

# 智能电网与智慧城市业务互动研究

高志远<sup>1</sup>, 严春华<sup>1</sup>, 郭昆亚<sup>2</sup>, 郝蜜昉<sup>1</sup>, 曹阳<sup>1</sup>, 姚建国<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院(南京), 江苏 南京 210003; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

**摘要:** 友好互动是智能电网的核心特征之一。智慧城市建设对智能电网的互动运行提出了新的要求, 但是目前这方面的研究还相对薄弱。采用规范化分解和按需重组的方法, 提出了一个智慧城市互动化业务框架, 并从通信支撑、协议规范、安全保障等方面进行了分析。在此基础上, 对智能电网对外服务进行了规范分解, 并结合智慧城市需求进行了多源信息服务、应急抢险、需求响应业务的综合重组设计。最后, 利用 MatLab/Simulink 工具进行了模拟仿真, 验证了所提方案的高效服务能力。

**关键词:** 智能电网; 智慧城市; 双向互动; 互动框架; 一体化平台; 信息通信技术

## Research on interactive operation between smart grid and smart city

GAO Zhiyuan<sup>1</sup>, YAN Chunhua<sup>1</sup>, GUO Kunya<sup>2</sup>, YAN Mifang<sup>1</sup>, CAO Yang<sup>1</sup>, YAO Jianguo<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China;

2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China)

**Abstract:** Flexible interaction is a key feature of smart grid. The construction of smart city puts forward new demands for the interactive operation of smart grid, but the current related researches are still relatively weak. With the methods of standardized decomposition and on-demand reconstruction, an interactive operation architecture of smart city is proposed which is analyzed from communication supports, protocol specification and security measures. Based on the architecture, the external business of smart grid is decomposed into standardized external services, the businesses of multi-source information integration service, emergency rescue and demand response are comprehensively restructured combining higher demands of smart city. Finally, a simulation model is developed on the Matlab/Simulink software, and the results show that the proposed architecture is effective.

**Key words:** smart grid (SG); smart city (SC); bidirectional-interaction; interactive architecture; integrated platform; information communication technology (ICT)

中图分类号: TM619

文章编号: 1674-3415(2016)02-0065-09

## 0 引言

智能电网与智慧城市分别是目前在电力工业和城市建设领域的两大世界性潮流。以电为中心、清洁化和智能化为特征的新一轮能源革命正在世界范围兴起<sup>[1-4]</sup>。而进入新世纪以来, 智慧城市建设也日渐成为大势所趋<sup>[5-8]</sup>, 城市中的各个行业和部门需要日益紧密的联系和协调。在城市建设和运行领域这个交集范围内两者间的互动具有重要的意义<sup>[9]</sup>, 互动有利于充分利用两者的(已有)资源, 有利于更好

地实现社会服务功能, 也有利于城市建设和电网发展, 最终实现“双赢”。

目前智能电网和智慧城市建设的互动还有很大提升空间。相比于传统电网的简单、单向供电服务, 智能电网非常强调双向互动, 并且在电力流、业务流、信息流方面发展了多种互动的方式和应用<sup>[10-12]</sup>, 但目前还主要限于以电网为中心的预先设定固定模式的互动, 怎样动态地满足智慧城市中不断发展的多类型互动需求还需要深入研究。城市各业务部门、用户之间的充分互动也是智慧城市的核心特征之一<sup>[7]</sup>, 但是目前还很少对智能电网提出深入的互动要求, 大部分电网功能, 被社会认为是局部的、电力行业自身应该完成的。本文在对几个典

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“智能电网支撑智慧城市关键技术研究及示范应用”

型城市的调研中也印证了这种情况。

有鉴于此，有必要就智能电网与智慧城市的业务互动进行深入研究，以实现更高水平的自动化和智能化应用，充分利用两大体系的各类资源。同时面对复杂、多样和动态的城市业务系统和智能电网服务，如果每一种互动都需要进行针对性的开发和协调，则可能既是资源的浪费，实际上也不可行，所以为智能电网和智慧城市提供一种互动的机制和方法，也很重要。

### 1 关键问题分析

随着智能用电、智能家居、分布式能源、储能应用、能效管理、电动汽车<sup>[13]</sup>、电力信息数据挖掘等新技术和应用的不断涌现，以及互联网应用的充分发展，目前智能电网(以下简称 SG)与智慧城市(以下简称 SC)的互动已经有了很好的基础。但是还面临着以下关键挑战：

1) 各个部门和行业长期以来已经形成了各自的垂直管理和运行体系，整个城市业务条块化分割的现状将长期存在。

2) SG 与 SC 的互动必须满足各行业部门的安全需求和行业管理规定。例如电力行业本身就有各种复杂的安全管理规定<sup>[14-15]</sup>，还涉及许多社会敏感内容和商业机密。

