

以 TRNSYS 为平台的集中空调水系统数字仿真器的建立

同济大学 孟 华[☆] 龙惟定
香港理工大学 王盛卫

摘要 介绍了以 TRNSYS 为平台,利用部件模型建立可用于优化控制研究的集中空调水系统数字仿真器的方法,讨论了用户 DECK 文件的编写、部件模型的连接、仿真迭代计算收敛、数据文件输入、仿真器调试等问题,所建立的数字仿真器在通过验证后可用于仿真研究。

关键词 TRNSYS 集中空调 水系统 数字仿真器

Establishment of a water system digital emulator based on TRNSYS in central air conditioning systems

By Meng Hua[★], Long Weiding and Wang Shengwei

Abstract Presents the method of establishing the digital emulator which is suitable for optimal control. Discusses the issues of DECK document complication, component model connection, emulation convergence, data input and emulator tuning. The digital emulator will be suitable for simulation research after evaluated.

Keywords TRNSYS, central air conditioning, water system, digital emulator

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

任何科研都离不开试验,采用数字仿真器来代替实际空调系统进行分析试验的方法,简便快捷费用低廉,已日益成为当今空调研究领域的重要发展方向。这种方法的前提是要有一个能够准确反映实际系统各参数动态响应的系统数字仿真器。本文介绍以 TRNSYS 为平台建立空调系统数字仿真器的一般方法。

空调系统的仿真软件大体有两类:一类用于模拟系统的能量特性,如 DOE 2^[1], BLAST^[2]等,基本上采用 LSPE (load, system, plant, economic)法进行计算,即先进行区间通常为一年冷热负荷计算,然后计算各设备的能耗,进而计算整个空调系统的能耗,最后进行技术经济分析,因此这类软件适用于系统的能耗分析;另一类用于模拟系统的能量特性和控制特性,如 HVACSIM+^[3], TRNSYS^[4]等,是以整个系统中各部件为单元,按照各部件的压力、流动方向及质能平衡等进行计算,因此这类软件适用于系统的控制分析和控制器设计。本文选择 TRNSYS 软件作为仿真平台来建立空调水系统的动态数字仿真器。

要想建立一个空调系统数字仿真器,首先需要建立整个系统各组成部分的数学模型,然后根据具体的仿真对象,

确定模型中的所有参数,并按照实际系统的设备布置情况,利用一定的方式将所有的数学模型串接起来,形成闭式计算回路,最后进行仿真调试,当每个时刻整个系统计算收敛后,系统仿真器也就建立完成了。通过验证后的系统仿真器即可用于仿真研究。

由于本文所建立的数字仿真器将用于空调水系统的优化控制研究,因此不仅要对整个系统(包括整个系统的各组成部分)的能量特性进行模拟;而且还要对系统的控制特性,包括传感器、直接数字控制器(DDC)、执行机构等控制部件,以及各下位机控制回路的特性进行模拟。

1 仿真对象的确立

选择某大楼为仿真对象。该大楼总使用面积 74 000 m²,有 5 台大小相同的离心机(4 用 1 备),每台设计冷量

①[☆] 孟华,女,1968年8月生,博士研究生,工学博士,讲师
200092 上海市赤峰路67号同济大学南校区楼宇设备工程与管理系
(021) 65980902
E-mail: menghua@em.tongji.univ.net
收稿日期:2003-12-02
一次修回:2004-03-04
二次修回:2005-01-10

3 100 kW; 采用 4 台大小相同的冷却塔进行水冷, 每台冷却塔中有 2 台可由高、低挡转速调节风量的风扇, 在实际运行时采取 1 台冷却塔中 2 台风扇同时联动的控制方式。冷水侧采用二次变频泵系统。该大楼共有 5 个不同的使用区, 5 台 AHU。整个水系统的控制包括: 根据最不利管路中 AHU

两端的冷水供回水压差来调节二次变频泵的输入频率, 以控制冷水的实际输送量; 通过感应 AHU 的送风温度来调节流经表冷器二通阀的冷水流量; 由温差传感器来感受冷却水供水温度与环境湿球温度之差, 以此调节各冷却塔风扇的转速。整个仿真对象的系统结构及控制系统测点布置见图 1。

