

导弹特种装备与训练模拟系统研制

黄先祥, 谢建, 高钦和

(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

[摘要] 导弹特种装备与模拟训练系统综合运用多学科先进技术, 建立了数十个数学、物理和网络模型, 研制出上百台仪器设备, 实现了导弹全武器系统与发射全过程的模拟。简要介绍了系统的组成、功用和简要技术方案。对大型高可靠液压系统设计、自动调平与起竖的实现、导弹高精度定位、大型复杂电器系统电磁兼容设计等主要技术问题做了详细论述。

[关键词] 导弹; 训练模拟; 液压系统; 细分控制; 电磁兼容

1 引言

导弹武器系统属高技术密集, 操作动作多, 协同面广, 需反复地进行操作训练。而导弹又是一次性使用武器, 利用实弹发射进行训练的机会极少。即使利用实装进行操作, 由于武器系统价格昂贵、使用寿命短、耗资大等原因, 使操作次数受到严格限制, 存在着训练需反复操作而实装保证困难的矛盾。为此, 研制特种装备与训练模拟系统代替实装进行操作训练是十分必要的, 这对于促进军事训练手段的现代化具有重要意义。

2 系统的功用和组成

2.1 功用

1) 进行模拟操作训练。系统可进行头、体、地全武器系统及发射全过程测试、操作、发射训练, 并具有系统自检、故障设置与诊断、操作示范教学、训练成绩自动评定等多项功能。

2) 进行射击可能性分析、火力计划拟制、飞行过程模拟、落点预报、打击效果评估等项训练, 为作战技术决策提供科学依据。

3) 进行作战运用研究、新型号武器方案论证

及其他研究工作。

2.2 组成

该系统由发射阵地、技术阵地、作战应用与技术决策三大部分共 11 个分系统组成, 如图 1 所示。

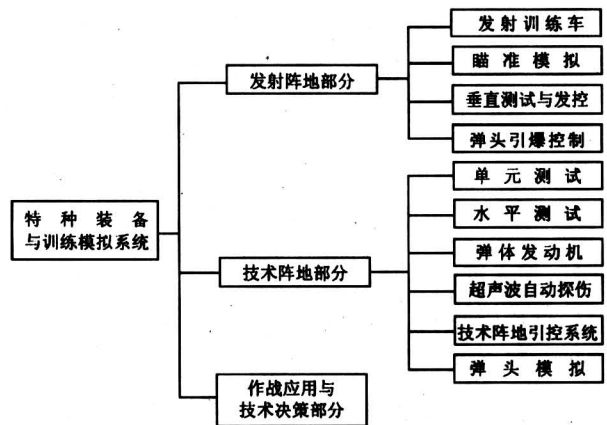


图 1 特种装备与训练模拟系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of the special equipment and simulation training system

3 简要技术方案

3.1 发射阵地部分

如图 2 所示, 发射阵地部分包括发射训练车、

瞄准模拟、垂直测试与发控、弹头引控四个分系统。发射训练车由牵引车、拖车、电控系统、液压系统、发射装置五部分组成，完成对导弹的起竖、调直、回转等项任务，同时又是弹头、控制、瞄准模拟弹上部分的安装平台，可以进行整个发射阵地的操作训练。垂直测试与发控分系统主要是模拟弹上计算机、姿态稳定系统、制导系统、安全系统、

电源系统的各项性能参数，向地面各测试设备发送信号，从而完成垂直测试与发控的训练任务。弹上瞄准模拟平台能模拟平台的转动，向地面瞄准设备返回光电准直信号，与地面瞄准设备配合，共同完成瞄准任务。弹上弹头引控模拟器与地面弹头监控装置共同完成对弹头参数装订、测试任务^[1]。

