基于工业以太网的3D动感影院分布式控制系统

结合北京天文馆3D动感影院自动控制系统项目，设计并实现了一套基于工业以太网的3D动感影院分布式控制系统，包括观众升降台系统、6DOF运动平台系统、放映系统、上位机监控系统及通信。采用网络拓扑结构并通过工业以太网通信和串口通信技术实现9台PLC的组网、分布式控制。在TIA Portal V11环境中，采用梯形图和结构化控制语言（Structured Control Language，SCL）混合编程，实现了3D动感影院的自动控制。在控制室应用iFix工控组态软件对整个剧场设备的运行状态实时监控。现场应用表明，该系统操作灵活、运行稳定，各项性能指标完全达到了设计要求。

段建民　郑凯华　刘　丹/北京工业大学智能测控研究所

段建民/教授

关键词/Keywords
三维动感影院·
六自由度运动平台·
可编程序逻辑控制器·
分布式控制系统·
工业以太网通信·
组态软件·

3D动感影院由六自由度运动平台、放映系统、特效设备、银幕系统、音响系统、控制系统和操作监控一体化等子系统构成，运动平台配合相应的影片和剧场效果，可上下升降（自由落体）、左右摇摆、左右旋转（急转弯）、前后运动（如急刹车或加速）、自转（如汽车打滑原地旋转）和上下旋转（如过山车向上爬行），营造出使人身临其境的整体效果。

3D动感影院的分布式控制系统采用工业以太网总线实现主控制柜控制器可编程序逻辑控制器（PLC）与远程控制终端（Remote Terminal Unit，RTU）和操作控制台（Operational Control Console，OCC）之间的的高速数据交换，以便对升降台的升降控制、压杆解锁与锁定及运动基座与影片的同步运动等协调控制，还要对灯光、音效及特效等进行逻辑联动控制；采用RS 232数据通信技术实现主控制柜与放映系统之间的数据通信与数据采集，完成对影片的播放与停止等操作，并能够接收和响应操作人员的控制台命令；监控系统实现动画模拟、参数设定、报警和信号查询等功能。

本文采用了Siemens公司生产的1200系列PLC，主控PLC选择1215C、2个OCC和6个RTU，选择1214C，进行联网控制。放映系统和监控系统均采用性能稳定、抗干扰能力好的工控机。上位机监控选择GE公司的iFix编写监控界面。同时，主控柜中还配有APC公司的不间断电源（Uninterrupted Power Supply，UPS），以避免系统工作过程中突然断电带来的财产损失和人身伤害。

西门子PLC与6DOF动感平台

1. 西门子PLC

S7系列PLC具有体积小、抗干扰能力强、可靠性高、编程指令丰富和扩展灵活等特点。S7－1200 PLC设计紧凑、组态灵活且具有功能强大的指令集。CPU 根据用户程序逻辑监视输入并更改输出，用户程序可以包含布尔逻辑、计数、定时、复杂数学运算以及与其他智能设备的通信。S7－1200系列PLC提供一个PROFINET 端口，支持工业以太网和基于TCP/IP的通信标准。PROFINET 物理接口支持10/100 Mbit/s的RJ45口、电缆交叉自适应。还可使用附加模块通过PROFIBUS、GPRS、RS 485或RS 232网络进行通信，每台PLC最多可以扩展3个

中国知网 https://www.cnki.net

通信模块。

2. 六自由度运动平台

六自由度（6DOF）运动平台由于其极为广阔的应用前景，近几年引起了国内外科研院校广泛的研究兴趣。如图1所示，六自由度运动平台是由6台电动机，上、下各6只铰链和上、下2个平台组成，其下平台固定在地面上，借助6台电动机的伸缩运动，完成上平台在空间6个自由度（X，Y，Z，roll，yaw，pitch）上的运动，从而可以模拟出各种空间运动姿态，六自由度平台可广泛应用到各种领域的训练模拟器，如飞行模拟器、舰艇模拟器、汽车驾驶模拟器、地震模拟器、动感电影及娱乐设备等领域。运动平台运动参数如表1所示。

