

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.020

压水堆核电站给水泵转速控制系统 仿真机的研发

姚水永¹, 张彦¹, 王潜博¹, 钱明辉², 梁军^{2*}

(1. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124; 2. 浙江大学 控制科学与工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对核电站仪控调试的成本高和控制参数调试验证工作的不便问题, 开发了集成的核电站给水泵控制系统仿真机。介绍了压水堆核电站给水泵转速仿真机的结构、设计方案、主要技术实现和现场应用。利用LabVIEW程序开发了热工水力模型, 采用西门子的PLC实现了仿真机与核电厂DCS、仿真机与给水泵控制箱的连接, 利用WinCC-flexible工业组态软件编辑了友好的人机界面, 设置了实时数据库存储运行数据, 借助OPC通讯协议完成了系统内部的实时通讯, 由多个技术部件一起构成了压水堆核电站转速控制仿真平台。进行了启停泵试验、阶跃升转速和手动操作试验。测试结果表明, 该平台能够较好地模拟系统瞬态工况和稳态工况, 可用于相关技术培训和核电站仪表控制系统的参数优化。

关键词: 压水堆核电站; 仿真机; 给水泵; 转速控制; LabVIEW; OPC

中图分类号: TP273; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-251-05

Development of simulator for PWR feed-water pump speed control system

YAO Shui-yong¹, ZHANG Yan¹, WANG Qian-bo¹, QIAN Ming-hui², LIANG Jun²

(1. China Nuclear Power Engineering Company, Shenzhen 518124, China;

2. Department of Control Science & Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at reducing the cost of I&C commissioning and control parameter verification in nuclear power plant, an integrated pump control system simulator was developed. The structure and design of the pump speed control simulator, the main technology and field applications were introduced. The thermal-hydraulic model was developed based on LabVIEW. Siemens PLC was used to connect the simulator and DCS in the nuclear power plant. WinCC-flexible industrial configuration software was used to edit the friendly interface, real-time database was used to store operational data set. The system real-time communication was realized based on OPC communication protocol. All these technologies constitute a real simulator. The starting and stopping the pump test, rank jumped speed test and manual test were proceeded. The test results indicate that it has a good simulation effect. It can be used to verify parameters, do nuclear-related technology training and optimize the control system.

Key words: pressurized water reactor (PWR); simulator; feed-water pump; speed control; LabVIEW; OPC

0 引言

根据核电自身的特点, 要保证核电站的安全运行, 在核电厂的建设调试和试运行阶段中运用系统仿真技术是十分必要的。早在上个世纪, 国外就将该技

术应用于反应堆设计和核电站运行分析领域中^[1]。为了培养操作运行人员, 1968~1973年的5年时间里, 当时美国最大的4家动力集团公司相继建立了各自的首个仿真培训中心。1968年, 通用电气公司建立了世界上第一台完全复制800 MW沸水堆控制室仿真机;

收稿日期: 2014-10-15

作者简介: 姚水永(1983-), 男, 河北徐水人, 工程师, 主要从事机械电子工程方面的研究。E-mail: yaoshuiyong@cgnpc.com.cn

通信联系人: 梁军, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: jliang@iipc.zju.edu.cn

1970年,B&W公司建立了913 MW沸水堆蒸汽发生器系统仿真机;1972年西屋(Westing House)电气公司建成1 100 MW的压水堆仿真机;1973年,CE(Combustion Engineering)公司建立了880 MW压水堆仿真机^[2]。21世纪,西方的电力工业趋于饱和,仿真机的市场重点也转移到亚洲地区。目前我国电站已经使用和正在研发的培训仿真机约400台。其中清华大学能源仿真公司和同方电子公司研发了148台,数量居国内首位^[3]。这些大规模的专用仿真机功能全面、仿真范围大、通用性强,但也存在共同的缺点:价格高、投资大、专用性不足、移植、掌握和维护困难^[4]。

随着核电站建设和运行中越来越强调专业化和精细化,近年来开始出现专用仿真机的趋势,其通过对核电站中某一流程单元甚至单一设备进行深度仿真,提高调试和运行的准确性和安全性,很好地弥补了通用仿真机在具体设备或设备单元层面不够专业的不足。