3) 缺乏城市中各行业普遍认同的信息和业务互动规范，也缺乏相应的协同设计指导。

4) 城市互动业务本身的复杂性很高。由于涉及到多个行业，具体应用需求和环境差异很大，难以预先设定固定模式。

5) 成本和时间限制。一方面要提供更经济的解决方案，另一方面又要及时满足各种变化的业务互动需求。

目前一个比较普遍的思路是建立跨行业跨部门的公用基础平台(或者类似的提法)<sup>[16-18]</sup>，实现基于一体化平台的互动应用。其实在一个行业和部门内部的统一平台化应用已经比较普遍，例如在电力行业中就有国家电网公司数据交换平台<sup>[19]</sup>、统一支撑平台<sup>[20]</sup>等。但是扩展到整个城市中的各个部门、行业 and 用户，也受到以上约束的限制。在实际建设中，多数情况下也并不存在一个这样的统一平台(电信服务商平台除外)，松耦合是必然和长期的。

### 2 智慧城市互动化业务框架

基于分布建设、总体集成的思路，提出了一种先把各行业部门提供的服务进行规范化分解，然后根据 SC 发展建设的需要重构互动业务的解决方

案(以下简称互动框架)。这样既保持了各行业部门原有系统和运行方式的完整性，又为 SC 互动业务的不断更新提供了一种自动化和智能化的机制和方法。其基本框架如图 1 所示。

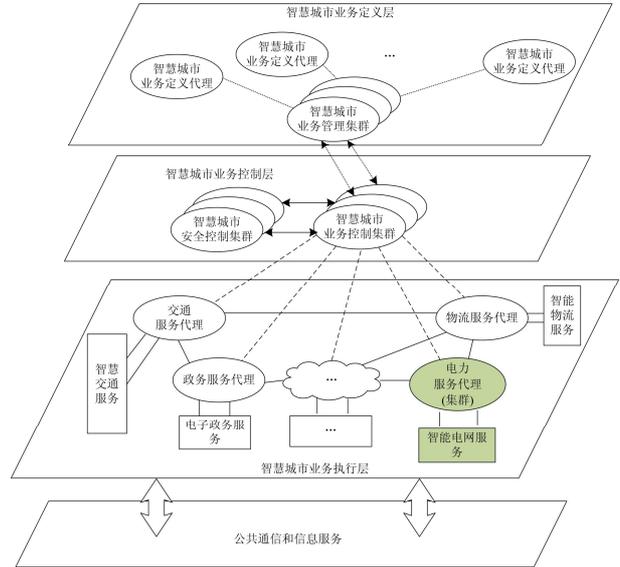


图 1 智慧城市互动化业务框架

Fig. 1 Interactive business framework for smart city

互动框架共分为以下 4 层：

1) 智慧城市业务定义层：这一层在城市各业务部门提供的基本业务单元的基础上，组合、重构完成互动业务定义。业务定义的基础是基本业务单元，它代表了各业务部门的对外服务分解后的基本单元服务(后文将以 SG 典型服务为例进行示范分解)。具体操作通过各业务定义代理完成，最终结果保存在业务管理集群中。集群的规模根据需要可以灵活控制(下同)。

2) 智慧城市业务控制层：接受业务定义层发来的已定义互动业务，据此控制业务的执行。业务安全控制集群负责业务的安全和权限鉴别，业务控制集群实际控制业务执行。该层同时必须支持业务的调试和试运行。

3) 智慧城市业务执行层：实际执行智慧城市各类互动业务。特点在于不改变各行业部门原有的业务系统，而增加服务代理，对外提供各类规范化的基本服务，在业务控制集群的控制下，实现各类互动业务。各服务代理之间以及各行业原有业务系统之间的连接可以通过本层内的专网实现，在安全控制策略允许范围内也可以利用下面的公共通信和信息服务层。

4) 公共通信和信息服务：电信及其他各类社会公共通信和信息服务。

## 2.1 业务定义和调试

业务定义层中定义的互动业务, 实际只能代表业务控制集群与业务执行层中各业务代理之间的理想化互动。实际业务的执行, 需要业务执行层中各业务部门实际系统的真正互动, 需要 SG 中电力流、业务流、信息流的实际运转。所以一个 SC 互动业务在业务定义层中定义好后, 还必须在业务控制层和业务执行层中实际调试和试运行。

业务的定义和发起者, 可能是行政主管部门, 也可能是个别业务部门, 或者某一类用户。显然, 互动业务的组织、协调和执行需要城市行政主管部门的支持。事实上, 许多国内的智慧城市建设中已经建立了类似“智慧办”的部门。

## 2.2 通信支撑

通信支撑是实现 SC 互动框架的基础。图 1 中的层与层之间、每层内部各个模块之间都需要一定通信支撑。可以建立专网, 也可以综合利用电信(包括专线)网络资源。

最理想的情况如图 2 所示, 采用 3 张专网和 1 张公网的形式, 即业务定义层、业务控制层和业务执行层采用专网(相互间通信基于一定的安全防护装置); 公共信息和服务层利用互联网等公共网络。根据情况, 可以灵活配置并使用已有的各种资源, 但核心是确保业务定义层、控制层的更高安全级别。