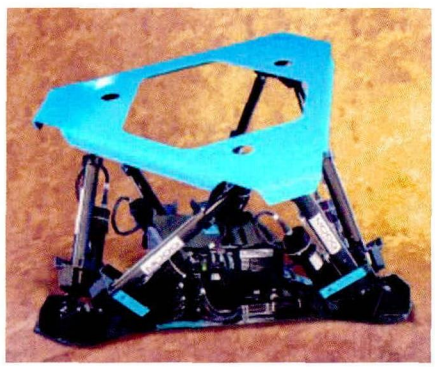


图1　六自由度（6DOF）运动平台

表1　运动平台运动参数

自由度	联合自由度	速度	加速度
俯仰	+25/−23 deg	±30 deg/s	±500 deg/s^2
横滚	±22 deg	±30 deg/s	±500 deg/s^2
偏航	±23 deg	±40 deg/s	±400 deg/s^2
垂直升降	±0.18 m	±0.30 m/s	±0.5g
纵向位移	±0.27 m	±0.50 m/s	±0.6g
侧向位移	±0.26 m	±0.50 m/s	±0.6g

北京天文馆3D影院控制要求与设计

1. 乘客观影过程控制

乘客观影过程控制由主控PLC控制，主要实现压杆锁住与解锁、升降台的升降、影片的开始与结束、影片与运动平台的同步问题和紧急停止等工作，乘客观影过程控制流程图如图2所示。

压杆是安装在座位舱内保证乘客安全的装置，其作用类似于汽车上的安全带，一是防止运动平台运动时乘客自由走动；二是发生危险时能够保证乘客安全。压杆的控制要求是在影片开始放映且运动平台开始动作和升降台降落前，需锁住压杆；当放映结束、运动平台停止运动并且升降台升起后才能解开压杆。同时设计一个释放按钮，当出现不可预测故障时，例如通信错误造成主控PLC无法控制RTU，可以人工释放压杆使乘客离开，撤离剧场。

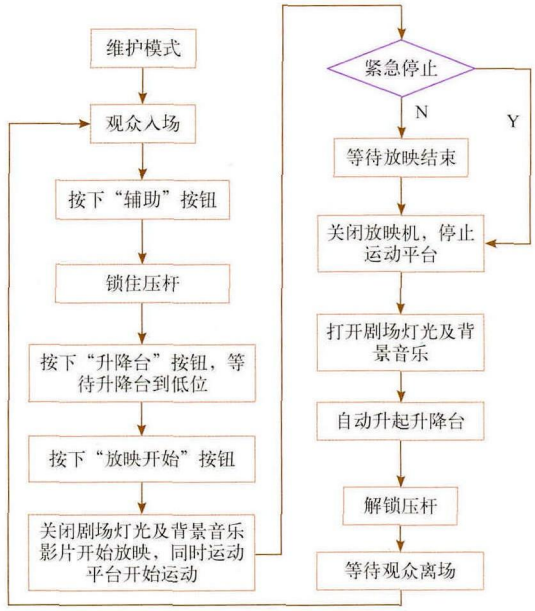


图2　乘客观影过程控制流程图

影片放映开始前，打开灯光，音响播放背景音乐；影片放映时，关闭灯光，音响切换为影片音效；影片放映结束后，打开灯光，音响播放背景音乐。

2. 升降台过程控制

升降台作为观众乘坐驾驶舱观看影片的辅助工具，可以在观众准备登上驾驶舱阶段升起，从而辅助观众更容易地登上高约为1 m的安装在六自由度运动平台上的驾驶舱。尤其当面对身高较矮的观众，例如孩子等，升降台的作用就显得尤为重要。在影片开始放映并且运动平台带动驾驶舱开始运动时，升降台需要降落在地面上，以免运动平台根据影片动作时，与升降台发生碰撞，造成设备损坏和人身伤害；当放映结束并且运动平

中国知网　https://www.cnki.net

台停止运动后，升降台需要自动升起，使得乘客能够从容地从驾驶舱中借助升降台回到地面。

鉴于对设备和乘客的安全性考虑，升降台的过程控制应该与其他环节形成许可互锁。本文要求当压杆锁住后才能够降落升降台，以避免乘客自由运动时将脚伸入驾驶舱与升降台的缝隙中所造成的危险；当运动平台停止运动后才能够升起升降台，以避免在影片放映时，运动平台与升降台发生碰撞造成设备损坏。