本研究设计开发一种核电给水泵转速控制系统的专用仿真机,用于常规岛电动给水泵的运行特性分析、操作培训和控制系统参数优化。结构上,适应当前整体仿真机模块化和分散化的设计理念,该仿真机可以作为全核电站总体仿真系统的一个子系统很方便地接入接入其他模块^[5]。在功能上,可实现核电站给水泵转速控制系统的全方位模拟仿真,满足调试团队的试验与工程分析需求。

1 给水泵转速控制系统仿真机的总体设计

给水泵转速控制系统作为核电给水系统的一部分,其正常运行对整个核电厂的安全运行有着极其重要的意义。给水泵转速控制系统与蒸发器液位控制系统以及压力控制系统相互合作,组成核电站二回路的主给水系统,其主要任务就是维持给水母管压力的恒定^[6]。为此,在核电站还未投入商业运营前,对给水泵转速控制系统做全面深入的调试和分析显得尤为重要。

1.1 仿真机的总体结构

该系统采用四层体系结构:最底层为常规控制层,使用德国西门子公司的S7系列PLC模块,包括CPU模块、模拟量输入模块、模拟量输出模块、开关量输入模块、开关量输出模块、通讯模块等等,负责现场信号接入接出、与DCS和其他子系统通讯、与平板式工控机通讯、与触摸显示屏HMI通讯等等,并完成信号采集、处理和标准的PID控制算法。第二层是数据层,搭载平台为一台台湾研华的平板触摸式工控机。现场采集的数据包括开关量信号、DCS系统控制信号

以及仿真模型计算结果等写入挂接在这一层的实时数据库。实时数据库是整个体系结构的核心,通过它实现全系统的数据交换,这里采用的是美国NI公司的Citadel 5数据库。第三层是仿真模型计算和控制器参数优化分析层,以电动给水泵、液力耦合器为核心,实现了各类模型计算、参数优化计算和控制规律计算,是整个仿真机的高级功能实现区,也搭载在上述平板工控机上。第四层是用户操作/显示界面层,反映仿真机运行的实时信息并提供实时操作手段,采用LabVIEW的界面实现功能开发,实现动态流程显示、趋势图形、数据输入与查询,报警与报表、仿真模型计算显示与分析、参数优化分析等功能。这一层也搭载到平板工控机上。不过,为了适应工业现场环境和方便现场操作,系统还特别加挂了一台触摸操作显示屏HMI。总体结构如图1所示。

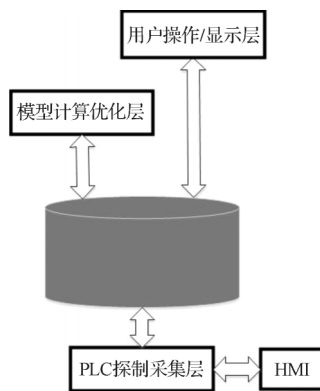


图1 系统四层体系结构

1.2 仿真机软件架构及功能

仿真机的功能设置直接决定了软件系统的总体结构。在功能上,仿真机对核电给水泵控制系统的控制回路实现完全仿真,包括对控制回路的测试(瞬态试验、稳态试验等);可以保存试验数据和趋势曲线,形成试验报告方便日后的分析研究;能够完成仿真模型的全方位计算、控制器参数的优化分析;与DCS或者现场给水泵控制机柜相连,验证现场硬件功能正常;验证现场控制器的参数并通过试验寻求更好的参数等。在具体仿真模式上,设置了两种操作模式,即DCS仿真模式和HMI仿真模式,前者是通过与核电站DCS系统直接相连接来进行联合调试仿真,仿真机仅仅作作为模型计算终端代替给水泵运行单元实体(含液力耦合器和控制箱);后者不连接DCS,但仿真机同时仿真给水泵运行单元和DCS两部分实体,为不具备连接DCS条件时提供方便,此时仿真机就是一套DCS和给水泵运行单元的联合体。在软件系统构成上,仿真机主要包括两个大的软件分块:对象的液力耦合器动态模型与热工水力模型计算和逻辑控制规律计算,这

