城市污水处理系统实现全厂控制的发展前景

马 勇, 彭永臻
(北京工业大学 北京市水质科学和水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

摘 要: 污水处理系统不同运行单元之间存在着复杂的耦合和交叉因素,为实现系统的最优运行,需对污水处理厂进行全局或全系统控制。全厂控制是未来污水处理系统过程控制发展的必然趋势,欧美等发达国家正在大力开展这方面的研究,而我国对此研究相对落后。从全厂控制系统、全厂运行观点、全厂控制的目标以及全厂控制的实例等方面对全厂控制进行了介绍,以期促进我国在污水处理系统过程控制方面(尤其是全厂控制方面)的研究和思考。

关键词: 污水处理系统; 过程控制; 全厂控制
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1000-4602(2008)08-0008-06

Development Perspective for Plant-wide Control of Urban Wastewater Treatment System

MA Yong, PENG Yong-zhen
(Key Laboratory of Beijing for Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The different parts of wastewater treatment system have many complicated cross-coupling factors. In order to achieve optimal operation, it is necessary to implement the plant-wide control or global system control. The plant-wide control is the inevitable trend of process control development of future wastewater treatment system. Europe and the United States have vigorously carried out research in this area. The Chinese research lags behind relatively. The plant-wide control including control system, control operation, control objectives and some control examples was introduced with a view to promote the Chinese research and thinking in process control of wastewater treatment system, particularly in the plant-wide control.

Key words: wastewater treatment system; process control; plant-wide control

污水处理厂不同控制变量的时间量程跨度不同,如传统仪表(流量计、液位计和压力表等)的控制环路,其时间量程以秒或分钟计;对于浓度控制环路(DO控制、化学药剂投加控制和内循环回流量控制),其时间量程以分钟或小时计;而 SRT控制会对微生物动力学产生影响,其时间量程则以天计。由于不同污水处理过程的时间量程不同,污水处理厂传统控制是"分而制之",认为每个处理单元过程相对独立运行。例如,对于营养物污水处理系统,每次只考虑一个格室或一个单元,认为 DO控制和 SRT控制之间完全解耦,没有相关性。在快速时间量程工作环境中认为慢速过程是恒定的,如在 DO控制

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060005002); 北京工业大学博士科研启动基金资助项目(52005013200702); 北京市属高等学校学术创新团队

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

过程中认为微生物种群恒定。相反在慢速时间量程系统中,快速现象可以认为无限快,如在描述微生物变化的系统中,可以认为当供气量或呼吸速率变化时 DO浓度可瞬间达到稳定。

在考虑不同单元过程的控制和自动化时,需考虑系统单元过程之间的相互作用,它不但影响污水处理厂的运行目标,而且还影响单个处理单元的运行。事实上污水处理厂不同单元的运行过程与下水道及污水处理厂之间存在很多耦合和交叉的因素,即使根据不同单元过程和时间常数可以解耦的运行系统,也不能忽略它们之间的相互作用[1,2]。为了实现系统的最优运行,必须对污水处理厂进行全局或全系统控制。

全厂控制是污水处理系统过程控制发展的必然趋势[3],当前欧美许多国家对控制系统的研究主要集中在全厂控制,而我国还未开展这方面的研究。与发达国家相比,我国在污水处理的运行管理与过程控制方面还存在较大差距[4]。目前,我国城市污水处理厂的吨水耗电量是发达国家的近两倍,而运行管理人员数又是其若干倍。因此加强我国污水处理系统过程控制的研究迫在眉睫。

1　全厂控制系统

在某些方面可将“全厂”理解为污水处理厂不同运行单元和基础设施间信息的相互联系,实时控制计算机使得全厂控制成为可能。许多制造商和污水处理厂运行人员认为“全厂”就是污水处理厂不同单元的信息交流。全厂控制主要具有以下功能:

① 数据收集、报告和信息共享

通过高性能的驱动程序和标准的通讯接口,“全厂”系统可以连接上千个设备并能收集数据。数据分布和通讯结构均能保证将数据提供给用户、其他污水处理系统和不同的数据库。

② 实时可视化

应用全厂控制系统的运行人员不但可从控制室屏幕获得数据,而且从手动的便携式设备也可获得数据。此外,警报信息还可被传输到标准的数字传呼机。不管运行人员、工艺工程师或管理者是否在现场,根据需求都可获得想要的信息。