此外，考虑到设备的后期维护，设计一个维护模式，在维护模式中，要求可以人为地控制升降台的升降，以便维护人员可以更方便地测试、维护和更换设备。

升降台的具体过程控制流程图如图3所示。

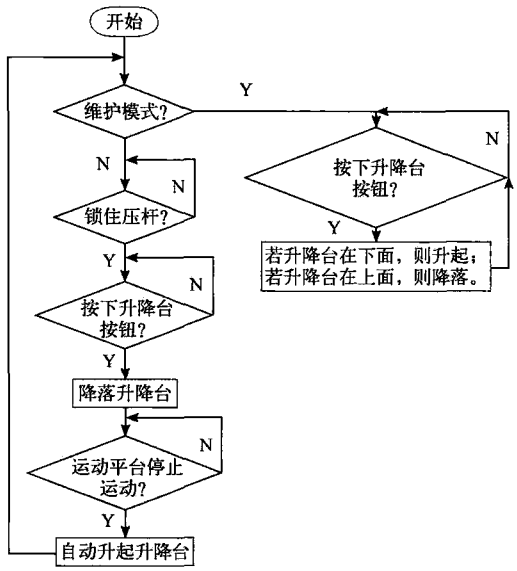


图3 升降台过程控制流程图

3. RTU与运动平台的通信

与运动平台的通信可以通过串口通信（RS 485）和以太网通信两种通信方式来实现。与运动平台的通信任务是由6台RTU分别与各自的运动平台进行数据交流而完成的。RTU的CPU 1214C型PLC只有一个工业以太网口，并且用于与主控PLC进行通信。所以本文采用串口通信（RS 485）技术，实现RTU对运动平台的通信控制。

由于对运动平台的通信与控制过程中需要涉及到字符串的发送、接收与判别，语法结构上用到循环、选择等高级语言特性，梯形图编程将很难实现对运动平台的通信与控制。S7－1200系列PLC提供多种编程语言，例如梯形图LAD、S7－SCL和功能块图FBD等。鉴于结构化控制语言（Structured Control Language，SCL）是一种类似于PASCAL的高级编程语言，并为PLC做了优化处理，具有高级语言的特性，例如：循环、选择、分支、数组和高级函数等。S7－SCL编程语言非常适合复杂运算功能、复杂的数学函数、数据管理和过程优化等任务。故本文采用梯形图和SCL语言混合编程实现RTU对运动平台的通信与控制任务。

运动平台的具体过程控制流程如图4所示。在按下放映开始按钮后，影片开始播放，要求起动运动平台并发送起动命令；若不要求起动且出现故障，则询问运动平台故障原因；若不要求起动且无故障，则询问运动平台状态。并将接收到的状态信息和故障信息存储到接收存储区，供监控系统调用显示。

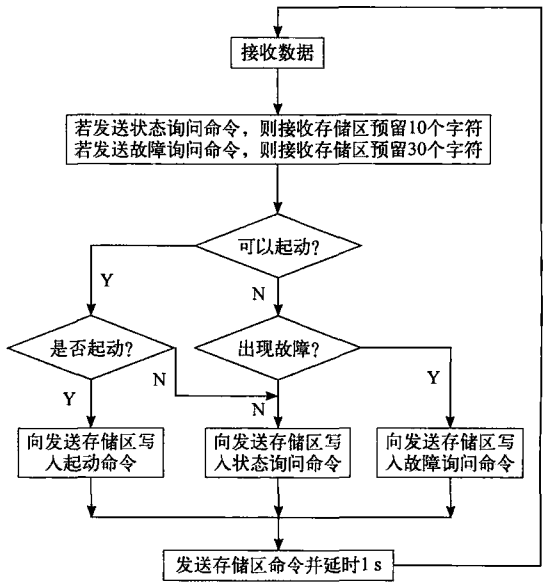


图4 运动平台过程控制流程图

4. 主控PLC与放映系统的通信

放映系统采用性能稳定，抗干扰能力好的工控机。由于放映系统工控机放置在主控柜中，故与主控PLC距离较近，基本无干扰。所以采用RS 232串口通信技术实现主控制柜与放映系统之间的数据通信，完成对影片的播放与停止等操作。放映系统工控机与主控PLC的RS 232串口通信协议：波特率为