两个软件分块是协调工作的。根据仿真机研发需求,软件系统分为在线监控功能、离线组态功能、高级计算功能、PLC控制功能、HMI监控功能、数据采集与输出功能和系统通讯功能等。给水泵转速控制系统仿真机软件架构如图2所示。

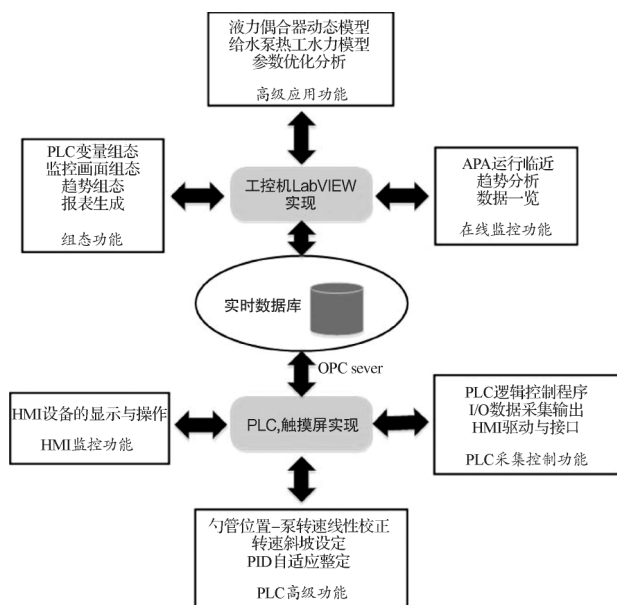


图2 给水泵转速控制系统仿真机软件架构

为实现上述众多不同功能,本研究采用了多种软件开发平台混合编程的开发手段,主要有:①LabVIEW,它是美国NI公司实现虚拟仪器(Virtual Instrument-VI)技术的G语言。图形化编程开发平台的特点是基于通用计算机等标准软硬件资源平台,实现构建灵活、层次体系明晰、功能强大且人机界面友好的测控系统,因此其在国内外许多测控应用中被广泛采用^[7]。笔者使用LabVIEW平台开发了系统模型、监控画面,实现监控数据的存储和报表生成。②西门子Step-7软件,编写控制系统的梯形图和实现高级算法功能。③西门子的WinCC-flexible组态软件,用来组态触摸屏,实现简单的显示和操作功能。

2 给水泵仿真机研发的技术实现

2.1 软件功能模块化结构

由于仿真机最终是形成一个软、硬件集成的系统,在具体研发实现的时候,本研究就将其按要实现的功能进行了模块化处理,主要包括这样几个模块:HMI模式下西门子PLC的控制模块,DCS模式下西门子PLC的数据采集模块,LabVIEW的模型处理模块,各种协议下设备通讯模块,界面操作和监控显示模块。而各模块又分别由低一级的各个子模块实现不同的功能,主要有:①MD_Main.vi为主程序,启动进入

界面,由此可以进入各子功能;②TC.vi为泵模型的子程序,启动后通过此子程序来实现模型仿真计算;③DB.vi为数据库处理子程序,用来记录和保存试验的数据;④Report.vi为生成仿真运行分析报告的子程序,为现场技术人员完成试验报告提供方便。还有一个很重要的部分即数据通讯接口模块,系统通过该接口完成DCS、给水泵控制箱、PLC、HMI、平板工控机等主要设备之间数据的实时交互。同时,本研究利用LabVIEW的图形化编程工具开发出GUI为用户提供监控和操作交互界面。为了方便操作人员的使用,笔者专门使用WinCCflexible组态工具在HMI平板触摸屏上开发了就地用户操作界面。用户界面如图3所示。