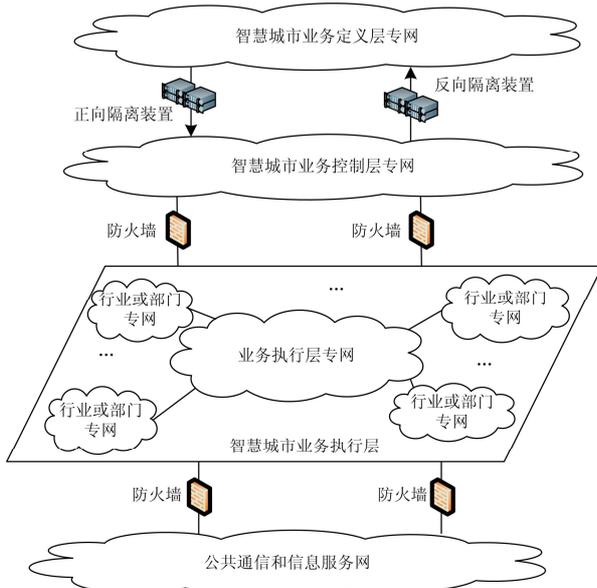


图 2 互动业务通信支撑

Fig. 2 Communication systems of interactive business

## 2.3 通信协议接口

为实现互动框架, 就需要有一个城市各业务部门共同遵守的通信协议, 特别是在业务管理集群、

业务控制集群以及业务执行层的各业务代理之间。这方面可选的技术很多, 典型的例如基于开放标准 XML、WSDL、UDDI 的 WebService 服务方式等, 但目前还没有这方面普遍认可的通用协议。图 3 是本文做的一个示范设计, 该协议栈以互联网 TCP/IP 协议族为基础, 支持常见的互联网协议, 但对物理层、链路层、会话层、表示层协议不具体指定, 可以根据当地具体情况选用; 考虑到安全需求, 可以选用 SSL/TLS 等安全协议; 对于具体应用, 可以支持 Web Service 技术应用, 同时也支持另建内部的智慧城市应用协议。

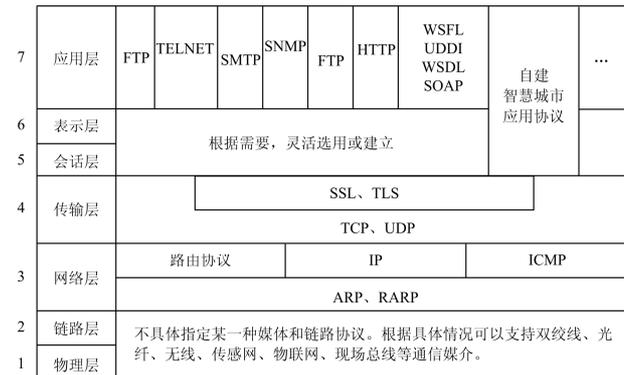


图 3 通信协议栈示例

Fig. 3 Example of communication protocol stack

需要指出的是, 以上协议栈不涉及 SC 中各行业和部门内部的通信协议, 例如对于电力、教育、交通、政务等行业, 其专用协议与 SC 互动框架的互联互通由图 1 中的各类服务代理系统转化完成。

## 2.4 安全保障

互动框架的安全问题, 其范围已经从普通的信息安全威胁扩展到各类城市基础设施和实体的安全。在安全的多种含义中<sup>[21]</sup>, 优先关注机密性(信息保密)、完整性(数据正确)、可达性(服务可用)。

基于 BLP、BIBA 等信息安全模型<sup>[21-22]</sup>, 在常见的各类安全技术基础上, 设计了如下 SC 互动业务安全策略。

### 1) 信息分类:

机密信息: 例如密码、业务逻辑等。

数据信息: 各业务响应数据、各专业系统数据、业务执行指令等。

其他信息: 安全限制相对较低的信息, 例如用户的互动化请求等。

### 2) 安全和重要级别:

对 SC 互动框架中的各主体划分安全级别, 核心是确保业务控制层具有最高级别, 其次是业务定义层。表 1 是一个示范例子。对于具体的互动业务

也可以设计类似的重要性级别。

表 1 智慧城市互动业务主体安全等级示例

Table 1 Example of security levels for subjects of smart city interactive business

主体	业务控制集群	业务定义集群	业务定义代理	行业服务代理	行业服务实体	公共通信、信息服务
安全级	6	5	4	3	2	1

3) 访问策略:

机密信息: 只允许从安全级别低的主体流向安全级别高的主体, 即高安全级主体可以读低安全级主体的机密信息, 低安全级主体可以写机密信息给高安全级主体。这一机制用于确保机密性。