中国知网 https://www.cnki.net

9 600 bit/s，无校验位，8位数据位，1位停止位。

放映系统开始播放的过程控制：按下放映开始按钮后，运动平台开始准备，就绪后主控PLC向放映系统工控机发送播放影片命令，开始播放影片，并从放映系统接收已经播放信号与同步信号。并将同步信号转变成开关量传递给运动平台，从而达到影片与运动平台动作同步的效果。主控PLC存储接收到的已经播放信号，供上位机监控系统显示放映机状态使用。

放映系统播放流程图如图5所示。

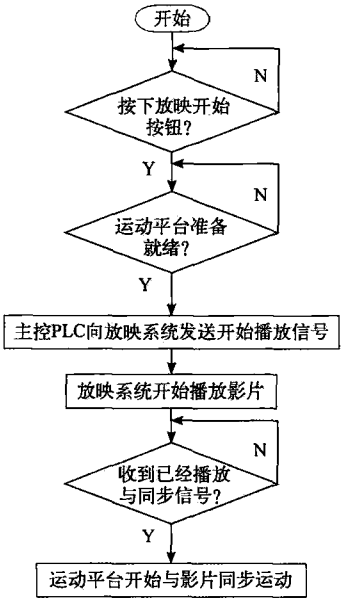


图5 放映系统播放流程图

放映系统停止播放的过程控制：按下放映停止按钮后或者影片播放结束自动停止后，主控PLC向放映系统工控机发送停止播放命令，停止播放影片，并从放映系统接收已经停止信号。主控PLC存储接收到的已经停止信号供上位机监控系统显示放映机状态使用。放映系统停止流程图如图6所示。