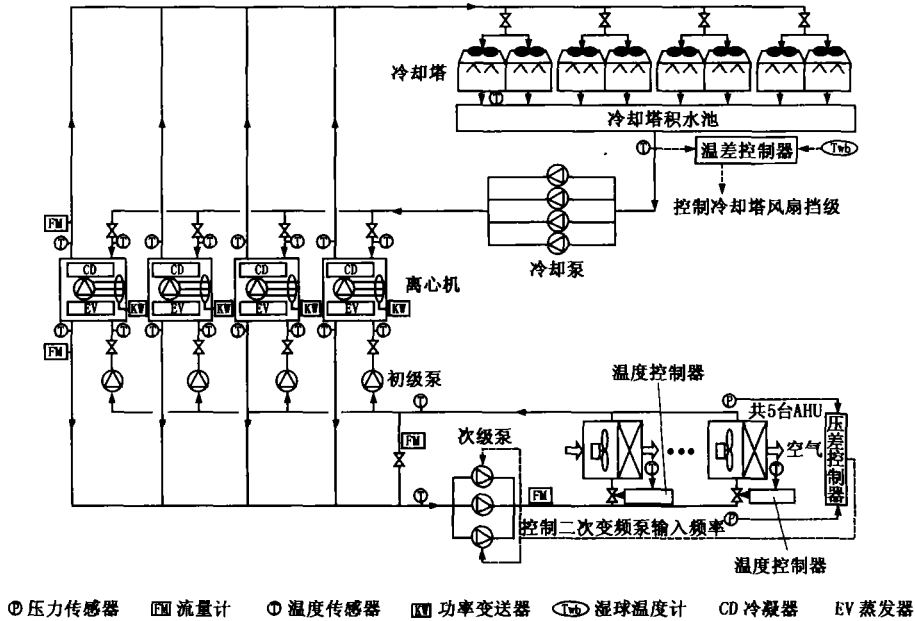


图 1 仿真对象的系统结构及控制系统测点布置

利用已有的部件模型, 根据所选择的仿真对象, 按照一定方法完成模型参数辨识后^[5], 即可建立数字仿真器。

2 以 TRNSYS 为平台建立系统仿真器

根据不同的研究目的, 系统仿真器的建立方式也不同: 若系统仿真器是用于系统能耗分析的, 则各部件之间的能量传递是系统连接的主线, 闭式计算回路的计算步长一般采用 1 h, 这时的仿真器建立相对简单; 若系统仿真器是用于优化分析的, 则系统中各部件的结构参数以变量形式进行仿真, 优化目标是系统连接的主线, 闭式计算回路的计算步长根据优化目标可长可短。由于本文所建立的系统仿真器是用于实时优化控制研究的, 即要求当外界条件发生变化时, 仿真器不仅能够仿真系统的热力状态变化, 而且能够仿真控制系统的控制响应, 因此仿真器的建立较为复杂, 选择的仿真时间步长为 5 s。

TRNSYS 软件最早由 Wisconsin Madison 大学 Solar Energy 实验室开发研制, 迄今其最新版本为 Ver.16, 可以对太阳能(太阳热和光伏系统)、建筑及暖通空调、可再生能源、冷热电联产、燃料电池等系统的运行特性和控制特性进行仿真; 此外, 运行于 WINDOWS 环境中的 TRNSYS 可以在线描绘和监测 100 多个系统变量, 可以直接调用 EXCEL 和 MATLAB 的有关数据图形信息等。TRNSYS 是模块化的仿真软件, 源程序都用 FORTRAN 语言编写, 其最大优点是允许用户根据各自的需要修改或编写新的模型并添加到程序库中去。通常, 利用 TRNSYS 建立系统仿真器一般必须包括: TRNSYS 主程序、固定使用的功能性子程序、可