数据信息: 只允许从安全级别高的主体流向同级或安全级别更低的主体, 这一机制用于确保完整性。

重载处理: 当各级业务主体的负载率达到一定限值时, 则根据互动业务的重要级别, 优先处理更为重要的业务, 这一机制用于确保可达性。

具体实现时可以根据权限设置, 构造访问控制权限可达矩阵。其定义为:  $n$  级主体在行、列按同样顺序排列, 元素 1 表示允许从行主体到列主体的读操作, 矩阵元素 0 表示不允许。如果主体不多可以一次性构建该矩阵, 否则可以在初始邻接矩阵  $A_1$  中只定义相邻主体的访问权限, 然后利用式(1)获得机密权限可达矩阵  $C_1$ (即访问控制权限矩阵), 式(2)获得数据权限可达矩阵  $C_2$ 。造成  $C_1$  和  $C_2$  区别的原因是数据信息允许同级之间传递, 导致初始邻接矩阵特征不同。

$$C_1 = A_1^{(k)} \tag{1}$$

式中:  $A^{(i)} = A^{(i-1)} + A^{(i-1)} \cdot A^{(i-1)}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ );  $k \leq n-1$  且满足  $A^{(k)} = A^{(k-1)}$ 。

$$C_2 = (A_1)^k \tag{2}$$

式中,  $k \leq n-1$ , 且满足  $A^k = A^{k-1}$ 。

### 3 智能电网与智慧城市业务互动化设计

在 SC 互动框架下, 采用业务分解和重构的方式, 对 SG 对外服务业务进行了规范化分解, 并以多源信息服务、需求响应为例, 示范了相关互动业务的构建。

#### 3.1 电力服务规范化分解

为了更好地参与外部系统和用户的互动, 需要对电网对外服务进行适当的分解。把原来的服务分解为一个一个单独的可用于重构更复杂互动业务的单

元服务。例如根据目前智能电网发展和互动化研究成果<sup>[1-4, 11-13]</sup>, 可以把电力对外服务规范化分解为供电请求、供电通知、停供电请求、停供电通知、受电请求(请求电网接纳分布式能源电能)、预受电请求(基于预测信息, 提前发出受电请求)、停受电通知(停止接受用户电能)、提供信息(由电网对外部用户提供信息)、接受信息(接受电网外部系统或用户提供的信息)、检修请求、检修通知、现场服务请求、电能质量监测请求、用电数据分析请求、安装请求、安全鉴定、费用结算、同意业务请求、拒绝业务请求等单元服务。

显然, 在不同的层级可以分解出不同颗粒度的单元服务。这需要视当地智慧城市发展的需要而定。

#### 3.2 城市多源信息综合互动服务

SG 的发展和运行中获得了丰富的多源海量数据<sup>[23]</sup>, 城市中其他业务部门也产生了大量数据。充分挖掘这些数据中的价值, 是 SC 发展的重要技术方向。

以城市经信委分析产业类型分布、统计行业发展情况、预测行业经济走势业务为例, 设计了如图 4 所示的城市多源信息综合互动服务业务。图中虚线代表信息流; 两条线的交叉点表示信息发到该部门, 还会继续向其他部门发; 方框中的文字代表各部门的实际操作(下同)。该业务所需要的信息, 涉及到交通、公安、环境、工商、电力等多个部门, 其中电力部门主要提供电力营销数据信息、企业或行业用电量信息、企业或行业负荷曲线信息。该业务的特点在于大大提高了自动化过程, 实现了信息价值的充分利用。

#### 3.3 城市电力需求响应服务

需求响应(DR)已成为 SG 研究和建设的重要领域<sup>[24]</sup>。在国家既定政策下推动 DR 的发展, 除了依靠电力部门的激励和价格措施, SC 发展对于 DR 的实施也有很大的支撑潜力。运用 SC 互动框架可以设计加入更多业务部门和用户, 深化互动过程。图 5 是一个自动化的城市需求响应互动业务设计例子。

在这个例子中, 需求响应不再仅仅是电力公司和用户负荷以及负荷聚合商之间的事, 整个 SC 中各个部门, 从中长期、近期、日前、日内甚至实时等不同时间尺度全面地参与到电力 DR 应用中。显然这种对 DR 的综合推动力是巨大的, 更重要的是形成了一种 SC 中各部门和用户参与 DR 应用的机制。

