

# 模拟机运动系统及软件剖析

姜永正\*

(中国民航飞行学院 四川广汉 618307)

【摘要】针对飞行模拟机运动载荷系统中平台质心处的线加速度的算法进行了剖析,并就液压伺服作动筒的伸缩长度与飞机特定力和飞机转动率之间的关系进行了分析。提出了运动方程建模的依据,探讨了模拟机六自由度运动系统在软硬件上的合成原理,为飞行模拟机液压伺服控制在运动系统过载保护性能方面的改善及研究打下了基础。

关键词 线性通道; 角度通道; 质心变换; 旋转率

中图分类号 TP271+.31

## Simulator Motion System and Software Dissect

Jiang Yongzheng

(China Civil Aviation Flight College Guanghan 618307)

**Abstract** The present essay dissects the algorithm of the linear acceleration at the centre of gravity of the platform of the motion loading system, and also analyses the relations of hydraulic servo actuator's travel distance, the aircraft's specific force and the aircraft's rotational rate. The essay also suggests the basis of motion equation modeling, and discusses the simulator's six-degree-of-freedom motion system's combination principles by the means of the hardware and software, and all these make the foundation of the research of flight simulator hydraulic servo control in improving performance of overload protection.

**Key words** linear channel; angular channel; centroid transition; rotational rate

### 1 运动系统的六个自由度

飞机模拟机是由数字计算机实时控制的六自由度平台运动系统,并能提供俯仰、横滚、偏航、升降、纵向平移和侧向平移的六自由度瞬时过载仿真设备。

数字计算机根据被模拟飞机提供的三维线加速度和角加速度以及姿态角等运动参数,经过一系列变换与滤波得到能反映飞机的线运动和角运动的驱动信号,它们分别对应模拟机运动平台的三个线位移和三个转角,由于平台的任何一个自由度的改变都是运动平台六根作动筒组合运动的结果,所以要将平台驱动信号变换成作动筒位移数字信号,最终驱动模拟机平台运动,使得模拟机中的飞行员得到相同于真实的动感。

### 2 运动系统的模拟

对运动系统来说,为达到仿真效果,使平台产生线性运动和角位移以及在模拟机中产生对应的力,需要建立三个坐标系,两个通道,即飞机机体坐标系,运动平台坐标系,运动基座(即地面)坐

标系, 以及反应模拟飞机特定力的线性通道, 反应飞机旋转速度的角度通道。

## 2.1 线性通道与坐标变换

数字计算机计算出被模拟飞机特定的力, 通过线性通道被输入到机体坐标系模块之中, 经过质心变换, 在运动平台坐标系内被转变成线加速度后产生特定的效果。质心变换的目的是将被模拟的飞机质心处的平移加速度(即机体坐标系下)转换成运动平台质心处的平移加速度, 使在运动平台上飞行员座椅处感受到的实际加速度等效于在被模拟的真实飞机上飞行员座椅处的加速度。

### 2.1.1 质心变换

由于平台质心不可能与飞机质心重合, 所以, 只能将平台的质心作为飞机机体坐标系中的一个质点。

设平台质心是飞机机体坐标系中的一个质点A, 点A的坐标为 $A(x, y, z)$ , A点与机体坐标系原点O的连线为矢量 $r_A$ , 飞机绕机体坐标转动的角速度由 $p$ 、 $q$ 、 $r$ (滚转角速度、俯仰角速度, 偏航角速度)三个分量组成如图1所示。

$$r_A = ix + jy + kz \quad (1)$$

$$w = ip + jq + kr \quad (2)$$

在A点处, 由于旋转角速度产生的线速度为

$$v_1 = w \cdot r_A = \begin{vmatrix} i & j & k \\ p & q & r \\ x & y & z \end{vmatrix} \quad (3)$$

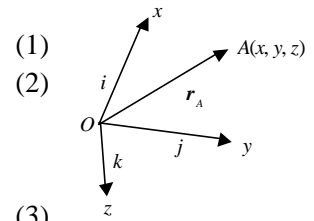


图1 机体坐标系

设机体坐标系原点O的速度为 $v_0$ , 在机体坐标系上投影分别为 $v_{x0}$ 、 $v_{y0}$ 、 $v_{z0}$ 它们是A点的牵连运动速度。A点的绝对速度应是牵连运动速度和绕原点转动而产生的线速度之和定义为

$$v_A = v_0 + w \times r_A \quad (4)$$

A点的绝对加速度为

$$a = \frac{dv_A}{dt} = \frac{dv_0}{dt} + \frac{dw}{dt} \times r_A + w \times \frac{dr_A}{dt} \quad (5)$$