③ 警报管理

好的监控系统应具有提供警报的功能,从而自动响应并给运行人员发送警报信息,通知关于该事件的相关过程,标明与本事件相关的运行人员和工程师。理想的警报系统应在问题发生前具有识别和解决问题的能力。

④ 远程连接

运行人员可应用 Modem和污水处理厂内部互联网远程连接,进行预警报告并检查污水处理厂的运行状态,同时还可修改系统。另外,运行和维护人员可从污水处理厂的任何位置使用无线局域网掌上电脑和人机界面软件,实现与报警器和控制点的接触,从而提高系统的响应时间、促进系统运行灵活。临时用户应用工业标准浏览器通过 Internet可以访问控制系统(即虚拟控制室),当污水处理系统出现紧急情况时,运行控制和命令中心在专家的帮助下可迅速确定解决方案。

⑤ 开放的结构

目前很多控制设备具有开放结构,控制器、输入/输出(I/O)单元和数据线易与第三方模块进行结合,这一特性使得控制系统可自由地选择最好的或最新开发的技术。

⑥ 综合的自动化系统

综合的自动化系统应该实行过程控制,并与其他对系统性能有影响的控制过程紧密结合。这主要包括所有运行的质量控制、安全性、仪表、资产和维护等信息,且从任何地点都可访问和修改上述信息。综合结构意味着所有的控制器编程和配置方式相同,系统的数据模型也相同,另外系统还可提供污水处理厂运行和管理系统之间的连接。

2　全厂运行的观点

传统污水处理系统的过程控制是通过解耦不同单元过程实现的,但是不同运行单元之间的确存在相互作用,有时很难解耦,这也是污水处理系统为什么需进行全厂控制的主要出发点。污水处理厂中存在的主要相互作用体现在水力相互作用、污水处理厂内部回流系统的影响、单元过程的相关性及资源分配等 4个方面[1,5,6]。

2.1　水力相互作用

水力干扰是所有污(废)水处理系统运行中存在的主要问题,需要避免流量变化给运行系统带来的干扰。然而工业废水的排放和暴雨等事件会导致污水处理系统的流量快速变化,给系统处理性能带来较大影响,因此需要采取措施以降低污水处理厂进水流量的变化。

排水管网可以积累大量的污水,通过管网和污

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

水处理厂的相互作用可降低进入污水处理厂的水量,但实际是不同部门负责排水管网和污水处理厂的运行,同时雨污合流制也很难发挥管网储存污水的能力。排水管网和污水处理厂的综合控制意味着排水管网的运行目标和污水处理厂的运行目标两者之间实行优化,可通过受纳水体的状态来表示系统的处理性能。因此可将排水管网作为污水处理厂进水量的调节单元,从而削减高峰期进入污水处理厂的流量。另外,如果进入污水厂的原水分别进入几个平行运行的处理系统,则其流量分配极其重要,一定要避免进水分配不均,造成高负荷的系统出水水质不达标而低负荷的系统浪费能耗的问题。

2.2 污水处理厂内部回流系统的影响

不同单元过程之间的相互作用使得全厂控制更加必要,每次仅考虑一个处理单元是不够的,污水流量将影响每个单元的运行。污水内部回流将增加系统的复杂程度,因此需要考虑不同运行单元间的相互影响。

污水处理厂内部常见回流系统的影响主要有以下几种:

① 对于营养物去除系统,溶解氧和硝态氮会通过回流污泥而进入厌氧区,从而对厌氧过程造成一定影响。

② 对于生物过滤系统,过滤反冲洗水的回流会对系统水力负荷造成巨大冲击。

③ 城市污水处理厂的污泥回流量控制存在问题,这是因为回流污泥和进水量是成比例的,进水量变化约在 20～30 min后传递到二沉池,污泥回流泵将根据流量的变化以设定的比例快速变化,也就是污泥回流量的变化将比进水量到沉淀池之间的变化更迅速,从而导致出水 SS浓度增加。解决该问题的有效办法就是使污泥回流变化滞后。