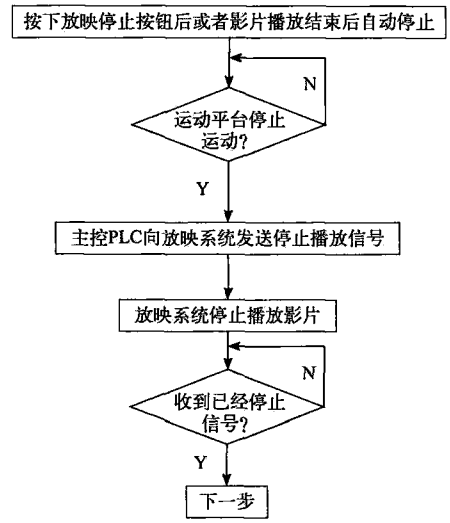


图6 放映系统停止流程图

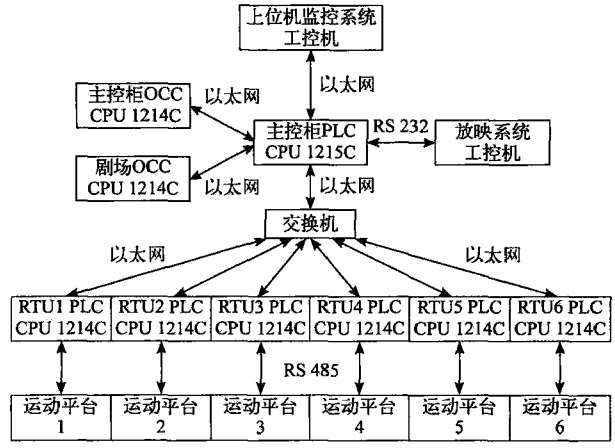


图7 分布式控制系统结构框图

3D动感影院自动控制系统设计与实现

1. 3D动感影院分布式控制系统设计

（1）分布式控制系统结构设计

如图7所示，本文采用分布式控制结构设计3D动感影院的自动控制系统，整个系统分为上层设备、中控层和底层设备。

上位机监控系统为上层设备，主控柜PLC为中控层，6台RTU和2台OCC为底层设备。基于工业以太网的分布式控制系统具有以下的优点：

1）采用工业以太网通信，使得现场布线大量简化，便于控制系统的设备管理和维护。

2）局部系统因故障停止工作而不会影响全系统的其他部分，从而提高整个系统的可靠性。

3）由于控制功能的分散，减轻了主控柜PLC的负担，降低了对控制设备的要求，使设备投资降低。

4）由于采用了网络拓扑结构，系统扩充非常方便灵活，可适用于不同规模系统的控制要求。

5）可以满足主控制器对各分支控制器的同步

中国知网 https://www.cnki.net

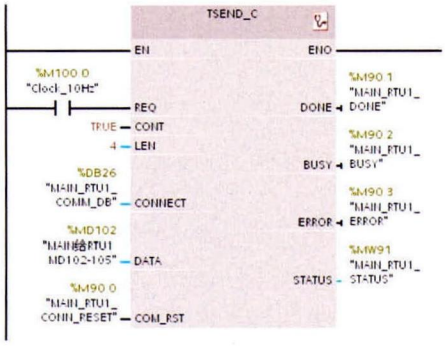
控制。

（2）分布式控制系统通信设计

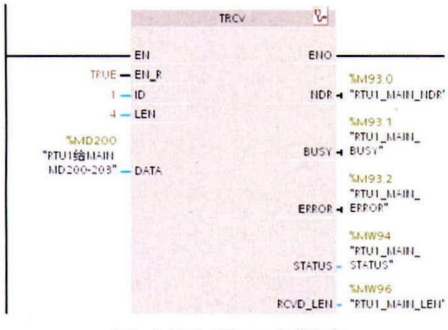
与基于串口通信技术的分布式控制系统相比，由于串口通信采用点对点协议进行基于字符的串行通信方式，没有确认机制，安全性差，传输速度慢。并且主控PLC需以轮询方式与各个分支PLC进行数据传输，不可避免地使得数据传输速度和安全性进一步降低，这将不能满足动感影院对于系统同步性、稳定性和安全性的控制要求。

如图7所示，本文设计在主控PLC、监控系统、2台OCC与6台RTU之间采用工业以太网TCP协议的通信方式，具有协议开放，与不同厂商设备兼容；适合传输大量数据，提供错误恢复和流控制功能，具有较高的可靠性、网络速度快和实时性强等优点。

中控层的主控PLC与底层6台RTU之间通过交换机实现数据高速、可靠通信。首先为主控PLC和6台RTU配置在同一网段的IP地址，还要为6台RTU配置不同的端口号、连接ID，并调用T－block通信指令，设置发送、接收区地址和大小。主控PLC中工业以太网通信部分梯形图如图8所示。



（a）主控PLC向RTU发送数据



（b）主控PLC从RTU接收数据

图8 主控PLC与RTU通信梯形图

上位机监控系统与中控层、底层PLC既相互通信构成一个完整的信息采集系统，又能彼此独立工作。一旦上位机出现故障，中控层和底层PLC可脱离上位机独立工作，确保现场设备安全、可靠连续的运行。

2. 3D动感影院自动控制系统实现

（1）主控柜

主控柜是整个动感影院自动控制系统的中控层，包含监控系统显示屏、OCC面板、放映系统、监控系统工控机、主控PLC、继电器辅助电路、24 V供电电源和UPS。主控柜布局图如图9所示。

图9 主控柜布局图

（2）主控PLC

作为分布式控制系统中控层的主控PLC既要与上层设备进行通信，还要与底层设备进行通信。同时还需完成升降台、放映系统、灯光、音响和风机的过程控制，以及进行错误处理和急停处理等工作。

PLC编程包括如下内容：

1）硬件组态。需按照实物（PLC及其附加模块）在TIA PORTAL编程软件中对应添加；并编辑属性和参数，如I/O口地址和串口通信协议等；还需组建网络，软件描述PLC之间组网方式。

2）变量表。创建变量表，并定义编程中使用到的变量名，数据类型和地址。

3）编写程序代码块。使用代码块可以创建用

中国知网 https://www.cnki.net

户程序结构，组织块OB定义程序的结构，充当操作系统和用户程序之间的接口。组织块包括启动组织块、程序循环组织块、延时中断组织块、循环中断组织块、处理时间错误组织块、硬件中断组织块和诊断错误中断组织块。

本文程序结构采用2个程序循环组织块和4个循环中断组织块，并通过设定恰当的循环周期和优先级使得程序结构清晰，周期循环高效，组织块排队处置合理。使得CPU利用率高，控制效果稳定。

具体程序结构分配如表2所示。

表2　程序结构

组织块	类型	循环周期	优先级
通信	程序循环组织块	1个循环周期	1
放映系统音响、灯光	程序循环组织块	1个循环周期	1
步进器	循环中断组织块	0.2 s	4
信号传导	循环中断组织块	0.5 s	4
升降台错误处理	循环中断组织块	0.5 s	4
急停	循环中断组织块	0.2 s	4