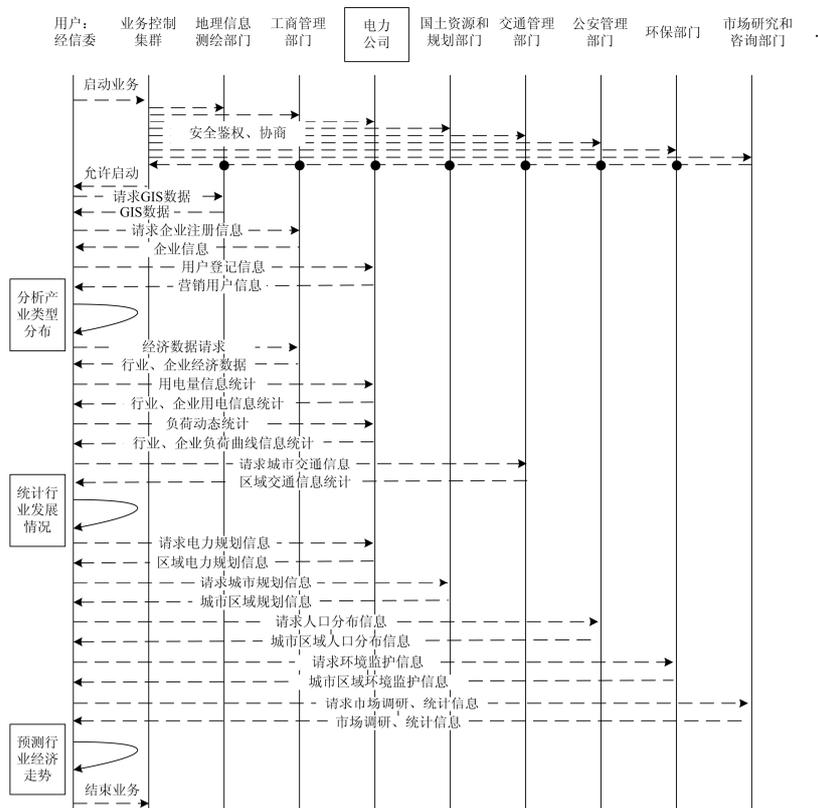


图 4 智慧城市多源信息综合应用

Fig. 4 Comprehensive application based on multi-source information of smart city

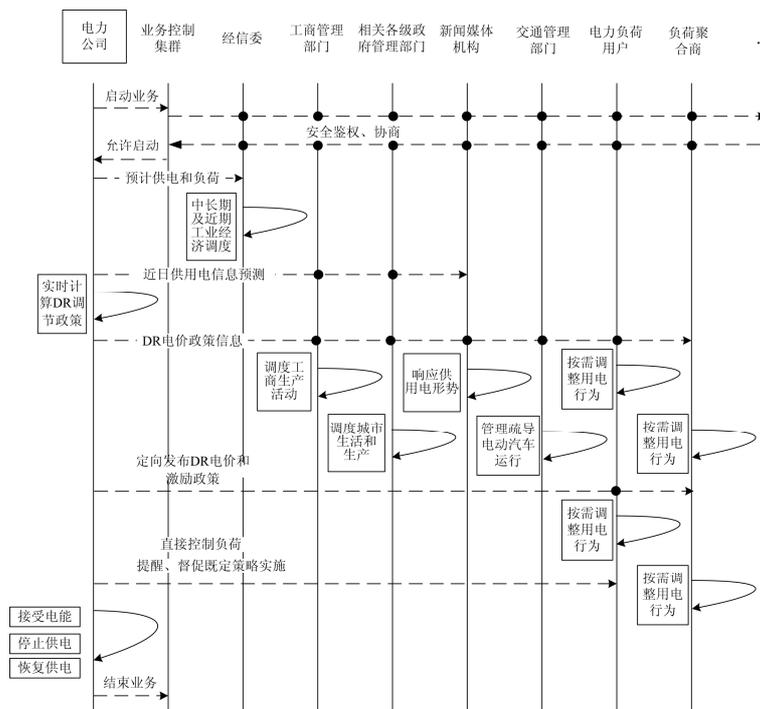


图 5 智慧城市需求响应业务

Fig. 5 Design of general interactive business for demand response of smart city

### 4 智慧城市互动服务能力仿真

基于 Matlab/Simulink 平台下的 TrueTime 网络仿真环境,对如图 6 所示的包含 12 个服务部门、10 个用户群的理想市域网络化控制系统进行了仿真。其中业务发生器负责按照参数为  $\lambda$  的泊松分布来模拟互动业务,则其产生的间隔服从独立同分布的参数也为  $\lambda$  的指数分布。对于每次互动业务需要关联的部门数,按照正态分布模拟,取  $u = 12/2, \sigma^2 = 12/3$ 。具体每次互动业务是哪几个业务部门和具体用户群参与,则完全按照部门和用户群上的均匀随机分布产生。

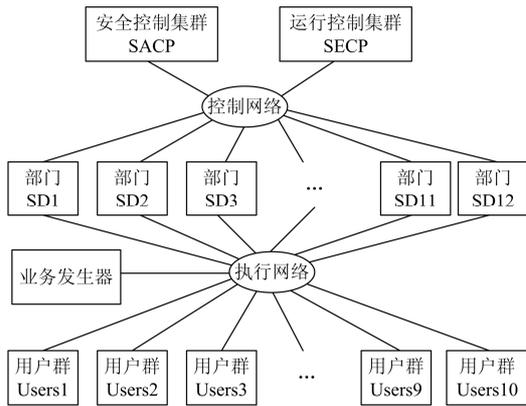


图 6 智慧城市仿真环境

Fig. 6 Simulation environment of smart city

以城市多源信息综合互动业务为例,分条块分割、互动框架、一体化平台三种情况(详见表 2),详细考察了该系统在三种方案下的架构特点和服务吞吐量对比。其中执行网络采用千兆以太网。控制网络采用千兆以太网。部分核心参数如表 3 所示。