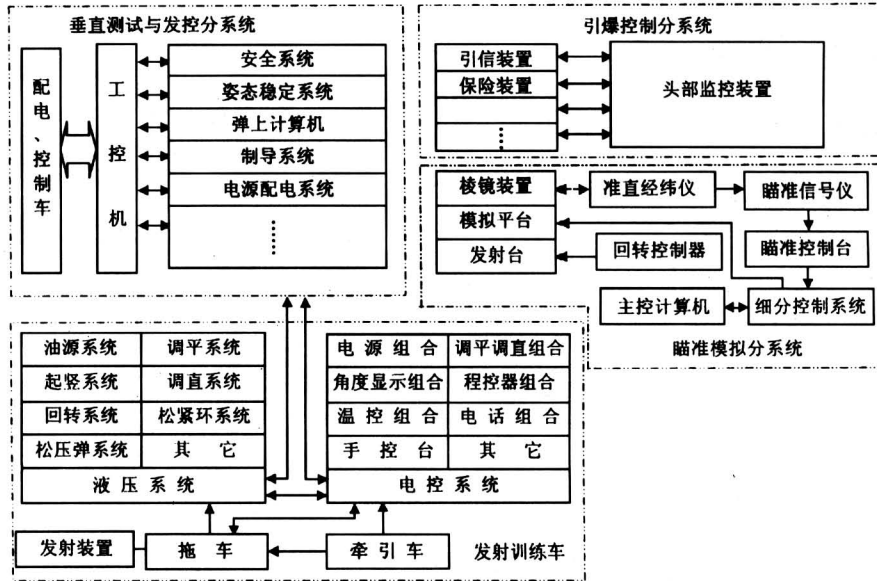


图 2 发射阵地部分组成框图

Fig.2 Block diagram of the launching site part

3.2 技术阵地部分

技术阵地部分由单元测试、水平测试、弹体发动机、超声波自动探伤、弹头模拟、引控模拟六个分系统组成，如图 3 所示。水平测试弹上模拟器主要模拟平台等弹上仪器的性能参数，通过配电转接箱送至地面测试设备，对导弹控制系统进行水平测试。单元测试模拟分系统采用计算机仿真方案，模拟弹上仪器单台测试时的性能。弹体发动机模拟系统是由弹上和地面两部分组成，采用实物仿真与计算机模拟相结合的方案，用来模拟保险机构、火工

品等的测试情况。超声波自动探伤分系统主要用于对弹体的探伤训练。弹头模拟分系统主要用于装配训练。引控模拟采用计算机与红外收发技术有机结合，实现对高频引信机的仿真^[2,3]。

3.3 作战应用与技术决策部分

如图 4 所示，它由资料收集与处理、火力计划拟制、模拟飞行、打击效果评估等部分组成，主要用于作战应用和技术决策方面的训练。

4 主要技术问题

4.1 大型高可靠性液压系统设计

发射训练车是整个系统的核心装备，需要完成调平、起竖、调直等几十个工作步骤的动作。液压系统庞大复杂，包括油源、调平、起竖回平、调直、回转、松紧环、松压弹等 7 个分系统，液压系统设计要确保系统运行的平稳性和高可靠性。

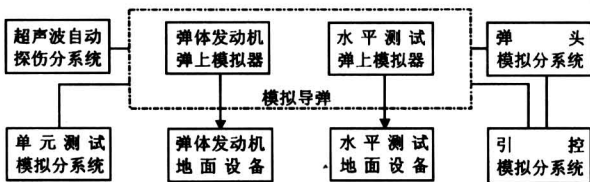


图 3 技术阵地部分组成简图

Fig.3 Block diagram of the technique site part

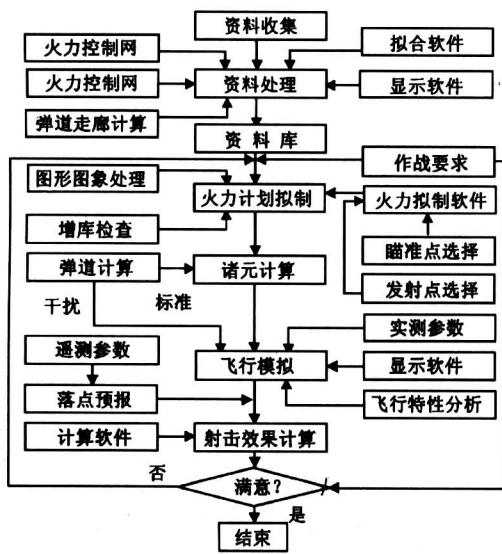


图 4 作战应用与技术决策部分原理框图
Fig.4 Block diagram of the technique decision-making part

4.1.1 液压系统控制方案的确定。在发射训练车起竖过程中，由于负载的变化和多级油缸的截面积不同，为了防止多级油缸各级到位时发生冲撞，在换级时需减速运行，因此在起竖过程中液压系统的角速度、压力、流量的变化是很复杂的曲线关系，如图 5 所示。如采用传统控制方案，其压力和流量变化难以满足理论要求，在设计中我们采用新的计算机—电液比例控制方案，根据起竖角度的大小，利用计算机实时控制系统中的压力和流量，从而达到平稳起竖的目的。