④ 前置反硝化系统从好氧区到缺氧区的硝化液回流,将影响硝化反应器最后区域 DO设定值的选择。

⑤ 生物除磷系统二次释磷及污泥回流将导致磷负荷重新回流到系统,从而影响好氧区 DO值的控制及二沉池停留时间的调整。

⑥ 污泥消化上清液回流需严格控制时间,避免上清液回流和污水处理厂的进水高峰负荷重合。

⑦ A^2/O工艺中厌氧区易于生物降解 COD和 VFA会溢流到缺氧区和好氧区。

⑧ 营养物去除系统中营养物浓度和停留时间对微生物种群分布有一定影响。

⑨ 许多污水处理厂对污泥产量的目标不一致,有时运行目标是最大程度地提高污泥消化的甲烷产量,有时却是最大程度地降低污泥产量及其处理费用。

2.3 单元过程的相关性

由于污水处理厂由数个单元过程组成,很明显每一个单元过程的运行都将影响后续处理单元的运行,例如:

① 好氧池和沉淀池之间的耦合程度很强,若系统微生物中含有大量丝状菌,则沉淀池的运行将受到影响;如果沉淀停留时间长、硝酸盐氮浓度高,沉淀池内将出现反硝化现象造成污泥上浮。

② 设置初沉池并投加混凝剂进行化学除磷将影响碳源的去除。在初沉池中化学药剂的投加量不仅影响除磷效果,其他颗粒性物质也将在初沉池中被去除,造成进入生物反应器的碳源含量降低,从而导致前置反硝化区域的进水碳源不足。

③ 反硝化消耗碳源存在问题,即前置反硝化区的运行将影响好氧区有机物的去除及对能量的需求。

2.4 资源的分配

污水处理厂的合理设计对系统的运行具有重要影响,若污水厂的设计已经完成 (无论运行与否),只能从系统的运行优化着手来提高污水厂的处理能力。

在比较不同的污水处理系统时,需考虑系统的总能耗 (包括污水的传输、曝气能耗、混合能耗、水加热能量需求和气体产生量)。从单元子系统来观察能量需求显然不能得出正确的结论,可能仅仅实现了系统的准最优控制。能耗同时也是生物脱氮除磷系统的决定性因素,对于好氧微生物可以采用曝气控制系统来降低能耗,并以总能耗来比较不同的方法。用污水泵提升污水时,也需要考虑能耗问题。虽然一些单元过程并未高效运行,但实现了整个系统的最优,这就是最终目标。

3 全厂综合控制的目标

全厂控制运行的最终目标是在满足出水排放标准的情况下,最大程度地降低运行费用和能源需求。为了更加明确全厂综合控制的目标,需要定义系统的边界并把普遍的目标变为特定的目标或性能指

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

标。

当讨论全厂控制时一般都是指在污水处理厂范围内,当扩大范围时可包括排水管网、受纳水体、污(废)水排放企业或居住小区,处理工艺因而包括更多的回流系统并受其影响。由于很难实现这样复杂系统的综合控制,考虑到污水处理厂的外部干扰主要是进水流量,而考虑污水处理厂和排放管网这一综合系统时,污水处理厂的进水量就可以看作本综合系统的一个控制变量,所以目前综合控制主要是指污水处理厂和排水管网综合系统的运行控制。

污水厂的出水排放将影响外部环境,当外部环境定义为受纳水体时,外部干扰将变得很复杂。在排水管网—污水处理厂综合运行系统中,仅考虑污水处理厂出水对外部环境的影响并不充分,还需考虑系统运行对污水处理厂的影响。例如,出现暴雨时需考虑溢流;对于没有溢流装置的污水厂,虽然会有部分污水进入受纳水体,但只是短期内出水污染物浓度提高;而不设置溢流,则所有污水进入污水处理厂将会出现水力负荷超标的危险,可能造成微生物流失从而导致污水处理厂在以后数周或数月内除污效率降低。

在考虑排水管网—污水处理厂综合系统时,所有的单元过程都可认为是本地控制。不同单元过程的控制就是在污水处理厂控制系统中计算本地控制器合适的设定值。同时应用水位和流量传感器的信息控制不同区域排水管网的流量,排水管网流量可通过自动堰调整,另外雨具测量装置提供的信息也可使流量预测成为可能。当污水处理厂进水流量可以预测和控制时,就可实现排水管网和污水处理厂的全厂控制。

