

# 稳态加速度模拟试验设备： 离心机设计（7）

贾普照

（北京卫星环境工程研究所，北京 100094）

**摘要：**文章分 3 篇 10 章详细介绍了稳态加速度模拟试验设备——离心机的设计。

上篇对稳态加速度环境及其效应、相关试验方法和国家标准作了阐述；中篇（上）系统介绍了国内外离心机发展的历史，提供了较为全面具体的离心机结构概况，并对它们逐一进行小结与点评；中篇（下）对离心机进行基本理论分析，研究总体设计和部件设计问题，提出离心机设计原则及其计算方法；下篇通过一个国家“七五”科技攻关项目的实践作为实例，提供读者作设计参考。

在文章中，作者对多年来积累的技术资料和实践心得进行了系统的整理和归纳，梳理出一条在离心机研制中科学的设计思路和实用的工作程序。该文章对相关领域的研究人员和技术人员会有启发和帮助，同时对其他同类设备的设计也有触类旁通的作用。

文章主要探讨的对象是中型、大型、特大型航空航天物体离心机，土工离心机和载人离心机。

**关键词：**环境模拟；加速度；离心机；设计

**中图分类号：**V416.2；V216.5'6；TH122

**文献标识码：**A

**文章编号：**1673-1379(2010)01-0121-014

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1739.2010.01.026

## 第 4 章 欧美其他国家离心机（续 2）

### 4.4 美国离心机

美国是航空航天大国，当然也是包括载人离心机在内的航空航天离心机大国，研究这些离心机是观察美国的侧重点，可惜缺少细节资料。

在土力学领域，虽然早在 20 世纪 30 年代，美、苏科学家几乎同时率先认识离心模拟方法，但实践中美国比较重视数值分析，只是在 20 世纪后期才又逐渐拾起离心模拟方法。因此，在土工离心机方面的发展美国远不如欧洲和日本蓬勃，而且也不像苏联和英国那样靠自己因陋就简起步，他们的土工离心机基本上都是委托专业单位进行研制，起点较高，但总体水平还是没有达到欧洲的高度。下面介绍几个典型的离心机。

#### 4.4.1 美国国家土工离心机

1987 年 8 月美国加利福尼亚大学戴维斯分校（University of California, Davis, USA）从 NASA 接收了一台半径 9.14 m（主轴中心至平台的距离）

的大型航空航天物体离心机。这台离心机最先于 1984 在阿姆斯研究中心（Ames Research Center）首次运转，属于 1978 年与戴维斯分校双方协作研制的，1987 年才决定搬迁至戴维斯分校。

将航空航天物体离心机转化为土工离心机，虽然只是这台离心机的转变，但一叶知秋，它也具体折射出整个离心机世界的兴衰与变迁动向，需求决定着命运。

限于经费原因，计划分阶段逐渐将其改造为国家土工离心机：

第一步，打基础、筑墙基先将离心机安置在露天，安装一台 1000 马力（相当于 745.7kW）的直流电动机转到 25g；

第二步，修围墙、盖屋顶，借助封闭空间的气团旋转，使机器转到 100g；

第三步，增添一台电动机转到 170g；

第四步，改造供电电网、再增添电动机，使离

收稿日期：2009-07-07；修回日期：2009-12-30

作者简介：贾普照（1937-），男，研究员，主要从事离心机研制和运动模拟器设计工作。联系电话：（010）62351008；E-mail: jiapz@sina.com。

离心机最后达到 300g。

可见，堂堂美国、鼎鼎名校也有着一段艰苦创业的历史<sup>[9]</sup>。

该离心机的基本技术参数为：负载平台的长×宽为 1.82m×2.13m，面积达 3.88m<sup>2</sup>，模型高度可达 1.52m，结构允许安装 3640kg 的有效载荷转至 300g。

图 4-47 表示 1987 年离心机被安置在露天钢筋混凝土基础上，以低速度徐徐转动起来的情况，图中可见吊篮已经被甩起的过程，表示第一阶段目标实现，可以在这种环境下因陋就简地开展实验工作了。

1989 年建起了围护墙（见图 4-48），机器最高转到 53g，准备通过对驱动电机和某些气动方面的改进措施，争取达到 100g<sup>[10]</sup>。在改造之前，他们已经在低加速度条件下积极开展了各种大尺寸模型——小模型率的实验工作，以便将原型缩小为比高 g 值模拟时采用的模型大一些的缩模，而以低 g 值来模拟之。



图 4-47 Davis 离心机第一阶段在露天地坑中转起来  
Fig. 4-47 The Davis centrifuge first stage operating in the outdoor pit

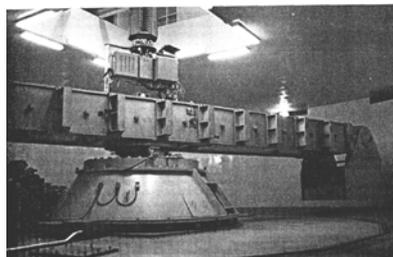


图 4-48 Davis 离心机第二阶段有了实验室  
Fig. 4-48 The Davis centrifuge second stage had a laboratory

1994 年报告了加装大型振动台的信息，即利用离心机低加速度运行状态，改变原计划，增添振动台直接进入复合环境模拟阶段<sup>[11]</sup>（见图 4-49 和图 4-50）。这倒是一个非常聪明的改变<sup>[12,13]</sup>，因为在加速度一时难以上去的阶段，加上一台迟早要添

加的振动台，比提高加速度容易多了，而且离心机马上就变得十分有用。可见，目前它还只是加速度 100g 以下的一台大尺寸复合环境离心机。



图 4-49 Davis 离心机复合振动台状态之一  
Fig. 4-49 Davis centrifuge complex state of the shaking table I



图 4-50 Davis 离心机复合振动台状态之二  
Fig. 4-50 Davis centrifuge complex state of the shaking table II

Davis 离心机基本技术参数为：

- 主轴中心线至吊篮底板 9.1 m；
- 最大有效载荷 4 500 kg；
- 吊篮有效面积 4.0 m<sup>2</sup>；
- 最高运转速度 90 r/min（相当于 75 g）。

驱动系统

- SCR 直流供电系统；
- GE 752 1000 HP DC 电动机；
- Falk 齿轮箱。

旋转接头

- 两对压缩空气；
- 两对油压；
- 一对水；
- 一对 1 000 psi（相当于 6.895 MPa）压缩氮气；
- 备用两对。

汇电环

- 信号环 40；
- 视频环 40（20 路）；
- 电源环 20（10 路）；
- 2 路光纤视觉梯度。

监控离心机和振动台的数采 C-DAQ (centrifuge data acquisition system) 及子网络系统

PC - NGC-Main:

- PCI-6071e —振动台控制器采集数据发送命令的多功能卡;

- PCI-6527 —控制开关与监测信号数字界面。

PC - NGC-Rotunda:

- PCI-6071e —离心机速度控制器采集数据发送命令的多功能卡。

2042-RTD —RTD温度传感器信号调节:

- DIO-24 —控制开关与监测信号数字界面。

ER-16 —继电器开关。

离心机、振动台控制分系统传感器及信号调节监测

- 温度;
- 振动;
- 应变/位移;
- 振动台界面;
- 驱动电机控制;
- 阀。

**警告与限制**

避免停留于引发驱动系统扭转响应频率的下述转速:

32.2 r/min (31.2~33.3 r/min) (约 9~11 g);

64.3 r/min (62.3~66.3 r/min) (约 37~42 g);

72.0 r/min (69.8~74.2 r/min) (约 47~53 g)。

附加的振动台性能如表 4-7 所示。

表 4-7 大型振动台性能规格

Table 4-7 Large-scale shaking table performance specifications

模型及模型箱质量/kg	2 700
对 2 700 kg 最大振动加速度/g	15
最大绝对速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1
最大相对位移/cm	2.5
频率范围/Hz	20~200
模型箱长度/m	1.75
模型箱宽度/m	0.7
模型箱高度/m	0.6
激振器数/个	2
激振器面积/m <sup>2</sup>	0.0081
油压/MPa	35
伺服阀流量(L·s <sup>-1</sup> )	13
35 MPa 油源体积/L	70
1.3 MP 排气储筒体积/L	55

图 4-51 表示 Davis 离心机及其实验室相关尺寸和构造的关系, 图中标识为 M 的是一台 750 kW 的型号为 GE 752 直流电动机, 通过减速比为 2.76:1 的减速器 G 传递动力到减速比为 3.62:1 的转台 T; 再利用转台垂直轴 Sp 上的花键轴, 通过剪切销联轴节驱动离心机转子, 此安全联轴节提供了离心机的过载保护。直流电动机由 50 m 开外的可控硅整流器 (SCR) 通过地沟 U 供电, 齿轮箱冷却水管也从这里穿过来。

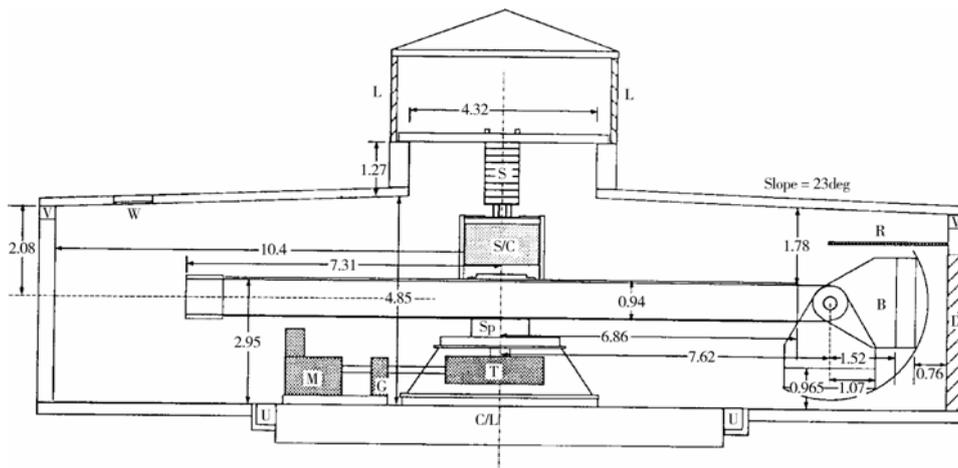


图 4-51 Davis 离心机及其实验室尺寸和构造示意图

Fig. 4-51 Davis centrifuge and its laboratory size and structure diagram

离心机主机室天花板中央留有 4.3 m 见方的开口, 安装 1000 路汇电环组件, 其顶部覆盖木制雨棚; 雨棚延伸至整个屋顶, 在屋顶适当位置留有窗口 W 安装闪频照相机用于观察模型; 而雨棚壁总

计有 19 m<sup>2</sup> 的百叶窗 L, 外墙周顶均布 12 个 0.3m × 2.4 m 通风口 V, 作为主机室冷却空气的风口。

为了测量室内的风速, 沿水平撑角 R 不同位置安置了皮托管 (空速管)。

图 4-52 是 Davis 离心机转子的结构分解图,直接连接着吊篮和配重的主承力件为 4 根 15.2m 长、横截面为 0.076m×0.76m 的高强度钢带,用销子把吊篮和钢带同一个中央焊接件连接起来;为防止横向加速度造成钢带侧弯,焊接件每边都用 11 根拉杆将其拉住,钢带与拉杆之间垫以钢垫圈,提供平滑的滑动表面。图 4-53 为吊篮的结构图。

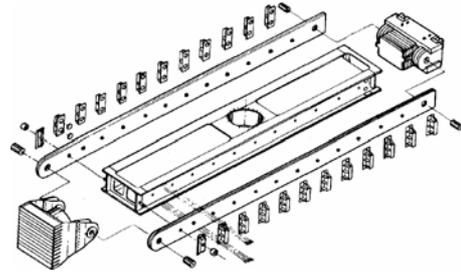
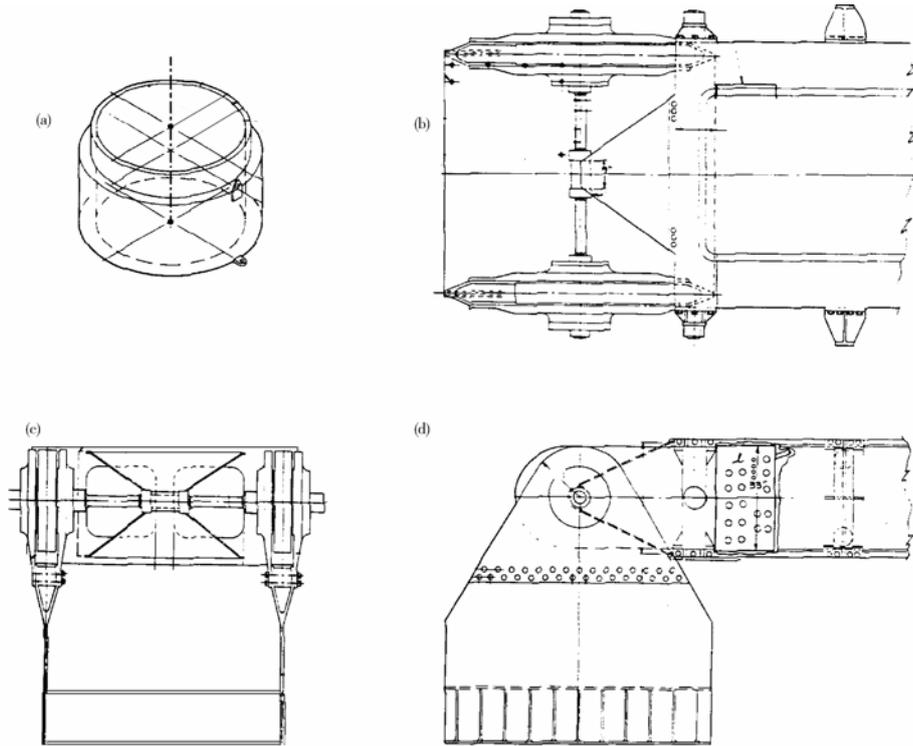


