同构成多轴旋转系统。文中研究一种特殊的 离心机动态模拟系统,其常平架某转轴始终与离心机 转轴方向相同,模拟系统外观如图1所示。该系统固 定了三轴模拟系统的两轴方向,第三方向上试件可以 自旋。动态模拟系统数学模型的几何描述与相关坐 标系如图2所示。





Fig.1 Sketch map of simulation system with three-axial variable accelerations



图2 动态模拟系统的数学模型

Fig.2 Mathematical model of simulation system with three-axial variable accelerations

2 三轴加速度模型运动方程的建立

2.1 三轴加速度模型及相关坐标系

三轴加速度模型如图2所示,其中S₀为惯性坐标 系,S₄为与离心机固连的坐标系,S₀,S₄的原点为o点。 在离心机旋转研究中,通常以S₄坐标系代替S₀坐标系 进行惯性系研究,S_b为吊篮处与离心机固连的坐标系, 它与S₄相差一臂长,记为矢量r。实际可以认为是同 一坐标系,S₆是与常平架固连的坐标系,通常与飞行器 固连,为本体坐标系,S_c与S_b的原点为常平架中心o⁻ 点。S₆是通过S_b先绕z轴旋转β,再绕y轴旋转φ 实现 的,旋转顺序表示为¹⁶⁻⁹¹:

$$S_{a} \xrightarrow{A_{z}(\boldsymbol{\beta})} S_{1} \xrightarrow{A_{y}(\boldsymbol{\varphi})} S_{c}$$

式中: $A_z(\beta)$, $A_y(\varphi)$ 为旋转矩阵; S_1 为中间过渡 坐标。从 S_a 到 S_c 的转换矩阵 A_{ca} 为:

$$\boldsymbol{A}_{ca} = \boldsymbol{A}_{y}(\varphi)\boldsymbol{A}_{z}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\varphi & \cos\varphi\sin\beta & -\sin\varphi\\ -\sin\beta & \cos\beta & 0\\ \cos\beta\sin\varphi & \sin\varphi\sin\beta & \cos\varphi \end{bmatrix}$$
(1)

记从S。到S。的转换矩阵为Aaco

2.2 相对角速度、相对角加速度

相对于本体坐标系的角速度矢量可以表示为^[10-14]: $\vec{\omega}_{e} = \vec{\beta} + \vec{\varphi}$ (2)

由于不同旋转角度产生的角速度对应不同的旋转 过渡坐标, $\vec{\beta}$ 对应过渡坐标系 S_1 , $\vec{\phi}$ 对应过渡坐标系 S_e :

$$\vec{\beta}_{1} = \{0 \ 0 \ \dot{\beta}\}^{\mathrm{T}}, \{\vec{\varphi}\}_{e} = \{0 \ \dot{\varphi} \ 0\}^{\mathrm{T}}$$
(3)
$$\underline{\eta}_{\omega_{e}} \stackrel{}{=} \alpha_{e} \stackrel{}{=} \delta_{e} \stackrel{}{=}$$

$$\vec{\{\omega_e\}}_e = \vec{\{\beta\}}_e + \vec{\{\varphi\}}_e = A_y(\varphi) \vec{\{\beta\}}_1 + \vec{\{\varphi\}}_e$$
(4)

$$\hat{A} S_e \Psi f \in \mathbb{N}$$

$$\left\{ \overrightarrow{\omega}_{e} \right\}_{e} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\beta} \end{matrix} \right\}_{e}^{0} + \left[\begin{matrix} -\dot{\beta}\sin \varphi \\ \dot{\phi} \\ \dot{\beta}\cos \varphi \end{matrix} \right]$$
(5)

通过坐标变换, $\vec{\omega}_e$ 在 S_a 坐标系下的列阵形式为:

$$\{\vec{\omega}_{c}\}_{a} = A_{ac}\{\vec{\omega}_{c}\}_{c} = \begin{cases} -\dot{\varphi}\sin\beta\\ \dot{\varphi}\cos\beta\\ \dot{\beta} \end{cases}$$
(6)

相对角加速度S。坐标系下的列阵形式为:

$$\vec{\left\{ \varepsilon_{c} \right\}}_{c} = \vec{\left\{ \overrightarrow{\beta} \right\}}_{c} + \vec{\left\{ \overrightarrow{\varphi} \right\}}_{c} + \vec{\left\{ \overrightarrow{\beta} \right\}}_{c} \times \vec{\left\{ \overrightarrow{\varphi} \right\}}_{c} =$$

$$\vec{\left\{ -\overrightarrow{\beta} \sin \varphi - \overrightarrow{\beta} \overrightarrow{\varphi} \cos \varphi \right\}}_{\vec{\varphi}}$$

$$(7)$$

 $\beta \cos \varphi - \beta \varphi \sin \varphi$

2.3 三轴加速度模型的建立

假设在图2坐标系中, \vec{r}_{p} 为惯性系 S_{0} 坐标系中点 P的位置矢量, \vec{r} 为吊篮中心到离心机转轴中心即 S_{a} 坐标系中的位置矢量, $\vec{\rho}$ 代表点P在 S_{a} 动量矩框本体 坐标中的位置矢量,为可变矢量。则:

 $\vec{r}_{\rm p} = \vec{r} + \vec{\rho} \tag{8}$

惯性坐标系下的速度及加速度矢量为:

$$\overrightarrow{v} = \overrightarrow{v_{\rm r}} + \overrightarrow{v_{\rm e}} = \frac{c \overrightarrow{d\rho}}{dt} + \overrightarrow{\omega_{\rm a}} \times \overrightarrow{r} + (\overrightarrow{\omega_{\rm a}} + \overrightarrow{\omega_{\rm c}}) \times \overrightarrow{\rho} \qquad (9)$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{dv}}{dt} = \frac{r\vec{d^2r}}{dt^2} + \frac{r\vec{d^2\rho}}{dt^2}$$
(10)

因为
$$S_a$$
坐标下 r 为常量,平移速度 $\frac{a dr}{dt}$ =0,平移

加速度
$$\frac{ad^2r}{dt^2} = 0_{\circ}$$
式(10)整理为公式(11):
 $\vec{a} = \vec{\epsilon}_{a} \times \vec{r} + \vec{\omega}_{a} (\vec{\omega}_{a} \times \vec{r}) + \frac{cd^{2}\vec{\rho}}{dt^{2}} + 2(\vec{\omega}_{a} + \vec{\omega}_{c}) \times \frac{cd\vec{\rho}}{dt} + (\vec{\epsilon}_{a} + \vec{\epsilon}_{c} + \vec{\omega}_{a} \times \vec{\omega}_{c}) \times \rho + (\vec{\omega}_{a} + \vec{\omega}_{c}) \times ((\vec{\omega}_{a} + \vec{\omega}_{c}) \times \rho)$
(11)

通常变矢量⁷ 与*S*。动量矩框本体坐标固联,在本体坐标*S*。下相对速度和相对加速度为0。式(11)可简化为:

$$a = \overrightarrow{\varepsilon}_{a} \times (\overrightarrow{r} + \overrightarrow{\rho}) + \overrightarrow{\omega}_{a} \times (\overrightarrow{\omega}_{a} \times (\overrightarrow{r} + \overrightarrow{\rho})) + \overrightarrow{\varepsilon}_{c} \times \overrightarrow{\rho} + \overrightarrow{\omega}_{c} \times (\overrightarrow{\omega}_{c} \times \overrightarrow{\rho}) + 2\overrightarrow{\omega}_{a} \times (\overrightarrow{\omega}_{c} \times \overrightarrow{\rho})$$
(12)

离心机旋转的角速度在 S_a 坐标系下的矢径表示 为 $\{\vec{\omega}_a\}_a = \{0 \ 0 \ \omega_{ax}\}^T, \{\vec{\omega}_a\}_a^*$ 为其在 S_a 坐标系下的 叉乘矩阵, $\{\vec{\omega}_a\}_e^*$ 为其在 S_c 坐标系下的叉乘矩阵, 角加 速度也同样表示, 记为 $\{\vec{e}_a\}_a = \{0 \ 0 \ \varepsilon_{ax}\}^T$ 。 S_c 坐标系 原 点 o' 点 在 S_a 坐 标 系 下 的 矢 径 表 示 为 $\{\vec{r}\}_a = \{r_{ax} r_{ay} r_{ax}\}^T = (0 \ r \ 0)^T$, 变 矢 量 $\{\vec{\rho}\}_a =$ $A_{ac}\{\vec{\rho}\}_c^T = A_{ac}(\rho_{cx} \rho_{cy} \rho_{cz})^T$ 。 为了简化公式, 将 S_a 坐 标系下的分量记为 $\{\vec{\rho}\}_a = (\rho_x \rho_y \rho_z)^T$,则式(8)表示 的位置矢量在 S_a 坐标系下的列式为:

$$\vec{\{r_{p}\}}_{a} = \vec{\{r\}}_{a} + A_{ac} \vec{\{\rho\}}_{c}$$
(13)