选用的功能性子程序、模拟系统的各部件模型子程序、DECK 文件以及计算所需要的附属数据文件。

TRNSYS 主程序用于调用各子程序并将整个系统的各个设备串接起来, 其程序结构框架见图 2。

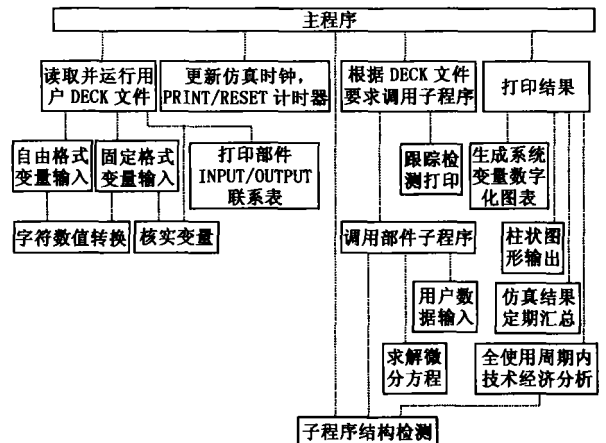


图 2 TRNSYS 主程序结构框架

2.1 部件模型的连接

TRNSYS 软件中很重要的部分即是能够调用模拟系统中各部件模型的子程序, 并最终生成仿真结果, 这也是利用 TRNSYS 建立系统仿真器的关键步骤。TRNSYS 要求对所有设备必须以 UNIT 进行编号, 并且所有部件模型的子程序都要以 TYPE 作为子程序名, 每个部件子程序应包括: 变量输入 INPUT、参数赋值 PARAMETER、模型过程

的计算、变量输出 OUTPUT 四个部分。通过编写用户 DECK 文件,按照各部件模型之间质量流动、热量流动以及控制信号等逻辑关系进行部件模型的连接。

以下是本文 DECK 文件中的一部分:

```

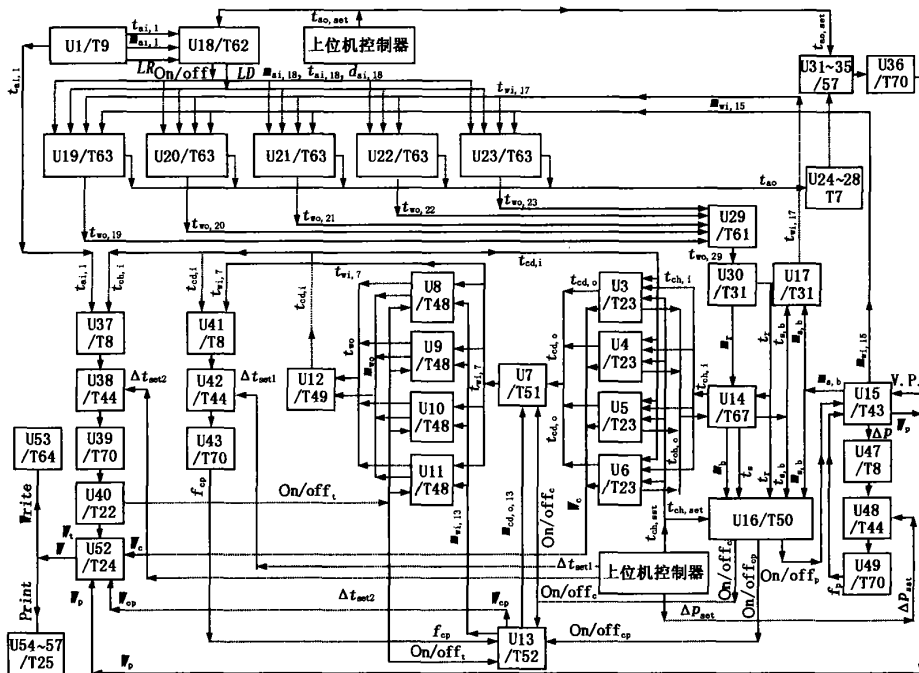
*****
*
SIMULATION 0.0 86 400.0 5.0
TOLERANCES 0.000 01 0.000 01
LIMITS 100 100
WIDTH 132
NOLIST
MAP
ASSIGN OUT. INF 6
ASSIGN SUMMER. NEW 9
ASSIGN OUT1. DAT 21
*
*****
*
UNIT 3 TYPE 23 Chiller ONE
PARAMETERS 19
227.778 6 1.453 661E 02 5.236E 01,
199.207 3 8.795 267E 01, 2.230 225E 01,
    
```

```

6.474 544E 01, 4.067 12E 02 0.0
0.0, 1.014 712E 03, 0.0, 0.0
1.247 556E 03, 1.0, 40 000.0 40 000.0
2.0, 2.0
INPUT 7
14.4 12.1 0.0 13.6 16.5 16.1 0.0
10.0 30.0 130 133 7.5 0.0 25.0
DERIVATIVES 2
25.0 25.0
* TRACE 0, 10 000
*
*****
    
```