图 4-52 转子结构分解图  
Fig. 4-52 Rotor structure exploded view



(a) 刚性圆柱形模型箱; (b) 顶视图; (c) 吊篮侧视图; (d) 吊篮正视图

图 4-53 吊篮结构图

Fig. 4-53 Basket structure drawing

转臂、主轴、轴承等驱动和支撑零件处都布置了各种测量装置,诸如应变片、温度计、振动传感器等等,以便在运转中对转臂、吊篮、主轴、转台进行实时应力、应变、温度、振动监测。离心机监测和速度控制,集中于计算机数采和控制系统中,32 个传感器分为机上和机外两部分,所有信号都调制到 40m 外的控制室的数采系统:16 个机上通道可以监测承力钢带的拉伸与弯曲,中央焊接件的弯曲与不平衡拉伸,吊篮侧板拉伸与弯曲,承力钢带相对于中央焊接件的偏离值等等;16 个机外通道监测主轴轴承和驱动电机温度,主轴弯曲与剪切载荷,主轴振动,转台振动,电动机电流、电压和速度。检测控制系统方块图如图 4-54 所示。

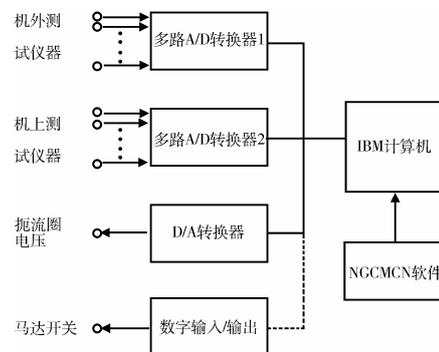


图 4-54 检测控制系统方块图  
Fig. 4-54 Detection-control system block diagram

根据离心机的大惯量以及速度与气动阻力的关系,研发了专用闭环速度控制装置,可假设离心机运动方程为

$$I \frac{d\omega}{dt} + R\omega = T = ki^2,$$

其中： $\omega$  为角速度； $I$  为模型、吊篮、配重及转臂的转动惯量之和，对于 Davis 离心机， $I$  的估算值为  $2.4 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ； $R=R(\omega)$  为表征驱动离心机所需的稳态力矩系数，在低速状态下由于机械摩擦为主  $R$  接近常数，在高速段时支配因素为气动阻力， $R$  正比于角速度的平方（或正比于离心机加速度）； $T$  为驱动力矩，对直流串绕电动机而言，设定它等于系数  $k$  与电流  $i$  平方的乘积。

运动方程表现为一阶非线性方程，可分段线性化予以简化，将其线性化为角速度和电动机电流的函数，闭环系统表示在图 4-55 中。图中  $\omega_e$  为预期速度， $\omega$  为实际速度。闭环控制器为 PI（比例加积分）型，当系统稳定时，将使稳态误差（ $\omega_e - \omega$ ）接近于零。由于电动机电流和离心机的非线性，闭环控制器参数根据实时速度和电流分段予以修正。为此，利用软件通过计算机中断服务不断调节控制器参数来优化系统性能。

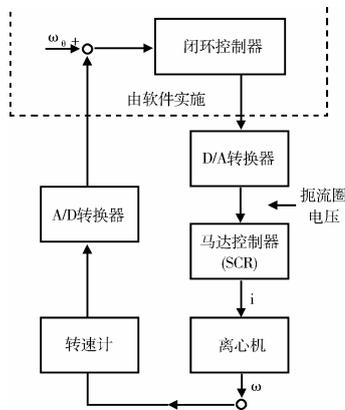


图 4-55 闭环控制系统  
Fig. 4-55 Closed-loop control system

Davis 离心机是目前世界上可承载模型尺寸最大的离心机，但加速度偏低，转子潜能尚未发挥出来，加速度值与载荷容量暂时都不突出，适用于大尺寸模型一小模型率的动态试验。

总体上为**对称转臂，不对称吊篮**构造，这是又一种转子形态；其最突出的结构特点是转臂承力件为**钢带**，使得工艺性变得非常好，因为转臂侧向刚性较弱，吊篮自身相对就需要强壮一些；另外机器没有整流，适当整流也是提高加速度的一个途径。离心机总的特点为：

- 对称转臂，不对称吊篮；
- 固定式配重；
- 配重端与转臂同高；
- 主承力件为钢带；
- 下支撑；
- 下传动；
- 非整流转子；
- 配备振动台。

#### 4.4.2 科罗拉多大学土工离心机

1985 年科罗拉多大学民用环境及建筑工程系委托 Wyle Laboratories 设计，Alabama Dynamics 制造 400gt 土工离心机，1988 年全面运转<sup>[14,15]</sup>，后来又加装了振动台。

图 4-56 为离心机结构透视图，形象地表达了包括实验室在内的基本情况。转臂与 Davis 离心机相仿，由两部分组成：一个基础的盒形结构和两对高强度钢带。前者构成结构的基础，维持整体性；后者承受主拉力。

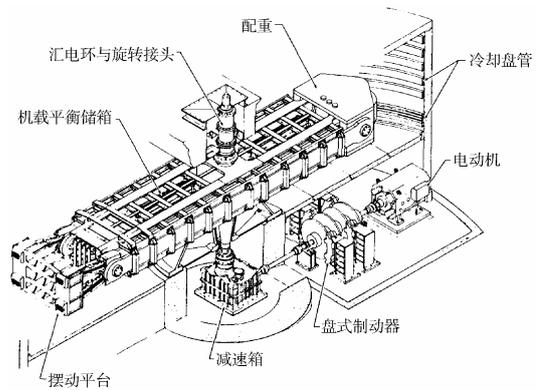


图 4-56 Colorado 离心机结构图  
Fig. 4-56 Colorado centrifuge structure drawing

试验吊篮的结构两者有一些区别：Davis 吊篮为整侧板；而 Colorado 吊篮侧板则为板条结构。

离心机驱动装置和控制室全部置于地下，主机室没有电动机，也就避免了 Davis 实验室那样，对暴露电动机进行整流的麻烦；同时，驱动与控制装置都在地下，变长距离控制与传输为就近进行，都是一个改善，但代价就是增加了建筑物难度，控制室工作环境也不太好。