因A点相对机体坐标系原点的模不变, 仅改变方向, 故 $dr_A/dt$ 代表A点由于转动而产生的线速度矢量 $v_1 = w \times r_A$ 。

展开式(5)得

$$a = \frac{dv_0}{dt} + \left[ \frac{dw}{dt} \times r_A + (w \cdot r_A)w - w^2 \cdot r_A \right] \quad (6)$$

将式(1)和式(2)代入式(6), 得到A点在机体坐标系三个方向的标量线加速度为

$$a_x = a_{x0} - (q^2 + r^2)x + (r \cdot p + \dot{q})z + (q \cdot p - \dot{r})y \quad (7)$$

$$a_y = a_{y0} - (r^2 + p^2)y + (p \cdot q + \dot{r})x + (r \cdot q - \dot{p})z \quad (8)$$

$$a_z = a_{z0} - (q^2 + p^2)z + (q \cdot r + \dot{p})y + (p \cdot r - \dot{q})x \quad (9)$$

式中 $a_{x0}$ 、 $a_{y0}$ 、 $a_{z0}$ 是被模拟的飞机平移加速度在机体坐标系中的三个分量。式(7~9)中的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 是代表A点即平台质心相对飞机机体坐标系原点在机体坐标系中的投影。当平台质心相对被模拟的飞机质心间距离确定后, 则 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 是三个确定数。由以上公式可见, 平台质心处的线加速度随被模拟的飞机平移加速度及飞机的各个角速度、角加速度而改变。

若已知飞机上飞行员座椅与飞机质心间距离为 $X_P$ 、 $Y_P$ 、 $Z_P$ , 飞机上飞行员座椅相对平台质心间距离为 $X_{PC}$ 、 $Y_{PC}$ 、 $Z_{PC}$ 。在X方向上, 当飞机质心位于飞行员座椅之后, 设 $X_{PC}$ 为负, 反之为正, 其他

两个方向也类似定义其极性，可以计算出平台质心与飞机质心间距离为

$$R_x = X_p + X_{pc} \quad (10)$$

$$R_y = Y_p + Y_{pc} \quad (11)$$

$$R_z = Z_p + Z_{pc} \quad (12)$$

式中  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  代替式(7~9)中的  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，当其他飞行参数实时获取后，即可算出在机体坐标系内运动平台质心处的平移加速度。

### 2.1.2 软件流程

为了满足模拟机的仿真要求与被模拟飞机特定的力，应先变换成机体坐标系下的加速度，并将加速度分解在坐标轴上，然后乘以反应飞行状态如空中、地面、上升、下降等增益系数，得到每个轴上的总输入，其增益系数将被调整 and 限制，得到一个在机体坐标系下符合仿真要求的加速度值即特定的力，再经过质心变换后将机体坐标系变换成运动平台坐标系，最后通过“三阶线性滤波器”在运动平台坐标系下产生惯性加速度信号，通过作动筒运动生成特定的力，其流程如图2所示。

### 2.1.3 注意事项

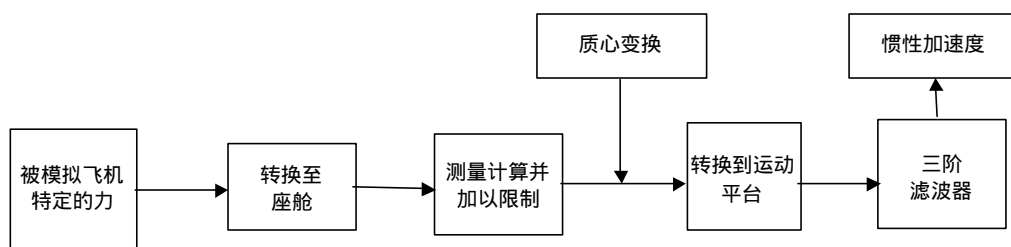


图2 线性通道软件流程图

将特定的力转换到座舱时需注意：1) 增益系数可以调整并连续变化，涉及模拟机的运行速度限制，惯性加速度限制，被模拟飞机所处的状态即初始值限制；当模拟机速度和位置开始上升并接近其极限时，适应参数将使总的输入加速度值减少，一旦该过程生效，清除滤波器，将使运动平台回到中立位置，初始参数回到原始值；2) 要注意缓慢或持续的加速度时的模拟是通过座舱在俯仰和倾斜运动来完成的，其倾斜的范围受飞行员所视范围限制。