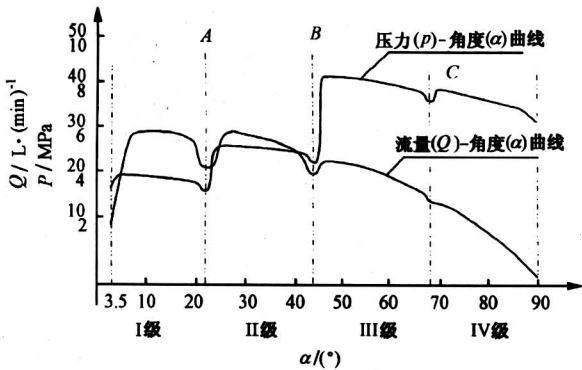


图 5 起竖过程中的流量、压力随角度变化曲线
Fig.5 Graph of the flux and pressure changing with the erection angle

4.1.2 在液压阀设计上，如果采用传统的分立元件设计系统，需用 150 多个液压元件，560 多根液压管路。本系统采用先进的组合逻辑阀结构，设计了 4 个集成逻辑阀，液压管路减少到 122 根，大大简化了结构，提高了工作可靠性。

4.1.3 在液液压油缸设计中，针对起竖油缸为多级缸、行程长、倾斜使用的特点，运用最新自动补偿密封技术，设计了新型组合密封结构，成功地解决了大型倾斜式多级油缸存在的划伤和漏油的难题。

4.2 发射装置自动调平起竖过程控制

发射训练车是一个机电一体化的复杂系统，要求它具有调平、起竖、调直、回转、回平等多项功能，自动调平和起竖是其中最主要的工步，是通过以 PC 工控机为核心的控制系统来实现的，控制过程如图 6 所示。

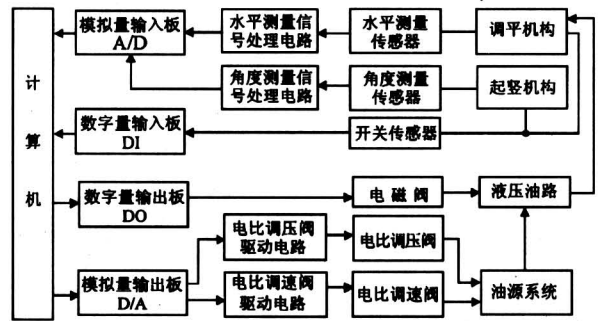


图 6 起竖过程中压力流量自动控制原理框图
Fig.6 Block diagram of the pressure and flux automatic controlling elements in the erecting process

4.2.1 自动调平控制 自动调平控制部分主要由水平测量传感器、信号处理电路、工控机及执行机构四大部分组成。为了保持起竖过程中整车处于良好的受力状态，要求起竖架回转轴应处于精确的水平状态。其水平情况由水平传感器测量，经处理电路处理后送入计算机，由计算机分析判断，一方面输出数字量信号控制相应的油路，另一方面输出模拟量电压，分别控制液压系统的压力及流量，从而控制液压支架的升降，进行调平，同时，水平传感器又随时反馈状态变化信息，构成实时闭环控制系统，实现自动调平。

为了测量起竖架回转轴的水平情况，在起竖车的前梁（与起竖架回转轴平行）上安装液体摆组

合，由它来敏感水平情况。测量原理示意图如图7所示。

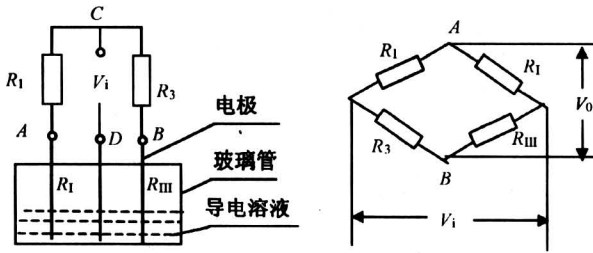


图7 水平测量原理示意图

Fig.7 Sketch map of level measuring elements

当起竖车前梁水平时，液体摆处于水平状态，由于三根电极插入导电溶液的深度及其间距均相等，故两根电极之间导电的离子数相等，因此，其导电的等效电阻 $R_I = R_{III}$ ；当前梁不水平，并在一定范围内出现倾角 α 时，则等效电阻 $R_I \neq R_{III}$ ，电桥电路有输出电压，其大小为