转臂内部附加了一套运转中自动平衡装置，它是一套由载荷传感器控制的氮气压力驱动的水箱系统。

离心机总体设计上颇具特色：转子刻意不整流，期望尽可能推动室内空气团旋转速度，减小相对风速以降低风阻功率，而室内热量则靠墙壁附加的盘绕式冷却水屏带走。

离心机驱动系统为功率 900 马力 (671 kW) 的直流电动机经 6.4:1 直角伞齿轮减速器带动主轴，于 14 min 内加速到 200 g，中间加了一组 4 个气动盘式制动器，用于电气系统发电反馈制动后进行完全制动或紧急制动时使用。

离心机转动中心至吊篮平台的半径为 18 ft (5.49 m)，有效载荷最大尺寸为 4 ft×4 ft×3 ft (1.22m×1.22m×0.91m)，最大质量为 4000 lb (1814kg)，最高加速度 200 g，则最大载荷容量为 363 gt。

离心机配有 100 个电滑环，3 路油接头，后者可用一路大容量水接头替换。

离心机模型箱和实验室配有各种各样加载及观察、测量装置。

图 4-57 为科罗拉多土工离心机的总体外观图。

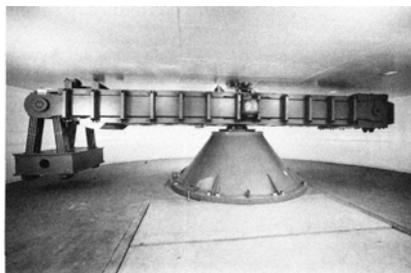


图 4-57 Colorado 离心机外观图

Fig. 4-57 Colorado centrifuge outward appearance chart

科罗拉多大学除了上述大型离心机外，早在 1981 年就拥有一台 Genisco 1230-5 型 15 gt 小型土工离心机，同样加装了振动台，许多实际使用经验多来自这台机器。

科罗拉多大学离心机与 Davis 离心机除了吊篮有些区别以外其余基本相同，其结构特点为：

- 基本对称的转臂；
- 主承力件为钢带；
- 不对称吊篮；
- 板条式吊篮侧板；
- 配重端与转臂同高；
- 固定式配重；
- 运转平衡系统；
- 刻意不整流转子；

- 实验室墙壁配以水冷系统；

- 下传动。

#### 4.4.3 SANDIA 国家实验室航空航天离心机

美国 Sandia National Laboratory 位于新墨西哥州的 Albuquerque，该实验室除了火箭车—滑轨之外还有两台特殊的离心机，那就是罕见的武器试验用物体离心机，一台位于室内，一台在露天。图 4-58 为室内离心机的照片，离心机的规格如下<sup>[16]</sup>。

半径：29 ft (8.84 m)；

载荷容量： $1.6 \times 10^6$  g·lb (725.6 gt)；

最大有效载荷：16 000 lb (7 257.6 kg)；

加速度：到 100 g (轻载荷时最大 300 g)；

最高转速：175 r/min。



图 4-58 Sandia 国家实验室的室内离心机

Fig. 4-58 Sandia National Laboratory indoor centrifuge

典型的试件为：

卫星部件；

再入飞行器；

土工模型；

火箭部件；

传感器；

武器部件。

离心机放置在直径 80 ft (24.38 m)、高 12 ft (3.66 m) 的洁净可调温的地下室内。离心机已经在 100 g 状态下复合了 15 g<sub>rms</sub> 由 50 Hz 到 2 000 Hz 的振动台，有效载荷为 400 lb (181.4 kg)；进一步的发展是研制对 50 lb (45.4 kg) 有效载荷进行可控加速度、振动和双轴自旋的联合试验。

图 4-59 为室外离心机的照片，离心机的规格如下。

半径：35 ft (10.67 m)；

载荷容量：450 000 g·lb (204.08 gt)；

最大有效载荷：10 000 lb (4 535 kg)；

加速度：到 45 g；

载荷 1700lb (771kg) 时，加速度达 270g；  
最高转速：150r/min。



图 4-59 Sandia 国家实验室室外离心机  
Fig. 4-59 Sandia National Laboratory outdoor centrifuge

典型的试件为：

- 爆炸荷载；
- 特大型物件；
- 冲击试验释放物件；
- 火箭发动机点火试验。

如此高的加速度，看来进行土工模型试验也是可以的。

从标识上看出是 Rucker 公司产品，与图 2-3 康维尔离心机相似，具有典型的美国航空航天物体离心机的特征：

- 全整流等长臂不对称吊篮；
- 下支撑下传动。

#### 4.4.4 NASA 加速度模拟试验设备

美国国家航空航天局 NASA 是世界上最大的航空航天机构，承担国防部所有民用火箭及太空计划，进行航空技术、空间科学、生命科学的研究工作，从 20 世纪 50 年代末开始，逐渐建立起各种模拟试验设备，例如位于艾姆斯的生命科学分部重力生物研究中心的 CGBR<sup>[17]</sup> (Center for Gravitational Biology Research) 就有一批所谓国家重力生物实验设备，主要由一系列的离心机组成：小到直径 1 ft (0.3048 m) 细胞用离心机，大到人可生活的超大型离心机，还有直线橇及多轴离心机等设备。

NASA 的设备主要用于小加速度值、长期运行的人造重力生理与心理试验项目，有别于其他载人离心机，它们种类较多，形态奇特，以下列举几种以窥一斑。

图 4-60 为 20 g 离心机，可用于人、细胞、啮齿动物、植物和硬件设备，座舱（图 4-61）具有适合人类生活的环境，其基本技术参数如下。

半径：29 ft (8.84 m)；

有效载荷：1200 lb (544.3 kg)；

加速度：人用到 12.5 g，最大达到 20 g；

最高转速：50 r/min；除持续稳态加速度外还可进行快速加速度模拟，其变化率不详。



图 4-60 NASA 20 g 离心机  
Fig. 4-60 NASA 20g centrifuge



图 4-61 NASA 20 g 离心机座舱  
Fig. 4-61 NASA 20g centrifuge cabin

图 4-62 是一台人力离心机，称为 Human Powered Centrifuge (HPC)，转臂上可头朝里仰卧 1~2 人，靠人力踏动，用来进行生理、心理和功能测试，转臂半径 6.25 ft (1.9 m)，脚部最高加速度可达 5 g，该离心机也可由外人踏动，用于试验正向加速度。