全厂控制的一个基本需求就是排水管网和污水处理厂之间的通信,从而最大程度地利用两个系统的容量。根据当前的实际情况,污水处理厂监控和数据获得系统(SCADA)可连续计算污水处理厂的水力负荷,但其水力容量和污泥特性、污泥分布以及污泥量相关,也与泵的能力、渠道和管道尺寸等物理性限制因素相关。

控制的目的是保证大部分污染物储存在一定区域内,或储存在排水管网中,稍后通过污水厂处理后排放。当需要排放时,控制的思想就是将污染程度较轻的污水溢流到不敏感的受纳水体,雨季时的控制目标就是综合利用排水管网和污水处理厂的容量降低污水对环境的影响。基于以上分析,排水管网和污水处理厂的目标、测定变量和控制方法见表 1。

表 1　排水管网—污水处理系统综合运行的目标、测定变量和控制方案

Tab. 1　Function aim, determination parameters, and control project of combined drainage network and wastewater treatment system

项目	局部目标	测定变量	控制手段
排水管网系统	降低上游溢流量、利用其容量储存污水	雨量、液位、流量	泵站、可调节的堰、水池
污水处理厂	处理尽可能多的污水、降低二沉池的水力和固体负荷	流量(进水、出水和回流污泥)、SS(曝气池和回流污泥)、污泥层高度	控制二沉池污泥层、曝气池沉淀(ATS)、在生物单元之前或污水处理厂前溢流

对排水管网和污水处理厂的控制,需选择合适的控制策略(包括设定值的选择)。此外,排水管网系统必须可以预测进入污水处理厂的流量(如几小时后的流量),另外污水处理系统必须能估计生物处理单元最大允许的水力负荷,这些运行参数可以基于模型或经验获得[7,8]。为了提高系统的处理效果,进入污水处理厂的水力负荷应尽可能小,从而最大程度地利用排水管网储存污水的能力。另一方面,污水厂生物处理单元所允许的水力负荷应尽可能高(从排水管网角度来看),但这是以牺牲处理效果为代价。因此全厂控制是实现系统的优化,粗略地讲,系统的优化可通过指定污水处理厂和排水管网系统的设定值来实现,全厂控制必须综合考虑:如能实现两者之间的平衡,则将提高系统的总性能。

如果能提前预测污水处理厂控制系统的流量,就能确定生物处理单元所能承受的最大水力负荷。假如生物处理单元达到最大可承受的水力负荷,就可以应用排水管网的储存能力来降低生物处理单元的进水量,假如超过了排水管网的储存能力,需要溢流部分污水。这也就是说,不管对于单独的排水管网或污水处理厂还是它们的综合系统,均需考虑系统的变化和灵活性。

4　应用实例

与设计负荷相比,在沉淀性较差或回流污泥浓度较低时系统的最大容量也有所降低。相反,沉淀性能较好且沉淀池和曝气池之间污泥分配合理时,系统的处理容量将高于设计容量。通常可采用分段进水控制、调节池控制和曝气池沉淀(ATS,也就是根据进水负荷的大小关闭曝气池最后格室的曝气从

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

而降低进入二沉池的污泥负荷)等方法,实现较高的系统容量[9]。由于全厂控制的目的是在可能最小的费用下达到预期的排放标准,降低化学药品投加量,实现系统的稳定运行,其关键在于如何实现系统的连续稳定运行。因此,最优策略并不需要在每个单元过程或步骤中都试图最大程度地去除污染物,需综合考虑单元过程和总运行费用的相互作用及不同过程之间的动态耦合性,即采用全厂控制。

① 瑞典 Boras的 Gasslosa污水处理厂

该污水厂初级处理由砂滤池和进行化学除磷的前置沉淀池组成,二级处理分为前置反硝化 A/O工艺和生物滤池两个平行运行工艺,最后还包括一个后置化学沉淀单元。应用初级处理可避免后续生物单元超负荷运行,但还需保证生物处理单元反硝化所需的碳源,另外应用前置沉淀池也可保证后置沉淀能满足出水磷的排放标准。