式(12)的绝对加速度在Sa坐标系下的列式为:

$$\vec{a} = \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{p} \vec{\epsilon}_{a} \times \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{a} \vec{\epsilon}_{p} \vec{\epsilon}_{a} \vec$$

$$\begin{bmatrix} -\omega_{az}^{2} - 2\dot{\beta}\omega_{az} - \dot{\beta}^{2} - \dot{\varphi}^{2}\cos^{2}\beta & -\varepsilon_{az} - \beta\dot{\varphi}^{2}\sin\beta\cos\beta & -2\omega_{az}\dot{\varphi}\sin\beta + \dot{\varphi}\cos\beta - \dot{\beta}\dot{\varphi}\sin\beta \\ \varepsilon_{az} + \dot{\beta} - \dot{\varphi}^{2}\sin\beta\cos\beta & -\omega_{az}^{2} - 2\dot{\beta}\omega_{az} - \dot{\beta}^{2} - \dot{\varphi}^{2}\sin^{2}\beta & 2\omega_{az}\dot{\varphi}\cos\beta + \dot{\varphi}\sin\beta + \dot{\beta}\dot{\varphi}\cos\beta \\ - \dot{\varphi}\cos\beta - \dot{\beta}\dot{\varphi}\sin\beta & -\varphi\sin\beta + \dot{\beta}\dot{\varphi}\cos\beta & -\dot{\varphi}^{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{x} \\ \rho_{y} \\ \rho_{z} \end{bmatrix}$$
(14)

式(14)表示的加速度在*x*,*y*,*z*三个方向都存在偏移,试验中最常见的情况为*z*向、*x*向偏移设为0,仅仅存在自转轴y向的偏移量,那么:

$$\overline{\{\rho\}}_{a} = \boldsymbol{A}_{ac}(0\,\rho_{cy}\,0)^{\mathrm{T}} = (-\rho\sin\beta \ \rho\cos\beta \ 0)$$
(15)

$$\vec{A} = \begin{cases} -\varepsilon_{x}r - \rho(\vec{\beta} + \varepsilon_{x})\cos\beta + \rho(\vec{\beta}^{2} + \omega_{x}^{2} + 2\beta\omega_{x})\sin\beta \\ -\omega_{x}^{2}r - \rho(\vec{\beta} + \varepsilon_{x})\sin\beta - \rho(\vec{\beta}^{2} + \omega_{x}^{2} + 2\beta\omega_{x})\cos\beta \\ \vdots \\ \rho\beta\varphi \end{cases}$$
(16)

则(14)式改为:

通常试验中S。坐标系下的绝对加速度已知,则S。

坐标系和S。坐标系两坐标系下的绝对加速度转换公 式为:

$$\begin{cases} -\varepsilon_{az}r - \rho(\beta + \varepsilon_{az})\cos\beta + \rho(\beta^{2} + \omega_{az}^{2} + \beta\omega_{az})\sin\beta \\ -\omega_{az}^{2}r - \rho(\beta + \varepsilon_{az})\sin\beta - \rho(\beta^{2} + \omega_{az}^{2} + \beta\omega_{az})\cos\beta \\ \vdots \\ \rho\beta\varphi \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\varphi & -\sin\beta & \cos\beta\sin\varphi \\ \cos\varphi\sin\beta & \cos\beta & \sin\varphi\sin\beta \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ex} \\ a_{ey} \\ a_{ez} \end{bmatrix}$$
(17)

式(17)为三轴旋转时需要求解的微分方程,复杂问题需要求解该方程。为了算例简单,不考虑偏移量,即变矢量 $\vec{\rho}$ =0,同时不考虑重力加速度的影响,则 φ =0。式(17)简化为:

$$\begin{cases} -\varepsilon_{\rm ac} r \\ -\omega_{\rm ac}^2 r \end{cases} \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{cases} a_{\rm cx} \\ a_{\rm cy} \end{cases}$$
(18)

简化公式为求解每时刻的圆周运动和试件转 角。为了避免无解和多值波动,下面算例中将式(18) 的角加速度作线性化处理,将方程转换为代数方程, 计算时先联立求解角速度和角加速度,最后求解试件 的旋转角度。

3 算例

文中算例同时具有轴向和法向加速度,算例中机 臂长 *r*=3.5 m,轴向及法向目标加速度同时随时间的变 化曲线如图3所示。试验时需要同时实现轴向和法向 加速度动态变化,并且在整个试验过程中反映轴向和 法向加速度剧烈的动态变化。