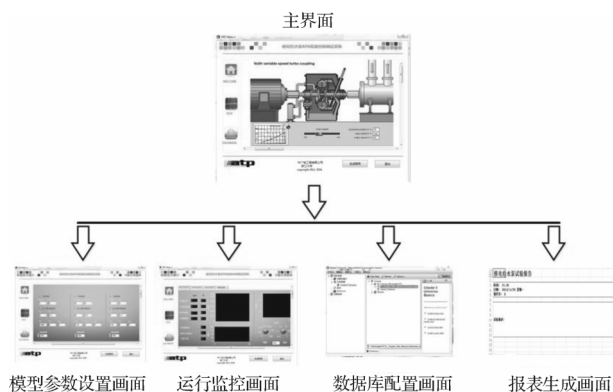


图3 用户界面

2.2 主要仿真模型的实现

仿真模型的实现是仿真机的技术核心,该系统中的仿真模型全部在LabVIEW环境下构建和实现,包括液力耦合器动态模型和给水泵热工水力模型,并借助西门子PLC实现给水泵转速控制逻辑组态和线性化校正。数学模型基于LabVIEW图形化界面开发,与PLC中的控制逻辑协同组织成一个完整的仿真平台,同时将这些逻辑都通过WinCC-flexible组态到触摸面板中,集中显示和操作(系统结构如图4所示)。Lab-

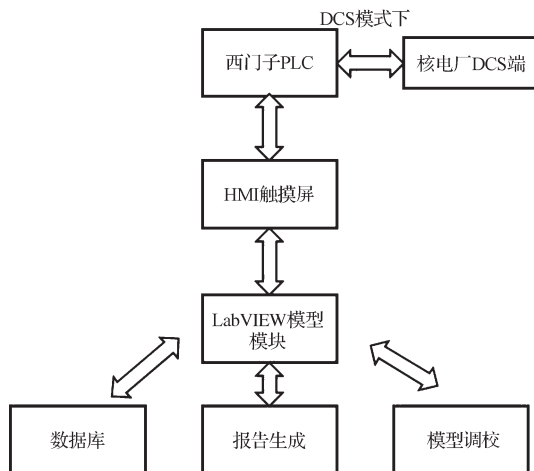


图4 系统结构

VIEW实现的模型无论与自身PLC模拟的控制系统还是DCS模式下的控制系统组合,都能完整地构成一个给水泵转速控制测试平台。

本研究在LabVIEW中使用控制仿真循环,将其图形化的传递函数加入到控制循环中,并且设置仿真采样周期使其能够实时运行,不间断地运算输出。模型子vi如图5所示。

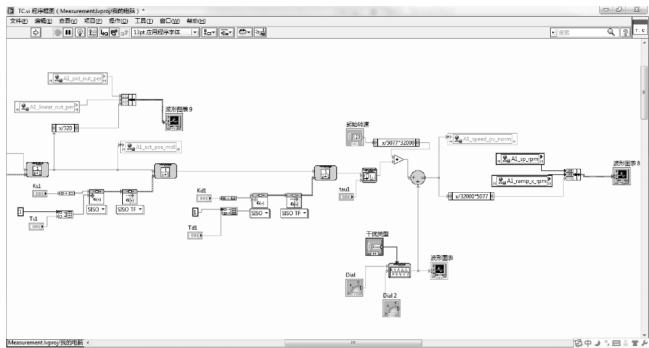


图5 模型在LabVIEW中实现的部分vi

2.3 仿真机开发中若干关键技术

给水泵仿真机与DCS机柜的连接使用硬接线方式,得到的信号在被西门子的输入输出模块接收后经过梯形图程序处理变成数字量,存储在PLC的寄存器中,然后通过IEEE RS-485/422协议电缆送往平板工控机的实时数据库。

基于LabVIEW平台的仿真模型模块与实时数据库是通过OPC协议进行交互的^[8],具体实现为:通过NI OPC Servers建立与PLC的通讯,再在OPC Server中建立变量组,以供模型程序的读写。本研究在配置完OPC Server后,在LabVIEW工程中建立共享变量组,将OPC Server中的变量都导入的LabVIEW编程环境中利用,同时LabVIEW模型计算出的值也可以写入到NI OPC servers中,形成一个完整的通讯回路(通讯数据流结构如图6所示)。

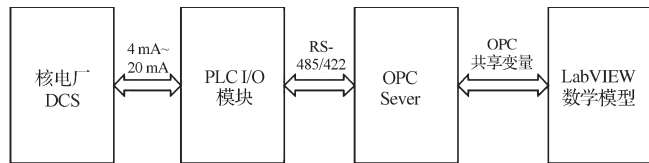


图6 通讯数据流结构

生产过程控制中,需要及时地采集现场数据并快速地进行处理,常规的关系数据库往往不能满足要求,需要实时数据库管理系统的支持。从系统的实时性、接口方便、使用简单和与其他模块一体化等方面考虑,该系统选用美国NI公司LabVIEW自带的Citadel5作为仿真机的实时数据库,它是用于集成生产过程信息与高层次应用软件(如先进控制、优化、管理)