其中,第 1 部分确定了使用 TRNSYS 进行仿真的起止时间、时间步长、收敛精度、数据读入、结果打印等等。第 2 部分对整个系统中各设备的模型参数进行赋值,规定各设备所有 INPUT 与其他设备 OUTPUT 的连接状况,并给予这些 INPUT 的初始值。由此可见,DECK 文件实际上是描述整个系统结构的文件,用户通过编写 DECK 文件,完成整个系统的连接。

本文按照 TRNSYS 规范,首先将所有设备进行 UNIT 和 TYPE 编号(共 57 个);之后根据仿真对象编写了 DECK 文件,仿真 DECK 文件流程图见图 3。



U 为 UNIT; T 为 TYPE; t 为温度; LR 为负荷率; On/off 为开关控制信号; LD 为负荷; W 为能耗; d 为含湿量; 下标 a 为空气, w 为水; i 为进口, o 为出口, set 表示控制变量设定值, cd 为冷却水, ch 为冷水, ep 为二次泵, c 为制冷机, b 为建筑物, t 为冷却塔, s 为供水, r 为回水, p 为冷却泵; V. P. 代表阀门位置; 数字表示 UNIT 或 TYPE 的编号

图 3 仿真 DECK 文件流程图

2.2 仿真计算中迭代收敛困难的解决办法

当所有部件模型连接完毕并给参数赋值后,即可进行

仿真计算。因为 TRNSYS 是基于各个部件模型进行计算的大型仿真程序,当用它来仿真复杂压力流量平衡系统时,

常产生迭代计算难以收敛的困难,为解决这个问题,可以将描述整个系统压力和流量的所有变量分离出来,就冷水循环回路和冷却水循环回路,分别单独建立两个压力-流量平衡模型,并以两个 UNIT 参加仿真计算,以帮助整个仿真计算收敛并提高计算速度。

$$p_{pu}(f, m_{pu}) - p_{pi,1}(m_{su}) - p_{ahu,5}(m_{ahu,5}) - p_{pi,2}(m_{su}) = p_2 - p_1 \quad (1)$$

$$p_{ahu,i-1} = p_{ahu,i} + 2p_{pi} \quad (i = 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

$$m_{tot} = m_{by} + m_{su} = m_{by} + \sum_{i=1}^3 m_{pu,i} = m_{by} + \sum_{i=1}^5 m_{ahu,i} \quad (3)$$

式中 p, m, f 分别为压力、流量、输入频率;下标 pu, pi, su, ahu, tot, by 分别代表水泵、管道、进入 AHU 的总水量、AHU、冷水总水量、旁通;下标 i 表示第 i 台设备;数字下标见图 4 标注。

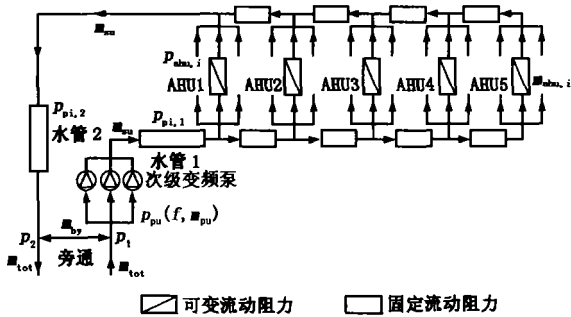


图 4 二级冷水循环回路的压力-流量平衡网络图

以同样的方法处理冷却水循环回路的压力流动问题。事实证明,这样做能有效解决大型仿真计算中收敛困难的问题,大大提高仿真计算速度。

2.3 数据文件的读取

至此,数字仿真器已经建立完成了,但要想进行仿真计算,还需要给它输入必备的数据文件,这些文件必须根据仿真器的读取要求进行预处理,并按照 TRNSYS 软件规范编制。由于本文建立的是集中空调水系统的数字仿真器,因此需要输入反映建筑物负荷的数据文件。实际建筑物在使用上分为 5 个区,共有 5 台 AHU,其中某些区的部分办公室和一些重要设备房间需要全年供冷,包括节假日,因此制冷机系统始终运行,这样使得实际系统的冷负荷即使在一天之内变化也很大。分别选择夏季、春季和冬季试验日,根据对建筑的实测数据获得不同季节试验日的建筑总负荷,见图 5;在某试验日内 5 台 AHU 的日负荷变化见图 6。