表 2 不同方案下互动业务的实施特征

Table 2 Implementation characteristics of interactive business under different schemes services

方案名称	实施特征
条块分割	用户收到业务启动通知后,依次向本次业务相关部门发起信息请求,全部得到回应后结束。每个业务部门收到请求后,都要向业务控制集群请示,业务控制集群问询业务安全控制集群后回复允许执行,这时业务部门再回复具体用户信息。
互动框架	与条块分割方式的不同在于,用户收到启动通知后,只要就近向某一业务部门发起请求即可。由该部门在获得运行控制集群确认后,去和其他各部门交互并完成业务,然后回复用户。
一体化平台	与互动框架的不同在于控制网上的信息交换过程,由业务控制集群直接负责协同。只将结果通过某一个部门回复用户(模拟一体化平台的情况)。

表 3 部分核心参数

Table 3 Parts of the core parameters

参数名称	实施特征
$\lambda$	业务发生泊松过程的参数。
$UsersUnitTime$	用户群模块单位处理时间。取决于用户群的综合硬件配置水平。作为参照,执行仿真时固定设为 0.01。
$SDUnitTime$	部门模块单位处理时间。取决于业务部门综合硬件配置水平。
$SECPUnitTime$	安全和运行控制集群的单位处理时间。取决于有关集群和一体化平台的硬件配置水平。

根据泊松分布的规律,如果时间从  $t=0$  算起,则发生  $n$  次业务的状态概率可表示为:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (3)$$

发生业务的次数  $N(t)$  的数学期望和方差同为:

$$E(N(t)) = D(N(t)) = \lambda t \quad (4)$$

所以  $\lambda$  实际就是单位时间内的平均业务发生次数。对于某个确定的  $SDUnitTime$  和  $SECPUnitTime$  配置,最合适的  $\lambda$  设置,实际代表了该系统的吞吐量。虽然,本系统设有 10 个用户群,12 个业务部门,但 1 次业务的产生,实际涉及到 1 个用户群、若干个业务部门和运行控制集群的交互,所以简化为  $M/G/1$  型的排队模型。设每次业务的平均逗留时间为  $W_s$ ,每次业务的服务时间  $T$  的期望值为  $E(T)$ ,方差为  $D(T)$ ,有:

$$W_s = E(T) + \frac{\lambda [E^2(T) + D(T)]}{2[1 - \lambda E(T)]} \quad (5)$$

同时,还必须满足以下约束:

$$W_s \geq W^{(SACP)} \quad (6)$$

$$W_s \geq W^{(SECP)} \quad (7)$$

$$W_s \geq W_i^{(SD)}, i=1,2,\dots,12 \quad (8)$$

$$W_s \geq W_i^{(Users)}, i=1,2,\dots,10 \quad (9)$$

式中,  $W^{(SACP)}$ 、 $W^{(SECP)}$ 、 $W^{(SD)}$ 、 $W^{(Users)}$  表示 1 次业务过程在安全控制集群、运行控制集群、业务部门、用户群等处的处理时间。

系统中各节点设有一定的缓冲区,当业务量巨大时,部分业务可能被丢弃,但仿真搜寻吞吐量时要求长期稳定的业务失败率不能大于 1%。

经过仿真程序自动搜寻,结合由式(5)计算得出的  $W_s$  辅助,对三种模式各种  $SDUnitTime$  和  $SECPUnitTime$  配置下的系统吞吐量进行了仿真实证。

图 7 是条块分割模式的吞吐量变化曲面图。该

模式具有以下特点: 1) 总体吞吐量偏低, 即使  $SDUnitTime$  和  $SECPUnitTime$  提升到  $UsersUnitTime$  的 10 倍, 吞吐量也仅提升 44.7%。2)  $SECPUnitTime$  是其核心瓶颈。因为 1 次业务过程中每和一个部门交互, 都需要一次鉴权。图中为了更好地体现  $SDUnitTime$  的影响, 暂时关闭了该影响。3) 当  $SDUnitTime$  提升到  $UsersUnitTime$  的 2.5 倍以后, 对吞吐量就不再有明显影响。此时瓶颈在于用户群模块本身的处理能力。