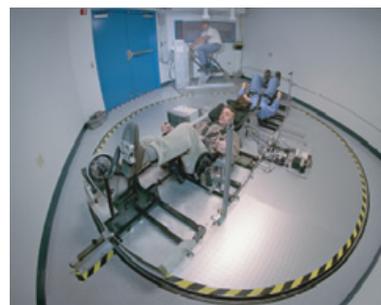


图 4-62 NASA 人力离心机  
Fig. 4-62 NASA manpower centrifuge

图 4-63 为 30 ft 直线滑橇，用来进行前庭和眼球反应研究。载人滑架置于光滑的花岗岩台面上，二者利用低压空气作为支撑即空气垫支撑；驱动采用一系列弹性缆绳，运动完全静寂无声；滑架上安装着座椅，座椅用伺服电机改变其偏航角；滑台的释放与捕获均靠计算机控制，可进行正弦或梯形运动。其基本技术参数如下。

滑台位移：23 ft (7.01m)。

### 梯形运动

加速度：至 1 g；

稳态速度：51 in/s (1.3 m/s)。

### 正弦运动

加速度：0.008~0.5 g；

频率：0.2~0.6 Hz。



图 4-63 NASA 30 英尺直线滑梯  
Fig. 4-63 NASA 30 foot straight line sled

图 4-64 为 NASA 的 52 ft 直径离心机，供人、啮齿动物、小灵长类动物、植物进行持续加速度试验。离心机提供两套房间：一套配置专供动物使用；另一套人用。每一套均有 17.7 m<sup>2</sup> 面积，其中又分为 4 个小间，放置折叠床、收放桌、电脑、电视、储物柜等。房间一端设有卫生间，中央为公共面积，置方桌供吃饭、娱乐、交流使用。其基本技术参数如下。

半径：15~20 ft (4.57~6.1m)；

有效载荷：5 000 lb (2 268 kg)；

最大加速度：2 g；

最大转速：21 r/min；

座舱：190 ft<sup>2</sup> (17.7 m<sup>2</sup>)。



图 4-64 NASA 52 英尺直径离心机  
Fig. 4-64 NASA 52 foot diameter centrifuge

图 4-65 为 NASA 的直径 24 ft 离心机，该离心机有 10 根转臂，每一转臂悬挂两个吊篮，吊篮尺寸为 2.2 ft×3.2 ft×1.8 ft (0.67 m×0.98 m×0.55 m)，每一吊篮有 16 个安装位置，这样，同一台离心机的每一次运转过程，就可以有不同的加速度水平，而吊篮都要进行平衡且安装在叉头形状的常平架上，转动过程中自由摆动，得以按合成加速度方向

定位，主要用于小动物、植物和硬件试验。基本技术性能如下：

半径：12 ft (3.66 m)；

最大有效载荷：100 lb (45.4 kg) /每一吊篮；

最大加速度：3 g；

最大转速：30.5 r/min。



图 4-65 NASA 24 英尺直径离心机  
Fig. 4-65 NASA 24 foot diameter centrifuge

图 4-66 为 NASA 多轴离心机，用于检验身体按一定频率转动，导致眼睛运动对前庭反射的表现，来试验小动物对角度或直线加速度与角加速度组合的生理反应。多轴离心机主体两端固定着对称的两个叉头部件，叉头各配置一个试验容器 STC (Specimen Test Container)，内部配备有试验所需的不同装置。

离心机共有 4 根运动轴：主自旋轴；外部高性能自旋轴；内部高性能自旋轴；内部定位轴。

离心机主体围绕主自旋轴旋转，带着 STC 的内常平架与外常平架联接体，并绕外高性能轴旋转。STC 绕内高性能轴转动；STC 还可绕定位轴转动并在运转中锁定方位。离心机可以同时组合两个运动：主自旋运动与其他一根自旋轴的运动；也可没有主自旋运动，仅仅是绕内、外高性能自旋轴运动。

多轴离心机基本技术性能如下：

主自旋轴速度：240°/s；

主自旋轴加速度：15°/s<sup>2</sup>；

高性能轴速度：±500°/s；

高性能轴加速度：±500°/s<sup>2</sup>；

定位轴速度：55°/s；

定位轴位置界限：±180°。

### 半径

STC 中心：2.62 ft (0.8 m)；

STC 地面：3.44 ft (1.05 m)。

最大载荷：54 lb (24.5 kg)。

### 最大加速度

STC 中心：1.75 g；

STC 地面：2.13 g。

STC 体积：2.8 ft<sup>3</sup> (0.08 m<sup>3</sup>)。



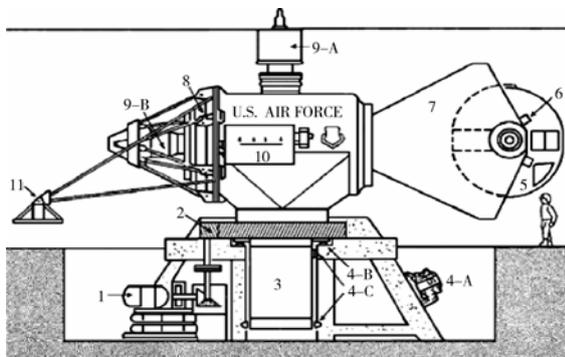
图 4-66 NASA 多轴离心机  
Fig. 4-66 NASA multiple spindle centrifuge

NASA 重力生物研究中心的各种各样加速度试验设备，让我们接触到一些另类离心机和其他一些试验装置，足以使我们扩展了视野。

#### 4.4.5 HEPG空军研究实验室离心机

据称自 1935 年就开始应用离心机进行科学研究长达 70 余年的美国空军研究实验室 HEPG (Human Effectiveness Protectorate-G)，位于美国俄亥俄州代顿的赖特帕特森空军基地 (Wright-Patterson Air Force Base in Dayton, Ohio)。

1967 年 (有资料称为 1969 年，取其早者) 他们就开始运转了一台三轴载人离心机，被称之为动态环境模拟器 (Dynamic Environment Simulator，简称 DES)，终于在 2007 年 2 月运行 40 年以后退役。尽管该离心机已经退役，但是它完成如此之长的历史使命值得尊敬，而且其构造也还是非常值得回顾的。其结构和外形分别如图 4-67 和图 4-68 所示<sup>[18,19]</sup>。



1-主驱动直流电动机；2-大小齿轮副；3-主轴；4A-静压轴承油源；4B-径向静压轴承；4C-止推静压轴承；5-座舱；6-座舱驱动马达；7-叉头；8-叉头驱动马达；9A-主臂汇电环；9B-叉头汇电环；10-主臂；11-试验平台