通过 Matlab 求解¹⁵¹处理后的方程(18),离心机旋 转角速度和试件旋转角度如图4和图5所示。图5说 明当轴向值趋近0时,横向目标的微小变化需要通过 较大转角变化来实现。通过计算获得的离心机角速 度和试件转角模拟仿真轴向加速度和横向加速度与 目标加速度比较如图6所示。从图6a中可见,当加速 度经剧烈变化到突然长时间变为0时,由于离心机的 角加速度始终处于趋近于0的状态,横向模拟值与目 标横向加速度存在0.07g的差值。从整体上以及图6b 所示的横向加速度可知,能够很好地模拟轴向和横向 的动态变化加速度。



图4 离心机角速度随时间变化曲线 Fig.4 Angular velocity of centrifuge





4 结语

文中通过建立三轴动态变化加速度模拟系统的 数学模型,从运动学正问题出发,建立了试件目标加 速度与模拟系统各驱动结构的角加速度、角速度之间



图6 试件模拟值与目标加速度比较

Fig.6 Comparison of transverse simulated value and objective acceleration

的关系,通过Matlab反解方程,并对方程进行线性化 处理,减小初值的影响和多值性的影响,得到所需的 角速度和试件旋转角度,最后对双轴运动简例进行仿 真分析,仿真结果表明反解方程进行动态加速度模拟 试验是可行的。

参考文献:

[1] 贾普照. 稳态加速度试验模拟设备——离心机理论与设计
 [M]. 北京:国防工业出版社,2013.

JIA Pu-zhao. The Design of a Steady State Acceleration Simulation Test Equipment — Centrifuge[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.

- [2] 由俊生,由勇,许叙遥,等. 歼击机飞行员三轴加速度过载 建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(S2):28—30.
 YOU Jun-sheng, YOU Yong, XU Xu-yao, et al. Research for Modeling and Simulation of Pilot Three Shaft Acceleration[J].
 Journal of System Simulation, 2006,18(S2):28—30.
- [3] 马杰,姚郁.一种新型动态飞行过载模拟器及其运动学分析[J].系统仿真学报,2009,21(S2):112—114.
 MA Jie,YAO Yu. Kinematics Analysis of a New Flight Acceleration simulator[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21 (S2):112—114.
- [4] 马智周. 三轴运动模拟转台的运动学和动力学[J]. 航空精

密机械工程,1988(3/4):28-34,9-13.

MA Zhi-zhou. Kinematics and Dynamics of Three-axial Motion Simulated Turnable[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1988(3/4):28-34,9-13.

[5] 潘文俊,王立新.持续载荷飞行模拟器过载模拟新原理[J]. 航空学报,2010,31(11):2159—2164.

PAN Wen-jun, WANG Li-xin. Principles of G-load Simulation for a Novel Sustained-G Flight Simulator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11):2159—2164.

[6] 赵育善,师鹏. 航天器飞行动力学建模理论与方法[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.
 ZHAO Yu-shan, SHI Peng. The Modeling and Method of the

Flight Dynamics on Space Shuttle[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012.

- [7] 肖业伦. 航空航天器运动的建模——飞行动力学的理论基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
 XIAO Ye-lun. The Modeling of Aerospace Vehicle The theory of The Flight Dynamics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2003.
- [8] 袁惠群.转子动力学基础[M].北京:冶金工业出版社,2013.
 YUAN Hui-qun. The Foundation of Rotor Dynamics[M].
 Beijing:Metallurgy Industry Press,2013.
- [9] 徐明友,丁松滨.飞行动力学[M].北京:科学出版社,2003.
 XU Ming-you, DING Song-bin. The Dynamics of Flight[M].
 Beijing:Science Press,2003.
- [10] 贾书惠. 刚体绕定点运动中的角速度和角加速度[J]. 力学 与实践,1991,13(6):50—53.
 JIA Shu-hui. The Angular Velocity and Acceleration for Rotation of Rigid Body with one Fixed Point[J]. Mechanics in

Engineering, 1991, 13(6): 50-53.

- [11] 李向荣,蔡屹立,潘红萍. 刚体绕定点运动的角加速度合成 公式[J]. 力学与实践, 1989, 11(5):68—69.
 LI Xiang-rong, CAI Yi-li, PAN Hong-ping. The Angular Acceleration Compound Formula of Rigid Body Around a Fixed Point Motion[J]. Mechanics in Engineering, 1989, 11(5):68— 69.
- [12] 陈勇. 刚体在复合运动中角速度、角加速度合成定理[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2000,18(4):89—90.
 CHEN Yong. The Angular Velocity and Acceleration Composing Theorem of rigid body in compound motion[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Science Edition), 2000, 18(4):89—90.
- [13] 张献图. 四重转动参考系与质点的运动[J]. 河南教育学院 学报(自然科学版),1997,6(1):33—36.
 ZHANG Xian-tu. The Motion of Four Rotation Reference Frame and Material Point[J]. Journal of Henan Institute of

Education(Natural Science Edition), 1997, 6(1): 33-36.