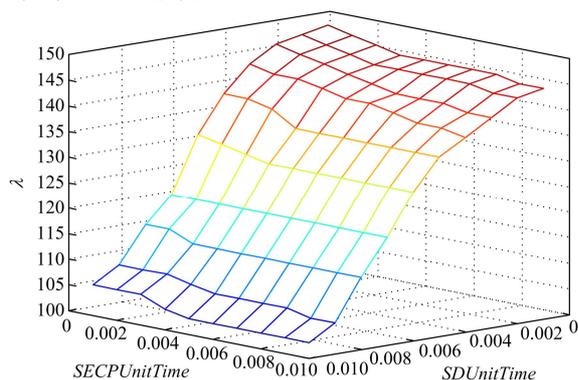


图 7 条块分割模式下的吞吐量曲面

Fig. 7 Throughput surface of independent departments pattern

图 8 是一体化平台模式的吞吐量变化曲面图。该模式具有以下特点: 1) 总体吞吐量很高。最高已经接近当前  $Users$  配置所能支撑的理论最高值(500 左右)。2) 对  $SECPUnitTime$  和  $SDUnitTime$  的要求很高。即使要充分发挥当前  $UsersUnitTime$  的硬件潜力,  $SECPUnitTime$  和  $SDUnitTime$  也非提升 10 倍以上不可。这种模式下的  $SDUnitTime$  和  $SECPUnitTime$  实际代表了一体化平台的硬件配置。

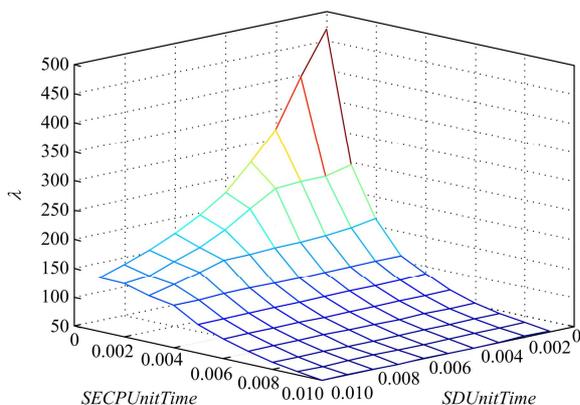


图 8 一体化平台模式下的吞吐量曲面

Fig. 8 Throughput surface of integrated platform pattern

图 9 是互动框架模式的吞吐量变化曲面图。该模式具有以下特点: 1) 总体吞吐量略低于一体化平台模式。2) 对  $SDUnitTime$  全程敏感, 只要提升它

的配置, 就可以提升总体吞吐量。这里  $SDUnitTime$  实际代表了各部门之间业务互动的处理能力。

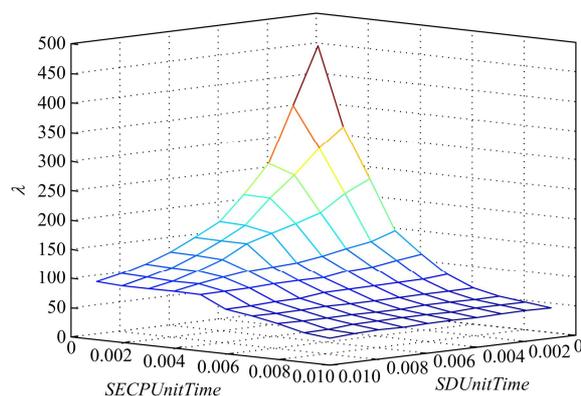


图 9 互动框架模式下的吞吐量曲面

Fig. 9 Throughput surface of interactive framework pattern

综合以上分析结果, 可见: 1) 条块分割模式下互动业务的执行是一个低效率过程。2) 一体化平台具有最高的效率, 但前提是有有一个巨大的高配置平台。3) 互动框架模式也能达到很高的效率, 前提是各部门之间实现高效的信息交互和业务互动。

## 5 结语

本文所提出的互动化业务框架, 着眼于解决智能电网和智慧城市两大体系的信息共享和应用协同问题。显然, 这一框架其实经过扩充, 完全可以支持更广泛的系统间信息共享和应用协同问题。更重要的是设计了一种机制, 为更多复杂和深入的互动业务提供支撑。

在智能电网支撑智慧城市建设的 application 实践中, 面对已经形成的众多系统内的纵向垂直管理和条块分割的现状, 许多问题不仅仅是技术问题, 更是体制和管理问题。技术通道上打通了, 在实际应用中还会有各种执行的问题。需要在架构设计中进一步考虑。

## 参考文献

- [1] 王益民. 坚强智能电网技术标准体系研究框架[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 1-6.  
WANG Yimin. Research framework of technical standard system of strong & smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 1-6.
- [2] 高志远, 姚建国, 曹阳, 等. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.  
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5):