## 2.2 角度通道

被模拟飞机的滚转、俯仰、侧滑是通过角度通道来完成的。角度通道的输入值是计算飞机的旋转率。每个轴方向上的旋转率乘以依赖于飞机状态(如空中、地面等)的增益系数，然后加以调整限制产生真实的运动信号，其旋转率的大小受到硬件的严格限制。其中，增益系数连续变化且依赖于模拟机角度位置、模拟机角度速度、模拟机惯性角速率以及适应参数。当模拟机角度位置和角度速度接近极限时，适应参数起作用，使输入角速率减少，这时将导致运动平台回到中立位置，适应参数将回到初始值。其软件流程如图3所示。

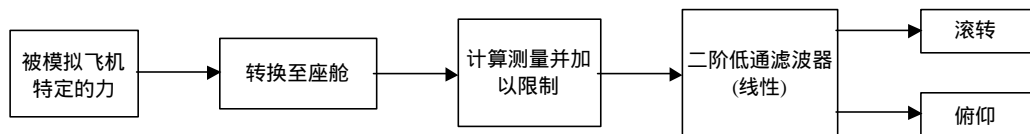


图3 角度通道的软件流程图

## 2.3 作动筒变换

通过模拟机线性通道和角度通道，得出在运动平台系统特定的力即惯性加速度信号和飞机转动率信号，这些信号必须通过作动筒转换，最终使模拟机运动达到仿真的目的。通过作动筒变换，将

平台坐标系变成运动基座坐标系,即用已知的运动基座坐标中的上下轴坐标可计算每个作动筒伸展的长度,即

计算的作动筒长度=作动筒在中立位置的长度+作动筒位置变换长度

由于飞机模拟机具有六自由度运动平台,是通过六个作动筒伸长的组合得到每一个自由度的运动,因而必须产生驱动六根作动筒的信号,从而驱动六根作动筒,完成运动模拟。

如图4所示,各矢量关系可得到作动筒长度矢量  $L_i$  为

$$L_i = [T]D_i + R - F_i \tag{13}$$

式中  $D_i$  为平台质心至作动筒与平台上支点间矢量;  $R$  为活动坐标系原点  $O$  (平台质心) 与固定坐标系原点间矢量;

在固定坐标系内表示成:

$$R = ix + jy + kz \tag{14}$$

式中  $F_i$  为固定坐标系原点至作动筒下支点间矢量;  $L_i$  为第  $i$  根作动筒长度矢量(在固定坐标系);  $T$  为活动坐标系至固定坐标系的变换矩阵, 矢量  $D_i$  是在活动坐标系中乘以  $T$  就被转换至固定坐标系。