2.4 数字仿真器的调试

在本文用于优化控制研究的数字仿真器中,有很多下位机控制回路的仿真模拟。比如在 AHU 送风温度控制回路中,通过调节流经表冷器冷水的阀门开度使 AHU 送风温度保持在设定值,这种送风温度控制回路的工作原理和工作过程如图 7 所示。

通过温度传感器来感受 AHU 出口的送风温度;然后将其测得的数据传输给送风温度控制器,再由送风温度控制器根据送风温度设定值,计算并输出有关冷水阀门开度变化量的控制信号;最后,由执行机构执行并调节阀门开

比如,根据本文仿真对象中冷水二次泵系统的特点,绘制出其二级冷水循环回路的压力-流量平衡网络图,见图 4,假设二级冷水流动为理想均匀流且无压力传递延迟,以稳态方法来建立其压力和流量平衡方程:

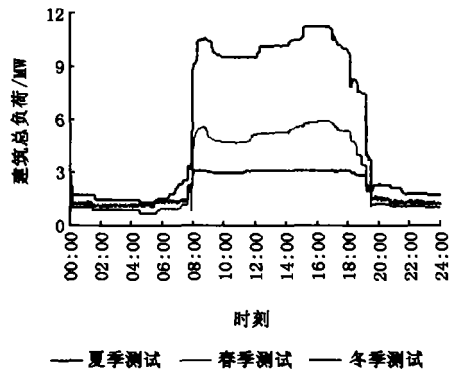


图 5 不同季节时的建筑物总负荷

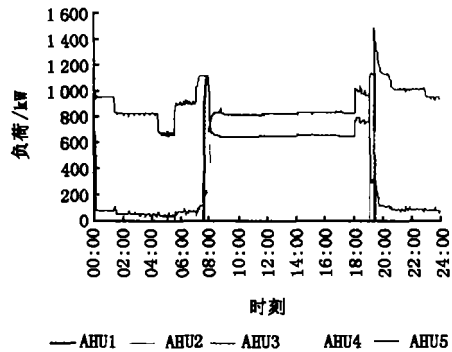


图 6 某试验日内各区 AHU 的日负荷变化

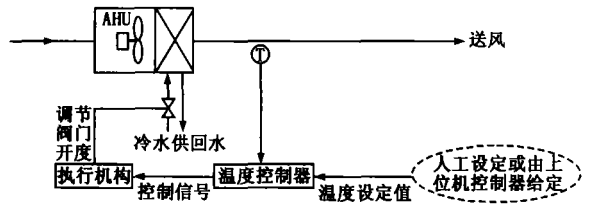


图 7 AHU 送风温度控制回路

度,从而完成送风温度控制回路的控制过程。

因此,要想使建立好的数字仿真器能正确反映实际系统的动态响应,还必须对它进行调试,即必须对各下位机控制回路中的 PID 参数进行整定,以保证各控制回路运行平稳并提高控制质量。PID 参数的整定需要进行详细的探讨和复杂的理论计算,但在实际应用中,常采用试算法来获得各参数。本文所有 PID 控制器的参数都是先对具体控制对象进行分析,计算出初值,然后再通过计算机模拟试验并逐步调整而得;同时,各控制回路之间彼此也会相互影响,因此需要逐步调试,直到整个系统仿真器的所有控制效果都达到稳定。

图8给出了在AHU送风温度控制回路中,当PID参数选择不当时对控制变量的影响。由图可见不当的PID参数会使被控变量发生偏移和振荡,而当选择了适当的PID参数后(图9),通过不断调节表冷器的水阀开度,可使AHU的送风温度保持在设定值 13°C 。

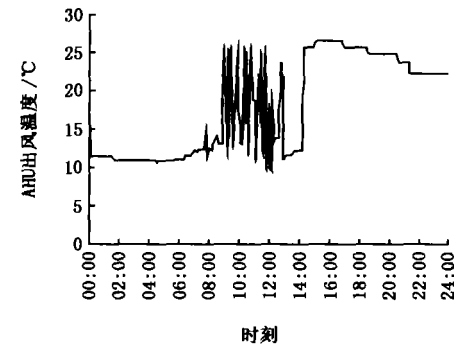


图8 当PID参数选择不当时的仿真结果

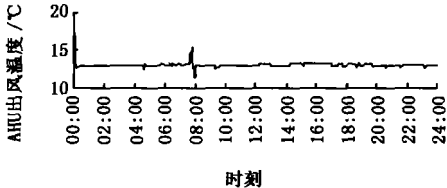
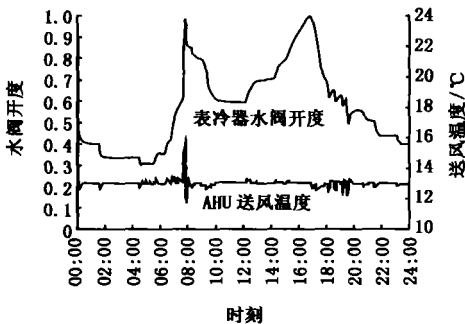