$$V_0 = V \frac{Y_0(R_1 - R_3) + b(R_1 + R_3)\alpha}{(1 + Y_0R_1 + bR_1\alpha)(1 + Y_0R_3 - bR_3\alpha)}$$

$$\approx V \frac{Y_0(R_1 - R_3) + b(R_1 + R_3)\alpha}{(1 + Y_0R_1)(1 + Y_0R_3) + b(R_1 - R_3)\alpha}$$

(1)

式中 Y_0 为液体摆处于水平位置时导电液的电阻值； b 为与液体摆有关的系数； V 为电桥电路的工作电压； α 为液体摆的倾角，即起竖车前梁的不水平度。

当 $R_I = R_{III} = R$ 时，

$$V_0 = \frac{2bRV}{(1 + Y_0R)^2\alpha}$$

(2)

信号处理电路如图8所示。由液体摆敏感出的起竖车前梁不水平的方向和大小的信号，经测量电桥、差动放大、相敏整流和直流放大后，输出一直流电压信号，其大小反映了不水平的程度，极性反映了左右倾斜的方向。此信号一方面送至电表指示

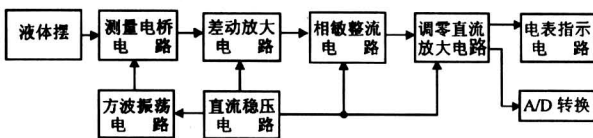


图8 水平测量信号处理电路原理框图

Fig.8 Block diagram of the level measuring signal dealing circuit

电路进行显示，同时经 A/D 转换送入计算机，当输入信号超过某一规定值时，说明水平度超差，计算机根据输入电压的极性，输出开关量信号，控制相应电磁阀，从而切断高端液压支架的油路，而低端的支架继续伸出，逐渐减小水平度偏差，当偏差小于该规定值时，计算机控制左右两支架同时伸出，直至限位行程开关发出到位信号为止，实现了自动调平。

4.2.2 发射装置自动起竖的实现 如图6所示，线性旋转变压器与起竖架回转轴相连，由它敏感起竖角度的变化，其输出电压与起竖角度成线性关系：

$$V_0 = \frac{\delta\pi f W_1 W_2 I_1 \mu_0 r h}{\delta} = K\alpha \quad (3)$$

由线性旋转变压器产生的输出电压经相敏整流放大后，一方面送数显表显示角度，另一方面经 A/D 转换被计算机采集。计算机根据起竖角度的变化，产生控制信号，由 D/A 输出，并经电比驱动电路调理，控制电比调压阀和电比调速阀，从而控制系统的压力和流量。整个控制过程由软件自动实现^[4]。

在图5中 A、B、C 分别表示 I、II、III 级油缸伸出到位时的位置，系统软件依据起竖角度的变化对压力和流量曲线进行拟合，在不同转角段选择一定的压力和流量，在平滑段选择的点较少，而在 A、B、C 三个位置时，增加选择点的密度，构成起竖角度、压力和流量的对应关系表，编制到起竖控制软件中。在运行过程中，系统根据计算机采集的起竖角度值，查表输出相应的电压值，使实际输出的压力和流量值与理论计算值保持基本一致，实现平稳的自动起竖控制。当起竖到 90° 时，计算机发出开关量控制信号，切断油路，停止起竖。

4.3 导弹高精度定位的实现

在对导弹进行瞄准定位时，系统采用“光电对准—计算机步进电机”的闭环控制方案，由计算机控制步进电机微步回转，从而带动模拟平台和弹上棱镜转动，完成高精度定位任务。

光电对准过程中，要求方位角必须控制在数秒范围内，而作为执行机构的步进电机，其步距角通常都在零点几度。即使采用经过细分的步进电机，也远远不能满足要求。因此，研制新型细分控制系统，大幅度提高细分分辨率，就成为精确定位的关键。