的基础数据平台,用户通过Citadel5可以访问和集成来自操作单元范围内DCS和PLC的数据,通过分析工具、历史数据管理、图形化的用户界面和大量的过程接口来访问和集成数据。连接数据库主要有以下几种方式(数据交换与接口设计图如图7所示)。

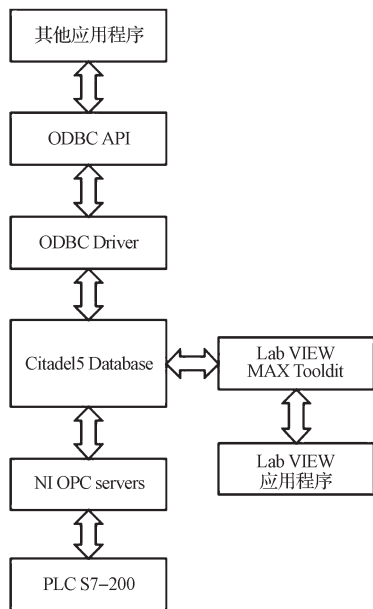


图7 数据交换与接口设计图

(1) LabVIEW数据库工具包基于ODBC技术,在使用ODBC API函数时,需要提供数据源名DSN才能连接到实际数据库^[9]。

(2) 利用NI公司开发的NI OPC servers通过OPC协议连接,数据交换。

(3) 利用NI公司开发的LabVIEW MAX toolkit工具包访问数据库。

在本研究设计的仿真机中,直接使用了NI OPC servers完成PLC与数据库的连接,使用LabVIEW的MAX toolkit完成LabVIEW与数据库的交互。

仿真机设计有模式切换功能。DCS模式既可以用来测试DCS系统的接线和控制逻辑的正确性,又可以对控制参数的设置进行验证和调整试验,而HMI模式可以脱开DCS对给水泵及其控制箱进行全面仿真研究。通常,在给水泵运行尤其是在商运前的安装调试过程中经常需要在两种操作模式间进行切换已完成不同仿真试验任务。该仿真机中,两种模式的切换是通过在PLC中设置的逻辑软开关来实现的,具体操作方式是在西门子的HMI触摸屏上进行组态,以按钮的形式完成切换。现场操作人员在试验时可以首先在启动界面选择DCS模式或HMI模式(切换示意图如图8所示)。在DCS模式下,仿真机自己的PID控制器不参与工作,只有用户选择了HMI模式时,才将仿真机自身的