- 116-121.
- [3] 郭昊坤, 吴军基. Agent 技术在中国智能电网建设中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 12-16.  
GUO Haokun, WU Junji. Application of Agent technology in China's smart grid construction[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 12-16.
- [4] 高志远, 曹阳, 朱力鹏. 智能变电站未来发展的分析方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 11-18.  
GAO Zhiyuan, CAO Yang, ZHU Lipeng. Research on the analysis method of the future development of smart substation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 11-18.
- [5] 丁吉林, 武琪. 中国智慧城市发展之路任重道远——访国家信息中心信息化研究部副主任、中国智慧城市发展研究中心秘书长单志广[J]. 财经界, 2013(7): 12-15.
- [6] 李德仁, 邵振峰, 杨小敏. 从数字城市到智慧城市的理论与实践[J]. 地理空间信息, 2011, 9(6): 1-5.  
LI Deren, SHAO Zhenfeng, YANG Xiaomin. Theory and practice from digital city to smart city[J]. Geospatial Information, 2011, 9(6): 1-5.
- [7] IBM. 《智慧的城市在中国-IBM-白皮书》[R/OL]. [2010-12-11]. [http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/cn\\_zh\\_cn\\_cities\\_white\\_paper\\_0924\\_4918kb.pdf](http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/cn_zh_cn_cities_white_paper_0924_4918kb.pdf).
- [8] 许庆瑞, 吴志岩, 陈力田. 智慧城市的愿景与架构[J]. 管理工程学报, 2012, 26(4): 1-7.  
XU Qingrui, WU Zhiyan, CHEN Litian. The vision architecture and research models of smart city[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2012, 26(4): 1-7.
- [9] 高志远, 姚建国, 郭昆亚, 等. 智能电网对智慧城市的支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 148-153.  
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, GUO Kunya, et al. Study on the supporting role of smart grid to the construction of smart city[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 148-153.
- [10] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源\_网\_荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid "source-grid-load" interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [11] 林弘宇, 张晶, 徐鲲鹏, 等. 智能用电互动服务平台的设计[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 255-259.  
LIN Hongyu, ZHANG Jing, XU Kunpeng, et al. Design of interactive service platform for smart power consumption[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 255-259.
- [12] 张新昌, 周逢权. 智能电网引领智能家居及能源消费革新[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 59-67.  
ZHANG Xinchang, ZHOU Fengquan. Smart grid leads the journey to innovative smart home and energy consumption patterns[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 59-67.
- [13] 谈丽娟, 赵彩虹, 陈子奇, 等. 电动汽车与分布式电源的微网经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 100-105.  
TAN Lijuan, ZHAO Caihong, CHEN Ziqi, et al. Economical dispatch for microgrids of electric vehicles and distributed power[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 100-105.
- [14] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 1-5.  
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5.
- [15] 国家电力监管委员会. 电力二次系统安全防护规定 (电监会 5 号令)[S]. 2004.
- [16] 王兆进. 一体化平台构筑智慧城市[J]. 上海信息化, 2012(7): 81-83.  
WANG Zhaojin. Smart city based on integration platform[J]. Shanghai Informatization, 2012(7): 81-83.
- [17] 陈真勇, 徐州川, 李清广, 等. 一种新的智慧城市数据共享和融合框架——SCLDF[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 290-301.  
CHEN Zhenyong, XU Zhouchuan, LI Qingguang, et al. A novel framework of data sharing and fusion in smart city——SCLDF[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(2): 290-301.
- [18] 薛蕾, 蒋朝惠. 基于 ESB 的智慧城市共享平台设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(3): 218-222.  
XUE Lei, JIANG Chaohui. Design and realization of sharing platform of intelligence city based on ESB[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(3): 218-222.

- [19] 孙丕石, 曹占峰, 王亚玲, 等. 国家电网公司数据交换平台研发与应用[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 62-67.  
SUN Pishi, CAO Zhanfeng, WANG Yaling, et al. Design and application of data exchange platform for SGCC[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 62-67.
- [20] 刘巍, 黄翌, 李鹏, 等. 面向智能配电网的大数据统一支撑平台体系与构架[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊1): 486-491.  
LIU Wei, HUANG Zhao, LI Peng, et al. Summary about System and Framework of unified supporting platform of big data for smart distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 486-491.
- [21] 高志远, 徐美强. 电力厂站自动化系统安全探讨[J]. 电气应用, 2010, 29(13): 54-58.  
GAO Zhiyuan, XU Meiqiang. Discussion on the security of power plant and substation automation systems[J]. Electrotechnical Application, 2010, 29(13): 54-58.
- [22] 黄益民, 平玲娣, 潘雪增. 信息安全模型的研究及安全系统方案设计[J]. 浙江大学学报, 2001, 35(6): 603-607.  
HUANG Yimin, PING Lingdi, PAN Xuezheng. Research on information security model and security system design[J]. Journal of Zhejiang University, 2001, 35(6): 603-607.
- [23] 中国电机工程学会信息化专委会. 中国电力大数据发展白皮书[S]. 2013.
- [24] 高赐威, 梁甜甜, 李惠星, 等. 开放式自动需求响应通信规范的发展与应用综述[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 692-698.  
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Huixing, et al. Development and application of open automated demand response[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 692-698.
- 
- 收稿日期: 2015-04-09
- 作者简介:
- 高志远(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能电网、厂站自动化系统的应用研究; E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn
- 严春华(1983-), 女, 工程师, 从事智能电网、需求响应等方面的研究工作;
- 郭昆亚(1967-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。
- (编辑 周金梅)