当二级生物处理单元有效处理进水负荷时(尤其采用生物除磷可以实现磷的达标排放时),采用前置沉淀是不合理的。另外,前置沉淀池也会导致后续生化单元的进水碳源含量降低,尤其是在生物脱氮除磷所需碳源不足的情况下,尽量避免投加化学药剂。此时应充分考虑所有的耦合关系以实现系统间的平衡,从而降低运行费用,同时满足出水磷的排放要求。在正常的进水负荷条件下,可考虑不使用后置沉淀池,只在雨季和暴雨时设置后置沉淀池。

② 丹麦 Fredrikshavn污水处理厂

该污水厂设有前置化学除磷沉淀单元,该单元后是平行运行的脱氮工艺(分别是内循环活性污泥工艺和淹没式曝气生物滤池)。由于两种工艺的处理能力不同,因此运行的关键在于如何尽可能地均匀分配两种工艺的进水负荷,从而最大程度地提高系统的处理能力。此时控制的任务在于高进水负荷时充分利用活性污泥工艺去除有机污染物的稳定能力以及淹没式曝气生物滤池处理水力负荷的能力,而在低进水负荷时则应尽可能地将原水分配进入运行费用较低的工艺。

通过在线测定两种平行工艺的出水氨氮和硝态氮浓度,以表示进水负荷的大小,从而控制进水负荷的分配。然而两种工艺的水力停留时间不同,由出水信息反馈进水负荷的分配具有滞后性。因此可以根据某天的运行经验来控制随后一天系统的运行,如果能确定每日负荷的变化就可以获得更好的控制效果。

采用淹没式曝气生物滤池时,由于其除磷能力较差,为了满足出水中磷的排放标准,就需要辅助前置化学沉淀除磷;而内循环活性污泥工艺运行时可以减少或停止前置化学沉淀过程。

③ 丹麦的 Skagen污水处理厂

该污水处理厂由两个相互连接的生物单元 A段和 B段组成(见图 1)。控制的目的在于强化系统的处理性能,以最小的运行费用处理尽可能多的污水,因此在 A段可去除大部分 COD(吸附作用)。如果需要在 B段去除较多的有机物,污水可超越 A段而进入生物除磷反应器或直接进入曝气池。图 1主要说明了污水经过沉砂池后分配在三个位置,其中两个通过控制分配到 A段和 B段,而第三个是从分配室处溢流(如图 1所示的虚线)。

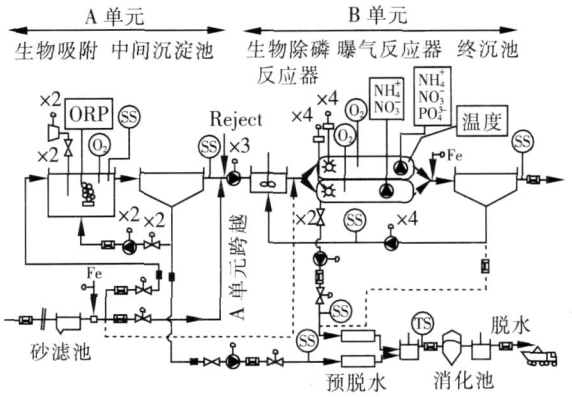

图 1 丹麦 Skagen污水处理厂布置(包括 A段和 B段)

Fig 1 Layout of Skagen WWTP of Denmark (including A and B section)

④ 丹麦 Vedback污水处理厂

与污水处理厂相比,对排水管网系统控制的考察很少,近年来对排水管网系统控制的研究主要集中于应用在线传感器测定污水量、泵的运行状态和管道内的液位。

排水管网系统的泵站数据可用来预测污水处理厂的流量,从而在高峰负荷流量到达污水处理厂之前启动曝气池沉淀(ATS)过程。2002年丹麦 Vedback污水处理厂采用流量预测的策略结合 ATS控制,对排水管网和污水处理厂进行综合控制,目的是减少污水的溢流量,结果表明控制很成功。另外有较大暴雨的集水区 A的溢流水可储存在未降暴雨集水区 B的管道和集水池中,直至污水处理厂可以处理这部分污水,从而实现系统的综合控制。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5　结论