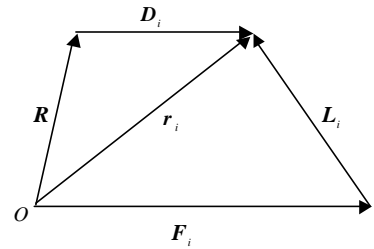


图4 作动筒长度矢量关系图

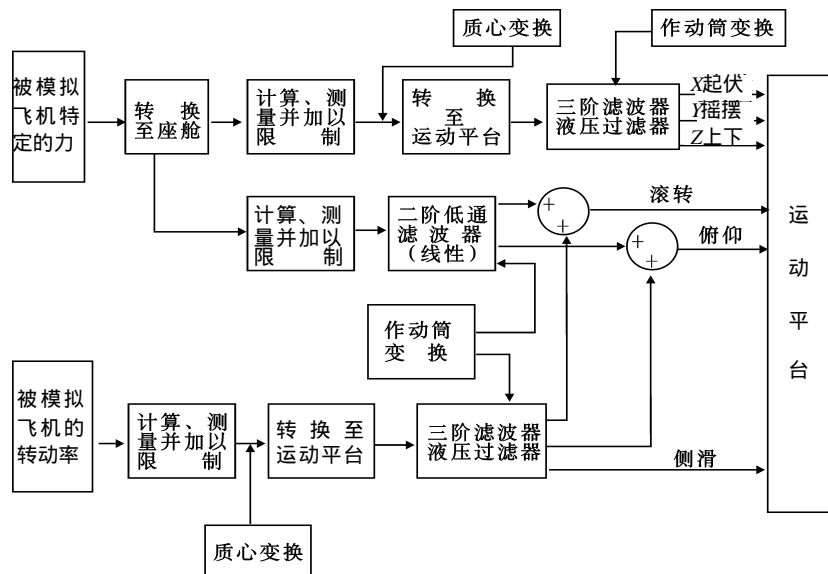
计算作动筒长度就是求作动筒矢量  $L_i$  的模, 即计算如下

$$L_i^T L_i = \{TD_i + R - F_i\}^T \{TD_i + R - F_i\} \tag{15}$$

展开成标量公式, 并代入已确定的结构参数, 和当前的平台驱动变量, 就可求到  $i=1\sim 6$  的六根作动筒长度值。

### 3 运动系统的软件流程及系统工作原理

#### 3.1 运动系统的软件流程



如图5所示, 被模拟飞机特定的力和转动率, 经过线性通道和角度通道分离后, 其中“特定的力”被分成了两路。经过计算、测量并加以限制后分别送至三阶滤波器及二阶线性低通滤波器、“转动率”也经过计算、测量并加以限制后送至三阶滤波器。再经过质心变换和作动筒变换, 向模拟机座舱输出起伏、摇摆、上下、滚转、俯仰、侧滑运动姿态, 以模拟飞机飞行过程和飞行状态。

### 3.2 系统工作原理

将计算机、接口、液压伺服系统、运动平台连接成一个系统，其原理如图6所示。每个作动筒由一套液压伺服回路驱动，共有六套相同的液压伺服回路协调驱动六根作动筒。运动系统软件运算迭代速率多采用1/2速率，即比主率低一半，并将作动筒变换和其他特殊限制计算放在专用高速计算机中迭代计算，这样不仅能使运动平台运行平滑，而且能真实的仿真，模拟飞机的飞行状态及飞行全过程。

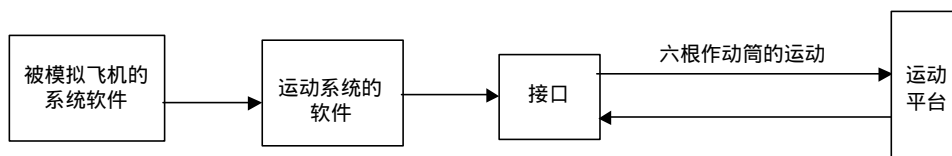


图6 运动系统工作原理图

## 4 结束语

为了使飞行员在模拟机上产生相同的感受，本文通过对运动系统及作动筒运动分析，完成了在软硬件上运动模拟，使飞行员感受到真实飞行的效果与训练目的，降低飞行成本，实现全天候训练。

### 参 考 文 献

- 1 Stanley F, Schmidt, Bjorn C. Motion Drive Signals for Piloted Flight Simulators. NASA CR--1601
- 2 Wang Xing Ren. Flight Simulator Development In China. 18th ICAS 1992
- 3 王行仁. 飞行实时仿真系统及技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993
- 4 CAE Electronics Ltd. Motion and control loading maintenance manual.
- 5 中华人民共和国国家标准 GB/T 14410.1—93 飞行力学概念、量和符号,坐标轴系和运动状态变量. 北京: 1993.4

· 科研成果介绍 ·

### 潜在电路分析技术研究及计算机辅助分析软件开发

主研人员：邵家骏 黄锡滋 田春雨 吕刚德 骆 宁 丁开盛 吕明华 王启德

结合我国实际，在充分跟踪和研究国外SCA技术及其软件开发的最新进展的基础上，展开深入的研究了路径搜索、路径处理等一系列技术关键，提出了独立开发的UEST-611SCA分析方法及其计算机辅助分析软件SCAS。该成果在寻找潜在电路的能力和效率方面与当前美国公开销售的商品SCA相当。

· 科 卞 ·