图9 PID参数选择恰当时的仿真结果

此外,从图9还可以发现,当PID参数选择适当后,被控变量基本上能稳定于所需要的设定值上,但在早上8:00左右会出现一个峰值,这是因为该时刻负荷突然增大,而该峰值能较快地消除,说明所建立的数字仿真器具有一定的灵敏度和稳定性。

以上建立了集中空调水系统的数字仿真器,通过验证后该仿真器即可用于仿真研究。

例如在某试验日内,为维持某AHU的送风温度为 13°C ,其表冷器的水阀开度见图10。从图中可见,在早晚空



调负荷较小的时段,为维持给定的送风温度设定值,水阀开度也相对较小,基本上在 $0.3\sim 0.5$ 的范围内变化;而在上午8:00左右到下午18:00左右空调负荷相对较大的时段,为供给AHU更多的冷量,水阀开度也加大,在 $0.6\sim 1.0$ 范围内变化。

事实上,像图10那样维持控制变量恒定值(AHU的送风温度维持于 13°C)的控制方式将使阀门在一天的大部分时间内开度很小,这样必使得次级泵会有多余能量消耗

于阀门上,从而造成能源浪费,因此必须根据空调负荷的实际变化对系统中所有的控制变量(AHU送风温度、AHU供回水压差、冷水供水温度等)进行实时在线的优化控制,这样才能使整个系统在最优化、最节能状况下运行。本文所建立的数字仿真器即可进行这方面的研究。

3 结语

本文着重介绍了以TRNSYS为平台、利用部件模型建立可用于优化控制研究的集中空调水系统数字仿真器的方法。文中首先简单介绍了TRNSYS软件的基本结构和应用功能;然后讨论如何根据TRNSYS软件的要求编写用户DECK文件,并将所有部件模型按照一定方式连接起来,同时给出解决整个仿真器迭代计算收敛困难问题的冷却水侧和冷水侧压力-流量计算的方法;最后,在给予仿真器必备的数据文件输入后,还探讨了集中空调水系统数字仿真器的调试问题,以完善整个系统仿真器。建立的数字仿真器在通过验证后即可用于仿真研究。

参考文献

- 1 Lawrence Berkeley Laboratory. DOE 2 Engineering Manual. Version 2.1c. 1982
- 2 Dept of Mechanical and Industrial Engineering, Univ. of Illinois. BLAST 3.0 Building Loads Analysis and System Thermodynamics Program User Manual. 1983
- 3 National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce. HVACSIM+ Building Systems and Equipment Simulation Program Reference Manual. 1986
- 4 Klein S A, Braun J E. TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Version 13.1. USA; Univ of Wisconsin-Madison, 1990
- 5 孟华. 集中空调水系统的仿真及上位机控制器的实时控制研究.[博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2004

· 通知 ·

关于中国建筑学会吸收团体会员的通知

近年来,中国建筑学会暖通空调专业委员会经常收到全国各地生产与安装企业表达加入学会团体会员愿望的电话和信件。经研究并请示后,中国建筑学会决定从2005年起接收暖通空调设备生产以及工程设计安装企业申请加入中国建筑学会团体会员。

中国建筑学会开展项目评估、成果鉴定、工程评优等一系列先进技术推广及服务活动;中国建筑学会主办的各类刊物旨在宣传我国建筑业发展政策并提供建筑市场信息;中国建筑学会可根据行业的特点和要求开展针对性强的专业性技术服务。

了解加入中国建筑学会团体会员具体程序的企业可点击中国暖通空调网(www.chinahvac.com.cn),查看《中国建筑学会团体会员条例》,也可直接拨打电话(010)84287783咨询。

中国建筑学会暖通空调专业委员会

2005年1月