（3）RTU

作为分布式控制系统底层控制设备的RTU既要与中控层的主控PLC进行通信，还要与运动平台进行通信。此外，还需完成压杆解锁与锁定等工作。

由上文可知，RTU程序由梯形图和S7－SCL语言混合编程实现，不仅能够发挥梯形图形象直观、简单易用的优点，而且能够发挥出S7－SCL语言处理复杂逻辑运算和复杂数学函数的能力。

采用梯形图编写压杆的过程控制，例如压杆的解锁与锁定等工作；采用S7－SCL语言编写运动平台的过程控制，例如RTU与运动平台的通信、对接收字符串的后期处理等工作。图10给出RTU与运动平台通信的部分代码。

（4）OCC

OCC属于底层控制设备，是剧场操作人员进行人机交互的重要途径。剧场放映系统的播放与停止、灯光的开关、音响的切换、升降台的升降、压杆锁定与解锁和运动平台的动作基本都通过OCC进行控制。OCC布局如图11所示。

```
"RCV_PTP_DB"(EN_R:=TRUE,PORT:="CM_1241_(RS422_485)_1",
             BUFFER:="485BUFFER".RCV,NDR=>"485RCV1_NDR",
             ERROR=>"485RCV1_ERR",STATUS=>"485RCV1_STATUS",
             LENGTH=>"485RCV1_LENGTH");
IF ("485BUFFER".RCV<>'can_move')AND("485BUFFER".RCV<>'err_occ')
  AND("CASE"=1)THEN "485BUFFER".STAT1_BUFFER:="485BUFFER".RCV;
END_IF;
IF ("485BUFFER".RCV<>'can_move')AND("485BUFFER".RCV<>'err_occ')
  AND("CASE"=2)THEN"485BUFFER".XX1_BUFFER:="485BUFFER".RCV;
END_IF;
IF "485BUFFER".RCV='can_move' THEN
  IF "MB1.START"=1 THEN
             "485BUFFER".SEND:='move';"DATA_LEN":=7;
  ELSE"485BUFFER".SEND:='ask_stat';"DATA_LEN":=6;
             "CASE":=1;
  END_IF;
ELSE IF "485BUFFER".RCV='err_occ' THEN
   "485BUFFER".SEND:='ask_err';"DATA_LEN":=4;
             "CASE":=2;
  ELSE"485BUFFER".SEND:='ask_stat';"DATA_LEN":=6;"CASE":=1;
  END_IF;
END_IF;
"SEND_PTP_DB"(REQ:="Clock_sys",PORT:="CM_1241_(RS422_485)_1",
             BUFFER:="485BUFFER".SEND,LENGTH:="DATA_LEN",
             PTRCL:=False,DONE=>"485SEND1_DONE",
             ERROR=>"485SEND1_ERR",STATUS=>"485SEND1_STATUS");
```

图10　RTU与运动平台通信SCL代码

图11　OCC布局图

3. 故障处理与急停处理

动感影院的自动控制系统需要保证设备和人身安全，所以对整个系统的安全性和稳定性有了更高的要求。下面阐述设备或人为操作出现的故障处理和出现紧急情况的急停处理。

（1）故障处理

故障处理主要包括压杆突然解锁、升降台错误动作、设备气压错误和UPS供电失败等。多达上百条的故障处理可以有效地增加控制系统的安全性和稳定性，从而保证设备和人身安全。

剧场由6台运动平台组成，分为两组，第一组3台在前排，第二组在后排。可以根据故障的严重程度选择停止单一故障设备，还是停止同一排的设备或者是全部停止运动。这种将故障分类的处理方式，使得整个控制系统更加的智能化。

（2）急停处理

当遇到紧急情况时，可以由操作人员按下OCC面板的急停按钮触发；也可由设备内部的严重故障触发，例如运动平台急停继电器或者看门

中国知网　https://www.cnki.net

狗超时等情况触发。

上位机监控系统软件开发与界面设计

1. 组态软件

GE智能平台的iFix是全球领先的HMI/SCADA自动化监控组态软件，提供工控人员熟悉的操作界面，能够进行生产操作的过程可视化、数据采集和数据监控，并提供完备的驱动程序。其编程语言为VBA（Visual Basic for Application），并且在内部集成微软的VBA开发环境。