图 4-67 HEPG 动态环境模拟器结构示意图

Fig. 4-67 HEPG dynamic environment simulator structure schematic drawing



图 4-68 HEPG 动态环境模拟器外形图

Fig. 4-68 HEPG dynamic environment simulator outline drawing

在每一套汇电环尾部还附加一套液压旋转接头；座舱轴也有一套汇电环部件，很可能没有液压接头。

DES 主要技术指标，不同资料出入颇大，取其高者列于如下。

半径：6 m；

最高加速度：20 g；

加速度增长率：<1 g/s；

有效载荷：1 364 kg。

除有效载荷大以外，其他指标与现代载人离心机不能相比，但其使用之久，说明仍有其存在价值，就看如何利用了。

该离心机被称之为主臂的部分短而粗，几乎与转台尺寸相当，不像是一条臂；倒是叉头部件更像是转臂，它伸出去构成了旋转半径的主要几何尺寸。如果根据“构成离心机主要结构参数——设计半径的重要构件”的定义来衡量，说它是转臂也无不可，不过这个转臂特别之处是可以绕自己的中心轴转动，一般叉头在离心机里都是固定不动的部件，因此，无论叉头还是转臂能够自转皆为其一大特点。

从图 4-69 可见，叉头转动构成了受试者眼水平的俯仰运动，座舱构成滚转运动，座椅构成偏航运动。

该离心机的转子靠全静压轴承系统支撑，我们 1986 年开始研制的特大型人一物两用离心机也是全静压轴承系统，是因循自己大型物体离心机的静压导轨发展而来，可见，20 世纪 60~70 年代静压技术比较时髦，至少大型轴承当时还不成熟，包括我们的座舱常平架内外环间，不得不采用自制钢丝

轨道轴承也是一例。这台离心机叉头所用轴承应该也是大型轴承，何种支撑形式具体情况不详；此外，

叉头驱动是大电机还是电动机-齿轮副传动也不详。总之，叉头自转独出心裁，值得关注。

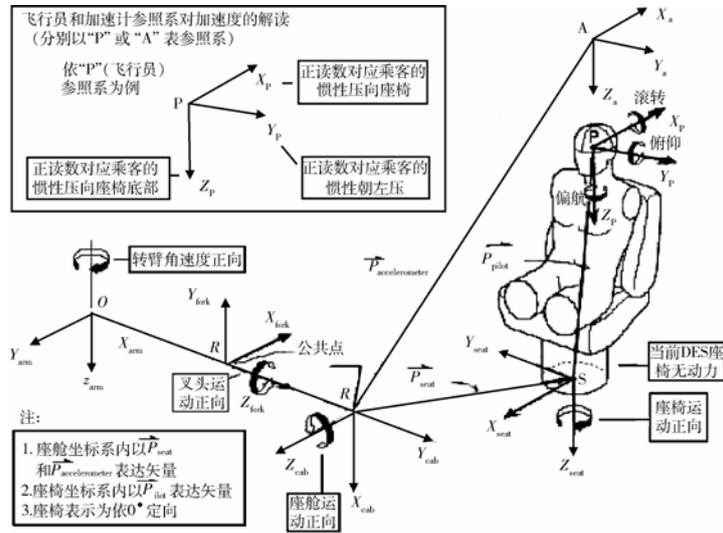


图 4-69 HEPG DES 参考坐标系及其定向图

Fig. 4-69 HEPG DES reference coordinate system and orientation chart

该离心机结构庞大，转臂半径 6m 而座舱直径就达 3m，整个转子呈短粗状，形状怪异，加上中央主臂和转台，总质量高达 163t。

离心机的配平关系不清楚，难道就因为转速不高全靠粗壮的主轴和全静压轴承承担吗？总之，这也是一台另类的低加速度离心机。

#### 4.4.6 美国商品离心机

由于美国研究单位很少去自行研制离心机，基本都是委托研制或采购商品离心机，因此离心机制造商出现得早，数量也多，以下介绍两家。

##### 4.4.6.1 Wyle Laboratories 离心机

维勒实验室 (Wyle Laboratories) 是美国著名实验设备制造商<sup>[20]</sup>，擅长于航空航天生命科学研究训练设备的研制，长期执行美国国防部、NASA、美国海军等军事部门的各种研发计划，也参与其他民用商业活动，早在 1960 年因支持水星空间计划的加速度研究和训练任务，成为航空医学技术的先驱，首台离心机具有稳态加速度 20 g 并配备振动和声环境；上世纪 90 年代中期，购入爱姆荣工程公司 (Emro Engineering Company) 陆基训练模拟器和动态运动模拟器生产线的同时也获得了一批从事 35 年运动模拟和空间模拟设备的工程师，从而进一步扩大了业务范围。

维勒实验室可以完成包括设备实验室及其附属设施在内的交钥匙工程，主要产品是离心机、运动模拟器、空间定向训练器、转台及低压舱等。而航空航天人用离心机以及依托离心机为基础的动态飞行模拟器，包括单轴、双轴以至三轴常平架系统。

Wyle 离心机涵括 4 种类型：物体离心机，综合环境离心机，土工离心机，人用离心机。

##### (1) Wyle 物体离心机

Wyle 物体离心机可以根据用户对不同半径、不同载荷以及各种加速度组合的要求，照单个体研发，可参照标准的组合系列，如表 4-8 所示。

表 4-8 Wyle 物体离心机标准组合

Table 4-8 Wyle object centrifuge standard combination

加速度/g	有效载荷/kg
5 600	0.9
400	227
250	45
500	45
100	250
100	136
100	45

从系列表观察到，他们的物体离心机有效载荷并不太大，加速度从低到高都有。

转臂可采用钢制也可用铝，吊篮可对称也可不对称；驱动系统采用液压或直流电机，控制部分可手动也可自动。总之，随君属意，点到即有。

## (2) Wyle 综合环境离心机

Wyle 综合环境离心机用于敏感的电子或机械零部件进行品质检验,可综合各种自然和诱导环境,如振动、加速度、温度、气候和高度,基本结构是在离心机转臂一端利用绝热耳轴固定振动、气候/高度舱,而耳轴可将振动台定向到与离心机主轴平行或者垂直的不同方向。Wyle 典型综合环境试验设备 CETS (Combined Environment Test System) 具有如下性能。

### 离心机子系统

最大有效载荷: 55 lb (25 kg);  
最大加速度: 50g (试件质心处测量);  
试件最大加速度梯度:  $\pm 10\%$ ;  
加速度变化率:  
0~10g 不大于 2 min;  
10~50g 不大于 5 min;  
50~100g 不大于 10 min。

控制台: 读转数与时间; 转数读出: 数字误差  $\pm 1\%$ ;

驱动: 直接液压马达;  
转速控制: 液压伺服  $\pm 2\%$ ;  
安全互锁: 超速及液压系统过热。

### 振动台子系统

50g 条件下横向或轴向气冷振动台;  
最大有效载荷: 55 lb (25 kg);  
加速度: 有效载荷 55 lb (25 kg) 时正弦峰值为 20g;