(下转第110页)

参考文献:

[1] 朱维新. 土工离心模型试验研究状况[J]. 岩土工程学报, 1986,8(2):82-95.

ZHU Wei-xin. A Review of Geotechnical Centrifugal Model Test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8 (2):82—95.

- [2] 陈正发,于玉贞.土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石 力学与工程学报,2005,25(2):4026—4033.
 CHEN Zheng-fa,YU Yu-zhen. A Review on Development of Geotechnical Dynamic Centrifugal Model Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 25(2): 4026—4033.
- [3] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备——离心机的设计(1)
 [J]. 航天器环境工程,2009,26(1):86—100.
 JIA Pu-zhao. The Design of a Steady State Acceleration Simulation Test Equipment—Centrifuge (1st Part)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(1):86—100.
- [4] 包承纲. 我国岩土离心模拟技术的应用与发展[J]. 长江科学院院报,2013,30(11):55—66.
 BAO Cheng-gang. Application and Development of Centrifugal Modeling Technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2013,30(11):55—66.
- [5] 程永辉,李青云,饶锡保,等.长江科学院土工离心机的应用与发展[J].长江科学院院报,2011,28(10):141—147. CHENG Yong-hui, LI Qing-yun, RAO Xi-bao, et al. Application and Development of Geotechnical Centrifuge in Yangtze River Scientific Research Institute[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2011,28(10):141—147.
- [6] 濮家骝. 土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J]. 岩土 工程学报,1996,18(5):92—94.
 PU Jia-liu. Trends of Centrifugal Model Test and Application
 [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5):92— 94.
- [7] 陈进. 用离心机作结构模型试验的若干问题探讨[J]. 长江 科学院院报,1991,8(3):59—65.
 CHEN Jin. Several Problems with the Structural Model Experiments Using Centrifuge[J]. Journal of Yangtze River Scientif-

ic Research Institute, 1991, 8(3):59-65.

[8] 孙述祖. 土工离心机设计综述(一) [J]. 水利水运科学研 究,1991(1):109—121.

SUN Shu-zu. Review of Design for Geotechnical Centrifuge (I) [J]. Hydraulic and Marine Science Research, 1991(1): 109—121.

[9] 孙述祖. 土工离心机设计综述(二)[J]. 水利水运科学研 究,1991(2):220-226.

SUN Shu-zu. Review of Design for Geotechnical Centrifuge (II)[J]. Hydraulic and Marine Science Research, 1991(2): 220-226.

- [10] 吴望一. 流体力学 [M]. 北京:北京大学出版社, 1982.
 WU Wang-yi. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1982.
- [11] 归柯庭,汪军,王秋颖. 工程流体力学[M]. 北京:科学出版 社,2003.

GUI He-ting, WANG Jun, WANG Qiu-ying. Engineering Fluid Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[12] 景思睿,张鸣远. 流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版 社,2001.

JING Si-rui, ZHANG Ming-yuan. Fluid Mechanics[M]. Xi' an:Xi' an Jiao Tong University Press, 2001.

[13] 刘新民. 2*离心机风阻功率及气动热计算[R]. 绵阳:中国 工程物理研究院结构力学所,1994.

LIU Xin-min. Wind Resistance Power and Aerodynamic Thermal Calculation of 2[#] Geotechnical Centrifuge[R]. Mianyang: Structure Mechanics Institute of China Academy Engineering Physics, 1994.

- [14] 刘新民. 25g·t 土工离心机流场分布规律试验数据整机报告[R]. 绵阳:中国工程物理研究院结构力学所, 1987.
 LIU Xin-min. Experimental Research of Air Flow Field Distribution in 25g · t Geotechnical Centrifuge[R]. Mianyang: Structure Mechanics Institute of China Academy Engineering Physics, 1987.
- [15] 杜延龄. 大型土工离心机设计原理[J]. 岩土工程学报, 1993,15(6):82—95.

DU Yan-ling. Fundamental Design Principle of Large Geotechnical Centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15 (6):82-95.

(上接第60页)

 [14] CHEN Wan-chun, XIAO Ye-lun. Relationship for Motion When Described in Any Two Rotational Reference Frames[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1999, 12(4):40-43.

[15] 敖文刚,杜力,黄勇刚,等.基于MATLAB的运动学、动力学

过程分析与模拟[M]. 北京:科学出版社, 2013.

AO Wen-gang, DU Li, HUANG Yong-gang, et al. Application of Matlab to Process Analysis and Simulation of Kinematics and Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2013.