2. 监控界面

本文使用iFix组态软件设计并开发3D动感影院分布式控制系统的上位机监控界面，能够实现对剧场进行动画模拟、参数设定、信号监控和报警等功能。

如图12所示，监控系统主界面能够完成对剧场内运动平台的状态，升降台的位置，放映系统和音响进行动画模拟，还能够显示剧场操作步数。简洁形象地描述出现场情景，使得操作人员可以在操控室就能够对运动平台和升降台操作控制。还能够选择6台运动平台的工作状况，选择关闭运动平台后在动画模拟中将对应平台做红色叉号处理，表示在本轮播放中不能起动。还可以通过界面底部的序号选择不同的影片进行播放，控制系统将自动为运动平台选择相应动作配合影片动作。

当出现故障时，在相应设备处进行报警，便于维护工程师尽快排除错误。

结束语

本文设计并实现了基于工业以太网的3D动感影院分布式控制系统，各个方面很好地达到了控制要求。实现了剧场灵活、安全、稳定和可靠的自动控制，使设备和人身安全得到有效保证。

（收稿日期：2014－06－25）EA

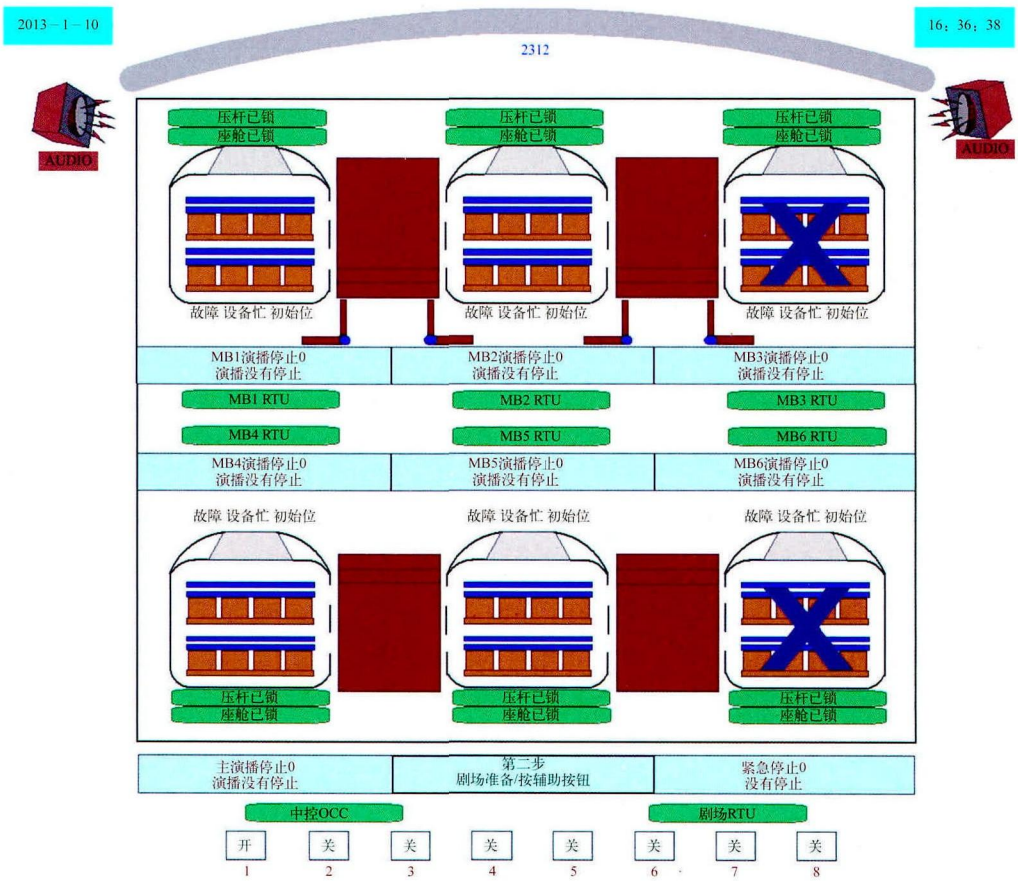


图12 监控系统主界面

中国知网 https://www.cnki.net