对步进电机的步距角进行细分是通过改变步进电机相电流的方法来实现的。一般的细分方法只改变某一相的电流，如图 9 (a) 所示。在 $0 \sim 45^\circ$ (电角度) 范围内， i_A 不变，只有 i_B 在变化；而在 $45 \sim 90^\circ$ 范围内， i_B 不变，只有 i_A 在变化……。这种方法的优点是硬件电路易于实现，但电流合成矢量 i_H 的幅值是不断变化的，致使步进电机的转矩 T_M 亦随之变化，从而引起滞后角 θ_z 的变化，如图 10 所示。这种变化在细分分辨率较低时，可以忽略它对细分角的影响，但在超高分辨率细分的情况下就会吃掉细分角，使细分失去了应有的意义，这也是该方法不能达到超高分辨率的根本原因^[1]。

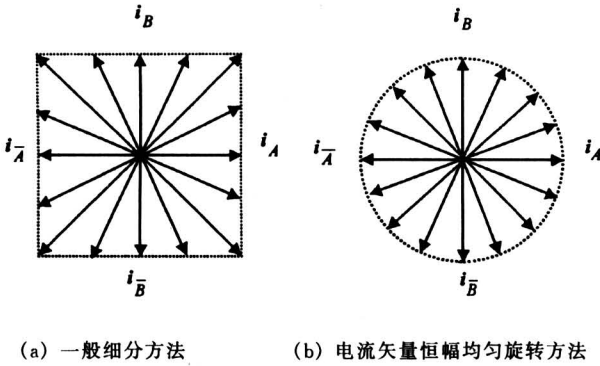


图 9 两种细分驱动方法的比较

Fig.9 Compare of the two sorts of subdivision control method

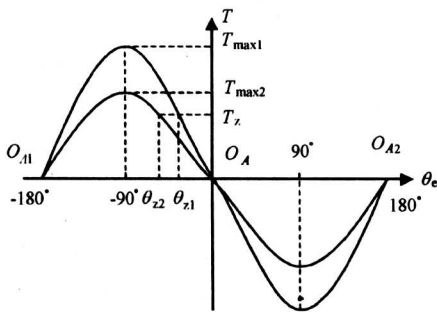


图 10 扭矩峰值对滞后角的影响

Fig.10 Graph of the lag angle affected by the torsion peak value

为此，我们采用“电流矢量恒幅均匀旋转”的细分方法，其电流合成矢量的旋转示意图如图 9 (b) 所示。这种方法的主要特点是同时改变两相电流 i_A 和 i_B 的大小，使电流合成矢量 i_H 等幅均匀

旋转。这样在任意时刻，步进电机的输出转矩保持恒定，在理论上解决了滞后角对细分角的影响。

步进电机电角度的大小由转子的齿数，即齿距角决定。A2060-9212 型步进电机转子上有 100 个齿，齿距角为 $360^\circ/100 = 3.6^\circ$ ，则其电角度为：

$$1 \text{ 电角度} = \frac{\text{齿距角}}{360} = \frac{3.6^\circ}{360} = 0.01^\circ = 36''$$

定向系统选用的是 A2060-9212 型两相混合式步进电动机，其整步角为 0.9° 。细分控制系统实现了 2^{11} (2048) 细分，如图 11 所示。它主要由环形分配器、细分控制函数发生器、三角波发生器、电流调节器、PWM 脉宽调制电路、电流取样电路、功率桥和电源等部分组成。

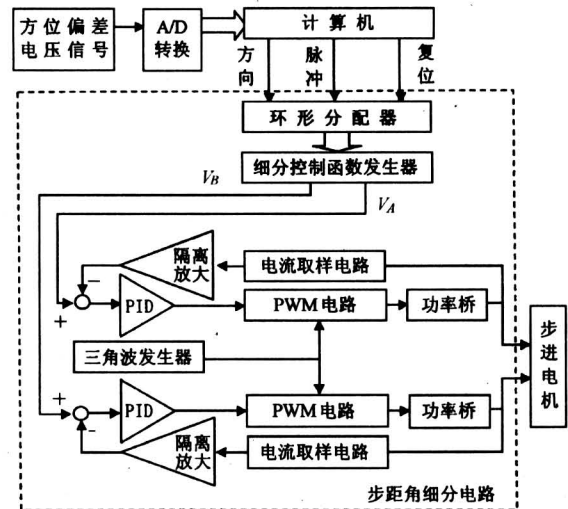


图 11 细分控制电路原理图

Fig.11 Block diagram of the subdivision control circuit

细分控制系统的简要工作过程是：计算机对表示方位偏差的电压信号进行采样，根据两次采样差值的大小和正负，计算控制脉冲的数目、频率和方向控制信号，送到细分控制电路。计算机送出的脉冲信号经环形分配器中的计数器计数与分配，送到细分控制函数发生器，产生大小正比于控制参数 x 的细分控制函数，其中：