频率范围: 10~2000 Hz;  
最大振幅: 峰-峰值 1.0 in (2.5 cm);  
正弦或随机波;  
安全互锁: 过调和过热。

### 气候子系统

不锈钢绝热气候室提供高度和温度环境,离心机不动时利用地面调节系统维持实验条件,冷量与热量通过流经电加热器和液氮冷却螺管的热循环液体进行热交换。

离心机运转时,地面系统断续工作,机上真空泵抽空并维持所需高度环境。

### 温度

范围:  $-65\sim 300^{\circ}\text{F}$  ( $-36\sim 167^{\circ}\text{C}$ );

热载荷: 来自试件, 连续 500 W;

加热速度: 连同内部 500 W 载荷, 由  $60\sim 300^{\circ}\text{F}$  ( $33\sim 167^{\circ}\text{C}$ ), 不大于 30 min;

冷却速度: 连同内部 500 W 载荷, 由  $95\sim -65^{\circ}\text{F}$  ( $+53\sim -36^{\circ}\text{C}$ ), 不大于 45 min;

安全互锁: 过温和欠温。

### 高度

范围: 0~70 000 ft (0~21 336 m);

变化率: 静止或转动, 0~70 000 ft (0~21 336 m), 15 min 之内;

测量设备: 高度/时间控制器及记录仪;

安全互锁: 当过海拔状态时。

### 结构

室内空间:  $40\text{ in}^3$  ( $655\text{ cm}^3$ );

不锈钢内表面;

测量电缆端口。

### 综合实验性能

加速度、振动及气候: 15 min;

振动和气候: 48 h;

加速度和振动: 15 min;

加速度和气候: 15 min。

综合环境航空航天物体离心机在我国还是空白, 主要可能还是试验方法和试验标准方面的原因, 为什么美国要进行这样的试验值得研究。

## (3) Wyle 土工离心机

Wyle 土工离心机, 如 Colorado 土工离心机, 此处不加赘述。

## (4) Wyle 人用离心机

### • Wyle 载人离心机

如图 4-70 所示, 其技术性能如下。

半径: 6.1 m;

舱体积:  $7.2\text{ m}^3$ ;

有效载荷: 680 kg;

加速度: 1~30g;

加速度变化率: 0.1~6 g/s;

峰值功率: 1.5 MW;

控制形式: 程序控制或人控;

闭环控制: 包括 F-16 飞行模式;

42 in 等离子显示屏。

美国空军 HEPG Brooks 基地配备此离心机。



图 4-70 Wyle 载人离心机  
Fig. 4-70 Wyle manned centrifuge

#### • Wyle 动态飞行模拟器 DFS (Dynamic Flight Simulator)

Wyle 动态飞行模拟器被加拿大和美国空军使用，瑞典航空航天医学训练中心也配备了它，其外形和视窗效果分别如图 4-71 和图 4-72 所示。



图 4-71 Wyle 动态飞行模拟器  
Fig. 4-71 Wyle dynamic flight simulator

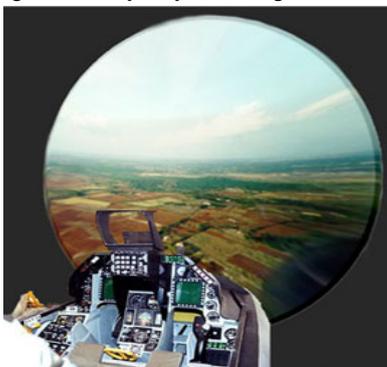


图 4-72 Wyle 动态飞行模拟器视窗系统效果  
Fig. 4-72 Wyle dynamic flight simulator Windows system effect

Wyle 动态飞行模拟器的主要技术性能如下。

- 半径：30 ft (9.14 m)；
- 最大设计加速度：15 g；
- 有效载荷：1 150 lb (521.6 kg)；
- 启制动变化率：0~15 g/s；
- 双常平架座舱：滚转与俯仰；
- 座椅感知反馈；
- 抬头低头及窗外视觉系统；
- 生物医学检测系统；

提供地基模拟器功能；

离心机可以开环控制，用于  $G$  试验与  $G$  锻炼；或闭环控制，用于  $G$  容差生理学、空间定向、人/机界面研究、战术机动训练和教学。

总之，该离心机具有如下一些特点：

- 离心机转子由大扭矩直流电动机直接驱动，其质量也由电机直接传给地基；
- 球形座舱具有全旋能力，可按飞机座舱进行配置；
- 控制系统可模拟飞机动态响应特性；
- 再现所试飞机的控制算法，气动力学和发动机特性；
- 知觉算法与 DFS 控制系统相结合，造成一般离心机所没有的逼真感；
- 窗外、抬头、低头显示与 DFS 运动及驾驶员控制输入相结合；
- 闭环模态下飞行员全指令实飞；
- 运行过程医学检测资料实时传输；
- 用于高加速度训练的预编程模态；
- 用户可修正的模态。

瑞典航空航天医学训练中心的图片见图 4-73 和图 4-74<sup>[21]</sup>，它是 2001 年配备的。图 4-75 是该 DFS 安装前的转子图片<sup>[22]</sup>。



图 4-73 瑞典的 DFS  
Fig. 4-73 Sweden's DFS

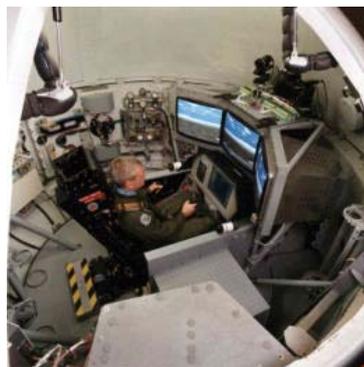


图 4-74 DFS 舱内  
Fig. 4-74 In DFS cabin



图 4-75 安装前的瑞典空军 DFS 转臂与座舱  
Fig. 4-75 Swedish Air Force DFS Arm and Gondola Before Installation

#### 4.4.6.2 ETC 载人离心机

美国环境构建公司 (Environmental Tectonics Corporation, ETC) 由其总裁和首席执行官 William F. Mitchell 先生于 1969 年创立, 他原是宾夕法尼亚州费城 (Philadelphia, Pennsylvania) 郊区一名乡村高尔夫俱乐部的年轻人。公司处女作是 1971 年为美国海军研制快速减压舱, 在这基础上发展了一系列低压舱类设备, 如生物学、杀菌消毒、试验模拟等系统; 后来迎合社会需求逐渐发展到空勤人员训练设备, 如今俨然成为当家技术; 1999 年后, 运动模拟技术工程尤为突出。