城市污水处理系统不同单元之间存在着复杂的相互作用,系统优化运行需要考虑它们之间的相互作用,而非系统的局部最优化。采用全厂控制可以实行上述目标,它是污水处理系统过程控制的未来发展方向。全厂控制的最终目标就是在满足出水排放标准的情况下最大程度地降低运行费用和能源需求。目前的全厂控制仅限于污水处理厂和排水管网的综合运行,充分利用排水管网和污水处理厂的处理容量,提高系统的处理能力,并实现节能降耗。全厂控制在欧美各国得到了广泛重视,并在实际中开始应用,而我国还远未开始这方面的研究,因此开展城市污水处理系统全厂控制的应用性研究是我国污水处理系统的一个重要发展方向,并具有较强的实用价值。

参考文献:

[1] Olsson G, Nielsen M K, Yuan Z, *et al*. Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Treatment Systems [R]. London, UK: IWA, 2005.

[2] Jeppsson U, Rosen C, Alex J, *et al*. Towards a benchmark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs[A]. Proc 6th IWA Int Symp on Systems Analysis & Integrated Assessment (Watermatex 2004) [C]. Beijing: IWA, 2004.

[3] Olsson G, Jeppsson U. Plant-wide control: dream, necessity or reality? [J]. Water Sci Technol, 2006, 53(3): 121 - 129.

[4] 高大文,彭永臻,王淑莹,等. 污水处理智能控制的研究、应用与发展[J]. 中国给水排水, 2002, 18(6): 35 - 39.

[5] Vanrolleghem P A, Jeppsson U, Carstensen J, *et al*. Integration of wastewater treatment plant design and operation - a systematic approach using cost functions[J]. Water Sci Technol, 1996, 34(3 - 4): 159 - 172.

[6] Pernille Ingildsen. Realising full-scale control in wastewater treatment systems using in situ nutrient sensors [A]. Doctoral Dissertation in Industrial Automation Department of Industrial Electrical Engineering and Automation[C]. Sweden: Lund University, 2002.

[7] Rauch W, Bertrand-Krajewski J L, Krebs P, *et al*. Deterministic modelling of integrated urban drainage systems [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(3): 81 - 94.

[8] Gernaey K V, Nielsen M K, Thornberg D, *et al*. First principles suspended solids distribution modelling to support ATS introduction on a recirculating WWTP[A]. Proc 2nd Int IWA Conf on Automation in Water Quality Monitoring (AutMoNet2004) [C]. Vienna, Austria: IWA, 2004.

[9] Nielsen M K, Lindstrom M, Gernaey K V, *et al*. Uncertainty reduction in integrated control: confronting model predictions with information from on-line data[A]. Proc 2nd IWA Conf on Instrumentation, Control and Automation (ICA2005) [C]. Busan, Korea: ICA, 2005.

E-mail: mayong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2007 - 09 - 05

·企业动态·

施耐德电气参与 2008年北京奥运会的场馆建设

作为全球配电和控制领域的专家,施耐德电气被选中参与 2008年北京奥运会规划的电力基础设施的建设和管理,这项服务几乎涵盖了 2008年北京奥运会的所有设施。正是由于施耐德电气所具有的专业团队和技术创新实力,以及所积累的长期参与奥运设施建设的丰富经验,使之成为历届奥运会组织者的共同选择。

施耐德电气为 2008年北京奥运会制定了一系列以节能和环保为中心的整体解决方案,即为每个建设项目提供最具创新技术的产品,这些产品由全系列软件系统和服务来驱动。

施耐德电气参与的北京奥运会场馆的建设有:为新建的国家体育场 (即"鸟巢")安装照明控制系统;为"水立方"及其他大型项目 (如北京首都机场新建的 3号航站楼和外形前卫的中央电视台大楼等)建设整体配电系统。

由于施耐德电气在技术、环境和社会责任等方面不断做出的贡献,将助力北京奥运会所提出的"绿色奥运、科技奥运、人文奥运"理念,并为北京奥运会成为历史上最成功的奥运会保驾护航。

(施耐德电气 <中国> 郑　洋)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net