$$x = \sum \theta_f = n\theta_f = n \times \frac{90^\circ}{2^{11}}$$

式中 x 的单位为电角度， n 为脉冲数。

细分控制函数可以表示为：

$$\begin{cases} i_A = i_M \cos x \\ i_B = i_M \sin x \end{cases} \quad (4)$$

其中, i_A 为余弦函数, i_B 为正弦函数。当按照(4)式的规律对步进电机 A、B 两相的电流进行控制时, 每当参数 x 变化 1° , 步进电机的转子将转过一个电角度。

正、余弦函数的两路电压, 分别作为电机 A、B 两相绕组电流的控制电压, 经电流调节器放大, 再与三角波电压比较, 其差值电压由 PWM 脉宽调制电路整形为脉宽正比于控制电压的方波信号, 控制功率桥中 VMOS 管的通断。电机绕组 W_B 与 W_A 分别接在两个功率桥的对角线上, 取得正、余弦电流 $i_M \cdot \sin x$ 与 $i_M \cdot \cos x$, 这样每当输入一个脉冲, 电机转子就步进一个微步距角 θ_f :

$$\theta_f = \frac{0.9^\circ}{2^{11}} \approx 1.58''$$

4.4 大型复杂电器系统电磁兼容设计

整个系统涉及仪器设备多, 工作距离远, 导线数量大, 传输信号种类多, 且相互混杂, 干扰问题非常严重, 如不能很好地解决这一问题, 系统将无法正常工作。例如在垂直测试与发控分系统中, 各车辆之间的电缆长度超过 200 m, 仅配电车通过发射训练车与弹上连接的电缆就达 450 多根, 干扰信号一般在 10 V 以上, 个别点甚至超过 80 V。为解决这一问题, 采取了以下措施:

在硬件上, 设计了双 T 型 50 Hz 削波电路和有源带通滤波器; 在软件上, 采用信号特征识别技术, 按照信号的时间特性、状态特性、电平特性与

相关状态关系特性, 识别干扰信号和有用信号, 进行有用信号的筛选和判定。

此外, 还在导弹武器领域首次采用了测控信号光纤传输技术, 有效地抑制了干扰, 使系统工作稳定可靠。

5 结束语

导弹特种装备与训练模拟系统综合运用国内外多项先进技术, 解决了多项技术难题, 在大型液压系统设计、步进电机超高精度细分、复杂电器系统电磁兼容、惯性仪表仿真等方面取得了新的突破, 主要性能指标达到了设计任务书的要求, 在训练的时间、空间、内容和决策层次上比实装有更大的拓展。目前该系统已推广应用, 性能稳定, 工作可靠。

参考文献

- [1] 黄先祥. “92121 系统” 研究报告 [R]. 西安: 第二炮兵工程学院, 1997
- [2] Zhang Boding, Cao Tingzao. Flight simulation technology and flight simulation industry [A]. Proceeding of the 3rd Beijing International Conference on SSSC [C]. October 1995
- [3] Ialob A. Acoust efficiency oriented model for Romanian made helicopter simulator [A]. Proceeding of the 1st CISS Conference [C]. Zurich, August 1994
- [4] 黄先祥, 张志利, 谢建. 起竖控制仪的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 1998, 12 (3): 38~42

Development of the Special Missile Equipment and Simulation Training System

Huang Xianxiang, Xie Jian, Gao Qinhe

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

[Abstract] Advanced techniques in many subjects are adopted synthetically in the Special Missile Equipment and Simulation Training System. Mathematical, physical and network models are built, about one hundred apparatus are manufactured, and the simulation of the whole weapon system and whole launching process is realized. In this paper, the composition, function and the brief scheme of the system are presented briefly. Main technical problems in the design of the large and highly credible hydraulic system, the realization of auto erecting and level adjusting, the missile high precision orientation, and the electromagnetic compatibility design in the large and complex electric system are discussed in detail.

[Key words] missile; simulation training; hydraulic system; subdivision control; electromagnetic compatibility