国家宇航训练研究中心 (The National Aerospace Training and Research Center) 是 ETC 全资子公司, 装备了 ETC 的最新设备, 供军、民、个人航空航天模拟试验和训练之用, 主要设备有<sup>[23]</sup>:

##### (1) G-Lab 单轴 4000 型载人离心机 (图 4-76)

该离心机的技术性能为:

旋转半径 6.1 m;

最大有效载荷 318 kg;

最大径向加速度 15 g;

由怠速 1.4 g 开始最大启动率 8 g/s;

舱内配有窗外视景显示器;

配备中央及侧面操纵杆;

座椅靠背角度可调 13° 或 30°, 适应大多数战斗机几何角度;

航空座椅可旋转 90°, 使受试者暴露于横向加速度环境下。该离心机应用于美国空军战术部队。



图 4-76 G-Lab 4000 型单轴载人离心机  
Fig. 4-76 G-Lab 4000-single axle manned centrifuges

##### (2) G-FET II 双轴载人离心机 (图 4-77)

该离心机的技术性能为:

转臂 7.6 m/系统自然频率 10 Hz;

最大有效载荷 350 kg;

最大径向加速度 15 g, 用于训练;

最大径向加速度 25 g, 用于研究;

由怠速 1.4 g 开始最大启动率为 10 g/s;

$g_x$  最大值为  $\pm 10 g_x$ ;

$g_y$  最大值为  $0 \sim 8 g_y$ ;

主驱动为大力矩直流电动机联接精密直角减速器;

俯仰+180°~-90°, 滚转+10°~+100°, 由同步电动机带齿轮箱驱动;

舱内配有窗外 120°×50°视景显示器;

座椅靠背角度可调 13° 或 30°, 适应大多数战斗机几何角度。



图 4-77 G-FET II 双轴载人离心机  
Fig. 4-77 G-FET II two axle manned centrifuge

G-FET 系列双轴载人离心机俯仰与滚转运动如图 4-78 所示, 这类离心机加速度变化率最大可以做到 15 g/s, 适应目前甚至未来战斗机性能, 执行如图 4-79 空战机动飞行剖面, 成为其最现代的载人离心机或动态飞行模拟器之基础。

离心机转臂采用复合材料或硬铝合金制造, 最小安全系数按极限强度为 5.85, 系统自然频率达到 10 Hz。

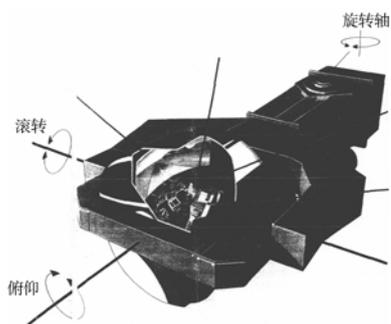


图 4-78 G-FET 系列双轴载人离心机  
Fig. 4-78 G-FET series two axle manned centrifuge

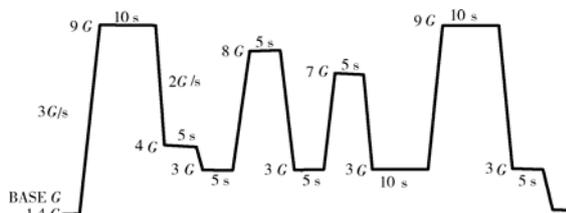


图 4-79 典型空战机动曲线  
Fig. 4-79 Typical air-combat maneuver curve

### (3) ATFS-400 战术飞行系统 (图 4-80 和

图 4-81)

该离心机的技术性能为:

旋转半径 7.6m;

(最大有效载荷 350 kg);

最大径向加速度 15g;

最大启动率 10g/s;

$g_x$  最大值为  $\pm 10g_x$ ;

$g_y$  最大值为  $0\sim 8g_y$ ;

主驱动峰值为 6 000 HP(4 474.2 kW)的感应电动机;

三套精密可控电动-机械运动驱动系统;

与飞机机动飞行相协调的精密加速度矢量定向控制;

俯仰  $\pm 360^\circ$ , 滚转  $\pm 360^\circ$ ;

舱内配有窗外  $120^\circ \times 70^\circ$  视景显示器;

力反馈控制。



图 4-80 ATFS-400 战术飞行系统视图 1  
Fig. 4-80 ATFS-400 tactic flight system view 1



图 4-81 ATFS-400 战术飞行系统视图 2  
Fig. 4-81 ATFS-400 tactic flight system view 2

### 参考文献 (References)

- [9] Cheney J A, Kutter B L. Update on the US national geotechnical centrifuge[J]. Centrifuge, 1988-04
- [10] Kutter B L, Li X-S, Sluis W, et al. Performance and instrumentation of the large centrifuge at Davis[J]. Centrifuge, 1991
- [11] Using nees to investigate soil-foundation-structure interaction[C]//13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2344
- [12] Kutter B L, Idriss I M, Khonke T, et al. Design of a large earthquake simulator at UC Davis[J]. Centrifuge, 1994
- [13] Centrifuge features and limitations[R]. Centrifuge SSDB document, 2004
- [14] Ko H-Y. The Colorado centrifuge facility[J]. Centrifuge, 1988
- [15] Centrifuge Facilities, University of Colorado Department of Civil Environmental and Architectural Engineering[EB/OL]. <http://civil.colorado.edu/web/grad/geotech/faci/centrifuge/index.html>, 2008
- [16] Centrifuge/Superfuge[EB/OL]. <http://www.sandia.gov/vqsec/SON-CF.html>
- [17] NASA CGBR[EB/OL]. <http://cgbr.arc.nasa.gov/>
- [18] Butcher R K. composite data from centrifugal experimentation regarding human information processing[EB/OL]. [http://www.ohiolink.edu/etd/send-pdf.cgi/Butcher%20Ronald%20K.pdf?acc\\_num=wright1182285671](http://www.ohiolink.edu/etd/send-pdf.cgi/Butcher%20Ronald%20K.pdf?acc_num=wright1182285671), 2007
- [19] Van Poppel J A, Pancratz D J, Rangel M H, et al. Model validation and design for the dynamic environment simulator[J/OL]. <http://www.stormingmedia.us/53/5321/A532163.html>
- [20] Wyle Laboratories[EB/OL]. <http://www.wylelabs.com/aboutwyle.html/>, 2008
- [21] Kiefer D. Swedish dynamic flight simulator update[J/OL]. Acceleration Research News, 2001, 2(1), <http://www.flightmed.com.au/IAW2001Newsletter.PDF>
- [22] <http://www.flightmed.com.au/workshop.html>[EB/OL]
- [23] The National AeroSpace Training and Research Center[EB/OL]. <http://www.nastarcenter.com/>, 2008