控制器投入仿真试验中,这样便可以脱离核电厂DCS系统独立完成仿真研究,这对调试工作有很大的意义,同时又可带电操作,不需要断开DCS的硬跳线。

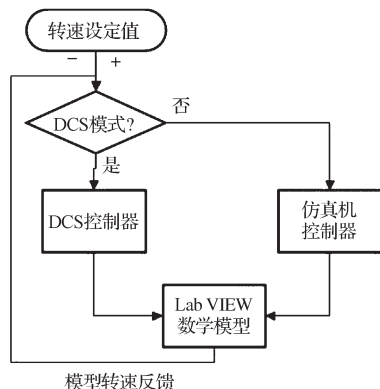


图8 DCS模式与HMI模式切换

3 给水泵仿真机的现场应用

本研究研制的给水泵仿真机经软、硬件开发和集成调试,已经于2013年11月成功应用于某核电站2#机组(1 000 MW),主要的监控操作人机界面截图如图9所示。

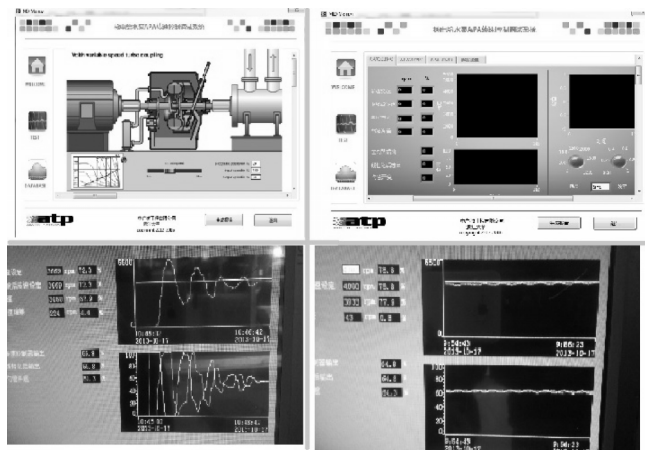


图9 主要人机界面截图

在实际使用中,根据某核电站1#机组(工艺、设备、控制系统与2#机组完全相同)给水泵控制、运行的实际数据作为参考,并结合现场运行操作人员的经验确定了仿真模型参数和PID参数^[10]。在此基础上,本研究用仿真机对2#机组的给水泵转速控制系统进行了多组仿真试验,并对试验数据与1#机组进行了比分析和对策研究,取得了满意的仿真验证效果。实践证明,该仿真机能够达到预期的技术要求、模拟精度

和仿真效果,对核电站建设的调试阶段和商运后的持续稳定运行都有很大的帮助作用,也可以进行与给水泵转速控制系统有关的上岗培训,成为核电站调试团队和运行人员开展工作时的有力工具。

5 结束语

本研究通过利用LabVIEW强大的虚拟仪器开发的系统仿真机,可以很好地建立核电厂的各种设备仿真模型。利用PLC的控制模块可以完全复现控制系统的控制逻辑,通过将两者结合在一起实现控制与模型的闭环仿真,对于核电站各个系统的调试和运行有重要试用价值和科学意义。与传统的大型全范围仿真机相比,它的构建更加简洁,完全由工控机和PLC模块搭建,并且可实现该仿真机与给水泵标配控制箱、与常规岛DCS系统的完全集成,体现了仿真机的专用化、小型化、系统开放化、使用简便、维护成本低等特点。笔者研发的仿真机已经成功应用于某核电站1 000 MW机组,应用效果令人满意。

笔者的研发工作仍有需要进一步深入和完善之处,例如,目前系统规模还较小,所能仿真的对象仅限于给水泵转速控制系统,需要在以后的研发中加以辐射、拓展,例如前可至除氧器、后可至蒸汽发生器。

参考文献(References):

- [1] 董玉洁. 核动力系统工程与电厂分析仿真机的发展[J]. 计算机仿真, 1998, 15(1): 49-51.
- [2] 朱立志, 林 萌, 杨宗伟, 等. 核电厂数字化仪表控制系统仿真测试平台开发[J]. 核动力工程, 2010(5): 113-117.
- [3] 吕崇德, 薛亚丽. 电厂系统仿真技术的发展[J]. 科技导报, 2007, 25(8): 6-8.
- [4] 孙永滨. 田湾核电站全范围仿真机综述[J]. 核动力工程, 2001, 22(6): 563-566.
- [5] 杨宗伟, 黄铁明, 冯光宇, 等. 核电站仿真技术在反应堆控制系统调试中的应用[J]. 核动力工程, 2009, 30(6): 49-53.
- [6] 钱 虹, 李 超, 叶建华, 等. 蒸汽发生器水位全程数字化控制系统[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(4): 313-316.
- [7] 徐 超. LabVIEW在实时测控系统中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2005.
- [8] 饶克克, 李 华. 基于OPC的多客户端与WINCC的数据通信[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 1(3): 133-135.
- [9] 李文涛, 曹彦红, 卜旭芳, 等. LabVIEW数据库访问技术的实现及应用[J]. 工矿自动化, 2012, 3(3): 70-71.
- [10] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 6版. 北京: 科学出版社, 2013.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

姚水永, 张 彦, 王潜博, 等. 压水堆核电站给水泵转速控制系统仿真机的研发[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 251-255.

YAO Shui-yong, ZHANG Yan, WANG Qian-bo, et al. Development of simulator for PWR feed-water pump speed control system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 251-255.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>